

DÉCIMA EDICIÓN

# DISEÑO DE CONCRETO REFORZADO



JACK C. McCORMAC • RUSSELL H. BROWN



# **Diseño de Concreto reforzado**

# Diseño de Concreto reforzado

Décima edición

Edición 318-14 del Código ACI

**Jack C. McCormac**

*Clemson University*

**Russell H. Brown**

*Clemson University*



**Traducción:**  
Dr. Raúl Arrijo Juárez, UNAM  
**Gerente editorial:**  
Marcelo Grillo Giannetto  
mgrillo@alfaomega.com.mx

Datos catalográficos

Mc Cormac, Jack; Brown, Russell  
Diseño de Concreto Reforzado  
Décima Edición con el Código ACI 318-14  
Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V., México

ISBN: 978-607-622-970-5

Formato: 20 x 25.5 cm

Páginas: 672

**Diseño de Concreto Reforzado**

Jack C. Mc Cormac y Russell H. Brown

ISBN: 978-1-118-87-910-8 edición original en inglés "Design of Reinforced Concrete", 10th Edition, ACI-318-14 Code edition, publicada por John Wiley & Sons, Inc. New Jersey, USA.

Derechos reservados © John Wiley & Sons, Inc.

Décima edición con el Código ACI 318-14, Alfaomega Grupo Editor, México, noviembre 2017

**© 2018 Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V.**

Dr. Isidoro Olvera (Eje 2 sur) No. 74, Col. Doctores, C.P. 06720, Cuauhtémoc, Ciudad de México.

Miembro de la Cámara Nacional de la Industria Editorial Mexicana

Registro No. 2317

Pág. Web: <http://www.alfaomega.com.co>

E-mail: [cliente@alfaomegacolombiana.com](mailto:cliente@alfaomegacolombiana.com)

**ISBN: 978-958-778-413-8**

**Derechos reservados:**

Esta obra es propiedad intelectual de su autor y los derechos de publicación en lengua española han sido legalmente transferidos al editor. Prohibida su reproducción parcial o total por cualquier medio sin permiso por escrito del propietario de los derechos del copyright.

**Nota importante:**

La información contenida en esta obra tiene un fin exclusivamente didáctico y, por lo tanto, no está previsto su aprovechamiento a nivel profesional o industrial. Las indicaciones técnicas y programas incluidos, han sido elaborados con gran cuidado por el autor y reproducidos bajo estrictas normas de control. ALFAOMEGA GRUPO EDITOR, S.A. de C.V. no será jurídicamente responsable por: errores u omisiones; daños y perjuicios que se pudieran atribuir al uso de la información comprendida en este libro, ni por la utilización indebida que pudiera dársele.

Edición autorizada para venta en todo el mundo.

**Impreso en Colombia. Printed in Colombia.**

**Empresas del grupo:**

**México:** Alfaomega Grupo Editor, S.A. de C.V. - Dr. Isidoro Olvera No. 74, Col. Doctores, C.P. 06720, Cuauhtémoc, Cd. de Méx.

Tel.: (52-55) 5575-5022 - Fax: (52-55) 5575-2420 / 2490. Sin costo: 01-800-020-4396

E-mail: [atencionalcliente@alfaomega.com.mx](mailto:atencionalcliente@alfaomega.com.mx)

**Colombia:** Alfaomega Colombiana S.A. - Calle 62 No. 20-46, Barrio San Luis, Bogotá, Colombia

Tels.: (57-1) 746 0102 / 210 0122 - E-mail: [cliente@alfaomegacolombiana.com](mailto:cliente@alfaomegacolombiana.com)

**Chile:** Alfaomega Grupo Editor, S.A. - Av. Providencia 1443. Oficina 24, Santiago, Chile

Tel.: (56-2) 2235-4248 - Fax: (56-2) 2235-5786 - E-mail: [agechile@alfaomega.cl](mailto:agechile@alfaomega.cl)

**Argentina:** Alfaomega Grupo Editor Argentino S.A. - Av. Córdoba 1215 Piso 10 - C.P. 1055

Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina

Tel/Fax: (54-11) 4811-0887 - E-mail: [ventas@alfaomegaeditor.com.ar](mailto:ventas@alfaomegaeditor.com.ar)

[www.alfaomegaeditor.com.ar](http://www.alfaomegaeditor.com.ar)

# Prefacio

---

## AUDIENCIA

Este libro de texto presenta una introducción al diseño de concreto reforzado. Nosotros los autores esperamos que el material esté escrito de tal modo que interese a los estudiantes en el tema y los aliente a continuar su estudio en los años venideros. El texto se preparó con un curso introductorio de tres créditos, pero se incluye suficiente material para un curso adicional de tres créditos.

## NUEVO EN ESTA EDICIÓN

### **Reglamento Actualizado**

Con la décima edición de este texto el contenido se ha actualizado conforme al *Reglamento de Construcciones 2014 del American Concrete Institute (ACI 318-14)*. Los cambios de esta edición del Reglamento se estudian en la sección 1.7 del libro bajo el encabezado **Resumen de cambios del reglamento del ACI del 2016**.

### **Capítulo sobre mampostería de concreto actualizado con el Reglamento ACI 530-13**

El nuevo capítulo sobre el diseño por resistencia de la mampostería de concreto reforzado que se añadió a la novena edición del libro ha sido actualizado de conformidad con la edición 2013 del ACI 530. Como en esta revisión del reglamento hubo mucha reorganización, la mayoría de las referencias son diferentes. Este capítulo está disponible en la página de la editorial Alfaomega ([www.alfaomega.com.mx](http://www.alfaomega.com.mx)). Como el diseño por resistencia de la mampostería de concreto reforzado es muy similar al del concreto reforzado, los autores consideraron que esto sería una extensión lógica de la aplicación de las teorías desarrolladas anteriormente en el libro. Se incluyen el diseño de los dinteles de mampostería, los muros con carga no coplanar, y los muros de cortante. También se incluye un ejemplo de diseño de cada tipo de elemento de mampostería para mostrar al estudiante algunas aplicaciones típicas. En el sitio de la red de Alfaomega también se incluyen hojas de cálculo para ayudar en el diseño de estos elementos.

### **Organización**

El libro está escrito en el orden que los autores piensan que se seguiría en la secuencia normal de presentación de un curso introductorio de diseño de concreto reforzado. De esta manera, se espera que se minimice el salto de capítulo en capítulo. El material sobre columnas se incluye en tres capítulos (9, 10 y 11). Algunos profesores no tienen tiempo de cubrir el material sobre columnas esbeltas, de modo que éste se colocó en un capítulo aparte (11). El material restante sobre columnas se dividió en dos capítulos con objeto de enfatizar la diferencia entre las columnas que tienen carga axial principalmente (9) y aquéllas con momento flexionante importante combinado con la carga axial (10).

## RECURSOS DEL PROFESOR Y DEL ESTUDIANTE

El sitio web para el libro está localizado en [www.alfaomega.com.mx](http://www.alfaomega.com.mx) y contiene los siguientes recursos.

### Para estudiantes y profesores

**Hojas de cálculo de Excel.** Se crearon hojas de cálculo de Excel para suministrar al estudiante y al profesor con herramientas para analizar y diseñar elementos de concreto reforzado con rapidez para comparar soluciones alternativas. Se proveen hojas de cálculo de Excel para la mayoría de capítulos del texto y su uso es autoexplicativo.

Muchas de las celdas contienen comentarios para ayudar al usuario nuevo. El estudiante o el profesor pueden modificar las hojas de cálculo para satisfacer sus necesidades más específicas. En la mayoría de los casos, los cálculos contenidos dentro de las hojas son un reflejo de aquellos mostrados en los problemas de ejemplo en el texto. Los diversos usos de estas hojas se ilustran a lo largo del texto. Al final de la mayoría de los capítulos, hay problemas de ejemplo que muestran el uso de la hoja de cálculo para ese capítulo específico. El espacio no permite ejemplos para todas las capacidades de la hoja. Los autores consideraron a los ejemplos escogidos como los más pertinentes.

### Capítulo 20

### Apéndices C y D

#### Plataforma de contenidos interactivos

---

Para consultar el material de la plataforma de contenidos interactivos de este libro, siga los siguientes pasos:

1. Ir a la página: <http://libroweb.alfaomega.com.mx>
2. Ir a la sección Catálogo y seleccionar la imagen de la portada del libro, al dar doble clic sobre ella, podrá consultar *on line* el material complementario.

## RECONOCIMIENTOS

Deseamos agradecer a las siguientes personas que revisaron esta edición:

Marion R. Hansen  
South Dakota School of Mines and Technology  
Steven E. O'Hara,  
Oklahoma State University  
Tongyan Pan,  
Illinois State University  
Andrew T. Rose,  
University of Pittsburgh at Johnstown  
Felix Udoeyo,  
Temple University

Finalmente, estamos también agradecidos a los revisores y los usuarios de las ediciones previas de este libro por sus sugerencias, correcciones y críticas. Siempre estaremos agradecidos con cualquier persona que se tome el tiempo de contactarnos respecto de cualquier parte del libro.

*Jack C. McCormac*  
*Russell H. Brown*

# Contenido

---

Prefacio	v	<b>3. Análisis por resistencia de vigas de acuerdo con el Código ACI</b>	<b>67</b>
<b>1. Introducción</b>	<b>1</b>		
1.1 Concreto y concreto reforzado, 1		3.1 Métodos de diseño, 67	
1.2 Ventajas del concreto reforzado como material estructural, 1		3.2 Ventajas del diseño por resistencia, 68	
1.3 Desventajas del concreto reforzado como material estructural, 2		3.3 Seguridad estructural, 68	
1.4 Antecedentes históricos, 3		3.4 Obtención de expresiones para vigas, 69	
1.5 Comparación del concreto reforzado con el acero estructural para edificios y puentes, 5		3.5 Deformaciones unitarias en miembros sujetos a flexión, 72	
1.6 Compatibilidad del concreto y el acero, 6		3.6 Secciones balanceadas, secciones controladas por tensión, y secciones controladas por compresión o secciones frágiles, 73	
1.7 Códigos de diseño, 7		3.7 Reducción de resistencia o factores $\phi$ , 73	
1.8 Resumen de cambios del código ACI 2014, 7		3.8 Porcentaje mínimo de acero, 75	
1.9 Unidades SI y recuadros sombreados, 8		3.9 Porcentaje de acero de equilibrio, 77	
1.10 Tipos de Cemento Portland, 9		3.10 Problemas de ejemplo, 78	
1.11 Aditivos, 10		3.11 Ejemplos con computadora, 82	
1.12 Propiedades del concreto reforzado, 11			
1.13 Agregados, 18		<b>4. Diseño de vigas rectangulares y losas en una dirección</b>	<b>85</b>
1.14 Concretos de alta resistencia, 19		4.1 Factores de carga, 85	
1.15 Concretos reforzados con fibras, 21		4.2 Diseño de vigas rectangulares, 87	
1.16 Durabilidad del concreto, 22		4.3 Ejemplos de diseño de vigas, 92	
1.17 Acero de refuerzo, 22		4.4 Consideraciones diversas en el diseño de vigas, 98	
1.18 Grados del acero de refuerzo, 24		4.5 Determinación del área de acero cuando las dimensiones de la viga son predeterminadas, 99	
1.19 Tamaños de varillas y resistencias de materiales en unidades SI, 26		4.6 Varillas en racimo, 101	
1.20 Ambientes corrosivos 27		4.7 Losas en una dirección, 102	
1.21 Identificación de las marcas en las varillas de refuerzo, 27		4.8 Vigas en voladizo y vigas continuas, 105	
1.22 Introducción a las cargas, 29		4.9 Ejemplo con unidades SI, 106	
1.23 Cargas muertas, 29		4.10 Ejemplo con computadora, 108	
1.24 Cargas vivas, 29		Problemas, 109	
1.25 Cargas ambientales, 31			
1.26 Selección de las cargas de diseño, 33		<b>5. Análisis y diseño de vigas T y vigas doblemente reforzadas</b>	<b>115</b>
1.27 Exactitud de los cálculos, 34		5.1 Vigas T, 115	
1.28 Impacto de las computadoras en el diseño de concreto reforzado, 35		5.2 Análisis de vigas T, 117	
Problemas 36		5.3 Otros métodos para analizar vigas T, 121	
<b>2. Análisis de vigas sometidas a flexión, 37</b>		5.4 Diseño de vigas T, 122	
2.1 Introducción, 37		5.5 Diseño de vigas T para momentos negativos, 128	
2.2 Momento de agrietamiento, 40		5.6 Vigas L, 130	
2.3 Esfuerzos elásticos: concreto agrietado 43		5.7 Acero de compresión, 130	
2.4 Momentos últimos o nominales de flexión, 50		5.8 Diseño de vigas doblemente reforzadas, 135	
2.5 Ejemplo de problema usando unidades SI, 53		5.9 Ejemplos con unidades SI, 139	
2.6 Hojas de cálculo de la computadora, 54		5.10 Ejemplos con computadora, 141	
Problemas, 56		Problemas, 146	

**6. Estado límite de servicio 157**

- 6.1 Introducción, 157
- 6.2 Importancia de las deflexiones, 157
- 6.3 Control de las deflexiones, 158
- 6.4 Cálculo de deflexiones, 159
- 6.5 Momentos de inercia efectivos, 159
- 6.6 Deflexiones a largo plazo, 162
- 6.7 Deflexiones en vigas simples, 164
- 6.8 Deflexiones en vigas continuas, 166
- 6.9 Tipos de grietas, 172
- 6.10 Control de las grietas por flexión, 173
- 6.11 Normas del Código ACI relativas a grietas 176
- 6.12 Ejemplo con unidades SI, 177
- 6.13 Grietas diversas, 178
- 6.14 Ejemplos con computadora, 178  
Problemas, 180

**7. Adherencia, longitudes de desarrollo y empalmes 185**

- 7.1 Corte y doblado de las varillas (barras) de refuerzo, 185
- 7.2 Esfuerzos de adherencia, 188
- 7.3 Longitudes de anclaje para el refuerzo de tensión, 190
- 7.4 Longitudes de anclaje para varillas en racimo, 198
- 7.5 Ganchos, 199
- 7.6 Longitudes de anclaje para malla de alambre soldada en tensión, 205
- 7.7 Longitudes de anclaje para varillas a compresión, 206
- 7.8 Secciones críticas para la longitud de anclaje, 208
- 7.9 Efecto del momento y el cortante combinados en las longitudes de anclaje, 208
- 7.10 Efecto de la forma del diagrama de momento en las longitudes de anclaje, 209
- 7.11 Corte o doblado de las varillas de refuerzo (continuación), 210
- 7.12 Empalmes de varillas en miembros a flexión, 213
- 7.13 Empalmes a tensión, 214
- 7.14 Empalmes a compresión, 215
- 7.15 Varillas ancladas mecánicamente y con anclaje interno, 216
- 7.16 Ejemplo con unidades SI, 217
- 7.17 Ejemplo con computadora, 218  
Problemas, 219

**8. Cortante y tensión diagonal 225**

- 8.1 Introducción, 225
- 8.2 Esfuerzos cortantes en vigas de concreto, 225
- 8.3 Concreto de peso ligero, 226
- 8.4 Resistencia del concreto al cortante, 226
- 8.5 Agrietamiento por cortante en vigas de concreto reforzado, 228
- 8.6 Refuerzo del alma, 229
- 8.7 Comportamiento de las vigas con refuerzo del alma, 230
- 8.8 Diseño por cortante, 232

- 8.9 Requisitos del código ACI, 234
- 8.10 Ejemplos de problemas de diseño por cortante, 238
- 8.11 Separación económica de los estribos, 248
- 8.12 Fricción al cortante y ménsulas, 250
- 8.13 Resistencia al cortante de miembros sometidos a fuerzas axiales, 252
- 8.14 Requisitos para el diseño por cortante en vigas de gran peralte 254
- 8.15 Comentarios introductorios sobre torsión, 255
- 8.16 Ejemplo en unidades SI, 257
- 8.17 Ejemplo con computadora, 258  
Problemas, 259

**9. Introducción al estudio de columnas 265**

- 9.1 Generalidades, 265
- 9.2 Tipos de columnas, 266
- 9.3 Capacidad por carga axial de las columnas, 268
- 9.4 Fallas de columnas con estribos y espirales, 268
- 9.5 Requisitos del código para columnas coladas en obra, 271
- 9.6 Precauciones de seguridad para columnas, 273
- 9.7 Fórmulas de diseño, 274
- 9.8 Comentarios sobre diseño económico de columnas, 275
- 9.9 Diseño de columnas cargadas axialmente, 276
- 9.10 Ejemplo con unidades SI, 279
- 9.11 Ejemplo con computadora, 280  
Problemas, 281

**10. Diseño de columnas cortas sometidas a carga axial y flexión 283**

- 10.1 Carga axial y flexión, 283
- 10.2 El centroide plástico, 284
- 10.3 Desarrollo de los diagramas de interacción, 286
- 10.4 Uso de los diagramas de interacción, 292
- 10.5 Modificaciones de código a los diagramas de interacción de columna, 294
- 10.6 Diseño y análisis de columnas cargadas excéntricamente usando los diagramas de interacción, 295
- 10.7 Fuerza cortante en columnas, 303
- 10.8 Flexión biaxial, 304
- 10.9 Diseño de columnas con carga biaxial, 308
- 10.10 Continuación del estudio del factor de reducción de capacidad,  $\phi$ , 311
- 10.11 Ejemplo con computadora, 312  
Problemas, 314

**11. Columnas esbeltas 319**

- 11.1 Introducción, 319
- 11.2 Marcos con y sin desplazamiento lateral, 319
- 11.3 Efectos de esbeltez, 320
- 11.4 Determinación de los factores k con nomogramas, 322
- 11.5 Determinación de factores k mediante ecuaciones, 324
- 11.6 Análisis de primer orden usando propiedades especiales de los miembros, 325

11.7	Columnas esbeltas en marcos con y sin desplazamiento lateral, 326		
11.8	Tratamiento del Código ACI de los efectos de esbeltez, 329		
11.9	Amplificación de momentos de columnas en marcos sin desplazamiento lateral, 329		
11.10	Amplificación de los momentos en las columnas de marcos con desplazamiento lateral, 334		
11.11	Análisis de marcos con desplazamiento lateral, 337		
11.12	Ejemplos con computadora, 343 Problemas, 346		
<b>12.</b>	<b>Zapatas</b>	<b>349</b>	
12.1	Introducción, 349		
12.2	Tipos de zapatas, 349		
12.3	Presiones reales del suelo, 351		
12.4	Presiones permisibles del suelo, 352		
12.5	Diseño de zapatas para muros, 354		
12.6	Diseño de zapatas cuadradas aisladas, 359		
12.7	Zapatas que soportan columnas circulares o con sección en forma de polígono regular, 365		
12.8	Transmisión de la carga de las columnas a las zapatas, 365		
12.9	Zapatas rectangulares aisladas, 370		
12.10	Zapatas combinadas, 373		
12.11	Diseño de zapatas con asentamientos iguales, 379		
12.12	Zapatas sometidas a cargas axiales y momentos, 381		
12.13	Transmisión de fuerzas horizontales, 383		
12.14	Zapatas de concreto simple, 384		
12.15	Ejemplo con unidades SI, 387		
12.16	Ejemplos con computadora, 389 Problemas, 392		
<b>13.</b>	<b>Muros de retención</b>	<b>395</b>	
13.1	Introducción, 395		
13.2	Tipos de muros de retención, 395		
13.3	Drenaje, 398		
13.4	Fallas de muros de retención, 399		
13.5	Presiones laterales sobre muros de retención, 399		
13.6	Presiones del suelo sobre zapatas, 404		
13.7	Diseño de muros de retención de semigravedad, 405		
13.8	Efectos de sobrecarga, 408		
13.9	Estimación del tamaño de muros de retención en voladizo, 409		
13.10	Procedimientos de diseño para muros de retención en voladizo, 413		
13.11	Grietas y juntas en los muros, 424 Problemas 426		
<b>14.</b>	<b>Estructuras continuas de concreto reforzado</b>	<b>431</b>	
14.1	Introducción, 431		
14.2	Consideraciones generales sobre los métodos de análisis, 431		
14.3	Líneas de influencia cualitativas, 431		
14.4	Diseño al límite, 434		
14.5	Diseño al límite según el código ACI, 441		
14.6	Diseño preliminar de miembros, 444		
14.7	Análisis aproximado de marcos continuos por cargas verticales, 444		
14.8	Análisis aproximado de marcos continuos por cargas laterales, 454		
14.9	Análisis por computadora de marcos de edificios, 457		
14.10	Arriostamiento lateral en edificios, 458		
14.11	Requisitos de la longitud de desarrollo en miembros continuos, 458 Problemas, 464		
<b>15.</b>	<b>Torsión</b>	<b>469</b>	
15.1	Introducción, 469		
15.2	Refuerzo por torsión, 470		
15.3	Momentos torsionales que se han de considerar en el diseño, 473		
15.4	Esfuerzos de torsión, 474		
15.5	Cuándo se requiere refuerzo de torsión según el ACI, 475		
15.6	Resistencia al momento por torsión, 476		
15.7	Diseño del refuerzo por torsión, 477		
15.8	Requisitos adicionales del ACI, 478		
15.9	Problemas ejemplo usando unidades comunes en Estados Unidos, 479		
15.10	Ecuaciones para SI y ejemplo de problema, 482		
15.11	Ejemplo con computadora, 486 Problemas, 487		
<b>16.</b>	<b>Losas en dos direcciones, método directo de diseño</b>	<b>491</b>	
16.1	Introducción, 491		
16.2	Análisis de losas en dos direcciones, 494		
16.3	Diseño de losas en dos direcciones según el código ACI, 494		
16.4	Franjas de columna y franja central, 495		
16.5	Resistencia al cortante de losas, 496		
16.6	Limitaciones al espesor y requisitos de rigidez, 498		
16.7	Limitaciones del método directo de diseño, 504		
16.8	Distribución de momentos en losas, 504		
16.9	Diseño de una placa interior plana, 510		
16.10	Colocación de las cargas vivas, 514		
16.11	Análisis de losas en dos direcciones con vigas, 515		
16.12	Transmisión de momentos y cortantes entre losas y columnas, 521		
16.13	Aberturas en los sistemas de losas, 526		
16.14	Ejemplos con computadora, 527 Problemas, 529		
<b>17.</b>	<b>Losas en dos direcciones, método del marco equivalente</b>	<b>531</b>	
17.1	Distribución de momentos para miembros no prismáticos, 531		

- 17.2 Introducción al método del marco equivalente, 532
- 17.3 Propiedades de las vigas losas, 534
- 17.4 Propiedades de columnas, 537
- 17.5 Ejemplo de problema, 538
- 17.6 Análisis con computadora, 542
- 17.7 Ejemplos con computadora, 543
- Problemas, 544

---

**18. Muros** **545**


---

- 18.1 Introducción, 545
- 18.2 Muros no portantes, 545
- 18.3 Muros de concreto de carga. Método empírico de diseño, 547
- 18.4 Muros de concreto soportantes de carga. Diseño racional, 550
- 18.5 Muros de cortante, 552
- 18.6 Requisitos del ACI para muros de cortante, 556
- 18.7 Aspectos económicos de la construcción de muros, 561
- 18.8 Ejemplo con computadora, 562
- Problemas, 563

---

**19. Concreto presforzado** **565**


---

- 19.1 Introducción, 565
- 19.2 Ventajas y desventajas del concreto presforzado, 567
- 19.3 Pretensado y postensado, 567
- 19.4 Materiales usados para el concreto presforzado, 568
- 19.5 Cálculo de esfuerzos, 570
- 19.6 Formas de las secciones presforzadas, 574
- 19.7 Pérdidas de presfuerzo, 577
- 19.8 Resistencia última de secciones presforzadas, 580
- 19.9 Deflexiones, 584
- 19.10 Fuerza cortante en secciones presforzadas, 588
- 19.11 Diseño del refuerzo por cortante, 589
- 19.12 Temas adicionales, 593
- 19.13 Ejemplos con computadora, 595
- Problemas, 596

---

**20. Mampostería de concreto reforzado (en línea en [www.alfaomega.com.mx](http://www.alfaomega.com.mx))**


---

- 20.1 Introducción
- 20.2 Materiales de mampostería
- 20.3 Resistencia a la compresión especificada de la mampostería
- 20.4 Refuerzo máximo de tensión por flexión
- 20.5 Muros con cargas fuera del plano-muros que no son de carga
- 20.6 Dinteles de mampostería
- 20.7 Muros con cargas fuera del plano-muros de carga
- 20.8 Muros con carga coplanar-muros de cortante
- 20.9 Ejemplo con computadora
- Problemas

---

**A. Tablas y gráficas: unidades usuales en EUA** **599**


---



---

**B. Tablas en unidades del SI** **637**


---



---

**C. El método de diseño del puntal y el tirante (en línea en [www.alfaomega.com.mx](http://www.alfaomega.com.mx))**


---

- C.1 Introducción
- C.2 Vigas de gran peralte
- C.3 Claro de cortante y regiones de comportamiento
- C.4 La analogía de la armadura
- C.5 Definiciones
- C.6 Requisitos del código ACI para el diseño de puntal y tirante
- C.7 Selección de un modelo de armadura
- C.8 Ángulos de los puntales en los modelos de armaduras
- C.9 Procedimiento de diseño

---

**D. Diseño sísmico de las estructuras de concreto reforzado (en línea solamente en [www.alfaomega.com.mx](http://www.alfaomega.com.mx))**


---

- D.1 Introducción
- D.2 Terremoto máximo considerado
- D.3 Clasificación de suelo en el sitio
- D.4 Factores de riesgo y de importancia
- D.5 Categorías de diseño sísmico
- D.6 Cargas de diseño sísmico
- D.7 Requisitos de detallado para las diferentes clases de marcos de concreto reforzado para momentos
- Problemas

---

**Glosario** **645**


---

**Índice** **649**

# Capítulo 1

---

## Introducción

### 1.1 CONCRETO Y CONCRETO REFORZADO

El *concreto* es una mezcla de arena, grava, roca triturada u otros agregados unidos en una masa rocosa por medio de una pasta de cemento y agua. En ocasiones, uno o más aditivos se agregan para cambiar ciertas características del concreto, tales como la ductilidad, durabilidad y tiempo de fraguado.

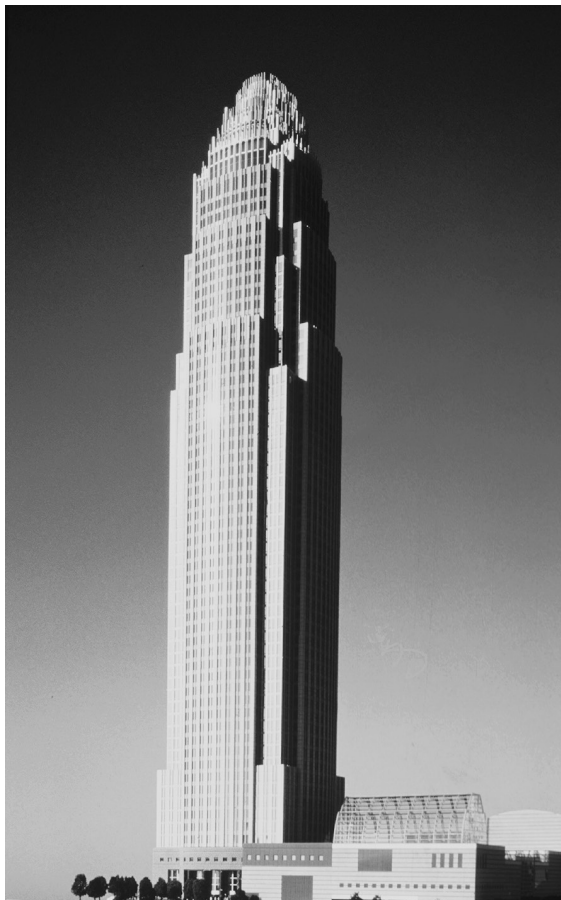
Al igual que la mayoría de los materiales pétreos, el concreto tiene una alta resistencia a la compresión y una muy baja resistencia a la tensión. El *concreto reforzado* es una combinación de concreto y acero en la que el refuerzo de acero proporciona la resistencia a la tensión de la que carece el concreto. El acero de refuerzo es también capaz de resistir fuerzas de compresión y se usa en columnas, así como en otros miembros estructurales y en situaciones que se describirán más adelante.

### 1.2 VENTAJAS DEL CONCRETO REFORZADO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

El concreto reforzado es probablemente el material disponible más importante para la construcción. Puede usarse en una u otra forma para casi todas las estructuras, grandes o pequeñas —en edificios, puentes, pavimentos, presas, muros de retención, túneles, instalaciones de drenaje e irrigación, tanques, etcétera.

El gran éxito de este material universal en la construcción puede entenderse fácilmente si se consideran sus numerosas ventajas. Algunas de éstas son las siguientes:

1. Tiene una resistencia considerable a la compresión por unidad de costo en comparación con muchos otros materiales.
2. El concreto reforzado tiene gran resistencia a las acciones del fuego y el agua y, de hecho, es el mejor material estructural que existe para los casos en que el agua esté presente. Durante incendios de intensidad media, los miembros con un recubrimiento adecuado de concreto sobre las varillas de refuerzo sufren sólo daño superficial sin fallar.
3. Las estructuras de concreto reforzado son muy rígidas.
4. Requiere de poco mantenimiento.
5. Comparado con otros materiales, tiene una larga vida de servicio. Bajo condiciones apropiadas, las estructuras de concreto reforzado pueden usarse indefinidamente sin reducción en sus capacidades de carga. Esto puede explicarse por el hecho de que la resistencia del concreto no disminuye con el tiempo, sino que en realidad aumenta con los años, debido al largo proceso de solidificación de la pasta de cemento.
6. Es prácticamente el único material económico disponible para zapatas, losas de piso, muros de sótano, pilares y construcciones similares.



Torre NCNB en Charlotte, Carolina del Norte, terminada en 1991. (Cortesía de Portland Cement Association.)

7. Una característica especial del concreto es la posibilidad de colarlo en una variedad extraordinaria de formas que van desde simples losas, vigas y columnas, hasta grandes arcos y cascarones.
8. En muchas regiones, el concreto aprovecha para su elaboración la existencia de materiales locales baratos (arena, grava y agua) y requiere cantidades relativamente pequeñas de cemento y acero de refuerzo, las cuales quizás sea necesario conseguir en otras regiones del país.
9. Se requiere mano de obra de baja calificación para su montaje, en comparación con otros materiales, como el acero estructural.

### 1.3 DESVENTAJAS DEL CONCRETO REFORZADO COMO MATERIAL ESTRUCTURAL

Para usar con éxito el concreto, el proyectista debe estar completamente familiarizado con sus puntos débiles, así como con sus puntos fuertes. Algunas de sus desventajas son las siguientes:

1. El concreto tiene una resistencia muy baja a la tensión, por lo que requiere el uso de un refuerzo de tensión.
2. Se requieren cimbras para mantener el concreto en posición hasta que se endurezca lo suficiente. Además, pueden requerirse obras falsas o apuntalamiento para apoyar la cimbra de techos,



Segmentos precolados para el puente I-35 W en St Anthony Falls, Minneapolis, Minnesota. (Cortesía de EFCO Corporation.)

muros, pisos y estructuras similares hasta que los miembros de concreto adquieren suficiente resistencia para soportarse por sí mismos. La obra falsa es muy cara. Su costo (en Estados Unidos) es de uno a dos tercios del costo total de una estructura de concreto reforzado, con un valor promedio aproximado de 50%. *Debe ser claro que cuando se trata de mejorar el costo de las estructuras de concreto reforzado, el factor principal reside en la reducción del costo de la cimbra.*

3. La baja resistencia por unidad de peso de concreto conduce a miembros pesados. Esto se vuelve muy importante en estructuras de gran claro, en donde el gran peso muerto del concreto tiene un fuerte efecto en los momentos flexionantes. Pueden usarse agregados ligeros para reducir el peso del concreto, pero el costo del concreto aumenta.
4. Similarmente, la baja resistencia por unidad de volumen del concreto implica que los miembros serán relativamente grandes, lo que es de una considerable importancia en edificios altos y en estructuras de grandes claros.
5. Las propiedades del concreto varían ampliamente debido a las modificaciones en su proporción y mezclado. Además, el colado y curado del concreto no son tan cuidadosamente controlados como la producción de otros materiales; por ejemplo, el acero estructural y la madera laminada.

Otras dos características que pueden causar problemas son la contracción y la fluencia plástica del concreto. Estas características se estudian en la Sección 1.12 de este capítulo.

## 1.4 ANTECEDENTES HISTÓRICOS

La mayoría de la gente piensa que el concreto se ha estado usando durante muchos siglos, pero no es así. Los romanos utilizaron una especie de cemento, llamado *puzolana*, antes del nacimiento de Cristo. Encontraron grandes depósitos de ceniza volcánica arenosa cerca del Monte Vesubio y en otros lugares en Italia. Cuando mezclaron este material con cal viva y agua, además de arena y grava, al dejar endurecer la mezcla, se produjo una sustancia rocosa que utilizaron como material de construcción. Se podría pensar que resultaría una especie de concreto relativamente pobre, en comparación con las normas actuales, pero algunas estructuras de concreto romanas siguen de pie hoy en día. Un ejemplo es el Panteón (un edificio dedicado a todos los dioses) que se encuentra en Roma y se terminó en el año 126 A.C.

El arte de hacer concreto puzolánico se perdió durante la Edad Media y fue resucitado retomado hasta los siglos XVIII y XIX. En Inglaterra se descubrió, en 1796, un depósito de piedra de cemento natural que fue vendido como “cemento romano”. Se descubrieron otros depósitos de cemento natural tanto en Europa como en América, que fueron explotados durante varias décadas.

El verdadero gran adelanto para el concreto ocurrió en 1824, cuando un albañil inglés llamado Joseph Aspdin, después de largos y laboriosos experimentos, obtuvo una patente para un cemento que él llamó cemento portland, debido a que su color era muy similar al de la piedra de una cantera en la isla de Portland, en la costa inglesa. Él hizo su cemento con ciertas cantidades de arcilla y piedra caliza que pulverizó y quemó en la estufa de su cocina, moliendo después la escoria resultante para obtener un polvo fino. En los primeros años tras su invención, ese cemento se usó principalmente en estucos.<sup>1</sup> Este extraordinario producto fue adoptado poco a poco por la industria de la construcción y ni siquiera fue introducido en Estados Unidos sino hasta 1868; el primer cemento portland no se fabricó en Estados Unidos sino hasta la década de 1870.

Los primeros usos del concreto no son bien conocidos. Muchos de los trabajos iniciales fueron hechos por los franceses François Le Brun, Joseph Lambot y Joseph Monier. En 1832, Le Brun construyó una casa de concreto y siguió después la construcción de una escuela y una iglesia con el mismo material. Alrededor de 1850, Lambot construyó una embarcación de concreto reforzado con una red de alambres o varillas paralelas. Sin embargo, se le acredita a Monier la invención del concreto reforzado. En 1867 él recibió una patente para la construcción de tinajas o receptáculos y depósitos de concreto, reforzados con una malla de alambre de hierro. Su meta reconocida al trabajar con este material era obtener un bajo peso sin tener que sacrificar resistencia.<sup>2</sup>

De 1867 a 1881 Monier recibió patentes para la fabricación de durmientes, losas de piso, arcos, puentes peatonales, edificios y otros elementos de concreto reforzado en Francia y Alemania. Otro francés, François Coignet, construyó estructuras simples de concreto reforzado y desarrolló métodos básicos de diseño. En 1861, publicó un libro en el que presentaba un buen número de aplicaciones. Fue la primera persona en darse cuenta de que la adición de demasiada agua a la mezcla reducía considerablemente la resistencia del concreto. Otros europeos que experimentaron con el concreto reforzado en sus etapas iniciales fueron los ingleses William Fairbairn y William B. Wilkinson, el alemán G.A. Wayss y otro francés, François Hennebique.<sup>3,4</sup>

William E. Ward construyó el primer edificio de concreto reforzado en Estados Unidos en Port Chester, Nueva York, en 1875. En 1883 presentó un artículo ante la *American Society of Mechanical Engineers* donde afirmaba haber obtenido la idea del concreto reforzado al observar a trabajadores ingleses en 1867 intentando limpiar el cemento endurecido de sus herramientas de hierro.<sup>5</sup>

Thaddeus Hyatt, un estadounidense, fue probablemente la primera persona en analizar correctamente los esfuerzos en una viga de concreto reforzado y en 1877 publicó un libro de 28 páginas titulado *An Account of Some Experiments with Portland Cement Concrete, Combined with Iron as a Building Material* [Relato de algunos experimentos con concreto de cemento de portland, combinado con hierro como material de construcción]. En este libro elogió el uso del concreto reforzado y dijo que “las vigas laminadas (acero) tienen que aceptarse con base en un acto de fe”. Hyatt puso mucho énfasis en la alta resistencia del concreto al fuego.<sup>6</sup>

<sup>1</sup> Kirby, R.S. y Laurson, P.G., 1932, *The Early Years of Modern Civil Engineering* (New Haven: Yale University Press), pág. 266.

<sup>2</sup> *Ibid.* págs. 273-275.

<sup>3</sup> Straub, H., 1964, *A History of Civil Engineering* (Cambridge: MIT Press), páginas 205-215. Traducido del alemán *Die Geschichte der Bauingenieurkunst* (Basel: Verlag Birkhauser), 1949.

<sup>4</sup> Kirby, R.S. y Laurson, P.G., 1932, *The Early Years of Modern Civil Engineering* (New Haven: Yale University Press), páginas 273-275.

<sup>5</sup> Ward, W. E., 1883, “*Béton in Combination with Iron as a Building Material*”, *Transactions ASME*, 4, páginas 388-403.

<sup>6</sup> Kirby, R.S. y Laurson, P.G., 1932, *The Early Years of Modern Civil Engineering* (New Haven: Yale University Press), pág. 275.



Instalación de la subestructura base por gravedad de concreto (CGBS, *Concrete Gravity Base Substructure*) para la plataforma de petróleo y gas LUNA en el mar de Okhotsk, en la región de Sakhalin, Rusia. (Itar-Tass Photos/News Com.)

E.L. Ransome, de San Francisco, supuestamente usó concreto reforzado en los primeros años de la década de 1870 y fue el inventor de las varillas corrugadas (o retorcidas), para las que obtuvo una patente en 1884. Estas varillas, que eran de sección transversal cuadrada, se torcían en frío con una vuelta completa en una longitud de no más de 12 veces el diámetro de la varilla.<sup>7</sup> (El propósito de torcerlas era proporcionar mejor adherencia entre el concreto y el acero.) En 1890, en San Francisco, Ransome construyó el museo Leland Stanford Jr. Se trata de un edificio de concreto reforzado de 312 pies de largo y 2 niveles de altura en el que se usó como refuerzo de tensión el alambre de los cables de desecho de un sistema de transporte funicular. Este edificio sufrió pocos daños en el sismo de 1906 y el incendio que resultó de éste. El limitado daño a este edificio y otras estructuras de concreto que resistieron el gran incendio de 1906 condujo a una amplia aceptación de esta forma de construcción en la costa occidental de Estados Unidos. Desde los inicios de la década de 1900, el desarrollo y uso del concreto reforzado en Estados Unidos ha sido muy rápido.<sup>8,9</sup>

## 1.5 COMPARACIÓN DEL CONCRETO REFORZADO CON EL ACERO ESTRUCTURAL PARA EDIFICIOS Y PUENTES

Cuando está bajo consideración un tipo particular de estructura, puede ser que el estudiante, perplejo, se pregunte: ¿debe usarse concreto reforzado o acero estructural? Hay mucha discusión sobre esta cuestión, pues mientras los partidarios del concreto reforzado muestran al acero como un material que se corroe, los que favorecen dicho metal señalan que el concreto es un material que tiende a retornar a su estado natural (es decir, arena y grava) bajo esfuerzos de tensión demasiado grandes.

<sup>7</sup> *American Society for Testing Materials*, 1911, *Proceedings*, 11, páginas 66-68.

<sup>8</sup> Wang, C.K. y Salmon, C.G., 1998, *Reinforced Concrete Design*, 6a. ed. (Nueva York: Harper Collins), páginas 3-5.

<sup>9</sup> "The Story of Cement, Concrete and Reinforced Concrete", *Civil Engineering*, noviembre de 1977, páginas 63-65.

No hay una respuesta simple a esta pregunta, sobre todo porque ambos materiales tienen muchas características excelentes que pueden utilizarse con tan buenos resultados en muchos tipos de estructuras. De hecho, con frecuencia ambos se utilizan en las mismas estructuras con estupendos resultados.

La selección del material estructural que se ha de usar en un edificio determinado depende de la altura y claro de la estructura, del mercado de materiales, de las condiciones de la cimentación, de los códigos locales de construcción y de consideraciones arquitectónicas. Para edificios de menos de 4 niveles, el concreto reforzado, el acero estructural y la construcción con muros de carga pueden competir entre sí. En edificios de 4 a 20 niveles, el concreto reforzado y el acero estructural son económicamente competitivos, pero para edificios de más de 20 niveles se prefiere el acero estructural. Sin embargo, actualmente el concreto reforzado se ha vuelto cada vez más competitivo para edificios de más de 20 niveles y hay ya un número de edificios de concreto reforzado de mayor altura alrededor del mundo. El edificio *Water Tower Place* en Chicago de 74 niveles, y 859 pies de altura es el edificio de concreto reforzado más alto en el mundo. La torre CN de 1 465 pies (que no es un edificio), en Toronto, Canadá, es la estructura más alta de concreto reforzado en el mundo.

Aunque a todos nos gustaría participar en el diseño de grandes y prestigiosos edificios de concreto reforzado, simplemente no se construyen los suficientes. Como resultado, casi toda nuestra labor se invierte en el diseño de estructuras mucho más pequeñas. Acaso 9 de cada 10 edificios en Estados Unidos tienen una altura de 3 niveles o menos y más de dos tercios de ellos contienen un área de piso de 15 000 pies o menos.

Las condiciones de la cimentación con frecuencia suelen afectar la selección del material por usarse en la estructura de un edificio. Si las condiciones de la cimentación son pobres, puede ser más conveniente usar una estructura de acero debido al menor peso de ésta. El código de construcciones en una ciudad específica puede favorecer más a uno de los materiales que a los otros. Por ejemplo, muchas ciudades tienen zonas de incendio en las que sólo pueden erigirse estructuras a prueba de fuego, lo cual favorece al concreto reforzado. Finalmente, el factor tiempo favorece a las estructuras de acero, ya que éstas pueden erigirse mucho más rápidamente que las estructuras de concreto reforzado. Sin embargo, la ventaja del tiempo no es tan grande como podría parecer a primera vista, porque en caso de que la estructura deba estar calificada a prueba de fuego, el constructor tendrá que recubrir el acero con algún tipo de material incombustible después de haber montado el edificio.

En la decisión de si se debe usar concreto o acero para un puente, se deberán tomar en cuenta diversos factores, tales como el claro, las condiciones de la cimentación, las cargas, consideraciones arquitectónicas, etc. En general, el concreto es un material de excelente compresión y normalmente será preferido en puentes de claros cortos y en los casos en que se requiera una estructura rígida (como, tal vez, en puentes ferroviarios).

## 1.6 COMPATIBILIDAD DEL CONCRETO Y EL ACERO

El concreto y el acero de refuerzo funcionan en conjunto de forma excelente en las estructuras de concreto reforzado. Las ventajas de cada material compensan las desventajas del otro. Por ejemplo, la gran desventaja del concreto es su falta de resistencia a la tensión; pero la resistencia a la tensión es una de las grandes ventajas del acero. Las varillas de refuerzo tienen una resistencia a la tensión aproximadamente 100 veces mayor a la del concreto que se usa regularmente.

Los dos materiales se adhieren muy bien entre sí, de modo que no hay deslizamiento entre los dos y, por tanto, funcionan conjuntamente como una unidad para resistir las fuerzas. La excelente liga obtenida se debe a la adherencia química entre los dos materiales, a la rugosidad natural de las varillas y a la estrecha separación de las corrugaciones en las superficies de las varillas.

Las varillas de refuerzo están expuestas a la corrosión, pero el concreto que las rodea les proporciona excelente protección. La fuerza del acero expuesto a las temperaturas que se alcanzan en los incendios de intensidad normal es nula, pero su recubrimiento con concreto da como resultado calificaciones de prueba de fuego muy satisfactorias. Finalmente, el concreto y el acero trabajan muy bien juntos respecto a los cambios de temperatura, porque sus coeficientes de dilatación térmica son muy parecidos. Para el

acero, el coeficiente es 0.0000065 por unidad de longitud por grado Fahrenheit y para el concreto varía entre 0.000004 y 0.000007 (valor promedio, 0.0000055).

## 1.7 CÓDIGOS DE DISEÑO

El código más importante en Estados Unidos para el diseño de concreto reforzado es el *Building Code Requirements for Structural Concrete* [Código de construcción de los requerimientos para el concreto estructural] del Instituto Americano del Concreto (ACI 318-14)<sup>10</sup>. Este código, que se usa principalmente para el diseño de edificios, es observado en la mayoría de los ejemplos numéricos dados en este texto. Con frecuencia se hacen referencias a este documento y se indica siempre el número de la sección considerada. Los requisitos de diseño para varios tipos de miembros de concreto reforzado se presentan en el código junto con un comentario a esos requisitos. El comentario proporciona explicaciones, sugerencias e información adicional relativa a los requisitos del diseño. De esa manera, los usuarios obtienen más antecedentes y un mejor entendimiento del código.

El Código ACI no es en sí mismo un documento legalmente aplicable. Es meramente una serie de principios para la buena práctica del diseño de concreto reforzado. Sin embargo, está escrito en forma de código o ley para que diversos organismos de la administración pública puedan decidir fácilmente si lo incluyen en sus códigos locales de construcción y entonces pueda ser legalmente aplicable en esa comunidad. De esta manera, el Código ACI ha sido votado como ley por innumerables organismos gubernamentales en Estados Unidos. El *International Building Code* (IBC), que se publicó por primera vez en el año 2000, gracias al *International Code Council*, ha consolidado los tres códigos regionales de construcciones (*Building Officials and Code Administrators*, *International Conference of Building Officials*, y el *Southern Building Code Congress International*) en un documento nacional. El Código IBC se actualiza cada 3 años y se refiere a la edición más reciente del ACI 318 para la mayoría de sus disposiciones relacionadas con el diseño de concreto reforzado, con sólo algunas modificaciones. Se espera que el IBC 2015 se refiera al ACI 318-14 para la mayoría de sus disposiciones sobre concreto reforzado. El Código ACI 318 también ha sido ampliamente aceptado en Canadá y en México, y ha tenido una enorme influencia en los códigos de concreto de todos los países alrededor del mundo.

Conforme se adquieren nuevos conocimientos sobre el comportamiento del concreto reforzado, el ACI revisa su código. El objetivo actual es efectuar cambios anuales en el código en forma de suplementos y efectuar revisiones mayores de todo el código cada 3 años.

Otras especificaciones bien conocidas sobre concreto reforzado son las de la *American Association of State Highway and Transportation Officials* (AASHTO) y la *American Railway Engineering Association* (AREA).

## 1.8 RESUMEN DE CAMBIOS DEL CÓDIGO ACI 2014

Como éste es un libro de texto introductorio de la materia de concreto reforzado, la mayoría de los lectores están viendo el material por primera vez. Para estos lectores, esta sección no sería de mucho interés. Sin embargo, para quienes estén familiarizados con las versiones anteriores del Código ACI 318, esta sección puede ser útil para entender los cambios que se han introducido en la versión 2014.

### Reorganización

El ACI 318-14 se reorganizó en su totalidad en seis categorías: Generalidades, Sistemas, Miembros, Uniones y Conectores, Caja de herramientas y Construcción. Cada categoría contiene varios capítulos. Por ejemplo, los capítulos de Miembros incluyen capítulos separados sobre Losas en una dirección,

<sup>10</sup>American Concrete Institute, 2014, *Building Code Requirements for Structural Concrete* (ACI 318-14), Farmington Hills, Michigan.

Losas en dos direcciones, Vigas, Columnas y Muros. Los capítulos de Caja de herramientas tienen disposiciones que son comunes para muchos tipos de elementos, incluyendo Factores de reducción de Resistencia, Resistencia de la sección, Puntal y tirante, Condiciones de servicio y Detalles de refuerzo. Un ejemplo de resistencia de la sección es la capacidad de momento nominal de la viga, que se determina básicamente de la misma manera que aquella de una losa en una dirección, una losa en dos direcciones, una zapata, o un muro.

## Capítulos nuevos

El ACI 318-14 tiene capítulos nuevos: Sistemas estructurales (Capítulo 4), Uniones y conectores (Capítulo 16), incluyendo descripciones sobre uniones viga/columna y losa/columna, conectores entre miembros y anclaje en el concreto (anteriormente un apéndice del código). El capítulo nuevo sobre construcción (Capítulo 26) está escrito para el diseñador, no para el contratista, e incluye lo que debe comunicarse mediante documentos de construcción al contratista. También se incluye un capítulo nuevo sobre diafragmas (Capítulo 12).

## Tablas

Se han añadido muchas tablas nuevas al ACI 318-14. Éstas son mucho más claras que en los códigos anteriores.

## Otros cambios

El diseño de mezclas de concreto del ACI 318-14, y solamente se hace referencia al ACI 301. A menudo, el diseñador de una estructura de concreto reforzado no es la misma persona que hace la proporción de la mezcla de concreto. Los requisitos esenciales del concreto, tal como la resistencia especificada a la compresión y los tipos de exposición, que el diseñador debe especificar, permanecen en el código.

Ahora se reconoce y se estudia con algún detalle el análisis del elemento finito. Asimismo, se incluyen en el código guías y limitaciones del uso de la modelación de los elementos finitos.

## 1.9 UNIDADES SI Y RECUADROS SOMBREADOS

La mayor parte de este libro está dedicada al diseño de estructuras de concreto reforzado usando las unidades comunes en Estados Unidos. Sin embargo, los autores opinan que es absolutamente necesario para los ingenieros actuales poder diseñar usando también el sistema SI. Por ello, se presentan aquí las ecuaciones SI cuando éstas difieren de las expresadas en unidades comunes, junto con una buena cantidad de ejemplos numéricos resueltos usando unidades SI. Las ecuaciones están tomadas de la versión métrica del *Building Code Requirements for Structural Concrete* del Instituto Americano del Concreto (ACI 318M-14).<sup>11</sup>

Para mucha gente es algo incómodo leer un libro en el que números y ecuaciones son presentados en dos grupos de unidades. Para tratar de reducir esta molestia, los autores han colocado, a lo largo de todo el libro, un recuadro sombreado alrededor de cualquier entrada pertinente a unidades SI.

Si los lectores están trabajando en un momento dado con unidades de Estados Unidos, pueden ignorar por completo las áreas sombreadas. Por otra parte, esperamos que tales ayudas permitan a una persona que trabaje con unidades SI, a encontrar fácilmente las ecuaciones y los ejemplos correspondientes.

---

<sup>11</sup>*Ibid.*

## 1.10 TIPOS DE CEMENTO PORTLAND

Los concretos hechos con cemento portland normal requieren aproximadamente dos semanas para adquirir una resistencia suficiente que permita retirar la cimbra y aplicar cargas moderadas. Tales concretos alcanzan sus resistencias de diseño después de aproximadamente 28 días y después continúan ganando resistencia a un menor ritmo.

En muchas ocasiones es deseable acelerar la construcción por medio del uso de *cementos de fraguado rápido*, los cuales, si bien más caros, permiten obtener las resistencias deseadas en un periodo de 3 a 7 días en vez de los 28 días normales. Esos cementos son particularmente útiles para la fabricación de miembros prefabricados; en éstos, el concreto se cuela en cimbras, donde rápidamente adquiere las resistencias deseadas; luego se retiran las cimbras con objeto de usarlas nuevamente en otros colados. Está claro que cuanto más rápido se obtenga la resistencia deseada, más eficiente resultará la operación. Se pueden hacer consideraciones similares sobre el colado de edificios de concreto, piso por piso. Los cementos de fraguado rápido también se pueden usar con éxito en reparaciones de emergencia y para el *concreto lanzado* (en éste, un mortero o concreto se dispara a gran velocidad a través de una manguera hacia una superficie preparada de antemano).

Existen otros tipos especiales de cementos portland disponibles. El proceso químico que ocurre durante el fraguado o endurecimiento del concreto produce calor. En estructuras de concreto colosales, como presas, losas de cimentación y pilares, este calor se disipa muy lentamente y puede generar serios problemas, como ocasionar que el concreto se expanda durante su hidratación. Al enfriarse, el concreto se contrae, por lo que con frecuencia se desarrolla un severo agrietamiento.



El One Peachtree Center en Atlanta, Georgia, tiene 854 pies de alto y se construyó para los Juegos Olímpicos de 1996. (Cortesía de Portland Cement Association.)

El concreto puede usarse en lugares en que queda expuesto a diversos cloruros y/o sulfatos. Tales situaciones se presentan en las construcciones marinas y en estructuras expuestas a diversos tipos de suelos. Se fabrican algunos cementos portland con bajo calor de hidratación y otros con mayores resistencias al ataque de los cloruros y sulfatos.

En Estados Unidos, la *American Society for Testing and Materials* (ASTM) clasifica los cementos portland en cinco tipos. Estos diferentes cementos se fabrican casi con los mismos materiales básicos, pero sus propiedades se modifican variando la dosificación. El cemento tipo I es el cemento normal usado en la mayoría de las construcciones, pero hay otros cuatro tipos útiles en situaciones especiales, en las que se requiere un fraguado rápido o una generación baja de calor, o bien una resistencia mayor a los sulfatos:

*Tipo I:* el cemento común de usos múltiples empleado en trabajos de construcción en general.

*Tipo II:* un cemento modificado que tiene menor calor de hidratación que el Tipo I y puede resistir alguna exposición al ataque de los sulfatos.

*Tipo III:* un cemento de fraguado rápido que produce, en las primeras 24 horas, un concreto con una resistencia aproximadamente del doble que la del cemento tipo I. Este cemento produce calor de hidratación muy alto.

*Tipo IV:* un cemento de bajo calor que produce un concreto que disipa muy lentamente el calor. Se usa en estructuras de concreto de gran tamaño.

*Tipo V:* un cemento usado para concretos que van a estar expuestos a altas concentraciones de sulfatos.

Si el tipo requerido de cemento no está disponible en el mercado, pueden adquirirse varios aditivos con los que las propiedades del cemento Tipo I se modifican para producir las características deseadas.

## 1.11 ADITIVOS

Los materiales que se agregan al concreto durante o antes del mezclado se denominan "aditivos". Se usan para mejorar el desempeño del concreto en ciertas situaciones, así como para disminuir su costo. Hay un dicho bastante conocido relacionado con los aditivos, que dice que "son para el concreto lo que los artículos de belleza son para el pueblo". Varios de los tipos más comunes de aditivos se dan en la siguiente lista y se describen brevemente.

- Los *aditivos inclusivos de aire*, que cumplen con los requisitos C260 y C618 de la ASTM, se usan principalmente para incrementar la resistencia del concreto al congelamiento y derretimiento; proporcionan mejor resistencia a la acción de deterioro de las sales descongelantes. Los agentes inclusivos de aire ocasionan la formación de espuma en el agua de mezclado, y como resultado se obtienen billones de burbujas de aire estrechamente espaciadas que se incorporan en el concreto. Cuando el concreto se congela, el agua penetra en las burbujas de aire, con lo cual se alivia la presión sobre el concreto. Cuando el concreto se descongela, el agua puede salir de las burbujas, gracias a lo cual hay un menor agrietamiento al que habría si no se hubiera usado el aire atrapado.
- La adición de *aditivos acelerantes*, como el cloruro de calcio, acelera en el concreto el desarrollo de su temprana resistencia. Los resultados de tales adiciones (particularmente útiles en climas fríos) son la reducción del tiempo requerido para el curado y la protección del concreto, así como el pronto retiro de la cimbra. (La Sección 26.4.1.4.1(c) del Código ACI establece que, debido a problemas de corrosión, el cloruro de calcio no debe agregarse a concretos con aluminio ahogado, ni a concretos colados en cimbras de acero galvanizado permanente, ni a concretos presforzados.) Hay otros aditivos aceleradores que pueden usarse, entre éstos se incluyen varias sales solubles y otros compuestos orgánicos.
- Los *aditivos retardadores* se usan para retardar tanto el fraguado del concreto como los aumentos de temperatura. Consisten en varios ácidos o azúcares, o derivados del azúcar. Algunos

conductores de camiones de concreto llevan consigo sacos de azúcar para añadirla al concreto en caso de ser demorados por el tránsito u otra circunstancia. Los aditivos retardadores son particularmente útiles para grandes colados donde pueden presentarse notables incrementos de temperatura. También prolongan la plasticidad del concreto, lo cual permite mejorar el mezclado o adherencia entre colados sucesivos. Los retardadores también pueden desacelerar la hidratación del cemento en superficies de concreto expuestas o superficies cimbradas para producir acabados atractivos con agregado aparente.

- Los *superplastificantes* son aditivos hechos a partir de sulfonatos orgánicos. Su uso permite a los ingenieros reducir considerablemente el contenido de agua en los concretos y al mismo tiempo incrementar sus revenimientos. Aunque los superplastificantes también pueden usarse para mantener proporciones de agua-cemento constantes usando menos cemento, son más comúnmente usados para producir concretos manejables con resistencias considerablemente superiores, aunque se use la misma cantidad de cemento. (Véase la Sección 1.14.) Un producto relativamente nuevo, el concreto autoconsolidante, utiliza superplastificantes y modificaciones en las proporciones de las mezclas para producir una mezcla muy manejable que no requiere vibración, aun para las situaciones de colocación más congestionadas.
- Usualmente, *los materiales impermeables al agua* se aplican a las superficies endurecidas de concreto, pero pueden agregarse también a las mezclas de concreto. Estos aditivos consisten generalmente en algún tipo de jabón o de algunos productos derivados del petróleo, por ejemplo las emulsiones asfálticas. Pueden ayudar a retardar la penetración del agua en los concretos porosos, pero probablemente no ayudan mucho a los concretos densos bien curados.

## 1.12 PROPIEDADES DEL CONCRETO REFORZADO

Es necesario que el estudiante posea un amplio conocimiento de las propiedades del concreto antes de que empiece a diseñar estructuras de concreto reforzado. En esta sección se presenta una introducción a varias de esas propiedades. Sin embargo, el diseñador de una estructura de concreto generalmente no es la misma persona que diseña la mezcla de concreto. Por esta razón, una gran cantidad de información en el ACI 318-11 relacionada con el diseño de las mezclas de concreto no se incluye en el ACI 318-14, y en su lugar se cita el ACI 301<sup>12</sup>.

### Resistencia a la compresión

La resistencia a la compresión del concreto se determina por medio de pruebas a la falla de cilindros de concreto de 6 plg  $\times$  12 plg de diámetro de 28 días a una velocidad especificada de carga (primero se permitieron cilindros de 4 plg  $\times$  8 plg de diámetro en el código 2008 en lugar de los cilindros más grandes). Durante el periodo de 28 días, los cilindros suelen mantenerse sumergidos en agua o en un local con temperatura constante y humedad de 100%. Aunque existen concretos con resistencias últimas a los 28 días, que van de 2 500 lb/plg<sup>2</sup> hasta 10 000 a 20 000 lb/plg<sup>2</sup>, la mayoría de los concretos usados en la práctica tienen una resistencia de entre 3 000 y 7 000 lb/plg<sup>2</sup>. Para aplicaciones comunes se usan concretos de 3 000 y 4 000 lb/plg<sup>2</sup>, mientras que en la construcción presforzada se emplean los de 5 000 y 6 000 lb/plg<sup>2</sup>. Para ciertas aplicaciones, como en columnas de pisos inferiores de edificios altos, se han utilizado concretos con resistencia de hasta 9 000 o 10 000 lb/plg<sup>2</sup> que son suministrados por empresas de concreto premezclado. Como consecuencia, el uso de estos concretos de alta resistencia se hace cada vez más común. En la *Two Union Square* en Seattle, se usaron concretos con resistencias de hasta 19 000 lb/plg<sup>2</sup>.

Los valores obtenidos para la resistencia a compresión de concretos, tal como se determinaron en pruebas, dependen en gran medida de los tamaños y formas de los especímenes de prueba y de la manera en que éstos son cargados. En muchos países, los especímenes de prueba son cubos de 200 mm (7.87 plg) por lado. Para los mismos lotes de concreto, la prueba de cilindros de 6 plg por 12 plg proporciona resis-

<sup>12</sup> 2010, *Specifications for Structural Concrete*, Farmington Hills, Michigan, 48331, USA, ISBN 978-0-87031-403-2.

tencias a compresión de sólo aproximadamente 80% de los valores en  $\text{lb/plg}^2$  obtenidos con los cubos.

Es posible pasar de un concreto de 3 000  $\text{lb/plg}^2$  a otro de 5 000  $\text{lb/plg}^2$  sin que se requiera una cantidad excesiva de trabajo o de cemento adicional. El aumento en el costo aproximado para tal incremento de resistencia es 15 a 20%. Sin embargo, para fabricar un concreto con resistencia superior a 5 000  $\text{lb/plg}^2$  o 6 000  $\text{lb/plg}^2$  se requiere un diseño muy cuidadoso de la mezcla y prestar considerable atención al mezclado, colado y curado. Estos requisitos ocasionan un incremento relativamente mayor en el costo.

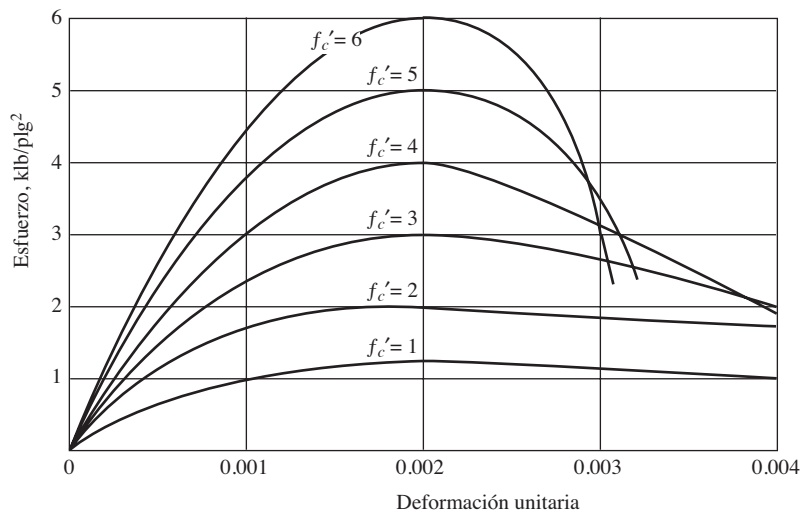
En este texto se hacen diversos comentarios respecto a los costos relativos que se obtienen al usar diferentes resistencias del concreto en distintas aplicaciones, tales como vigas, columnas, zapatas y miembros presforzados.

Para asegurar que la resistencia a la compresión del concreto en la estructura es al menos tan fuerte como el valor especificado,  $f'_c$ , el diseño de la mezcla de concreto debe apuntar a un valor superior,  $f'_{cr}$ . La Sección 4.2.3.3 del Código ACI 301 requiere que las resistencias de compresión del concreto usadas como base para seleccionar las proporciones de éste deben exceder las resistencias de 28 días especificadas por valores bastante más grandes. Para las instalaciones de producción de concreto que tengan suficientes registros de pruebas de resistencia de campo que cumplan con la Sección 4.2.3.4a del ACI 301-10, estas proporciones de mezcla pueden someterse para su aceptación. Para las instalaciones que no tengan suficientes registros como para calcular desviaciones estándar satisfactorias, la Tabla 4.2.3.3b del ACI 301 provee incrementos en la resistencia a la compresión de diseño promedio requerida ( $f'_{cr}$ ) de 1 000  $\text{lb/plg}^2$ , menores a 3 000  $\text{lb/plg}^2$  e incrementos muy superiores para concretos con  $f'_c$  superiores.

Con objeto de satisfacer la resistencia a la compresión especificada, la Sección 26.12.3 del ACI 318-14 requiere que (1) la resistencia a la compresión promedio de tres pruebas consecutivas sea igual o sobrepase a  $f'_c$  y que (2) ninguna prueba de resistencia esté situada por debajo de  $f'_c$  por más de 500  $\text{lb/plg}^2$ . Para valores de  $f'_c$  que sobrepasen a 5 000  $\text{lb/plg}^2$ , ninguna prueba de resistencia deberá estar situada por debajo de  $0.10 f'_c$ .

Las curvas de esfuerzo-deformación unitaria de la Figura 1.1 representan los resultados obtenidos en pruebas de compresión en cilindros estándares de resistencias variables a los 28 días. Deben estudiarse cuidadosamente estas curvas, ya que muestran varios puntos importantes:

- a) Las curvas son aproximadamente rectas, mientras la carga crece de cero a más o menos entre un tercio y un medio de la resistencia última del concreto.
- b) Más allá de este intervalo, el comportamiento del concreto es no lineal. La falta de linealidad de las curvas esfuerzo-deformación unitaria del concreto a esfuerzos mayores ocasiona algunos problemas en el análisis de las estructuras de concreto porque el comportamiento de éstas tam-



**Figura 1.1** Curva esfuerzo-deformación unitaria típica del concreto, con carga de corto plazo.

poco es lineal bajo esfuerzos mayores.

- c) Es de particular importancia el hecho de que todos los concretos, independientemente de sus resistencias, alcanzan sus resistencias últimas bajo deformaciones unitarias de aproximadamente 0.002.
- d) El concreto no tiene una resistencia a la fluencia plástica definida; más bien, las curvas se comportan suavemente hasta sus puntos de ruptura bajo deformaciones unitarias de entre 0.003 y 0.004. Para fines de cálculos futuros en este texto, se supondrá que el concreto falla a 0.003 (ACI 318-14, Sección 22.2.2.1). *El lector debe observar que este valor, el cual es conservador para concretos de resistencia normal, puede no ser conservador para concretos de resistencia superior; es decir, en el intervalo de 8000 lb/plg<sup>2</sup> y mayores.* El código europeo usa un valor diferente para la deformación unitaria a compresión última para columnas (0.002) que para vigas y columnas con carga excéntrica (0.0035).<sup>13</sup>
- e) Muchas pruebas han mostrado claramente que las curvas esfuerzo-deformación unitaria de los cilindros de concreto son casi idénticas con las obtenidas en los lados de compresión de vigas.
- f) Debe observarse, además, que los concretos de bajo grado son menos frágiles que los de grado alto, o sea, que mostrarán deformaciones unitarias mayores antes de romperse.

### Módulo estático de elasticidad

El concreto no tiene un módulo de elasticidad bien definido. Su valor varía con las diferentes resistencias del concreto, con la edad de éste, con el tipo de carga, las características y proporciones del cemento y los agregados. Además, hay varias definiciones diferentes del módulo:

- a) El *módulo inicial* es la pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación en el origen de la curva.
- b) El *módulo por tangente* es la pendiente de una tangente a la curva en algún punto de ésta, por ejemplo, en 50% de la resistencia última del concreto.
- c) A la pendiente de una línea trazada del origen a un punto en la curva entre 25 y 50% de su resistencia última a compresión, se le llama *módulo por secante*.
- d) Otro módulo, llamado *módulo aparente* o *módulo a largo plazo*, se determina usando los esfuerzos y deformaciones unitarias obtenidas después de que la carga se ha aplicado durante cierto periodo.

La Sección 19.2.2.1 del Código ACI 318-14 establece que la siguiente expresión puede usarse para calcular el módulo de elasticidad de concretos que pesen entre 90 y 160 lb/pie<sup>3</sup>:

$$E_c = w_c^{1.5} 33 \sqrt{f'_c}$$

En esta expresión,  $E_c$  es el módulo de elasticidad en lb/plg<sup>2</sup>,  $w_c$  es el peso del concreto en libras por pie cúbico y  $f'_c$  es su resistencia a la compresión especificada a los 28 días en lb/plg<sup>2</sup>. Éste es en realidad un módulo por secante con la línea (cuya pendiente es igual al módulo) trazada del origen a un punto sobre la curva esfuerzo-deformación que corresponde aproximadamente al esfuerzo (0.45  $f'_c$ ) que se tendría bajo las cargas muertas y vivas estimadas que la estructura debe soportar.

Para concreto de peso normal, que pesa aproximadamente 145 lb/pie<sup>3</sup>, el Código ACI establece que la siguiente versión simplificada de la expresión anterior se puede usar para determinar el módulo:

$$E_c = 57\,000 \sqrt{f'_c}$$

La Tabla A.1 (véase el Apéndice A al final del libro) muestra valores de  $E_c$  para concretos de diferentes resistencias. Estos valores se calcularon con la primera de las fórmulas precedentes, suponiendo un concreto de 145 lb/pie<sup>3</sup>.

<sup>13</sup> MacGregor, J.G. y Wight, J.K., 2005, *Reinforced Concrete Mechanics and Design*, 4a. ed. (Upper Saddle River, NJ: Pearson Prentice-Hall) página 111.

En unidades SI,  $E_c = w_c^{1.5}(0.043)\sqrt{f'_c}$  con  $w_c$  variando entre 1 500 y 2 600 kg/m<sup>3</sup> y con  $f'_c$  en N/mm<sup>2</sup> o MPa (megapascuales). Si se usa piedra triturada normal o grava para el concreto (con una masa aproximadamente de 2 320 kg/m<sup>3</sup>),  $E_c = 4 700\sqrt{f'_c}$ . La Tabla B.1 del apéndice B de este texto proporciona valores de módulos para varios concretos de diferentes resistencias.

El término *peso unitario* es constantemente usado por los ingenieros estructurales que trabajan con las unidades que se usan en Estados Unidos. Sin embargo, al usar el sistema SI, este término debe remplazarse por el término *densidad de masa*. Un kilogramo no es una unidad de fuerza y sólo indica la cantidad de materia en un objeto. La masa de un objeto particular es la misma en cualquier parte de la Tierra, mientras que el peso de un objeto en nuestras unidades usuales varía dependiendo de la altitud, debido al cambio en el valor de la aceleración gravitacional.

Los concretos con resistencias superiores a 6 000 lb/plg<sup>2</sup> son designados concretos de alta resistencia. Las pruebas han indicado que las ecuaciones usuales del ACI para  $E_c$  al aplicarse a concretos de alta resistencia, dan valores muy grandes. Con base en estudios en la Universidad de Cornell, la siguiente expresión se ha recomendado para concretos de peso normal con valores  $f'_c$  mayores que 6 000 lb/plg<sup>2</sup> y de hasta 12 000 lb/plg<sup>2</sup> y para concretos de peso ligero con  $f'_c$  mayores que 6 000 lb/plg<sup>2</sup> y de hasta 9 000 lb/plg<sup>2</sup>.<sup>14, 15</sup>

$$E_c(\text{lb/plg}^2) = [40\,000\sqrt{f'_c} + 10^6] \left( \frac{w_c}{145} \right)^{1.2}$$

En unidades SI con  $f'_c$  en MPa y  $w_c$  en kg/m<sup>3</sup>, esta expresión toma la forma:

$$E_c(\text{MPa}) = [3.32\sqrt{f'_c} + 6\,895] \left( \frac{w_c}{2\,320} \right)^{1.5}$$

## Módulo de elasticidad dinámico

El módulo de elasticidad dinámico, que corresponde a deformaciones unitarias instantáneas muy pequeñas, se obtiene usualmente por medio de pruebas sónicas. Es entre 20% y 40% mayor que el módulo estático y es aproximadamente igual al módulo inicial. Cuando las estructuras se analizan por cargas sísmicas o de impacto, el uso del módulo dinámico parece ser apropiado.

## Módulo de Poisson

Al someter un cilindro de concreto a cargas de compresión, éste no sólo se acorta a lo largo, sino que también se expande lateralmente. La proporción de esta expansión lateral respecto al acortamiento longitudinal se denomina *módulo de Poisson*. Su valor varía de aproximadamente 0.11 para concretos de alta resistencia hasta 0.21 para concretos de bajo grado, con un valor promedio de aproximadamente 0.16. No parece haber ninguna relación directa entre el valor de esta proporción y la relación agua-cemento, cantidad de curado, tamaño del agregado, etcétera.

En la mayoría de los diseños de concreto reforzado, no se le da ninguna consideración al llamado efecto Poisson. Sin embargo, tal vez tenga que ser considerado en el análisis y diseño de presas de arco, de túneles y de algunas otras estructuras estáticamente indeterminadas. La espiral de refuerzo en las columnas aprovecha el módulo de Poisson y esto se estudiará en el Capítulo 9.

<sup>14</sup>Nawy, E.G., 2006, *Prestressed Concrete: A Fundamental Approach*, 5a. ed. (Upper Saddle River, Nueva Jersey: Prentice-Hall), página 38.

<sup>15</sup>Carrasquillo, R., Nilson, A. y Slate, F., 1981, "Properties of High-strength Concrete Subject to Short-term Loads". *J. ACI Proceedings*, 78(3), mayo-junio.



Concierto en la concha acústica de Naumburg en Central Park, Nueva York.  
(© Nikreates/Alamy Limited.)

## Contracción

Cuando los materiales del concreto se mezclan, la pasta consistente en cemento y agua llena los vacíos entre los agregados y los amalgama. Esta mezcla necesita ser suficientemente manejable o fluida, de modo que pueda fluir entre las varillas de refuerzo y entre la cimbra. Para lograr la fluidez requerida, se usa considerablemente más agua (quizás el doble) que la necesaria, para que el cemento y el agua reaccionen químicamente (a esto se le llama *hidratación*).

Después de que el concreto se ha curado y comienza a secarse, el agua adicional que se usó en el mezclado empieza a aflorar en la superficie, donde se evapora. Como consecuencia, el concreto se contrae y se agrieta. Las grietas resultantes pueden reducir la resistencia a cortante de los miembros y pueden dañar el aspecto de la estructura. Además, las grietas permiten que el refuerzo quede expuesto a la atmósfera, o a productos químicos, tales como descongeladores, aumentando por consiguiente la posibilidad de corrosión. La contracción continúa durante muchos años, aunque, bajo condiciones comunes, probablemente 90% se da durante el primer año. La cantidad de humedad que se pierde varía con la distancia a la superficie. Además, cuanto mayor es el área superficial de un miembro en proporción a su volumen, mayor es la contracción; es decir, los miembros con secciones transversales pequeñas se contraen más que aquellos con secciones transversales grandes.

La cantidad de contracción depende mucho del tipo de exposición. Por ejemplo, si el concreto se ve sometido a mucho viento durante el curado, su contracción será mayor. Igualmente, una atmósfera húmeda implica menos contracción, mientras que una seca implica mayor contracción.

También debe considerarse que es conveniente usar agregados de baja absorción, como el granito y muchas piedras calizas. Cuando se usan ciertas pizarras y areniscas absorbentes, el resultado puede ser una vez y media o incluso dos veces la contracción que resulta con otros agregados.

Para minimizar la contracción es deseable: 1) mantener en un mínimo la cantidad de agua para mezclado; 2) curar bien el concreto; 3) colar el concreto para muros, pisos y otros elementos constructivos grandes en secciones pequeñas (lo que permite que parte de la contracción ocurra antes de colar la siguiente sección); 4) intercalar juntas constructivas para controlar la posición de las grietas; 5) usar refuerzo por contracción y 6) emplear agregados apropiadamente densos y no porosos.<sup>16</sup>

<sup>16</sup> Leet, K., 1991, *Reinforced Concrete Design*, 2a. ed. (Nueva York: McGraw-Hill), página 35.

## Fluencia plástica (o cedencia)

Bajo cargas de compresión sostenidas, el concreto continuará deformándose durante largos periodos. Después de que ocurre la deformación inicial, la deformación adicional se llama *cedencia* o *fluencia plástica*. Si se aplica una carga de compresión a un miembro de concreto, se presenta un acortamiento inmediato o instantáneo elástico. Si la carga se deja en su lugar por mucho tiempo, el miembro continuará acortándose durante varios años y la deformación final usualmente será igual a aproximadamente dos o tres veces la deformación inicial. Veremos en el Capítulo 6 que esto implica que las deflexiones a largo plazo también pueden ser iguales a dos o tres veces las deflexiones iniciales. Quizás 75% de la fluencia plástica total ocurrirá durante el primer año.

Si la carga a largo plazo se retira, el miembro recobrará la mayor parte de su deformación elástica y algo de su deformación plástica. Si la carga vuelve a actuar, tanto la deformación elástica como la plástica se desarrollarán nuevamente.

La magnitud del flujo plástico depende mucho de la magnitud de los esfuerzos presentes. Es casi directamente proporcional al esfuerzo, mientras el esfuerzo sostenido no sea mayor que aproximadamente la mitad de  $f'_c$ . Más allá de este valor, la cedencia crece rápidamente.

Las cargas a largo plazo no sólo generan fluencia plástica, sino que también influyen adversamente en la resistencia del concreto. Para cargas sostenidas en especímenes cargados concéntricamente por un año o más, puede darse una reducción de la resistencia de aproximadamente 15% a 25%. *Así, un miembro cargado con una carga sostenida de, digamos, 85% de su resistencia última a la compresión,  $f'_c$  puede ser satisfactoria por un cierto tiempo, pero puede fallar después.*<sup>17</sup>

Otros factores que afectan la magnitud de la fluencia plástica son:

- Cuanto mayor sea el tiempo de curado previo a la aplicación de las cargas, menor será la fluencia plástica. El curado a vapor, que acelera la adquisición de resistencia, reduce también la fluencia plástica.
- Los concretos de alta resistencia manifiestan una menor fluencia plástica que los de baja resistencia, para esfuerzos de la misma intensidad. Sin embargo, los esfuerzos aplicados en concretos de alta resistencia son probablemente mayores que los aplicados en concretos de baja resistencia y este hecho tiende a causar un incremento de la fluencia plástica.
- La fluencia plástica aumenta con la temperatura. Alcanza su valor máximo cuando el concreto está entre 150 y 160 °F.
- A mayor humedad, menor será el agua de poro libre que pueda escapar del concreto. La fluencia plástica, adquiere un valor casi del doble a 50% de humedad que a 100%. Obviamente es muy difícil distinguir entre la contracción y la fluencia plástica.
- Los concretos con el mayor porcentaje de pasta cemento-agua tienen la mayor fluencia plástica porque es la pasta (y no los agregados) la que fluye plásticamente. Esto es particularmente cierto si se usa piedra caliza como agregado.
- Obviamente, la adición de refuerzo en las zonas de compresión del concreto reduce mucho la fluencia plástica, ya que el acero manifiesta muy poca fluencia plástica bajo esfuerzos ordinarios. Conforme ocurre la fluencia plástica en el concreto, el refuerzo tiende a impedirlo y a tomar cada vez más parte de la carga.
- Los miembros grandes de concreto (es decir, aquellos con relaciones grandes de volumen a área superficial) fluirán proporcionalmente menos que los miembros delgados más pequeños donde el agua libre tiene que recorrer distancias menores para escapar.

## Resistencia a la tensión

La resistencia a la tensión del concreto varía de aproximadamente 8% a 15% de su resistencia a la compresión. Una razón principal para esta baja resistencia es que el concreto contiene un gran número de

<sup>17</sup>Rüsch, H., 1960, "Researches Toward a General Flexure Theory for Structural Concrete", *Journal ACI*, 57(1), páginas 1-28.

grietas muy finas. Las grietas tienen poca importancia cuando el concreto está sometido a cargas de compresión, porque éstas ocasionan que las grietas se cierren y permitan entonces la transmisión de la compresión. Obviamente, éste no es el caso para cargas de tensión.

Aunque la resistencia a la tensión normalmente se desprecia en los cálculos de diseño, es, sin embargo, una propiedad importante que afecta el tamaño y extensión de las grietas que se presentan. Además, la resistencia a la tensión de los miembros de concreto tiene un efecto definitivo de reducción en sus deflexiones. (Debido a la pequeña resistencia a la tensión del concreto, muy poco esfuerzo se ha hecho para determinar su módulo de elasticidad en tensión. Sin embargo, con base en esta información limitada, parece ser que su valor es igual a su módulo de compresión.)

Usted podría preguntarse por qué no se supone que el concreto resiste una parte de la tensión en un miembro a flexión y el acero el resto. La razón es que el concreto se agrieta bajo deformaciones unitarias de tensión tan pequeñas, que los esfuerzos tan bajos en el acero hasta ese momento harían su uso antieconómico. Una vez que las grietas por tensión se han presentado, el concreto ya no tiene más resistencia a la tensión.

La resistencia a la tensión del concreto no varía en proporción directa a su resistencia última  $f'_c$  a compresión. Sin embargo, varía aproximadamente en proporción a la raíz cuadrada de  $f'_c$ . Esta resistencia es muy difícil de medir bajo cargas axiales directas de tensión, debido al problema de agarre en los especímenes de prueba, para evitar concentraciones de esfuerzo, y debido también a la dificultad de alinear las cargas. Como resultado de estos problemas, se han desarrollado dos pruebas, más bien indirectas, para medir la resistencia a tensión del concreto. Éstas son la *prueba del módulo de ruptura* y la *prueba radial de cilindro*.

La resistencia a la tensión del concreto en flexión es muy importante al considerar grietas y deflexiones en vigas. Para estas consideraciones se han usado por mucho tiempo las resistencias a tensión obtenidas con el módulo de ruptura. El módulo de ruptura (que se define como la resistencia a la tensión por flexión del concreto) usualmente se mide al cargar una viga rectangular de concreto simple (o sea sin refuerzo) de 6 plg  $\times$  6 plg  $\times$  30 plg (con apoyos simples a 24 plg entre centros) a la falla con cargas concentradas iguales en los tercios del claro, de acuerdo con el método ASTM C78.<sup>18</sup> La carga se incrementa hasta que ocurre la falla por agrietamiento en la cara de tensión de la viga. El módulo de ruptura  $f_r$  se determina entonces con la fórmula de la flexión. En las siguientes expresiones,  $b$  es el ancho de la viga,  $h$  el peralte y  $M$  es  $PL/6$  que es el momento máximo calculado:

$$f_r = \frac{Mc}{I} = \frac{M(h/2)}{\frac{1}{12}bh^3}$$

$$f_r = \text{módulo de ruptura} = \frac{6M}{bh^2} = \frac{PL}{bh^2}$$

El esfuerzo determinado de esta manera no es muy exacto porque al usar la fórmula de la flexión estamos suponiendo que los esfuerzos en el concreto varían en proporción directa a las distancias del eje neutro. Esta hipótesis no es muy buena, por lo que el método de prueba ha sido retirado.

Con base en cientos de pruebas, el código (Sección 19.2.3.1) proporciona un módulo de ruptura  $f_r$  igual a  $7.5\lambda\sqrt{f'_c}$  en donde  $f_r$  y  $f'_c$  están en unidades de lb/plg<sup>2</sup>.<sup>19</sup> El término  $\lambda$  reduce el módulo de ruptura cuando se usan agregados ligeros (véase la Sección 1.13).

La resistencia a la tensión del concreto también se puede medir por medio de la prueba radial.<sup>20</sup> Se coloca un cilindro acostado en la máquina de prueba y se le aplica una carga de compresión uniforme a lo largo de la longitud del cilindro, que está apoyado a todo lo largo de la base (véase la Figura 1.2). El cilindro se fracturará a la mitad de extremo a extremo cuando se alcance su resistencia a la tensión.

<sup>18</sup> American Society for Testing and Materials., 2010, *Standard Test Method for Flexural Strength of Concrete (Using Simple Beam with Third-Point Loading)* (ASTM C78/C78M-10e), West Conshohocken, Pennsylvania.

<sup>19</sup> En unidades SI,  $\lambda f_r = 0.7\lambda\sqrt{f'_c}$  MPa.

<sup>20</sup> American Society for Testing and Materials, *Standard Test Method [Método de prueba estándar]*.



*separación libre mínima entre las varillas de refuerzo.* Pueden usarse tamaños mayores si, de acuerdo con el juicio del ingeniero certificado, la manejabilidad del concreto y su método de consolidación son tales que el agregado en uso no ocasionará la formación de vacíos o de una estructura alveolar.

Los agregados deben ser fuertes, durables y limpios. Si en ellos hay polvo u otras partículas, éstas pueden interferir en la adherencia entre la pasta de cemento y los agregados. La resistencia de los agregados tiene un efecto importante en la resistencia del concreto y las propiedades de los agregados afectan considerablemente la durabilidad del concreto.

Los concretos con resistencias a los 28 días iguales o mayores que 2 500 lb/plg<sup>2</sup> y pesos secos al aire iguales o menores que 115 lb/pe<sup>3</sup>, se denominan concretos *estructurales de peso ligero*. Los agregados usados para estos concretos están hechos con pizarras expandidas de origen volcánico, arcillas cocidas o escorias. Cuando se usan materiales de peso ligero, tanto para los agregados finos como para los agregados gruesos, el concreto resultante se denomina de *peso ligero global*. Si se usa arena para el agregado fino y el agregado grueso se reemplaza con agregado de peso ligero, el concreto resultante se denomina de *arena y peso ligero*. Los concretos hechos con agregados de peso ligero no son tan durables o robustos como los hechos con agregados de peso normal.

Algunas de las propiedades estructurales del concreto son afectadas por el uso de agregados ligeros. El Código ACI 318-14, Sección 19.2.4 requiere que el módulo de ruptura sea disminuido por la introducción del término  $\lambda$  en la ecuación

$$f_r = 7.5\lambda \sqrt{f'_c} \quad (\text{Ecuación ACI 19.2.3.1})$$

$$\text{o, en unidades SI con } f'_c \text{ en N/mm}^2, \quad f_r = 0.7\lambda \sqrt{f'_c}$$

El valor de  $\lambda$  depende del agregado que se reemplazó con material ligero. Si sólo se reemplaza el agregado grueso (concreto de arena y peso ligero),  $\lambda$  vale 0.85. Si la arena también se reemplaza con material ligero (concreto de peso ligero global),  $\lambda$  vale 0.75. La interpolación lineal está permitida entre los valores de 0.85 y 1.0, así como también de 0.75 a 0.85 cuando se usa el reemplazo parcial con material ligero. Alternativamente, si se especifica la resistencia a la tensión radial promedio del concreto ligero,  $f_{ct}$ , en la Sección 19.2.4.3 del Código ACI 318-14 se define a  $\lambda$  como

$$\lambda = \frac{f_{ct}}{6.7\sqrt{f'_{cm}}} \leq 1.0$$

donde  $f'_{cm}$  es la resistencia al concreto promedio de compresión medida en lb/plg<sup>2</sup>.

Para concreto de peso normal y para concreto que tiene agregado fino de peso normal y una mezcla de agregado ligero y agregado grueso de peso normal,  $\lambda = 1.0$ . El uso de concreto con agregado ligero puede afectar las deflexiones en las vigas, la resistencia al corte, el coeficiente de fricción, las longitudes de desarrollo de las varillas de refuerzo, de los ganchos y el diseño del concreto pretensado.

## 1.14 CONCRETOS DE ALTA RESISTENCIA

A los concretos cuyas resistencias a compresión exceden de 6 000 lb/plg<sup>2</sup> se les llama *concretos de alta resistencia*. También se les llama *concretos de alto desempeño* porque tienen otras características excelentes, además de su alta resistencia. Por ejemplo, la permeabilidad baja de tales concretos los hace muy durables con respecto a los diferentes agentes físicos y químicos que actúan sobre ellos y pueden ocasionar que el material se deteriore.

Hasta hace unas cuantas décadas, los ingenieros estructurales consideraban que las compañías de premezclado no podían entregar concretos con resistencias a compresión mucho mayores que 4 000 lb/plg<sup>2</sup> o 5 000 lb/plg<sup>2</sup>. Sin embargo, actualmente éste no es el caso, ya que estas mismas compañías pueden entregar ahora concretos con resistencias a compresión de hasta por lo menos 9 000 lb/plg<sup>2</sup>. Se han usado aun concretos más resistentes. En *Two Union Square* en Seattle, se obtuvieron resistencias de hasta 19 000 lb/plg<sup>2</sup>