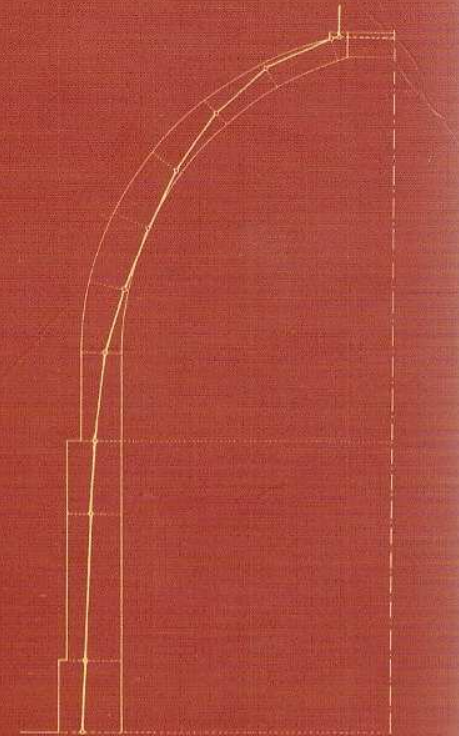
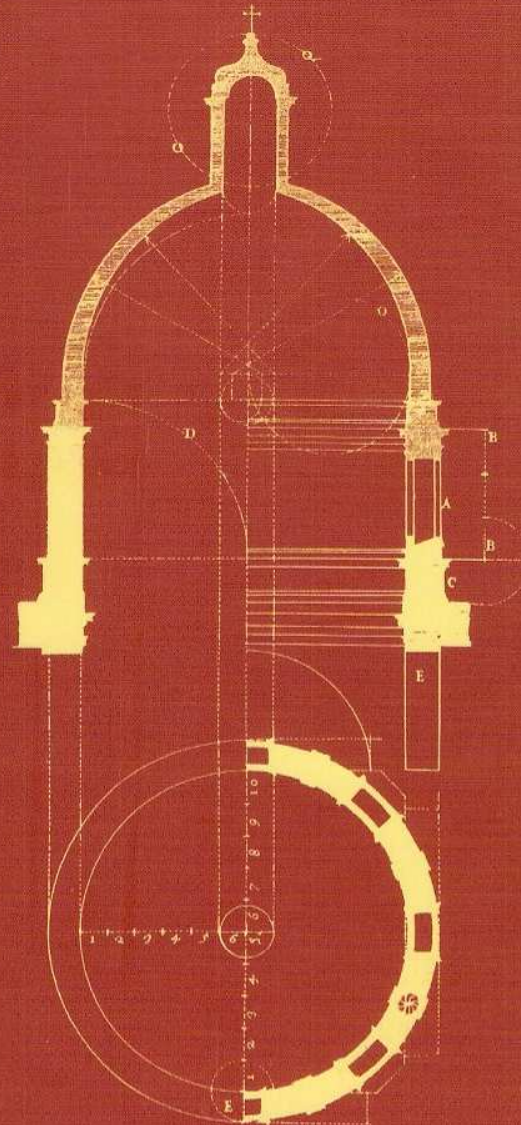


Arcos, bóvedas y cúpulas

Geometría y equilibrio en el cálculo tradicional de estructuras de fábrica

Santiago Huerta



Instituto Juan de Herrera
ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR
DE ARQUITECTURA DE MADRID

Arcos, bóvedas y cúpulas

Las grandes obras de arquitectura del pasado debieron ser "calculadas" de alguna forma. Los edificios expresan una maestría que debe surgir de algún tipo de conocimiento ordenado, de una teoría. Esta teoría tradicional, distinta de la teoría científica actual, serviría para decidir la geometría y dimensiones de los elementos estructurales de las construcciones de fábrica. ¿Cuál debe ser el estribo para esta bóveda? Ésta es la pregunta que ha sido respondida en cada época para cada tipo estructural.

Un examen de las fuentes documentales que han llegado hasta nosotros (manuscritos, tratados de arquitectura y construcción, informes y peritajes, etc.) revela que los antiguos constructores emplearon reglas de proyecto esencialmente geométricas. Además, la mayor parte de estas reglas son "proporcionales", esto es, independientes del tamaño. Por ejemplo, los romanos daban al tambor de las cúpulas $1/7$ del vano; para las bóvedas renacentistas y barrocas, solía darse al estribo al menos un $1/3$ de la luz, etc.

Para un arquitecto o ingeniero moderno estas reglas pueden parecer "acientíficas", cuando no groseramente incorrectas. Pero usándolas se construyeron Santa Sofía, las catedrales góticas o San Pedro de Roma. Debe haber algo esencialmente correcto en el corazón de estas reglas, algo que recoja la esencia del cálculo estructural de las fábricas.

Este aspecto es, precisamente, el énfasis en la forma geométrica. Las reglas recogen, de forma condensada para su uso por maestros expertos, proporciones estables. El moderno análisis límite llega a las mismas afirmaciones de tipo geométrico. Un largo cálculo científico desemboca, finalmente, en conclusiones geométricas. En este libro se explora la estabilidad de las fábricas desde ambos puntos de vista: el tradicional y el científico. Ambos enfoques se complementan y permiten una comprensión más profunda de las obras abovedadas de fábrica.

Arcos, bóvedas y cúpulas

Geometría y equilibrio en el cálculo
tradicional de estructuras de fábrica

Santiago Huerta

INSTITUTO JUAN DE HERRERA
Escuela Técnica Superior de Arquitectura
Madrid

A la memoria de mi madre,
de mi padre, y de mi hermano José

© Santiago Huerta Fernández

De la presente edición:

© Instituto Juan de Herrera, 2004

Todos los derechos reservados

ISBN: 84-9728-129-2

Depósito Legal: M. 48.332-2004

Cubierta: Regla de Carlo Fontana (1694) para las cúpulas simples,

y su verificación mediante el dibujo de la correspondiente línea de empujes.

Prefacio	xi
1 Introducción: El cálculo de estructuras de fábrica	1
PRIMERA PARTE: EL CÁLCULO CIENTÍFICO	
2 El material: la fábrica	11
3 Equilibrio: líneas de empujes	35
4 Análisis límite de arcos y estribos	71
SEGUNDA PARTE: EL CÁLCULO TRADICIONAL	
5 La Edad Media	133
6 El Renacimiento	181
7 Rodrigo Gil de Hontañón	207
8 El siglo XVII	239
9 El siglo XVIII	287
10 Epílogo de una tradición: el siglo XIX	375
TERCERA PARTE: GEOMETRÍA Y EQUILIBRIO	
11 Validez del cálculo tradicional	387
12 Conclusiones	517
Apéndice A: Historia breve de la teoría científica de arcos y bóvedas	523
Apéndice B: Fractura de estribos de fábrica	533
Notas	537
Bibliografía	563
Índice de nombres y lugares	587
Índice de temas	597

El ámbito de este libro es la Historia de la Construcción, disciplina que mira a las obras de arquitectura e ingeniería civil desde un punto de vista técnico. Mi interés por la Historia de la Construcción nació ya durante mis estudios en la Escuela de Madrid, y recuerdo en particular las clases del profesor Fernández Huidobro, en las que explicaba la construcción de las bóvedas romanas o bizantinas con la misma minuciosidad que la que dedicaba, por ejemplo, a la modernas estructuras tensadas. He sabido después que seguía el enfoque iniciado por Viollet-le-Duc y Choisy en la segunda mitad del XIX, que fue seguido después con entusiasmo por otros profesores como Gato y Torres Balbás.

La llegada de la arquitectura moderna barrió casi por completo el interés por las construcciones históricas, si bien en el decenio de los años 1980 podían detectarse signos de una renacida atención. Pensé, entonces, que una manera de saber si la Historia de la Construcción era una disciplina, consistía en realizar una investigación bibliográfica: si se encontraban suficientes referencias que encajaran en la idea antedicha, podría afirmarse «empíricamente» que la disciplina existía. Así sucedió en este caso, y fue una agradable sorpresa descubrir que el camino iniciado a finales del siglo XIX, fue continuado, de forma más o menos irregular después. En apenas dos años de trabajo pude recopilar más de un millar de referencias sobre diversos aspectos de la técnica constructiva histórica y

me sorprendió la diversidad de revistas y ámbitos en que aparecían estas publicaciones.

Decidí entonces escribir una tesis sobre bóvedas, que el profesor Aroca aceptó dirigir. El campo de búsqueda se estrechó, pero siguieron apareciendo numerosas referencias que confirmaron la intuición previa. El trabajo se centró en el cálculo tradicional de arcos y bóvedas. Un mejor entendimiento del problema requería el estudio del comportamiento estructural. En este tema encontré en las teorías del profesor Heyman una ayuda inestimable que, desde entonces, ha guiado mis investigaciones. Gracias al profesor Heyman, descubrí no sólo la moderna teoría del análisis límite, sino la antigua teoría científica. El estudio de la historia de la teoría de arcos y bóvedas demostró ser fundamental para una mejor comprensión de los problemas. Después, finalizada la tesis en 1990, empecé mi trabajo editorial sobre Historia de la Construcción y me impliqué en peritajes sobre edificios históricos con problemas estructurales. Ambas actividades sirvieron para sedimentar y profundizar los conocimientos adquiridos. En particular la elaboración de peritajes ha sido enormemente instructiva. Un peritaje debe responder a preguntas concretas, y encontré que el análisis límite y su principal corolario, el enfoque del equilibrio, suministraba la mejor herramienta para comprender este tipo de edificios. Por otra parte, las reglas tradicionales proporcionaban en muchos casos la primera orientación, crucial, a la hora de determinar la naturaleza de los problemas.

Este libro recoge los intereses antes citados. Las referencias bibliográficas y las citas son numerosas, si bien se ha tratado de reducirlas al mínimo. Pero me ha parecido útil, siempre que ha sido posible, dejar hablar a los maestros del pasado. La tradición de la construcción de fábrica ha desaparecido casi por completo y el arquitecto o ingeniero actual, cuando quiere comprender este tipo de edificios, se enfrenta a su propia ignorancia. La construcción de arcos y bóvedas, que fue considerada por Tosca «lo más sutil y primoroso de la arquitectura», nos es ajena. Nunca hemos visto levantar una sencilla bóveda. Carecemos del oficio y experiencia del antiguo constructor, que seleccionaba la piedra, dibujaba las plantillas para cortarla, trazaba la cimbra, dirigía el proceso de construcción y, finalmente, supervisaba el descimbrado. Tenemos mucho que aprender de los arquitectos e ingenieros del pasado. Por supuesto, estamos de acuerdo con la rotunda afirma-

ción de Mignot en el peritaje de la catedral de Milán: *Ars sine scientia nihil est*, la práctica no es nada sin la teoría. Pero la teoría sin la práctica está vacía de contenido. La práctica, en nuestro caso, debemos buscarla en los edificios construidos y en lo que podamos extraer de la lectura crítica de los antiguos tratados de arquitectura e ingeniería, todo ello dentro de un marco teórico adecuado.

La Historia de la Construcción ha empezado ya a perfilarse como una disciplina independiente. El presente libro pretende contribuir a la formación y difusión de esta disciplina que no sólo puede aportar datos como «ciencia auxiliar» a otros campos ya consolidados como la Teoría e Historia de la Arquitectura, la Arqueología o la Restauración y Rehabilitación de edificios, sino que merece por su propio interés y amplitud formar un ámbito específico. Los estudios pioneros de Viollet-le-Duc y Choisy deben ser continuados. El aspecto técnico no es el único ni el más importante, pero es fundamental para completar nuestra visión de las obras históricas de arquitectura e ingeniería.

AGRADECIMIENTOS: Los trabajos relacionados con este libro se extienden a lo largo de más de dos decenios. En este tiempo, multitud de personas me han prestado ayuda. A veces una fotocopia, un comentario o una referencia; otras han dedicado una parte sustancial de su tiempo. No hay espacio para agradecer individualmente a todas estas personas, pero espero que cada una de ellas, si cae en sus manos este libro, reconozca su ayuda, y sienta mi profundo agradecimiento.

No obstante, quisiera mencionar a quienes han tenido una relación más directa con esta publicación. El profesor Ricardo Aroca aceptó dirigir mi tesis doctoral que es el germen de este libro y me animó a iniciar mi actividad como editor. Siempre ha estado disponible y me ha orientado y apoyado durante todos estos años. Su insistencia en los aspectos geométricos del proyecto estructural ha marcado sin duda mis investigaciones. El ingeniero Antonio de las Casas, que fue gerente del CEHOPU durante un productivo decenio, ha insistido durante largo tiempo en esta publicación, recordándome una y otra vez esta tarea tantos años pendiente. El profesor Pedro Navascués también me animó en este sentido, y de sus clases nació, como estudiante de arquitectura, mi interés por los estudios históricos. Con el profesor Jacques Heyman tengo una deuda intelectual inmensa, que espero haya quedado patente a lo largo de todo el libro. Hace más de un de-

cenio tuve la fortuna de conocerle personalmente y, desde entonces, he mantenido un contacto regular con él. Con gran amabilidad, siempre ha estado dispuesto a discutir problemas complejos y a responder a mis, quizá demasiado numerosas, preguntas.

Este trabajo se inició con un fin completamente investigador y académico, sin pensar en su posible aplicación práctica. El profesor José Miguel Ávila y el arquitecto Manuel Manzano-Monís me hicieron darme cuenta de que estos estudios podían ser útiles en el ámbito del análisis y consolidación de edificios históricos, y me iniciaron en un campo en el que he trabajado con intensidad en el último decenio. La profesora Gema López me ha ayudado durante el largo proceso de edición y ha elaborado los detallados índices finales. Su trabajo minucioso ha eliminado numerosas incorrecciones; no obstante, soy responsable de cualquier error que haya podido permanecer.

Finalmente, me gustaría señalar que cualquier trabajo de investigación en España es, todavía hoy, como una carrera de fondo en solitario. Cuando falta el apoyo oficial, y social, el apoyo personal de la familia y los amigos adquiere un carácter crucial. Sin este apoyo no habría podido llevar a término, para bien o para mal, este libro. Mis padres y mi hermano José no han vivido para verlo terminado. Este libro está dedicado a su memoria.

1

Introducción: El cálculo de estructuras de fábrica

La construcción de fábrica (de piedra, ladrillo o adobe) surge con los primeros asentamientos permanentes, con la agricultura y las primeras ciudades, con el nacimiento de la civilización. Hay un deseo evidente de permanencia frente al paso del tiempo. Las primeras construcciones tenían muros de fábrica sobre los que apoyaban troncos de árbol para formar los suelos o techumbres. El siguiente paso consistió en cubrir el espacio también con fábrica. La manera natural de salvar un vano a base de pequeñas piedras o ladrillos es formar un arco, y el arco se inventa en Mesopotamia o Egipto hace unos 6.000 años.¹ El cómo se pudo llegar a esta idea es un misterio, pero que no es algo evidente lo demuestra que otras culturas, por ejemplo los mayas o los incas, construyeron en fábrica durante siglos sin jamás llegar a la idea del arco.

Un arco típico se construye apilando piedras unas al lado de las otras sobre una estructura auxiliar de madera o cimbra. La cimbra da la forma al arco; se empiezan a colocar las piedras a partir de los arranques y colocada la última piedra en el centro, la clave, el arco queda terminado. Al bajar la cimbra las piedras tienden a caer hacia abajo. Así, una dovela que intenta caer empuja a las dos dovelas colindantes que contrarrestan ese empuje, y los empujes se van transmitiendo, incrementados por los pesos. Si la forma del arco es correcta, y su espesor suficiente, estos empujes y contraempujes se anularán entre sí y el arco permane-

Índice de nombres y lugares

- Abelardo de Bath, 136
Abiell, Guillermo, 174
Abraham, Pol, 467, 480, 541n.11
Ackerman, James, 138, 544n.20
Adda, puente sobre el río, 176, 405, 406
Adriano, puente de, 190
Agüera Ruiz, Antonio, 550n.14
Alais, chimenea, 500, 560n.48
Alberti, Leon Battista, 146, 151, 178, 181-193, 194, 195, 203, 204, 205, 206, 241, 246, 247, 248, 249, 251, 252, 253, 254, 259, 261, 263, 265, 266, 274, 275, 286, 290, 292, 305, 307, 313, 314, 315, 318, 323, 326, 329, 341, 357, 401, 404, 422, 434, 436, 459, 496, 511
Albi, catedral de, 495, 544n.22
Alcalá, convento de las Bernardas, 559n.34
Alcántara, puente de, 252
Allier, puente en Vieille-Brioude sobre el río, 555n.24
Alomar, Gabriel, 544n.22
Alonso, Miguel Angel, 550n.12
Alzola y Minondo, Pablo, 545n.31
Amiens, 495, 544n.22
Antemio de Tralles, 136, 542n.2
Antigoni, Antonio, 174
Aragon, Ernest, 105
Aragón, 544n.22
Arcueil, piedra de, 362
Aristóteles, 240, 265
Aroca Hernández-Ros, Ricardo, 556n.3
Arquímedes, 136, 543n.16
Arrúe Ugarte, Begoña, 178
Ars, chimenea de, 500
Arvei, Pere, 544n.24
Arzobispo, puente del, 252
Asinelli, torre, en Bolonia, 499
Asociación de Ingenieros y Arquitectos austríacos, 27, 73, 82, 527, 539n.3
Asinelli, torre, 176
Audoy, 86, 87, 95, 96, 104, 105, 526
Babinger, F., 556n.6
Baccojani, 142, 144, 147
Bacon, Francis, 263
Báez Macías, Eduardo, 546n.11
Bails, Benito, 369, 372-374
Baker, John, 79, 126, 128, 539n.3, 540n.5, 7
Baldi, Bernardino, 182, 240, 263-266, 299, 545n.1, 550n.15
Barbaro, Daniel, 200, 201
Barberot, Étienne, 380
Barcelona, 169, 170, 172, 174, 544n.24; casa Milá, 554n.16; catedral, 172, 544n.24;

Barcelona (*continuación*)
 Lonja de Mercaderes, 544n.24; Sagrada Familia, 472; Santa María del Pino, 544n.22
 Bargués, Arnau, 544n.24
 Barlow, William Henry, 51, 52, 53, 57, 539n.5
 Bartola, Cósimo de, 181, 190
 Barr, Archibald, 392
 Barroco, 141, 458, 461, 463, 521, 559n.35
 Barthel, Rainer, 467
 Bassegoda, Joaquín, 171, 544n.23
 Bauschinger, Johann, 537n.2
 Baxter, J. W., 407
 Beauvais, 28, 29, 494, 495, 532, 544n.22
 Becchi, Antonio, 523, 545n.1, 550n.15, 552n.36
 Bechmann, Roland, 542nn.5, 6
 Beckett Denison, E., 530, 558n.27
 Bédidor, Bernard Forest de, 104, 287, 345, 352, 356, 358, 369, 371–372, 374, 524, 526, 529, 541n.14
 Benedicto XIV, 529
 Benvenuto, Edoardo, 523, 538n.3, 550n.17, 556n.1
 Benouville, Léon, 28, 532, 538n.13
 Beranek, W. J., 472
 Bérard, Joseph-Balthasar, 529
 Bergier, Nicolas, 315
 Berlín; ordenanza de, 538n.8; Staatsbibliothek, 553n.6
 Bernard, viaduc du, 393, 406
 Bernini, Gianlorenzo, 463, 465
 Bernoulli, Johann, 342
 Besenval, Roland, 537n.1
 Betty Langley, 151, 153
 Biblia, 133
 Biblioteca de la Escuela Técnica Superior de Arquitectura de Madrid, 148, 150
 Biblioteca de Ingenieros del Ejército de Madrid, 145
 Biblioteca Nacional de Madrid, 256, 546n.2
 Biegholdt, H.-A., 537n.2
 Binding, Günther, 543n.7
 Bizancio, 133, 136, 453
 Bland, William, 541n.15
 Blondel, François, 142, 240, 284–286, 300, 302, 306, 322, 323, 324, 325, 326, 329, 338, 345, 346, 374, 380, 431, 552n.36

Blondel, Jacques-François, 372, 555n.27
 Blouet, Abel, 555n.1
 Boistard, L. C., 15, 18, 80, 81, 96, 526
 Bolfrand, Germain, 360, 555n.25, 361
 Bofill, Guillermo, 173, 174, 175, 489, 490
 Bollig, Hermann, 512
 Bolonia, 176, 560n.43; torre Asinelli, 499; torre Garisenda, 499
 Bonet Correa, Antonio, 543n.9, 549n.3
 Borelli, Giovanni Alfonso, 556n.3
 Borgnis, J.-A., 526, 555n.3
 Bosch, Pere Ramon, 170, 544n.24
 Boscovich, R., 455, 458, 529, 531, 558nn.26, 28
 Bossut, Charles, 60, 529, 531, 555n.28
 Bouguer, Pierre, 528, 529, 531, 558nn.20, 23
 Bramante, Donato, 200, 274, 275, 283
 Branca, Juan, 552n.33
 Brescia, Loggia de, 193, 194, 195, 198, 199, 465
 Brunelleschi, Filippo, 186, 187, 188, 436, 451
 Bulmer-Thomas, I., 542n.3
 Butin, A., 560n.48
 Cabezas, fray Francisco, 274
 Cabin John, acueducto de, 406
 Caille, Puente de en Cruseilles, 406–407
 Cain, W. M., 111, 112, 541n.15
 Calladine, Ch., 541n.16
 Calvo, José, 543n.8, 543n.9
 Camacho, Rosario, 555n.28
 Cambridge, equipo de, 126–127, 539n.3
 Camón Aznar, José, 546n.2
 Candela, Félix, 127
 Canet, Antonio, 174
 Capua, 194
 Caramuel, Juan de, 411
 Carasona, St. Vincent, 495, 544n.22
 Carrasco Hortal, José, 545n.27
 Carrillo de Albornoz, M., 560n.45
 Carvallo, 526
 Casaseca, Antonio, 546n.1
 Cassinello, Fernando, 380
 Castellón de Ampurias, 174

Castigliano, C. A. P., 72, 73, 527
 Cataneo, Pietro, 261, 263
 Cejka, Jan, 121, 122
 Chanfón, Carlos, 546n.2, 550n.10
 Chappuis, René, 559n.33
 Charlton, T. M., 523
 Chartres, catedral, 168, 495, 544n.20
 Chezy, 368, 526
 Chiorino, Mario Alberto, 559n.34
 Chitty, L., 540n.7
 Choisy, Auguste, 184, 391, 392, 466, 544n.18
 Chrimes, Mike, 557n.10
 Claudel, J., 538n.8
 Clapeyron, E., 529
 Coenen, Ulrich, 151–153, 157, 543n.11, 544n.17
 Collignon, Edouard, 15, 16, 538n.12
 Colonia; biblioteca, 543n.11; catedral de, 495; iglesia de S. Gereon, 559n.33
 Colonia, Francisco de, 202
 Colrat, Maestre, 179
 Coma, Pere, 170, 544n.24
 Conforti, Claudia, 559n.32
 Constantino, Basílica de, 544n.22
 Constantinopla, 556nn.6, 7
 Córdoba, San Hermenegildo, 559n.34
 Coste, Anne, 467
 Coulomb, Charles Augustin, 26, 80, 86, 104, 109, 116, 117, 374, 525, 526, 528, 538n.10, 539n.1
 Couplet, Pierre, 79, 95, 97, 304, 339, 343, 345, 374, 525, 526
 Cowan, Henry J., 545n.3, 560n.46
 Cremona, campanile «il Toraccio», 499
 Croizette-Desnoyers, Ph., 105, 382, 402, 538n.7
 Cruseilles, puente de Caille, 406–407
 Culmann, Karl, 527, 530
 Curcio, G., 551n.19
 D'Amelio, Maria Grazia, 551n.23
 Danyzy, A. A. H., 79, 80, 332–338, 345, 374, 417, 526, 553nn.10, 11, 12, 554nn.13, 14
 Debo, Ludwig, 537n.2, 538n.8
 Dejardin, 538n.8, 382

Delbecq, Jean-Michel, 14, 17, 22, 25, 538n.9
 Delft, 542n.25
 Demanet, A., 555n.4
 Derand, François, 142, 143, 147, 306, 349
 Dietlein, J. F. W., 530
 Dischinger, Franz, 530, 558n.19
 Domenge, Joan, 508, 512
 Dorn, Harold L., 6, 545n.1, 550n.15, 552n.29, 555n.28, 556n.8
 Douglass, James, 58
 Downey, Glanville, 136
 Drucker, D. C., 88
 Dubosque, J., 557n.16
 Dunn, William, 437, 440
 Dupuit, J., 64, 65, 66, 111, 112, 382, 402, 406, 538n.1, 556n.5
 Durand-Claye, Alfred, 73, 526, 530
 Durero, Alberto, 166, 167, 265
 Durm, Josef, 39, 454, 544n.22
 Ebro, río, 178–179, 191
 École des Ponts et Chaussées, 356, 530
 biblioteca, 358, 554nn.21, 555n.25, 22, 23, 361, 365
 Eddy, Henry T., 439, 441, 530, 558n.21
 Egipto, 1
 El Escorial, 11; bóvedas de, 550n.12; cúpula, 259, 260
 El-Naggar, Salah, 537n.1
 Enciclopedia Británica, 53
 Engesser, Fr., 24, 28, 73, 540n.5
 Escuela de Arquitectura de Madrid, 550n.12
 Espie, Comte de, 549n.5
 Esselborn, C., 380, 555n.3
 Estambul, puente sobre el Cuerno de Oro, 404, 556nn.6, 7
 Estrasburgo, 176, 507, 508, 515, 544n.22
 Euclides, 136, 137
 Europa, 239, 263, 526
 Ewing, J. A., 53
 Exeter, catedral de, 561n.54
 Eytelwein, J. A., 526
 Ezequiel, libro de, 133
 Fabri, H., 550n.17
 Felipe II, 201, 203

- Fergusson, James, 436, 451, 452, 540n.5, 552n.28
 Florencia; campanile, 499; Santa María del Fiore, 390, 391, 451, 453, 454, 455, 457, 461, 551n.19
 Flügel, Wilhelm, 558n.19
 Foce, Federico, 109, 523, 526, 542n.19, 555n.2, 555n.28
 Fontana, Carlo, 201, 239, 266–278, 445, 458–461, 462, 551nn.18–22, 25
 Fontana, Domenico, 267, 551n.19
 Föppl, August, 57, 412, 441, 442, 530
 Francia, 178, 500, 524, 526, 544n.22, 549n.5, 556n.6
 Frankl, Paul, 133, 134, 138, 466, 543n.7, 544n.20
 Freigang, Christian, 544n.20
 Frenoya, Johan de, 179
 Fresnel, L., 495, 560n.48
 Freyssinet, E., 393, 406, 407, 546n.16
 Frézier, A. F., 80, 276, 285, 293, 332, 334, 336, 338–352, 355, 357, 370, 372, 374, 466, 397, 528, 529, 553nn.10, 11, 554n.17, 18
 Frontino, 181
 Fuller, G., 47, 97
 Gaitanas, iglesia de las, 549n.8
 Galatta, puente de, 556n.6
 Galilei, Galileo, 5, 239, 387–394, 403, 487, 546n.2, 550n.15, 556nn.2, 3
 García, Simón, 207, 210, 211, 217, 219, 223, 224, 226, 229, 231, 233, 239, 256–263, 546n.2, 550nn.9, 10, 11, 12, 551n.24, 557n.17
 García Barriuso, P., 551n.24
 García Berruguilla, Juan, 302–305, 306, 374, 420, 431
 García-Diego, José Antonio, 203
 García-Tapia, Nicolás, 203
 García Llana, Joaquín, 547n.3
 García Salinero, Fernando, 546n.14
 Garidel, 526
 Gaudi, Antoni, 56, 58, 61, 62, 127, 342, 376, 398, 470, 472, 509, 530, 554n.16, 557n.14, 558n.22
 Gauthey, Emiland Marie, 13, 109, 276, 364, 380, 382, 397, 455, 458, 529, 537n.5, 541nn.13, 14, 545n.5
 Gautier, Hubert, 189, 314–332, 338, 341, 345, 352, 353, 355, 356, 360, 361, 362, 363, 366, 374, 378, 401, 434, 517, 521, 526, 537n.5, 545n.5, 546n.15, 555n.25
 Gamla Linköping, 119, 120
 Gentil Baldric, José María, 559nn.34, 35
 Gerona, 108, 138, 148, 168, 169–176, 488, 489, 490, 495, 544n.20, 545n.27
 Gerstner, Franz, 62, 63, 526, 538n.1
 Gil de Hontañón, Juan, 207, 494
 Gil de Hontañón, Rodrigo, 8, 166, 184, 207–237, 246, 254, 256, 261, 398, 419, 420, 421, 422, 426, 468, 474, 476–478, 485, 490–494, 495, 496, 499, 501, 511, 519, 543n.16, 546nn.1–15, 553n.4
 Gillispie, Ch. C., 542nn.1, 2
 Gladesville, puente de, en Australia, 407
 Gol Gumbaz, 451, 455, 452, 457
 Gómez-Moreno, Manuel, 559n.33
 Gonin, E., 555n.3
 González Moreno-Navarro, J. L., 555n.1
 Gordon, J. E., 537n.3
 Göritz, viaducto de Saleano, 29
 Gottgetreu, Rudolph, 455, 456, 558n.29
 Götz, Wolfgang, 559n.33
 Gouilly, A., 560n.44
 Graefe, Rainer, 58, 529
 Granada; Alhambra de, 254, 305; catedral, 538n.2
 Grassnick, Martin, 532, 559n.38
 Grecia, 135
 Greenberg, H. J., 88, 528
 Gregory, David, 54, 62, 128, 524, 529
 Grosvenor, puente de, 66
 Guadet, J., 557n.14, 560n.47
 Gual, Bartolomé, 174
 Guarini, Guarino. Ver Vittone
 Guastavino, Rafael, padre, 26, 85, 86, 97, 549n.5, 552n.28
 Guastavino, Rafael, hijo, 440, 558n.22
 Güell; iglesia de la colonia, 472, 530; parque, 61, 62, 530
 Guimarei, iglesia de, Lugo, 124

- Guinguamps, Juan de, 174
 Gvozdev, A. A., 88, 127, 528, 542n.25
 Gwilt, Joseph, 555nn.3, 4
 Habana, torre del puerto, 560n.45
 Hagen, Gotthilf, 558n.23
 Hager, Helmut, 551nn.18, 19, 20
 Hahnloser, Hans R., 139, 140, 542nn.5, 6
 Hanover, escuela de, 486
 Harvey, B., 60, 61
 Hase, C. W., 380, 486
 Hatzel, E., 399, 400
 Hecht, Konrad, 134, 543n.12
 Heidelberg, biblioteca de, 543n.11
 Henkel, Otto, 539n.4
 Hernán Ruiz el Joven, 148–149, 150, 151, 152, 553n.4
 Herón de Alejandría, 135, 136, 542n.1
 Herranz y Laínz, C., 178, 179, 545n.31
 Hernando García, J. I., 533, 541n.16
 Hertwig, A., 136, 527, 540n.4
 Heyman, Jacques, 7, 12, 31–34, 43, 44, 54, 74, 75, 76, 77, 82, 83, 85, 88, 89, 91, 92–93, 94, 95, 97, 98, 99, 107, 111, 112, 118, 122, 126, 127, 128, 133, 134, 347, 401, 403, 434, 435, 437, 438, 439, 442, 443, 447, 449, 450, 467, 469, 479, 480, 481, 482, 501, 517, 518, 523, 524, 528, 530, 533, 537n.5, 538n.10, 539n.2, 539n.5, 539n.6, 540n.7, 540n.8, 541n.16, 542n.22, 543n.8, 543n.12, 543n.15, 545n.4, 552n.26, 552n.29, 552n.36, 556nn.1, 2, 558n.19, 558n.23, 558n.26, 560n.49
 Hoag, John, 231, 546n.1
 Hoffstadt, Friedrich, 543n.14
 Hooke, Robert, 36, 53, 54, 55, 56, 82, 92, 128, 240, 278, 342, 344, 374, 398, 438, 444, 470, 524, 528, 552n.29, 558n.23
 Horne, M. R., 88, 126, 127, 539n.3
 Howe, M. A., 527
 Huerta, Santiago, 56, 78, 105, 109, 108, 123, 124, 376, 472, 526, 533, 541n.16, 540n.6, 542n.19, 542n.23, 543n.8, 549n.5, 554n.16, 555n.28, 557n.14, 558n.22
 Hutton, Charles, 58
 Inglaterra, 500, 524, 526
 Instituto de Francia, 404
 International Recommendations for Masonry Structures, CIB Report, Publication 58, 538n.9
 Italia, 204, 263, 458, 461
 Jacquier, T., 455, 458, 529, 531, 558nn.26, 28
 Jaussner, 28
 Jenkin, 53, 128
 Julbe, Juan y Pascasio, 174
 Kaiser, 539n.10
 Karlsruhe, biblioteca, 543n.11
 Kepler, Johannes, 263
 Kerisel, 545n.29
 Kist, N. C., 542n.25
 Knoop, G., P. Jones y D. Hamer, 542n.4
 Kobell, 530, 558n.27
 Koepf, Hans, 155, 158, 160, 161, 164, 168
 Kohnke, R., 439, 530
 Kooharian, 88, 528
 Körner, Carls, 380, 467, 470, 471, 532
 Krafft, 560n.44
 Kubler, George, 208, 209, 231, 240, 549n.1
 Kurrer, Karl-Eugen, 523, 538n.1, 539n.2
 La Hire, 5, 104, 105, 276, 286, 287, 304, 319, 322, 339, 340, 345, 346, 352, 368, 374, 524, 525, 526, 529, 539n.1, 552n.36
 Lamé, G., 529
 Lamprecht, H. O., 25
 Landshut, S. Martin, 512, 513, 532
 Laroque. Ver Claude, 538n.8
 Lastanosa, Juan de, 203
 Lauenstein, R., 103, 539n.4
 Lechler, Lorenz, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 163, 164, 165, 167, 168, 543n.11, 544n.19
 Le Seur, F., 455, 458, 529, 531, 558nn.26, 28
 Leibniz, G. W., 342
 Lemonnier, Henry, 552n.35
 Lesguiller, 381, 382
 Leupold, Jakob, 545n.5
 Leveillé, 381, 382
 Limmat, puente sobre en Wettingen, 557n.9

- Llaguno y Almirola, E., 240, 288, 305, 369, 544n.20, 545n.26, 549n.2, 552n.2, 553n.5, 555n.29
- Londres, 24
- San Pablo de, 29, 278, 283
- López Gayarre, P. A., 549n.4
- López Manzanares, Gema, 20, 22, 23, 25, 123, 124, 542n.23, 551n.18, 22, 23, 25, 552n.26, 558n.20
- López Mozo, Ana, 550n.12
- Lucca, campanile de, 499
- Lugo, Guimarei, 124
- Luxemburgo, puente de, 29
- Madrid, San Francisco el Grande, 267, 274, 305, 457
- Maillart, Robert, 127
- Mainstone, Rowland J., 5, 186, 187, 448
- Mairle, Lorenz, 540n.4
- Mallorca, Palma de, catedral, 29, 108, 170, 494, 495, 508-512, 532
- Malta, iglesia de Mosta, 457
- Manresa, 174
- Mantes, puente de, 554n.22
- Mañas Martínez, José, 543n.9
- Marcelo, teatro de, 194
- Marconi, Nicoletta, 551n.23, 25
- Mariátegui, Eduardo, 546n.2
- Mark, Robert, 153, 467, 532
- Marva y Mayer, José, 18, 19, 24, 26, 379, 382, 537n.2
- Martínez de Aranda, Gines, 142, 145, 146, 147, 246, 307, 396, 543nn.8, 9
- Matheu Mulet, P. A., 512
- Maunder, E. W. A., 561n.54
- Mayniel, 109, 541n.13
- Medina de Rioseco, iglesia del convento de San Francisco, 482
- Mehrtens, G. C., 47
- Menéndez Pidal, Gonzalo, 543n.7
- Méry, E., 36, 86, 87, 95, 96, 97, 101, 526, 538n.1, 2
- Mesopotamia, 1, 17
- Mesqui, Jean, 177, 178, 545n.29, 30
- Miecheville, chimenea de, 500, 560n.48
- Michon, 116, 121, 382, 479, 526, 530
- Mieres, Guillem, 170, 544n.24
- Miguel ngel Buonarroti, 455
- Mil, casa, 554n.16
- Milán, 168, 544n.20
- Milankovitch, Milutin, 38, 95, 423, 539n.8
- Milliet de Chales, Claude-François, 306, 553n.3, 4
- Millington, John, 560n.45
- Módena, la Ghirlandina, campanile, 499
- Mohr, Otto, 533, 540n.5
- Mohrmann, Karl, 380, 399, 423, 466, 472, 480-482, 483, 486, 487, 488, 505, 506, 507, 508, 530, 538n.8, 543n.10, 15, 560n.49
- Monasterio, Joaquín, 109, 110, 111, 116, 117, 121, 526, 541n.14, 542n.19, 555n.28
- Monier, sistema de, 82
- Montefiascone, Santa Margarita, 266, 272, 273, 274, 551n.18, 20
- Montepulciano, San Biagio, 390, 391
- Montpellier, Academia, 553n.9, 10
- Morbegno, puente de, 29
- Morey, Guillem, 170, 544n.24
- Morley, Arthur, 47
- Mortet, Victor, 544n.20, 545n.30
- Moseley, Henry, 36, 37, 38, 64, 72, 106, 423, 525, 526, 527, 538n.1, 540n.8, 542n.20, 554n.13
- Mosta, iglesia de, en Malta, 457
- Mota, Guillermo de la, 174, 175
- Moya, Ramiro, 297
- Muller, J., 555n.28
- Mller, Werner, 138, 142, 476, 544n.17, 550n.16, 559n.35
- Munich, 537n.2, 556n.6
- Npoles, 176; Castel Nuovo, Sala dei Baroni, 495, 544n.22
- Narbona: catedral de, 495; Guinguamps, Juan de, 174; Vecian de, 172
- Navascués, Pedro, 149, 372
- Navier, L. M. H., 12, 15, 17, 18, 29, 111, 116, 397, 467, 528, 530, 532, 538n.13, 541n.13, 14, 554n.18
- Neal, B. G., 127, 542n.25
- Nervi, Pier Luigi, 127
- Nielsen, M. P., 542n.25

- Nueva York, catedral de San Juan el Divino, 440
- Nuremberg, Fleischbrucke, 539n.10
- Nussbaum, Norbert, 544n.22
- Ochsendorf, John A., 95, 97, 111, 114, 115, 540n.8, 542n.23, 557n.18
- O'Dwyer, Dermot, 559n.37, 561n.54
- Ogubio, teatro de, 194
- Onat, E. T., 528
- Oppenheimer, Irving J., 449
- Orense, Monasterio de Melón, 541n.17
- Orlens, puente, 554n.22
- Oesterr. Ingenieur-und Architekten-Verein. Ver Asociación de Arquitectos e Ingenieros Austracos.
- Palladio, Andrea, 8, 193-201, 250, 252, 257, 261, 274, 275, 284, 286, 313, 314, 315, 323, 326, 329, 339, 420, 422, 465, 545n.6, 549n.6
- Paniagua, J. R., 549n.7
- Panteón, 135, 184, 200, 277, 278, 283
- Parent, A., 319, 322, 339
- París, 148; Concorde, puente de la, 356, 368; Invlidos, 29; Nemours, puente de, 368; Neuilly, puente de, 356, 366-368, 554n.22; Nôtre Dame, 495; Pont Neuf, 326; Pont Royal, Tulleras, 326, 354, 355; Saint-Maxence, puente de, 356, 368; Santa Genoveva, 13, 29, 267, 274, 276, 357-358, 364, 529, 552n.26, 554n.21; Val de Grace, iglesia de, 339
- Parland, Herman, 116, 118, 119, 120, 121, 528
- Parma, campanile, 499
- Parsons, 5, 451, 453, 454, 539n.10, 552n.27
- Patte, Pierre, 276, 372, 555n.27
- Pearson, K., 523
- Pena, Pedro de la, 245
- Perpian, 174; St. Jean, 495, 544n.22
- Perret, Pierre, 259, 260
- Perronet, Jean Rodolphe, 8, 13, 15, 28, 187, 317, 352, 355, 356-368, 370, 379, 380, 381, 382, 401, 402, 405, 406, 434, 524, 526, 537n.5, 546n.16, 554n.23, 555n.24, 25, 556n.5
- Persy, N., 530
- Petit, 95, 116, 397
- Petronotis, Anargyros, 136, 278
- Picon, Antoine, 554n.20
- Pieper, Klaus, 532
- Pilgrim, Ludwig, 95
- Pino, iglesia del, 174
- Pippard, A. J. S., 82, 540n.7
- Pisa: San Niccol, campanile, 499; torre inclinada, 499, 560n.43
- Pla Cargol, Joaquín, 544n.23
- Planat, P., 467, 530, 559n.39, 560n.49
- Plauen, puente de, 29, 406
- Plinio, 181
- Plo y Camn, Antonio, 144, 305-314, 323, 431, 551n.24
- Poleni, Giovanni, 54, 444-446, 455, 456, 458, 460, 524, 529, 531, 551n.22, 558n.30
- Poncelet, Jean-Victor, 72, 523, 526, 527
- Pont du Gard, 317-318, 326
- Pontones, P., 293, 369-372, 374
- Porta, Giacomo della, 267
- Prager, William, 88, 528
- Prony, Gaspard R., 555n.28
- Prudencio, 134
- Puppi, Lionelo, 545n.6, 546n.7-10
- Rabasa, Enrique, 542n.23, 543n.8, 9, 553n.3
- Ramos, Antonio, 555n.28
- Rankine, W. J. M., 56, 60, 106, 107, 381, 402, 407-413, 415, 423, 428, 430, 432, 433, 439, 462, 495, 514, 530, 557n.12, 13, 558n.21, 560n.48
- Rasch, Jürgen, 135, 136, 459, 460, 546n.12, 559n.31
- Regnier, 15
- Reichensperger, August, 543n.11
- Reims, catedral de, 140
- Reinhold, 380
- Rejn de Silva, Diego A., 549n.7
- Renacimiento, 141, 177, 179, 181-, 208, 225, 257, 265, 458, 459, 463, 521, 559n.35
- Rennie, George, 15, 66
- Rerone, puente medieval, 196
- Rsal, 19
- Reynaud, Lonce, 538n.12
- Rimini, puente romano de, 195, 196

- Ritter, 95
 Roca, Bernat, 170, 544n.24
 Rocky River, puente sobre el, 29
 Rodríguez, Ventura, 274
 Rojas, Cristóbal de, 201–203, 280
 Roma, 135, 136, 176, 184, 339; Baco, templo de, 200; Bramante, tempietto de, 200; Coliseo, 363; Constantino, Basílica de, 544n.22; Il Gesù, 274; Madonna de Miracoli, 274; Marcelo, teatro, 194; Minerva Médica, 200, 453, 559n.31; Panteón, 28, 29, 135, 184, 200, 277, 278, 283, 377, 441, 447, 453, 455, 457, 459, 460, 463, 546n.12, 551n.19, 552n.32, 559n.31; Sant'Andrea al Quirinale, 463, 465, 559n.34; Sant'Andrea della Valle, 273; Sant'Andrea in Via Flaminia, 559n.34; San Carlo a'Catinari, 274; S. Giacomo degli Incurabili, 559n.34; Santa Maria in Cosmedin, campanile, 499; San Pablo Extramuros, iglesia de, 29; San Paolo, basílica, 267, 269; San Pedro, 29, 241, 257, 258, 266, 267, 268, 269, 277, 278, 283, 390, 391, 397, 444–446, 453–458, 461, 551n.19, 22; San Pedro, bóveda nave, 341; San Pedro, cúpula de, 200, 268, 269, 524, 529, 531, 551n.22, 268, 269, 531; San Pedro, fachada, 363; Santa María en Vallicella, 266, 272, 551n.18; Vaticano, 551n.19; Vesta, templo de, 200
 Rondelet, Jean, 15, 18, 19, 21, 22, 28, 95, 195, 198, 199, 01, 276, 364, 377–379, 529, 538n.13, 545n.6, 546n.9, 552n.28, 555n.2
 Roriezer, Matthäus, 152, 543n.16
 Rosenberg, G., 467, 532
 Rosenthal, Earl E., 538n.2
 Roy, E., 382
 Rubió y Bellver, Joan, 62, 509, 510, 511, 530, 532, 538n.13, 561n.53
 Ruddock, Ted, 66, 151, 153, 546n.15
 Ruiz Hernando, Antonio, 546n.13
 Rupérez Almajano, Nieves, 550n.9, 11
 Rusconi, G. A., 195, 198
 Rusia, ingenieros de, 382
 Saalman, H., 545n.3
 Sauvedra, Eduardo, 72, 116, 428, 527
 Sádaba, Javier, 556n.1
 Sagrera, Guillermo, 174, 176, 544n.22
 Saint Denis, 137
 Saint Gervais, iglesia de, 362
 Saint Guilhem, 60
 Saint Martin des Champs, 362
 Saint Rollox, 560n.48
 Saint Sulpice, 362
 Sainte-Chapelle, 148
 Salamanca: catedral de, 207, 258; Monterrey, palacio de, 548n.8; universidad de, 546n.2
 Salcano, viaducto de, 28, 29, 406
 Salimbeni, Leonardo, 529
 Salomón, templo de, 551n.19
 Sanabria, Sergio L., 207, 208, 227, 228, 230, 231, 233, 234, 235, 543n.9, 546nn.1, 2, 547n.3, 548nn.10, 12
 Sánchez Taramas, Manuel, 555n.28
 San Carlo, Milán, 457
 San Esteban de Gormaz, puente de, 372
 San Francisco, iglesia del convento, en Medina de Rioseco, 482
 San Francisco el Grande, 305, 457, 551n.24
 San Juan el Divino, catedral de, en Nueva York, 440
 San Miguel, fray Andrés de, 546n.11
 San Nicolás, fray Lorenzo de, 115, 199, 239, 240–256, 258, 289, 300, 301, 302, 305, 307, 310, 372, 397, 429–432, 441, 542n.18, 549nn.1, 2, 6, 8, 550n.11, 556n.4
 Sanpaolesi, Piero, 188
 San Petersburgo, San Isaac de, 530
 Santo Domingo, iglesia de, 545n.27
 Santa Maria del Fiore, 186, 188, 551n.19
 San Pablo, catedral de, 278, 283, 457, 524, 528
 Santa Sofía de Constantinopla, 17, 29, 136, 377, 391, 392, 441, 448, 457
 Santa Sofía de Salónica, 391, 392
 Santo Tomás de las Ollas, iglesia de, 559n.33
 San Vitale, Rávena, 17
 Sauvage, Martin, 17
 Seamozzi, Vincenzo, 274, 275, 284, 314, 315
 Scheffler, Hermann, 60, 72, 455, 458, 527, 530
 Schübler, J. J., 144

- Schuttermayer, Hans, 152
 Segovia (ca. 1530), 169, 544n.20
 Segovia, catedral de, 258, 546n.13
 Sejourné, Paul, 59, 176, 405, 526, 537n.4, 538n.11, 538n.13, 540n.9, 545n.5, 557n.11
 Senent, Rosa, 555n.23
 Serlio, Sebastiano, 200, 259, 274, 275, 284, 314, 326, 329, 339, 463, 464, 465, 559n.31
 Serra, Amadeo, 544n.22
 Serra i Rafols, E., 544nn.20, 24, 25
 Sevilla, alcázar de
 Sganzin, Joseph M., 526, 555n.27
 Shelby, Lon R., 138, 153, 544n.19, 542n.4
 Siena: catedral, campanile, 499; torre del Mangia, 499
 Silberschlag, J. E., 2
 Sisbert, Bartomeu, 544n.24
 Smars, Pierre, 542n.23
 Snell, George, 40, 41, 61
 Solís, Carlos, 556n.1
 Soo, Lydia M., 552nn.30, 31, 34
 Soufflot, J.-G., 13, 357, 364, 366, 368
 Spangenberg, H. J., 557n.11
 St. Ouen, chimenea de, 500
 St. Rollox, chimenea de, 500
 Stieglitz, Chr. L., 543n.11
 Stirling, J., 524, 529
 Straub, Hans, 137, 188, 189, 194, 270
 Street, Georg F., 170, 173, 494, 544n.20, 544n.22
 Sturm, L. C., 144, 286
 Stüssi, F., 404, 556nn.6, 7
 Suárez Quevedo, Diego, 550n.8
 Tamayo, Alberto, 545n.31
 Tâmesis, puente sobre el, 58, 405–406, 556n.8
 Tarragona, catedral de, 174
 Telford, Thomas, 58, 405–406, 556n.8
 Tello, León, 288, 553n.3
 Terenzio, Alberto, 28, 447, 538n.13, 546n.12
 Teston, puente de, 402–403
 Theodorides P., 278
 Thiele, R., 537n.2
 Thode, Dierk, 17, 538n.13
 Thompson, D'Arcy W., 556n.3
 Todhunter, L., 523
 Toledo: iglesia de, 254, 258; ordenanzas de Tolosa, catedral de, 544n.22
 Torija, Juan de, 556n.4
 Torino, Politécnico de, 559n.34
 Torres Balbás, Leopoldo, 544n.22, 545n.2
 Tortosa, catedral de, 174
 Tosca, Tomás Vicente, 2, 264, 288–302, 306, 307, 398, 495, 502, 553n.3, 560n.43
 Toulouse: catedral de, 495; Pont-Neuf, 326
 Tourtay, 22, 23
 Toussaint d'Angers, iglesia de, 29
 Trautwine, John C., 402, 557n.16
 Tredgold, Thomas, 406, 556n.9
 Trezzo, puente sobre el río Adda, 176, 405, 406
 Truesdell, Clifford A., 54, 539n.6
 Turriano, Juanelo, 203–206
 Ungewitter, G. G., 67, 148, 151, 152, 289, 290, 380, 399, 423, 424, 426, 444, 467, 472, 473, 480, 481, 482, 483, 486, 487, 488, 504, 505, 506, 507, 530, 539n.8, 543n.15, 560n.49
 Valdés, Nicolás, 555nn.3, 4
 Valencia: basílica de los Desamparados, 559n.34; cimbório de la catedral, 293, 294–299
 Valleras, Arnaldo de, 174, 175
 Vallfogona, Pedro de, 174
 Vallicella, Santa Maria in, 551n.18
 Vandelvira, Alonso de, 246
 Vanvitelli, Luigi, 458, 551n.22, 558n.30
 Varro, 183
 Vaticano, obelisco, 551n.19
 Vauban, S. L. P. de, 557n.16
 Vegni, Leonardo, 552n.33
 Venecia, 193, 199, 263; campanile de San Marcos, 499; puente de Rialto, 393, 539n.10
 Vétheuil, iglesia de, 425
 Verona, teatro de, 194
 Vicat, 18, 19, 111, 541n.14
 Vicenza, 194; puente de, 196
 Vicoforte, cúpula de, 559n.34

- Vieille-Brioude, puente sobre el río Allier, 555n.24
- Viena, 159, 160, 161, 164, 168; Tratado gótico de, 156, 157, 158, 159, 166, 543n.11
- Vignola, 284, 320, 458, 552n.33, 559n.34
- Villacastín, iglesia de San Sebastián, 547n.3
- Villaceau, Yvon, 60, 527
- Villard de Honnecourt, 138, 139, 140, 141, 292
- Villeneuve, puente de, 29
- Vinci, Leonardo da, 40, 329, 404, 540n.6, 550n.15, 556n.6, 7
- Vinas, Enric, 544n.21, 22
- Viollet-le-Duc, E., 13, 148, 184, 380, 425, 466, 502, 541n.11, 542n.24, 544n.22
- Vitruvio, M., 12, 134, 135, 149, 177, 181, 200, 201, 208, 274, 275, 284, 320, 342, 459, 543n.12, 546n.11
- Vittone, Bernardo, 267, 276, 551n.25
- Walter, Caspar, 373, 374
- Walther, 541n.15
- Wanderley, G., 379, 555n.3, 4
- Warren, John, 136
- Warth, Otto, 20, 468, 538n.8
- Weale, John, 405
- Westminster, 127; abadía de, 279, 280; puente de, 151, 153
- Wettingen, puente sobre el Limmat, 557n.9
- White, Lynn, 545n.28
- Wiebenson, Dora, 181
- Willis, Robert, 499
- Winkler, Emil, 72, 73, 527
- Wittkower, Rudolph, 465
- Wittmann, W., 530, 537n.2
- Woodbury, D. P., 411, 412
- Woolwich, Escuela de, 555n.28
- Wotton, Henry, 240, 263-266
- Wren, Christopher, 202, 240, 278-284, 331, 458, 524, 528, 552n.29, 30, 31, 34
- Xanten, catedral de, 532
- Young, Thomas, 55, 56, 57, 377, 381, 383, 406, 558n.20
- Zamboni, Baldassare, 199, 200, 545n.6, 546n.9
- Zaragozá, Arturo, 297
- Zaragoza, 138, 169, 178, 545n.31; Puente de piedras, 178-179, 191, 545n.31
- Zorn, Eberhard, 512, 513, 532

Índice de temas

- Ábside, estribo, 151, 424-425
- Acero, 11, 77-79, 82, 86, 88, 126-127, 376, 518, 528, 537n.3
- Acueductos, 317, 406
- Ad quadratum, 160-162, 166
- Adherencia, 18, 22, 26, 31
- Adobe, 17
- Agrietamientos, 4, 26; Heyman, 88-89
- Agrimensor, 302
- Agua: drenaje, 59; entrada de agua en las techumbres, influencia en el empuje, 505; paso en los puentes, 189, 359, 364-366; presión hidrostática, 59, 60; rellenos, 59, 93; retallos de estribos, 422; sistemas de desagüe en puentes, 176
- Aguja, 138; análisis de membrana, 441-442, 545n.4; espesor, 501, 545n.4; papel estabilizante en los cruceros, 279; relación con cúpulas poligonales, 186, 545n.4; torres, 221, 547n.5
- Albañiles, 240, 337, 549n.2; jornales en el gótico, 350
- Álgebra, 554n.12; Couplet, espesor arcos, 339; Frézier, 340-341
- Aligeramiento; cimborrio, 298; puentes, 556n.7; riñones de los puentes, 204
- Altura límite, 15, 28, 407, 537-538n.5, 6
- Análisis, 71; científico, 375, 523-532; construcción tabicada, 549n.5; cúpulas, de equilibrio, 444-446; edificios, el método de los bloques, 502-508, 532; elástico, 12, 14, 29, 72, 77-79, 82, 376, 527-528, 532, 556n.7; de equilibrio (líneas de empujes), 375, 380; espacial de bóvedas, 470-472, 530, 532; «funicular» por ordenador, 559n.37; métodos de, 375-376; métodos gráficos de, 439-440, 514, 526, 530-532, 539n.4, 540n.9; ordenador, por, 21, 470, 559n.37; pilares góticos, 501-515; puentes, 406, 556n.7; de rotura, 375, 455, 276, 322, 524-526, 529, 530, 539n.1, 552n.36; siglo XIX, métodos de, 375-376. *Ver también* membrana
- Análisis dimensional, 401
- Análisis Límite, 7, 8, 126-129, 517-521, 528, 532, 539n.4, 3, 540n.5; arbotantes, 89; arcos, 71-129, 434-435; armadura de madera, 127; bóvedas o estructuras espaciales, 434-435, 479, 502, 532; bóvedas, 89, 129; cúpulas, 89, 528-532; edificios: el método de los bloques, 501-, 530, 561n.54; estribos simples, 129; flechas, 89; grietas, 558n.26; «método de los cortes», 347-348, 435, 517-518; pórticos, 77-79, 86-87, 89,

Análisis límite (*continuación*)

528; principios, 30-34, 74, 79, 434; puentes, 89; rosetones, 89; vigas, 528; *Ver también* cúpulas; bóvedas de crucería y teoremas fundamentales

Analogías antropomórficas, 6; arcos, espesor de, 231; bóvedas de crucería, dimensionado de los nervios, 218-220; dimensionado, 242; puentes, 177; San Pedro de Roma, 258; templos, 208-209, 210, 257-258; torres, 223

Analogía con la naturaleza, 185, 357

Anfiteatros, 559n.33

Antigüedad, 6, 8, 61; aparejo en seco, 319, 331; bóvedas de arista, 349; cúpulas de sección variable, 339; influencia en el Renacimiento, 181; modelos a escala, 135; proporciones, 357; reglas, 133-136, 278, 387, 517, 519; tamaño de los edificios, 377; templo de Salomón, 551n.19

Aparejador, conocimientos de, 322, 325

Aparejo, 3, 11, 12; en espina de pez, 188; fractura de estribos, 109-111, 114, 541nn.14, 15; influencia en el espesor de los arcos, 317; influencia en la estabilidad de los puentes, 204; influencia en la resistencia de las pilas, 316, 537-538nn.5, 6; influencia en la seguridad de los puentes, 319; muros, 20, 21; resistencia de las fábricas, 23-24, 26, 364, 538n.8

Apeo, 40; gótico, 140

Árabe, origen de la bóveda de crucería, 349, 545n.2

Arbotante, 63, 67, 166, 209, 466, 501-515; análisis, 89, 560nn.49, 51, 561n.53; descimbrado, 3; deslizamiento en cabeza, 121; empujes resistentes, 247, 414, 503-505, 508, 509, 511, 560n.51, 559n.39; espesor, 142-143; estribos simples o botareles, 427; Gaudí, 557n.14; ideal, 557n.14; ligereza, 343; localización, 140, 470, 542n.6; mecanismo de colapso, 84, 85; Palma de Mallorca, 561n.53; reglas estructurales, 157; tipos, 4; Villard de Honnecourt, 140, 542n.6

Arçada, 501; Blondel, 284-286; de contención, 530; estribos, 418, 420-422, 548nn.8,

9; gótica, 138; oblicua, 410-411; renacentista, 193-194, 195-199, 231, 548nn.8, 9

Arçilla: mortero, 18; techumbre de madera y arcilla, 546n.11

Arco, 1-2; acciones asimétricas sobre, 394; apoyos y movimientos, 72-86, 88-89, 122-123; arranques, 40, 42, 43, 46, 47, 49, 50, 84, 94; cálculo científico, 9-130, 240, 319; cargas adecuadas, 329-331; cargas verticales, 43, 44; comportamiento estructural, según Alberti, 182-183; contrarresto, 61-69, 280-284; cortes de cantería, 202-203; cúpulas, comparación con, 435-437, 439; deformaciones, 332, 541nn.11-12, 542n.23; desplazamientos, relación entre, 448; elástico, 47, 72, 527-528, 532; elíptico, 246, 265, 300, 321, 332, 355, 372, 397, 399; empuje, 371, 414, 550n.15, 551n.17; «equilibrados», 58, 59; equilibrio, 35-69, 434-435; esbeltez, 394-395; espesor límite, 50, 92, 94-100, 394-403, 449-450; estabilización, 151; estereotomía, 246; estética, 246; etrusco, 38, 39; forma ideal, 53, 54-56, 58, 59; Frézier, sobre, 339-344; geometrías de equilibrio, 339-340; geostático, 60; grandes deformaciones, 75-76, 121-126, 395, 541nn.11-12, 542n.23; hidrostático, 60; hiperestático, 71, 72, 434-435; hormigón armado, 73, 539n.3; intradós poligonal, 292; junta de rotura, 204, 276, 368, 322, 524-526, 537n.3; ladrillo, 184; límite, 92, 94-100; línea de empujes, 38-61, 394-395, 434-435; luz máxima, 363, 364, 540n.9, 556nn.6-9; madera, 72; mixto de intradós de medio punto y trasdós apuntado, 289; modelos colgantes: bloques, 57-58; cables, 55-57; modelos de yeso, 302; movimiento por cedimiento de apoyos, 50, 72-86, 88-89, 121-126; origen, 1; parabólico, 560n.41; peso propio, 235-236, 314; pinjantes, 291, 292; precompresión previa, 205, 546n.16; primeros teoremas sobre arcos, 240, 263-266, 545n.1, 550n.15; rampante, 80, 333, 423; rellenos, 59-61, 236; riñones, 46, 50, 151; sección variable, 339-340, 342; seguridad, 91-104,

107-108, 394-403, 542n.23; simétrico, 40-42, 45, 86, 92, 100; tabicados, 554n.16; tamaño y proporción, 394-395; tensiones, 394, 395, 403, 527; tipos, comparación, 322-323, 332, 343-344; torales, 453; tranquill, por, 503; trasdosado, 57, 102, 284-286, 510, 511; trazado científico, 339; triarticulado, 75, 100, 527. *Ver también* arbotantes; colapso de arcos; empuje de los arcos; ensayos de colapso; espesor, arcos; estribos, arcos; teoría de arcos

Arco adintelado: cargas resistentes y empuje, 332; empuje, 346-347, 502; estribo, 323, 334, 336-337; gótico, 140; juntas verticales, 264-265; mecanismos de colapso, 84, 333; regla gótica n1 aplicada a, 306; sisimos, Tosca, 290-292

Arco apuntado, 47, 49, 77, 96, 101, 102, 122-123, 544n.18; Alberti, 183-184; altura de carga, 233, 234; arbotante, como, 247; cantidad de material, 343-344; capacidad portante, 319, 321, 332; cimborrjo, 294-299; crítica 265-266, 343-344; debilidad, 266; dovelas, 343; empuje, 142-143, 285, 294-299, 319, 321, 323, 332; ensayos, 333; espesor (en la clave), 342; estribos, 145-151, 227, 234-237, 284-286, 294-299; forma de colapso, 289, 298, 333, 398-399, 473-476; labra de la clave, 138, 344; ligereza, 343-344; papel estabilizante de la clave, 102, 298-299, 398, 399, 400; pilares, 343; Plo y Camín, 307, 309; puentes, 319; rellenos, 397; San Nicolás, Fray Lorenzo, 246, 247; semejanza con la catenaria, 343-344; tajar, 260-263; Tosca, 289-290; trazado, 145; ventajas, 343-344, 350

Arco carpanel, 100, 124, 265, 359, 368; puentes, de varios centros, 397, 399, 526

Arco catenario, 54, 58, 59, 92, 97, 398, 444

Arco crucero, 162-166, 209-212, 218, 544n.18, 547n.4; análisis, 468-476, 559n.36; arcos apuntados, 294-299, 544n.18; en bóvedas de arista, 251; bóvedas vaídas, 482-485; cimborrjo, 294-299; clave, 220, 486, 559n.36; empuje, 296-299, 478,

559n.36; gran arco crucero, 164-166; línea de empujes, 559n.36; pequeño arco crucero, 164-166; peralte en cimborrjo, 295; peso, 478; como huesos, 357

Arco de descarga: de medio punto para arcos rebajados, 183-184; muro superior de las arcadas, 420-421; en los muros hacia contrafuertes o estribos; 479, 559n.39; Panteón de Roma, tambor, 455; puentes, en los riñones, 204

Arco escarzano, 46, 95, 100, 102, 118

Arco formero, 209-212, 214, 218, 482-485, 489, 544n.18, 559n.39

Arco de medio punto, 76, 83-84, 92, 95, 100, 122-125; Alberti, 182-183, 184; como arco de descarga, 183-184; capacidad portante, 319, 321, 332; empuje, 142-143, 319, 321, 323, 332; espesor, 225, 226, 229, 340, 341-342; espesor mínimo, 98, 99, 100, 101, 339, 340-342, 394-396, 449-450; estribos, 145-151, 191, 202; ideal, 182-183, 203-204, 246, 247, 249, 252, 265; comparación con la catenaria «ideal» mecánicamente, 342, 343-344; en intradós, 289, 339-340; mecanismo de colapso, 100, 101, 342, 398-399; nervios cruceros, 162, 544n.18; puentes, 317-319; Rodrigo Gil, 209, 215, 217-220, 547n.4; tablas de Gautier, 326-329; Tosca, 289, 301; transformación afin, 407-413; de trasdós plano, 225-231

Arco peraltado: empuje, 143; estribos, 145-148, 284-286; transformaciones afines, 407-413

Arco perpiaño, 143, 165-166, 209, 209-212, 214, 218, 482-485, 508-515, 544n.18, 547n.4, 548n.8

Arco rebajado, 46, 66, 75-76, 84, 102, 109, 120, 121, 124; Alberti, 183-184; arco de descarga, como, 204; capacidad portante, 319, 321; coeficientes de seguridad geométricos, 395, 396; empuje, 142-143, 299, 319, 321, 323, 433; ensayos, 80, 333; espesor límite, 97, 339, 395-397, 449-450; estribos, 145-151, 191, 227, 228, 234-237, 285-286, 549n.14; forma de colapso, 80,

Arco rebajado (*continuación*)
333, 398–399; nervios, 477; quasicatenarios, 398–399; transformaciones afines, 407–413; vigas, comparación con, 182

Arceuil, piedra de, 362

Arenisca, 480, 481, 488, 492, 538n.8

Argamasa. *Ver* Mortero

Aristón o arco de boquilla, 188–190, 194–195

Aristóteles, 266

Aritmética, 236; compendio de García Berruguilla, 302; métodos para traza planta gótica, 210, 544nn.17–18

Armaduras, 127; árabes, 545n.2; empuje, 414, 550n.17; góticas, 217–218; peso sobre las bóvedas, 341–342; peso sobre los muros, 341; peso sobre los muros sin empujes, 245; peso sobre los pilares, 317

Arquitecto, 61; actual, 105; barroco, 3; bizantino, 136; Congreso de expertos de Gerona, 138, 168–176, 544nn.20, 24; conocimientos algebraicos y geométricos, 322; gótico, 3, 4, 207, 222, 225; medieval, 7; moderno, 3, 11; reglas, empleo de, 517; Renacimiento, 3, 5, 6, 195, 207, 225; romano, 3, 4, 459; s. XIX, del. 116

Arquitectura civil, 288, 372–373

Arquitectura hidráulica, primer tratado, 203–206

Arquitectura oblicua, 410–411

Arquitectura tradicional, 67, 520

Articulaciones, 32–34, 75–76, 79–87, 90–92, 95–96, 99, 540nn.6; arco apuntado, 122; arco escarzano, 95; arco medio punto, 76, 95, 122, 124; arcos rebajados, 75, 76, 84, 85; clave, 109, 123, 530, 558n.27; constructivas, 527; cúpulas, 530, 558n.27; ensayos, 332–334; espesor, en función de, 401; estribos, 86, 106, 560n.52; línea de empujes, 86, 122; mecanismos de deslizamiento, 116, 119; pórticos de acero, 79, 86–87. *Ver también* colapso, mecanismos de

Barroco, 3; alemán, 4; bóvedas de cañón, 141, 144; cúpulas, 455, 458, 463, 559nn.34–35; Fontana, Carlo, 266–278; fuentes, 138, 141–151, 521; Italia, 461; muros, 67

Bielas, mecanismo por formación de, 304–305, 525, 525

Bizancio: aparejo, 24; arquitectos, 136; columnas, 30; estructuras de las iglesias, 501; ladrillos cocidos, 17; proporciones, 136; regla para el dimensionado de los pilares, 278; sistemas de contrarresto de cúpulas, 4, 453; tratados, 136

Botarel, 63, 121, 426, 502, 557n.14

Bóveda: abanico, 89; adintelada, 528; altura, 208–209, 212; análisis de equilibrio, 434–435; análisis límite, 8, 30, 539n.4; arranques, 295, 542n.6; asiento de, 546n.16; barrocas tardías alemanas, 4; bizantinas, 501; catenarias, 398; colapso, 73–74, 82, 108–109, 342; colaterales, empuje nulo, 296–298; comportamiento estructural, 249–251; compuestas, 254, 345, 346–348, 459; construcción, 239–240, 539n.7; de contención, 62; de contrarresto, 64; doble curvatura, 247–248; embecaduras, 186, 549nn.7–8; estabilidad, 249–251; estereotomía, 248; estudios sobre, hasta el siglo XVII, 248; etimología del nombre, 248; grietas, 75–78; hormigón, 135; hormigón armado, 82; hundimientos, 82, 217–218, 542n.23, 543n.6; informes, 195–199, 544n.20; de ladrillo, 242, 244, 245, 301, 310–313, 380, 429; medición, 249, 302, 556n.4; medio punto, 142–143, 307, 378–379; modelos de yeso, 302; módulo de elasticidad, 538n.11; movimientos durante la construcción, 511–512; peraltadas, 142–143; peso, 249, 317; de piedra, 242, 244, 245, 301, 309–313, 429–432; de puentes, 176–179, 189–190; rebajadas, 142–143, 185, 191i, 378–379, 395–397, 549n.14; rebajadas tabicadas, 84–86, 549n.5, 7; rebaje, influencia en el empuje, 300; rellenos, 59–61, 184–186; renacentistas, 184–186; replanteo, 185; riñones, 191, 204, 212; romanas, 21; románicas, 501; seguridad, 108; simétricas, 104; tamaño, 164, 176, 478; trasdós para bóveda en equilibrio sin rozamiento (Parent), 322; tratados, 135–136, 338–352, 549n.6; túneles,

59–61; Wren, 278–284, 285. *Ver también* espesor, bóvedas; empuje de las bóvedas; puentes

Bóveda de arista, 248, 251, 348–349, 351–352, 427, 524, 528–532, 544n.22

Bóveda de cañón, 3, 101, 124–125, 247, 501; análisis, aplicado a cúpulas, 276; barroco, 141, 144; cargas sobre, 411–412; carpanel, 397; elípticas, 372, 397, 411–412, 433; empuje, 302, 346–348, 528–529; equilibrio, 35–69; espesor, 248, 394–395, 487; estribo, 284, 300–301, 302, 350, 548nn.8, 9; estribos simples para arcos y bóvedas de cañón, 413–; geometría, 349; línea de empuje mínimo, 418; con lunetos, 144, 251, 342, 427, 430; método de los cortes, 347–348, 435; proyecto de bóvedas de cañón, 477; relleno, 395–397, 411–412; Renacimiento, 141, 144, 239; románicas, 101, 124; tablas de Petit, 397; tablas de Woodbury, 411–412; teoría, 523–528; transformación de arcos: el teorema de la «proyección paralela», 407–413; transformación afin de bóvedas sobre estribos, 432–433; volumen de piedra, en comparación con otras bóvedas, 351–352; Wren, 284

Bóveda de crucería, 89, 129, 166, 501; análisis, 502, 524, 528–532; arco perpiaño (arcos principales o transversales), 143, 165–166, 209–212, 214, 218, 300, 508–515, 544n.18, 547n.4, 548n.8; arranques o jaramiento, 212, 213, 215, 220, 467, 470, 473, 479, 485, 486, 487, 488, 490, 492, 542n.6; bóvedas vaídas, 482–485; de cabecera, 152; catenaria, 470; claves, 162, 210, 477–478; colapso durante la construcción, 473–476; construcción, 141, 209–212, 293, 350, 468–476, 477, 511–512; empujes, 217, 293, 302, 350, 350, 478–485, 494, 502, 503, 504, 508, 559n.39; encofrados y plataformas, 212; espesor, 476–478, 480, 481, 487, 488, 492, 494; estabilidad, 468–476, 478–485, 502; estrelladas, 495, 544n.22, 559n.33; estribos, 286, 293, 300, 350, 376, 435, 466–495; estudio de, 466–468; formas, 468; formero, 209–212,

214, 216, 218, 219, 544n.18, 559n.39; Frézier, 345, 348–352; geometría, 349–352, 468; de Gerona, 138, 168–176, 545n.27; Gil de Hontañón, sobre, 208, 209–212; gótico tardío, 349, 543n.11; hundimientos, 543n.6; intervenciones y reparaciones, 349; juntas, 293; origen, 349, 545n.2; plementería, 162, 211, 212, 217–218, 293, 294, 468, 480; materiales, 293, 294, 480, 487, 488; método de los cortes, 468–473, 482, 559n.38; modelos colgantes, 470–472; movimientos, 511–512; neogótico, 376, 377; nervios, 154, 160, 162–166, 209, 545n.2; peso, 293, 362–363; rebajadas, 485, 560n.42; reglas tradicionales de proyecto de bóvedas góticas, 476–478; reglas para el dimensionado de estribos góticos, 141–144; reglas empíricas para estribos, verificación, 485–494; riñones, 212; San Nicolás, sobre, 251; seguridad, 293; tablas de Mohrmann/Ungewitter, 480–482, 483, 488, 530; tamaño, 169, 477, 480, 494, 495, 544n.22; tamaño límite, 494, 495; Tosca, 293, 294; trasdós, 209; ventajas, 348, 350–352; volumen de piedra, menor en comparación, 351–352

Bóveda en rincón de claustro, 249, 250–251, 351–352, 378, 524, 528–532

Bóveda vaída, 209, 215, 247, 250, 283, 474, 482–485, 492

Cables, 36, 53–58, 83–84, 128

Cadenas de ladrillo, 184

Cal, 18, 91, 21, 23, 25, 458, 546n.16

Cálculo científico, 2–8, 21, 374, 523–532; arcos, 9–130, 240, 523–528; Bizancio, 136; bóvedas, 30, 523–528; bóvedas de crucería, 524, 528–532; cúpulas, 240, 524, 528–532; dependencia del cálculo tradicional, 377, 381–383; elástico, 73–74, 77–79, 527–528, 532, 557n.10; estribos, 9–130, 63, 413, 493–494; Gil de Hontañón, 519; métodos analíticos, 35, 38, 54–56, 68; métodos gráficos, 36–38, 45–50, 56, 60–62, 90, 103, 128, 530–532; puentes, 380–381; siglo XVIII, 374, 523–532; siglo XIX,

- Cálculo científico (*continuación*)
375-378, 379, 523-532; siglo XX, 523-532; torres, 495-501
- Cálculo tradicional, 2-8, 61, 131-; decadencia, 373, 374, 375-377; Edad Media, 133-179; estribos, 105, 413; Wren, 284; validez, 387-516.
- Cálculo plástico. *Ver* Análisis Límite
- Caliza, 356
- Calzada, muros de contención, 321
- Campanas, 254
- Campanile, 499
- Cantera, 12, 14
- Cantería: bóvedas, 248, 250, 309-313; cortes de, 246, 248, 288, 302; cúpulas, 550n.12; gótica, 212; modelos, 202-203; muros de, 245; tratados de, 142, 144, 145, 202-203 553n.3
- Canteros, 240, 549n.2; conocimientos, 322, 324, 325; herramientas, 520; medievales, 137, 141-142; procedimientos de los, 14; secretos sobre la monte, 543n.7
- Capillas: laterales, 241, 245, 246, 257; templos redondos u ovales, 259, 463-465
- Capitel colgante, 138-140
- Cargas: accidentales, 394, 436; altura de, 227, 230, 231, 233, 234, 363, 365; arcadas apuntadas, sobre, 285; arcos, variables y asimetrías, 394; arcos cruceros, sobre, 470; arcos perpiños y claves, sobre, 508-515; arcos de los puentes, peso, 314, 320; armaduras sobre las bóvedas, 341-342; axial, 84, 400; catenarias, 342-343; cimborrio, 294-299; claves, 477-478, 483, 492; clave de un arco apuntado, 184, 247, 289-290, 398-399, 400; clave mayor, peso, 220; colapso, 79, 83-84, 86-92, 109, 126-127, 332; columna análoga, 315-317, 362-364, 365, 537-538n.5, 6; distribución de, 341; dovelas, 524-526, 552n.36; espesor de los arcos en función de, 289, 318-319, 340-342; estados seguros, 89; estribos, sobre, 197, 202, 433; gráficas carga/desplazamiento, 527-528, 539n.3; historia de, 435, 532; impacto, 435; imprevistas, 93; línea de acción, 42, 48; líneas de carga,
- 58-61, 398, 399; máxima sobre un puente, 56, 83-84, 92, 318-319; móviles, 56, 92, 93-94; nervios en las bóvedas de crucería, sobre, 473-476; pilares, sobre, 317; pilares góticos, sobre, 209, 508-515; pilas y estribos de puentes, sobre, 359; presiones horizontales, 60-61; puntual, 47, 56, 83-84, 118-120, 341, 399, 476; rellenos, 411-412, 420-422; riñones, estabilización, 151, 185-186, 191, 289, 290; simétricas, 50, 92; sobrecargas, 84, 85, 92, 93-94; tejados, 217-218, 245; transmisión de, 31; tren de cargas, 400; verticales, 43, 44, 45, 53, 58; viento, 496-501, 515, 560n.50, 51
- Cargas, influencia en la estabilidad: bóvedas de crucería, 217; Alberti, 183, 185-186; efecto sobre la línea de empujes, 37, 39, 41, 46, 52, 53, 58, 59; machones en las torres, 253-254, 255; San Nicolás, 250; torres sobre pilas de puentes, 252
- Cartabones de los corrientes de las aguas, 303
- Cáscaras, 436-442, 558n.19
- Casco. *Ver* Plementería
- Cascote. *Ver* Relleno
- Catapultas, 135
- Catedrales, 168-169, 176, 209, 473, 494, 495, 501-515, 532; Beauvais, 494, 495, 532; dimensiones, 544n.22; Estrasburgo, 507, 508; Gerona, 138, 168-176, 488, 489-490, 544n.20, 24, 545n.27; informes periciales, 168-169, 544n.20, 24, 546n.13; Palma de Mallorca, 494, 495, 508-514, 532, 561n.53; Valencia, 294-299; viento, 560n.50; Xanten, 532
- Catenaria, 36, 53-58, 65, 82, 92, 128; «arco ideal», 342, 343-344, 397-399, 444, 524, 527; arranques, 342; bóvedas de crucería, 470-472; cargas, 343; catenaria no homogénea, 343, 530; cimbras, 343; comparación con arcos apuntados y de medio punto, 343-344, 397-399; construcción de arcos y bóvedas, 398; Couplet, 343; cúpulas, 437-438, 444, 449, 524, 529, 530, 531, 558n.22; dovelas de arcos con forma, 342; ecuación matemática, 54-56, 128, 342, 344; San Pablo de Londres, 278, 524; San Pedro

- de Roma, 524, 529, 531; transformación afín, 408; transformada, 56; tratados prácticos de construcción, 342-343; trazado y construcción de arcos con forma, 342-343
- Cedencia: condición, 35, 88, 89, 91, 126-127, 439; superficie de, 31-34, 88
- Cemento: hormigón, 25; lechada de, 22; mortero de, 18, 25, 546n.16
- Cepas. *Ver* Estribos
- Chimeneas, 392-393, 495-501, 560n.48. *Ver también* Torres
- Cimborrios, 258-259, 260; catedral de Valencia, 293, 294-299, 553n.4; catedral de Toledo, 258; reglas de Simón García, 258-259, 550n.12
- Cimbra, 38, 39; ahorro, 359; arcos catenarios, 343; arcos y bóvedas rebajadas, 396; bóvedas como, en los puentes, 253; bóvedas de crucería, 211, 212, 466, 474, 511; bóvedas de espesor insuficiente, 342; cálculo, 345; cedimiento, 72-76; construcción sin: en agujas, 442; en cúpulas, 186, 188, 292-293, 436; ensayo, 330; estribos, 423; flexibilidad, 394, 398; formas poco habituales, 339; generación geométrica, 248; modelo, 81; de puentes, 359, 404, 406; San Pedro de Roma, 277
- Cimentación: asientos diferenciales, 108; condición de contorno, 77, 121; empujes contra, 40, 126; fallos de, 241, 395, 542n.23; historia, 545n.29; muros góticos, 156; pilares góticos, 504; puentes, 176-178, 545n.29; San Pedro de Roma, 277-278; tensiones, 538n.8; torres, 223, 254, 547n.5, 560n.48; transmisión de cargas hasta, 184; transmisión de empujes hasta, 453. *Ver también* Terreno.
- Cinemática, 387
- Clave, 38, 39, 40, 41, 42, 46, 47, 49; anillos de las cúpulas como, 187; arco adintelado, 139, 140; arco apuntado, 124, 289-290, 294-299, 398-399, 400; carga, 50, 81, 101; arcos apuntados, 184, 289, 298-299; descenso, 27, 123, 205, 541n.12; función estabilizante, 102, 298-299, 398-399, 400; grietas, 74-78, 86, 95-96, 100, 109, 333, 479-480; levantamiento, colapso por, 100-102, 289, 290, 298, 398-399, 400; modelo de Boistard, 81; movimiento durante la construcción, 511-512; precompresión, 546n.16; peso sobre, catedral de Palma, 508-515; tamaño, 182; relación inversa con el empuje, 333; puentes, 205, 317; tensión, 556n.7
- Clave de arco crucero, 209, 209-212, 216, 220, 294-299, 544n.18, 559n.36
- Clave de bóvedas de crucería, 162, 209-212, 350, 466, 468, 216; altura relativa, 486-487, 544n.18; clave mayor, 220; dimensionado, 209, 210, 220, 476-478, 494; papel en la estabilidad, 217-218, 473-476; perforaciones, 212; primarias, 211, 212, 214, 220; reglas no proporcionales, 518, 519; secundarias, 211, 212, 220
- Cloacas, 60
- Coefficiente geométrico de seguridad, 92-94
- Coefficiente de seguridad resistente, 366
- Cohesión, 15, 551n.21; estribos de fábrica, 428; morteros, 18, 26
- Colapso: formas de, 60, 100-102; hundimiento, 100, 101; Leonardo da Vinci, 540n.6, 550n.15; levantamiento de la clave, 100-102, 398-399, 473-476; reglas con proporciones de, 378, 379
- Colapso de arcos y bóvedas, 73-74, 79-92, 398-399, 539n.1, 3, 540n.6; adintelado, 84, 85, 291; apuntados, 289, 298-299, 398-399; arbotantes, 84, 85; bóvedas de crucería, 473-476; cúpulas, 529-530, 531, 558n.27 por desplome de estribos, 108-109, 112, 230-231, 300; ensayo, 329-331; por espesor insuficiente, 342, 394-395, 530; Palladio, 197; rebajados, 398, 399
- Colapso, cargas de, 79, 83, 86, 88, 90-91, 109, 126; bóvedas, 197; estribo simple, 432, 541n.15; puentes, en función del tamaño de, 401
- Colapso de estribos, 65, 68, 511, 560n.52; estribos compuestos, 426-432; por vuelco, 106, 230-231, 300, 418, 419, 490, 541n.10-13. *Ver también* estribos, fractura

- Colapso, mecanismos de, 73-74, 79-91, 95, 99; bóvedas, 197, 526, 525; cúpulas, 448-450, 529-530, 558n.27; ensayo, por formación de articulaciones, 329-331, 332-334, 527-528, 540n.6; espesor, influencia del, 401, 530; estribos, 560n.52; fallo por deslizamiento, 116-121; mixtos, 116; pórticos, 87, 539n.3; puentes, 109, 110, 366
- Columna, 15, 16, 23, 29, 30; análoga, estribos de los puentes en función de, 315-317, 362-364, 537-538nn.5, 6; carga soportada en edificios reales, 362-363; cúpulas, 259, 260; gótica, 138-140; grueso de la, como módulo, 194, 546n.11; orden, 194; plantillas, 194; razón de la, 192, 193; reglas para disminuir, 234
- Compatibilidad, condiciones de, 35, 72, 127-128; condiciones, 79, 91, 467; ecuaciones, 79, 438-439, 527, 532
- Condiciones de obra, 8
- Consolidación de cúpulas, 458
- Consolidación de estribos, 428
- Construcción: arcos catenarios, 342-343; arcos de sección variable, 339; articulaciones, 527; bóvedas, 240, 539n.7; bóveda de crucería, elementos y construcción, 209-212, 293, 468-476; catedral, 473; errores, 439; estabilidad durante, 473-476; estribos, 539n.7; herramientas, 185; imperfecciones, 532; movimientos durante la, 511-512; teorías y métodos sobre construcción en España, 369-374
- Construcciones civiles, tratados, 338
- Construcciones militares, tratados, 338
- Constructores, conocimientos, 369-370, 399, 517
- Contorno, condiciones de, 35, 77-79, 88, 90, 91, 434, 435, 527-528, 532, 540n.5
- Contracción. *Ver* Transformación afin.
- Contrafuerte, 64, 101, 115, 518; adicionales a los muros, 286, 413, 426-432, 502, 548n.8; cúpulas, 455-456, 551n.22; góticos, 143, 158, 160, 161, 559n.39; románicos, 466; torres, 497. *Ver también* estribos
- Contrarresto, 100, 124, 129; arquitectura bizantina, 4; bóvedas colaterales, 296-298; cúpulas, 266-278; regla superficial, 267, 277-278; Gautier, 322; gótico, 138, 141, 157-160; siglo XIX, 377
- Contratos de construcción: puentes medievales, 178; San Nicolás, 549n.8
- Coro, en España, con bóvedas rebajadas, 560n.42
- Coro gótico: estribos del, 152, 154, 155, 161; de Gerona, 138, 168-176; pared del, espesor de la, 154-157, 159, 161, 162, 163, 164
- Cortes, método de los, 347-348, 435, 501-502; bóvedas de crucería, 468-473, 482, 559n.38; bóvedas vaídas, 482-485; estribos, 511; soluciones de cúpulas de fábrica, 442-446, 447, 451-453, 455, 460, 465-466, 528-532, 558n.25
- Crucero, cargas sobre los pilares, 279
- Cubiertas: armaduras, tratado sobre, 302; estructura oculta, 512; entrada de agua, 505; hundimiento accidental sobre arcos o bóvedas, 394-395; madera, procesos constructivos, 240; muros sometidos sólo al peso de las, 245; peso sobre los pilares, 317, 507, 512; templos circulares, 546n.11; viento, 498, 499, 500, 505-508, 560n.50
- Cuña, método de la, 304, 524-526, 529, 531, 539n.1, 552n.36
- Cuñas de madera, 546n.16
- Cúpulas: Alberti, 186-187, 188; arcos torales, 453; bóvedas de cañón, comparación con, 347-348; bóveda «ideal», 265; cálculo científico, 240, 524, 528-532; compuesta de arcos y cornisas, 186; consolidación, 458; contrafuertes, 455-456, 551n.22, 558n.26,30; decoración, 200; esbeltez, 450, 559n.31; espesor, 200-201, 248-249, 443, 455, 458-459, 546n.12, 552n.36, 559n.31; Frézier, 276, 345, 347-348; Gauthier, 529; Gol Gumbaz, análisis, 451, 452, 455, 457; gradas, 250; grandes cúpulas, 457; informes periciales: Palladio, 199-201; juntas, 248, 250; ley de semejanza geométrica, 390, 391; linterna, 460; matemáticas, 528-529, 531; materiales, 460; óculo, 135, 186, 466,

- 550n.12; Palladio, 199-201, 339; percepción visual, 267, 270; perfil, 199-201; Poleni, 444-446, 524, 529, 531, 558n.30; proporción del tambor, 135; regla de proporción, 3; seguridad, 249-250, 293, 458; tamaño, 457, 463; Tosca, 289, 292-293; trasdós, 529; tratados, 272, 274, 275; trazas góticas, 451, 544nn.17-18; trazado, 339, 459-461, 461
- Cúpulas, comportamiento estructural: análisis límite, 89, 129; análisis de, 440, 558n.29; analogía con los arcos, 446; cargas concentradas, 443; catenaria, 437-438, 444, 449, 452, 455, 524; efecto de pequeños movimientos: grietas meridianas, 446-448, 453, 458, 460, 529, 558n.26, 30, 531; empuje, 292-293, 440-441, 446-453, 459, 460, 502; empujes, línea o superficie de, 443, 444-449, 451, 452, 455, 458, 460, 461, 465-466; espesor límite, 449-450, 530, 558n.27; estabilidad, 292, 436, 458; estática gráfica, 530-531; forma correcta, 453; forma ideal, 528, 529, 531, 552n.29, 558n.22, 23; grandes deformaciones, 448, 541nn.11-12, 542n.23; la estabilidad del tambor de contrarresto: el caso de San Pedro de Roma, 453-, 456; sobre las tensiones, 456-457; mecanismos, 448, 450, 529-530, 449; método de La Hire/Béldor, 529, 531, 539n.1, 552n.36; modelos colgantes, 444, 455, 529, 530, 531; planos de corte, 436, 437; seguridad de las cúpulas de fábrica, 450-; cúpula de paños, 451-453, 454; soluciones de membrana, 436-442, 450, 530, 558n.19-22; soluciones de equilibrio, el método de los cortes, 442-446, 447, 451-454, 456, 460-461, 465-466, 528-532, 558n.25; tensiones, 28, 453, 457, 29; tensiones de tracción, 14, 443; tracciones, 438-442, 443, 558n.20, 22; transformación afin de cúpulas: cúpulas ovales, 462-466
- Cúpulas, construcción: andamios, 187, 188; aparejo de ladrillo en espina de pez, 188; arranques, 546n.12, 275; cadenas y arcos de ladrillo, 184; cantería, 550n.12; cimbrias, sin empleo de, 186-188, 292-293, 436; disposiciones constructivas, 186-188, 292-293; embecaduras, 249, 549nn.7-8; estereotomía, 248; ladrillo, 380, 558n.29; lengüetas, 249, 441, 459; nervios, 448, 451-454; óculos, 250, 292, 436, 438, 453; pilares, 453, 552n.26; rellenos, 441, 458; secciones constructivas, 454
- Cúpulas, reglas de Fontana, 266-278; cúpulas dobles: San Pedro, 267-270, 273-274; cúpulas simples, 270-274, 276; influencia posterior, 274-276; sistema de apoyo y contrarresto, regla superficial, 277-278
- Cúpulas, tipos: apuntadas, 201, 390, 391, 451-54, 461; barrocas, 455; bizantinas, 278; bóvedas de crucería con forma cupuliforme, 209, 215; dobles, 267-270, 273-274, 460, 530; ovales, 462-466, 559nn.33-35; perlongada, 249, 267; poligonales, 186-187, 188, 347-348, 390, 391, 451-453, 454, 530; rebajadas, 249, 441, 443, 449-450, 458; renacentistas, 186-187, 188, 239, 453, 455; romanas, 3, 28, 135, 184, 339, 453, 459, 463, 546nn.11, 12, 559n.31; románicas, 462, 559n.33; semiesférica, 249-250; simples, 267, 270-274, 276; tabicadas, 440, 441, 550n.8, 558n.22; templos circulares romanos, 277
- Deformaciones de los arcos, 331, 527-528, 541nn.11-12, 542n.23
- Deformaciones elásticas, 12, 27, 77-79, 527-528
- Descarga del trasdós de los arcos, 329-331
- Descimbramiento, 3, 7, 38, 39, 72; arbotante, 3, 543n.6; bóvedas de crucería, 217, 279-280, 466, 543n.6; dimensionado previo de estribos, 345; modelo de arco, 52; movimiento, 74-76, 124, 398, 124; precompresión previa, 205, 546n.16; puentes, 205, 366-368
- Dimensionado, 29-30, 126, 375, 376, 381-383, 387, 517; Gil de Hontañón, Rodrigo, 207-238; excesivo o insuficiente, 241-242; templos, 133-135
- Diques, muros de contención, 321, 557n.16

- Dovelas, 31–32, 49; arco de, 38–39, 41, 50, 52, 53, 55, 56, 88, 119; arcos y bóvedas rebajadas, 396; bóvedas en rincón de claustro, 250–251; bóvedas de crucería, de espesor reducido en, 357; caras paralelas, 264; cúpulas, 186, 250, 445, 446, 451, 528, 558n.29; elementos metálicos entre, 189; esfuerzos entre las, 286, 524–526, 529, 531; espesor, 146, 396, 552n.36; forma cuneiforme, 264; grapas y espigas, 121; dirección de las juntas, 182; juntas no planas, 121, 122; labra gótica, 138; «pendans», 343, 344; peso de, en arcos ideales, 524, 552n.36; precompresión previa, 205, 546n.16; puentes, 314, 318, 321; replanteo gótico de las juntas, 139, 140; resaltes entre, 291–292; sin rozamiento, 322, 524, 552n.36; trespuntada, 289
- Drenaje, 59
- Ductilidad, 432, 439
- Economía: arcos apuntados, 343–344; bóvedas de crucería, 349–352; cúpulas, 270; ejecución de estribos, 422–426; formas tradicionales, 398; uso de reglas y gasto de material, 320, 372, 518; mano de obra, 423; material, 364, 557n.16; gótico, 357–358, 370–371; puentes en arco de grandes luces, 406
- Edad Media, 7, 133–179; antecedentes: la antigüedad y Bizancio, 133–136; la geometría en el gótico, 136–138; Villard de Honnecourt, 138–140; reglas geométricas góticas en fuentes renacentistas y barrocas, 141–151; reglas estructurales del gótico tardío alemán, 151–168; los congresos de expertos: la catedral de Gerona, 168–176; proyecto de puentes medievales, 176–179; reglas de proporción, 279; replanteo, 134. *Ver también* gótico
- Edificios: civiles, 195–199, 548n.8; comparaciones, 278, 283; dimensiones básicas, góticas, 154–156, 544n.22; estribos de, 106, 108; iglesias de una nave, 159, 208, 241, 257, 544n.22; iglesias de tres naves, 257; iglesias de cinco naves, 257; iglesias salón de tres naves, 208–224, 236–237, 512–514, 549n.14; proporciones edificios públicos, Palladio, 194; edificios privados, 194, 241–242; proyecto de iglesias góticas, 207, 208–209, 212–213, 215; sobre puentes, 363, 365; reconstrucción, 532; tamaño, 514–515
- Edificios, análisis, 89; método de los bloques, 501–, 530, 561n.54; la estructura gótica, 502–508, 532; la catedral de Palma de Mallorca, 508–514, 532, 561n.53; proyección afín de edificios, 514–515
- Egipto, 135
- Elasticidad, 11–12, 14, 17, 517–518, 523, 532, 539nn.4, 3, 540n.9; análisis, 29, 72–74, 77–79, 82; arcos, cálculo elástico de, 47, 72, 82, 527–528, 532, 540n.4, 7, 557n.10; cáscaras, 439; constantes elásticas, 11, 73, 532; construcción tabicada, 549n.5; deformaciones, 12, 27, 77–79, 527–528; estructuras góticas, 467, 532; línea de empujes «verdadera», obtención, 527, 540n.5 módulo de, 377, 538n.11; puentes, 556n.7; sección reducida, 73; tercio central, 73, 102–103, 106, 109, 113, 533
- Embedaduras. *Ver* rellenos, riñones.
- Empirismo, 320
- Empuje: ángulo respecto a las juntas, 120; cálculo del, 62, 104; Danyzy, 332–334; centro de, 36, 40, 41, 42, 66, 539n.9, 557n.12; coeficiente de estabilidad, 104–106, 115; concentrado, 427; construcción tabicada, 549n.5; contrarresto con peso, 279–280; contrarresto entre bóvedas colaterales, 296–298; definición y empleo del término, 538n.2; dirección, 332, 333, 335; equilibrio, 420; junta de rotura, 104, La Hire, 276, 322, 524–526, 537n.3; mayorado, 539n.1; máximo, 45–47, 49, 50, 76, 413, 447, 503–505, 509; mínimo, 45–47, 49, 50, 72–73, 75–76, 413, 418, 509; muros con, 478; muros sin, espesor de, 245; resistido por muros, 430; relación con el peso, 242–244, 429; peso específico, independiente del, 336; plementería, 559n.39; posición dentro de la sección, 89; polígonos

- de, 40, 41; puentes, 176, 314, 315, 319, 364, 366, 367, 520; radial, 279; tangente al intradós, 95, 540n.8; tejados (Góticos), 217–218; tipo de arco, 285; transmisión a través de los rellenos, 395–396; transformaciones afines, 410; uniforme, 427; variable, 470, 471, 540n.5; viento, 505–508; Wren, 278–284; zunchos, 267–270, 530, 552n.33. *Ver también* línea de empujes
- Empuje de los arcos: arbotantes, 247, 427, 466, 503–506, 508, 509, 511; arcadas, 420–422, 421; arco adintelado, 265, 290, 346–347, 502; arco apuntado, 290, 299, 319, 343, 520; arco crucero, 296–299, 559n.36; arco de medio punto, 289, 319, 520; arco mixto, 289; arco parabólico, 560n.41; arco perpiñaño, 508–515; arcos rebajados, 183–184, 227, 228, 285, 299, 319, 396–397, 433
- Empuje de las bóvedas, 141, 142–144, 241, 299, 302, 322, 346–348, 555n.28; apuntadas, 343, 378–379, 520; arista, 251; cañón, 346–348, 429–432, 520, 528–529; con lunetos, 430; compuestas, 346–348, 528–532; crucería, 217, 293, 302, 350, 466, 468, 478–485, 487, 488, 491–494, 501–515, 559n.39; elípticas, 411–412; Frézier, 344–352; La Hire, 322, 524–526, 539n.1, 552n.36; método de los cortes, 347–348, 435, 528–532; Petit, tablas de, 397; rebajadas, 378–9; San Nicolás, 245, 249–251; siglo XIX, 377; transformación afín, obtención del, 411–412; vaídas, 482–485, 492–493; variable, 504–505, 512
- Empuje de las cúpulas, 440–441, 446–449, 451, 452, 453, 455, 459, 460, 502; método de La Hire/Béldor, 529, 531, 539n.1, 552n.36; San Nicolás, 250; Tosca, 292–293, 502
- Encadenados, 21
- Encofrados, 212
- Energía disipativa, 118
- Energía de fractura, 14, 537n.3
- Enjarje, 21, 474; bóvedas en rincón de claustro, 251; muro-contrafuerte, 426–432, 488, 489, 492–493
- Enjutas. *Ver* rellenos, riñones
- Ensayos: arcadas, 422; reglas de Rodrigo Gil, 225, 230–231, 422; sobre estructuras reales, 428–429
- Ensayos de materiales, 12, 316; elasticidad, bóvedas, 27, 73; flexión, 363; máquinas de, 363–364; Renacimiento, 5; resistencia de las fábricas, 21–28, 362, 364; resistencia del hierro, 363; resistencia del hormigón, 25; resistencia de la madera, 363; resistencia del ladrillo, 17; resistencia de los morteros, 18, 19; siglo XIX, 537n.2; tracción, 363
- Ensayos de colapso de arcos, 542n.21; AIAA, 73, 527–528, 539n.3; bóvedas, 82; Barlow, 50–53, 57; Boistard, 81, 96, 526; Danyzy, 79–80, 332–334, 526; Gauthey, 526; Gautier, 329–331; Leonardo da Vinci, 329, 550n.15; mecanismo de deslizamiento, 118–121; Parland, 118–119; Rondelet, 95, 378, 529; semiarco, 329–331; otros tipos de arcos, 80, 333
- Ensayos de fractura de estribos, 109, 111, 114–115, 541nn.14, 15
- Ensayos de pórticos de acero, 77–79, 126–127, 539n.3, 540n.5
- Ensayos de piedras, 13–17, 537n.2; influencia de la humedad, 14; Gauthey, 364; Perronet (primeros ensayos), 28, 362–364, 368; Rondelet, 364; Santa Genoveva, 364; Soufflot, 366–368
- Ensayos de puentes de fábrica, 82
- Perronet, primeros ensayos, 362–364
- Entramados triangulados, 376, 408
- Equilibrio, 6, 7, 385–522; análisis de, 375–376, 380, 518, 557n.10; antigüedad, 136; catenarias, 342–343; cimborrios, 294–299; como suma de pesos, 331; cúpulas, 248, 460–461; ecuaciones de, 35, 36, 45, 53, 71, 72, 79, 90, 112, 121, 127, 129, 331, 413, 514, 532, 561n.53; empujes en arcadas, 420; enfoque, 126–129, 517, 521; estados, 87–88; estable, 94, 118; estático, 89; estudio científico, 320; inestable, 84, 90, 91, 92, 530; leyes del, 240, 276, 321–322, 331; líneas de empujes, 35–69, 375; masas, 264,

Equilibrio (*continuación*)
 279, 281, 288, 294-299; membrana, solución de, 439, 530; perfiles de arcos en, 339-340; sin rozamiento en bóvedas, 322, 342; teorema de la seguridad, 89-91; torres, 495-501

Esbeltez, 29, 49, 68; arcos, 394-395, 399, 400; chimeneas, 392-393, 560n.48; cúpulas, 450, 559n.31; elementos, 241-242; pilares góticos, 357, 366, 508, 512, 513; pilas de los puentes, 357, 359, 364-368; tambor de las cúpulas, 455, 460-461, 546n.11, 551nn.21-22

Esbeltez, estribos, 104, 121, 241, 418, 419, 433; góticos, 144, 159, 487-488, 492; Gerona, 169; influencia en el espesor, 230; Panteón, 283; puentes, 359, 433-434

Esbeltez, puentes: Gautier, 401; Perronet, 364, 379, 401-402; en relación con el tamaño, 392-393, 401-403

Esbeltez, torres: Albertí, 263; espesor, en relación con, 496-501, 547n.7; góticas, 166, 176, 221-224; Renacimiento, 192, 193; San Nicolás, 253-254, 255; en relación con el tamaño, 392-393

Escala, comportamiento de las fábricas independiente, 331

Escalera, 411

Escayola, modelos, 81, 255

Escuelas de Arquitectura e Ingeniería, 375

Escultura: gótica, 137; puentes, 176

Esfuerzos internos, 77-79, 88-89, 91, 126; compresión, 435; estado de servicio, 127; proyección afín de edificios, 514-515; transformación de arcos 407-413; transformación de bóvedas, 432-433; transformación de cúpulas, cúpulas ovales, 462-466; variación en función de diversos factores, 540n.5

Estabilidad, 3, 4, 11, 30, 89, 102-104, 518; arcos con grandes deformaciones, 122, 541nn.11-12, 542n.23; arquitectura oblicua, 410-411; bóvedas, 249-251, 341, 467; bóvedas de crucería, 468-476, 478-485; bóvedas vaídas, 482-485; claves, 102; durante la construcción, 473-476; estereotomía, relación con, 250, 331; estribos, 114;

independiente de la escala, 331; modelos a escala, 202-203, 302, 519, 521; momento de, de Rankine, 415-416, 422-426, 557n.15; de posición, 413; problema proporcional, 433; puentes, mejora de la, 205, 518; resistencia en lugar de, 317; de rozamiento, 412-413; tamaño, 518; torres, 192, 496-501, 518; transformación afín y grado de, 408-411, 432-433

Espesor, arcos, 57, 64, 118, 128, 487; arcadas, 420-422; arranques, 341-342; cargas pequeñas o peso propio, 340-342; Couplet, 339, 525, 526; de gran espesor, 118-119, 292; estribo, influencia en el espesor del, 149, 323, 396; Frézier, 339-340, 340-342; Gil de Hontañón, 225, 226, 231, 235-237; en función del material, 397; mínimo, 339, 436; puentes 317-319; regla de Alberti o del décimo de la luz, 151, 188-190; reglas renacentistas, 145-146; resistencia, influencia en la, 341; riñones, influencia del macizado de, 395-397; San Nicolás, fray Lorenzo, 246; teoría con rozamiento, 339; teoría sin rozamiento, 339-340; Tosca, 289, 290; variable, 339-340

Espesor, bóvedas, 64, 96-97, 248-249, 284, 340-342; arranques, 341-342; cargas pequeñas o peso propio, 340-342; clave, 340-342; equilibrio sin rozamiento 322; Frézier, 355; límite, 558n.27; en función del material, 397; medición de bóvedas, 556n.4; influencia de la resistencia, 341; reducción, 358

Estática, 6, 86; Bizancio, 136; equilibrio, 89, 321-322; estribos, 104; Gautier, 321-322; gráfica, 376, 445-446, 466-467, 526, 530-531, 539n.4; herramientas, 103; líneas de empujes, 35-69, 526; manuales, 45, 526; mecanismos de colapso, 305; siglo XVII, 279, 281-284; torres, 496-501; transformaciones, 44, 45, 60

Estatuas de coronación, 67

Esterotomía, 80; arcos, 246; arcos catenarios, 342; bóvedas, 248; bóvedas de arista, 348; cúpulas, 248, 250; estabilidad, relación con la, 250, 331; gótico, 137-139;

modelos, 255-256; nervios de las bóvedas de crucería, 349; pendans o dovelas sin labra, 343, 349-350; puentes, 319; Renacimiento, modelos a escala, 202-203; plantillas de las columnas, 194

Estética: arcos apuntados, 289, 343-344; arcos carpaneles y elípticos, 265; arcos catenarios, 342; arcos de sección variable, 342; cimborrio, 296; economía de material, 357-358; gótico, 172-173, 348; Fray Lorenzo, 245, 246, 248, 249, 251; Frézier, 342, 348, 350, 352; percepción cúpulas, 267, 270

Estribos: ábsides de las iglesias, 151, 424-425, 426; análisis de equilibrio, 413-418, 511; anchura, 158, 215, 230; capillas laterales, existencia de, 245, 257; carga de colapso, 432; catedral de Gerona, 138, 168-176; cedimiento, 421, 446-448, 460, 474, 479, 480, 511, 529, 538n.11, 541nn.11-12, 558nn.26, 30; cimborrio, 294-299; coeficiente de estabilidad, 104-106, 115, 557nn.15, 16; coeficiente geométrico de seguridad, 106-109, 460-461; contrafuertes adicionales, con, 286, 413, 426-432, 455, 548n.8, 551n.22; desplome, 108, 418, 420, 541nn.11-12; ecuación matemática, 423; ejecución, 423, 424, 539n.7; enjarje con el muro, 426-432, 488, 489; ensayos con modelos, 549n.15esbeltez, 121, 230, 414, 418, 419, 433-434; góticos, 169, 487-488, 492; escalonados, 67-69; estribo equivalente, 493; fallo por cortante, 432; fallo por deslizamiento, 64, 65, 66, 67, 533; en cabeza, 67, 69, 104; fallo por vuelco, 64, 67-69, 106, 107, 109-115, 230-231, 332-334, 345, 418, 419, 533-535; gótico, 3, 68, 141-151, 208, 209, 212-217, 370, 423, 425-426, 557n.14; grietas, 109, 115, 121-126; hundimiento, 115, 281; influencia del aludado, 422-426, 485-490, 492-493; juntas críticas, 67-69, 413-414, 416; lengüetas a modo de, 250; línea de empujes, 61-69, 417, 533-535, 539n.8, 560n.52; lunetos a modo de, 251, 342; macizado, 307, 309, 310, 311; material, canti-

dad de, 422-426; mejora de estabilidad, 67, 100; módulo de estabilidad, 106; momento de estabilidad de Rankine, 415-416, 422-426, 557n.15; estribos compuestos, 426-432; monolitismo, ausencia, 333-334; muro continuo como, 64, 301; peso, 241, 415, 422-426, 433, 487; peso específico del estribo, 534-535; pilares como, 279-280; planos de corte, 64-68; crecimiento, 309, 311-313; rectangular, 64-67, 106, 111, 113, 533-535; refuerzo, 170, 172; retallos, con, 159, 215, 413-414, 422-426; rígido, 104, 109, 111, 113, 114, 446; seguridad, 63-64, 66, 67, 69, 104-115, 125-126, 215, 413-418, 419-420, 422-426, 506, 541n.10; torres, 166-168, 254, 451, 496-501; transformación afín, 425, 432-433

Estribos de arcos, 142; adintelados, 290-292, 323, 332, 336-337; apuntados, 227, 228, 234-237, 284-286, 289-290, 332, 336-338, 485-490; ligereza, 343; La Hire, 276, 322, 524-526, 539n.1, 552n.36; medio punto, 284-286, 289, 332, 336-338; mixtos, 289; en función del peralte, 299; peraltados, 284-286; perpiños, 142-143, 485-490, 508-515, 547n.4, 548n.8; rebajados, 191, 227, 228, 234-237, 284-286, 336-338, 396-397, 549n.14; regla de Blondel, 142-148, 284-286, 380, 552n.36; Frézier, crítica, 345, 346; Gautier, crítica, 322-325; regla de Gautier, 323-325, 326; reglas de Rodrigo Gil de Hontañón (medio punto), 223-237; Rondelet, 378, 379, 529; San Nicolás, fray Lorenzo, 247; tablas, 526 (Gari del y Michon); cualquier tipo de arco, 334-338

Estribos, bóvedas de cañón, 3, 63-64, 141; cualquier forma (Plo), 306; comparación con otros tipos de bóvedas, 346-348, 350, 378, 528-529; la Hire, 276, 322, 524-526, 539n.1, 552n.36; elípticas, 433; rebajadas, 549n.14; excesivos, 320; regla de Blondel (invalidéz), 142-144, 284-286, 380, 552n.36; Gautier, crítica, 322-323, 325; Petit, tablas, 397; reglas de Rodrigo

- Estribos, bóvedas de cañón (*continuación*)
 Gil de Hontañón, 223-237, 548nn.8, 9; de piedra, 242-244, 429-432; Rondelet, 378, 379, 529; de rosca de ladrillo, 242-244, 429; tabicadas, 242-244, 429, 549nn.5, 7; Tosca, 300-301; estribadas sobre muros continuos, 242-244; Wren, 284; estribos simples para arcos y bóvedas de cañón, 413-422, 455
- Estribos, bóvedas de crucería, 435, 466-495, 496, 501-515, 518, 519; colapso, 490, 511; regla de Blondel, 142-144, 286; Frézier, no da regla, 348, 350; Gil de Hontañón, 208, 209, 210, 212-217, 547n.4; ley del cuadrado-cubo inversa, 487; neogóticas, 376, 377; Tosca, 293, 300; verificación de reglas empíricas para estribos, 485
- Estribos compuestos, 426-432, 455, 502; reglas de fray Lorenzo de San Nicolás, 429-432; colapso de estribos compuestos, 432, 541n.17
- Estribos, cúpulas, 135, 248, 293, 347-348, 440, 446-449, 451-456, 459; método de La Hire/Béllidor, 529, 531, 539n.1, 552n.36
- Estribos, fractura, 63, 109-115, 333-334, 533-535, 541nn.13-17, 542n.23, 560n.52; colapso de bóvedas y estribos, 115; colapso de estribos previamente desplomados, 115; forma, 111-114, 533-535, 541nn.13-17, 542n.23; muro-estribo, 429-432, 551n.22
- Estribos, proyecto: estribos simples para arcos y bóvedas de cañón, 413-, 414; bóveda de cañón sobre estribos rectangulares, 418-420; estribo de una arcada, 420-422; sobre la forma ideal de los estribos simples, 422-426; estribos compuestos, 426-, 427, 429; reglas de fray Lorenzo de San Nicolás, 429-, 431; colapso de estribos compuestos, 432; transformación afín de bóvedas sobre estribos, 432-433; estribos de puentes, 433-434
- Estribos, reglas tradicionales de proyecto, 104, 115, 413, 479; reglas góticas, fuentes renacentistas y barrocas, 141-151; reglas gótico tardío alemán, 157-168; reglas renacentistas, 195, 195, 199, 202, 431; reglas de Gil de Hontañón, para arcos y bóvedas de cañón, 223-237, 419-422; reglas del siglo XVII: San Nicolás, fray Lorenzo, 241-246; regla del tercio, 242-244; reglas del siglo XVIII, 289, 299-314, 332-338, 344-352; reglas, validez de las, 417-418, 485-494
- Estribos simples para arcos y bóvedas de cañón, 413-422, 455; bóveda de cañón sobre estribos rectangulares, 418-420; estribo de una arcada, 420-422; forma, 415, 417, 422, 493, 557n.15; sobre la forma ideal de los estribos simples, 422-426
- Estructura
 cantidad de (reducción), 357-358, 364, 370-371
 concepto de, como esqueleto resistente: Alberti, 184-185; Rodrigo Gil, 184, 208; Viollet-le-Duc, 184
 exterior, 357
- Estructuras de fábrica: aparejo, 3; cálculo, 1-8; calidad, 154-157, 159; comportamiento estructural, 288; constantes elásticas, 21, 27-28, 532; decadencia, en el s. XIX, 376; deformaciones, 115; grandes deformaciones, 116, 120, 121-126, 541nn.11-12, 542n.23; espesor de las juntas, 22-24; estabilidad, 3; heterogeneidad, 532, 540n.5; inestabilidad, 115, 128; material, propiedades mecánicas, 11-34, 88, 127; fábrica, 19-27, 30-34, 115, 532; tensiones, 27-30
- Fallo: cimentación, 241; por cortante, 26, 432, 456; por deslizamiento, 30, 31, 32, 34, 38, 80, 81, 88, 115, 116-121; por dislocación, 126; paso del tiempo, 241; de resistencia, 30, 126, 197
- Faros, 496, 560n.45. *Ver también* torres
- Física, 319, 329, 331
- Flecha gótica, 89, 166
- Flexión. *Ver* vigas.
- Florones, 442
- Fluencia, 439
- Fortificación: taludes, muros de contención, 321; tratados de, 201-203, 555n.28
- Fragilidad, 432

- Fraguado, 3; aceleración, 18; esfuerzos internos en función del, 540n.5; hormigón, 19; mortero, 72-73, 458
- Fuller, método de, 47-50, 103; Fuller/Heyman, 50
- Geometría, 321-322, 325, 385-522; aplicada, 288; arcos de sección variable, 339-340; bóvedas, 349-352; cimbras, 248; coeficiente geométrico de seguridad, 92-94, 339; condición principal en las fábricas, 362, 518, 519, 521; conocimientos, 554n.12; cúpulas, 199-201; esencia del proyecto de las fábricas, 331; griega, 136; imperfecciones, 78, 136; ley de semejanza geométrica, 134-135; Galileo y el principio de semejanza, 387-394; ley del cubo-cuadrado, 390-394; puentes, 188, 189, 193, 194-195, 196; resistencia en lugar de geometría, 329; románico, 136; tratados, 149, 265
- Geometría gótica, 136-139; procedimientos geométricos, 137, 154; ad quadratum, 160-162, 163, 164, 166; bóvedas de crucería, 349-352; espesor de la nave, 156; nervios, 349; plantillas de los maineles, 160-165; plantillas de los nervios, 162-166; Gil de Hontañón, 217-220, 210; regla de Blondel, 142-148; regla de Hernán Ruiz, 148-151, 152, 153; trazas generales del templo, 208-209, 210, 212, 215; traza y monte, 162, 209-212, 215-217, 219, 543n.7, 544nn.17-18; trazado de arcos, 145; nervios, 162, 209-212, 215-216, 544n.18
- Girola gótica, 376
- Godos, origen de la bóveda de crucería, 349
- Gótico, 133-179; aritméticos, 222; armaduras, 217-218; arquitectos, 222, 225; aspectos formales y compositivos, 137; construcción y estabilidad, 468-476, 542n.6, 543n.7; la estructura gótica, 502-508, 532; clásico, 138, 544n.22; comparación con la arquitectura del siglo XVIII, 352; constructores, 280, 289, 292, 361, 399; erit' a, 265, 285, 357, 557n.14; estética, 348; decoración, 137, 153, 154; esoterismo, 137; España, 239; estética, 172-173, 348; estudios del s. XIX, 399, 531, 532; flechas, 89, 166; funcionalidad, 532; gabletes, 153; gótico tardío español, 474, 553n.4; hundimientos, 366; ideal de belleza, 137; influencia en Alberti, 184; ligereza, 357-358, 370; literatura sobre, el estudio de la estructura gótica, 466-468, 532; maineles, 154, 158, 160-165; medida base, 154-155; muros, 154-158, 208, 210, 215, 217-218; torres, 221-224; neogótico, 376, 377, 486, 512, 532; orden de ejecución de los trabajos, 202; proyecto, 137, 138, 139, 140, 154, 207, 208-209, 212, 215; revolución técnica, 176, 545n.28; rosetón, 89, 160; secretos de las logias, 141, 543nn.7, 12; teoría, 141, 175-176; torres, 166-168, 176, 208, 221-224; tracería, 168
- Granito, 82, 356, 538n.8
- Gravedad, centro de, 41, 42, 49, 50, 240, 281-284, 479, 480, 481; tambor, 552n.32; en las transformaciones afines, 408, 514; dovelas de las cúpulas, 446, 558n.24; teorema de Pappus/Guldin, 558n.24; torres, 495, 497, 560n.43
- Gremios, 141-142
- Grietas, 73-86, 91, 102, 122-123, 532, 538n.11; análisis por ordenador, 561n.54; arco adintelado, 84, 85; arcos y bóvedas de cañón, 75, 108, 109, 110, 124-125, 527; articulaciones, coincidencia, 540n.7; bóvedas de crucería, 479-480, 511, 543n.6; clave, simétricas, 333; cortante, 456; cúpulas, 446-448, 453, 458, 460, 529, 531, 558nn.26, 30; Danyzy, 332-334; deshojamiento de muros, 551n.21; desplazamientos, relación entre, 447-448, 527; AIAA, ensayos, 527-528; estribos, 106, 109, 113-115, 332-334, 533-535, 541nn.13-17, 542n.23; Heyman, 88-89; levantamiento, 559n.30; muros sobre arcadas, 421; muro-contrafuerte, 551n.22. *Ver también* estribos, fractura
- Herramientas, 185, 520
- Hierro forjado, 376, 538n.8; arco, 72, 527; elementos metálicos entre dovelas, 189;

- Hierro forjado (*continuación*)
estructuras, 82, 523; tirantes, 183; zunchos, 267-272, 283, 530, 552n.33
- Hierro fundido, 58, 376, 405-406, 556n.8
- Hiladas en estribos, 65, 533, 539n.7; extremo superior, 104; inclinadas, 66, 121
- Hiperestatismo, 71, 72, 77-79, 540n.5; arbotantes, 503-506; arcos, colapso, 86-87, 90, 91; arcos, equilibrio, 434-435; bóvedas de crucería, 473; cúpulas, 442; edificios góticos, 561n.53; regruesamiento de la estructura, 539n.1
- Historia de las estructuras, 102-103, 539n.2; estribos, 104-105
- Historia de la ingeniería de la construcción, 137, 181, 195, 240, 390, 521; puentes, 315; reglas, 521; tabicada, 244, 549n.5.; tratados del s. XIX, 377-378
- Historia de la Técnica, 203, 545n.28
- Hormigón, 6, 19-21; arcos, 38, 73, 527-528, 539n.3; bloques, 24; bóvedas, 6, 21, 27, 135, 184, 457, 530; muros, 20, 21; puentes, 406, 545n.5; resistencia, 25, 26, 28
- Hormigón armado, 11, 73, 82, 376, 406-407, 518, 527-528, 530, 539n.3
- Hormigón en masa, 393, 406-407, 527-528
- Hornacinas, 277
- Hundimientos: arcos, 122, 281, 283, 329-331, 394-395; bóvedas, 541n.12, 542n.23; bóvedas de crucería, 217-218, 532, 541n.17, 543n.6; por fallos en cimentación, 241, 395; por fallos de resistencia, 362; cubierta, 394; gótico, 366; desarrollo del cálculo, 3, 4, 6; estribos, 115; mal empleo de las reglas, 303-304, 311, 345; muro, 111; pórticos de acero, 79, 86-87; puentes, 319, 362, 366; San Nicolás, 241, 245; por guerras, 532; por paso del tiempo, 241; por falta de conocimientos teóricos, 371; torres, 111, 222, 224
- Huracanes, 175, 192
- Impostas góticas, 154, 156, 158, 214
- Imprenta, 141
- Incas, 6
- Inestabilidad, 115, 128, 439, 458; local, 126
- Informes periciales, 8, 168, 521; estribos, 431; puentes, 60, 177-179, 319; San Francisco el Grande, Madrid, 267, 274, 551n.24; Santa Genoveva de París, 267, 274, 276, 529, 552n.26; San Pedro de Roma, 529, 531, 551nn.19-23, 558nn.26, 28, 30; Wren, 278-279, 552n.30
- Informes periciales, Fontana: San Pedro de Roma, 266-278, 551nn.19-23; Santa Margarita en Montefiascone, 266, 272, 273-274, 551nn.18, 20, 271; Santa María en Vallicella, 266, 271, 272, 551n.18
- Informes periciales, góticos, 168-169, 544n.20, 546n.13; catedral de Gerona, 138, 168-176, 544nn.20, 24; Colonia, Francisco de, 202
- Informes periciales, Palladio, 193, 420, 422, 545n.6, 546nn.7-10; pilastras y arcos, informe sobre la Loggia Pública del Palacio de Brescia, 195-199, 465; perfil de las cúpulas: informe sobre el Duomo nuevo de Brescia, 199-201
- Ingeniero, 3, 11, 23, 61; antigüedad, 135-136; actuales, 60, 82, 105; vs. arquitecto, 377; Bizancio, 136; Francia, 82, 86, 105, 106, 276, 500; ingleses, 55, 58, 106, 500; manuales, 380-383; militares, 201-203; reglas, empleo de, 517; Renacimiento, 5; Roma, 7
- Intradós: arcos de sección variable por razones de equilibrio, 339-340; articulaciones, 84, 91, 92, 101; cálculo, 86, 95; bóvedas de crucería, nervios, 349; coincidencia con línea de empujes, 58, 59, 527; cúpulas, 200-201, 266-274, 275, 463, 464; estribos, curvo en, 422-426; de formas agradables, 342; formas de, 58, 59; juntas perpendiculares al, 121, 182; medio punto, 289; poligonal, en arcos, 292; radio de intradós, altura del muro igual, 286; semi-circular en arcos de sección variable, 339-340; tangencia de la línea de empujes, 540n.8; trazados geométricos, 142-143, 234-236
- Iometría, 257
- Isostatismo: análisis de membrana de las cúpulas, 438; análisis de equilibrio de las

- cúpulas, 447; bóvedas de crucería y grietas, 479; cálculo del estribo, 434, 524, 533
- Jarjamento. *Ver* bóvedas de crucería; arranques
- Juntas: arcos y bóvedas rebajadas, 396; arcos adintelados, 291-292; arcos mixtos, 289; bóvedas de crucería, 293, 349-350; cimborrio, 295; concurrencia, 264; convexas, 52; críticas; estribos, 67-69; cuñas de madera y relleno de mortero, precompresión con, 545n.16; cúpulas, 186, 248, 250, 293; degradación del material, 90; estribos, 104; fallo, 88; a hueso, 23, 329; inclinación, variación, 433, 557nn.12-13; inclinadas, 56-57; influencia del espesor en la resistencia de las fábricas, 22-24; no labradas, 349-350; modelo, 51, 57; perpendiculares al intradós, 121, 539n.7; no planas, 121, 122; con plomo, 23; quebradas, 121, 122; planos de corte, relación con, 436, 539n.9; radiales en los arcos, 182; replanteo gótico, 139, 140; resultantes de tensiones, 31-33, 35, 37-40, 43, 89, 102; rotura por cortante, 26; rozamiento, 80, 81, 116-121, 412-413; tercio central, 73, 102-103, 106, 109, 113, 533; tracción nula, 118, 533; transformaciones afines, 557nn.12-13
- Juntas de rotura, 50, 95, 104, 537n.3; Danyzy, 332-334; La Hire, 276, 322, 524-526, 529; modelo de García Berruguilla, 304-305; Petit, tablas de, 397; puentes, 204
- Labra: arcos y bóvedas rebajadas, 396; arcos y bóvedas catenarias, 398; gótica, 138; contra el deslizamiento, 121, 122; tamaño mínimo, 146; tradicional, 398
- Ladrillo, 11, 12; adherencia con el mortero, 18; aparejo en espina de pez, 188; arcos de, 38, 184, 397, 527; arcos de descarga, 455; arcos torales de rosca, 310-311, 397; bóvedas, 27, 242-245, 307, 308, 309, 310-313, 380; cadenas y arcos de ladrillo embebidas en la fábrica, 184; constantes elásticas, 17, 27; cúpulas, 380, 460-461, 558n.29; estribos, 533; fábrica de, 19-21, 24-26; hume-
- dad, 17; machones, 184; modelos, 81, 114-115; muros de, 245; origen, 17; plementería, 349, 481, 487; propiedades mecánicas, 17; puentes de, 252; resistencia a compresión, 15, 16, 17, 24-26; resistencia a tracción, 17; tambor de, 273-274, 551n.21; tensión de trabajo, 17, 538n.8; torre, 560n.43
- Lecho de cantera, 14
- Lengüetas, 249-251, 441, 459, 549nn.7-8
- Línea de empujes, 35-69; acomodación a movimientos de los arcos, 436; análisis por, 82, 128, 375, 406; arbotantes, 503-504, 506, 507, 510; arcos apuntados, 289, 290, 298-299, 398, 399, 400; definición, 36-38, 525, 526, 538nn.1, 2, 542n.20; arcos, 38-61, 62, 63, 394-395, 398, 399, 434-436; bóvedas de crucería, 468-476, 478, 559n.36; carga móvil, modificación debida a, 400; carga permanente, 527; calidad del muro, influencia en, 503, 504; cúpulas, superficie de empujes, 436, 443, 444, 446, 447-449, 451, 452, 454, 456, 458, 462; «curva de presiones», 538n.2; discordancia con la catenaria, 55; discordancia con la directriz, 398, 399, 400; edificios góticos, 501-515; ecunción, 97; elástica, 73, 527-528; estribos, 61-69, 104, 106-107, 417, 501-515; grandes deformaciones, 125, 541nn.11-12, 542n.23; hipérbola rectangular, 533; indeterminación, 58, 90, 91, 527, 540n.5; máximo, 76-77; mínimo, 75-77, 122, 418, 420-421, 456; por ordenador, 561n.54; parabólica, 483; perturbaciones, 72-86; peso propio, 507, 508; precompresión, influencia de la, 205; rellenos, 59-61; rozamiento, 118; tangencia, 46-47, 49; teorema de la seguridad, 89, 102-104, 128, 434-435; teoría matemática, 38, 54-56, 64; transformación afín, 408-409; de arcos, 407-413, 557nn.12-13; transformación afín, 432-433, 462-466; variaciones bruceas, 91; verdadera, 71, 72-74, 88, 90, 91, 527, 540n.5; viento, 505-508
- Línea de inclinaciones, 38

- Línea de presiones, 37
 Línea de reacciones, 37
 Linterna: Fontana, 270-272; Palladio, 200-201; San Nicolás, 250; García, Simón, 259, 260, 550n.12
 Logias, 141-142, 543nn.7, 12
 Lunetos, 144, 243, 244, 249-251, 342, 427
 Luz: empuje, sinónimo de, 157; gran magnitud, 176; de Gerona, 138, 168-176, 544nn.20, 24, 545n.27; iglesias y catedrales góticas, 544n.22; incremento, 75; máxima en arcos, según resistencia, 363, 364, 556n.9; nave, 162; nave central, 165; nave lateral, 165; posición de la carga, 83-86, 93-94; puentes medievales, 176, 405; puentes de gran luz, 403-407, 545n.5; reducción, 76; relleno, 185-186; relación con la altura de estribos, 230-231, 233; relación con el espesor de los arcos, 235-236
 Madera, 11; arco de, 72, 527; armadura, 127, 545n.2, 550n.17; cubiertas, 240; cuñas, 546n.16; dovelas de ensayo, 120; flechas, 166; modelo de un semiarco, 329-331; pies derechos, 212, 466; pilar como apeo gótico, 139, 140; puentes de, 406, 557n.9; rozamiento sobre piedra, 15; techumbre de, y arcilla, 546n.11; zunchos, 458
 Maestros de obras, conocimientos sobre estática, equilibrio y geometría, 321-322, 324, 325, 334, 335, 337
 estabilización de arcos y bóvedas, 398-399, 400
 Maestros, antigüedad, 133-136
 Maestros, góticos, 3, 4, 137, 141, 207; Congreso de Gerona, 138, 168-176, 544nn.20, 24; conocimientos, 370, 466, 512; estribos, 426; gótico tardío alemán, 151-168, 543n.11; torres, 254
 Mampostería: bóvedas, 27; constantes elásticas, 27; estribos, 63, 492, 539n.7; muros de, 20, 21; plementería, 481; relleno de, 11, 539n.7; tambor de, 460, 551n.21, 558n.29; tensiones, 538n.8
 Mano de obra, coste, 423
 Mantenimiento, de estribos, 423
 Manuales de ingeniería, 15, 16, 17, 23, 28, 72, 539n.8
 franceses, 105
 tercio central, 102, 103, 106, 109, 113, 533
 Maquinaria: Galileo, 388; puentes, construcción de, 178
 Matemáticas, 319, 322, 331, 377, 526; estudios sobre cúpulas, 528-529, 531, 558n.23; estudio de la catenaria, 342; línea de empujes, 539n.8; número Pi, 543n.16
 Materiales: aparición de nuevos, en el s. XIX, 376, 405-407, 518, 538n.8; columna análoga, 315-317, 362-364, 365, 537-538nn.5, 6; condición de cedencia, 439, 561n.52; degradación, 90; dúctil, 128; ecuaciones, 79, 438-439, 467; elástico-lineal, 102, 532; ensayos, 5; fallo, 197; fluencia, 439; heterogéneo, 532; influencia en el espesor mínimo de arcos y bóvedas rebajados, 397; influencia en reglas, 242-246, 273-274, 300-301, 303, 305, 307, 311; espesor de los arcos, 317-319, 329; plástico, 528, 532
 Mecánica: antigüedad, 136; arco ideal, 342; conocimientos, 554n.12; fundamento de la Arquitectura, 319; Galileo y el principio de semejanza, 387-394; tratado sobre la, de Aristóteles, 240, 266
 Mecánica clásica de los medios continuos, 116-117, 528
 Mecánica, leyes o principios de la, 2, 5, 264, 279, 287, 304-305, 321; deducción de reglas geométricas a partir de, 325, 326, 329, 374, 378, 379; empuje según, 551n.17
 Mecánicos, 136
 Mecanismos de colapso, 73-74, 79-92, 93, 95, 99; condición de, 91; cúpulas, 529-530, 531; de la cuña, 304, 524-526, 529, 531, 539n.1; por formación de bielas 304-305, 525, 526; pórticos, 87
 Mediciones, 277-278; bóvedas, 302, 306, 556n.4
 Medidas antiguas, 552n.27
 Medios auxiliares; andamios en cúpulas, 187, 188
 Membrana, análisis de, 558n.19; agujas, 441-442, 545n.4; bóvedas de crucería,

- 467; cúpulas, soluciones de membrana, 436-443, 450, 530, 558nn.19-22
 MEF, 12, 467, 517, 532, 561n.54
 Métodos de análisis, 375-376, 380, 434-435
 Método científico, 4
 Métodos fotoelásticos, 467, 532
 Método de máximos y mínimos, 86, 95; fractura de estribos, 111
 Modelos a escala, 254, 519, 521; antigüedad, 135; estereotomía, 255-256; Gil, Rodrigo, 254; gótico, 512; De Rojas, Cristóbal, 202-203; Rondelet, 378, 529; San Nicolás, fray Lorenzo, 302, 254-256; Tosca, sobre el empleo de modelos, 289, 302; Gautier, 320, 329-331; estudio de la estabilidad, 254; seguridad, 256
 Modelos de bloques: fractura de estribos, 111, 541n.14; análisis de edificios: el método de los bloques, 501-, 561n.54; la estructura gótica, 502-508; la catedral de Palma de Mallorca, 508-514, 532, 561n.53; proyección afín de edificios, 514-515
 Modelos de barro, 203
 Modelo de cartulina, 77, 78, 108, 121
 Modelo de cartulina y tiza, estribos, 114
 Modelos colgantes: bloques, 57-58; bóvedas góticas, 470-472; cables, 55-57; cúpulas, 444-446, 529, 530, 531; edificios, 58; Gaudí, 398, 470-472, 530, 554n.16, 558n.22
 Modelo de dovelas de madera, 119-120, 329-331
 Modelo de dovelas de yeso o escayola, 80, 203, 231, 255-256
 Modelo de ladrillos en miniatura, 114-115
 Molduras, 163, 165, 550n.12
 Momento: equilibrio de, 331; de estabilidad de Rankine, 415-416, 422-426, 557n.15; estribos compuestos, 426-432; flectores, 89, 439, 556n.2; plástico, 89
 Montea, 209-212, 215-217, 219, 334, 337, 476, 543n.7, 544nn.17-18; arcos de sección variable, 339-340; Tosca, 288, 294, 553n.4; cimborrio, 294-299
 Mortero, 11, 12, 21; de arcilla, 18; de cal, 18, 19, 23, 458, 538n.8; de cal y cemento, 25, 546n.16; de cemento, 18, 538n.8; de yeso, 18, 19; de yeso y cal, 18; constantes elásticas, 22; espesor en las juntas de los elementos, 349-350; fraguado, 3, 19, 72-73, 458; hidráulico, 18, 19; hormigón, 19, 20; influencia en la resistencia de las fábricas, 316, 364, 538n.8; juntas, 22-24, 533, 26; juntas sin, 329, 533; mampostería, 20; en las plementerías, 349-350; resistencia a compresión, 15, 16, 18, 19, 22-24; resistencia a cortante, 26; resistencia a tracción, 18; resistencia a tracción por adhesión, 18
 Muros: acompañamiento, 59, 66; altura sobre el trasdós de un arco, 286, 420-422; aplomar, 115; arcadas, sobre, 284-286, 420-422; armaduras sobre, 341; calidad de la fábrica, 30, 154-157, 159, 503, 421, 504; carga estabilizante, como, 279-280; contención, 106, 108, 111, 321, 541n.14, 557n.16; con contrafuertes, 115, 426-432, 502, 548n.8; construcción, según Alberti, 185; contrarresto, 64, 242-246; deshojamiento, 551n.21; desplome de, y aplomado, 542n.18; estructura, 11, 13; grietas en muros sobre arcadas, 421; hornacinas y entrantes, 277; medievales, 13, 20, 21, 208, 210, 217-218; muros-estribo, 426, 430, 478, 548n.8; naves góticas, sobre pilares, 501-515, 543n.13; paramentos, 11, 12; rellenos de cascote, 419, 428, 551n.21; romanos, 13, 20, 21; rozas, 542n.18; superficie de fractura, 111, 432, 537n.3, 541nn.13-17, 542n.23; tapial, 26; templos redondos, 286; torres, 166-168, 191-193, 221-224, 495-501; trasdós quebrado, 48, 49
 Nave: alturas relativas entre naves, 208-209, 212, 494, 503, 501-515; análisis, 501-515; central, 165, 202, 208-209; San Pablo, 283; de Gerona, 138, 168-176, 544nn.20, 24, 545n.27; iglesias salón de tres naves, 208-224, 236-237, 512-514, 543n.13, 549n.14; lateral, 165, 202, 208-209, 215, 544n.22; nave única, 544n.22; orden de la

- Nave (*continuación*)
 construcción, 279–280; peso, 317; número de naves, 208–209
- Neogótico, 376, 377, 486, 512
- Nervios, 30, 154, 160, 162–166; arcos cruceros, 162–166, 209, 209–212, 214, 216, 218, 219, 294–299, 468, 544n.18, 547n.4, 559n.36; arcos formeros, 209–212, 214, 216, 218, 219, 294–299, 544n.18, 559n.39; arcos perpiaños, 165–166, 209, 209–212, 214, 216, 218, 219, 544n.18, 547n.4, 548n.8; cola, 559n.40; bóvedas de crucería, 466, 468, 494, 501; bóvedas vaídas, 482–485, 491; combados, 478; cúpulas, 448, 451–453, 454; descuelgue, 559n.40; espesor real, 559n.40; origen romano-árabe, 545n.2; dimensiones, según Gil de Hontañón, 217–220, 476–477, 494, 509, 519; equilibrio de, durante la construcción, 473–476; esqueleto resistente, 185; estereotomía, 349; geometría, 349; como huesos, 357; juntas, 293; longitudes, 490; materiales, 293; modelos catenarios, 470; monea y traza, 162, 209–212, 215–217, 219, 294, 466, 543n.7, 544n.17–18, 553n.4; movimientos durante la construcción, 511–512; peso total, 478, 483, 492; rampantes, 478; relación con los maineles, 165; tereletes, 209–212, 214, 216, 218, 220, 478, 547n.4
- Nichos, 455
- Obeliscos, 551n.19
- Obras Públicas, 320
- Obreros, 334, 335, 337
- Ogivas, 357. *Ver también* arcos cruceros
- Órdenes clásicos, 149, 194, 284, 459
- Ordenador, 127, 470, 514, 532, 561n.54; análisis funicular, 559n.37; grietas, 561n.54; líneas de empujes, 561n.54
- Óvalo, 559nn.33–35
- Palanca, ley de la, 331
- Parábola cúbica, 558n.23
- Paralelogramo de fuerzas, 6
- Paramentos, 11, 12, 21, 539n.7, 20; puentes, 66; tambor, 551n.21
- Patentes, 141
- Pechinas, 276, 451, 453, 268, 452
- Peralte: cimborrio, 294–299; cúpulas, 444; tamaño de estribos, 299
- Peritajes. *Ver* informes periciales
- Perpiaños, 209–212, 214, 218, 508–515, 544n.18, 547n.4, 548n.8, 20, 216, 219
- Perturbaciones, 72–86; estado de membrana, 439
- Peso: altura límite, 537–538n.6; arbotante, 507; bóvedas, 249; de crucería, 293, 350–352, 485, 487; bóvedas (influencia en el tamaño de los estribos), 242–244, 300–301; cimborrio, 294; sobre claves y arcos perpiaños, 508–515; excesivo y daños, 242; tambor, 551n.21; torres, 496, 497
- Peso específico: estribos, dimensionado en función de, 303, 335–336, 492–493, 533–535; muro en arcadas, 420; piedra, 15, 362, 14; puentes, 556n.7
- Peso propio, 15, 92, 93, 100, 16; arcos, 235–236; bóvedas y edificios de iglesias, 341, 433, 508, 507; en relación con las cargas móviles, 400; arcos en edificios: peso propio, 394–397; estabilidad proporcional, 434; línea de empujes para, 527; proyección afín de edificios, 514–515; tamaño máximo de estructuras sometidas a, 407
- Piedra, 11, 12–17; adherencia con el mortero, 18; calidad, 172; constantes elásticas, 14, 27; durabilidad, 12; dureza, 363; elección, 12; energía de fractura, 537n.3; ensayos, 12–17, 362–364, 368; humedad, 14; labra, 12; mármol, 560n.43; muros, 245; peso específico, 14, 15, 356, 477; propiedades mecánicas, 12–17; resistencia, 12–24, 319, 356, 537nn.3,4; rozamiento, 15–17, 526; Saillancourt, piedra de, 368; transporte, 350
- Pies derechos, 211, 212, 466, 473–476
- Pilares, 23, 24, 29; calidad de la fábrica, 30; carga sobre, 202, 209, 279–280, 317, 362–363, 508–515; cúpulas, 276, 277–278, 453, 457, 552n.26; columna análoga, 315–317, 362–364, 365, 537–538nn.5, 6; como estribos, 279–280; comparación

- entre la altura y la resistencia, 317, 537–538nn.5, 6; esbeltez, 508, 512, 513; estribos con medio, 491; Gaudí, 557n.14; inclinados, 557n.14; informe sobre la Logia Pública del Palacio de Brescia, 195–199; Santa Genoveva, 13, 29, 552n.26; proporciones, según Patte, 276; puentes, circulares en las pilas de los, 368; reglas para el dimensionado, 277–278; seguridad, 506; tensiones, cúpulas, 457; San Pedro de Roma, 277–278, 457
- Pilas, 176–179; Blondel, arcadas, 284–286; Gautier, 314; Palladio, 194–195, 196; regla del tercio, Alberti, 190–191
- Pilastras: regla de la mitad, 197, 198; regla del tercio, Palladio, 193–194, 195–199
- Pináculos, 67, 121, 557n.14; manuscritos góticos sobre, 152
- Planos de corte, 36–38, 43, 435, 539n.9; cúpulas, 436; estribos, 64–6; verticales, 53–58, 65, 68, 69
- Planta octogonal, 559n.33
- Plantillas, columnas, 194
- Platabandas. *Ver* Arcos adintelados
- Plementería, 30, 162, 185, 211, 212, 466; como parte activa o pasiva, 502; cargas del tejado sobre, 217–218; cupuliforme, 472, 473; de doble curvatura, 468; empuje, transmisión de, 559n.39; espesor, 349–350, 480, 481, 487, 488, 492; estereotomía, 349–350; geometría, 349–350; como «carne», 357; juntas, 293; de ladrillo, 349; materiales, 293, 480, 481, 294; modelos catenarios, 470–472; orden de construcción, 473–476; «pandans», 349–350; peso de la, 478
- Polígono: antifunicular, 41, 43, 44, 45, 48, 49, 53, 97, 98; funicular, 43, 45, 47, 49, 526; arcos, 524; bóvedas de crucería, 468–476; cúpulas, 442, 445, 446, 462, 558nn.19–23
- Pórticos, 376, 420–422
- Pórticos de acero, 77–79, 86–87, 89, 126–127, 528, 539n.3, 540n.5
- Presas de fábrica, 540n.5
- Presión, centro de, 557n.12
- Principio de la Mínima Reacción, 527
- Principio de la solicitación mínima, 527
- Principio de los trabajos virtuales, 90, 118, 529
- Probetas; forma, tamaño y asiento, 13–14
- Procedimientos constructivos: bóvedas, 240; bóveda de crucería, elementos y construcción, 209–212, 216; cubiertas de madera, 240; puentes, 178
- Proceso constructivo, 73
- Proporción: aguja gótica, 138, 545n.4; arcadas, 284–286; arcos, renacentistas, 145–146; Bizancio, 136; colapso, 378, 379; cúpulas reales, 259, 260, 266–278, 559n.31; espiral de Arquímedes, 136; estribos, 141, 160; estudios geométricos del Romanticismo, 136; «gran medida», 134; Galileo y el principio de semejanza, 387–394; modelos para comprobación de, 255; nervios góticos, 218, 219; número de oro, 136; Órdenes, en función del tipo de, 284; tamaño, independientes del, 407; templos redondos, 258–259, 260; tratados, 149; torres, 191–193, 208, 221–224, 305, 496–501
- Proyecto de arcos, 339–344, 394–413; arcos en edificios: peso propio, 394–397; arco ideal, 397–399; arcos de puentes, carga variable, 399–403; por estabilidad, 394–395; Gaudí, 376, 554n.16; límites de tamaño, 403–407; por resistencia, 394–395; transformación de arcos: el teorema de la «proyección paralela», 407–413
- Proyecto de estructuras, 12, 30, 375–376, 29; cúpulas, 552n.29; Gaudí, 376, 530, 554n.16, 557n.14, 558n.22; puentes, 315, 404; a partir de reglas, s. XX, 532; a partir de la teoría científica, 381–383; por transformación de estructuras, 407–413, 432–433, 462–466, 514–515
- Puentes colgantes, 408
- Puentes, modelos de: bloques, 57–58; cables, 55–57
- Puentes de hierro fundido, 58, 405–406, 556n.8
- Puentes de fábrica: agua, paso del, 189, 359, 364–366, 367; aligeramiento, 556n.7; análisis, 55–56, 72, 406–407, 556n.7; aparejo,

Puentes de fábrica (*continuación*)

316, 317, 319; arcos de puentes: carga variable, 399-403; arcos apuntados, 319, 520; arco carpanel, 368, 462, 556n.5, 526; arcos de descarga, 204, 559n.39; arranques, 195, 363, 366, 368, 405; bóvedas elípticas, 372; calzada, 176, 178, 261; cargas que soportan, 321, 359, 363; carga máxima, 56, 83-84, 92, 93-94, 318-319; cimbras, 359, 404; cimentación, 545n.29; coeficiente de seguridad, 93-94, 107, 400, 407; carretera, 400; catálogo, 194-195, 196; cimentación, 176-178, 364; colapso, 109-111, 319; columna análoga, 362-364, 365, 537-538nn.5, 6; construcción, 187-191, 203-205, 252; contratos de construcción, 178; crecidas, 368; decoración, 176; des-cimbramiento, 366-368; deslizamiento entre hiladas, 66, 121; con edificios construidos encima, 363, 365; empujes, 319, 364, 366, 367, 520; ensayos de rotura, 82; esbeltez, 401-402; espesor límite, 93-94; estereotomía, 319; grietas, 75-78; historia de los puentes, 315; hundimiento, 319, 362, 364, 366; luces máximas, 363, 364, 403-407; de madera, en arco, 556n.9; maquinaria, 178; material de, 252, 317, 359; medievales, 138, 176-179, 196, 355, 402-403, 405, 406; modelos colgantes, 55-56; muros de acompañamiento, 59, 66, 315, 370; peritajes, 60, 177-179, 319; peso propio, relación con la carga móvil, 400, 421-422; precompresión previa, 205, 546n.16; reglas góticas, 176-179; relleno, 59-61, 176, 252, 313, 314, 363, 365; resistencia, 329, 356, 362-364, 366-368; riñones, 191, 204, 313, 314; romanos, 176, 195, 196, 204, 315, 317; seguridad, 103, 252, 253, 319, 434, 366, 540n.7; siglo XIX y XX, 28, 72, 358, 362, 405-407; sistemas de desagüe, 176; tablas, 326-329, 555nn.25, 27; tajamar, 260; tensiones, 28, 29, 404, 407, 556n.7; teoría científica, origen, 319-332; tímpanos, 176; torres: papel estabilizante, 252; tratados sobre, 177, 194-195, 204; trazas, 177, 178, 205-206, 253, 404, 556n.6

Puentes en arco de medio punto, 252, 319, 326-329, 353-354, 355-356, 359-360, 351, 382, 520, 556n.5

Puentes en arco rebajado, 66, 109, 121, 187, 319, 354-355, 356, 359-361, 368, 539n.10; arcos escarzanos, 368, 382, 393, 405, 556n.5; arranques verticales, 462; esfuerzos de compresión, 406; estribos, 191; incremento del grado de rebajamiento, 357, 366-368; Cuerno de Oro, 404; punto de rotura, 368; tensiones, 407

Puentes, espesor en la clave, 317-319, 321, 326-329, 341, 352, 355, 356, 360, 361; Alberti, 329, 341, 403, 422; Bélidor, 352, 355-356, 358; Blondel, 329; Boffrand, 360, 361, 555n.25; Croizette-Desnoyers, 402, 403; Dupuit, 402, 403; Frézier, 340-341; Gauthey, 380, 382; Heyman, tablas de, 401, 403; influencia en el estribo, 323; Leonardo, 404; Lesguiller, 381, 382; Leveillé, 381, 382; límite, 402; Martínez de Aranda, 403; Palladio, 329; Perronet, 358-360, 355, 368, 379, 380-381, 554n.23, 382, 403; Pontones, 372; Rankine, 381, 402; Reinhold, 380; Serlio, 329; influencia del material y la construcción, 329, 356; en relación con el tamaño del puente, 329, 355, 359-360, 393, 400-401, 403-407, 434; en función del tipo de arco, 355-356, 359-360; en función de la carga de colapso, 401; mejora de las reglas del s. XVIII, 380; reglas no proporcionales, 318-319, 326, 327, 329, 400-403, 433-434; siglo XIX, 380-383, 402, 403; tablas, 326, 327, 329, 356, 359-362, 372, 380, 400-402; teoría de bóvedas, 380-383; Trautwine, 402, 403

Puentes, estribos o cepas, 66, 109-111, 176-177, 539n.10; altura, 323, 420-422; como arcadas, 420-422; regla de Blondel, 144; Gautier, crítica, 322-323, 325; Alberti, arcos rebajados, 191; cargas, 359; Chezy, 368; esbeltez, 359, 434; espesor del arco, influencia, 323; espesor a partir de las pilas, 326; excesivos, 320; forma de construcción, 315; fractura de, 541n.13; Gau-

they, 541nn.13-14; Gautier, 314, 315, 317, 321, 352; La Hire, método de (Perronet), 368, 524-526, 539n.1; línea de empujes, 539n.8; mayor esbeltez, 359; Plo y Camín, 308, 309, 313-314; Bélidor, 352, 355, 372, 524-526; Perronet, 358, 366, 368, 434, 524-526; pilas como, 553n.7; Pontones, 372; reglas no proporcionales cepas y pilas (en función tamaño), 326-329, 433-434; siglo XIX, 381, 434, 539n.8; tablas, 372, 434, 526; teoría de bóvedas, 381; validez del cálculo tradicional, 433-434; Walter, 373, 374

Puentes, pilas, 176-179; altura, reglas en función de, 352, 354, 420-422; arcos rebajados, 191, 354-355, 366-368; Alberti, 187-191, 422, 326; del tercio, 190-191; influencia de, en otros autores, 205; Blondel, 326; cargas, 359, 368; cimentación, 545n.29; esbeltez, 357, 359, 364-368; espesor mínimo, 353, 366; estribos, como, 553n.7; reducción de espesor, 364-366, 367, 368; función de la carga permanente, 315-317, 537-538nn.5, 6; función de la carga móvil, 327; García, Simón, 259-263; Gautier, 314, 315-317, 321, 326-328, 352, 353; mayor esbeltez, 357, 359; hundimiento, 553n.7; Palladio, 194-195, 196, 326; Turriano, Juanelo, 203, 205-206; Bélidor, 352-355; Perronet, 357, 358, 364-368; pilares circulares, formadas por, 368; Pontones, P., 372; reglas no proporcionales pilas, 326-329; relaciones de áreas, 259-263; Roma, 315; San Nicolás, 252, 253; Serlio, 326; tablas, 372; tablas de Gautier, 326-329, 555nn.25-27; en función del tamaño del puente, 315, 327-328, 353-355; en función del tipo de piedra y fábrica, 327; en función del tipo de arcos, 352-355; tamaño excesivo, 364; tensiones de trabajo, 368;

Puentes de hormigón armado, 406-407, 545n.5

Puentes de hormigón en masa, 406-407, 545n.5

Puentes de madera, 406

Puentes, proyecto, elaboración de reglas, 317-318, 323, 326, 329, 341, 352, 354, 355, 358-362, 366, 380-381, 402-403, 550n.13, 556n.5; inventario, 405, 556n.5

Puentes, proyecto, reglas renacentistas, 177; Alberti, 187-191; Palladio, 193, 194-195, 196, 323; Turriano, 203, 205-206

Puentes, proyecto, siglo XVII, 545nn.29-30; San Nicolás, fray Lorenzo, 241, 246-247, 251-253

Puentes, proyecto, siglo XVIII, 146; Plo y Camín, 305-314; Gauthey, 380, 541nn.13-14; Gautier, 314-332, 517, 520, 521, 555nn.25-27; Bélidor, 287, 352-356, 524-526; Perronet, 358-368, 379, 380, 401-402, 524-526; Pontones, 371-372

Puentes, tamaño, 146, 190, 317-319, 326-329, 376, 380-381, 515, 518-519, 556n.9; espesor del arco, 359-360, 401-403; espesor de las pilas, 353-355; estribos, 433-434; grandes luces, 380, 403-407, 540n.9, 545n.5, 556nn.6-9; ley del cuadrado-cubo inversa, 392-393; tablas de Pontones, 372

Puntales. *Véase* pies derechos; arbotante

Puzolana, 18, 19, 552n.33

Raíz cuadrada, 213-215, 221-222, 236, 335, 336, 381, 402, 434, 477, 490, 493, 494, 496, 501, 547n.3

Rascacielos, 6

Reacciones, 43; cálculo, 72; Principio de Mínima Reacción, 72

Reconstrucción, de edificios, 532

Refuerzo, estribos, 170, 172

Relojes solares, 149

Rellenos: acción geostática, 60, 61; acción hidrostática, 60; acción vertical, 59, 61; agua en el, 93; ángulo de rozamiento entre piedra y relleno, 59; arcos, sobre, 57, 236, 289-290; bóvedas, 184-186, 249-250, 309-310, 311, 395-397, 411-412, 418, 474, 477; cúpulas, 249-250, 441, 458-459; empujes, paso de los, 395-397; ensayo sobre el papel de, en los arcos, 329-331; estribos, 539n.7; forjados tabicados, 84-86; horizontal, 102, 411-412, 418, 420-422;

- Rellenos (*continuación*)
 influencia en línea de empujes, 60, 329-331, 398-399; macizado, 395-397; en los manuales de construcción, 395-397; muretes transversales, 395; muros, 11, 20, 21, 419, 428, 551n.21; peso, 93, 100-102; profundidad, 60; puentes, 55-56, 176, 204, 313, 314; tierra, 59, 186
- Renacimiento, 3, 4, 5, 6, 239; analogías antropomórficas, 218, 219; arcos, proporciones, 146, 223-237; arquitectos, 195, 225; bóvedas de cañón, 141, 144, 208, 223-237, 239; cinquecento italiano, 201; constructores, 361; edificios, proporciones de, 194, 208-209, 210, 212-213, 257; estribos, 286; fuentes, 138, 141-151, 521; puentes, 177, 187-191, 194-195, 203, 205-206
- Reparaciones, 279-280; bóvedas de crucería, 349
- Replanteo; bóvedas, 185, 466; Edad Media, 136-138, 542n.6; errores, 542n.6; estribos, 423; templo, 133-134; tradicional de arcos y bóvedas, 398
- Requisitos estructurales, 11
- Resistencia, 11, 12; acero, 537n.3; arbotantes, 503; arco, Gautier, 331-332; arco de medio punto, 203-204; arco más resistente, 331-332; coeficiente de seguridad, 366-368, 457; columna análoga, 315-317, 362-364, 365, 407, 537-538n.5, 6; comparación entre altura de pilares de edificios, 317; a cortadura, 26, 428, 432, 456; enfoque de, 517; espesor de los arcos en función de la, 289, 318, 329, 341; de las fábricas, 3, 27-34, 35, 115, 117-118, 126-129, 362, 467, 504, 537n.4, 537-538n.6, 8; hierro fundido, 406; influencia de la humedad, 14; influencia de las inclemencias del tiempo, 363; límite de una ménsula, 389; luz máxima en un arco, 363, 364; madera, 406; mortero, 15, 16, 18, 19, 23-24, 25; piedra, 12-17, 356; pórticos, 79, 89; proyecto de las fábricas en función de, 317, 376, 518
- Retallos, 159, 215, 413-414, 422-426, 485-490, 492-493
- torres, 499
- Revolución científica, 5, 176
- Rigidez, 11, 427, 446
- Riñones, 74; aligeramiento en los puentes, 204; arcos apuntados, 289-290, 298-299; bóvedas de crucería, 212; carga, 151, 289, 290; cúpulas, 450; espesor en los, de arcos y bóvedas, 340-342; grietas, 100, 333; levantamiento, 398-399, 400; macizado, 309, 310, 311, 313, 314, 395-397, 450 313; tercio, hasta el, 307
- Riñones, relleno, 101, 102, 418; Alberti, 185-186, 191; influencia en la estabilidad, 185-186, 191, 204, 329-331, 395-397; muretes transversales, 395-396, 549n.7-8; puentes, 191
- Románico, 30, 101, 108, 501; catedral de Gerona, 169; bóvedas de cañón, 124; bóvedas de crucería, 466; cúpulas ovales, 462, 559n.33; geometría, 136
- Romanticismo, 136; tratados sobre el gótico, 137-138
- Rosca, 56
- Rosetón, 89, 543n.15
- Rótulas plásticas, 527-528. *Ver también* articulaciones
- Rozas, 542n.18
- Rozamiento: ángulo de, 26, 88; condición de, 120, 412-413; cono de, 65, 118, 120; criterio de rozamiento seco de Coulomb, 26; cúpulas, 528, 529, 531; equilibrio de bóvedas, hipótesis sin rozamiento, 322, 524, 552n.36; equilibrio sin, en arcos catenarios, 342, 524; estabilidad de, 412-413; piedra, 15-17, 30, 31, 526; teorema de la seguridad para rozamiento disipativo, 119; teoría de arcos con, 339, 525, 526; teoría de arcos sin, 339-340, 524-526, 552n.36
- Sección reducida, 73
- Seguridad, 3, 7, 28, 30, 34, 127, 289, 290, 521; análisis de membrana, 439; cálculos a favor de, 60; cantidad de material, 357-358; catedral de Gerona, 138, 168-176; coeficiente geométrico de, 92-94, 102-104, 339, 483; estribos, 63-64, 66, 67, 69, 100, 104-115, 244, 413-418, 506; grandes de-

- formaciones, 542n.23; matemáticas en relación con la, 377; modelos, 256; pilares góticos, 506; puentes, 252, 253, 313, 319, 366, 434, 540n.7; regla del décimo, 23-24; teorema de la, 89-91, 102, 103, 118, 434-435; torres, 497; inseguridad, teorema de la, 90-91
- Sentar en seco, 319, 329, 331, 332, 546n.16
- Selección natural, 6
- Semejanza, principio de (análisis dimensional), 401
- Sillarejo, 478, 487, 492
- Sillería, 11, 21, 22, 23; espesor mínimo de arcos y bóvedas, 397; bóvedas de crucería, 293; contrafuertes, 427-428; encadenados, 21; estribos, 63, 492; grapas y espigas, 121; mejora de la estabilidad, 204; muros de, 21, 503, 508-515; paramentos de, 20, 21, 539n.7, 551n.21; tensiones, 538n.8
- Sismo, 77, 121, 122, 175, 283, 560n.51; arcos adintelados, 292
- Superficie de las bóvedas, 351-352, 556n.4
- Superficie de vanos y macizos en planta, 277-278, 552n.28
- Tabicada, construcción, 18, 26, 549n.5, 7, 8, 552n.28, 554n.16; bóvedas, 248, 249-251, 301, 372; bóvedas, 242, 244, 308, 310-311, 429; bóvedas rebajadas, 97, 397; como forjado, 84-86, 395; cúpulas, 440, 441, 558n.22, 559n.34; teoría cohesiva, 549n.5
- Tabiques transversales, 84-86, 441
- Tambor: cimborrio, octogonal, 294-299; cúpulas dobles, 273-274; esbeltez, 551n.21-22; espesor del, 3, 135, 200-201, 292; materiales, influencia de, 551n.21; paramentos de sillería y relleno de cascote, 551n.21; tensiones en la base, 28, 29
- Ver también* cúpulas
- Tapial, 19, 21, 24-26
- Techumbre: peso, 317; templo, 133
- Tejados: cúpulas, 270; gótico, 217-218
- Temperatura, 435, 439
- Templos: dimensiones, 133-135; redondos, 286; replanteo, 133-134; romanos, 200-201, 277-278, 559n.31; Salomón, 551n.19
- Tenacidad, 458
- Tensión, 12, 77-79, 126; admisible en fábricas, 23-24, 33-34, 538n.8; arcos, 394, 395, 403; concepto de, 317, 362, 365, 537-538n.6; estribos, 423, 533; estructuras góticas, 467, 494; media, 457, 538n.12; pilares de las cúpulas, 457; pilares góticos, 494; presas, 540n.5; puentes, 556n.7; resultantes de, en las cúpulas, 436-442; rotura, 362, 403, 537-538n.6; puentes, 407; en relación con el tamaño, 403, 407, 494; transformaciones afines, 410; variaciones impredecibles, 439
- Tensión de trabajo: arcos triarticulados, 527; estribos, 533; fábricas, 27-34, 403, 527, 537n.5, 538n.12; ladrillo, 17; piedras, 14; puentes, 28, 404, 407; la estabilidad del tambor de contrarresto: el caso de San Pedro de Roma, 453-, 456; sobre las tensiones, 456-457
- Teoremas Fundamentales del Análisis Límite, 86-91, 115; arco de dovelas, 88; teorema del límite inferior, de la seguridad o estático, 7, 53, 87-92, 119; teorema del límite superior, de la inseguridad o cinemático, 87, 88, 90, 91, 92; teorema de la unicidad, 87, 88, 91
- Teoría de arcos, 7, 8, 30, 53, 54, 71, 397, 523-532, 545n.1, 550n.15; teoría con rozamiento, 339, 525, 526; teoría sin rozamiento, 339-340, 525, 526
- Teoría de estructuras, 2, 5, 7, 21, 35, 89, 539n.2; científica, 2-8, 9-130, 394-, 523-532; coexistencia entre reglas empíricas y enfoque científico (debate), 240, 276, 279, 519; cúpulas, 551n.18; dependencia del cálculo tradicional, 377; enseñanza y difusión, 375; España, 555n.28; influencia de Leonardo da Vinci, 550n.15; La Hire, 286, 319, 524-526, 529, 531, 539n.1, 552n.36; nacimiento, 239-240, 319-332; primeros teoremas sobre arcos, 240, 263-266, 545n.1, 550n.15; puentes, 319-332, 380-381; trazado de arcos, 339;

- Teoría de estructuras (*continuación*)
elástica, 73–74, 527–528, 532; plástica de pórticos, 79, 86–87, 89, 126–129, 539n.3; tradicional, 2–8, 73–74; antigüedad, 133–136; Bizancio, 136; gótico, 175–176; Patte, 276; siglo XVIII, 287–; Wren, 279
- Terecletes, 209–212, 214, 216, 218, 219, 220, 547n.4
como huesos, 357
- Tercio central, 73, 106, 109, 497, 113, 533
- Terreno: ángulo de rozamiento, 59; arcada de contención, 530; asentamientos, 439; condiciones, 77; empuje, 111; activo, 59–62; húmedo/seco, reglas para estribos en, 313–314; muros de contención, 321, 541n.14, 557n.16; pórticos de contención, 61, 62; presión hidrostática, 59, 60; resistencia, 313; tensiones, 538n.8
- Tierra, inadecuada en rellenos, 186
- Tipos estructurales, aparición de nuevos, en el siglo XIX, 376
entramados triangulados, 376
estructuras porticadas, 376
- Tirantes: Alberti, 183; arcos rebajados, 183; tejados góticos, 217–218
- Tiranteces. *Véase* juntas.
- Toba, tambor de, 273–274, 551n.21
- Torres: aguja, 138, 221, 547n.5; altura, 496, 498, 501, 547nn.5, 7, 560nn.45, 48; altura límite, 15, 407, 537–538nn.5, 6, 16; analogías antropomórficas, 223; arcadas en la base, 548n.8; arcadas en la coronación de, 420–422; arcos apuntados en la base, 184; campanile, 499; cimentación, 223, 254, 547n.5, 560n.48; Comares, torre de, 305; construidas sobre ruinas, 222, 224; contrafuertes, 497; cuadrada, 254, 255, 263, 497–499, 560n.43; cúpulas sobre, 221–224; esbeltez, 192, 193, 221, 253–254, 255, 263, 496–501, 547n.7; espesor variable, 499, 560nn.46, 48; estabilidad, 253, 496–501, 560n.43; estribos, 221–224, 254, 255; góticas, 166–168, 176, 208, 221–224, 254; hundimiento, 560n.43; inclinadas, 497, 499, 560n.43; levantamiento en el gótico, 138; machón central, 253–254, 255, 305; ocha-
- vada, 254; papel estabilizante en los cruces, 279; pared delgada, 497, 498, 500, 501; peso, 496, 497; proporción: Alberti, 191–192, 253, 305; puentes, defensivos en, 179; redonda, 254, 263, 497, 499, 500, 501, 560nn.43, 45; renacentistas, 191–193; retallos, 499; seguridad, 254, 497; tamaño, 496–501, 515, 518; traba, 560n.43; viento, 192, 221, 496–501, 515
- Torres, reglas, espesor del muro, 560n.45; Alberti, 191–193, 263, 305, 496–501; García, Simón, 263; García Berruguilla, 305; Rodrigo Gil de Hontañón, 221–224, 420, 496–501, 519, 547n.7; San Nicolás, fray Lorenzo, 254, 255, 305; tercio central, 497, 533
- Traba, 551n.21, 560n.43
- Tracciones, en: agujas, 442, 545n.4; arco, 283; bóvedas de crucería, 467; estribos, 533, 557n.18; cúpulas, 551n.21, 558nn.20, 22; torres, 497
- Tracería: arbotantes, 503, 504; torres, 168; ventanales, 543n.15
- Transformación afin, 44, 45; deslizamiento, fallo por, 412–413, 433; estribos, 425; Fuller, método de, 47–50; Fuller/Heyman, 50; grado de estabilidad, 433; transformación de arcos, 407–413, 557n.12; transformación de bóvedas sobre estribos, 432–433; transformación de cúpulas, cúpulas ovales, 462–466; transformación de muros de contención, 557n.16; proyección afin de edificios, 514–515
- Transformaciones geométricas, 60
- Transporte: de materiales sobre los arcos, 394; piedra, 350
- Trasdós: altura del muro sobre, en arcos, 286, 420–422; apuntado, 289; arcos, 57, 96, 102; arcos de sección variable por razones de equilibrio, 339–340; articulaciones, 84, 91, 92, 95, 101; bóveda en equilibrio sin rozamiento, 322; bóvedas de crucería, 209, 212; cúpulas, 199–201, 266–274, 275, 463; descarga en un modelo de arco, 329–331; determinación del espesor del estribo, construcción geométrica, 149, 150; inclinación, 59, 60; puentes, 55–56; que-

- brado, 48, 49; trazado, en arcos de sección variable, 339–340
- Tratados, 8, 521; antigüedad, 133–136; barrocos, 141–151; bóvedas, 135–136, 395–396, 549n.6; cantería, 553n.3; carpintería, 144; comparación entre, 274, 275; eclecticismo, 373, 374; fortificación, 201–203, 555n.28; sobre el gótico, 380; medievales, 8, 138, 177, 208, 476, 485–490, 496–501; primer análisis de bóvedas en un tratado español, 304–305
- Traza de: cimborrio, 294–299; cúpulas, 267–270, 550n.8; juntas de arcos adintelados y poligonales, 291, 292; puentes, 138, 177, 178, 205–206, 253, 404, 556n.6
- Trazas góticas, 137, 494, 553n.4; bóvedas, 138, 209–212, 349–352, 476, 544nn.17–18; cúpulas, 451; empuje, 142–144; estribos del coro, 152; iglesias, 153, 154, 155, 157, 158, 159, 161; Gil de Hontañón, 207, 208–209, 210, 212; métodos, 137; «por analogía», 208; «por ieometría», 208; nervios, 162, 210; Palma de Mallorca, catedral, 511; pináculos, 152; torres, 168, 208, 221–224
- Trazado geométrico, 142–148; arcos de sección variable, 339; arcos catenarios, 342–343, 398; Barroco; cúpulas, 201, 267–274, 459–461; elipses, 462; formas ovales,
- 462–466, 559nn.33–35; modelos de Gaudí, 398, 530, 554n.16, 558n.22; reglas de, para arcos de sección variable, 339–340; Renacimiento, 3, 4, 199–201, 339; resistencia, regla del décimo, 23–24
- Tufa, hormigones ligeros de, 457
- Túneles, 59–61
- Vaticano, 551n.19. *Véase* Roma, San Pedro
- Ventana: en muros, 419; uso del arco adintelado, 265
- Vientanal gótico, 89, 295, 297, 466, 543n.15
- Viaducto, 23–24; Du Bernand, 393, 406; Salcano, 28, 29, 406
- Viento, 175, 221, 496–501, 505–508, 515, 560nn.50, 51
- Vigas, 528; Alberti, 182, 184; Galileo, 239–240, 556n.2
- Yeso: bóvedas tabicadas, 250; dovelas, 80; modelos, 203, 231, 255–256, 302; mortero, 18, 19
- Young, módulo de, 377
- Zunchos, 552n.33; cálculo de, 530; consolidación estructural, 458; localización, 267–272; de madera, 458; papel durante el fraguado, 3, 458; Santa María del Fiore, 451, 454; Wren, 283