

Entender a arquitetura

Seus elementos,
história e significado

Leland M. Roth



GG

Título original: *Understanding Architecture. Its Elements, History and Meaning*. Publicado originalmente por Westview Press, uma divisão da Perseus Book Group

Tradução: Joana Canêdo

Revisão técnica e preparação de texto: Alexandre Salvaterra e Ana Beatriz Fiori

Revisão de texto: Solange Monaco

Design da capa: Toni Cabré/Editorial Gustavo Gili, SL

Qualquer forma de reprodução, distribuição, comunicação pública ou transformação desta obra só pode ser realizada com a autorização expressa de seus titulares, salvo exceção prevista pela lei. Caso seja necessário reproduzir algum trecho desta obra, seja por meio de fotocópia, digitalização ou transcrição, entrar em contato com a Editora.

A Editora não se pronuncia, expressa ou implicitamente, a respeito da acuidade das informações contidas neste livro e não assume qualquer responsabilidade legal em caso de erros ou omissões.

© Leland M. Roth, 1993

para a edição em português:

© Editorial Gustavo Gili, SL, Barcelona, 2017

Impresso na Espanha

ISBN: 978-85-8452-069-5

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação (CIP)
(Câmara Brasileira do Livro, SP, Brasil)

Roth, Leland M.

Entender a arquitetura : seus elementos,
história e significado / Leland M. Roth ;
[tradução Joana Canêdo]. -- São Paulo : Gustavo
Gili, 2017.

Título original: *Understanding
architecture : its elements, history and meaning.*
ISBN 978-85-8452-069-5

1. Arquitetura 2. Arquitetura - História I. Título.

16-06580

CDD-720

Índices para catálogo sistemático:

1. Arquitetura 720

Sumário

<i>Lista de mapas</i>	XII
<i>Lista de ilustrações</i>	XIII
<i>Prefácio</i>	XXIX
Introdução: arquitetura, a arte inevitável	1
PARTE UM: OS ELEMENTOS DA ARQUITETURA	7
1 “Funcionalidade”: como um edifício funciona?	9
2 “Firmeza”: como um edifício fica em pé?	19
<i>O sistema pilar e viga</i>	22
<i>Estruturas independentes</i>	27
<i>O arco</i>	27
<i>Abóbadas</i>	28
<i>Treliças</i>	33
<i>Estruturas espaciais e cúpulas geodésicas</i>	34
<i>Cascas</i>	37
<i>Estruturas suspensas</i>	38
<i>Membranas estruturais (tendas) e estruturas infladas</i>	40
<i>Tecnologia e risco</i>	42
<i>Estrutura como expressão cultural</i>	42
3 “Deleite”: espaço em arquitetura	45
4 “Deleite”: ver a arquitetura	57
<i>Percepção visual</i>	57
<i>Proporção</i>	62
<i>Escala</i>	65
<i>Ritmo</i>	67
<i>Textura</i>	70
<i>Luz e cor</i>	75
<i>Feiura</i>	78
<i>Ornamento</i>	79
5 “Deleite”: acústica, forma e som	91
6 O arquiteto: de sumo sacerdote a profissional	105
7 Arquitetura como parte do ambiente	123
8 Arquitetura, memória e economia	137

Quadro cronológico	140
PARTE DOIS: A HISTÓRIA E O SIGNIFICADO DA ARQUITETURA	141
9 A invenção da arquitetura: das cavernas às cidades	143
<i>Terra Amata (Nice, França)</i>	144
<i>Cultura neandertal</i>	145
<i>As casas dos Homo sapiens</i>	146
<i>Edificações neolíticas</i>	149
<i>Stonehenge</i>	152
<i>Skara Brae</i>	154
<i>As primeiras cidades</i>	154
<i>Çatal Hüyük</i>	156
<i>Cidades mesopotâmicas</i>	156
<i>A invenção da arquitetura e da cidade</i>	158
10 Arquitetura egípcia	161
<i>A paisagem do Egito</i>	161
<i>A cultura do Egito</i>	163
<i>História do Egito</i>	166
<i>A pirâmide escalonada de Djoser em Sacara</i>	167
<i>As pirâmides de Gizé</i>	169
<i>Casas e aldeias egípcias</i>	173
<i>A tumba de Hatchepsut em Deir el-Bahari</i>	176
<i>O templo de Amon em Karnak</i>	176
<i>Arquitetura egípcia tardia</i>	181
<i>Uma arquitetura de permanência</i>	182
11 Arquitetura grega	185
<i>A geografia da Grécia</i>	185
<i>A Grécia minoica e micênica</i>	187
<i>O caráter grego</i>	189
<i>A pólis grega</i>	191
<i>Planejamento urbano</i>	193
<i>Arquitetura doméstica</i>	195
<i>Edifícios públicos</i>	196
<i>O templo grego</i>	198
<i>Arquitetura helenística</i>	210
<i>Uma arquitetura de excelência</i>	212
12 Arquitetura romana	215
<i>História romana</i>	215
<i>O caráter romano</i>	217
<i>A religião e o templo romano</i>	218
<i>Planejamento urbano</i>	220
<i>O fechamento e a manipulação do espaço</i>	224
<i>Arquitetura doméstica</i>	230
<i>Edifícios públicos</i>	232
<i>Arquitetura romana "barroca"</i>	239
<i>Uma arquitetura universal</i>	239

13 Arquitetura paleocristã e bizantina	243
<i>A transformação do Império Romano</i>	243
<i>Arquitetura paleocristã</i>	245
<i>As igrejas de Constantino</i>	246
<i>Desenvolvimentos pós-constantinianos</i>	255
<i>Arquitetura bizantina</i>	256
<i>As igrejas de Justiniano</i>	256
<i>Igrejas bizantinas tardias</i>	263
<i>Uma arquitetura celestial</i>	266
14 Arquitetura da Alta Idade Média	269
<i>O Renascimento Carolíngio</i>	270
<i>Arquitetura doméstica e castelos medievais</i>	273
<i>Mosteiros medievais</i>	273
<i>São Martinho do Canigou</i>	277
<i>A planta da abadia de São Galo</i>	278
<i>Abadia de Cluny</i>	278
<i>Igrejas românicas</i>	280
<i>São Miguel, Hildesheim</i>	281
<i>Igrejas de peregrinação</i>	282
<i>Sainte-Foy, Conques</i>	283
<i>Saint-Sernin, Toulouse</i>	285
<i>Saint-Philibert, Tournus</i>	288
<i>Igrejas românicas na Itália</i>	290
<i>Catedral de Durham</i>	291
<i>Uma arquitetura de refúgio</i>	292
15 Arquitetura gótica	295
<i>Transformações políticas e sociais: o ressurgimento da cidade</i>	295
<i>Transformações religiosas: a escolástica</i>	297
<i>A catedral gótica</i>	297
<i>A igreja da abadia de Saint-Denis</i>	298
<i>Notre Dame de Amiens</i>	300
<i>Saint-Pierre, Beauvais</i>	306
<i>Catedral de Salisbúria</i>	308
<i>Sainte-Chapelle, Paris</i>	309
<i>Igrejas com telhado de madeira</i>	310
<i>Arquitetura gótica tardia</i>	312
<i>Arquitetura doméstica e pública</i>	315
<i>Uma arquitetura de aspiração</i>	318

16 Arquitetura renascentista e maneirista	321
<i>A Itália no século XV</i>	322
<i>O mecenas renascentista</i>	322
<i>Humanismo</i>	323
<i>Vitrúvio e a forma ideal</i>	324
<i>Brunelleschi e o espaço racionalmente ordenado</i>	328
<i>A forma ideal e a igreja de planta baixa centralizada</i>	330
<i>As igrejas em cruz latina de Alberti</i>	333
<i>Bramante e a nova São Pedro, Roma</i>	337
<i>Arquitetura residencial: os palácios dos príncipes mercadores</i>	342
<i>O palazzo Medici</i>	342
<i>O palazzo Rucellai</i>	345
<i>O palazzo Farnese</i>	345
<i>As vilas de Palladio</i>	345
<i>Maneirismo: o Renascimento em transição</i>	347
<i>O palazzo del Te</i>	351
<i>Jardins maneiristas</i>	353
<i>O Renascimento exportado</i>	355
<i>Uma arquitetura humanista</i>	358
17 Arquitetura barroca e rococó	363
<i>Uma arquitetura para os sentidos</i>	364
<i>Igrejas romanas barrocas</i>	364
<i>Uma arquitetura de impacto emocional</i>	367
<i>A planta baixa centralizada modificada</i>	371
<i>Igrejas de Bernini</i>	371
<i>Igrejas de Borromini</i>	374
<i>Igrejas de Guarini</i>	378
<i>A escala barroca</i>	379
<i>A difusão do barroco fora da Itália</i>	382
<i>Barroco francês: Versalhes</i>	382
<i>Barroco inglês</i>	383
<i>A escadaria barroca</i>	391
<i>Arquitetura rococó: o fim do barroco</i>	394
<i>Amalienburg</i>	396
<i>Vierzehnheiligen</i>	397
<i>Uma arquitetura de artifício</i>	400
18 Arquitetura na era do Iluminismo, 1720-1800	403
<i>A reinvenção da arquitetura racional</i>	405
<i>Sainte-Geneviève, Paris</i>	408
<i>"Arquitetura falante"</i>	410
<i>O desenho urbano</i>	412
<i>O jardim inglês</i>	415
<i>Ecletismo: a arquitetura da escolha</i>	419
<i>Revolução e arquitetura</i>	422
<i>Uma arquitetura racional</i>	424

19 Arquitetura no século XIX	427
<i>Neoclassicismo</i>	428
<i>Neogótico</i>	432
<i>As Câmaras do Parlamento, Londres</i>	432
<i>Saint Giles, Cheadle</i>	435
<i>Ecletismo criativo</i>	435
<i>Neobarroco</i>	435
<i>Gótico vitoriano</i>	438
<i>A arquitetura do novo industrialismo</i>	441
<i>O impacto da indústria</i>	441
<i>Reações à máquina</i>	444
<i>Indústria e crescimento urbano</i>	445
<i>Ecletismo racional: a École des Beaux-Arts</i>	447
<i>Uma arquitetura de utilidade pragmática e expressão simbólica</i>	456
20 Arquitetura do início do século XX: função e perfeição	465
<i>Arquitetura: "O desejo da época concebido em termos espaciais"</i>	470
<i>Peter Behrens (1868-1940)</i>	471
<i>Walter Gropius (1883-1969)</i>	472
<i>Ludwig Mies van der Rohe (1886-1969)</i>	474
<i>Le Corbusier (1887-1966)</i>	479
<i>Uma arquitetura perfeitamente funcional: sucesso ou fracasso?</i>	485
21 Arquitetura do fim do século XX: uma questão de significado	491
<i>Expressionismo alemão (1918-1930)</i>	491
<i>Neoexpressionismo (1955-1970)</i>	493
<i>Arquitetura "tanto/e"</i>	506
<i>Modernismo tardio</i>	508
<i>Pós-modernismo</i>	510
<i>Uma arquitetura substantiva</i>	521
 <i>Glossário</i>	 525
<i>Índice</i>	537

Prefácio

Este livro é sobre aprender a perceber e a entender o ambiente construído pelo homem. É sobre arquitetura considerada como um receptáculo físico, um espaço criado para receber a atividade humana. Mas, como a arquitetura é uma atividade social, construir também é uma expressão da sociedade, a criação de um legado da cultura. Cada edificação, seja um imponente prédio público, seja um pequeno abrigo - uma catedral ou um bicicletário -, é construída em conformidade com as leis da física, de modo a cristalizar os valores culturais de seus construtores. Este livro é uma introdução ao impulso artístico que impele a humanidade a construir, assim como às propriedades estruturais que tornam possível que as edificações fiquem de pé. É também uma introdução à linguagem cultural silenciosa expressa em cada construção. Este livro pode, então, ser considerado como um abecê do ambiental visual.

Desde a Reforma Protestante, há uma tendência no Ocidente de enfatizar o registro cultural escrito, seja ele histórico, seja literário, e dedicar menos atenção ao sentido do imaginário visual. Assim, pouquíssimos estudantes são ensinados a "ler" ou interpretar o ambiente físico no qual terão de viver e trabalhar. Em algumas escolas, os alunos têm aulas de artes plásticas, música e dança, muito embora apenas uma fração deles usará esses conhecimentos na prática quando entrar no mundo do trabalho. No entanto, sobre o ambiente construído com o qual têm obrigatoriamente de lidar, a maior parte das pessoas não chega a ter qualquer aprendizagem mais formal. O que sabem é o que adquirem "na rua", por meio da experiência, da tentativa e erro. Esse analfabetismo ambiental e construtivo tem sido aceito como normal. A maior parte das pessoas aprende pouco sobre a história de seu ambiente cons-

truído, ou como interpretar o significado dos espaços que herdaram.

Este livro pretende ajudar a corrigir essa situação. É voltado para o estudante inquisitivo, mas também para o leitor interessado em desvendar as operações básicas do ambiente construído e o significado das camadas de história da humanidade incorporadas a ele sem que se dê conta. O livro não pretende ser uma pesquisa histórica exaustiva traçando a complexa evolução das formas construídas, mas uma introdução básica de como o ambiente que construímos age sobre nós de maneira física e psicológica e que mensagens históricas e simbólicas ele carrega em si.

A estrutura básica da obra surgiu a partir do plano de curso que desenvolvi em 1977 para Sandee Harden, como parte de um telecurso, "A humanidade por meio das artes", produzido pelo Coast Community College, em Fountain Valley, Califórnia, e pelos City Colleges de Chicago. A ideia era que a arquitetura fosse examinada como um fenômeno cultural, assim como uma realização artística e tecnológica. O conteúdo do livro se desenvolveu, então, a partir de um curso introdutório de arquitetura voltado para estudantes de primeiro ano da faculdade, durante um período de treze anos, primeiro na Universidade do Estado de Ohio, depois na Universidade Northwestern (Illinois) e, finalmente, na Universidade de Oregon.

A forma e a organização da obra partem do princípio de que o leitor não tem conhecimentos técnicos ou históricos sobre o ambiente construído; por isso a divisão em duas partes. A Parte Um lida com as propriedades fundamentais da arquitetura. Elementos de projeto e conceitos técnicos básicos são delineados, junto com a apresentação de um vocabulário de trabalho. A Parte Dois, então,

trata da evolução histórica da arquitetura no Ocidente, mediante uma investigação dos temas culturais basilares de cada momento histórico, com edifícios selecionados para estudos de caso. Tal divisão permite que, no capítulo sobre arquitetura romana, por exemplo, a atenção se centre na imagem simbólica da vasta cúpula do Panteon, uma vez que as propriedades estruturais das cúpulas já foram discutidas na primeira parte.

A Parte Um começa com a definição do que é arquitetura, e continua com capítulos que exploram sua função, princípios estruturais e elementos de projeto. Alguns capítulos tratam de como a arquitetura afeta os elementos climáticos e por eles é afetada, o papel do arquiteto ao longo do tempo e o que historicamente foi e deixou de ser considerado arquitetura "boa" ou "econômica". A discussão, nessa parte, é ilustrada com exemplos de edifícios de várias partes do mundo, do passado e do presente.

A Parte Dois faz uma investigação histórica do desenvolvimento arquitetônico no Ocidente, da era Pré-Histórica até o fim do século xx. Nos capítulos dessa parte, o foco está na arquitetura como artefato cultural, como declaração sistematizada de valores. Isso leva ao argumento concludente de que o que construímos hoje - na esfera privada ou na pública - é a materialização de nossos valores.

Enquanto escrevia este livro, fui influenciado por diversos estudos históricos, incluindo obras gerais, monografias especializadas e pesquisas teóricas recentes. Talvez a mais informativa tenha sido a de Niels Luning Prak, *The Language of Architecture* (Haia, Países Baixos, 1968), que também é dividida em duas partes, mas cuja cobertura histórica começa com a igreja mausoléu de Santa Constança, paleocristã, e termina com a casa de vidro de Philip Johnson e a capela de Ronchamp, de Le Corbusier. Desde a construção desses edifícios, no início da década de 1950, muito aconteceu. Semelhante ao livro de Prak é o de Christian Norberg-Schulz, *Meaning in Western Architecture* (Nova York, 1975).

Quanto à análise formal da arquitetura, devo muito a Steen Eiler Rasmussen, *Arquitetura vivenciada* (São Paulo, Martins, 1998), e ao tratamento similar dado por Sinclair

Gauldie, *Architecture* (Londres, 1969). Especialmente esclarecedor foi *Architecture as Art: An Aesthetic Analysis* (Nova York, 1984) de Stanley Abercrombie, assim como o livro preparado pelos arquitetos Caudill, Pena e Kennon, *Architecture and You* (Nova York, 1978), voltado para clientes potenciais. Nos trechos que tratam das qualidades e virtudes da arquitetura, inspirei-me em Peter F. Smith, *Architecture and the Human Dimension* (Westfield, Nova Jersey, 1979), e Melvin Rader e Bertram Jessup, *Art and Human Values* (Englewood Cliffs, Nova Jersey, 1976).

Uma investigação como a encontrada na Parte Dois não pode deixar de ser influenciada por Nikolaus Pevsner, *Panorama da Arquitetura Ocidental* (São Paulo, Martins Fontes, 1982), ainda uma das mais importantes obras da área, e por Robert Furneaux Jordan, *Concise History of Western Architecture* (Nova York, 1970). Essas pesquisas compactas foram agora ultrapassadas por três estudos de peso: Spiro Kostof, *A History of Architecture* (Nova York, 1985); Marvin Trachtenberg e Isabelle Hyman, *Architecture: From Prehistory to Post-Modernism* (Englewood Cliffs, Nova Jersey, 1986); e David Watkin, *A History of Western Architecture* (Londres e Nova York, 1986). Diferentemente desses trabalhos enciclopédicos, no entanto, esta breve introdução trata da arquitetura como uma expressão cultural e centra-se em exemplos selecionados como tipos, em vez de se debruçar minuciosamente nas complexidades do desenvolvimento dos estilos.

Como Kostof, acredito que todo ambiente construído merece estudo, pois tudo é construído em resposta a necessidades humanas. Em um livro com este escopo compacto, no entanto, não é possível desenvolver uma pesquisa mais profunda sobre a arquitetura vernacular, ainda que ela constitua a parte mais significativa de nosso ambiente habitado. Tampouco foi possível elaborar sobre como as construções islâmicas, indianas ou orientais materializam valores culturais profundamente enraizados e distintos dos valores ocidentais.¹ Entendo que isso possa ser visto como uma falha desta obra, e que alguns críticos também possam encontrar problemas na ênfase exclusiva no Ocidente. Porém, tendo em vista que a maioria

dos estudantes que encontro vão trabalhar em uma cultura ocidental, e considerando o escopo modesto deste livro, a gama completa de construções vernáculas e a pluralidade de expressões mundiais não poderiam ser examinadas aqui. Reconheço a importância desses estudos e espero que recebam um tratamento adequado em volumes futuros.

O que quer que eu tenha absorvido de todas essas obras e pesquisas foi modificado e complementado em sala de aula, de acordo com o que funcionou melhor com meus alunos. E devo reconhecer também as contribuições feitas por muitos desses alunos ao longo dos anos, em suas perguntas expressas tanto verbalmente como por meio de discretos franzimentos de sobrancelha. É impossível agradecer adequadamente a todos os colegas que leram meu manuscrito, mas dedico uma gratidão especial a G. Z. Brown, Jeffrey Hurwit, John Reynolds e Richard Sundt.

Não posso deixar de mencionar os desenhos e diagramas que ilustram o livro, pois aqui também meus alunos contribuíram significativamente. À exceção daqueles que eu mesmo preparei, muitos foram feitos para se adequar às convenções por estudantes de arquitetura em diversos cursos de mídia que ministrei em 1985-1986. Eles estão individualmente identificados na Lista das Ilustrações.

Assim como meus livros anteriores, este também não teria sido possível sem o estímulo e o entusiasmo de Cass Canfield Jr., meu editor na Harper Collins, que trabalhou comigo durante um longo período de gestação. Os agradecimentos mais especiais são dedicados a Carol, que leu todo o manuscrito com um olhar crítico e cujos serviços inestimáveis incluíram encontrar vírgulas errantes e fazer a preparação da cópia impressa final.

pro domo humano

NOTAS

1. Sobre arquitetura indiana, ver: Huntington, Susan L. e C., John. *The Art of Ancient India: Buddhist, Hindu, Jain*. Nova York, 1983; Nath, R. *Islamic Architecture and Culture in India*. Délhi, 1882; e Benjamin Rowland, *The Art and Architecture of India*, 3 ed. Baltimore, 1977. Sobre arquitetura chinesa, ver: Nelson I. Wu, *Chinese and Indian Architecture*. Nova York, 1963; Laurence Siekman e Alexander Soper, *The Art and Architecture of China*, 3 ed. Baltimore, 1971. Sobre arquitetura japonesa, ver: William Alex, *Japanese Architecture*. Nova York, 1963; e Robert Treat Paine e Alexander Soper, *The Art and Architecture of*

Japan, 3a ed. Baltimore, 1981. Um bom estudo sobre arquitetura japonesa como fenômeno cultural é o de Kiyoyuki Nishihara, *Japanese Houses: Patterns for Living*. Tóquio, 1967. Estudos mais aprofundados sobre arquitetura islâmica começaram a aparecer recentemente em inglês, ver: Richard Ettinghausen e Oleg Grabar, *The Art and Architecture of Islam: 650-1250*. Harmondsworth, Inglaterra e Nova York, 1987; John D. Hoag, *Islamic Architecture*. Nova York, 1977; e George Mitchell (ed.), *Architecture of the Islamic World: Its History and Social Meaning*. Nova York, 1978.



2.1. Colunas do templo de Poseidon, Paestum, Itália, c. 550 a.C. Estas colunas de pedra, maiores do que seria estruturalmente necessário, transmitem uma nítida impressão de solidez.

“Firmeza”: como um edifício fica em pé?

A arquitetura [...] é a cristalização de sua estrutura interna, o lento desdobramento da forma. Essa é a razão pela qual tecnologia e arquitetura estão tão profundamente relacionadas.

Ludwig Mies van der Rohe, palestra aos estudantes do Illinois Institute of Technology, 1950. In Conrads, U. (ed.). *Programs and Manifestoes on 20th-Century Architecture*.

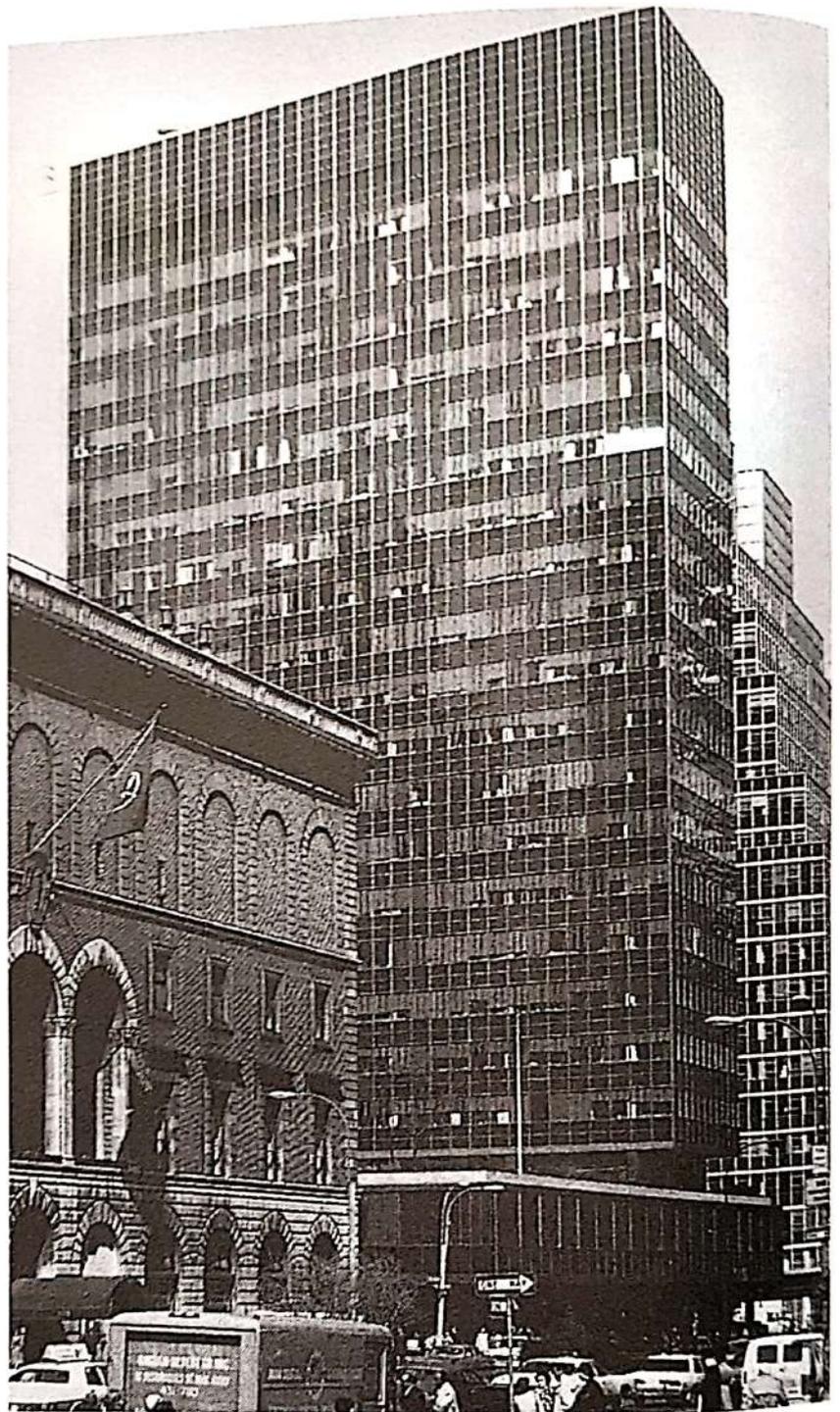
A parte mais aparente de um edifício é a sua estrutura, ou o que o faz ficar de pé. Isso pode ser mais perceptível hoje em dia do que em outros tempos, pois arquitetos e engenheiros têm grande prazer em criar estruturas que cada vez trabalham mais com menos material, e que parecem desafiar a gravidade. A tensão que podemos sentir quando olhamos para uma estrutura tão delicada que parece estar prestes a um colapso iminente ilustra a diferença entre *estrutura física*, o arcabouço literal do edifício que exerce o trabalho, e *estrutura perceptual*, ou o que vemos. Elas não são a mesma coisa, pois uma coluna pode ser muito mais larga do que estruturalmente necessário apenas para nos tranquilizar de que é de fato grande o suficiente para o trabalho. Esse é o caso das grossas colunas do templo de Poseidon, Paestum, Itália [2.1].

Fazendo uma comparação entre a Lever House, de Skidmore, Owings & Merrill (Nova York, 1951-1952) [2.2], e o Racquet and Tennis Club de Nova York, do escritório de McKim, Mead & White (1916-1919), vemos a diferença entre uma parede de vidro que esconde a estrutura e uma maciça parede de alvenaria. A parede do Racquet and Tennis Club parece mais forte do que precisaria ser e nos dá a segurança do excesso estrutural, enquanto as colunas da Lever House são encobertas por um painel suspenso de vidro verde, e não há pistas facilmen-

te perceptíveis sobre o que sustenta o prédio. Sabemos por experiência que chapas de vidro não podem suportar um edifício desse tamanho, então precisamos buscar a verdadeira estrutura (os arquitetos nos forçam a uma espécie de jogo), até que finalmente vemos as colunas emergir na base do edifício. Esse jogo entre o que sabemos ser uma construção pesada e sua leveza sugerida é parte do atrativo desses arranha-céus envidraçados. Observadores modernos apreciam a ideia de que a gravidade foi trapaceada – embora observadores de períodos mais antigos pudessem ter considerado a estrutura do edifício mal expressa.

Crescemos com uma boa percepção da gravidade e de como ela afeta os objetos a nossa volta, pois desde o primeiro momento em que tentamos mover nossos membros (depois de removidos do estado relativamente sem peso do útero) experimentamos sua força nos atraindo para baixo. Quando bebês, temos de descobrir como erguer nossos corpos e mantê-los em um estado de estase enquanto ficamos de pé e, depois, como nos mover com duas pernas. Então, muito antes de poder articular a ideia em termos científicos, temos um conceito claro de que objetos que não têm um apoio vão cair no chão, ou, para ser exato, em direção ao centro da terra. E esta é a essência da estrutura arquitetônica: garantir que os objetos não caiam, a despeito da força incessante da gravidade.

Desenvolvemos muito cedo uma maneira de entender os objetos à nossa volta mediante a *empatia*, de nos imaginar dentro do objeto e sentir como a gravidade age sobre ele. Então, quando vemos as pirâmides do Egito, por exemplo, sentimos que são objetos inerentemente estáveis; por outro lado, quando vemos algo como o Shapero Hall of

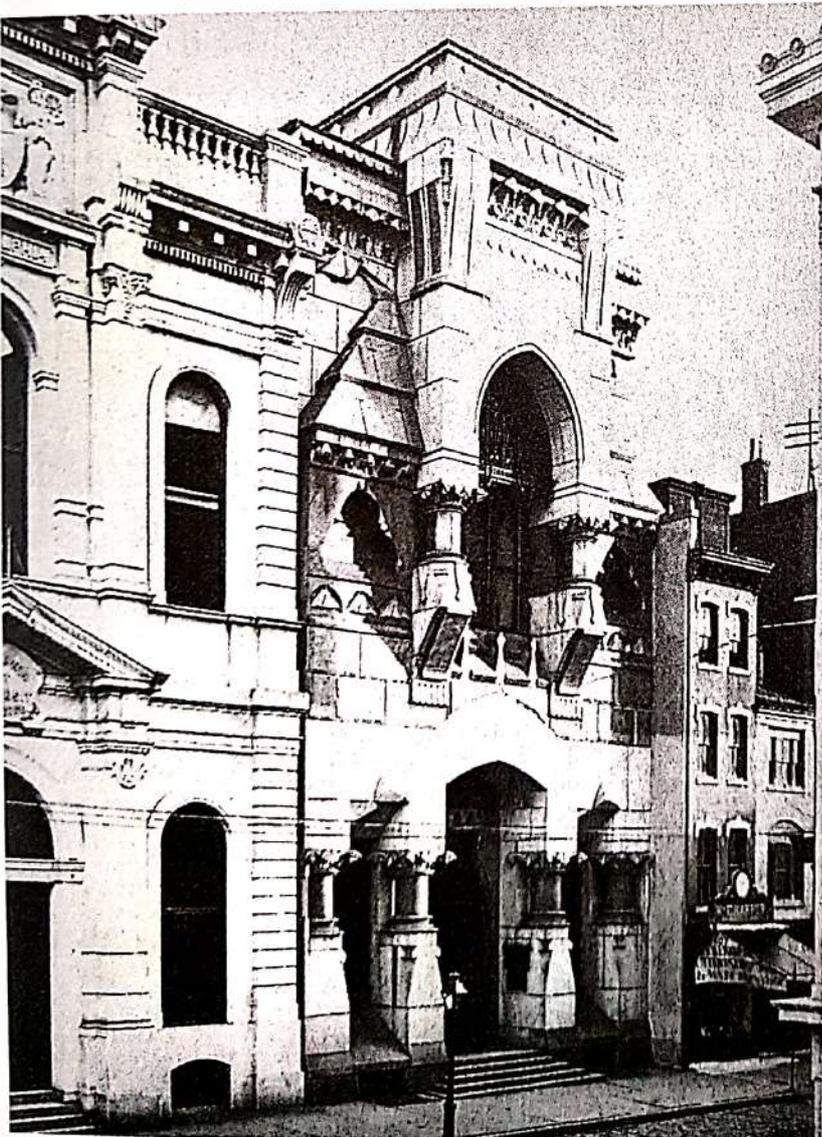
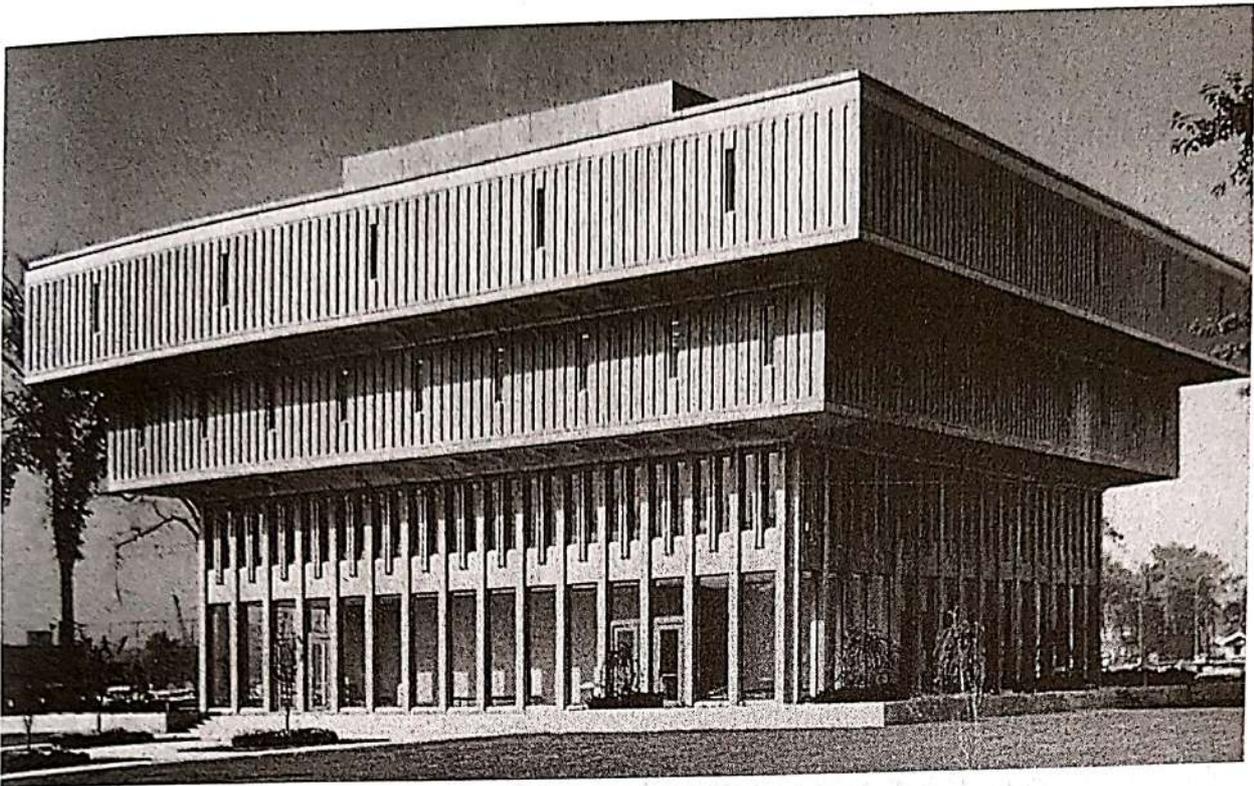


2.2. Skidmore, Owings & Merrill, Lever House, Nova York, NY, 1951-1952. Com sua fachada de vidro suspenso diante do esqueleto interno, a Lever House esconde visualmente sua estrutura, enquanto o Racquet and Tennis Club de Nova York (de McKim, Mead & White, 1916-1919), ao lado, possui uma parede estrutural bem destacada.

Pharmacy, da Universidade Estadual Wayne, Detroit [2.3], sentimos uma sensação de instabilidade, e, talvez, de deslumbramento quanto à maestria do arquiteto e do engenheiro que colocaram um prédio assim de cabeça para baixo. No caso da Lever House, o arquiteto brincou com nossas percepções em relação ao peso da pedra e a transparência do vidro, sabendo que sentiríamos um edifício como sólido e “pesado” e o outro como “leve”. Alguns arquitetos se esforçaram de fato para acentuar a sensação de peso, como é o caso do americano Frank Furness com o prédio da Provident Life and Trust Company, Filadélfia, 1876-1879 [2.4], lamem-

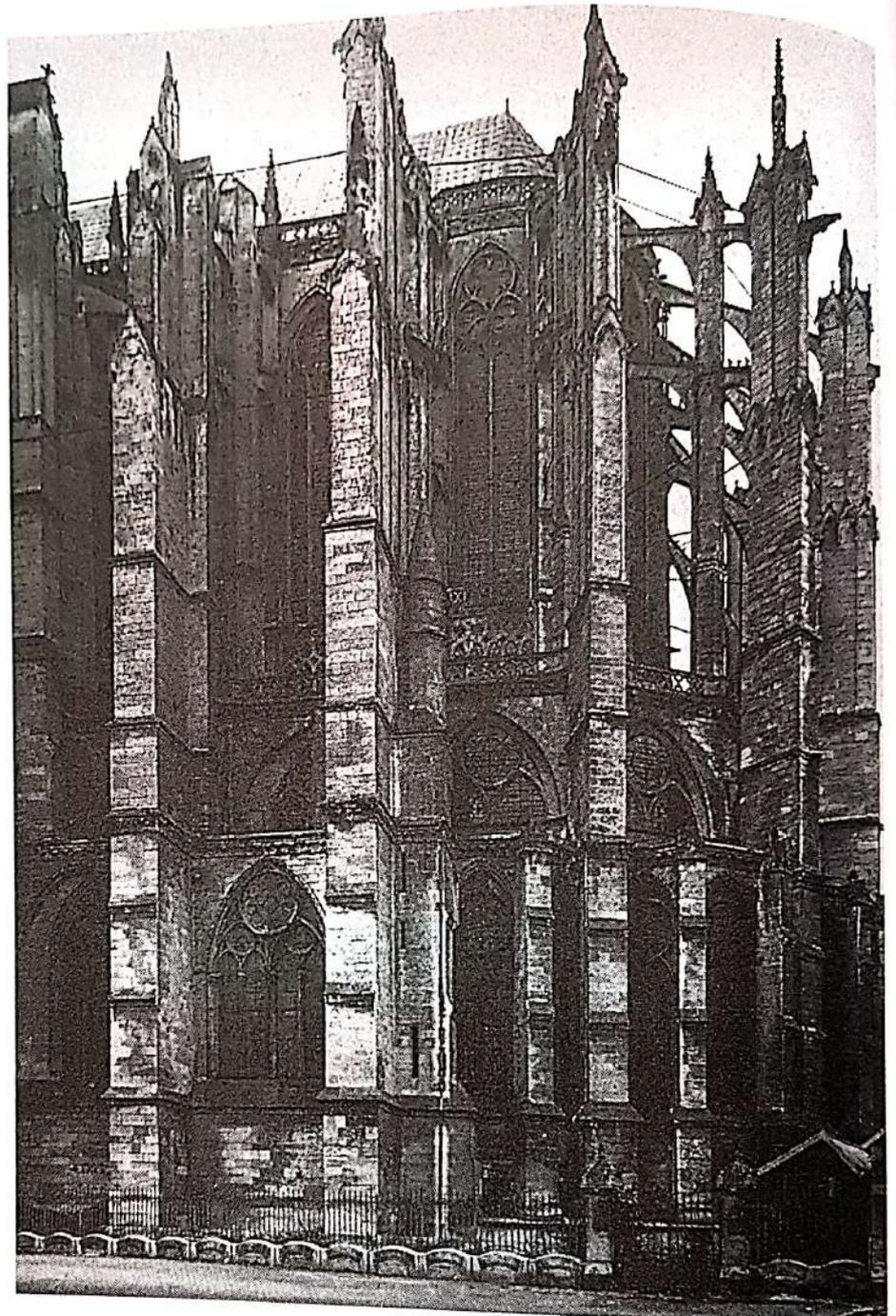
tavelmente demolido. O edifício projetava uma sensação de peso imenso, de modo que as partes da construção pareciam estar comprimidas e encaixadas umas dentro das outras e escorregando para baixo.

Parte de nossa percepção da arquitetura tem a ver com essa análise empática de como as forças trabalham nas construções. Assim, quando vemos o Partenon em Atenas [11.25], o cuidadoso equilíbrio entre os elementos verticais e horizontais, no qual nenhum dos dois domina, sugere um equilíbrio delicado entre as forças, exemplificando assim o ideal filosófico grego. A arquitetura gótica, em contraste, conforme representada



2.3. Paulsen e Gardner, Shapero Hall of Pharmacy, Universidade Estadual Wayne, Detroit, MI, 1965. Este edifício incomum, repousando sobre seu menor ponto, leva o observador a se perguntar como ele se mantém de pé.

2.4. Frank Furness, Provident Life and Trust Company, Filadélfia, PA, 1876-1879 (demolido c. 1950). O arquiteto deliberadamente explorou fortes contrastes de forma, escala e textura para criar uma imagem única e ousada.

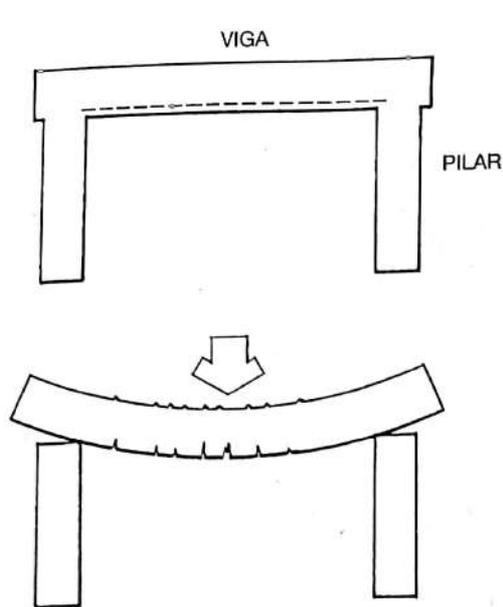


2.5. Coro de Saint-Pierre, Beauvais, França, 1225-1569. Neste edifício, dedicado à aspiração ao Paraíso, a linha vertical domina por toda parte.

pela fachada leste da catedral de Beauvais, na França [2.5], se caracteriza pelos suportes verticais e lançados e delgados e uma multiplicidade de linhas verticais. Isso sugere ascensão, elevação, leveza, aspiração e uma negativa visual das tremendas forças geradas a 42,7 metros acima do solo e que insistem em serem conduzidas para baixo de maneira segura.

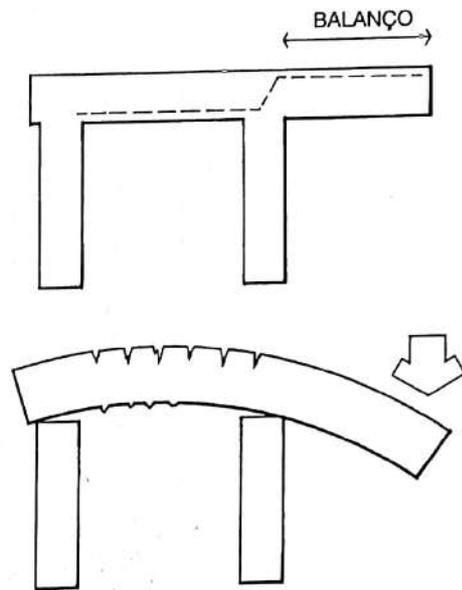
O sistema pilar e viga

O princípio da estrutura é a parede, seja ela feita de pedra, tijolo, adobe, blocos de argila, tijolos de vidro, seja de qualquer outro tipo de material. Mas um recinto cercado de paredes não recebe luz ou tem vista, então a parede precisa ser aberta. Os blocos ou tijolos acima dessa abertura precisam de apoio contra a força da gravidade, e isso é feito por meio de uma trave (de madeira, ou de metal após 1750) ou um arco. Essa trave, inserida em uma parede para apoiar os blocos acima da abertura, é chamada de *viga* (ou lintel). Também é possível dispensar a parede, por assim dizer, e substituí-la por



2.6. Diagrama do sistema pilar e viga.

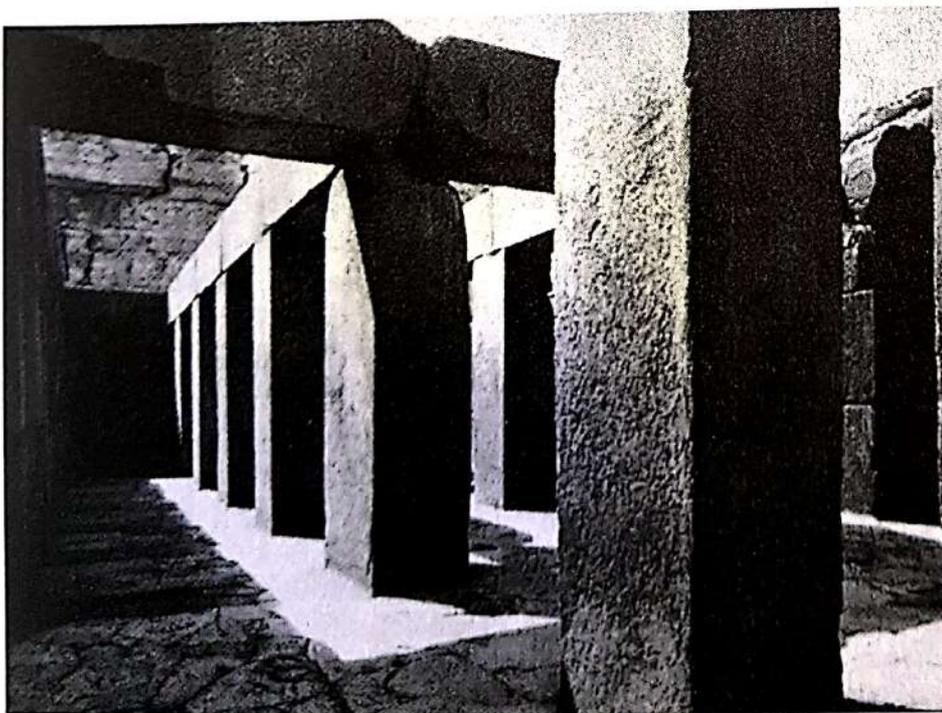
pilhas de blocos formando colunas, com vigas cobrindo o espaço entre elas. O arquiteto Louis Kahn fala do “momento arquitetônico decisivo, quando a parede sumiu e a coluna apareceu”.¹ O sistema pilar e viga [2.6] é tão antigo quanto a construção humana com materiais permanentes. Evidências arqueológicas e antropológicas sugerem que sistemas pilar e viga de madeira ou hastes de papiro atadas eram usados muito antes de serem realizados em pedra mais durável, e é bem possível que os humanos tenham usado pilares e vigas por centenas de milhares de anos. Tal sistema é



2.8. Diagrama de um balanço.

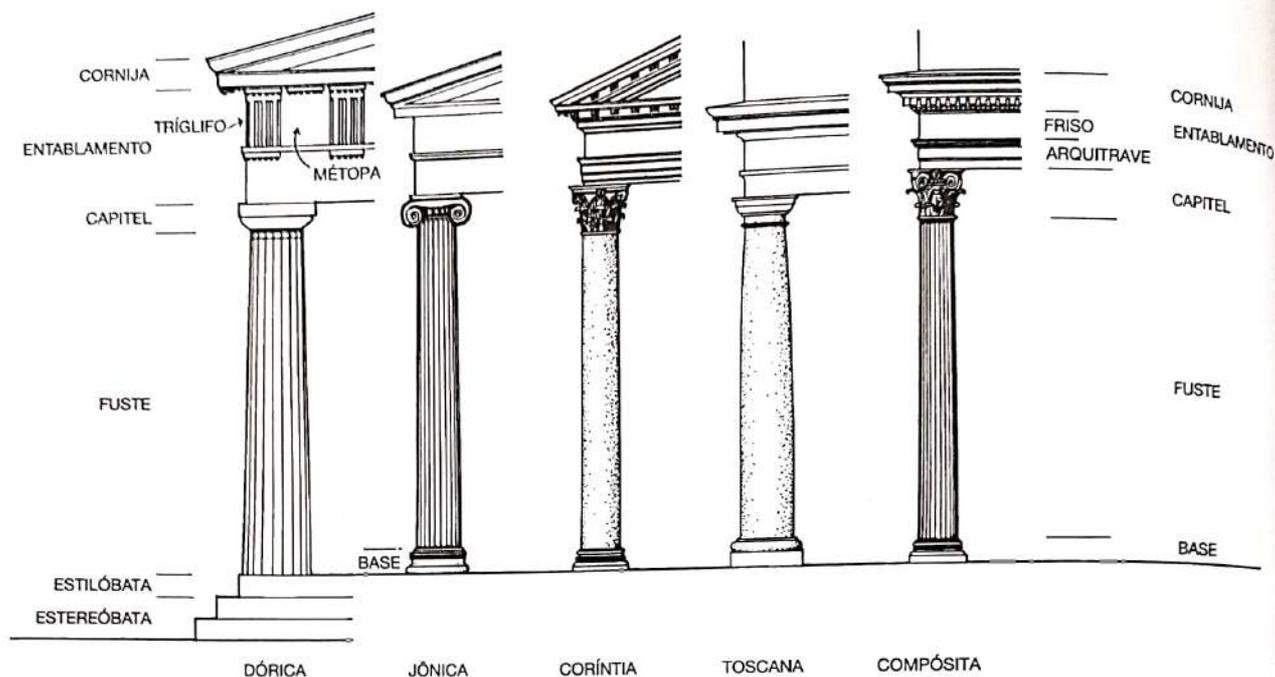
chamado de *arquitravado*, do latim *trabs*, trave ou viga. Um dos exemplos mais evidentes de construção do tipo pilar e viga é o Templo do Vale a leste da pirâmide de Khafre (Gizé, Egito), construído entre 2570 a.C. e 2500 a.C. [2.7]. Nele, vigas quadrangulares de granito vermelho finamente polidas se apoiam sobre pilares do mesmo material, contrastando com o piso de alabastro. Quando a viga avança além da coluna, obtém-se um *balanço* [2.8].

Todas as vigas (de pedra, madeira ou qualquer outro material), sofrem a ação da gravidade. Como todos os materiais são



2.7. Templo do Vale, pirâmide de Khafre (Quefrén), Gizé, Egito, c. 2570-2500 a.C. Uma das mais puras e diretas expressões do sistema pilar e viga.

24 Os elementos da arquitetura



2.9. Comparação das cinco ordens clássicas. As ordens gregas consistiam em: dórica, jônica e coríntia. A essas, os romanos adicionaram a compósita (uma combinação da jônica com a coríntia) e a mais simples e pesada dórica toscana.

flexíveis em níveis variados, as vigas tendem a fletir sob o próprio peso, ainda mais quando são aplicadas cargas sobre elas. Isso significa que a parte superior de uma viga entre dois suportes é apertada e sofre compressão no alto, enquanto a parte inferior se distende, ficando sob tensão [2.6]. Num balanço, a situação é invertida [2.8], pois como a parte avançada da viga enverga devido à força da gravidade, a parte de cima se distende (é colocada sob tensão) e a parte de baixo experimenta esforço compressivo. No balanço, essas forças são mais fortes sobre o apoio. Na verdade, é a continuidade do material da viga sobre o apoio que torna o balanço possível.

A madeira, por ser um material fibroso, resiste bem ao esforço de tensão, assim como o ferro forjado e o aço moderno, e vigas feitas com esses materiais podem cobrir vãos significativos. As forças de tensão ao longo da base da viga (ou da parte superior do balanço) são determinadas pelo tamanho do vão e pela carga colocada sobre a viga, de modo que, com o tempo, se o vão e a carga foram grandes demais, a força de tração do material será excedida; a viga vai quebrar na base ou se deformar ao longo do topo (ou ambos) e vai entrar em colapso. Pedra e concreto maciço, por serem mate-

riais cristalinos, têm menos força de tração do que madeira fibrosa, e uma viga de madeira sobre um determinado vão consegue suportar uma carga que quebraria uma viga de pedra. Evidentemente, a viga de pedra começa sendo muito mais pesada por si só. A solução, em vigas de concreto, que têm uma maior força compressiva, é colocar algo dentro do concreto para receber as forças de tração. Isso foi feito pelos romanos, assim como em tempos modernos, colocando-se barras de ferro (e hoje aço) nas formas em que o concreto líquido é lançado. O resultado é o concreto armado. Como as linhas pontilhadas nas Figuras 2.6 e 2.8 indicam, o aço é colocado onde as forças de tensão se acumulam – na parte inferior das vigas e na parte superior dos balanços. Os gregos também enfrentaram esse problema. A abertura central da entrada para a Acrópole de Atenas, o Propileu, construído em 437-432 a.C. [11.19], precisava permitir a passagem de pares de touros sacrificiais com seus condutores; para tanto, era necessário um vão de 5,5 metros, grande demais para um bloco maciço de mármore, que também deveria sustentar o telhado. A solução adotada pelo arquiteto Mnésicles foi furar a viga para reduzir seu próprio peso (ela ainda pesava onze toneladas) e colocar barras de aço ao

longo de seu topo, aparentemente para sustentar o peso dos blocos de mármore de cima. Nesse exemplo único, as barras de ferro estão na parte superior da viga, não na base, onde seriam esperadas. Ainda assim, ao longo dos séculos fissuras se desenvolveram nela.

As colunas do Propileu são exemplos esplêndidos de um dos três tipos de coluna que os gregos desenvolveram para sua arquitetura cívica e religiosa [2.9]. Esses três tipos colunares, ou ordens, foram posteriormente adaptados pelos romanos, que adicionaram ainda outras variações ornamentadas, e se tornaram parte do vocabulário arquitetônico básico desde o Renascimento, no século xv, até os dias de hoje. Cada ordem consiste em três partes básicas – base, fuste e capitel – e se ergue da base do templo, composta de três degraus: a *estilóbata* (de *stulos*, "coluna", e *bates*, "base") e um *estereóbata* de duas camadas abaixo. Em todas as ordens, a altura da coluna, assim como o tamanho relativo de suas partes e do entablamento, é derivada, de modo proporcional, do diâmetro da coluna.

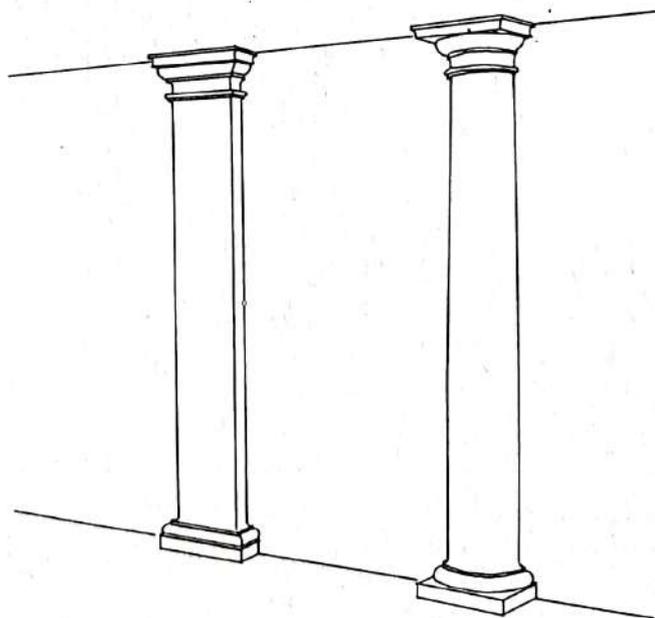
As *colunas dóricas* [2.9], as mais encorpadas dentre as três ordens gregas, são de quatro a 6,5 vezes mais altas que seu diâmetro, e o *entablamento* dórico (o sistema estilizado de vigas e seus acabamentos) sustentado pela coluna é cerca de um quarto da altura da coluna. O fuste da ordem dórica se ergue diretamente da *estilóbata*, não tem base, e é marcado por vinte sulcos longitudinais, ou *caneluras*. Acima do fuste, o *capitel* consiste em uma simples gola com uma suave saliência redonda chamada *equino* encimada por uma peça quadrada, o *ábaco*. Cada ordem tem seu *entablamento* característico, formado de três partes. O da ordem dórica é feito de (1) uma *arquitrave* embaixo (de *arch*, "principal", e *trab*, "viga"), (2) uma banda no meio, formada de *tríglicos* (remates estilizados da viga) e *métopas* (painéis de fechamento esculpidos) se alternando, e (3) uma *cornija* no alto, formada de diversas molduras salientes.

A *ordem jônica*, mais delgada [2.9], possui uma base da qual o fuste se eleva. A coluna em si é aproximadamente nove vezes mais alta que seu diâmetro, e o fuste tem 24 caneluras. O capitel tem *volutas* espiraladas características que repousam sobre uma

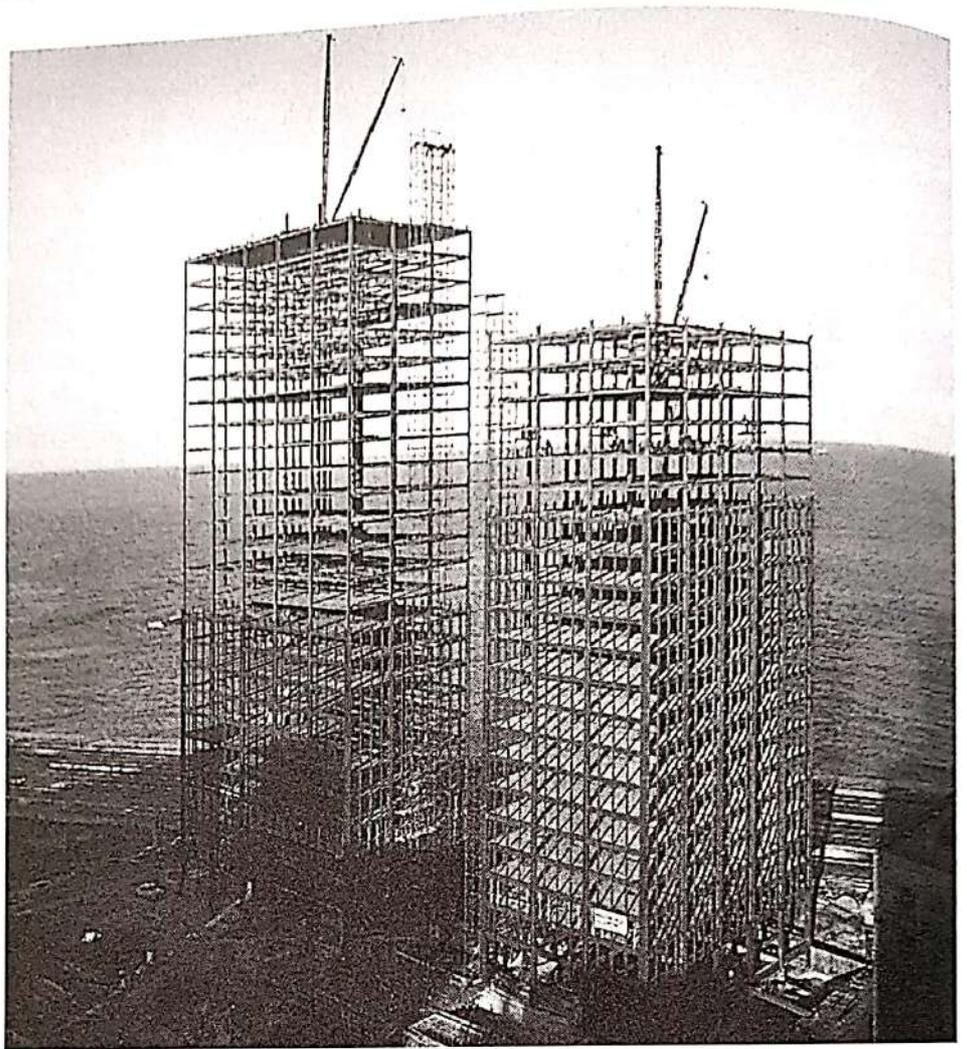
moldura decorativa de óvulos e dardos. O entablamento jônico é aproximadamente um quinto da altura da coluna e é composto de uma arquitrave de duas ou três faces, com um *friso* no meio geralmente ornado com uma faixa esculpida contando uma narrativa contínua. Acima, fica a *cornija*.

Levemente mais delgada é a *ordem coríntia* [2.9], cuja coluna é dez vezes mais alta que seu diâmetro. Ela se ergue de uma base semelhante à da ordem jônica, e também apresenta 24 caneluras. O capitel coríntio é o mais alto dos três, com duas ou três camadas concêntricas de folhas de *acanto* abrindo-se para fora. O entablamento é semelhante ao da ordem jônica.²

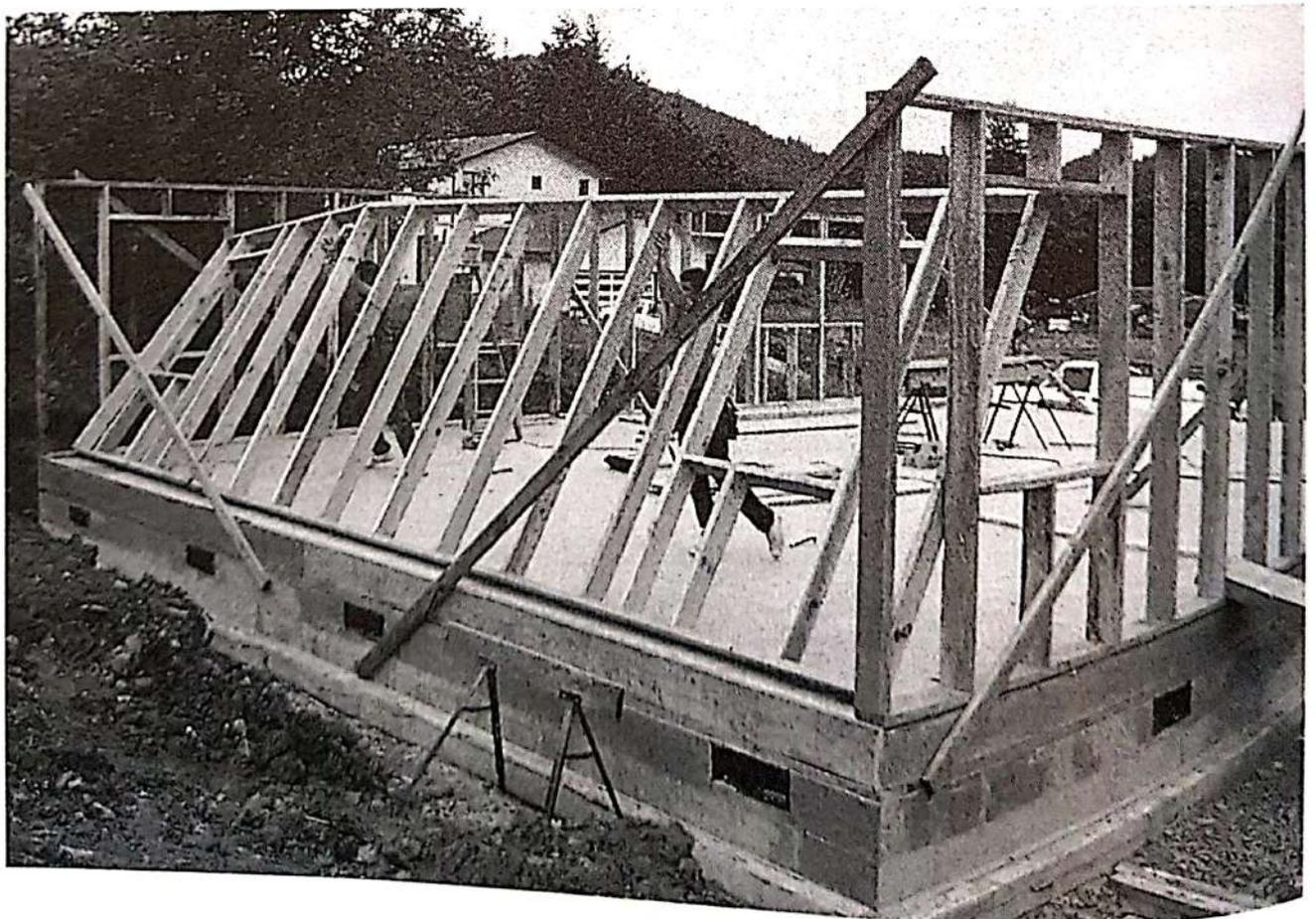
As ordens gregas foram subsequentemente adotadas pelos romanos, que as usaram predominantemente como elementos decorativos. As principais mudanças introduzidas pelos romanos foram transformar a ordem dórica na dórica toscana, mais esguia e adicionar uma base e um fuste geralmente liso, sem caneluras [2.9]. Outra grande novidade foi a *ordem composta*, na qual as *volutas* do capitel jônico são colocadas sobre as folhas de *acanto* espiraladas do coríntio. Os romanos também introduziram uma adaptação decorativa mesclando a coluna à parede, de modo que metade de uma coluna parece emergir da parede – trata-se da *coluna adossada* [2.10]. Além disso, desenvolveram outra projeção da parede, parecendo um pilar, que se completa com uma base e um capitel correspondentes aos de uma coluna



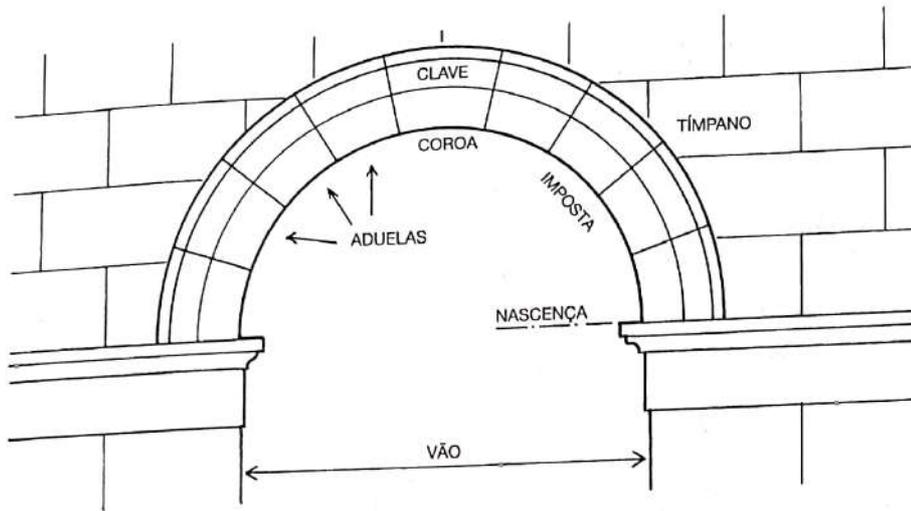
2.10. Coluna e pilastras.



2.11. Estrutura independente de metal.



2.12. Estrutura tipo balão.



2.13. Diagrama de um sistema de arco.

da mesma ordem: a *pilastra*. Ambos elementos permitem que o ritmo da colonata continue ao longo de uma superfície que, sem isso, seria apenas uma parede lisa.

Estruturas independentes

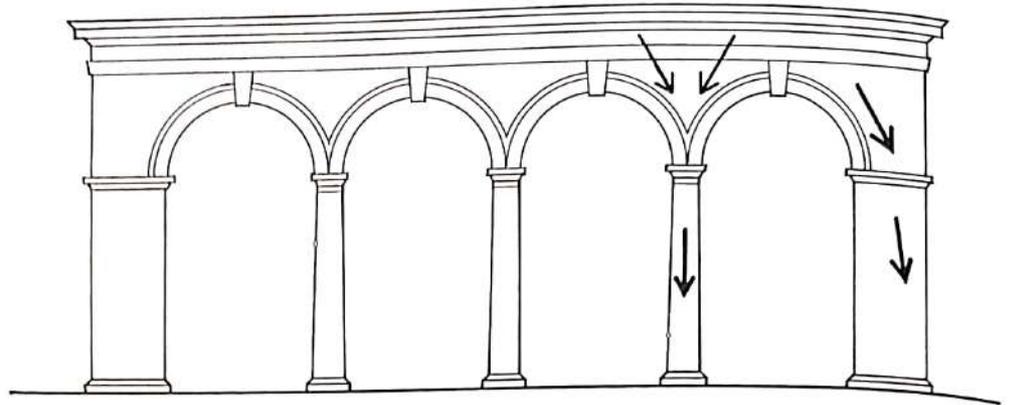
Se um sistema bidimensional de pilares e vigas se estende para três dimensões, o resultado é uma estrutura independente ou arcabouço estrutural. Pode ser uma estrutura como a do Templo do Vale, com colunas e vigas de pedra, mas hoje essas armações costumam ser construídas com perfis de aço rebitados [2.11] ou peças de madeira pregadas [2.12], como a típica “estrutura tipo balão” usada na construção de casas na América do Norte desde meados do século XIX.

O arco

Se voltarmos novamente para a parede básica de alvenaria, vemos que há uma alternativa para cobrir uma abertura – o *arco* [2.13]. Como a *viga*, o arco pode ser construído de pedra, mas tem duas grandes vantagens. Primeiro, o arco de pedra é feito de partes menores, as *aduelas*, blocos em forma de cunha truncada, de modo que se elimina a necessidade de encontrar um bloco grande de pedra, sem rachaduras ou defeitos, assim como a logística de lidar com peças grandes e pesadas. Segundo, graças à física envolvida, o arco pode cobrir distâncias muito maiores do que uma viga de pedra. As forças gravitacionais geradas pela parede acima do arco são distribuídas sobre a curvatura e

convertidas em forças diagonais praticamente perpendiculares à face de baixo de cada aduela, que é submetida a forças de compressão. Uma das desvantagens da construção de um arco é que, durante o processo, todas as aduelas devem ser suportadas por uma armação de madeira, o *cimbre*, até que a aduela mais alta, a *chave*, seja colocada no lugar. Nesse momento, o arco se torna autoportante, e o cimbre pode ser removido para ser usado para construir o próximo arco.

Tradicionalmente, o cimbre tinha uma forma semicircular, que era mais fácil de arrumar no local do trabalho com cavilhas e corda. Infelizmente, o arco semicircular, chamado de arco pleno ou de meio ponto, não é a melhor forma estrutural, pois as forças em sua base não vão diretamente para baixo. Em quase toda forma estrutural tradicional existem empuxos *laterais* além dos empuxos *verticais* (aqueles gerados pela gravidade e que vão direto para baixo). Esse é especialmente o caso do arco de volta perfeita, e o problema aumenta em proporção direta às forças verticais que o arco carrega. Esses empuxos laterais fariam que a base do arco se abrisse, a menos que ela seja adequadamente contida, como numa grande ponte arqueada na qual as bases do arco se apoiam contra as rochas de cada lado da montanha. Em um arco que não carrega uma parede sobre ele, existe outro problema: o peso do próprio arco. Uma única carga sobre o ápice, ou a coroa, do arco é capaz de causar sua ruptura ou fazer que sua superfície superior se abra por volta de 40° para cima da horizontal, mas esse problema diminui quando uma carga adicional uniforme (como uma parede) se espalha sobre o arco.



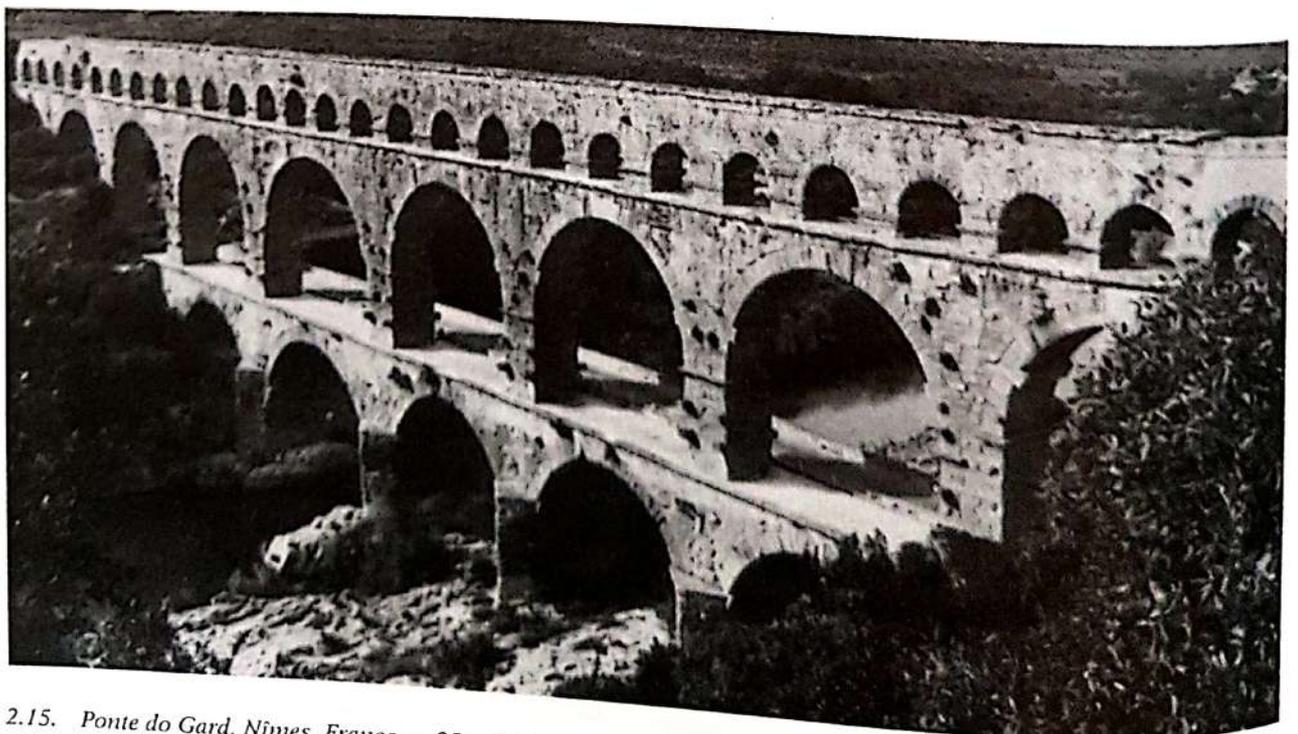
2.14. Diagrama de uma arcada.

Se diversos arcos são colocados lado a lado, então os empuxos laterais de um são contrabalanceados pelos empuxos laterais do arco adjacente [2.14]. Nesse caso, eles podem ser colocados sobre pilares mais estreitos ou colunas, pois os empuxos laterais são cancelados (exceto nas duas extremidades). Os romanos usaram essa técnica com excelentes resultados em suas *arcadas*, como por exemplo na ponte do Gard, uma combinação de ponte e aqueduto sobre o rio Gard, perto de Nîmes, no Sul da França, construída no final do século I a.C. [2.15]. O comprimento total da ponte é de 274 metros, e os vãos sob os arcos chegam a 19,5 metros, exceto o central, que é de 24,5 metros. Em uma arcada construída sobre colunas ou pilares altos, há ainda empuxos laterais não resolvidos nas extremidades, mas eles po-

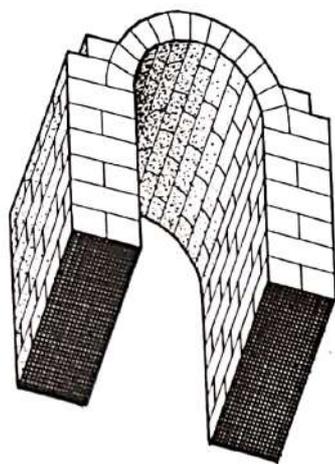
dem ser transmitidos para o solo por meio de seções de muro ou contrafortes de cada lado da arcada.

Abóbadas

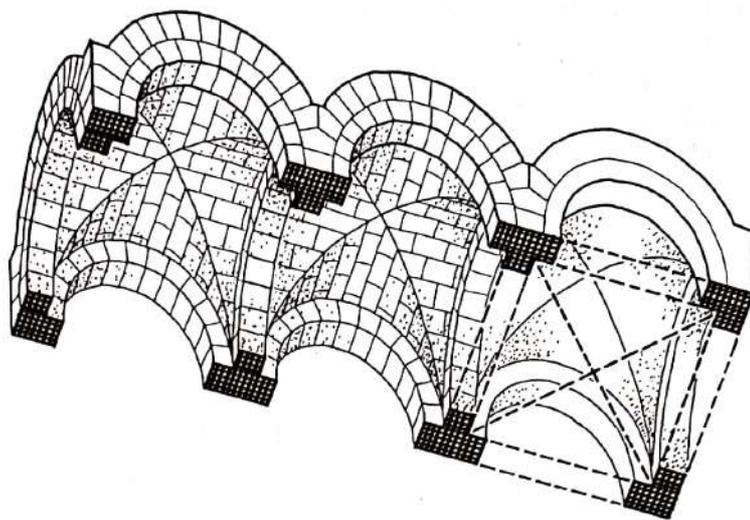
Uma estrutura *arqueada*, ou seja, construída com arcos, age estruturalmente num plano bidimensional. Porém, se imaginarmos o arco sendo empurrado pelo espaço, a forma resultante é uma abóbada. No caso de um arco pleno, a abóbada que se forma é chamada de *abóbada de berço* [2.16]. Em geral, essas abóbadas são construídas sobre paredes, mas, como a abóbada de berço maciça é muito pesada, as paredes tendem a ser empurradas para fora e se abrir no topo. É possível resistir a essas forças engrossando as



2.15. Ponte do Gard, Nîmes, França, c. 25 a.C. Uma combinação de ponte e aqueduto com arcos superpostos.



2.16. Abóbada de berço.



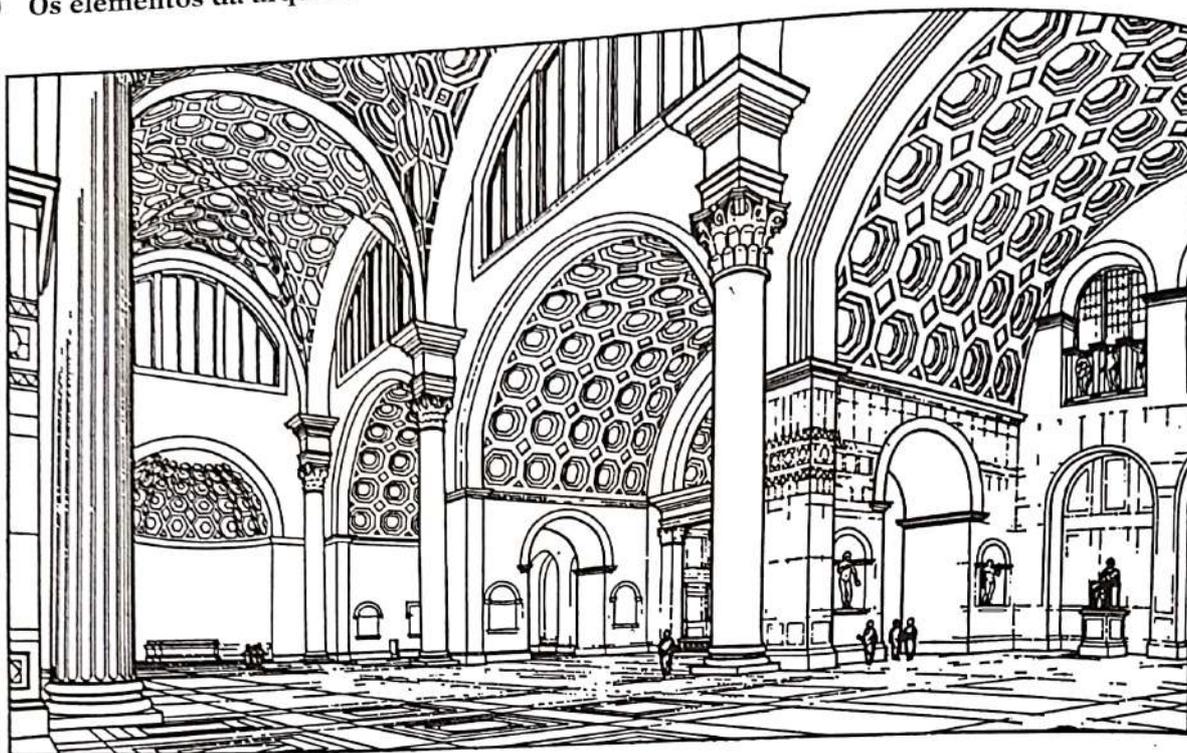
2.17. Diagrama de uma abóbada de arestas.

paredes ou adicionando grandes botaréis ou contrafortes. Um exemplo de abóbada de berço bastante elevada fica na nave da basílica de Saint-Sernin (Toulouse, França, iniciada em 1080) [14.22]. Mas, como Saint-Sernin mostra, abóbadas de berço maciças resultam em interiores escuros. Uma solução concebida anteriormente pelos romanos foi adicionar outras abóbadas de berço perpendiculares à abóbada principal, de modo que elas se cruzam, resultando em uma *abóbada de arestas*, que podiam ser abertas por amplas *lunetas* semicirculares de cada lado [2.17]. Com esse arranjo, as forças são canalizadas para baixo, ao longo das arestas onde as abóbadas se cruzam, e são concentradas em pontos da sua base. Abóbadas de arestas de três seções, ou três tramos, foram usadas pelos romanos em muitos de seus grandes edifícios públicos, como termas e basílicas. Um bom exemplo é a imensa basílica de Constantino (Roma, 307-312 d.C.) [2.18, 12.10]. Construída com um tipo de concreto desenvolvido pelos romanos, ela tinha três tramos centrais medindo 27 por 25 metros cada, com comprimento total de 80,8 metros. Os empuxos laterais das abóbadas de arestas, elevadas a quase 25 metros de altura, eram absorvidos pelas paredes das salas adjacentes de ambos os lados, que mediam 23,2 por 17,1 metros. Três dessas salas laterais, que eram cobertas por abóbadas de berço, são as únicas partes da basílica que restam hoje.

Um arco girado em torno de seu eixo central gera uma cúpula; assim, um arco pleno cria uma cúpula hemisférica. A cúpula

também foi muito usada pelos romanos. A maior, mais clara e mais impressionante de todas foi a imensa cúpula do Panteon (Roma 120-127 d.C.) [2.19, 12.12]. Ali, o vão livre é de mais de 43 metros. A cúpula é uma superfície de concreto maciça, com 1,2 metro de espessura no topo, onde há uma ampla abertura, o *óculo*, com 9,1 metros de diâmetro. A espessura da cúpula foi aumentada até o ponto em que a ruptura tenderia a ocorrer, e em sua base ela alcança 6,4 metros de espessura. A parede do tambor abaixo, também com 6,4 metros de espessura e suportando as 5 mil toneladas da cúpula, foi escavada criando nichos de 4,3 metros de profundidade, de modo que, na prática, funciona estruturalmente como dezesseis botaréis radiais conectados no alto por abóbadas de berço radiais. Além disso, a cúpula e a parede do tambor são entrelaçadas por arcos e abóbadas de berço inseridos no concreto para ajudar a conduzir as forças.³

No Panteon, o peso do concreto por metro cúbico foi variado pelos arquitetos e engenheiros romanos por meio dos materiais empregados para fazer o concreto. O concreto é um material viscoso e espesso formado pela mistura de água, um agregado de pedras britadas (*caementa* em latim) e um material aglutinante derivado de calcário para ligação. No concreto do Panteon, a pedra utilizada no agregado foi variada, de um basalto mais denso e pesado no anel de fundação, onde o maior peso seria carregado, até uma pedra-pomes porosa na parte da cúpula junto ao óculo, num esforço para reduzir o peso de cima.



2.18. *Basilica de Magêncio (Constantino), Roma, 307-312, d.C. Este salão de foro, hoje quase completamente destruído, demonstra como os romanos conseguiram cobrir amplos espaços públicos com abóbadas de concreto.*

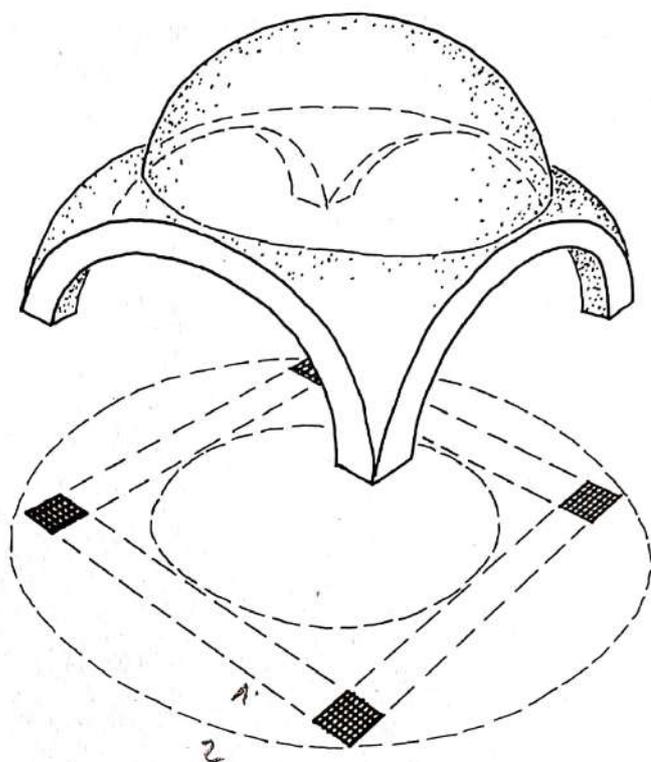


2.19. *Giovanni Paolo Panini, Interior do Panteon, c. 1750. Coleção Samuel H. Kress, Galeria Nacional de Arte, Washington, DC. Esta pintura transmite melhor do que qualquer fotografia moderna o efeito do espaço dentro do Panteon.*

Faremos uma pausa neste ponto para esclarecer a diferença entre o concreto romano e o que é comumente utilizado hoje. Em ambos os casos, a composição básica é semelhante, mas o agente aglutinante no concreto romano era a *pozzuolana*, um material vulcânico que sofria uma ação química quando triturado e misturado com água, formando uma rocha artificial. No concreto moderno, desenvolvido em 1824 na Inglaterra por Joseph Aspdin, o cimento aglutinante é feito de cal e argila, cuidadosamente cozida, cujos nódulos resultantes são reduzidos a um fino pó. Quando o cimento é misturado com água, areia e pedrisco, a pedra artificial resultante se parece muito com o calcário natural de grânulos finos encontrado na região de Portland, Inglaterra, como Aspdin notou. Assim, esse cimento artificialmente produzido é chamado de cimento Portland até hoje. Tanto para os romanos como para nós, é muito caro erguer edifícios inteiros, calçadas e outras construções usando apenas cimento. Mesmo a argamassa usada entre tijolos e pedras é completada adicionando-se areia, e, para fazer concreto, brita e areia são misturadas como *agregados*. No concreto romano, os arcos de descarga de tijolo e ladrilho também serviam como uma espécie de agregado graúdo. Como a pedra, o concreto é bastante resistente à compressão, mas relativamente fraco para as forças de tração. Percebendo isso, os romanos adicionaram barras de ferro ao concreto em alguns casos, mas preferiam usar arcos de descarga de tijolo e ladrilho integrados. Desde meados do século XIX, barras de ferro ou aço têm sido inseridas no concreto moderno quando forças de tração podem ocorrer.

A forma ou cofragem é uma das desvantagens financeiras do concreto. Logo que é misturado, o concreto é um material viscoso espesso e deve ser contido em formas, ou cofragens, até que fique seco e curado. A forma é como o cimbre usado para a construção de arcos. Em grandes construções, tanto nos tempos romanos como hoje em dia, isso significa a confecção de estruturas de madeira grandes e caras, consideráveis por si sós, que são destruídas assim que o concreto está curado o suficiente para que as formas sejam removidas.

Cúpulas, em particular as do tamanho do Panteon de Roma, são espaços poderosamente



2.20. Diagrama de pendentis.

samente evocativos, mas exigem plantas baixas circulares, o que torna difícil adicionar espaços adjacentes. Esse problema se tornou mais grave a partir do século IV d.C., e a solução concebida pelos arquitetos bizantinos foi assentar a cúpula sobre uma planta baixa quadrada. O que tornou isso possível foi o *pendente*[2.20]. Imagine um quadrado sobre o qual se quer colocar uma cúpula. Primeiro, cubra o quadrado com um hemisfério maior, que tangencie seus cantos. Corte o hemisfério na vertical ao longo dos lados do quadrado, de modo que, olhando o hemisfério cortado de cima, veja-se um quadrado. Então, corte na horizontal o topo do hemisfério, paralelamente ao quadrado de baixo, na altura do ápice dos semicírculos formados pelos cortes verticais. A forma resultante é circular no alto com uma base quadrada. As quatro seções triangulares curvas que restaram são os pendentis, que fazem a transição da planta baixa quadrada para a circular. Um excelente exemplo do uso de pendentis é encontrado na igreja de Hagia Sophia ou Santa Sofia (Istambul, Turquia, 532-537), projetada por Isidoro de Mileto e Antêmio de Trales [2.21, 13.15, 13.16]. Como no caso do Panteon de Roma, o espaço coberto é imenso. Ali, a cúpula tem 32,6 metros de diâmetro; porém, com as



2.21. *Hagia Sophia (igreja de Santa Sofia), Istambul (Constantinopla), Turquia, 532-537. Vista interna.*

meias-cúpulas que se estendem abaixo e as áreas cobertas com abóbadas de berço adiante, o vão livre total, de uma ponta a outra da igreja, é de mais de 76 metros.

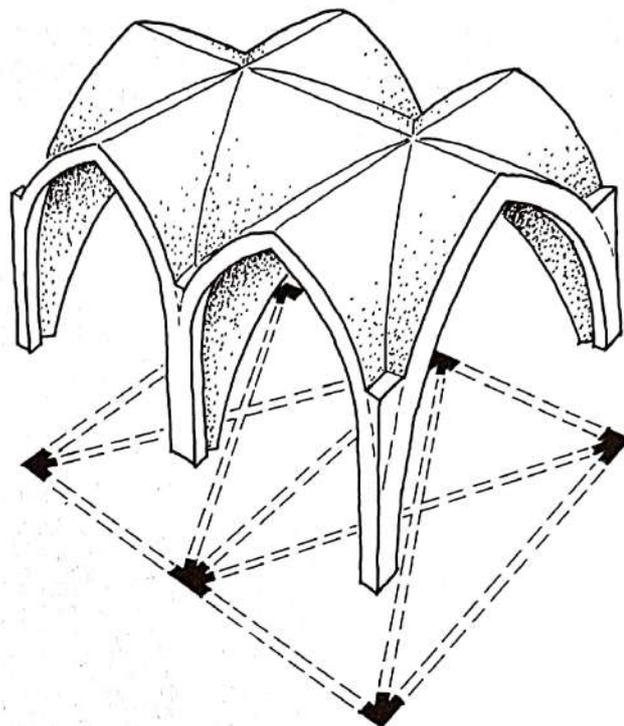
A base da cúpula da Hagia Sophia eleva-se a quarenta metros do solo, e o peso considerável da estrutura de tijolo gradualmente forçaram as paredes para fora. Depois de dois terremotos, em 553 e 557, a cúpula desmoronou; embora reconstruída, ela caiu novamente após mais um terremoto em 989. Para evitar um afastamento maior das paredes, enormes botaréis foram então construídos contra os pendentes, mas apenas dos lados nordeste e sudoeste, uma vez que, ao longo do eixo principal, a cúpula já era bem apoiada por duas meias-cúpulas, as quais, por sua vez, eram sustentadas por meias-cúpulas menores e abóbadas de berço repousando sobre colunas e pilares. O resultado foi que, ao longo do eixo principal, as forças exercidas pela cúpula para fora e para baixo foram conduzidas por essa cascata de meias-cúpulas e abóbadas pelo amplo espaço da igreja. Mas no eixo transversal mais curto,

dos outros dois lados, os pilares originais se provaram inadequados para resistir à pressão acentuada pelos terremotos; foi ali que os últimos botaréis externos foram adicionados.

Quando a cúpula romana foi colocada sobre pendentes, tornou-se possível cobrir um cômodo quadrado ou retangular com uma cúpula e adicionar espaços nas laterais, cobertos, por sua vez, com cúpulas menores, como na igreja em cruz grega de São Marcos, Veneza, que conta com cinco cúpulas [13.24, 13.26].

Por mais prática que tenha sido a abóbada de arestas romana, ela só funcionava bem em tramos quadrados; quando os tramos se tornaram retangulares ou trapezoidais, as linhas das arestas (onde duas abóbadas interseccionavam) se curvaram e a abóbada perdeu força estrutural. Além disso, era difícil cortar esse tipo de abóbada em pedra. A solução para esse problema foi alcançada em cerca de 1100, em Durham, Inglaterra, e em Saint-Denis, França. Ela consistiu em construir nervuras, ou arcos

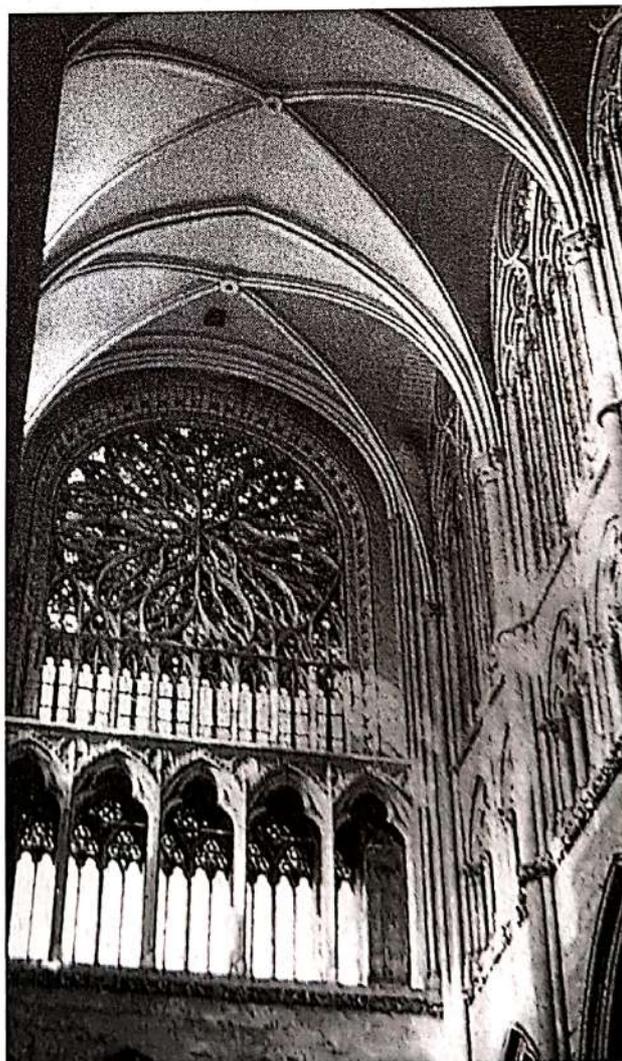
diagonais, ao longo das linhas de interseção das abóbadas de arestas, assim como ao longo das bordas externas das abóbadas [2.22]. O intradorso das abóbadas podia ser preenchido depois. Uma vantagem da abóbada nervurada foi a redução na quantidade de cimbra necessária. Em uma estrutura com tramos repetidos, utilizava-se apenas um conjunto de cimbres. Uma vez que as nervuras e os intradorsos estavam assentados sobre um tramo, o cimbra podia ser movido para o próximo. Além da abóbada nervurada, os construtores medievais começaram a usar arcos ogivais, ou ogivais. Ao deslocar os centros dos dois segmentos de círculo que formavam os arcos, era possível criar arcos em todos os lados de um trapézio ou quadrilátero irregular, sempre da mesma altura. O resultado foi a abóbada nervurada como foi usada na maioria das catedrais góticas francesas, inglesas e germânicas, como Notre Dame de Amiens (França, iniciada em 1221) [2.23].



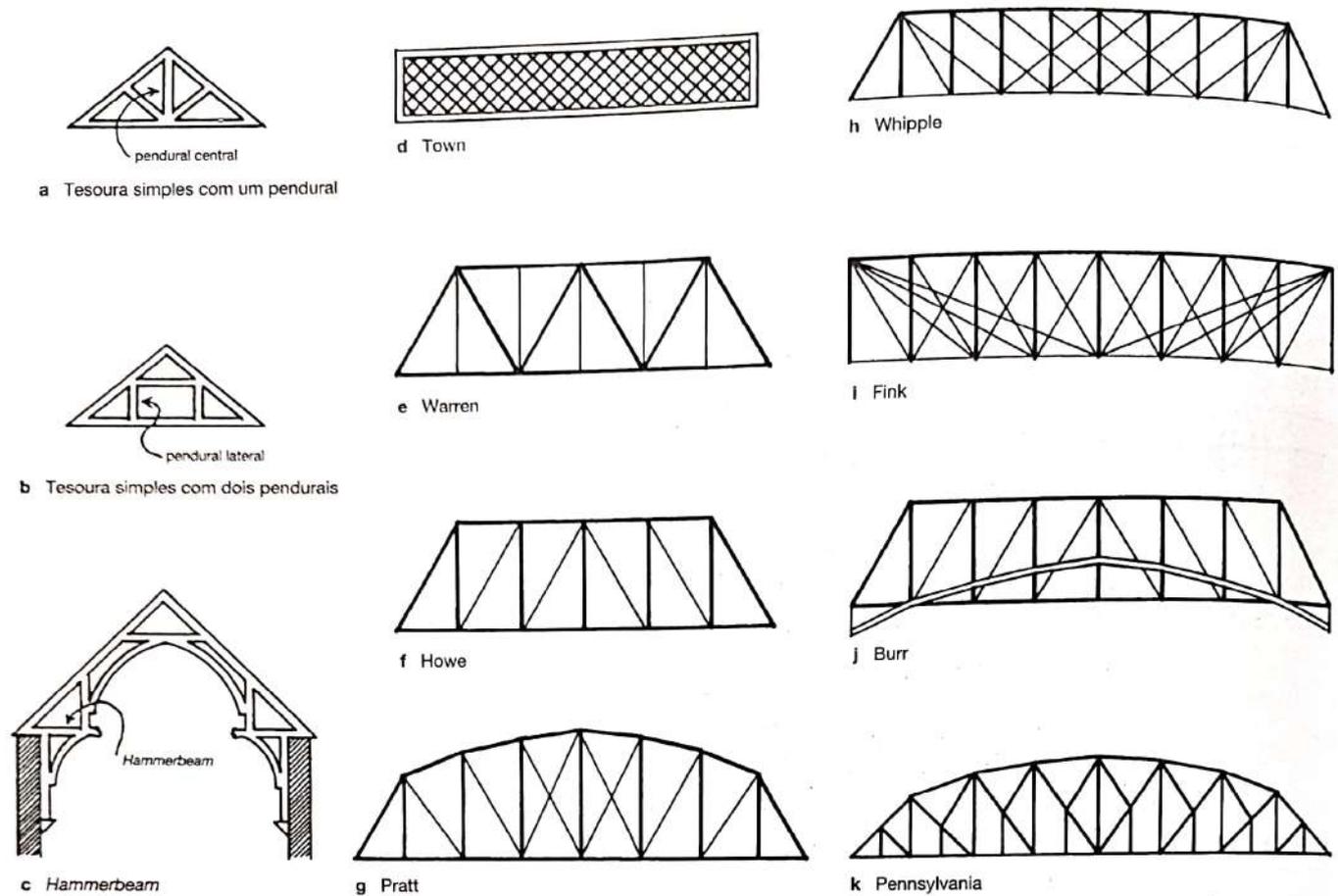
2.22. Diagrama de abóbadas de ogiva.

Treliças

Os romanos também usavam outro tipo estrutural que se provou fundamental para as grandes construções dos séculos XIX e XX – a *treliça*. A treliça tradicional era constituída de peças de madeira montadas em unidades triangulares, ou células [2.24]. O triângulo, graças à sua geometria própria, não pode mudar de forma sem flexionar ou corromper um dos lados. Assim, ao fazer uma montagem de vários triângulos, é possível construir figuras maiores que são bastante resistentes apesar de relativamente leves. Treliças de madeira foram usadas em uma ampla variedade de formas para a construção de telhados em edifícios romanos, e continuaram a ser usadas durante a Idade Média, especialmente nos telhados dos grandes armazéns urbanos. Um exemplo magnífico de construção medieval com treliça de madeira é o telhado *hammerbeam* do salão Westminster, Londres, construído em 1394-1399 por Henry Yevele e Hugh Herland, cobrindo um vão de 20,7 metros – o maior vão livre de madeira dos tempos medievais [15.16]. As grandes catedrais góticas, como a de Amiens, eram cobertas por telhados assim sobre a abóbada nervurada.



2.23. Robert de Luzarches, Notre Dame de Amiens, Amiens, França, 1221-1269. As abóbadas de Notre Dame de Amiens são quadripartidas, com quatro intradorsos curvos em cada tramo do coro e da nave.



2.24. Comparação de tipos de treliça. As treliças incluem tipos medievais (tesoura simples com um pendural, tesoura simples com dois pendurais e hammerbeam) e formas patenteadas do século XIX (Howe, Pratt, Whipple, Warren, Fink).

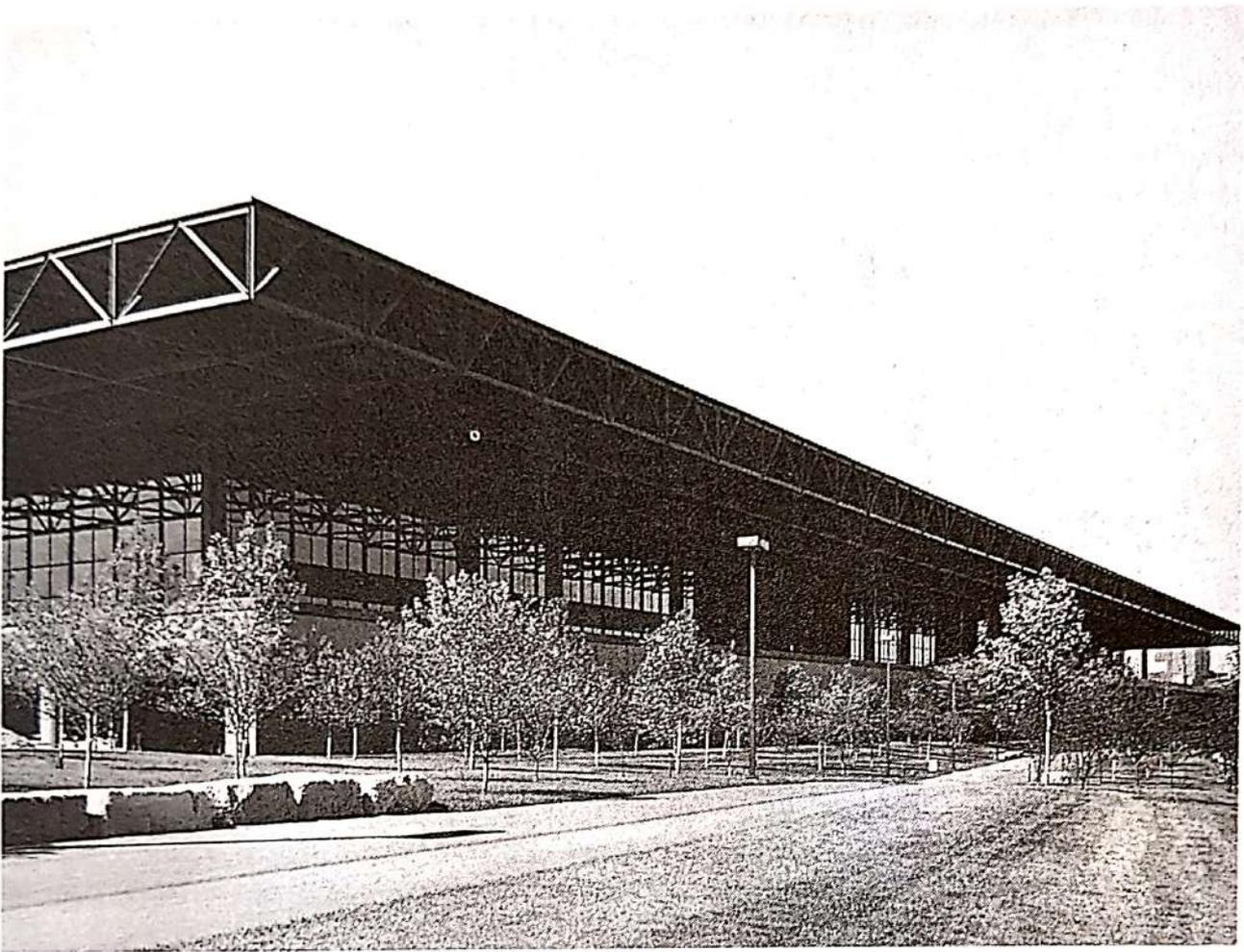
Durante o século XIX, muitas formas novas de treliça foram concebidas, em geral identificadas pelo nome do engenheiro que as usou pela primeira vez (algumas delas são mostradas na Figura 2.24). A treliça, em particular quando construída com peças de aço, se provou capaz de vencer grandes vãos, e assim era usada para cobrir espaços especialmente amplos. Um exemplo é a Galerie des Machines, o maior edifício da Exposição Internacional de Paris, em 1889 [19.22], no qual uma série de arcos de treliça se estendiam por quase 115 metros. Ali, como em qualquer arco, havia empuxos laterais consideráveis na base, mas contrafortes maciços não foram necessários, porque as extremidades das treliças arqueadas eram conectadas por barras de aço logo abaixo do piso.

Estruturas espaciais e cúpulas geodésicas

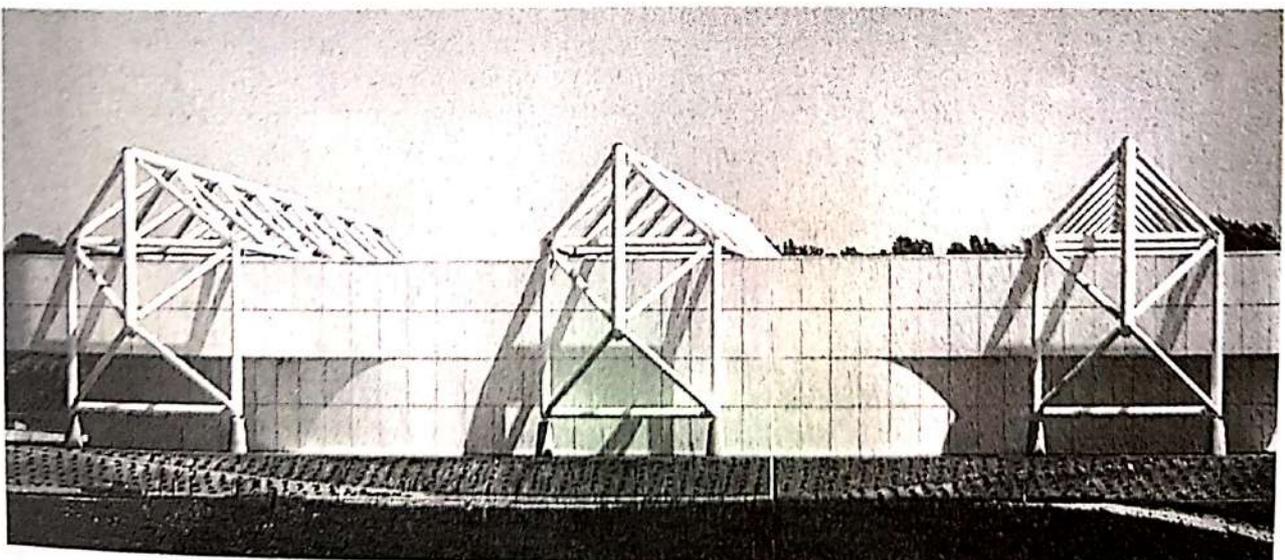
Assim como o sistema pilar e viga ou o arco, as treliças também podem se estender em três dimensões, formando um novo tipo de estrutura. A treliça tridimensional se torna

uma *estrutura espacial*, uma técnica relativamente nova, que passou a ser usada apenas desde cerca de 1945. Como a treliça plana, pode vencer vãos consideravelmente extensos. Quando bem projetada, pode ser suportada em potencial por qualquer uma das junções de suas partes, o que permite grandes balanços, como no McCormick Place (Chicago, 1970-1971), de C.F. Murphy & Associates [2.25]. Uma variação intrigante é a arena memorial R. Kemper Crosby (Kansas City, Missouri, 1975), também de C.F. Murphy & Associates [2.26]. Ali, grandes treliças tridimensionais, construídas com tubos de aço, são capazes de vencer vãos de mais de cem metros e suportar o beiral do telhado.

Assim como o arco pode ser girado para formar uma cúpula, a treliça pode ser curvada em três dimensões para formar o que R. Buckminster Fuller batizou de "cúpula geodésica". Como a treliça, ela é construída com pequenas peças de aço, leves e fáceis de manipular. Fuller começou a projetar e construir esse tipo de cúpula depois de 1945, e, em 1967, pediram-lhe para projetar o Pavilhão dos Estados Unidos para a Exposição Internacional de Montreal, Canadá, [2.27].

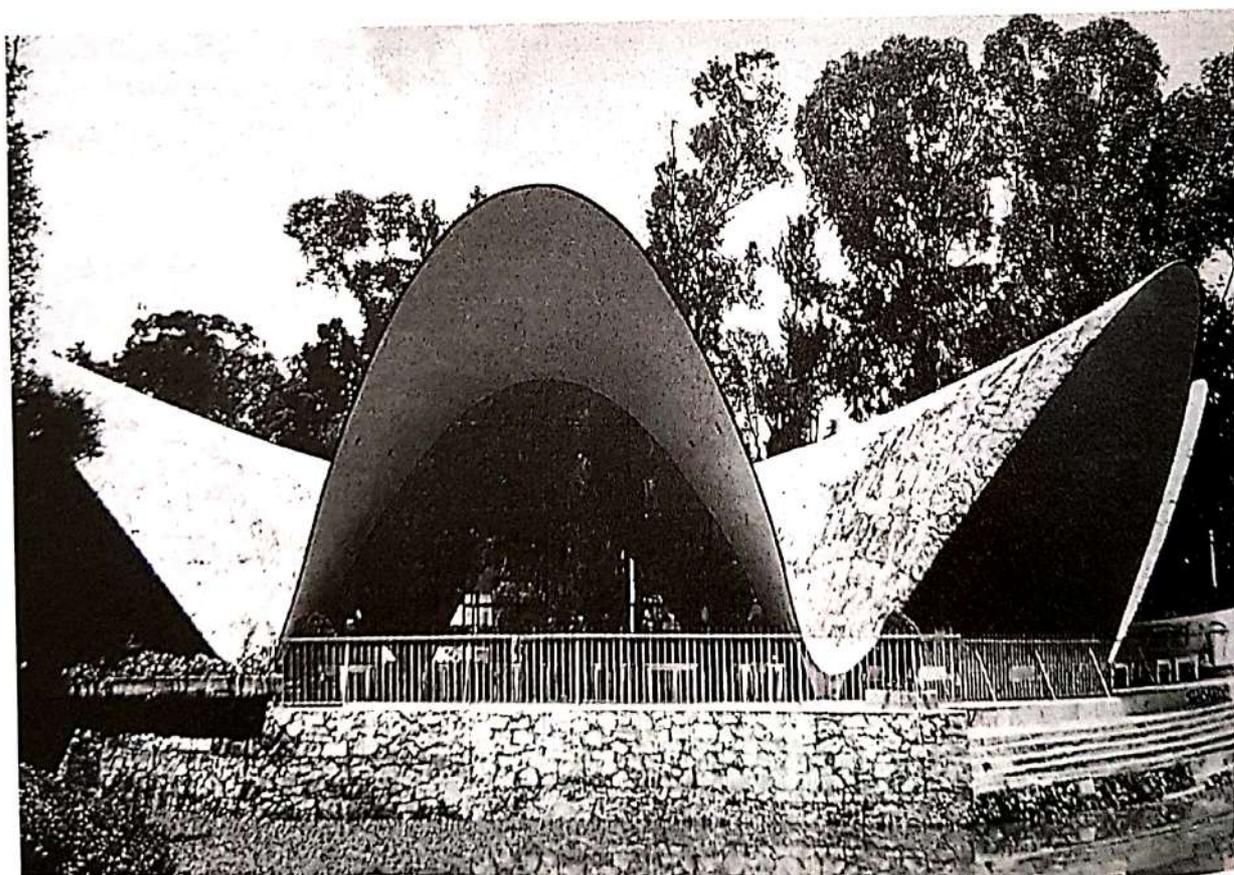
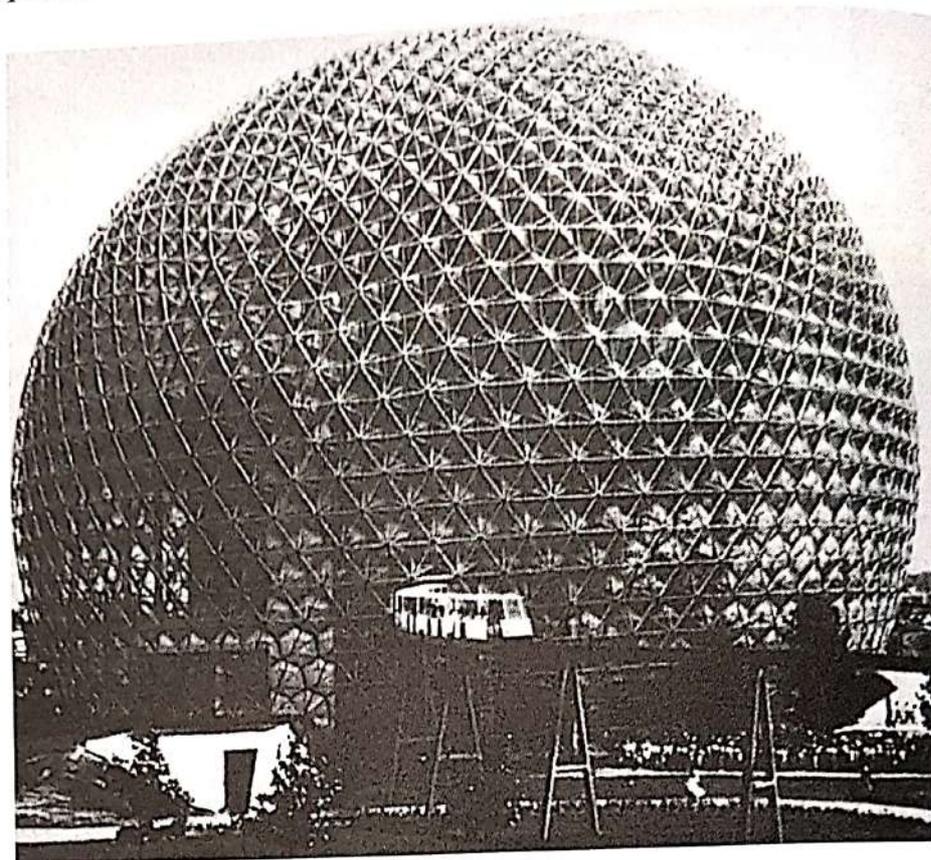


2.25. C. F. Murphy & Associates, McCormick Place, Chicago, IL, 1970-1971. Projetado por Gene Summers, tem vãos livres de 45,7 metros em ambas as direções e cobre uma área total de aproximadamente 77 mil metros quadrados.



2.26. C. F. Murphy & Associates, arena memorial R. Kemper Crosby, Kansas City, MO, 1975. Projetado por Helmut Jahn, possui três treliças, cada uma com 8,27 metros de altura e cobrindo vãos de 8,2 m por 98,8 m, que sustentam o telhado abaixo.

2.27. R. Buckminster Fuller, Pavilhão dos Estados Unidos, Exposição Internacional de 1967, Montreal, Quebec, Canadá (destruído por um incêndio em 1976). Aqui, a estrutura espacial é curvada para formar uma esfera.



2.28. Felix Candela, restaurante, Xochimilco, México, 1958. Casca construída com concreto aplicado sobre uma tela de fios de aço, com uma espessura total de cerca de dez centímetros.

Cascas

Outro tipo estrutural emprega *cascas*. Geralmente feitas de concreto, as cascas podem ser grossas e pesadas ou extremamente finas e leves. O arquiteto americano Eero Saarinen tinha um interesse particular por superfícies curvas e usou parte de uma esfera cortada para gerar uma planta baixa triangular para o auditório Kresge, no Massachusetts Institute of Technology (MIT), Cambridge, em 1954. Em seguida, concebeu amplas cascas curvas de concreto armado em balanço para o terminal da Trans World Airline (TWA) no aeroporto Idlewild (hoje aeroporto John F. Kennedy, Nova York, 1956-1962) [21.14]. O espaço total coberto é de aproximadamente 65 por 89 metros, com enormes balanços de 25 metros de um lado e do outro. Em geral, as bordas dessas cascas são sujeitas a significativas forças internas e deformações, então grandes vigas correm ao longo das bordas para reforçá-las. Como se pode imaginar, os pilares em forma de pés que apoiam as cascas em balanço são armados com barras de reforço para suportar as

enormes forças de tração geradas pelos beirais de 25 metros.

É possível construir cascas com muito menos material, como demonstrou o arquiteto mexicano Felix Candela em uma série de edifícios nas décadas de 1950 e 1960. Um bom exemplo é seu restaurante em Xochimilco, México, 1958 [2.28]. O concreto, aplicado manualmente sobre uma tela de aço, tem apenas dez centímetros de espessura, e o que dá resistência à estrutura não é a massa do material em si, mas as curvas da casca. A rigidez da estrutura é, num sentido verdadeiramente matemático, uma função de sua dupla curvatura, pois é curvada tanto radial quanto circunferencialmente.

Uma casca também pode ser curvada ou dobrada em apenas uma direção. Um bom exemplo disso é uma casca sanfonada, como no terminal do aeroporto internacional de Minneapolis, de Cerny Associates (1962-1963) [2.29]. Um uso particularmente interessante de casca plissada é o do Assembly Hall da Universidade de Illinois (Urbana, 1961-1962), de Harrison e Abramovitz, com os engenheiros Ammann e Whitney [2.30].



2.29. Cerny Associates, terminal do aeroporto internacional de Minneapolis, MN, 1962-1963. A cobertura é uma estrutura plissada que lembra um simples leque aberto.

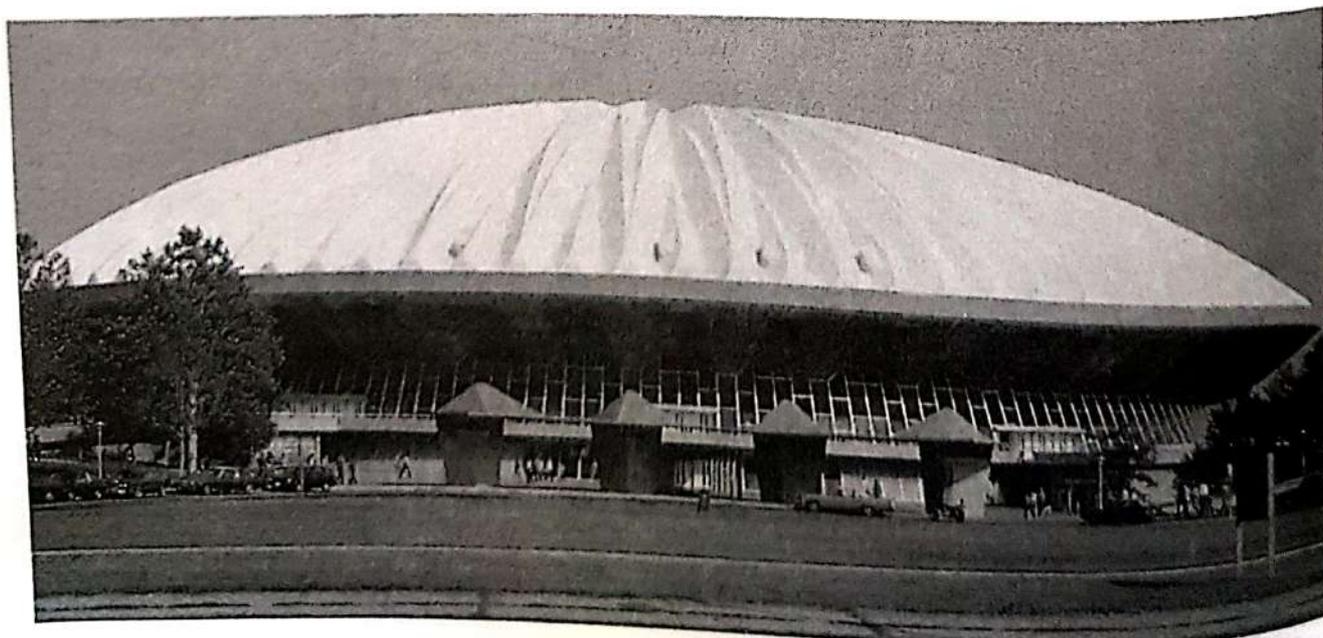
Essa cúpula consiste em uma placa dobrada de 120 metros de diâmetro que repousa sobre uma série de suportes radiais que se elevam para fora a partir de um anel na base. Os enormes empuxos laterais exercidos na borda externa da cúpula são absorvidos por um cinturão de quase mil quilômetros de cabos de aço colocado sob tensão em toda a volta.

Estruturas suspensas

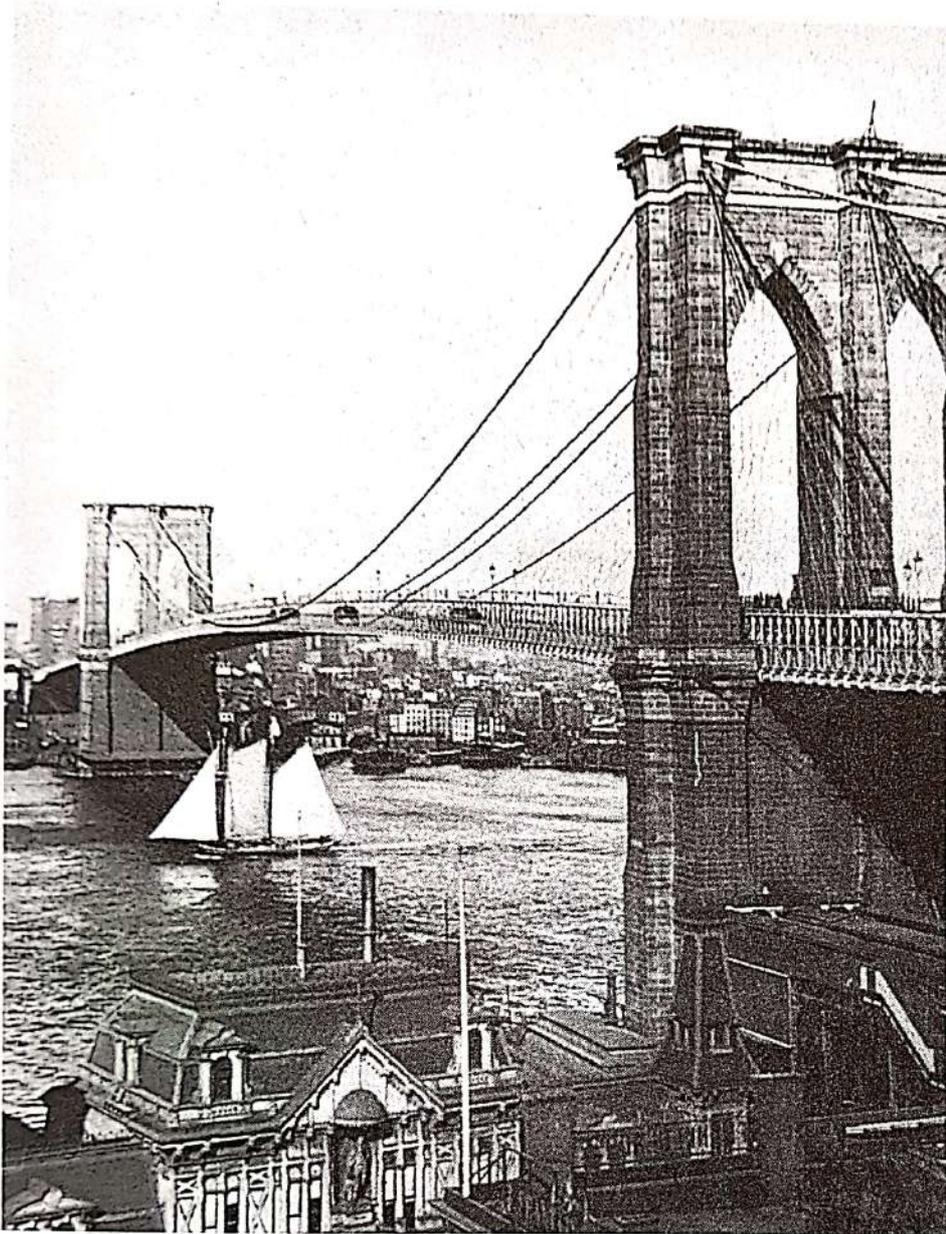
Sociedades tecnologicamente primitivas usavam cipós e cordas para erguer pontes suspensas desde tempos imemoriais. A partir do início do século XIX, pontes suspensas começaram a ser construídas com correntes de ferro e, em seguida, feixes de cabos de aço. O exemplo clássico de uma ponte suspensa moderna é a ponte do Brooklyn, que começou a ser construída por John Augustus Roebling em 1867 e foi concluída por seu filho, George Washington Roebling (com a supervisão da esposa de George, Emily), em 1883 [2.31]. Nessa ponte, fios de aço foram usados nos cabos pela primeira vez. Desde sua construção, permanece sendo o modelo para pontes suspensas.

Apenas a partir de 1955 o princípio dos cabos sob tração passou a ser usado extensivamente para outras construções além de pontes. Uma estrutura tracionada é especialmente eficiente, uma vez que o cabo todo

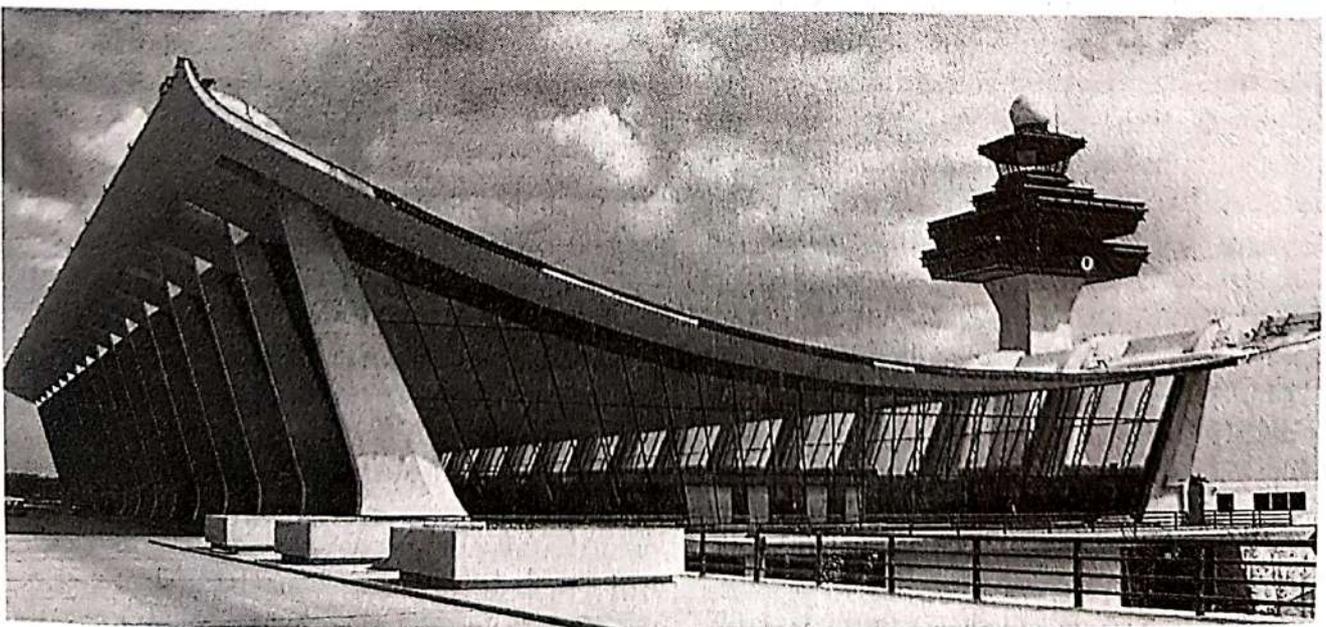
fica tensionado, enquanto a maior parte das outras formas estruturais sofre com esforços compostos (como em uma viga simples, que está em compressão ao longo do topo e em tração ao longo da parte inferior). Um cabo suspenso assume uma curva descrita matematicamente como uma catenária (muito próxima de uma parábola) e é uma forma estrutural ideal, pois fica inteiramente sob tração. De fato, se fosse possível congelar essa forma e invertê-la, o resultado seria um arco catenário ou parabólico quase sob total compressão. Tais arcos, e as formas abobadadas derivadas deles, foram usados pelo arquiteto espanhol Antoni Gaudí na virada do século XIX para o XX em Barcelona, Espanha [19.39]. Eero Saarinen, muito interessado em formas curvas expressivas, também usou a suspensão em uma série de construções. No ringue de hóquei Ingalls (Universidade de Yale, New Haven, Connecticut, 1955-1956), Saarinen ergueu um arco parabólico de concreto armado no comprimento do ringue, suspendendo cabos do arco para as paredes curvas embaixo, de cada lado do prédio. Uma plataforma de madeira foi então colocada sobre os cabos. Saarinen ampliou essa ideia no terminal do aeroporto Dulles, próximo a Washington, DC (1958-1962) [2.32]. Lá, ele criou duas fileiras de colunas inclinadas para fora e com o topo curvado para cima a fim de carregar vigas ao longo de todo o comprimento do terminal. Entre as duas longas vigas paralelas,



2.30. Harrison e Abramovitz, arquitetos, e Ammann e Whitney, engenheiros, Assembly Hall da Universidade de Illinois, Champaign, IL, 1961-1962. A cúpula é uma casca plissada com ondulações que radiam a partir do centro.



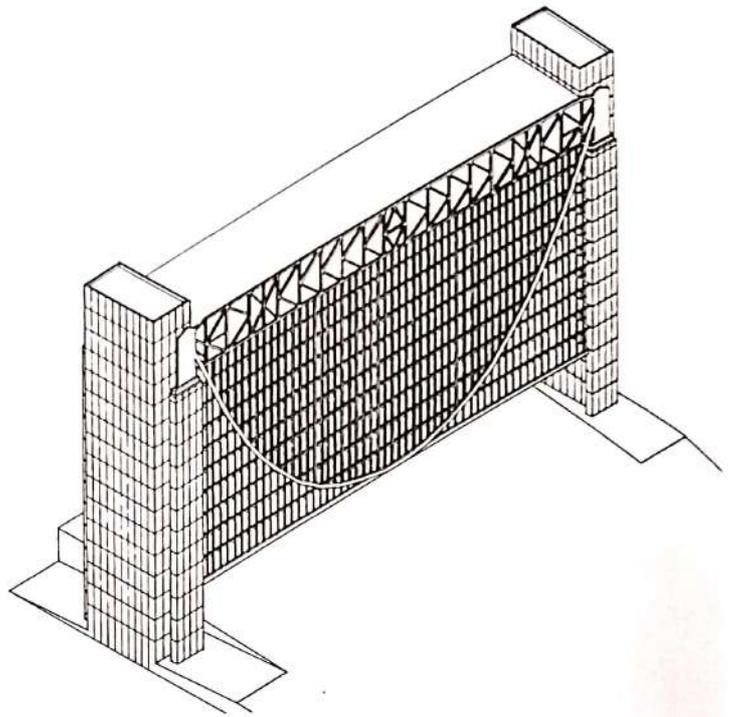
2.31. John Augustus Roebling, ponte do Brooklyn, Nova York, NY, 1867-1883. Esta ponte estabeleceu a base estrutural para todas as pontes suspensas modernas; também nela empregou-se o primeiro aço usado em uma estrutura americana.



2.32. Eero Saarinen, terminal do aeroporto internacional Dulles, Washington, DC, 1958-1962. A cobertura é suspensa por cabos ancorados nas vigas que se estendem ao longo de cada lado do edifício.

numa área do MAM

2.33. Gunnar Birkerts, *Federal Reserve Bank, Minneapolis, MN, 1971-1973*. Diagrama das partes estruturais, mostrando os principais cabos estruturais e a treliça de travamento no alto.



foram suspensos cabos. Placas de concreto foram colocadas sobre estes para criar a plataforma da cobertura. Isso pode não parecer uma estrutura leve, mas o peso morto da plataforma era necessário para impedir que o telhado se movesse com o vento.

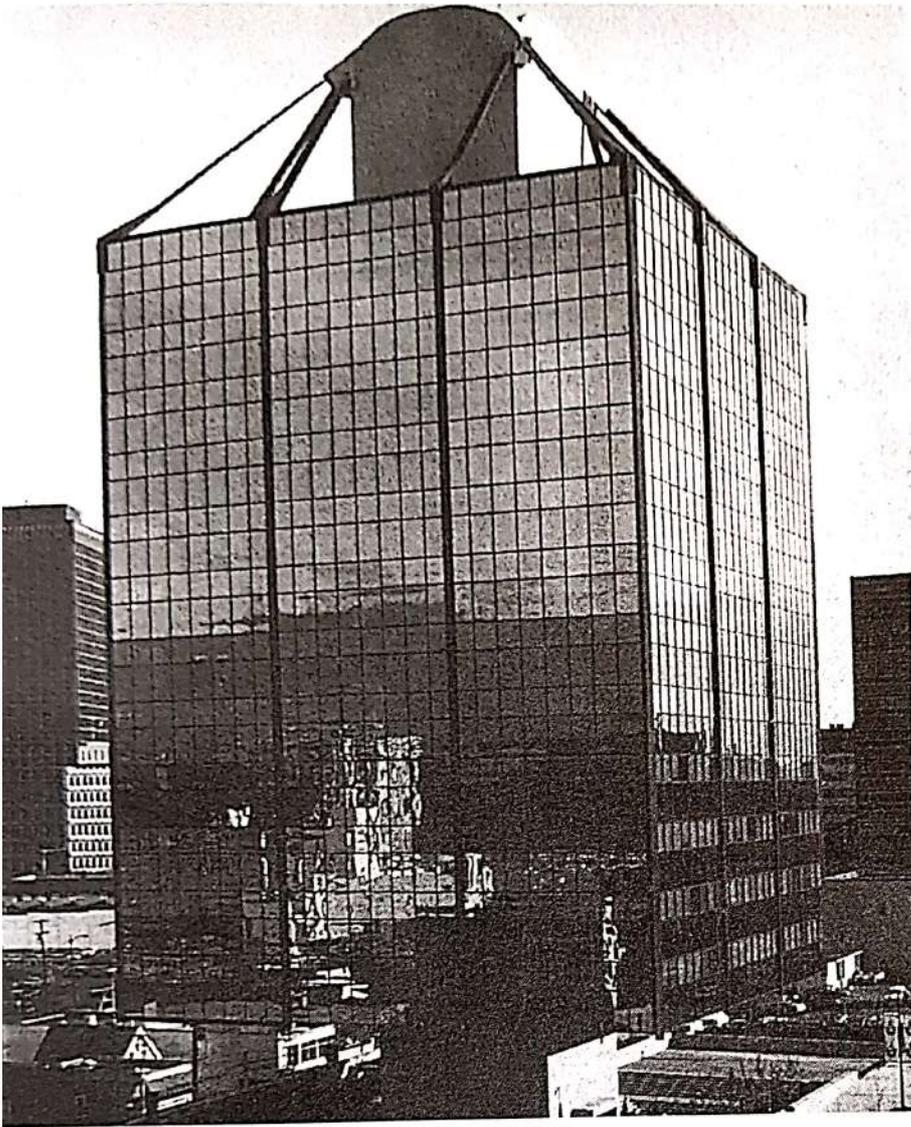
Outro edifício que usa esse princípio é o do Federal Reserve Bank (Minneapolis, Minnesota, 1971-1973), de Gunnar Birkerts. O programa de necessidades do prédio estipulava que houvesse um grande espaço abaixo do piso térreo; nessa área coberta, sem colunas de apoio, carros-fortes entregariam e retirariam dinheiro. Isso significava que não poderia haver colunas no subsolo para sustentar a estrutura do edifício, e a solução de Birkerts para esse dilema foi carregar o prédio todo em cabos suspensos no alto das duas torres, como uma ponte estaiada [2.33]. As paredes externas são estruturas reticuladas rígidas presas aos cabos, e todas as vigas dos pisos são conectadas a essas estruturas; assim, todas as cargas das lajes e das paredes são suportadas pelos cabos presos no topo das torres. Com essas sendo puxadas para dentro e para baixo dessa maneira, seus cumes seriam inevitavelmente puxados junto; por isso, no alto do edifício foi colocada uma treliça para mantê-las separadas. Birkerts também previu a construção de dois arcos acima das torres, a partir dos quais pisos adicionais poderiam ser suspensos caso viesse a ser necessário expandir o edifício verticalmente. Se isso for feito, os empuxos laterais para fora gerados pelos novos

arcos irão contrabalançar alguns dos empuxos laterais para dentro criados pelos pisos mais baixos pendurados nos cabos.

Edifícios também podem ser suspensos por cabos a partir de um único suporte de mastro, e a maior parte dos edifícios hoje em dia é construída com um dispositivo de suspensão desse tipo nos guindastes que erguem os materiais. Eles têm cabos ou varas de aço partindo de um mastro central que sustenta a extremidade do braço do guindaste. Um exemplo marcante dessa técnica sendo usada como a estrutura principal de um prédio é o edifício Westcoast Transmission (Vancouver, British Columbia, Canadá, 1968-1969) [2.34], dos arquitetos Rhone e Iredale com os engenheiros Bogue e Babicki. Nesse edifício, os pisos são suspensos por cabos saindo do núcleo central que se eleva acima da cobertura.

Membranas estruturais (tendas) e estruturas infladas

Desde o início da década de 1960, uma série de novos materiais vem permitindo técnicas de construção cada vez mais exóticas. Com o tempo, elas poderão se tornar tão triviais quanto a estrutura independente de metal, que era uma técnica muito inovadora quando foi usada para construir o Palácio de Cristal de Londres, em 1851, mas que hoje é uma das formas estruturais mais comuns. Uma técnica variante é a membrana estru-

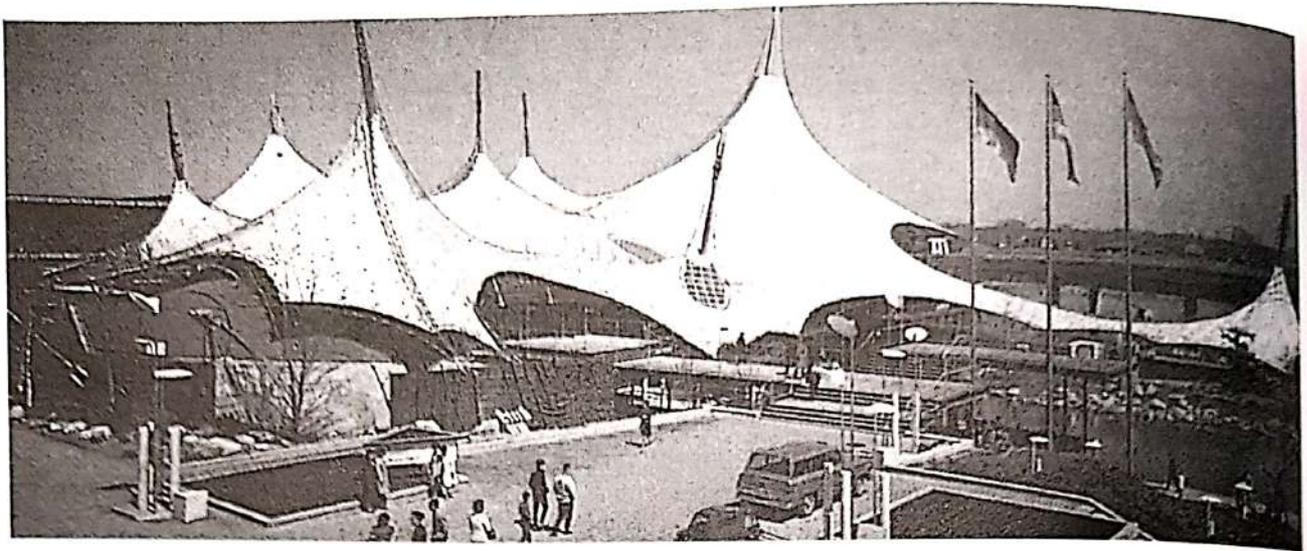


2.34. Rhone e Iredale, arquitetos, e Bogue e Babicki, engenheiros. Edifício da Westcoast Transmission, Vancouver, British Columbia, Canadá, 1968-1969. Os pisos são sustentados por vigas e colunas presas aos cabos externos que se juntam no alto a um mastro central.

tural, ou estrutura tracionada; uma variação de um dos mais antigos tipos construtivos humanos. O arquiteto e engenheiro alemão Frei Otto concentrou seus esforços em desenvolver membranas estruturais nas quais uma tenda é suportada por mastros que sustentam uma rede de cabos esticados entrelaçados e presos a fixações ancoradas no solo (isso previne que a membrana tremule ao vento). A membrana em si é presa a essa rede. Um bom exemplo foi o Pavilhão Alemão da Exposição Internacional de Montreal, Canadá, 1967 [2.35].

Outra técnica construtiva criada na segunda metade do século XX é a estrutura inflada, que se tornou possível graças aos avanços tecnológicos em fibras têxteis, tecelagem e impregnação plástica. Uma de suas aplicações é para coberturas temporárias de piscinas e outros equipamentos sazonais. Em geral, a estrutura tem uma única membrana atada ao solo ou ao piso, e a atmosfera interna é pressurizada com ventiladores que in-

flam a estrutura. Uma alternativa é uma parede inflável dupla (uma espécie de versão ampliada da piscina tubular inflável infantil), na qual tubos são presos uns aos outros de modo que, quando inflados, garantem a integridade estrutural, e a atmosfera dentro do recinto não precisa ser pressurizada. Um bom exemplo desse tipo foi o Pavilhão Fuji, na Exposição Internacional de Osaka, projetado por Yutaka Murata (Japão, 1970) [2.36]. A desvantagem das estruturas infláveis é que elas exigem energia quase constante para os ventiladores manterem a pressão, e o tecido que as formas são suscetíveis a furos e rasgos. Cada vez mais as estruturas tensionadas e infláveis têm sido usadas para cobrir edifícios esportivos, mas essas tecnologias são relativamente novas, e temos informações limitadas sobre como os materiais irão se manter ao longo do tempo e da exposição às intempéries.



2.35. Frei Otto, Pavilhão Alemão, Exposição Internacional de 1967, Montreal, Quebec, Canadá. Nesta construção, a cobertura protetora é fornecida por uma membrana tensionada por cabos esticados e presos ao chão a partir de mastros.

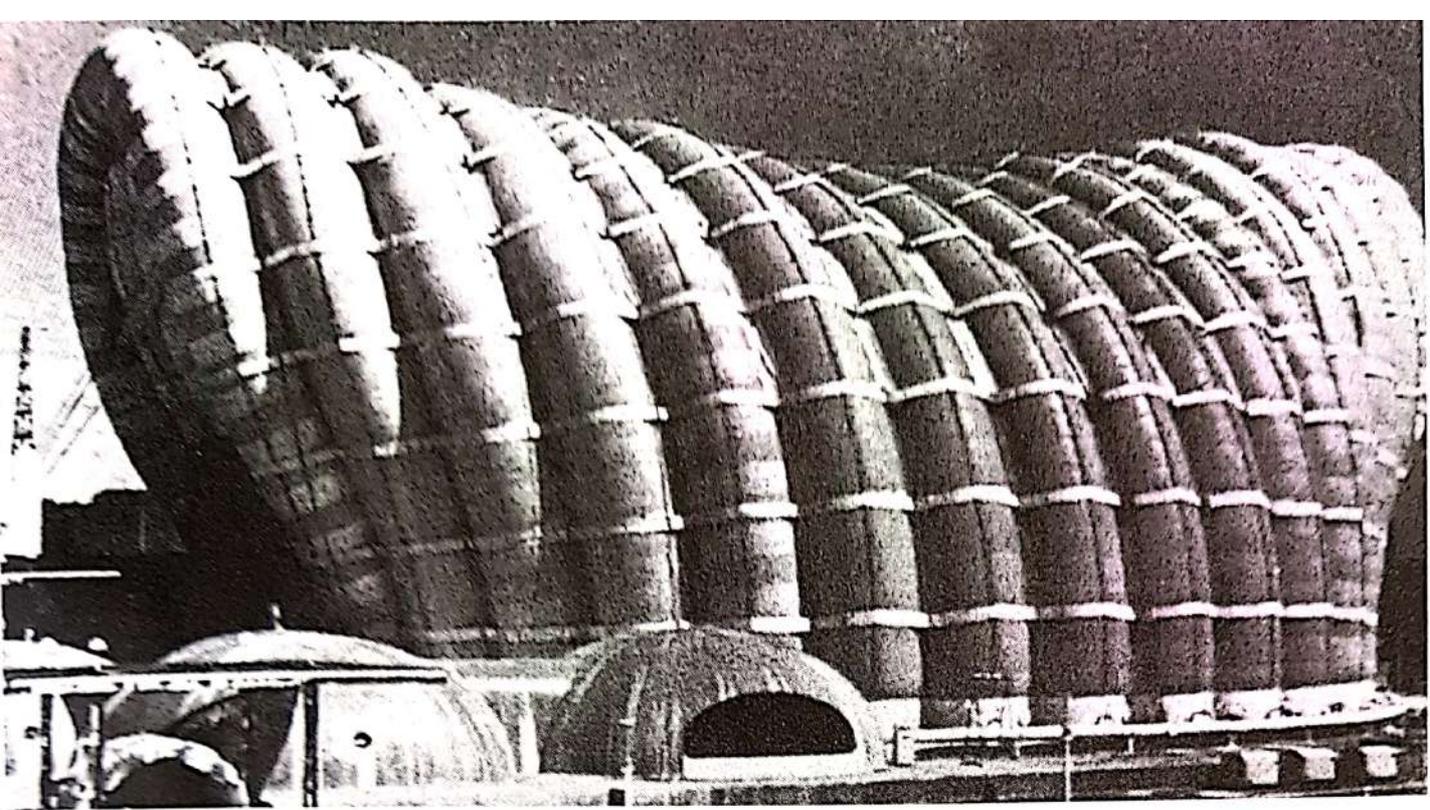
Tecnologia e risco

Parece ser parte da aspiração humana a vontade de colocar em uso uma nova tecnologia logo que ela é desenvolvida. Existe um desejo insaciável de sempre avançar pelos caminhos da inovação, às vezes além dos limites possíveis. E, como infelizmente costuma acontecer, os riscos e as desvantagens de um novo procedimento ou material são descobertos apenas após a estrutura estar em uso. Os arquitetos gregos talvez tenham aprendido pela amarga experiência qual era o tamanho máximo de uma viga de pedra que podiam erguer antes de ela começar a rachar, e os arquitetos góticos se deram conta de que tinham alcançado os limites de sua tecnologia quando a abóbada da catedral de Beauvais desmoronou. A compulsão pela novidade e leveza estrutural tornou-se particularmente evidente na arquitetura moderna após 1920, quando se começou a buscar cada vez mais a desmaterialização da arquitetura (como na parede de vidro transparente da Lever House). O objetivo tem sido conseguir o desempenho estrutural máximo com a mínima quantidade de material, usando junções e conexões tão pequenas quanto possível. O resultado disso é que alguns projetos se mostraram fatais, como no caso das

passarelas suspensas do saguão do hotel Hyatt Regency, em Kansas City, Missouri. As passarelas foram presas aos finos cabos de modo defeituoso e, por isso, despencaram em julho de 1981, matando 113 pessoas e ferindo outras 180.⁴

Estrutura como expressão cultural

Estrutura é mais do que apenas criar um arcabouço ou uma cobertura. Os materiais selecionados e a maneira como são montados, sugerindo solidez ou desmaterialização, são parte da visão que uma cultura tem de si mesma e de sua relação com a história. Então, como veremos na Parte Dois, a solidez e o peso das pirâmides eram uma expressão da visão imutável do universo tida pelos egípcios, a harmonia de proporções dos templos gregos era uma representação do ideal de equilíbrio da filosofia grega, a elevação das catedrais góticas era uma expressão da esperança do Paraíso, e os esguios suportes das passarelas do Hyatt Regency seriam nosso presunçoso anseio de vencer a gravidade por meio da tecnologia moderna. Como construímos nos diz quase tanto quanto o que construímos.



2.36. Yutaka Murata, Pavilhão Fuji, Exposição Internacional de 1970, Osaka, Japão. Tubos de tecido inflado criam seu próprio suporte firme.

NOTAS

1. Louis I. Kahn, palestra proferida na Escola de Arquitetura do Pratt Institute, Nova York, 1973, citado em Lobell, John. *Between Silence and Light*. Boulder, CO, 1979, p. 42.
2. Pesquisas recentes de George Mersey indicam que as ordens gregas foram inicialmente desenvolvidas como imitação dos troncos das árvores dos pomares sagrados, e que os nomes das muitas partes que compõem as ordens podem ser traçados às oferendas sacrificiais feitas aos deuses. Isso será discutido em mais detalhes no Capítulo 11.
3. Para uma análise estrutural do Panteon, ver Hutchinson, Mark e Paul. "On the Structure of the Roman Pantheon". *Art Bulletin*, 68, pp. 124-134, mar. 1988. Ver também discussões sobre a estrutura do Panteon em Mainstone, R. *Developments in Structural Form*, e em Salvadori, M. *Why Buildings Stand Up* (citados nas sugestões de leitura a seguir).
4. Ver uma análise da queda das passarelas do Hyatt Regency em Ross, Steven S. *Construction Disasters: Design Failures, Causes, and Prevention*. Nova York, 1984, pp. 388-406. Em janeiro de 1985, o estado de Missouri revocou as licenças profissionais de dois engenheiros estruturais que haviam projetado as passarelas, depois de eles terem sido indiciados por negligência profissional grave em novembro de 1985.

SUGESTÕES DE LEITURA

- Condit, Carl W. *American Building, Materials and Techniques from the Beginning, of the Colonial Settlements to the Present*. 3 ed. Chicago e Nova York, 1982.
- _____. *American Building Art: The Nineteenth Century*. Nova York, 1960.
- _____. *American Building Art: The Twentieth Century*. Nova York, 1961.
- Davey, Norman. *A History of Building Materials*. Nova York, 1971.
- Gordon, James Edward. *Structures: Or Why Things Don't Fall Down*. Nova York, 1978.
- Mainstone, Rowland J. *Developments in Structural Form*. Cambridge, MA, 1975.
- Ross, Steven. *Construction Disasters: Design Failure, Causes, and Prevention*. Nova York, 1984; inclui uma discussão sobre o fiasco da John Hancock Tower, o colapso da cobertura da arena Kemper e o desmoronamento da passarela do Hyatt Regency.
- Salvadori, Mario. *Why Buildings Stand Up*. Nova York, 1980. (Edição em português: *Por que os edifícios ficam de pé*. São Paulo, Martins Fontes, 2011).
- Salvadori, Mario e Heller, Robert. *Structure in Architecture: The Building of Buildings*. 3 ed. Englewood Cliffs, NJ, 1986.
- Timoshenko, Stephen. *History of the Strength of Materials*. Nova York, 1983.
- Zannos, Alexander J. *Form and Structure in Architecture: The Role of Statical Function*. Nova York, 1986.