Pete Silver
Will McLean
Peter Evans

SISTEMAS ESTRUTURAIS

Blucher

Sistemas estruturais

Título original: *Structural engineering for architects: a handbook*

Copyright © 2013 William McLean, Pete Silver and Peter Evans

William McLean, Pete Silver e Peter Evans have asserted their right under the Copyright, Design and Parent Act 1988 to be identified as the Authors of this work.

Portuguese translation © 2013 Editora Blucher Ltda.

This book was originally designed, produced and published in 2013 by Laurence King Publishing Ltd. London

Tradução: Jane Santana
Graduada e licenciada em Letras pela Faculdade de Filosofia, Letras e Ciências Humanas e pela Faculdade de Educação da USP.

Revisão técnica: Prof. Dr. Valdir Pignatta e Silva
Escola Politécnica da Universidade de São Paulo

Blucher

Rua Pedroso Alvarenga, 1245, 4° andar 04531-012 –
São Paulo — SP — Brasil
Tel.: 55 11 3078-5366
contato@blucher.com.br
www.blucher.com.br

Segundo o Novo Acordo Ortográfico, conforme 5° ed. do Vocabulário Ortográfico da Língua Portuguesa, Academia Brasileira de Letras, março de 2009.

É proibida a reprodução total ou parcial por quaisquer meios, sem autorização escrita da Editora.

Todos os direitos reservados pela Editora Edgard Blucher Ltda.

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

Silver, Pete
Sistemas estruturais / Pete Silver, Will McLean, Peter Evans; tradução de Janete Santana; coordenação de Valdir Pignatta e Silva –- São Paulo: Blucher, 2013.

ISBN 978-85-212-0799-3
Título original: Structural engineering for architects: a handbook

1. Engenharia das estruturas 2. Arquitetura I. Título II. McLean, Will III. Evans, Peter IV. Santana, Janete V. Silva, Valdir Pignatta

13-0933 CDD 624.171

Índices para catálogo sistemático:
1. Engenharia das estruturas

Sistemas estruturais

Pete Silver
Will McLean
Peter Evans

Blucher

Conteúdo

Introdução **6**

Estruturas na natureza **8**

1.1 Árvore 10

1.2 Teia de aranha 12

1.3 Casca de ovo 14

1.4 Bolhas de sabão 16

1.5 Corpo humano 18

2 Teoria **22**

2.1 Teoria geral das estruturas 24

2.1.1 Introdução 24

2.1.2 Carregamentos externos 25

2.1.3 Esforços Internos 26
2.1.3.1 Axial 26
2.1.3.2 Cisalhamento 26
2.1.3.3 Flexão 27
2.1.3.4 Torção 27
2.1.3.5 Equilíbrio estático 28
2.1.3.6 Análise simples 30
2.1.3.7 Equações de vigas comuns 36

2.1.4 Propriedades dos materiais 40
2.1.4.1 Tensão 40
2.1.4.2 Deformação específica 44
2.1.4.3 Propriedades do aço 47
2.1.4.4 Propriedades do concreto 48
2.1.4.5 Propriedades da madeira 49

2.1.5 Características geométricas das seções transversais 50
2.1.5.1 Flexão 50
2.1.5.2 Compressão axial 52
2.1.5.3 Deformação 55

2.1.6 Adequação à finalidade 56
2.1.6.1 Deformação vertical 56
2.1.6.2 Deformação lateral 57
2.1.6.3 Vibração 57

2.1.7 Estruturas 58
2.1.7.1 Categorias das estruturas 58
2.1.7.2 Estabilidade 63

2.2 Sistemas Estruturais 73
2.2.1 Introdução 73
2.2.2 Avaliação de materiais estruturais 74
2.2.3 Componentes estruturais 77
2.2.3.1 Sistemas de vigas 78
2.2.3.2 Sistemas de lajes de concreto 84

3 Protótipos estruturais **86**

3.1 A busca da forma 88

3.2 Teste de carga 92

3.3 Visualizando forças 104

4 Estudos de caso **110**

4.1 Introdução 112

4.2 1850–1949 114

4.2.1 A inovadora abordagem de Viollet-le-Duc sobre Engenharia 114

4.2.2 Estação Ferroviária St. Pancras Shed 116

4.2.3 Torre Eiffel 118

4.2.4 Ponte Forth Rail 120

4.2.5 Exposição All-Russia – 1896 122

4.2.6 Torre tetraédrica 124

4.2.7 Armazém Magazzini Generali 126

4.2.8 Hipódromo Zarzuela 128

4.3 1950–1999 130

4.3.1 Crown Hall, Illinois Institute of Technology (IIT) 130

4.3.2 Restaurante Los Manantiales 132

4.3.3 Estruturas em casca de concreto, Inglaterra 134

4.3.4 Cúpulas geodésicas 136

4.3.5 Palazzo del Lavoro (Palácio do Trabalho) 140

4.3.6 Estruturas de concreto em casca, Suíça 144

4.3.7 Monumento Jefferson National Expansion (Arco do portal de entrada) 150

4.3.8 Sistemas Maxi/Mini/Midi 152

4.3.9 Estruturas *Tensegrity* 156

4.3.10 Cobertura do Estádio Olímpico de Munique 158

4.3.11 Cúpulas Bini – forma inflável 162

4.3.12 Museu de Arte Contemporânea de Niterói (MAC-Niterói) 164

4.3.13 Vidro Estrutural 166

4.4 2000–2010 172

4.4.1 Sharp Centre for Design - Ampliação do Ontario College of Art and Design 172

4.4.2 Edifício Atlas 176

4.4.3 'Het Gebouw' (O edifício) 178

4.4.4 Casa Hemeroscopium 182

4.4.5 Oficina/Mesa do Kanagawa Institute of Technology (KAIT) 186

4.4.6 Passarela Meads Reach 190

4.4.7 Pompidou-Metz 194

4.4.8 Burj Khalifa 198

Referências e leituras complementares 202

Índice 204

Créditos de imagem 208

Agradecimentos do autor 208

Introdução

Quando eu tinha 17 anos, me disseram que eu nunca poderia ser um arquiteto, assim como eu nunca compreenderia totalmente as estruturas de uma construção. Foi assim, com esse desafio, que vim a estudar arquitetura. Eu assisti religiosamente a todas as aulas sobre engenharia de estruturas, aliás, sobre qualquer engenharia, e descobri que eram surpreendentemente fáceis de entender e, ainda melhor, eram divertidas. Depois disso, me apaixonei pela engenharia como ciência. Não que eu a tenha algum dia compreendido totalmente — mas quem se importa? No final das contas, o amor não é para ser compreendido.

Este livro é uma daquelas cartas de amor que alguém recebe e apenas precisa decidir se responde. Como eu desejaria tê-lo encontrado durante a minha juventude – teria me poupado todo o esforço gasto na leitura de tantos livros aborrecidos.

É pegar ou largar, mas, uma vez tendo este livro disponível, ninguém pode mais dizer que "você nunca vai entender estruturas". Confie no que estou dizendo, este livro lhe trará uma nova dimensão de entendimento sobre o planeta em que vivemos e, antes de tudo, será divertido.
Eva Jiricna
Junho de 2011

O objetivo deste livro é possibilitar que estudantes de arquitetura possam desenvolver um entendimento intuitivo de engenharia de estruturas, para que, a longo prazo, sejam capazes de conduzir diálogos produtivos com engenheiros. Espera-se ainda que o livro sirva como uma valiosa referência tanto para a arquitetura como para a engenharia.

No livro *The Concrete Architecture of Riccardo Morandi*, de Giorgio Boaga, publicado em 1965, o engenheiro italiano Morandi aborda a notória dificuldade no relacionamento entre arquitetos e engenheiros, mas se recusa a tomar partido nessa discussão pouco produtiva. Mais importante, ele descreve como "... é sempre possível, dentro de certos limites, resolver um problema – funcional, estrutural e economicamente – de várias maneiras válidas" e que "... o carinho dispensado aos detalhes formais (de modo bem independente dos requisitos de cálculo) ultrapassa o aspecto puramente técnico e, intencionalmente ou não, contribui para a criação artística."[1] Nessas afirmações, Morandi não está mais favorável ao calculista talentoso do que ao desenhista extravagante – está simplesmente a favor do trabalho interessante, que pode se mostrar assustadoramente simples ou inesperadamente expressivo.

Em seu livro *Estruturas*, de 1956, Pier Luigi Nervi explica o uso de suas nervuras isotencionadas projetadas conforme a distribuição de tensões, que foram vistas empregando as então novas técnicas de imagem fotoelástica. Mais recentemente, os detalhados cálculos aritméticos e algébricos analisados por meio do Método dos Elementos Finitos são vistos nas saídas da computação gráfica – uma ferramenta incrivelmente poderosa para as mentes mais intuitivas. Um passo a frente disso está a digressão do engenheiro de estruturas Timothy Lucas sobre um sistema de *feedback*

físico-digital, que permitiria ao engenheiro analisar os esforços nas estruturas por intermédio de um modelo físico ampliado. Ao longo da história da tecnologia, ensaios físicos têm sido, e continuam sendo, um componente vital para o desenvolvimento de tecnologia e de projeto estratégico de engenharia. De modo semelhante, o campo da biomimética é, certamente, apenas uma formalização acadêmica de um processo atemporal, no qual aprendemos, a partir da obtenção rápida de protótipos da natureza e das esquecidas ou não reconhecidas invenções do homem, a desenvolver novas estratégias de engenharia, de materiais e operacionais.

O livro é dividido em quatro partes:

Primeira parte – Estruturas na natureza: descreve algumas das formas estruturais comumente encontradas na natureza.

Segunda parte – Esboços de teoria: uma teoria geral de Estruturas e Sistemas Estruturais que é geralmente aplicada ao ambiente construído.

Terceira Parte – Protótipos estruturais: métodos de desenvolvimento e ensaios de formas estruturais, incluindo instruções práticas de produção de modelos e protótipos em tamanho natural, assim como de modelagem computacional.

Quarta Parte – Estudos de caso: apresenta uma seleção de figuras-chave envolvidas na evolução da engenharia de estruturas e forma construída, desde meados do século XIX até os dias atuais.

1 Boaga, G., and Boni, B., *The Concrete Architecture of Riccardo Morandi*, London: Alex Tiranti, 1965, p. 10

1
Estruturas na natureza

1.1
Árvore

Mais de 80.000 espécies de árvores, desde salgueiros-do-ártico com poucos centímentros de altura, até sequoias gigantes capazes de alcançar mais de 100 metros de altura, cobrem 30 por cento da superfície não oceânica da Terra.

Estrutura

As árvores se apresentam em várias formas e diversos tamanhos, mas todas possuem a mesma estrutura básica. Elas têm uma coluna central, o tronco, que proporciona suporte a uma estrutura de caule, ramos e galhos. Essa estrutura é chamada de coroa e estima-se que exista um número finito de sistemas de ramificação (por volta de 30) para todas as espécies de árvores. Os ramos e os galhos, por sua vez, possuem uma camada exterior de folhas. Uma árvore fica presa ao chão por meio de uma trama de raízes, que se espalham e engrossam de modo proporcional ao crescimento da árvore acima do solo.

Todas as partes da estrutura de uma árvore – tronco, ramos e galhos – são elementos em balanço, de comportamento elástico e com ligações flexíveis entre elas.

Folhosas (subclasse das dicotiledônias) e coníferas: esses termos fazem referência aos tipos de árvore de onde a madeira é proveniente. As folhosas têm origem nas florestas decíduas ou caducifólias; as coníferas, nas florestas de mesmo nome. Embora as folhosas apresentem maior densidade e dureza do que as coníferas, há exceções (p. ex. madeira balsa).

Crescimento

Conforme uma árvore cresce, grande parte da energia produzida por suas folhas precisa ser desviada para originar tecidos não produtivos (tais como o tronco lenhoso, os galhos e as raízes). A esmagadora maioria de todas as árvores (aproximadamente 99 por cento) é composta por tecidos não vivos e todo o crescimento de tecidos novos se apresenta em apenas alguns poucos pontos da árvore: dentro da casca e nas extremidades dos galhos e das raízes. Entre a casca e o entrecasco, ocorre um processo de criação de tubos de seiva, que transportam o alimento das folhas para as raízes. Toda a madeira é formada pelo câmbio vascular interior e todas as células de transporte de alimentos, pelo câmbio vascular exterior.

O tronco da árvore cresce todo ano com a adição de uma nova camada de madeira ao câmbio vascular. Cada nova camada de madeira adicionada a uma árvore forma um anel visível que varia sua composição de acordo com as estações do ano. Um anel composto por uma parte clara (crescimento na primavera) e uma parte escura (crescimento de final de verão/outono) representa o crescimento de um ano. As madeiras usadas na construção civil são escolhidas com base no equilíbrio das tensões contidas no interior do elemento estrutural. Se uma árvore cresceu ao lado de uma colina, terá crescido mais forte de um lado, ocasionando um diferencial de tensões internas, que, ocasionalmente, poderá fazer com que o elemento estrutural se empene – seja por torção ou flexão.

Resistência ao vento

As árvores são geralmente resistentes a ventos fortes, por terem a capacidade de se curvarem, embora algumas espécies sejam mais resilientes que outras. A energia eólica é gradualmente absorvida, começando com as oscilações rápidas dos galhos, seguida pelos movimentos menos rápidos dos ramos menores e, finalmente, chegando ao gentil balançar dos ramos maiores e do tronco. A grande área coberta por folhas de uma árvore a torna mais suscetível frente à ação do vento.

1

1

Estrutura básica de uma árvore

2

Partes do tronco de uma árvore
a. casca externa.
b. casca interna.
c. cerne.
d. câmbio vascular.
e. alburno.

2

1.2
Teia de aranha

Propriedades do material

A seda de aranha é também conhecida como teia e é composta por complexas moléculas de proteínas. As cadeias dessas moléculas, com diversas propriedades, são tecidas em conjunto para formar um material que possui uma enorme capacidade de absorção de energia. A seda da aranha Nephila é a mais forte fibra natural conhecida pelo homem.

A tendência geral em termos de estrutura de seda de aranha é uma sequência de aminoácidos que se automonta em uma conformação de folha. Essas folhas se empilham de modo a formar cristais, enquanto que as outras partes da estrutura originam áreas amorfas. É a interação entre os segmentos cristalinos rígidos e as regiões amorfas elásticas que proporcionam à seda de aranha suas extraordinárias propriedades. A ductilidade elevada é decorrente do rompimento das pontes de hidrogênio nessas regiões. A resistência à tração da seda de aranha é maior do que a de uma barra de aço do mesmo peso. O fio da teia de aranha pode ser esticado até 30 a 40 por cento de seu comprimento antes de se romper.

Produção de seda

As aranhas produzem fios de seda utilizando glândulas localizadas na ponta de seus abdomêns. Elas usam diferentes glândulas para produzir os diversos tipos de seda. Algumas aranhas são capazes de produzir até oito tipos diferentes de seda durante sua vida.

Projeto e produção de teias

As aranhas se locomovem pelos espaços entre os objetos deixando à deriva um fino fio adesivo. Quando a outra extremidade desse fio se prende a uma superfície adequada, a aranha cuidadosamente caminha por ele, fortalecendo-o com um segundo segmento de fio de seda. Esse processo é repetido até que o segmento se torne forte o suficiente para suportar o restante da teia. Em seguida, a aranha produzirá pequenas redes em forma de Y e as adicionará aos raios da teia, de modo que a distância entre cada raio seja pequena, mas que ela ainda possa atravessar por esse espaço. Isso significa que o número de raios de uma teia está relacionado diretamente ao tamanho da aranha e tamanho total da teia. Trabalhando de dentro para fora, a aranha irá, então, produzir uma espiral temporária não adesiva, com fios suficientemente espaçados para que ela possa se locomover em torno de sua própria teia durante a construção. Na sequência, começando de fora para dentro, substituirá essa espiral por outra com fios adesivos posicionados de modo mais próximos uns aos outros.

Resistência ao impacto

As propriedades da seda de aranha permitem que ela seja forte sob tração, sem, contudo, impedir sua deformação elástica. Quando finalizada, toda a teia de aranha está sob tração. No entanto, a natureza elástica das fibras permite que ela absorva o impacto de um veloz inseto voador, por exemplo. Com o impacto, ocorrerá uma oscilação local, sendo que quanto maior for a oscilação, maior será a sua capacidade resistente. Essa capacidade de armazenamento de energia e o fato de que a maior parte da energia é dissipada conforme a fibra se deforma permitem que a aranha intercepte e capture sua presa em decorrência da absorção de sua energia cinética.

1

1

As glândulas de produção de seda da aranha

2

Sequência da construção de uma teia

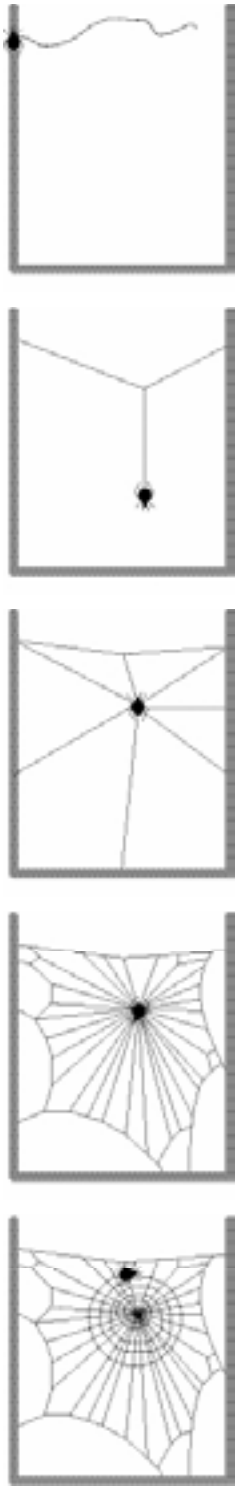
3

Uma teia de aranha gigante

4

A conclusão com êxito de um pouso empregando cabos de segurança para aviões. O cabo no qual a aeronave é presa realiza uma forma de resistência ao impacto similar ao de uma teia de aranha

2



3

4

1.3
Casca de ovo

A estrutura de uma casca de ovo varia muito entre as espécies, mas é essencialmente uma matriz revestida por cristais minerais, geralmente um composto, como o carbonato de cálcio. Não é composta por células e os ovos mais rígidos são mais mineralizados que os mais frágeis.

Ovos de pássaros – propriedades do material

As aves são conhecidas por seus ovos de casca dura. A casca do ovo é composta aproximadamente por 95 por cento de cristais de carbonato de cálcio, que são estabilizados por meio de uma matriz orgânica (proteína). Sem essa proteína, a estrutura cristalina seria frágil demais para manter sua forma.

A espessura da casca é o principal fator que determina sua força. A matriz orgânica possui propriedades de ligação de cálcio e sua organização durante a formação da casca influencia na capacidade resistente da estrutura: o seu material deve ser depositado de modo que o tamanho e a organização dos componentes do cristalino (carbonato de cálcio) sejam ideais, conduzindo assim a uma casca bastante resistente. A maior parte da casca é formada por longas colunas de carbonato de cálcio.

A casca de ovos de aves padrão é uma estrutura porosa, coberta externamente por uma camada protetora (também chamada cutícula), que ajuda o ovo a reter água e a evitar a entrada de bactérias.

Em média, em uma galinha poedeira, o processo de formação de casca leva aproximadamente 20 horas.

Capacidade resistente e forma

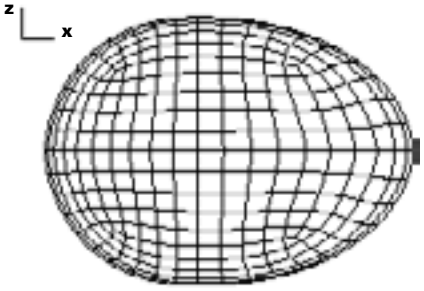
A estrutura da casca de um ovo de ave é forte em compressão e fraca em tração. Conforme o peso se concentra em sua parte superior, a parte exterior da casca será submetida à compressão, enquanto que a parte interior sofrerá tração. Desse modo, a casca poderá suportar ao peso da ave chocadeira. Os filhotes de galinha não são fortes, mas exercendo força concentrada em um ponto dentro da casca, eles conseguem sair do ovo sozinhos (a galinha possui um "dente de ovo", que usa para iniciar um furo).

É a forma de arco/domo que ajuda a casca do ovo a suportar à tração.

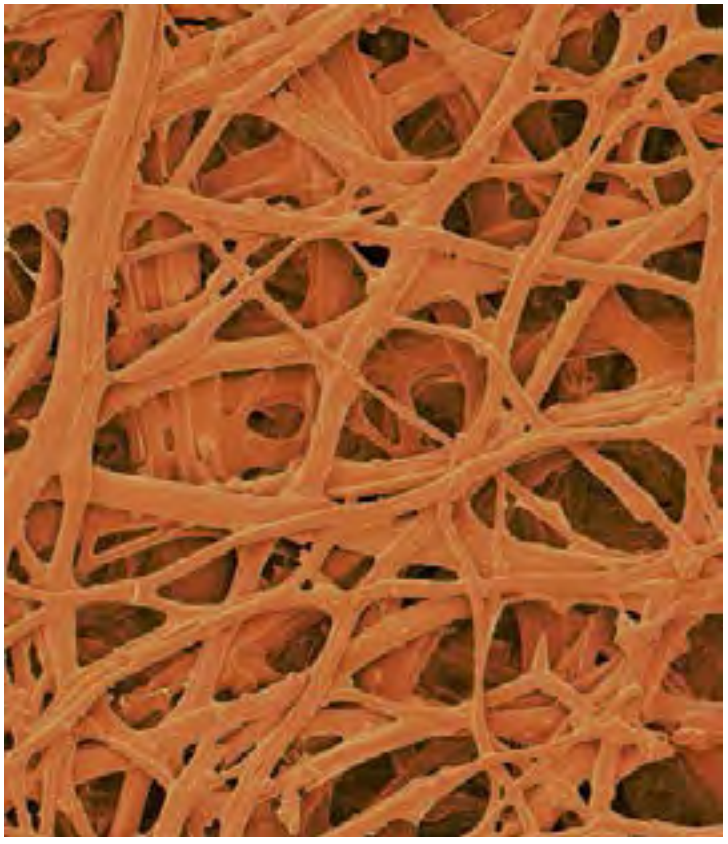
A capacidade resistente da estrutura de uma casca de ovo depende de sua geometria precisa – em particular, de seus raios de curvatura. Arcos ogivais feitos com concreto armado exigem menos armaduras do que um simples arco semicircular. Isso significa que uma cúpula altamente abobadada (baixos raios de curvatura) é mais forte do que uma cúpula menos sinuosa (altos raios de curvatura). É por isso que é fácil de quebrar um ovo apertando-o pelos lados, mas não por suas extremidades. Membros do Ontario Science Centre, em Toronto, foram bem sucedidos no experimento de manter uma pessoa de 90 kg sobre um ovo sem quebrá-lo.

1

2



3



4

5

1

Um ovo de galinha

2

Malha de casca de ovo gerada com o uso de elementos finitos do tipo casca

3

Uma visão microscópica da estrutura reticulada da casca de um ovo

4

Um arco com sob compressão suportará a forças maiores se tiver forma ogival

5

Os arcos de pedra e aço do Pavilion of the Future, construídos por Peter Rice, para a Expo-92 realizada em Sevilha, expressam a sua capacidade resistente por meio da separação dos elementos tracionados dos comprimidos

1.4
Bolhas de sabão

Tensão superficial

Uma bolha de sabão existe porque a camada superficial de um líquido possui uma determinada tensão superficial, que faz com que essa camada se comporte elasticamente. Uma bolha feita com um líquido puro isoladamente, no entanto, é instável, sendo necessário um agente tensoativo dissolvido, como o sabão, para estabilizá-la. O sabão age de modo a diminuir a tensão superficial, o que tem como efeito a estabilização da bolha (por meio de um processo conhecido como efeito Marangoni): conforme a película do sabão se estica, a concentração superficial do sabão diminui, o que ocasiona o aumento da tensão superficial. O sabão, portanto, seletivamente fortalece as partes mais fracas da bolha e tende a evitar que ela se expanda mais.

Forma

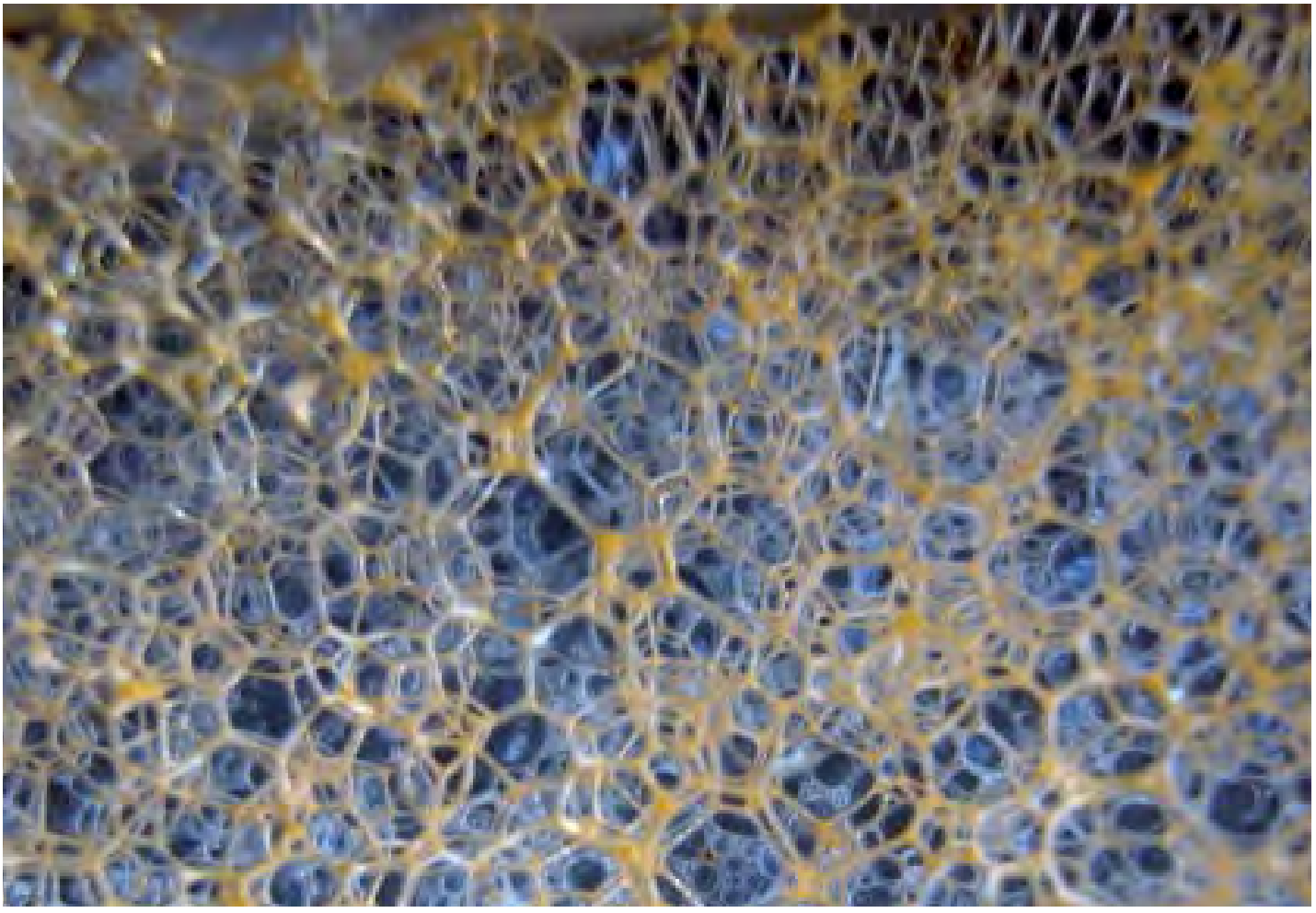
A forma esférica da bolha de sabão é também decorrente da tensão superficial. A tensão faz com que a bolha se torne esférica por essa forma ser a que proporciona menor superfície possível para um dado volume. Uma bolha de sabão, devido à diferença entre as pressões interna e externa, é uma superfície de curvatura média constante.

Fusão

Quando duas bolhas de sabão se fundem, elas adotam a forma que ofereça a menor superfície possível. Se a bolhas tiverem tamanhos similares, a parede comum será plana. As bolhas menores, por terem pressão interna maior, penetrarão nas maiores, mantendo seus tamanhos originais.

Na ocorrência do encontro de três ou mais bolhas, elas se organizam de modo que apenas três paredes se encontrem ao longo de uma linha. Levando-se em consideração que a tensão superficial é a mesma em cada uma das três superfícies, os três ângulos entre elas deve ser igual a 120 graus. Essa é a escolha mais eficiente e a razão pela qual os favos de uma colmeia possuem os mesmos 120 graus e forma de hexágono. Duas bolhas de sabão fundidas apresentam uma ótima maneira de englobar, com a menor superfície possível, dois dados volumes de ar, de diferentes tamanhos. Esse fenômeno foi denomidado de “o teorema da bolha dupla”.

1



2

1

Bolhas de sabão fundidas

2

O teorema da bolha dupla aplicado, por Nicholas Grimshaw e Associados, ao desenho dos "bio--domes" do Eden Project, Cornualha, Reino Unido

1.5
Corpo humano

O esqueleto humano

O esqueleto humano possui 206 ossos que formam uma estrutura rígida à qual os tecidos moles e órgãos estão presos. Os órgãos vitais estão protegidos pelo sistema esquelético.

O esqueleto humano está dividido em duas partes. O esqueleto axial é composto por ossos que formam o eixo do corpo – pescoço e espinha dorsal (coluna vertebral) – e dão sustentação e proteção aos órgãos da cabeça (crânio) e tronco (esterno e costelas). O esqueleto apendicular consiste nos ossos que compõem os ombros, braços e mãos – as extremidades superiores – e aqueles que compõem a bacia, pernas e pés – as extremidades inferiores.

Ossos – propriedades do material

A maioria dos ossos é composta por um tecido ao mesmo tempo denso e esponjoso. O osso compacto é denso e rígido e forma a parte exterior de todos os ossos. O osso esponjoso é encontrado dentro do osso compacto e é muito poroso (repleto de pequenos furos). O tecido ósseo é composto por vários tipos de célula inseridos em uma mistura de sais inorgânicos (principalmente cálcio e fósforo) para dar força óssea e fibras, que proporcionam flexibilidade aos ossos. A natureza oca da estrutura óssea pode ser comparada à relativamente alta capacidade resistente à flexão de tubos ocos em comparação a hastes sólidas.

Músculos – movimento corporal

O esqueleto não apenas fornece a estrutura que dá forma ao nosso corpo, mas também trabalha em conjunto com os 650 músculos do corpo para permitir que os movimentos ocorram. O movimento corporal ocorre, então, por meio da interação dos sistemas esquelético e muscular. Os músculos estão conectados aos ossos por tendões e os ossos, conectados entre si, pelos ligamentos. O encontro de ossos ocorre por intermédio da articulação. Por exemplo, o cotovelo e o joelho formam articulações em dobradiça, enquanto o quadril é uma articulação do tipo esférica. As vértebras que formam a coluna vertebral são conectadas por um tecido elástico, conhecido como cartilagem.
Os músculos responsáveis pelo movimento de uma articulação estão conectados a dois ossos diferentes e se contraem para puxá-los. Por exemplo, a contração do bíceps e o relaxamento do tríceps produzem o esticamento do braço.

Integridade tensional (*tensegrity*)

Já foi dito que o corpo humano, considerado como um todo, é uma estrutura autotensionada (*tensegrity*). Nesse tipo de estrutura, os elementos de compressão não se tocam, mas são mantidos no espaço por elementos de tração separados (cordas, fios ou cabos). O biólogo celular e diretor fundador do Wyss Institute, em Harvard, Don E. Ingber fez a ligação entre as estruturas *tensegrity*, de Kenneth Snelson (veja página 156) e células vivas, e afirma que "uma variedade espantosa de sistemas naturais, incluindo átomos de carbono, moléculas de água, proteínas, vírus, células, tecidos e mesmo seres humanos e outros seres vivos são construídos usando-se uma forma comum de arquitetura, conhecida como *tensegrity*".[1]

1 Ingber, Donald, E., 'The Architecture of Life' in Scientific American, pp. 48–57, January 1998

1

1 Pose de balé
Caminhar é, na verdade, "cair com estilo". Se você tentar caminhar muito devagar, começará a cair. Tente inclinar-se a frente dos seus quadris. Em algum momento o seu centro de gravidade fica "fora de você" e uma perna se movimenta para frente de modo a formar um triângulo que o impede de cair – o mantém estável. Continue se inclinando e chegará a um ponto no qual a única maneira de manter o seu centro de gravidade será estendendo a perna atrás de você. Esse processo segue o princípio do equilíbrio estático. No caso das estruturas de edifícios, uma estrutura em balanço (fixada na extremidade inferior e livre na superior) pode ser descrita como aquela que se projeta lateralmente a partir da vertical. Baseia-se no contrapeso à procura da estabilidade e na triangulação para resistir aos momentos fletores e às forças cortantes atuantes. Calcula-se esse tipo de estrutura também se impondo o equilíbrio estático entre esforços atuantes (na estrutura) e resistentes (nos apoios)

2

2 Argolas de ginástica
O esforço do corpo humano para manter o equilíbrio

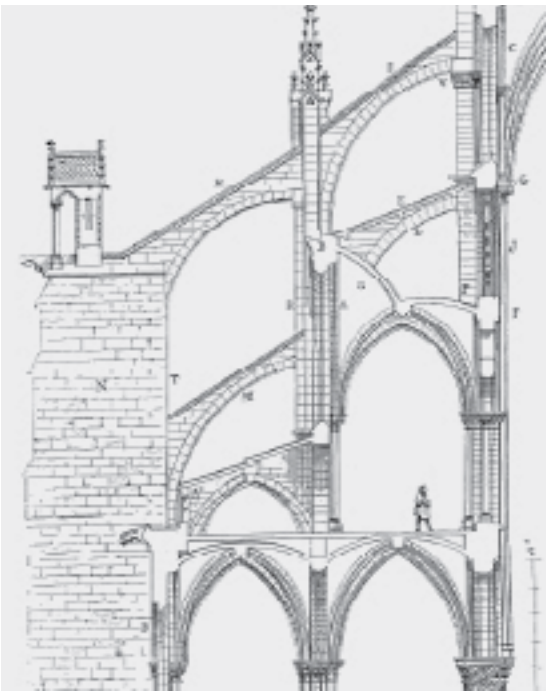
3

3 Torres humanas
Uma tradição espanhola cuja intenção é evidente. Várias estratégias podem ser empregadas, mas, em todos os casos, uma base sólida para a torre é imprescindível. Assim como em uma árvore, há uma estrutura uniforme de raízes para reforçar o "pilar". Cada participante usa um largo cinto para reforçar a conexão entre a coluna vertebral e a pélvis, além de proteger os rins de alguma pressão indevida

4

4 Círculo de pessoas
Um círculo de pessoas sentadas no colo umas das outras forma um tipo de estrutura tensegrity, por meio da qual todas são sustentadas sem a necessidade de qualquer mobiliário

5



5 Arcobotante
O princípio estrutural da torre humana é também expresso pelos arcobotantes, tradicionalmente usados para dar suporte a estruturas de alvenaria de baixo carregamento

6

6 Forth Rail Bridge
Os projetistas da Forth Rail Bridge usaram seus próprios corpos para demonstrar como a ponte utiliza o princípio de equilíbrio. Os corpos de dois homens no nível do chão estão atuando como pilares (em compressão) e seus braços estão sendo puxados (em tração). As varas estão comprimidas e estão transferindo a carga de volta para a cadeira. T = Tração, C = Compressão e R = Reação

T = Tensão
C = Compressão
R = Reação