

# DESIGN NATURAL CU TEORIA CONSTRUCTALĂ

## Principiile fundamentale dau formele naturale; ele pot, de asemenea, ghida inginerul

<sup>1</sup>Adrian BEJAN, <sup>2</sup>Sylvie LORENTE

<sup>1</sup>DUKE UNIVERSITY, DURHAM, NORTH CAROLINA (S.U.A.),

<sup>2</sup>UNIVERSITÉ DE TOULOUSE, TOULOUSE, INSA, LMDC TOULOUSE (Franța)

(Versiunea în limba română, prof. dr. ing. Alexandru MOREGA)

Cea mai fierbinte frontieră în știință este astăzi stimulată de designul observabil în natură: auto-organizarea, auto-optimizarea, regulile de design ale animalului, și multe alte relații de scalare în geofizică, biofizică, dinamică socială, și evoluția tehnologiei. Designul în natură a furnizat întotdeauna imagini de referință și deosebit de stimulative pentru cercetarea științifică.

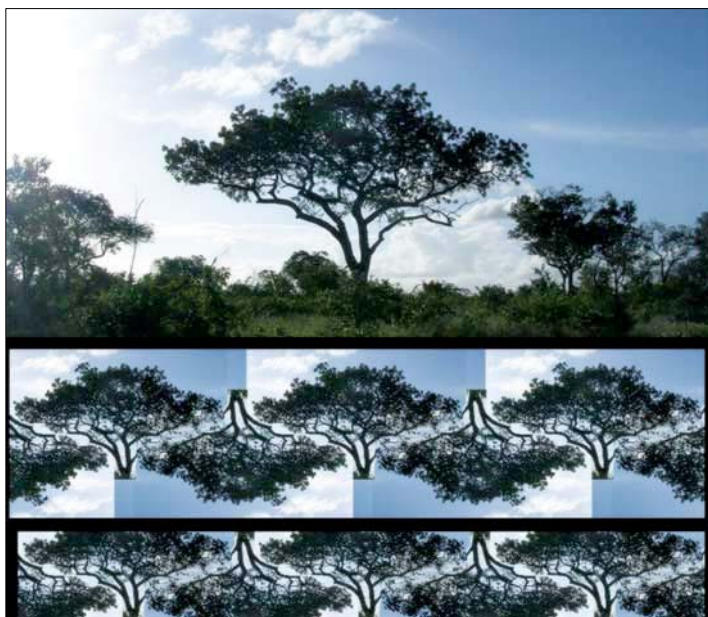
Designul în natură este captivant, util, și puțin înțeles. „Design”, în acest articol, înseamnă configurații discernabile, imagini, paternuri, ritmuri, și motive pe care le vedem și auzim în jurul nostru. Acesta este înțelesul original al cuvântului (*disegno* = desen, reliefare, în italiană) și este universal și unificator.

Întreaga natură, de la râuri la plămâni, curge în paternuri și ritmuri. Producerea designurilor vizibile și auditive este un fenomen natural, care nu trebuie confundat cu activitatea umană reprezentată de verbul „to design” (a proiecta). Știința este căutarea principiului care surprinde fenomenul natural. Știința nu este căutarea designerului.

Ingineria este știința dezvoltării cunoașterii științifice pentru scopuri de utilitate practică. Aceasta este o

observație cheie, deoarece diversificarea modernă a științei și educației a produs impresia că știința și ingineria sunt diferite, atât de diferite încât „inginerii” doar implementează ideile generate de „oamenii de știință”. Nu este adevărat, așa cum numele Carnot, Gibbs, și Prandtl mărturisesc. Acești uriași au fost ingineri prin instruire (ingineri mecanici, în terminologia modernă), totuși contribuțiile lor în fizică au fost atât de mari, încât secole mai târziu ei sunt considerați fizicieni, nu ingineri. Studentul în inginerie trebuie să știe că toți suntem oameni de știință, sau oameni de știință cu alte nume: geometri, designeri, și căutători (vânători) de forme.

Configurația unui proces sau dispozitiv de utilitate este esențială performanței sale. Abordarea uzuală a configurării curgerilor de fluide și a componentelor solide într-un întreg funcțional este realizată prin intuiție, talent și prin încercări. Imaginile apar în minte și apoi ele sunt încercate în practică. Această abordare este atât de comună încât nu o punem la îndoială, iar cei mai mulți dintre noi o identifică cu activitatea de design.



Pomii aliniați (imaginea de jos) ilustrează cele două părți ale teoriei constructale. Una este predicția că pomii care alternează sunt designul natural al accesului între două linii sau două plane. Cealaltă este strategia spălării în volum a unui corp, cu un singur curent care curge înăuntru și în afară. Mediile naturale poroase (de ex. solul) prezintă structuri de curgere multiscalate, (ierarhizate) compatibile cu scala și comportamentul asamblării prin aliniere.

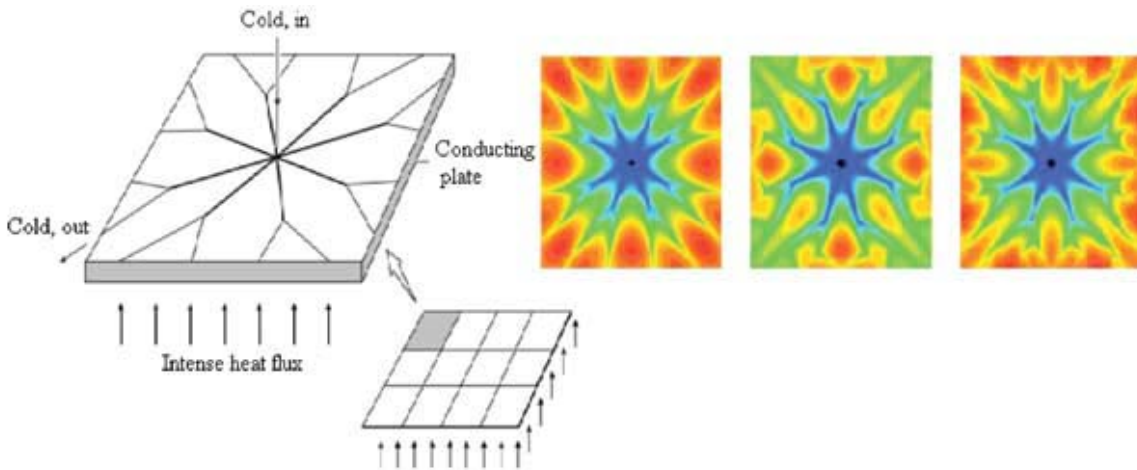
Alternativa acestei abordări este aceea de a „vedea” configurațiile utile, deoarece principiul care explică apariția lor este cunoscut. De exemplu, știm că cel mai ușor mod de curgere între un punct (sursă, puț) și un număr infinit de puncte (suprafață, volum) este curgerea dendritică, într-un pattern arborescent. Nu oricare arbore, ci arbore cu un anumit desen, cu anumite dimensiuni corespunzătoare, număr de canale, ierarhie, prezentare, și complexitate finită. Această alternativă este utilizarea designului ca o activitate științifică.

Designul, ca o paradigmă a științei, se răspândește rapid. Împreună cu colegii din mai multe universități din întreaga lume, l-am dezvoltat într-un curs nou de design și o carte (*Design with Constructal Theory*, Wiley, 2008). Teoria constructuală este perspectiva că generarea designului (configurație, ritm) în natură este un fenomen universal, exprimat de o lege a fizicii cunoscută ca legea constructuală, formulată de Adrian Bejan în 1996: „Pentru ca un sistem de curgere de dimensiuni finite să persiste în timp (să trăiască) el trebuie să evolueze astfel încât să ofere acces din ce în ce mai mare curenților care îl străbat”. În termeni constructuali, tot ce curge și continuă să curgă este asemănător unui sistem ”vii”,

similar cu bazinele râurilor și cu migrațiile animalelor. Această perspectivă este în acord aceea a lui Leonardo da Vinci, care a scris, „*Mișcarea este cauza oricărei vieți*”.

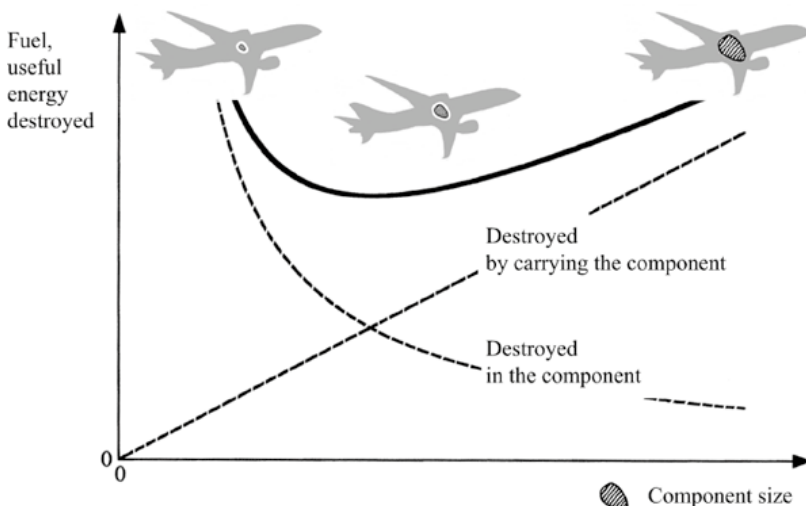
Legea constructuală este despre direcție și timp. Să ne imaginăm evoluția unui bazin de râu sub ploaie persistentă. Canalele se amplifică și se rearanjează în peisaj într-un arbore din ce în ce mai bine conturat. Urmărirea emergenței acestui arbore este asemănătoare vizionării unui film. Legea constructuală este despre direcția în care pelicula filmului rulează. Configurațiile de curgere existente sunt înlocuite de configurații de curgere, global, mai simple.

Evoluția structurii dendritice este spre curgere mai ușoară, nu spre complexitate maximă, sau cea mai mare suprafață de contact cu cel mai puțin material. Plămânul, de exemplu, nu este ramificat în treceri pentru aer din ce în ce mai mici doar pentru a maximiza contactul suprafață-aer. Da, o suprafață de contact mare este necesară, deoarece opune o rezistență mai mică transferului de masă ( $O_2$  și  $CO_2$ ). În mod egal este necesară o rețea de distribuție cu rezistență minimă de la punct (gură) la volum (torace) și înapoi.



Slaburi pătrate răcite de canale de curgere arborescente distribuite. Încălzirea intensă este uniformă și perpendiculară pe figură.

Agentul de răcire intră prin centru și iese prin porturi situate pe frontieră. Arhitectura vasculară are abilitatea de a distribui punctele fierbinți mai uniform pe suprafața sau în volumul disponibil. De la stânga la dreapta, designurile dendritice au unu, două, sau trei nivele de împerechere.



Designul integrat al unui vehicul sau animal este un ansamblu de componente a căror „dimensiune caracteristică” este finită. Fiecare componentă introduce două pierderi în designul global. Suma celor două pierderi este minimă atunci când componentele au o anumită mărime optimă.

Legea constructală asigură o acoperire largă „designabilității” oriunde, de la inginerie la geofizică și biologie. Pentru a-i aprecia generalitatea, să ne imaginăm formarea unui bazin de drenare al unui râu. Legea constructală indică configurații cu rezistență globală la curgere, din ce în ce mai mică, în timp. Acest fapt este realizat prin echilibrarea tuturor rezistențelor interne la curgere, de la alunecarea de-a lungul pantelor colinelor, la curenții din canale.

Rezistențele care sunt depășite de curgeri reprezintă pierderi termodinamice, sau ireversibilități. Rezistențele nu pot fi eliminate.

Aria secțiunii transversale a unei conducte prin care curge un fluid, sau suprafața de transfer de căldură într-un schimbător de căldură trebuie să fie finită, nu infinită. Pierderile datorate rezistențelor pot fi reduse prin distribuirea rezistențelor în spațiul disponibil, astfel încât efectul lor global să fie minim. Acest proces de distribuire este fenomenul de emergență al configurației. În cazul bazinului râului, acest proces este realizat atunci când rezistența la alunecare la vale, pe panta colinei, este egală cu rezistența la curgere în lungul canalelor. Designul emergent este complet analog plămânului: în bazinul de râu, rolul alveolei (curgere prin difuzie) este jucat de pantele colinelor, iar rolul celor mai mici părăiașe este jucat de cele mai mici treceri pentru aer.

Cel mai prețios produs al acestui mod de gândire este configurația: bazinul râului, plămânul, arborele canalelor de răcire într-un package electronic, patternul traficului urban, și așa mai departe. Configurația este marea necunoscută în acest design. Legea constructală atrage atenția asupra ei și ghidează gândirea noastră în direcția descoperirii ei.

## REVOLUȚIA VASCULARIZĂRII

În evoluția bazinului de râu, configurația constructală este curgerea arborescentă, cu echilibre fine între rezistivitate mare (difuzie, alunecare) și rezistivitate mică (curgerea în canal). Curgerea arborescentă este designul constructal care asigură accesul eficient al curgerii între puncte, și suprafețe sau volume. Arborele are complexitate finită, adică un mod anume de alocare a canalelor de curgere și de distribuire neuniformă a lor pe suprafața sau în volumul disponibil. Această întregă arhitectură este deductibilă din principiul constructal.

Vascularizat este un atribut adecvat sistemelor de curgere complexe. Vascularizația este peste tot, în cele însuflețite, neînsuflețite, și ingeniate, de la mușchi și bazinul râului până la răcirea circuitelor electronice de mare densitate. Straturile curgerilor energetice, ca și straturile sociale și toate țesuturile biologice, sunt arhitecturi rezultate din design (adică, cu patern și finalitate). Surmontarea acestui nivel ridicat de performanță este un efort transdisciplinar: echilibrul dintre curgeri, teritorii și discipline aparent necorelate. Acest proces de echilibrare – distribuția optimă a imperfecțiunii – generează chiar designul procesului, centralei energetice, orașului, geografiei, și economiei.

Să ne gândim la curgerea care intră și iese dintr-un corp permeabil, precum fluidul de răcire care spală un

chip, sau ploaia care cade pe sol. Care este arhitectura care oferă cel mai ușor acces? Nu se poate „învăța de la natură” privind prin sol. Cel mult, natura poate arăta (de exemplu, într-o tăietură făcută cu o lopată) o distribuție aparent aleatorie de pori de multe dimensiuni, puțini dintre ei fiind atât de mari încât să poată fi numiți „conduce”.

De la schimbătoarele de căldură la microelectronică, perspectiva clasică asupra modului în care trebuie configurată curgerea plan-plan (sau linie-linie) este prin utilizarea celui mai simplu desen: un ansamblu, regulat, de canale paralele prin mediul poros, adică un mediu poros uniform. Cu legea constructală, studentul are libertatea să schimbe desenul, și primul pas în această direcție este să elimine „soluția de raft”.

Cu designul constructal studentul descoperă (cu creion și hârtie) că arhitecturi de curgere de la line la linie, mai bune, trebuie configurate ca arbori care alternează cu arbori răsturnați – o structură dublu dendritică. A fost demonstrat analitic faptul că aceste vascularizări sunt considerabil superioare canalelor paralele și structurilor poroase omogene. Această descoperire ține seama și de structura aparent multiscalată a solului și a altor medii poroase care apar în mod natural.

Viitorul aparține vascularizatului. Acest fapt este evident în cursa actuală pentru materiale inteligente cu noi funcționalități volumice (autoreparare, autorăcire), care necesită distribuția continuă, uniformă, și „la cerere”, a fluidelor prin volumul materialului.

Aceeași configurație vascularizată poate fi utilizată pentru răcirea învelișului unui vehicul supus unei încălziri intense. Fluidul de răcire spală învelișul ca o rețea de parcele cu curgeri arborescente punct-arie. Fiecare parcelă este răcită de un curent care intră prin centru și iese pe la periferie. Structurile dendritice sunt studiate intens în prezent, și cercetarea progresează spre construcția și testarea lor pentru aplicații aerospațiale.

Înțelegerea acestor designuri aruncă, de asemenea, lumină asupra originii apariției lor în designul animal, unde curenții de sânge sunt distribuiți spre țesuturile vascularizate și spre suprafețele pentru răcire, pentru a colecta și disipa căldura. Exemple de acest fel sunt circulația sângelui în creier, în urechea unui elefant, și evacuarea căldurii corporale în timpul alergării.

Natura ne impresionează cu multe designuri care sunt arborescente. Multe dintre arhitecturile de curgere prezise de legea constructală sunt arborescente. Cărțile de geometrie fractală prezintă desene arborescente printre multe alte desene „crețe” (frizzy). Imaginile arborescente unifică, dar și creează confuzie.

Arbore nu înseamnă teorie. Legea constructală reprezintă însă teorie, deoarece este o perspectivă mentală pură asupra modului în care fenomenele *trebuie* să fie în natură. Geometria fractală este, în cel mai bun caz, o metodă descriptivă a lucrurilor observate în natură, adică empirism. Nici una dintre configurațiile naturii nu este fractală.

Un design fractal este imaginabil prin alegerea unui algoritm ad-hoc și repetarea sa de infinite ori. Un astfel de desen nu poate fi făcut, arătat, sau văzut. Dacă configurațiile naturii ar fi cu adevărat fractale, atunci tot

ceea ce am vedea ar fi încheșări sau umbre de gri, adică nici un fel de pattern, și nimic de înțeles, memorat, și discutat.

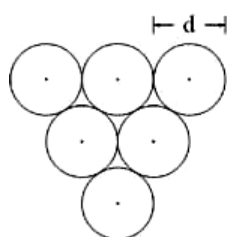
## DESIGN PENTRU COMPACTITATE

Designul unui întreg vehicul evoluează spre integrarea și distribuția funcționalităților fluidelor termice și rezistenței mecanice în structura vehiculului. Vedem acest lucru în orice tip de vehicul, în special dacă observăm ultimii o sută de ani de evoluție ai automobilelor, submarinelor, avioanelor.

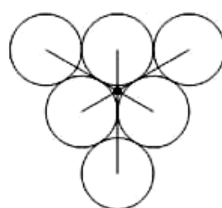
Cu teoria și designul constructal, conceptualizăm structura vehiculului ca pe un solid modelabil, cu spații de curgere ce trebuie alocate subvolumelor care necesită fluidele și fluxurile de căldură ce trebuie să curgă. Acest mod de gândire este referitor la cele două aspecte ale desenului:

- 1) proporțiile (factorii de formă, formele), și
- 2) dimensiunile propriu-zise ale designului (dimensiunile componentelor).

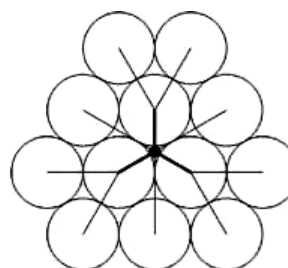
Să ne imaginăm dimensionarea unei componente de curgere ca o conductă, pompă, sau schimbător de căldură.



(a) Individual



(b) Radial



(c) Dendritic

Cum este produsă și distribuită apa caldă utilizatorilor răspândiți pe un teritoriu. Sistemele energetice distribuite se constituie ca un echilibru între pierderile centralizate (la noduri, surse) și pierderile distribuite, de-a lungul liniilor rețelilor de distribuție. Echilibrul relevă mărimea corespunzătoare a teritoriului alocat unei surse. Teritoriul propriu, alocat unei surse, crește pe măsură ce consumul individual de apă caldă crește. În timp, rețeaua se schimbă (pas cu pas) de la radial la dendritic, și continuă să își modifice morfologia spre arhitecturi arborescente de curgere din ce în ce mai mari și mai complexe.

Inginerii cunosc deja cea mai mare parte a acestor lucruri. A realiza mai mult cu mai puțin, a stăruii pentru eficiență și funcționalitate, sunt calități care definesc munca noastră. Acesta este încă un motiv de ce este important să știm cum să grăbim evoluția designului. Aceasta poate fi făcută ca știință, bazată pe principiul care guvernează procesul evoluționar, legea constructală.

Curgerea eforturilor merge „mânușă” cu curgerea fluidului sau căldurii. Această perspectivă integratoare este importantă deoarece membrele structurale mecanice sunt componente al curgerii sau eforturilor. Mărimile și formele lor corespunzătoare derivă din același principiu. Mai mare înseamnă mai bine dacă organul este proiectat independent (eforturile sunt mai mici, materialele mai ieftine, fabricația mai ușoară). Mai mic înseamnă mai bine dacă trebuie să fie portabil. Confruntarea dintre cele două tendințe determină greutatea și volumele juste.

Tendința curentă spre globalizare poate fi văzută, în parte, ca răspândirea societății noastre bazată pe

Componentele mai mari funcționează mai eficient deoarece curenții de fluid sau căldură întâlnesc constrângeri mai mici. Astfel, dacă componenta este concepută independent, atunci o mărime mai mare este mai bună.

Designul integrativ, cu toate acestea, este referitor la întregul animal, nu doar la un organ. Această perspectivă relevă curba ascendentă, care ține seama de faptul că o componentă mai mare produce o pierdere în raport cu combustibilul care este proporțional cu greutatea sa. Însumate, cele două pierderi relevă principiul care a generat „dimensiunile caracteristice” în orice corp care mișcă – animal sau vehicul. Organul cel mai adecvat are o anumită mărime optimă: organe mai mari pe vehicule mai mari.

Mărime optimă înseamnă greutate și compactitate optimă. Prin el însuși, organul de dimensiune optimă nu este atât de apropiat de ciclul Carnot ideal pe cât ar fi versiunea sa mai mare. Organul de dimensiune constructală produce cel mai bun întreg funcțional. Pe această cale, mintea baleiază vehiculul căutând echilibrul just între dimensiunile componentelor de curgere și performanța globală a vehiculului.

cunoaștere sub forma unor noi structuri de curgere pe suprafețe străbătute de structuri de curgere existente: vegetație, mișcarea animalelor, bazinele râurilor, etc. Structurile existente sunt afectate de presiunile de a construi infrastructuri de curgere pe tot globul, nu doar în lumea în curs de dezvoltare. Cu mult înainte, echilibrul structurilor de curgere naturale se realiza deoarece fiecare mișcare sau curent își găsea propria mărime pe suprafața care îi era disponibilă.

Această tendință constructală este și cheia dezvoltării sustenabile. Provocarea constă în alocarea curenților noștri pe suprafețe, astfel încât întreaga structură globală de curgere să curgă ușor (repede, cost scăzut, aproape de fiecare utilizator potențial). Structura vasculară globală emergentă este alcătuită din sisteme energetice distribuite: structuri de curgere alocate suprafețelor și conectate în moduri în care întregul beneficiază.

O exemplificare este producția și distribuția încălzirii pentru uzul uman. Să spunem că apa caldă este produsă

în instalații care servesc ca surse nodale într-o rețea care distribuie încălzirea utilizatorilor dintr-o zonă, ce poate fi un apartament într-o clădire, sau un campus universitar.

Această soluție este însoțită de două tipuri de pierderi de căldură: centrale, la nivelul instalației care produce apa caldă, și de distribuție, la nivelul conductelor izolate care distribuie apa caldă. Aceste pierderi sunt adverse, deoarece dacă suprafața (sau numărul utilizatorilor) crește, pierderea centrală per kilogram de apă caldă scade, în timp ce pierderile datorită distribuției cresc. Efectul lor cumulat este minim dacă centrala este alocată sau distribuită optim. Acest lucru se întâmplă atunci când nodul de generare și rețeaua de distribuție sunt alocate pe o suprafață care are mărimea corespunzătoare.

Foarte interesant este că „mărimea corespunzătoare” crește cu creșterea utilizării individuale a apei calde, adică cu standardul de viață, în timp. În consecință, designul vascular (arborescent) trebuie să se schimbe, pe măsură ce teritoriul, de dimensiune corespunzătoare, servit de un singur nod, crește. Se schimbă de la cate un nod pentru fiecare utilizator, la conducte radiale care conectează nodul la mai mulți utilizatori, și în final la designuri dendritice care devin mai mari și complexe pe măsură ce servesc un număr din ce în ce mai mare de utilizatori pe teritorii mai mari.

## DESIGNUL CA ȘTIINȚĂ

Ideea centrală este că designul (configurație, patern, ritm) poate fi dedus determinist, dintr-un principiu al

fizicii. Pe această cale, descoperim configurațiile mai bune, semnificația fizică a „mai bun”, și prezicem imaginile care sunt găsite (sau vor fi găsite) în natură. Direcția acestei rute este exact opusă mimetismului naturii (biomimetica), adică opusă copierii care nu este predictibilă.

Legea constructală dă studentului strategia pentru cum trebuie urmărit și descoperit designul – configurațiile sau patternurile – în spațiu și timp. Teoria constructală împinge gândirea designului mai aproape de știință și mai departe de artă. Înlătură pereții dintre inginerie și științele naturale.

Deoarece fenomenul generator de configurație al „designului” are principii științifice care devin cunoscute acum, este posibil să se afle unde sunt de așteptat oportunități de a descoperi configurații noi, mai eficiente. Cum să se urmărească aceste descoperiri cu mai puțin efort și timp (adică, cu strategie) este meritul principal al legii constructale și învățării generării designului ca subiect științific.

## PENTRU A AFLA MAI MULT

*Design with Constructal Theory* de Adrian Bejan de la Duke University și Sylvie Lorente de la University of Toulouse (John Wiley & Sons, 2008) oferă o abordare de tip curs a designului folosind legea constructală, principiul configurărilor în natură și inginerie.

Vedeți și portalul Web al teoriei constructale la [www.constructal.org](http://www.constructal.org).