INFLUENŢA TEHNOLOGIILOR DE FABRICAŢIE DIGITALĂ ASUPRA ARHITECTURII CONTEMPORANE

Daniela Anton

Editura Universitară „Ion Mincu”
Bucureşti, 2025

Volum publicat în cadrul proiectului:
„Dezvoltarea capacităţii instituționale a UAUIM pentru cercetare în arhitectură şi urbanism prin crearea unei culturi a diseminării rezultatelor”, Acronim CULTADISER

Proiect finanțat prin Consiliul Naţional pentru Finanţarea Învățământului Superior – FDI 2025
Domeniul Strategic de Finanţare D6 – „Dezvoltarea capacităţii instituționale pentru cercetare în universităţi”

DTP și copertă: Daniela Anton

Descrierea CIP a Bibliotecii Naţionale a României
Anton, Daniela
Influenţa tehnologiilor de fabricaţie digitală asupra arhitecturii contemporane / Daniela Anton. - Bucureşti : Editura Universitară "Ion Mincu", 2025

ISBN 978-606-638-418-6

72

Lucrarea de faţă reprezintă strict punctul de vedere al autorului. Responsabilitatea lucrării îi revine în întregime autorului, atât în ceea ce priveşte conţinutul, cât şi forma.

Toate drepturile rezervate. Nicio parte din această publicaţie nu poate fi reprodusă, stocată sau transmisă prin orice mijloace de natură electronică, mecanice, de copiere, înregistrare sau alte forme fără permisiunea scrisă a autorului şi a editurii.

© 2025 Autor
© 2025, Editura Universitară „Ion Mincu”, Strada Academiei, nr.18-20, sector 1, Bucureşti, cod 010014, https://editura.uauim.ro

Această lucrare are la bază teza de doctorat susținută la Universitatea de Arhitectură și Urbanism „Ion Mincu” Bucureşti, sub coordonarea domnului prof.dr.habil.arh. Dorin Ștefan, lucrare care a fost revizuită și completată pentru publicare.

CUPRINS

1. INTRODUCERE 7
2. DE LA MEȘTEȘUG LA PRODUCȚIA ÎN SERIE 11
2.1. Copia în producția manuală 11
2.1.1. Meșteșugul între unic și copie 11
2.1.2. Nevoia de copie în arhitectură 14
2.2. Copia în serie și eficientizarea prin mecanizare 18
2.2.1. Mașini pentru înlăturarea erorii umane 19
2.2.2. Automatizarea ca model organicist 23
2.2.3. Superspecializarea și pierderea calificării 26
2.2.4. Arhitectura și copia în serie 30
2.3. Legătura dintre control și dezvoltarea tehnologică 32
2.3.1. Schimbarea de scară 32
2.3.2. Controlul mașinilor 36
2.3.3. Mașinile de control 38
2.3.4. Controlul numeric și computația 42
3. VIRTUAL ȘI MATERIAL 49
3.1. Abstractizare prin digital 49
3.1.1. Tehnologie. Matematică. Cod 49
3.1.2. Variabilitate și diferențiere în serie 53
3.1.3. Urmele uneltelor virtuale 60
3.2. Evoluția sistemelor CAD 64
3.2.1. Building Information Modeling (BIM) 65
3.2.2. Proiectare computațională 72
3.2.3. Criterii de performanță 77
3.2.4. Simulare, analiză și sinteză 80
3.3. Meșteșugul digital 84
3.3.1. Continuum digital 86
3.3.2. Arhitectul, maestrul de construcție digital 90
3.3.3. Model și articulare. 95
4. UNELTE DE FABRICAȚIE DIGITALĂ 113
4.1. Fabricația digitală 113
4.2. Fabricație aditivă - printarea 3D. 118
4.2.1. Printarea 3D ca înlocuitor al metodelor de producție. 118
4.2.2. Materiale pentru 3D print 121
4.3. Fabricație digitală la scară arhitecturală. Studii de caz. 128
4.4. Fabricația robotică 142

4.4.1. Fabricația robotică în arhitectură 145
4.4.2. Roboții industriali..... 146
4.4.3. Potențialul roboților industriali 149
4.5. Aplicații viitoare ale uneltelor de fabricație..... 165
5. EXPLORĂRI PROPRII ÎN DOMENIUL FABRICAȚIEI DIGITALE 169
5.1. Workshop-uri 169
5.1.1. COMPONENT_BUILD..... 170
5.1.2. INformed geometries..... 177
5.2. Design de obiect..... 182
5.2.1. QUAD_LIGHT 183
5.2.2. SOFT_GEOMETRY..... 187
5.2.3. DIGITAL_SILVER 190
5.2.4. CELL_AGGREGATION..... 194
5.3. Fabricație robotică 198
5.3.1. ROBOTS IN ARCHITECTURE 2013 198
5.3.2. ROBO_CRAFT WALL 202
5.3.3. ROBO_CRAFT LIGHT..... 207
5.3.4. ROBO_CRAFT PAINT..... 210
6. CONCLUZII..... 215
6.1. De la meșteșug la fabricația digitală 215
6.2. Explorări în domeniul fabricației digitale..... 218
6.3. Direcții viitoare de cercetare 222
TABEL DE FIGURI..... 224
BIBLIOGRAFIE ȘI WEBOGRAFIE 233
BIBLIOGRAFIE..... 233
WEBOGRAFIE 245

Capitol 1.

INTRODUCERE

1. INTRODUCERE

Definirea domeniului de cercetare

Lucrarea investighează modul în care tehnologiile digitale de fabricație influențează arhitectura contemporană, de la concept până la materializarea obiectului proiectat. Studiul pornește de la premisa că mediul digital a început să transforme profund practica de arhitectură, prin implicarea sa în procesul care stă la baza actului de proiectare. În acest context, cercetarea își propune să evalueze impactul uneltelor digitale asupra practicii arhitecturale, să investigheze evoluția relației dintre proiectare și materializare, precum și să contribuie la redefinirea rolului arhitectului în noul cadru orientat către acest meșteșug digital.

Analiza începe prin identificarea factorilor care au dus la dezvoltarea mediului digital, urmărind relația dintre societate, context istoric, nevoi și evoluția tehnologică. Astfel se va urmări transformarea proceselor de producție pornind de la meșteșugul tradițional, producția mecanizată din revoluția industrială, ajungând la contextul actual marcat de explorările în domeniul fabricației digitale. Cercetarea urmărește modul în care s-a transformat procesul de proiectare și materializare de-a lungul timpului, analizând relația dintre creator, artefact și unelte.

Motivația alegerii subiectului în contextul actual

Abordarea domeniului fabricației digitale din punctul de vedere al implicațiilor asupra transformării practicii de proiectare este încă la început. Aceste metode digitale de concepție și fabricație au migrat dincolo de domeniile tehnice inginerești și au început să se insinueze în practica de arhitectură. Tehnologiile emergente sunt tot mai mult explorate în cadrul academic, în proiecte de cercetare sau workshop-uri, dar și în practica contemporană de arhitectură.

Informații despre fabricația digitală în domeniile creative sunt din ce în ce mai numeroase, iar cercetători, designeri și arhitecți își prezintă explorările în acest domeniu, documentându-și procesul. Pe măsură ce interesul pentru aceste tehnologii crește, se conturează o dualitate în modul în care

uneltele digitale sunt percepute: pe de o parte, ele sunt apreciate pentru capacitatea de a genera forme complexe; pe de altă parte, sunt adesea criticate pentru lipsa unui fundament conceptual solid. De multe ori utilizarea tehnologiilor digitale a fost interpretată ca un pretext pentru obținerea unor forme spectaculoase, dar lipsite de conținut. Aceste abordări au fost criticate ca fiind superficiale, prin accentuarea aspectului legat de valoarea tehnologiei în sine în detrimentul unei reflecții critice.

O altă abordare a fost cea în care fabricația și proiectarea digitală erau văzute ca o parte integrată în tema sustenabilității. Discursul referitor la fabricarea digitală s-a concentrat preponderent pe aspectele tehnice și economice, în timp ce implicațiile acesteia depășesc domeniul ingineriei și industriei. Astfel au fost interpretate ca metode de obținere a eficienței, ca un mijloc de a controla utilizarea de materie primă energie. În acest context tehnologiilor digitale li s-a limitat domeniul de influență asupra conceptului.

Cu toate acestea, o discuție mai consistentă în domeniul proiectării de arhitectură, care se extinde dincolo de aspectele legate de formă sau eficiență, care are un conținut bogat, a început doar recent să apară. Interesul actual se concentrează pe modul în care mediul digital transformă modul în care gândim arhitectura.

Lucrarea se concentrează pe tendința tot mai clară de reorientare a proiectării arhitecturale către materializare, în care fabricația digitală este văzută ca parte integrantă a conceptului, nu doar ca o necesitate de eficientizare a producției implicată la finalul procesului. Această abordare pare să deschidă noi direcții de cercetare asupra modului în care uneltele digitale, atât de proiectare cât și de fabricație, pot influența gândirea

Structura lucrării

Lucrarea este structurată în șase capitole, grupate în patru secțiuni principale, precedate de o introducere și încheiate cu concluzii.

În cel de-al doilea capitol se realizează un studiu ce urmărește relația dintre evoluția uneltelor, transformarea statutul celui care face și criteriul eficienței, în meșteșugul tradițional și perioada industrială. Se urmărește identificarea aspectelor care au determinat apariția mediului digital actual. Cercetarea pornește căutând factorii care au dus la dezvoltarea mediului digital, urmărind relația dintre societate, context istoric, nevoi și evoluția tehnologică. Astfel se va analiza transformarea proceselor de producție

pornind de la meșteșugul tradițional, producția mecanizată din revoluția industrială, ajungând la contextul actual marcat de explorările în domeniul fabricației digitale. Se va urmări modul în care s-a transformat procesul de proiectare și materializare de-a lungul timpului, analizând relația dintre creator, artefact și unelte.

Cel de-al treilea capitol cuprinde o descriere a caracteristicilor arhitecturii contemporane, influențate de tehnologiile digitale de proiectare și fabricație. Se urmărește, de această dată în contextul mediului digital, influența uneltelor de fabricație, statutul arhitectului și criteriile de performanță. Tot aici autorul propune modelul, ca element ce caracterizează practica de arhitectură marcată de digital. Se cercetează în ce măsură caracteristicile definitorii ale uneltelor digitale se transmit obiectelor materializate. Prin studii de caz, se urmărește identificarea modului în care uneltele de fabricație digitală își lasă amprenta asupra artefactelor arhitecturale.

În cel de-al patrulea capitol se realizează o clasificare a uneltelor de fabricație aplicate în arhitectură, susținută prin studii de caz. De asemenea se analizează relevanța adoptării tehnologiilor de proiectare și fabricație digitală din alte industrii, în domeniul construcțiilor și practicii de arhitectură. Se pune accentul pe modul în care implicarea acestor noi unelte transformă practica de arhitectură, la nivel creativ, dar și pe cercetarea noilor metode de materializare a artefactelor arhitecturale. Se discută modul în care uneltele intervin în practica de arhitectură, cum influențează proiectarea și construcția de artefacte arhitecturale. Se urmărește evaluarea potențialului uneltelor de fabricație în arhitectură, mergând mai adânc de posibilitățile nelimitate datorate tehnologiei, de creșterea eficienței sau de elaborare a formelor complexe.

Cel de-al cincilea capitol al cercetării este unul de natură practică și prezintă explorările personale ale autorului în domeniul fabricației digitale. În acest capitol sunt prezentate rezultatele unor workshop-uri, proiecte de design de obiect, instalații interactive și explorări în domeniul fabricației robotice care studiază modul în care uneltele digitale influențează procesul creativ.

Capitol 2.

DE LA MEȘTEȘUG LA PRODUCȚIA ÎN SERIE

2. DE LA MEȘTEȘUG LA PRODUCȚIA ÎN SERIE

Până recent promotorii revoluției digitale anunțau transformări radicale în mediul practicii și construcției de arhitectură (Leach 2004, 75). Se punea accentul pe capacitatea computației de integrare a informației, pe controlul și automatizarea proceselor, atât de proiectare, cât și de fabricație, și pe criteriul de eficiență (Kolarevic 2005b, 24). Pe măsură ce obiectele proiectate digital au început să fie materializate, interesul s-a extins și la uneltele digitale de fabricație, iar discursul despre mediul digital a început să-și caute referințe în trecut. Procesele digitale în practica de arhitectură încep să fie percepute ca o evoluție tehnologică, dar în directă legătură cu contextul social și profesional.

Odată cu proliferarea uneltelor digitale, practica de arhitectură se reorientează și către procesul de materializare, de care, în timp, arhitectul s-a îndepărtat. Tehnologiile digitale tind să readucă în practica de proiectare conceptul de meșteșug, ca moment în care proiectarea era într-o relație mai strânsă cu materializarea. Astfel, este nevoie să observăm cum s-a modificat procesul de materializare de-a lungul timpului, urmărind evoluția rolului celui care îl creează, transformarea uneltelor și conturarea caracterului obiectului, în relație cu dezvoltarea tehnologică și contextul social.

2.1. Copia în producția manuală

2.1.1. Meșteșugul între unic și copie

Meșteșugul a devenit o referință recurentă în discursul contemporan, pentru că se situează într-o zonă încărcată de semnificații, unde se suprapun conceptele opuse de artă-știință, creativitate-tehnologie, unic-copie.

Meșteșugul se află la granița dintre artă, bazată pe creativitate, și știință, fundamentată pe cunoaștere, și, astfel, aduce împreună aspectul creativ și tehnologia procesului de producție. Creația artistică se manifestă prin inventivitate, generând ceea ce nu a existat anterior, în timp ce știința urmează reguli clare, dar se bazează pe descoperire, punând în evidență

ceva care exista, oricum. Prin urmare, meșteșugul presupune o relație strânsă între tehnologie și creativitate, unde creativitatea extinde permanent limitele științei și stimulează dezvoltarea tehnologică, încercând să ajungă dincolo de cunoscut.

Artefactele, ca rezultat al unui proces de creație, au fost întotdeauna influențate de uneltele și tehnologiile disponibile la un moment dat în istorie. Astfel, creația artistică rămâne puternic conectată la descoperirile din sfera științei și la inovațiile tehnice. Pe măsură ce tehnologia evoluează, se schimbă și modul în care un artizan utilizează uneltele pe care le are la dispoziție; de aceea, se schimbă și meșteșugul în sine.

De asemenea, meșteșugul descrie un proces care îl are în centrul său pe meșter, care creează cunoscând posibilitățile de materializare și care se folosește creativ de uneltele sale pentru a realiza proiectul. Astfel, meșteșugul poate fi definit și ca fiind relația dintre capabilitățile materialelor, mijloacele de producție și creativitatea meșterului.

Atunci când singura metodă de producție era cea manuală, toate obiectele erau realizate astfel, fie că serveau scopului utilității și aveau un rol strict funcțional, fie că erau obiecte de artă sau decorative. Ceea ce le diferenția pe cele din urmă era iscusința și creativitatea meșterului, unicitatea, raritatea și timpul investit în realizarea lor. Datorită acestor caracteristici, obiectele artizanale au fost considerate prețioase, asociate adesea cu un design de nivel înalt și cu luxul. Astfel, în mod tradițional, valoarea pe care o câștigau aceste obiecte nu era datorată doar procedeului de producție. Metoda manuală de producție era doar o caracteristică a perioadei istorice respective.

Personalizarea era o caracteristică importantă a artefactelor realizate de meșteșugarii care se bucurau de aprecierea elitei. De multe ori, erau realizate în urma cererii unui beneficiar care urmărea în mod explicit ca obiectul să fie realizat special pentru el și să fie unic. În trecut, personalizarea era o dovadă a statutului celui care comanda realizarea obiectului. În percepția estetică meșteșugărească, erau apreciate obiectele cu detalii foarte migăloase, care necesită supraveghere permanentă și reajustarea continuă a obiectului pe parcursul producției.

Cu cât erau obiectele mai elaborate, deveneau mai prețioase; astfel se evidenția timpul investit și cu atât, erau mai apreciate și mai dorite de cei care dispuneau de mijloacele de a le procura. De asemenea, un aspect care contribuia la valoarea lor era cel legat de accesul limitat la acestea. Cu cât

erau mai greu de obținut, fie pentru că erau rare, fie din motive legate de cost, cu atât erau mai apreciate. Pe de altă parte, pentru a avea succes, autorul era interesat ca obiectele realizate de el să ajungă la cât mai mulți privitori; de aceea încerca să fie cât mai prolific.

Pentru a deprinde meșteșugul, meșterul medieval își câștiga competențele printr-un proces de ucenicie. Numai după ce învăța cum să folosească uneltele - care erau caracteristicile tehnice ale procesului de producție, dar și cele artistice - era recunoscut de societate. În prima etapă, ucenicul se străduia să facă parte din breaslă, să devină la rândul său meșteșugar. Astfel, meșteșugul începe prin imitație, legitimând copia ca primă etapă a procesului de înfăptuire. În această etapă învăța meseria copiindu-și maestrul. Mai apoi, notorietatea și-o câștiga prin dezvoltarea unui stil personal. Încercând să se detașeze de ceilalți meșteșugari prin trăsăturile specifice, unicitatea era o calitate care atrăgea, dar care, în același timp, atribuia și o trăsătură comună obiectelor realizate de el, conturându-i stilul personal.



(a) (b)

Figura 1. (a) Unelte de tâmplărie, (Joseph Moxon 1703), (b) Maestru aurar la atelier împreună cu ucenicii săi (*Saint Eligius in his workshop* 1440). Imagini libere de drepturi.

Un exemplu îl reprezintă școlile de pictură renascentiste, unde tinerii artiști aspiranți primeau o educație bazată pe stilul personal al unor pictori consacrați. Astfel, procesul de creație era descris de maeștri prin reguli foarte stricte, mai ales când era vorba de picturi cu temă religioasă, aceste școli bazându-se pe fonduri de la Biserica Catolică.

Chiar dacă în prezent recunoaștem ca principală caracteristică a meșteșugului unicitatea, observăm că atât copia, cât și similaritatea sunt definitorii pentru acesta. Astfel, meșteșugul descrie un proces ciclic care începe prin imitare și deprinderea abilităților tehnice, apoi se detașează, folosindu-se de creativitate, pentru ca odată atinsă maturitatea, să revină la copie, realizând artefacte similare care să poarte atributele stilului său și să îi asigure fidelitatea admiratorilor.

În principiu, artefactele au fost reproductibile dintotdeauna. Ucenicii realizau replici pentru practică, maeștrii se auto-copiau pentru a-și răspândi opera (Benjamin 1936, 2). De asemenea, se făceau copii cu intenția de a obține câștig financiar, ceea ce a generat necesitatea clarificării relației dintre original și copie. În ceea ce privește reproducerea manuală, copia realizată astfel este de obicei catalogată ca fals, originalul păstrându-și autoritatea.

Totuși, copiile realizate manual nu erau identice, pentru că mâna umană nu este capabilă să realizeze operații repetate precise. Prin conștientizarea neputinței de a realiza copii identice, similaritatea devine o caracteristică esențială a artefactelor meșteșugarilor. Astfel, similaritatea fie era doar un eșec rezultat din intenția de a replica, fie devenea marcă a stilului personal al artistului, ilustrând într-o anumită măsură și procesul de realizare.

Nevoia de copie identică a fost satisfăcută pentru prima oară prin apariția tiparului, în secolul al XV-lea. Totuși, realizarea de copii în serie a fost atinsă prin mecanizarea procesului de producție, abia în secolul al XVIII-lea, odată cu revoluția industrială. Acest deziderat a fost împlinit prin separarea procesului de creație de cel de execuție.

2.1.2. Nevoia de copie în arhitectură

Pentru a contura relația dintre arhitect și materializarea construcției ne folosim de conceptele de autografic[1] și olografic[2] definite de Nelson Goodman. În domeniul artei, acesta face diferența dintre autografic, ca fiind gândit și realizat de aceeași persoană, și olografic, fiind gândit de cineva și realizat de altcineva (Goodman 1976, 218-21).

[1] t.n. engleză: autographic

[2] t.n engleză: *olographic*

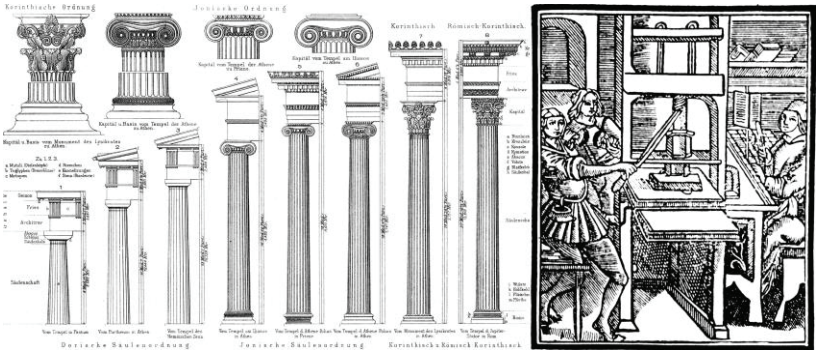
Artizanii tradiționali medievali erau, în același timp, cei care proiectau și maeștri ai procesului de producție. Astfel, meșteșugul reprezintă rezultatul fuziunii dintre procesul de proiectare și cel de materializare. În practica de arhitectură, cel care integra proiectarea și construirea era maestrul constructor. El coordona echipe recunoscute de meșteșugari, bazându-se pe abilitățile lor și asigurând îndeplinirea sarcinilor. În acest proces de coordonare, partea de creație era inclusă implicit. Totuși, chiar dacă maestrului constructor i se datora mare parte din concepție și din gestionarea construcției, statutul său era unul anonim.

În acest context, proiectarea în sine avea un rol secundar, accentul fiind pus pe administrarea și realizarea efectivă a construcției, iar expertiza se fundamenta pe experiența practică. Brunelleschi este cel care deplasează interesul către proiectare, dar nu ca proces separat de construcție, ci prin integrarea acesteia în procesul constructiv. Implicându-se în fiecare detaliu al edificiului, el a urmărit depășirea condiției anonime și consolidarea statutului arhitectului ca autor. Intenția sa a fost aceea de a-și lua toate măsurile pentru a se asigura că este recunoscut ca autorul clădirii. Brunelleschi era cel care gândea fiecare aspect și cel care se implica în realizarea lui, fiind responsabil de întregul proces creativ și controlând materializarea clădirii. Urmărind ca fiecare detaliu să fie realizat conform instrucțiunilor sale, printr-un control riguros, a diminuat autoritatea meșterilor, care până atunci beneficiau, datorită recunoașterii statutului lor în societatea italiană, de o oarecare libertate creativă. De asemenea, le-a negat meritul ca artiști, prin excluderea lor din procesul creativ, atribuindu-le un statut anonim, și chiar a preferat să colaboreze cu meșteri fără experiență, care să execute întocmai instrucțiunile sale. Pentru a se asigura că șantierul va fi dependent de el, nu se folosea de desene sau machete care să ilustreze proiectul în ansamblu. El oferea informațiile gradual și controlat, deoarece considera metodele de reprezentare un dezavantaj pentru definirea statutului său de creator, întrucât prin intermediul acestora s-ar fi permis construirea în absența sa (Carpo 2011, 72-75).

Procesul prin care arhitectura trece de la statutul său autografic, ca meșteșug, la cel abstract, ologrаfic, de proiectare, începe în Renaștere, odată cu definirea rolului arhitectului și a practicii de arhitectură de către Alberti, în tratatul *De Re Aedificatoria* (Carpo 2011, 16). Statutul arhitectului este definit strict ca proiectant, distinct de figura maestrului constructor. Arhitecții încetează să mai fie cei care construiesc și devin

producători de proiecte; astfel, arhitectul se îndepărtează de construcția în sine și de procesul de materializare. Prin definirea acestui rol, arhitectul dobândește calitatea de autor intelectual al clădirii pe care o proiectează, depășind condiția de anonimat.

Pentru a atinge această detașare, era nevoie de reglementarea modului de elaborare a proiectelor, de stabilirea unui anumit cod de prezentare a informațiilor conținute în proiect, astfel încât acestea să poată fi înțelese și de constructor, în absența arhitectului. Pentru a putea fi construit, un proiect trebuia să fie exprimat cât mai explicit, iar dimensiunile componentelor arhitecturale să poată fi măsurate și realizate. Astfel, proiecțiile ortogonale, planurile și elevațiile, care permit ilustrarea la scară a elementelor clădirilor, devin, începând cu Renașterea, metoda prin care arhitectul își externalizează intenția, stabilind o distanță între concepție și execuție.



(a) (b)

Figura 2. (a) Reprezentări ale ordinelor clasice (Meyer 1898). (b) Tiparul Gutenberg (Rolt-Wheeler 1920, 213). Imagini libere de drepturi.

Toate aceste noi reguli influențează modul în care arhitecții vor gândi obiectul arhitectural, astfel încât să poată fi exprimat conform noilor standarde grafice. Dacă proiectul de arhitectură trebuia exprimat prin proiecții care să dea informații de construcție la adevărată mărime, înseamnă că ceea ce nu se putea exprima grafic nu se proiecta, deci nici nu se construia (Carpo 2011, 34).

Alberti considera arhitectul ca autor al clădirii, prin faptul că el este autorul proiectului, doar cu condiția ca obiectul construit să fie identic cu cel

proiectat. Acum apare, și în domeniul arhitecturii, nevoia de copie identică, clădirea fiind, în viziunea lui Alberti, o replică a proiectului. Acest sistem de reprezentare, care se dorea un limbaj comun între arhitecți și constructori, constituie metoda prin care arhitectul se asigură că obiectul construit va fi materializarea identică a proiectului. Țelul era obținerea, de către arhitect, a unui control asupra autorității proiectului, fără să facă parte din construcția propriu-zisă. Practic, sistemul de reprezentare devine modul în care se reglementează și standardizează procesele de proiectare și construcție pentru a atinge idealul lui Alberti: clădire ca o copie a proiectului. Deși scopul declarat era definirea profesiei de arhitect, în realitate se remarcă dorința de control asupra întregului proces, prin ordonarea și eficientizarea acestuia.

Faptul că acest deziderat pentru copie identică în teoriile lui Alberti se întâmplă în paralel cu apariția tiparului nu este întâmplător. Astfel, se poate ilustra relația dintre apariția noilor astfel de unelte și declanșarea nevoii de dezvoltare și adaptare a acestei descoperiri tehnologice și în alte domenii. Apariția unei unelte, a tiparului, care făcea posibilă realizarea de copii identice în domeniul reprezentării, a adus în domeniul arhitecturii și construcției conștientizarea acestei posibilități.

Pe lângă aportul conceptual, tiparul a avut un impact mai puțin subtil asupra practicii de arhitectură. Pentru ca arhitectului să i se recunoască noul statutul promovat de Alberti, era nevoie de răspândirea și popularizarea noilor concepte descrise de acesta. Apariția tiparului a reprezentat unul din aspectele care a schimbat radical practica de arhitectură, datorită faptului că informația arhitecturală putea fi transmisă și devenea accesibilă. Astfel, tratatul *De Re Aedificatoria* devine prima carte de arhitectură tipărită în anul 1485, către sfârșitul vieții lui Alberti, urmată de prima tipărire, în anul 1486, a tratatului ”De Architectura” de *Vitruviu*, editat de către Fra Giovanni Sulpitius (Center for Palladian Studies 2009).

Apariția tiparului, datorită puterii sale de răspândire a conceptelor, a încurajat nevoia de identic în arhitectură. Până la apariția tiparului, arhitectura se baza pe descrieri verbale, nu pe cele vizuale, prin imagini, pentru că orice copie făcută de mână nu era de încredere, datorită inconsecvenței mâinii umane. Ceea ce contribuia și la implicarea directă a proiectantului în construire. Până atunci, principiile de proiectare, venite de la Vitruviu, se bazau pe proporții, nu pe dimensiuni exacte, tocmai pentru că nu puteau fi reproduse identic. Datorită imprimării, informațiile

tehnice puteau fi înregistrate și transmise în format vizual. Cel mai recunoscut efect al apariției tiparului, în arhitectură, îl reprezintă popularizarea ordinelor clasice, care au devenit primul stil internațional din istorie. Acestea au revenit în perioada Renașterii ca o recunoaștere a valorii trecutului, a ordinii compoziției geometrice. Punând accent pe regulile de compunere ale ordinelor clasice, tiparul a fost de mare ajutor în popularizarea acestor principii grafice de compunere geometrică, devenind reguli general valabile. Utilizarea ordinelor în practica de arhitectură a reprezentat o metodă de ordonare a procesului de creație. La nivelul construcției, aplicarea principiilor generale ale ordinelor clasice a dus la standardizarea gestului meșteșugarului, pentru a realiza obiecte care *să arate* identic, conform cu noile reguli generale și așteptări ale vremii (Carpo 2011, 14-15).

2.2. Copia în serie și eficientizarea prin mecanizare

Perioada istorică între inventarea tiparului și începutul revoluției industriale este marcată de progrese semnificative în domeniul științei. Beneficiind de avantajele oferite de tipar, informația se răspândea ușor, astfel că se contura un mediu efervescent, prielnic inovațiilor. Revoluția industrială, începută în Marea Britanie în a doua jumătate a secolului al XVIII-lea,a transformat radical societatea, prin punerea în prim plan a dezvoltării tehnologice și a eficienței.

Marea Britanie a beneficiat de câteva aspecte care au conturat contextul favorabil al revoluției industriale, atât din punctul de vedere al resurselor materiale, cât și al mediului social. Agricultura a cunoscut o dezvoltare importantă, susținută de acordarea drepturilor depline asupra terenurilor și de desființarea proprietăților comune. Prin responsabilizarea proprietarilor, recoltele au crescut, uneltele cu care se lucra au devenit mai eficiente, astfel că terenurile se lucrau cu mai puțin efort și cu mai puțini oameni. Cei care nu au beneficiat de împroprietăriri și nu au mai găsit locuri de muncă au fost nevoiți să se reprofileze, generând astfel apariția afacerilor familiale, sau să migreze către orașe în căutarea unui loc de muncă. Perioada de pace și stabilitate a încurajat comerțul și dezvoltarea unui spirit antreprenorial, iar primele fabrici au apărut ca extensii ale micilor afaceri familiale bazate pe producția manuală. Un alt factor esențial a fost reprezentat de resursele obținute din multiplele colonii ale Marii Britanii, care au susținut expansiunea economică și industrială.

Un alt eveniment important, ce a pregătit terenul pentru revoluția industrială, a fost Actul de brevetare din 1623, care a încurajat într-o anumită măsură, inovarea, prin acordarea de credit inventatorilor. Astfel, s-a instituit un cadru legal care garanta inventatorilor dreptul de a beneficia de rezultatele propriilor descoperiri, fără riscul de a fi imitați sau exploatați abuziv. În aceeași perioadă, legislația britanică trecea prin transformări menite să susțină emergența spiritului antreprenorial.

Continuarea revoluției științifice, începută în Renaștere, și dezvoltarea unei comunități de oameni de știință, care studiau cu precădere matematica, fizica, biologia și chimia, a contribuit la dezvoltarea tehnologică. Rigoarea specifică acestor discipline exacte a impus un nou model de gândire, trezind nevoia de a ordona o societate care, până nu demult, se baza pe ritual și incertitudine, într-un mediu controlat, echilibrat și predictibil.

În acest context, ordinea socială s-a reconfigurat în jurul unor criterii pragmatice, în care dimensiunea economică începea să cântărească mai mult decât tradiția. Revoluția industrială a accelerat ascensiunea unei clase de mijloc, formată din industriași și oameni de afaceri, care s-a impus deasupra nobilimii prin forța capitalului acumulat.

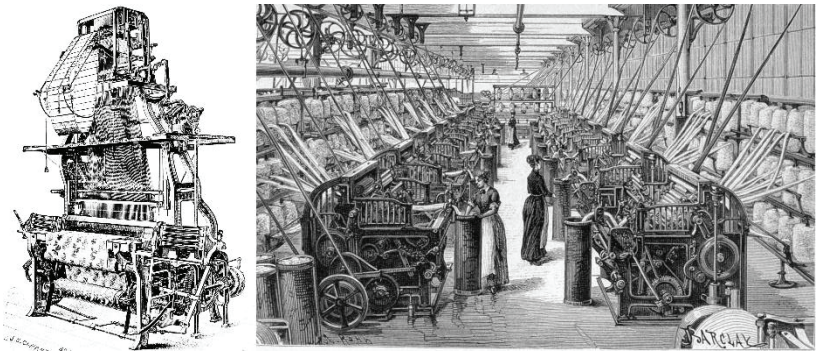
De la jumătatea secolului al XVIII-lea, populația Marii Britaniei a înregistrat o creștere constantă, dublând-se la fiecare 50 de ani până la începutul secolului al XX-lea. Totuși, nivelul de trai a rămas scăzut, iar transformările sociale generate de expansiunea rapidă de scară au fost dificil de asimilat. Atunci când se cerea gestionarea la o scară foarte mare, în condițiile în care nu existau mijloace care să suporte o varietate mare de situații, intervenea prioritizarea și simplificarea. Accentul nu se mai punea pe individ și pe particularitățile sale specifice, ci pe cantitate, medie și mase.

2.2.1. Mașini pentru înlăturarea erorii umane

După invenția tiparului din secolul al XV-lea, nevoia de utilizare a mașinilor pentru a ajuta procesele manuale s-a extins în domeniile de producție. Evoluția tehnologică a transformat treptat uneltele meșteșugarilor, pornind de la aspirația de a obține ceea ce mâna umană nu era capabilă să realizeze și orientându-se progresiv către criteriul eficienței.

În prima fază a revoluției industriale, industria textilă a reprezentat domeniul care a dominat prin extindere și dezvoltare, datorită raportului favorabil dintre valoarea producției și capitalul investit. Ea a fost prima care a adoptat mijloacele mecanizate de producție și a absorbit cea mai

mare parte a forței de muncă disponibile (Landes 1972, 40). Datorită importanței pe care o avea în societate, a constituit și domeniul în care s-au concentrat cele mai semnificative inovații tehnologice.



(a) (b)

Figura 3. Războiul de țesut Jacquard, care a fost adaptat la producția în masă, prin acționarea cu motor cu abur. (a) (*Popular Science Monthly Volume 39* 1891), (b) (Kohl 1889). Imagini libere de drepturi.

Războiul de țesut Jacquard, expus în 1801 la expoziția industrială de la Paris, mecaniza procesul de producție al țesăturilor cu modele complexe, prin introducerea cartelelor perforate (Hobsbawm 1996, 45). Sistemul Jacquard introducea pentru prima dată în producție un sistem de abstractizare, folosindu-se de codul binar pentru reprezentarea unui model grafic (Dutta 2007, 192). Astfel, el se baza pe un sistem informațional, care introducea variație într-un proces prin utilizarea unor cartele perforate diferite, ce schimbau modelul țesut. Dincolo de rolul său în modernizarea războiului de țesut mecanizat, sistemul Jacquard a marcat un moment de cotitură, aducând în producție un nou mod de stocare și codificare a informației.

Astfel, mecanismul a încapsulat o serie de funcții care, mai înainte, necesitau o combinație între facultățile manuale și cele mentale, competențe ce defineau calificarea meșteșugarului. Odată cu apariția mașinilor și utilizarea lor preponderentă în producție, s-a ajuns la pierderea acestor capacități din rândul meșteșugarilor. Transformarea procesului de producție a generat, în același timp, un nou rol economic: cel al designerului (Dutta 2007, 204), responsabil de conceperea modelelor

pentru războiul de țesut. Astfel, a fost consacrat statutul abstract al celui care proiectează, lăsând producția pe seama mașinilor. În secolul al XIX-lea, rolul designerului în producție era acela de a adapta și traduce motivele în formatul cerut de tehnologie.

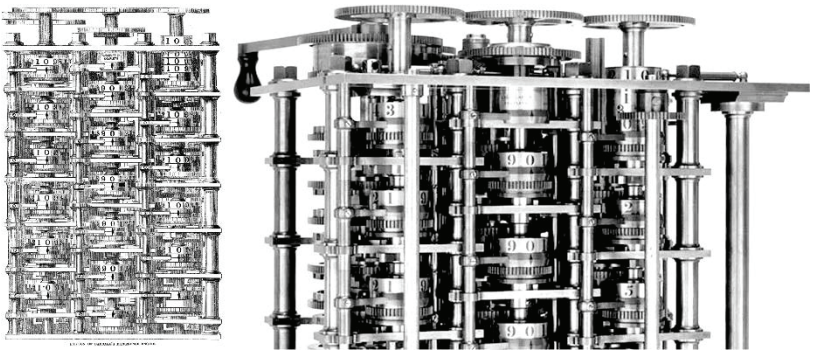
La începutul secolului al XIX-lea, Charles Babbage, filozof și om de știință, a obținut sprijin financiar din partea guvernului britanic pentru a dezvolta o mașină de calcul care se folosea de cartele perforate după modelul războiului de țesut Jacquard. Babbage a împărțit activitățile ce țin de diferitele ramuri ale științelor matematice în două secțiuni: una care ține de mecanică, pentru că este supusă unei legi precise și invariabile, iar cealaltă, care are nevoie de intervenții raționale, legate de înțelegere. Pornind de la această distincție, a concluzionat că partea mecanică putea fi transferată mașinilor (Dutta 2007, 195).

Mașina Diferențială a început să fie dezvoltată în 1822 de către Babbage, ca un dispozitiv autonom de calcul, destinat corectării erorilor identificate în tabelele matematice utilizate la acea vreme. Aceste erori erau atribuite limitărilor gândirii umane. Din perspectiva lui Babbage, matematica reprezenta o teorie economică a numerelor, cu potențial de a spori eficiența prin reducerea incertitudinii. Intenția era de a determina reguli de calcul aplicabile unor probleme specifice și de a le materializa prin intermediul principiilor mecanice. Astfel, Mașina Diferențială a fost concepută cu ambiția de a înlocui anumite proceduri mentale, care, executate de oameni, erau susceptibile de eroare, incomparabile cu ceea ce el considera infailibilitatea mecanizării (Dutta 2007, 195-96). În acest sens, dispozitivul și-a propus să automatizeze un proces ierarhic de operații succesive, guvernate de reguli clare, reducând vulnerabilitatea la erori umane și introducând o nouă paradigmă de eficiență în calcul.

Obiectivul lui Babbage a fost acela de a exclude neterminatul din operațiile matematice, atribuit inconsecvenței umane. Astfel, se conturează o trecere subtilă de la eroarea umană la omul perceput ca eroare, iar controlul erorii este adus în discuție ca fiind un criteriu de eficiență (Dutta 2007, 206). Se observă, astfel, o trecere de la manual la mecanic și de la conceptual la calcul. Accentul pus pe eficiență nu conduce la eliminarea omului din procesul de producție, ci la redefinirea rolului său: acela de a controla, evalua și gestiona continuu granița dintre aspectele cantitative și calitative.

Mașina de calcul diferențial nu a fost finalizată de Babbage, deoarece cercetarea sa s-a îndepărtat de modelul strict mecanic. Mașina Analitică,

care a urmat în 1832, a reprezentat pentru Babbage recunoașterea importanței gândirii globale, în opoziție cu abordarea mecanicistă a Mașinii Diferențiale. Dacă modelul diferențial presupunea descompunerea obiectului analizei în părțile sale componente, modelul analitic a fost proiectat, cel puțin în teorie, pentru a aborda probleme de ordin general, legate de infinit, continuitate și sinteză. Mașina Analitică nu s-ar fi limitat la clasificarea rezultatelor unei anumite funcții, ci ar fi făcut posibilă dezvoltarea și clasificarea oricărei funcții. În această perspectivă, ea era descrisă ca fiind expresia materială a oricărei funcții nedefinite, de orice grad de generalitate și complexitate (Dutta 2007, 199).



(a) (b)

Figura 4. Mașina Diferențială nr. 2 a lui Babbage, ce a fost finalizată în 1991 de către Muzeul de Știință din Londra. Procesul de realizarea a durat 17 ani și a încercat să respecte toleranțele și tehnologia pe care a avut-o autorul atunci când a conceput-o. (a) (Babbage 1864, 34), (b) (Britannica 2025). Imagini libere de drepturi.

Mașina de calcul diferențial nu a fost finalizată de Babbage, deoarece cercetarea sa s-a îndepărtat de modelul strict mecanic. Mașina Analitică, care a urmat în 1832, a reprezentat pentru Babbage recunoașterea importanței gândirii globale, în opoziție cu abordarea mecanicistă a Mașinii Diferențiale. Dacă modelul diferențial presupunea descompunerea obiectului analizei în părțile sale componente, modelul analitic a fost proiectat, cel puțin în teorie, pentru a aborda probleme de ordin general, legate de infinit, continuitate și sinteză. Mașina Analitică nu s-ar fi limitat la clasificarea rezultatelor unei anumite funcții, ci ar fi făcut posibilă dezvoltarea și clasificarea oricărei funcții. În această perspectivă, ea era

descrisă ca fiind expresia materială a oricărei funcții nedefinite, de orice grad de generalitate și complexitate (Dutta 2007, 199).

Prin abandonarea dezvoltării Mașinii Diferențiale, Babbage poate fi considerat primul care a recunoscut caracterul limitativ al unei abordări centrate exclusiv pe un singur criteriu, în acest caz pe cel al eficienței. Prin orientarea cercetării sale către gândirea globală, și-a pus problema controlului asupra oricărui proces, pentru care era nevoie de o mașină generică.

Babbage nu a reușit să convingă investitorii să dezvolte acest nou concept, astfel încât Mașina Analitică nu a fost construită. Totuși, proiectul acesteia reprezintă modelul conceptual al viitorului computer. În timp ce în producție apare proiectantul - ca fiind cel care creează pentru războiul de țesut Jacquard, înlocuind artistul meșteșugar - cel care urma să opereze Mașina Analitică a lui Babbage este precursorul programatorului.

2.2.2. Automatizarea ca model organicist

Prin focalizarea asupra eficientizării proceselor realizate de oameni, au fost dezvoltate mașini mecanizate capabile să preia și să optimizeze activități tradițional manuale. Caracteristicile lucrului de mână au fost analizate, interpretate, traduse în date obiective, apoi optimizate și recompuse în mașini. Aceste dispozitive nu s-au limitat la îmbunătățirea forței de muncă umane, ci, prin abstractizare, tehnologia a primit abilități senzoriale, materializate în mașini capabile să audă, să vadă și să perceapă tactil cu o acuratețe și o precizie superioare celei umane (Toffler 1984, 27). Mai mult, mașinile au fost puse împreună în sisteme interconectate sub un singur acoperiș, dând naștere fabricii și liniei de asamblare.

Relația dintre artizan și unealtă reflectă o schimbare profundă în atitudinea față de funcționalitatea corpului uman. Teoriile științifice din secolul al XIX-lea, din domeniul științelor vieții, care explică modul în care funcționează organismul uman, au constituit surse de inspirație pentru sistemul de producție mecanizat. Dacă în primă fază, structura și funcționarea organismului au servit ca model pentru a face construcția mașinii în sine mai ușor de înțeles, odată cu dezvoltarea mecanizării din timpul revoluției industriale, mașina a devenit cea care stabilește condițiile pentru a înțelege corpul uman. Știința secolului al XIX-lea a redefinit organismul ca analog al mașinii. Teoriile aplicate privind entropia, energia,

funcția, circulația, precum și mecanica au modelat organismul în paradigma eficienței (Dutta 2007, 214-15).

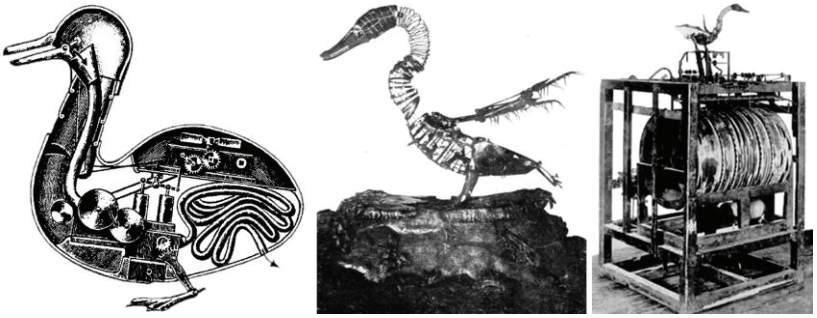


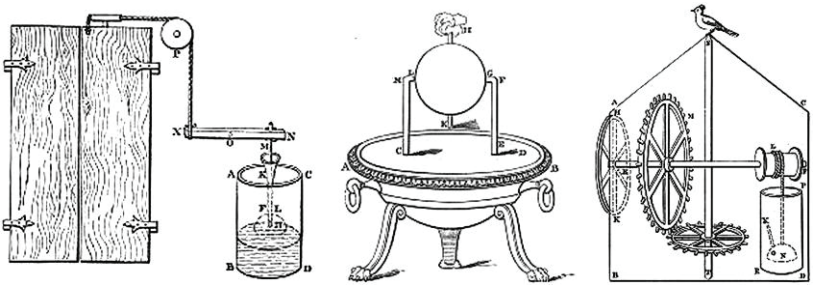
Figura 5. Canard Digérateur este un automaton sub formă de rață, creat de Jacques de Vaucanson în 1739. Intenția acestuia era de a realiza un mecanism care mănâncă și digeră, dar mecanismul nu a avut capacitatea de a face acest lucru (Chapuis și Droz 1958). Imagini libere de drepturi.

În perioada revoluției industriale, corpul uman a fost conceptualizat și tratat ca o mașină, în concordanță cu eforturile de eficientizare a proceselor de muncă. Tot ceea ce era considerat risipitor din producția manuală a fost eliminat, iar lucrătorii au fost instruiți să execute sarcinile într-o manieră cât mai asemănătoare funcționării mașinilor de producție.

Un mecanism este alcătuit din părți mobile care lucrează împreună conform unor principii cinematice, dar care, pentru a fi puse în mișcare, au nevoie de o sursă de energie. Înainte de perioada industrializării, mecanismele cinematice erau acționate de forța umană sau animală, ceea ce făcea ca mașina să depindă direct de operator pentru energia motoare (Canguilhem 1992, 47). Această dependență a generat motivația de a concepe un mecanism autosuficient, a cărui funcționare să nu mai fie condiționată de o forță externă care să-l pună în mișcare. Principiul de mecanism automat nu era unul nou, ci își are originile în termenul grecesc *automata,* utilizat pentru a descrie mașini care se mișcau prin propria forță. Acestea erau, de regulă, instalații dinamice menite să ilustreze principii fizice, precum cele realizate de Heron.

Asocierea organismului cu mașinile este realizată pentru prima dată, cu mult timp înaintea revoluției industriale, de către Aristotel. În scrierile sale

despre catapulte, acesta face o paralelă între modul de mișcare al animalelor și articularea componentelor mașinilor de război ale epocii. Aristotel considera că, înaintea oricărei mișcări, există o stare de imobilitate și că este necesară o forță inițiatoare. În cazul oamenilor, această forță este dorința, asociată sufletului; în cazul mașinilor ea este reprezentată de aportul energetic uman sau animal.



(a) (b) (c)

Figura 6. (a) Producerea unui sunet într-un templu odată cu deschiderea ușii (b) Aeolipile, primul motor cu aburi (c) Pasăre care cântă printr-un sistem mecanic (Heron of Alexandria 1851). Imagini libere de drepturi.

Mai târziu, Descartes se inspiră din descoperirile științifice și tehnice ale secolului al XVII-lea - de la mecanismele ceasurilor, ale morilor de apă sau ale orgilor bisericești - pentru a identifica similitudini între modul lor de funcționare și cel al organismului (Canguilhem 1992, 48). În viziunea sa, organismul este imaginat ca o sumă de mecanisme care, după ce primesc un impuls inițial, produc și transformă energia pentru a funcționa automat și independent, asemănător unui *perpetuum mobile*. Totuși, până în perioada industrială, mecanismele depindeau de aportul direct al oamenilor pentru a fi puse în mișcare. Astfel, explicarea organismului prin analogia cu mașina a devenit legitimă doar odată cu apariția mecanismelor automate. În acest context, mașinile nu mai sunt doar imitații ale mișcării organice, ci odată construite și acționate inițial de către oameni, dobândesc capacitatea de a funcționa automat și independent.

Fabrica însăși poate fi descrisă ca un vast *automatum*, adică un sistem de mecanisme de producție interconectate, ce își primesc energia motrice de la un motor central. Acest ansamblu de mașini, dotat cu motorul lor

automat, împreună cu lucrătorii, formează corpul articulat al liniei de producție. În acest sistem, lucrătorii apar ca organele intelectuale ale mașinii, distincte de componentele neînsufleţite prin conştiinţă, dar care lucrează în ritm cu acesta din urmă, subordonate ritmului ei constant și neîntrerupt (Dutta 2007, 199).

Această schimbare de perspectivă, de la om ca agent autonom la om ca element integrat într-un sistem mecanizat, a deschis calea pentru transferul principiilor de funcționare ale mașinilor către organizarea muncii. Dacă, în trecut, uneltele erau prelungiri ale abilităților meșteșugarului, în contextul industrial ele au devenit modele normative pentru modul în care trebuia să funcționeze lucrătorul. Astfel, procesul de producție nu a mai fost gândit în jurul capacităților naturale ale corpului, ci în raport cu ritmul, structura și constrângerile impuse de mașinile de producție, marcând începutul mecanizării muncii artizanale și al transformării radicale a relației dintre om și unealtă.

2.2.3. Superspecializarea și pierderea calificării

Uneltele meșteșugarilor erau specifice fiecărei bresle, iar mânuirea lor cu îndemânare făcea parte din procesul de ucenicie. În acest context, deși unealta servea unui anumit scop, utilizarea dobândea variabilitate doar în mâinile meșterului, căpătând aplicații diferențiate. Astfel, chiar dacă uneltele meșteșugarilor erau aceleași, ceea ce făcea ca rezultatul să fie diferit era creativitatea și îndemânarea celui care le mânuia.

În producția mecanizată, forța variabilă și adaptabilă a omului a fost înlocuită cu ritmul constant și repetitiv al mecanismelor. Uneltele, care în perioada preindustrială căpătau varietate prin interacțiunea cu meșteșugarul, au devenit dependente de un ciclu continuu și stabil, apreciat pentru constanță, dar incapabil să integreze variația. Revoluția industrială a înlocuit uneltele tradiționale de mână cu mașini și mecanizare, dar această substituție s-a realizat treptat. Atitudinea față de introducerea mașinilor în producție a evoluat de la o primă fază, în care noile unelte sprijineau activitatea meșteșugarilor, la o fază în care au eliminat un procent semnificativ dintre aceștia, din rațiuni de eficiență și economie.

Charles Babbage, unul dintre promotorii dezvoltării mașinilor automate, descrie conceptul de integrare a unor unelte diferite într-un ansamblu acționat de un singur motor, cu scopul de a fabrica același tip de produs. Totodată, el recunoaște necesitatea existenței mai multor variante de

operare, adaptate diversității lucrătorilor care le utilizează (Dutta 2007, 198). În viziunea sa, mașinile ar trebui să încorporeze variație și să țină cont de caracteristicile celor care le operează.

Inițial, intenția era de a crea noi unelte care să amplifice capacitățile productive ale meșteșugarului, permițându-i acestuia să își transfere priceperea și abilitățile în procesul de materializare. Scopul era menținerea unui sistem de producție capabil să integreze varietatea, stimulând creativitatea prin intermediul unor mașini cu caracter generic. Cu cât mașina era mai flexibilă, cu atât procesul de producție devenea mai general aplicabil (Pine II 1993, 9). Această abordare a fost însă abandonată, în favoarea concentrării pe criteriul economic. S-a ajuns la concluzia că reducerea semnificativă a costurilor de producție pentru un anumit bun era posibilă doar prin înlocuirea abilităților manuale ale omului cu funcționalitățile mecanice ale mașinilor(Piore și Sabel 1984, 19). Artizanii tradiționali, înainte de industrializare responsabili pentru realizarea integrală a unui artefact, au fost treptat transformați în grupuri de meșteșugari și mașini care lucrau împreună la un produs. Acest proces a condus, în cele din urmă, la apariția muncitorilor specializați, fiecare limitat la executarea unei singure sarcini mărunte și repetitive în cadrul liniei de producție (Pine II 1993, 19).

Babbage a observat că lucrătorii calificați își petreceau un procent semnificativ din timp realizând activități care erau sub nivelul lor de competență (Dutta 2007, 195-96). În situațiile în care procesul de producție putea fi fragmentat și distribuit între mai mulți muncitori, costurile forței de muncă puteau fi reduse prin atribuirea diferențiată a sarcinilor: operațiunile de înaltă calificare reveneau lucrătorilor cu pregătire superioară, remunerați corespunzător, și delegarea sarcinilor simple celor slab calificați, plătiți mai puțin. Astfel, cheltuielile cu forța de lucru se reduceau: cu cât numărul activităților simple, realizabile de oricine, era mai mare, cu atât procesul devenea mai eficient din punct de vedere economic. Deși meșteșugarii au fost afectați de pierderea responsabilității și, ulterior, a competențelor profesionale, diviziunea muncii a determinat o creștere evidentă a eficienței și a productivității.

Conceptul de diferențiere al muncii și de specializare a mașinilor are ceva în comun și cu teoriile lui Charles Darwin, care își publică în perioada respectivă cercetarea sa privind originea speciilor. Darwin vorbește despre două tipuri de diferențiere în cadrul organelor. În primul rând, le descrie pe cele al căror nivel scăzut de organizare nu necesita un grad semnificativ de

variație pentru a-și îndeplini sarcinile, prin urmare, se permite o gamă largă de variante generalizate. Și a doua categorie, unde un grad ridicat de organizare necesită o manifestare mai pronunțată, prin grade mai mari de diferențiere, prin manifestarea de caracteristici funcționale singulare (Dutta 2007, 198).

Pentru a lucra în fabrici, oamenii nu mai aveau nevoie de pregătire pentru un anumit proces, astfel că etapa de ucenicie și formare profesională a dispărut, iar angajatorii au redus investițiile în instruirea lucrătorilor, obținând economii semnificative. În contextul în care majoritatea lucrătorilor nu dețineau calificări sau aptitudini specializate, ci reprezentau o forță de muncă generică, recompensele financiare acordate erau minime. Accentul s-a concentrat, prin urmare, pe eficientizarea producției, în timp ce bunăstarea lucrătorilor nu a constituit o prioritate în configurarea condițiilor de muncă.

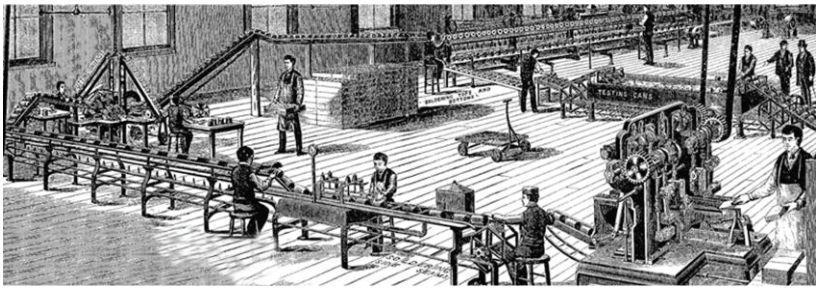


Figura 7. Bandă de asamblare la o fabrică de conserve (Https://Www.Scientificamerican.Com/Issue/Supplements/1883/08-18/ 1883). Imagine liberă de drepturi.

Procesul de producție a fost standardizat și transformat într-o rutină, afectând atât lucrătorii, cât și echipamentele de producție. Gradul de specializare al mașinilor a fost strâns legat de diferențierea și specializarea forței de muncă, cele două aspecte influențându-se reciproc. Astfel, forța de muncă a fost fragmentată în roluri ce implicau activități tot mai restrânse, ușor de automatizat, ceea ce a condus, în cele din urmă, la înlocuirea oamenilor cu mașini capabile să execute aceste sarcini simple cu mai multă precizie și rapiditate. Același principiu al specializării s-a aplicat și în cazul mașinilor.

În consecință, întregul proces de producție a fost descompus în sarcini mici ușor de realizat integral de mașini, în mod automat, fără intervenția unui număr mare de operatori. Dacă, inițial, mașinile de producție aveau nevoie de lucrători pentru a îndeplini o serie de operații, specializarea progresivă a condus la o reducere treptată a forței de muncă umană. Odată ce munca a fost descompusă în mișcări simple, uniforme și ușor repetabile, costurile de producție și salariile au putut fi determinate exclusiv prin numărul de ore lucrate, transformând un proces anterior calitativ într-unul cuantificabil. Calcularea muncii în termeni pur cantitativi care pot fi tratați matematic este parte din formarea unei concepții mecaniciste asupra lumii (Canguilhem 1992, 50).

Pentru a realiza toate sarcinile pe care le efectua anterior mâna umană, a fost nevoie de integrarea mai multor mașini diferite, ceea ce a condus la complexificarea sistemului de producție, prin relaționarea tuturor acestor componente. Astfel, pe măsură ce tehnologia s-a dezvoltat, mașinile, în loc să se simplifice, s-au complicat, având ca scop executarea unei operații simple și uniforme, dar într-un proces continuu. Pentru modificarea bunului produs era necesar un efort considerabil, atât financiar, cât și logistic, pentru a schimba o astfel de bandă de producție. În consecință, prin superspecializare, sistemul de producție a devenit foarte rigid, incapabil să integreze variații, astfel produsele sale rămâneau identice.

În mijlocul erei industriale, expertul în eficiență, Frederick Taylor a inventat *managementul științific al timpului* (Taylor 1911). Taylor a folosit principii de eficiență deja dezvoltate de ingineri și le-a aplicat lucrătorilor cu scopul de a-i transforma în mașini vii, a căror performanță ar putea fi optimizată, asemănător proceselor de producție continue, pentru obținerea de bunuri standardizate (Rifkin 2013, 112). În această concepție, un muncitor executa același proces atât astăzi, cât și mâine; zilele erau identice, nimic nu se schimba, o repetare infinită de evenimente, totul este planificat și previzibil. Mașina a înlocuit munca artizanală în dimensiunea ei specifică, dar a fost reintrodusă în altă parte ca forță de muncă abstractă. Forța de muncă umană nu a fost complet înlocuită de mașini, ci a fost deplasată în altă zona a procesului de producție. Astfel, s-a ajuns la o organizare ierarhică, cu definirea clară a responsabilităților lucrătorilor, de la maiștrii, la supervizori și manageri, accentul fiind pus pe gestionare și control. În acest fel, specializarea a dus la apariția profesiilor, ca un mecanism de alocare a oamenilor în angrenajul sistemului de producție.

Superspecializarea a generat o rigiditate în procesele de producție ce a împiedicat integrarea variației. Această inflexibilitate funcțională limitează adaptabilitatea sistemului, iar pierderea calificării lucrătorilor accentuează dependența de procese standardizate, transformând producția într-un mecanism predictibil, dar incapabil să răspundă schimbărilor.

2.2.4. Arhitectura și copia în serie

Proiectantul și-a găsit locul în producția în masă prin asumarea unei poziții de gestionare și control a unei noi situații industriale. Astfel, sarcinile meșteșugarului tradițional au fost împărțite: mașinile de producție se ocupau de materializare, iar proiectantul de componenta creativă. Principala provocare era formarea unei preferințe a masei înainte ca produsul să fie realizat în număr mare. În societatea victoriană a Marii Britanii a apărut o dilemă de gust, oscilând între standardele ridicate ale elitei educate și alegerile adesea arbitrare ale maselor (Dutta 2007, 121). În lipsa unor norme clare care să asigure calitatea produselor, era nevoie de mecanisme de control asupra obiectelor care ajungeau la utilizatori. Astfel, proiectantul avea un rol decizional, asigurându-se că obiectul produs în masă respecta un anumit standard. Principiile de proiectare căutau să stabilească un echilibru între criteriile estetice și cele de calitate, în relația dintre producător și consumator.

RIBA[3], fondată 1834 ca prima organizație profesională a arhitecților, și-a propus să asigure "uniformitatea și respectabilitatea practicii" pentru arhitect precum și "responsabilitatea în numele publicului pentru direcția și menținerea caracterului național al gustului" (Mace 1986). La mijlocul secolului al XIX-lea, arhitecții nu aveau un statut profesional care să le asigure un trai bazat doar pe design. Astfel, își completau veniturile ca topografi, agenți imobiliari, evaluatori de proprietate sau antreprenori în construcții, asumându-și o paletă largă de atribuții (Saint 1983). În ceea ce privește domeniul construit, contribuția arhitecților la silueta Londrei din 1860 era, astfel, redusă (Summerson 1974).

Prin distanțarea de execuția propriu-zisă, practica de arhitectură a devenit vulnerabilă, iar semnătura arhitectului, în lipsa unui cadru legal, era lipsită de valoare juridică. Abia în 1880, Parlamentul Britanic a definit arhitectura în cadru legal ca profesie, însă încadrată în categoria artelor. Astfel,

[3]Din engleză Royal Institute of British Architects

proiectantul și-a găsit locul în producția în masă, transformându-se într-o practică normativă încorporată în lege (Dutta 2007, 179). Arhitectura începe să fie percepută, în contextul producției de masă, ca o activitate predominant intelectuală, distinctă de munca constructorilor și meșteșugarilor, ale căror competențe se bazau pe practică directă și experiență acumulată. Profilul arhitectului presupune, astfel, o separare funcțională de procesul propriu-zis al construirii, iar autenticitatea și calitatea sa de autor este conferită de semnătură. În această conjunctură istorică, profesiei de arhitect i se atribuie explicit rolul de inovator, un privilegiu care, în trecut, era lipsit de importanță. Arhitectul devine o nouă formă de autoritate, care este modelată având în centru preocuparea pentru originalitate, recunoscută și consolidată prin reglementări juridice.

Walter Benjamin subliniază că reproducerea mecanică se realizează independent de existența unui original, spre deosebire de producția manuală. În ceea ce privește arta, el identifică valoarea operei autentice în dimensiunea sa ritualică, ancorată în rolul și utilizarea inițială. Odată cu emergența producției în serie, opera de artă este concepută direct pentru multiplicare, iar criteriul tradițional de autenticitate, întemeiat pe relația dintre original și copie, își pierde relevanța în contextul producției artistice moderne (Benjamin 1936, 2-5).

Benjamin regretă înlocuirea obiectului realizat de meșteșugar cu obiectul produs în masă, argumentând că această cultură a copiei privează obiectul de aura sa unică. Totuși, se poate susține că, în contextul producției de masă, copia, dimpotrivă, favorizează și confirmă valoarea originalului. Ridicarea originalului pe un piedestal, prin reglementările juridice privind bunurile, funcționează ca o justificare a multiplicării sale. În acest sens, dezvoltarea legislației dreptului de autor din secolul al XIX-lea nu urmărea doar acordarea de recunoaștere și credit originalului, ci și crearea cadrului legal prin care acesta putea fi reprodus în mod controlat și profitabil.

În arhitectură, dreptul de autor se referea la reprezentările grafice, la desene, nu la obiectul construit. Motivul era unul de natură birocratică, deoarece desenele constituiau dovezi ușor de arhivat și de protejat legal. În plus, un proiect era considerat copie doar dacă reproducea în întregime un altul, situație care, în practică, apărea rar. Arhitecții au privit acordarea dreptului de autor nu doar ca pe o confirmare a statutului lor profesional, ci și ca mijloc de a obține recunoaștere și credit, prin validarea proiectului ca operă unică și protejată.

În arhitectură, prin urmare, dreptul de autor a lucrat în direcția opusă față de alte domenii de producție: a garantat singularitatea și unicitatea obiectului arhitectural, mai degrabă decât să creeze condițiile pentru reproductibilitate (Dutta 2007, 181-82). Astfel, arhitectura a valorificat foarte puțin mecanismul dreptului de autor, doar un număr redus de proiecte fiind înregistrate la Oficiul de Brevete. Motivele erau multiple: pe de-o parte pentru că nu le proteja întrutotul creația, și pe de altă parte pentru că autorul nu obținea beneficii materiale directe din această înregistrare. Drepturile de autor în arhitectură au fost aplicate, în general, componentelor asociate industriei construcțiilor – precum modele de ceramică, teracotă sau mobilier – adică obiectelor destinate producției în masă. Pe de altă parte, Giedion, analizând arhivele de brevete din secolul al XIX-lea, susține că procesul de brevetare conferă proprietății intelectuale un statut anonim, reducându-se cel mult la instituționalizarea numelui autorului (Giedion 1948, 40-41). În fapt, proiectanții nu beneficiau de un credit real de autor, asemenea meșteșugarilor tradiționali, cărora acest statut le fusese, de asemenea, refuzat.

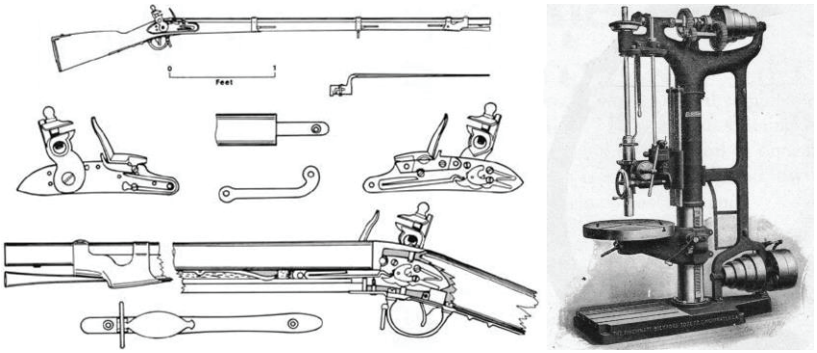
După proliferarea industrializării, a apărut o atitudinea nostalgică față de caracteristicile lucrului de mână. Mișcarea *Arts and Crafts* a încercat să recreeze metodele de producție specifice breslelor medievale. În același timp, a crescut și aprecierea pentru personalizare, care era dependentă de abilitățile meșteșugarilor. Choisy evidenția importanța creativității meșterilor și libertatea acestora de a se exprima (Choisy 1883, 170). Atunci când ornamentele erau realizate de artiști, aceștia își lăsau amprenta supra procesului. Odată cu proliferarea ornamentelor produse în masă, urmele mâinii umane, imperfecțiunile, au dobândit o valoare sporită. Ruskin considera imperfecțiunea drept dovadă a autenticității, în opoziție cu precizia impersonală a mașinii. De asemenea, el aprecia stilul gotic ca expresie a unei arte colective, în care fiecare participant își păstrează individualitatea, susținând că meșteșugarul deține un merit considerabil în arhitectură (Picon 2013, 78).

2.3. Legătura dintre control și dezvoltarea tehnologică

2.3.1. Schimbarea de scară

Într-o perioadă relativ scurtă, utilizarea uneltelor mecanice și caracteristicile lor abstracte și obiective au modificat fundamental abordarea mijloacelor de producție și poziția lucrătorilor în cadrul

procesului productiv. La această transformare au contribuit, de asemenea, criteriile economice și contextul social, care au condus la înlocuirea meșteșugarilor cu mașini capabile să producă un număr mai mare de unități, mai rapid și la costuri reduse. Astfel, accentul s-a mutat către realizarea de produse accesibile pentru mase.



(a) (b)

Figura 8. Modelul de flintă 1835, fabricat până în anul 1830, ilustrând principiul pieselor interschimbabile, inventat de Eli Whitney, pentru a putea fi înlocuite rapid, dar și produse în serie. Precizia era foarte importantă și era realizată cu ajutorul mașinilor de frezare (a) (Jandot 1940), (b) mașină de frezare (*The History of the Drilling Machine* 1917, 11). Imagini libere de drepturi.

A doua revoluție industrială marchează o etapă caracterizată de dezvoltări tehnologice, desfășurată între a doua jumătate a secolului al XIX-lea și începutul Primului Război Mondial, care a transformat procesul de fabricație prin introducerea electrificării, a producției în masă și a liniei de asamblare. Se face tranziția de la motorul cu aburi la motorul cu ardere internă și electricitate, iar atenția se concentrează pe industria chimică în detrimentul industriei textile, precum și pe producția oțelului. Cea mai importantă schimbare adusă de această evoluție tehnologică rapidă este creșterea volumului de producție, a vitezei de transport și a cantității de bunuri circulate și consumate (Landes 2003).

În timpul celei de-a doua revoluții industriale, Statele Unite ale Americii au depășit Marea Britanie ca putere industrială. Această creștere rapidă a fost posibilă datorită Sistemului American de Management și Producție, o metodă de producție dezvoltată inițial în industria de armament, în a doua

jumătate a secolului al XIX-lea. Americanii au fost cei care au dezvoltat mașinile de frezare pentru producerea părților componente ale muschetei, iar realizarea formelor specializate de mașini de frezare reprezintă contribuția lor principală în sistemul producției mecanizate.

Sistemul American și-a definit câteva direcții strategice, care i-au asigurat productivitatea: utilizarea pieselor interschimbabile, facilitând întreținerea prin înlocuirea rapidă a componentelor; unelte de precizie, necesare pentru fabricarea pieselor cu toleranțe reduse, eliminând astfel necesitatea finisării manuale. Pe măsură ce procesul de producție a fost standardizat și adus la nivel de rutină, accentul s-a pus concentrarea lucrătorilor asupra unei singure operații, pentru a se obține o eficiență crescută (Pine II 1993, 12).

În manufactură se produc bunuri personalizate în volum mic, cu un timp de producție mare. Prin contrast, tehnologia industrială realizează bunuri standardizate în volum mare și într-un ritm rapid, ceea ce le reduce costul, făcându-le mai accesibile pentru un număr mai mare de utilizatori. Totuși, este nevoie de o perioadă extinsă de proiectare și de resurse economice consistente pentru a ajunge la acest proces automatizat. De aceea, banda de producție trebuia să funcționeze timp îndelungat fără modificări, pentru a-și justifica investiția. Prin urmare, sistemul era eficient și specializat, dar orice ajustare a produsului final presupunea reorganizarea întregului lanț tehnologic (Davis 1987, 20).

Odată cu trecerea în secolul al XX-lea, Sistemul American a evoluat în producția în masă. Astfel, la direcțiile inițiale s-a adăugat și principiul fluxului, care presupunea mișcarea automată pe o bandă de producție, inventată de Ford, și care a impus muncitorilor integrarea strictă în ritmul acesteia. Noțiunea de flux fost strâns legată de reducerea costurilor și a prețurilor, pentru a produce eficient pentru mase. Cu cât compania era mai mare, cu atât volumul producției creștea și prețurile scădeau, generând economii de scară. Menținerea unui raport favorabil între investiție și profit a fost posibilă doar prin reducerea numărului de muncitori și creșterea numărul de mașini de producție, diminuând astfel costul per unitate. Prețurile scăzute făceau produsele accesibile unui număr mare de cumpărători, ceea ce stimula cererea și impunea creșterea producției la costuri și mai mici, generând un proces ciclic axat pe eficientizare. Producția în masă a devenit foarte dependentă de mașini și de diviziunea muncii, ceea ce a determinat un grad ridicat de specializare atât al echipamentelor, cât și al lucrătorilor. Din acest motiv, s-a impus fabricarea

de bunuri standardizate pentru a menține rapiditatea procesului, deoarece personalizarea obiectelor ar fi perturbat ritmul și ar fi crescut costurile (Pine II 1993, 14).

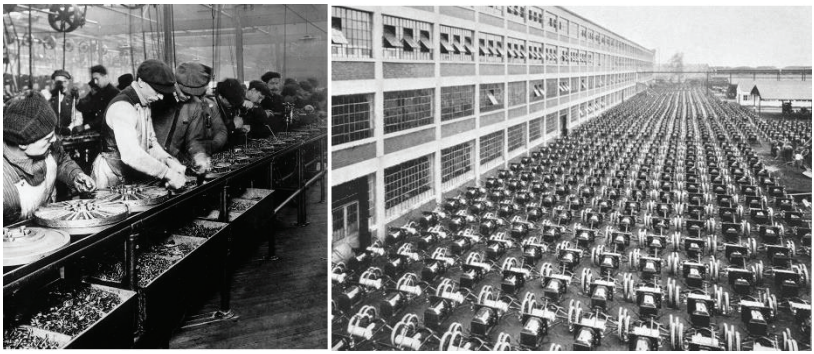
Unul dintre factorii sociali care au favorizat expansiunea producției în masă a fost specificul societății americane, formată dintr-o populație nouă, fără tradiții. În lipsa unor norme culturale sau a unor competitori consacrați, precum în Europa, producătorii nu erau constrânși să ofere o varietate mare de bunuri evitând astfel investițiile în sisteme de producție diferite. Într-un interval scurt, bunurile au încetat să fie realizate de cei care le și consumau, generând o societate în care autosuficiența devenea excepțională. Astfel s-a creat o dependență de alimente, produse și servicii furnizate de terți. Producția de serie a rupt legătura dintre realizarea și consumul bunurilor, separând clar producătorul de utilizator. În același timp, scopul producției s-a modificat, trecând de la utilizarea directă la schimb, iar mecanismul care mediază această relație între producător și consumator a devenit piața (Toffler 1984, 40-41).

Costul unui obiect produs mecanic este invers proporțional cu volumul de producție și dependent de funcționarea continuă a sistemului. Menținerea unei producții neîntrerupte și realizarea unui număr constant de unități garantează profitabilitatea.

În condițiile creșterii rapide a scării producției, orice întrerupere sau întârziere se resimte puternic. Odată cu eficientizarea procesului și substituirea forței de muncă umane cu echipamente mecanizate, a apărut necesitatea monitorizării și controlului permanent al mecanismului automatizat. Dependența accentuată de menținerea unui flux continuu, în care constanța și ritmul procesului influențează direct costurile, a condus la o concentrare pe eficiența operațională a producției. Într-un sistem guvernat de piață, timpul devine invers proporțional cu profitul. Mașinile, în care s-a investit economic, nu pot să stea degeaba, și acestea funcționează în ritmul lor, ceea ce a condus la sincronizarea societății cu ritmul mașinii (Toffler 1984, 52). Principiul integrării verticale a rezultat din nevoia, comună organizațiilor în expansiune, de a menține un proces ciclic: aprovizionarea cu materii prime, producția constantă și distribuția continuă a bunurilor realizate (Pine II 1993, 19).

Timpul a devenit un factor esențial în asigurarea unei producții constante. În interiorul organizațiilor care produceau, acesta era gestionat pe baza principiilor repetabilității și calculului economic, iar în relația cu

consumatorul, accentul se punea pe reducerea timpului de așteptare și pe livrarea imediată (Davis 1987, 13). Avantajul competitiv revenea companiilor capabile să ofere același serviciu sau produs într-un interval mai scurt decât concurența (Davis 1987, 19). Micșorarea distanțelor și compresia timpului au fost posibile datorită dezvoltării sistemelor de distribuție și mijloacelor de comunicație, care au accelerat activitatea comercială în toate etapele lanțului de aprovizionare (Rifkin 2013, 110).



(a) (b)

Figura 9. Producția în masă în domeniul automobilelor, mașinile Ford T produse într-o singură zi la fabrica Highland Park Plant, mulțumită eficienței primei bande de producție dinamice. (a) (U.S. Information Agency, f.a.), (b) (Henry Ford Museum 1913). Imagini libere de drepturi.

Principiile managementului științific s-au extins rapid din fabrici și birourile comerciale către sfera domestică și comunitară, transformând eficiența într-o valoare definitorie a noii ere industriale. Maximizarea rezultatelor și minimizarea investiției de timp, muncă și capital au devenit repere fundamentale, modelând aproape fiecare dimensiune a vieții sociale (Rifkin 2013, 112).

2.3.2. Controlul mașinilor

Procesul prin care oamenii au fost relocați din zona de producție a fabricilor în cea de control este marcat de modul în care organismul uman a fost perceput ca analog unei mașini. Pentru ca gesturile lucrătorilor să poată fi preluate de mașini, acestea au fost analizate și abstractizate, cu scopul de a identifica acele operații mecanice ce puteau fi transferate.

Procesele de decizie și control au rămas, însă, în sarcina oamenilor, deoarece mașinile mecanice nu le puteau substitui. Taylor a considerat că cel mai bun mod de a optimiza eficiența lucrătorilor presupune separarea gândul de acțiune. În plus, controlul asupra modului de realizare a unei sarcini a fost transferat managementului (Taylor 1911, 235-36). Astfel, mașina încetează să mai fie o unealtă aflată sub controlul direct al meșteșugarului și devine principalul agent de producție, supravegheat de oameni.

Atitudinea oamenilor față de mașini este strâns legată de viziunea asupra muncii. Una dintre primele intenții în dezvoltarea tehnologică a fost eliminarea sau diminuarea operațiilor periculoase ori dificil de realizat de către oameni. Înaintea apariției mașinilor, activitățile cele mai neplăcute sau solicitante erau îndeplinite fie de animale, fie de sclavi sau de păturile inferioare ale societății. Aristotel descria sclavii ca „mașini animate", iar Descartes considera că singura funcție a sufletului era judecata, astfel animalele erau lipsite de suflet. atribuind astfel animalelor o condiție lipsită de suflet. Prin devalorizarea atât a animalelor, cât și a oamenilor considerați neimportanți pentru societate, se justifica utilizarea lor în scopuri de exploatare și dominare (Canguilhem 1992, 50,52). În acest cadru, controlul este legitimat prin definirea celor supuși drept dispensabili. În schimb, mașinile erau prețuite, fiind utilizate pentru a perfecționa procese pe care oamenii nu le realizau cu aceeași precizie sau constanță.

Nevoia de control asupra mașinilor apare în perioada mecanizării, deoarece acestea par să dobândească o anumită independența față de operatori prin noua lor capacitate de mișcare automată. Pe măsură ce mașinile preiau din sarcinile umane, competențele lucrătorilor încep să fie percepute ca inferioare celor ale mașinilor, generând temeri legate de posibila lor înlocuire. În acest context, mașinile capătă o dimensiune percepută ca amenințătoare. Romanul *Erewhon* al lui Samuel Butler, publicat în 1872, explorează dependența reciprocă dintre om și mașină, subliniind teama că acestea ar putea dobândi capacitatea de reproducere (Dutta 2007, 214). O asemenea viziune asupra unui viitor controlat de mașini, pune sub semnul întrebării direcția dezvoltării tehnologice. Butler argumentează că mașinile nu pot suferi mutații — condiție esențială a evoluției — și, prin urmare, rămân dependente de creativitatea umană (Butler 1872). Paradoxal, această dependență, care ar putea asigura evoluția mașinilor, devine o amenințare, pentru că tendința umană de

autodepășire tehnologică alimentează posibilitatea emancipării mașinilor de sub controlul omului. Se recunoaște existența unei relații de interdependență între om și mașină, iar elementul de siguranță rămâne faptul că, în prezent, puterea aparține încă oamenilor. Cu toate acestea, perspectiva unei autonomii viitoare a mașinilor impune vigilență, iar pentru a evita o astfel de posibilitate se cere intensificarea măsurilor de control.

Aspectele negative ale revoluției industriale au fost generate de excesul de control, de orientarea exclusivă spre optimizare și de urmărirea profitului cu orice preț. Walter Benjamin consideră că forțarea producției prin creșterea vitezei, optimizarea proceselor și maximizarea eficienței surselor de energie conduce inevitabil la o utilizare distructivă, manifestată în contextul războiului (Benjamin 1936, 15). Distrugerea provocată de război dovedește că societatea nu era suficient de matură pentru a integra tehnologia, iar tehnologia, la rândul ei, nu era suficient de avansată pentru a răspunde nevoilor societății. În acest contrast se evidențiază discrepanța dintre capacitățile excepționale de producție și modul neadecvat de utilizare a acestora.

2.3.3. Mașinile de control

Intelectualii, oamenii de afaceri și revoluționarii din perioada industrială au manifestat o fascinație profundă față de mașini, construind analogii bazate pe tehnologiile mecaniciste ale epocii lor, care au influențat numeroase domenii. Newton a concluzionat că întregul univers poate fi conceput ca un uriaș mecanism de tip ceas, funcționând cu regularitate mecanică (Snobelen 2012, 149-50). Ulterior, Adam Smith a extins această analogie asupra economiei, argumentând că aceasta constituie un sistem care prezintă numeroase similitudini cu funcționarea mașinilor (Aspromourgos 2012).

Considerată cel mai avansat și eficient model de producție al epocii, fabrica a constituit sursa unui set de principii preluate ulterior de diverse tipuri de organizații - școli, spitale, închisori, structuri birocratice de stat - și nu numai. Aceste instituții au adoptat caracteristicile definitorii ale fabricii, precum diviziunea muncii, structura ierarhică rigidă și caracterul impersonal al relațiilor (Toffler 1984, 32).

Deși Darwin a fost preocupat în principal de evoluția biologică, ideile sale au fost reinterpretate și atribuite unor contexte sociale și politice.

Aplicarea principiului selecției naturale în domeniul social a condus la convingerea că cei mai bogați și mai puternici indivizi erau totodată cei mai adaptați și merituoși. Mai mult, s-a susținut că întregi societăți evoluează conform acelorași legi ale selecției, ceea ce a generat percepția industrializării ca o etapă superioară de dezvoltare în raport cu culturile non-industriale (Toffler 1984, 101). În acest cadru, civilizația industrială a fost considerată superioară celorlalte, iar această idee a servit ca justificare atât pentru degradarea naturii prin exploatarea resurselor, cât și pentru subordonarea și cucerirea civilizațiilor considerate mai puțin avansate.

Unul dintre factorii care a schimbat atitudinea față de mediu a fost producerea de energie folosind combustibili fosili neregenerabili. Transformarea radicală a început odată cu inventarea motorului cu aburi de către Thomas Newcomen în 1712, moment ce a marcat trecerea de la o utilizare sustenabilă a resurselor pentru supraviețuire la un consum accelerat și activ al capitalului natural (Toffler 1984, 26). În acest context, industrializarea devine o etapă evolutivă care justifică exploatarea.

Dezvoltarea industrială a devenit rapid dependentă de combustibilii fosili - de cărbune, petrol și gaze naturale - resurse energetice cu acces limitat, din cauza distribuirii geografice restrânse. Pentru a asigura accesul și controlul permanent asupra acestora, au fost necesare investiții militare semnificative (Rifkin 2013, 107). Ca urmare, s-au dezvoltat sisteme centralizate de comandă și de control, precum și o concentrare masivă de capital pentru transportul resurselor din subteran către utilizatori. Astfel, s-a consolidat un sistem energetic bazat pe resurse neregenerabile, care a alimentat producția în masă, iar aceasta, la rândul său, a susținut dezvoltarea unui sistem de distribuție complex (Toffler 1984, 28). Centralizarea infrastructurii energetice a stabilit condițiile generale pentru restul economiei, favorizând replicarea modelelor centralizate și ierarhice și în alte domenii.

Căile ferate s-au impus ca un sistem centralizat de distribuție, devenind prototipul întreprinderilor centralizate care au dominat prima și a doua revoluție industrială. Construirea unei căi ferate presupunea investiții de capital considerabil mai mari comparativ cu cele necesare pentru fabricile de textile, nave, canale sau alte sectoare de investiții din acea perioadă (Rifkin 2013, 107).

Datorită dimensiunii și complexității proiectelor, dezvoltarea acestor noi domenii avea nevoie de cantități enorme de capital, depășind posibilitățile

financiare ale indivizilor sau ale grupurilor restrânse. Proprietarii și partenerii erau reticenți să-și expună întreaga avere personală în asociații mari sau riscante. Pentru a stimula investițiile, a fost introdus conceptul de răspundere limitată, care limitează pierderile investitorilor la suma capitalului investit, protejând astfel patrimoniul personal în cazul falimentului societății. Această inovație juridică a facilitat accesul la capital și a condus la dezvoltarea corporațiilor. Mai mult, companiile au fost recunoscute juridic ca entități perpetue, capabile să existe independent de investitorii fondatori, ceea ce a permis angajarea în proiecte pe termen lung și de o amploare fără precedent (Toffler 1984, 31). Aceste schimbări legislative au încurajat dezvoltarea organizațională la o scară foarte mare, de care era nevoie pentru a deține controlul asupra structurilor în creștere.

Coordonarea marilor întreprinderi comerciale, cum sunt cele de dimensiunea căilor ferate, a reprezentat o sarcină dificilă. În această conjunctură, un nou tip de administratori profesioniști a preluat conducerea acestor întreprinderi gigant. Odată cu dezvoltarea corporațiilor, proprietatea a fost separată de management, iar controlul și standardizarea operațiunilor au devenit componente esențiale ale procesului de optimizare a comerțului (Rifkin 2013, 108-9). În acest context, birocrația a apărut ca o structură necesară pentru gestionarea și controlul relațiilor interne și externe ale companiei, conferind informației rolul principal de mijloc de control.

Principiul concentrării a marcat epoca industrială și a contribuit la accentuarea creșterii. Dependența de depozitele concentrate de combustibili fosili a orientat eforturile către zonele bogate în aceste resurse. În același timp, populația s-a concentrat, prin migrația rural-urbană, relocându-se în centre urbane de mari dimensiuni. De asemenea, munca a fost centralizată în fabrici, unde mii de muncitori au fost adunați împreună sub un singur acoperiș (Toffler 1984, 53). Această concentrare, care determină creșterea, a devenit în perioada industrială o metodă de optimizare, productivitate și eficiență, dependentă însă de control.

Prin urmare, concentrarea a condus la extinderea scalei operaționale, iar mărimea a fost percepută ca fiind direct proporțională cu eficiența. Maximizarea a devenit un scop în sine, motiv pentru care majoritatea sectoarelor căutau o creștere accelerată. Industriile dezvoltate în jurul culturii petrolului - de la sectorul financiar, industria auto, producția și distribuția de energie, până la telecomunicații și construcții comerciale - au fost predispuse la maximizare în scopul realizării economiilor de scară

(Rifkin 2013, 113). Similar industriei extracției combustibililor fosili, aceste domenii au avut nevoie de investiții masive de capital pentru a opera și s-au organizat într-un mod centralizat.

Centralizarea și reglementarea proceselor de producție și distribuție au impus cerințe similare asupra forței de muncă, atât în rândul angajaților de pe linia de producție, cât și în cazul personalului implicat în management. Corporațiile au o structură de management piramidală, caracterizată de o autoritate manifestată de sus în jos. Există reguli prestabilite care guvernează toate operațiunile, precum și instrucțiuni detaliate care definesc modul în care sunt organizate locurile de muncă și desfășurate activitățile la fiecare nivel al organizației. Avansarea profesională se bazează pe merit și pe criterii obiective. Pentru optimizarea producției, sarcinile sunt defalcate conform principiului diviziunii muncii, iar activitatea este organizată în etape fixe. Aceste procese clar definite permit integrarea mai multor activități într-un flux de producție accelerat, menținând în același timp controlul operațiunilor la nivel global (Chandler 1977, 120). Astfel, corporația reia modelul fabricii, de această dată fără mașini, a căror ritm și eficiență sunt replicate prin standardizare. Prin control și ierarhizare, se urmărește atingerea idealului funcționării precum o mașină.

Principiile standardizării au fost aplicate și în sistemul educațional de stat. Pregătirea unei viitoare forțe de muncă productive a devenit misiunea educației moderne. Dacă tinerii erau formați din timp în logica sistemului industrial, se preveneau eventualele problemele de disciplina ulterioare. Construit pe modelul fabricii, învățământul de masă preda noțiuni de bază, dar sub acest curriculum declarat funcționa o agendă ascunsă axată pe formarea unor aptitudini precum punctualitate, ascultare și executarea unor sarcini mecanice repetitive (Toffler 1984, 30). Școlile aveau sarcina de a produce o forță de muncă instruită, aparent educată, dar pregătită să funcționeze într-un mediu autoritar și centralizat.

Scopul era ca lucrătorii să execute comenzile superioare și să-și optimizeze activitatea fără a contesta autoritatea (Rifkin 2013, 112). Fabrica avea nevoie de angajați punctuali, obedienți și capabili să reproducă constant operații repetitive. Educația publică în masă a reprezentat un progres structural, dar, în același timp, a transformat generație după generație în forță de muncă adaptată tehnologiei mecanice și liniei de asamblare.

Transformările determinate de centralizare și concentrare au afectat și structura familiei. Pentru ca oamenii să fie disponibili, activități care până

atunci erau în sarcina familiei au fost transferate către noile instituții specializate. Mai presus de toate, noua societate necesita mobilitate: lucrători capabili să urmărească locurile de muncă de la o regiune la alta. Pentru a se putea deplasa dintr-un oraș în altul, familiile au devenit mai mici și mai mobile (Toffler 1984, 29).

Se poate observa că principiul standardizării, de obicei asociat cu producția în masă, a fost aplicat asupra aproape fiecărui aspect al vieții: învățământul de masă, treptele de salarizare, programul de lucru, stilul de viață. Industrializarea a fragmentat societatea în piese centralizate: fabrici, școli, sindicate, închisori, spitale. A compartimentat cunoștințele în discipline specializate, locurile de muncă în sarcini fragmentate și familiile în unități mai mici, transformând viața și cultura comunității (Toffler 1984, 62).

2.3.4. Controlul numeric și computația

Omenirea s-a folosit de capacitatea numerelor de a abstractiza în scopul de a reglementa, pentru a da o rutină și a cuantifica ceea ce era anterior aleatoriu, neregulat și calitativ. Astfel, cartografia și matematica mișcării planetare au regularizat spațiul, iar calendarul a standardizat și ordonat timpul. Sistemul psihologic nu a mai era sincronizat cu ritmul soarelui, al anotimpurilor, cu morfogeneza, ci a devenit condiționat de numere (Moe 2010, 155).

Pe de o parte, controlul numeric și-a făcut apariția odată cu integrarea abstractizării în mașinile de producție, prin utilizarea cartelelor perforate, pentru creșterea eficienței și pentru gestionare. Creșterea importanței informației, a transferului acesteia și dezvoltarea aplicațiilor de control numeric au determinat dezvoltarea computerului. Controlul și administrarea datelor au devenit posibile prin computație. În perioada industrială, numerele au devenit garanția eficienței prin standardizarea mijloacelor de producție, iar controlul întregului proces care s-a dezvoltat a fost și el realizat prin puterea numerelor. Dacă perioada preindustrială se baza pe ordinea naturală, industrializarea s-a fondat pe controlul și predicția naturii (Davis 1987, 20). Totuși, accentul pus pe control a legat dezvoltarea tehnologică strâns de domeniul militar și de producția de armament.

Computația își are originea în primele mașini mecanice de calcul din secolul al XVII-lea inventate de către Wilhelm Schickhardt și Blaise Pascal. Câteva decenii mai devreme, filozoful Gottfried Leibniz și-a închipuit o mașină

capabilă să multiplice. Mașinile proiectate de Babbage, chiar dacă nu au fost finalizate, au introdus principii esențiale care au contribuit la dezvoltarea computerului.

Creșterea volumului a condus la apariția corporațiilor, care s-au confruntat cu probleme de control, datorită cantității mari de informații ce trebuiau procesate. Aceeași problemă, legată de gestionare, o avea și administrația publică. Ca urmare a creșterii populației în SUA, pentru realizarea recensământului din 1890, inginerul Herman Hollerith a inventat un tabulator electric, o mașină care utiliza electricitatea pentru a citi date de pe cartele perforate și a genera statistici (Picon 2010, 17-18). El a fondat Tabulating Machine Company, care ulterior a fuzionat cu alte companii pentru a deveni IBM.

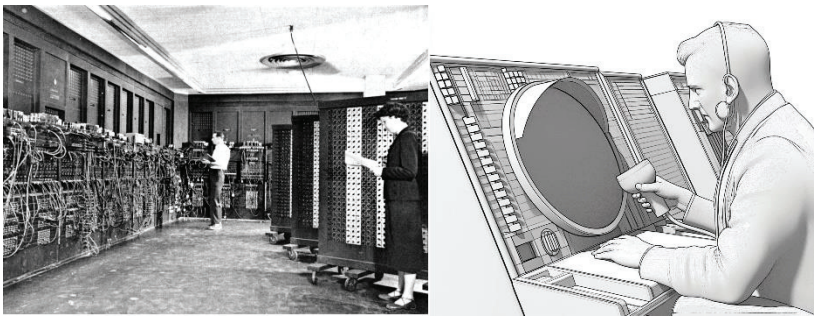
Cele mai importante progrese în computație au avut loc în timpul celui de-al Doilea Război Mondial. Primul calculator, ENIAC[4], a fost realizat în 1945 în SUA pentru calculul tabelelor balistice, a fost utilizat ulterior la dezvoltarea bombei cu hidrogen (Picon 2010, 27). În Anglia, calculatoarele electronice contribuiau la decriptarea mesajelor germanilor în timpul războiului. Producția militară a constituit domeniul în care controlul numeric a cunoscut cea mai avansată dezvoltare. Sistemul American de Management și Producție, care a asigurat succesul Statelor Unite în producția în masă, a fost inițial fondat de către departamente din armata, având ca scop dezvoltarea armamentului. Astfel, acesta a devenit un model de producție în care capitalul, securitatea, cercetarea și industria militară se intersectau. Dorința de control s-a manifestat, în acest caz, prin strategii preventive. A apărut noțiunea de „război permanent pentru pace permanentă", care a alimentat dezvoltarea tehnologică din perioada celei de-a doua revoluții industriale(Moe 2010, 158).

În timpul Războiului Rece, computerul a avut un rol important în operarea sistemelor de arme din ce în ce mai complexe. SAGE[5], realizat în anii 1950 pentru controlul radar, a fost utilizat în scopul prevenirii unui atac nuclear sovietic (Picon 2010, 28). Dacă inițial controlul numeric era implementat prin mecanizare, odată cu începutul Războiului Rece acesta s-a orientat tot mai mult către electronică. Cererea crescută pentru avioane de luptă și

[4] din engleză Electronic Numerical Integrator and Computer

[5] din engleză Semi-Automatic Ground Environment

armament a atras investiții majore, ducând la realizarea de către MIT a primului sistem CAD-CAM[6], adică a primului program de desen, capabil să transmită direct informația pentru producție primei freze cu control numeric (Reintjes 1991, 134-40).



(a) (b)

Figura 10. (a) ENIAC la Laboratorul de Cercetare Balistică din Philadelphia (*ENIAC* 2014). imagine liberă de drepturi. (b) Camera de control a sistemului SAGE, monitor interactiv (*SAGE* 1950). Ilustrație realizată de autor.

În domeniul militar, creșterea performanței era esențială pentru sporirea complexității armelor. Viziunea strategică a Războiului Rece se baza pe analogia dintre creierul uman și computer, interpretând omul ca pe o mașină, care și-ar putea mări performanța printr-o legătură mai strânsă cu mediul tehnologizat al computerului (Picon 2010, 28). Această abordare a condus la apariția ideii de hibrid om-tehnologie, deschizând astfel discuția despre cyborg. În această perspectivă, viziunea asupra tehnologiei este una agresivă, cyborgul militar este configurat pentru a identifica ținte, a executa misiuni și a respecta ordine, fiind conceput pe principiul eficienței maxime. O condiție a eficienței era renunțarea la lumea interioară a individului, ceea ce permitea o adaptare optimă la organizarea ierarhică specifică armatei. Aspectele comportamentale subiective erau eliminate, probabil pentru că se dovedeau mai greu de evaluat și exprimat într-un mod cuantificabil, prin numere. În acest sens, cyborg-ul militar nu

[6] din engleză CAD - Computer Aided Design și CAM - Computer Aided Manufacturing

reprezintă o simbioză între om și tehnologie, ci întruchipează idealul controlului absolut (Picon 2010, 30).

În această societate a informației, individul se definește atât prin modelele de comportament colectiv, cât și prin trăsături personale distinctive. Acesta a fost supus unei game extinse de măsurători cantitative, pentru a realiza statistici ale comportamentului fizic, psihologic și social. Această tendință de cuantificare a comportamentului uman se înscrie în logica controlului numeric. Motivația realizării acestor măsurători era de natură economică: identificarea profilului cumpărătorului pentru a produce bunul corespunzător preferințelor sale. Totuși, s-a constatat că descrierea comportamentului uman nu poate fi realizată exclusiv prin atribute cantitative. Această limitare a predictibilității a alimentat fascinația pentru androizi, percepuți ca entități complet previzibile (Picon 2010, 22). Androidul păstrează înfățișarea umană, dar este un robot, eliminând aspectele imprevizibile ale comportamentului uman.

La nivelul arhitecturii și urbanismului, importanța informației și a transferului acesteia a fost recunoscută inițial în raport cu infrastructurile de circulație și transport, dezvoltate odată cu apariția automobilului. Ulterior, revoluția informației și comunicării a creat un nou tip de spațiu: camera de control, unde starea unui sistem sau a unei organizații este vizibilă persoanei aflate în poziție de control, prin intermediul panourilor electrice, diagramelor și graficelor (Picon 2010, 20).

Evoluția rolului omului în procesul de producție a parcurs mai multe etape: de la artizan - simultan creator și producător la operator al mașinilor, apoi la supraveghetor al echipamentelor care procesează volume mari de date. Panourile de comandă sunt similare cu ecranele computerelor, întrucât constituie o reprezentare abstractă, mediată și codificată a proceselor în desfășurare (Picon 2010, 21). În acest sens, substituția informației cu imaginea constituie un pas important către digitalizare. În domeniul producției de bunuri, computerul nu doar că va proiecta produsul pe care clientul îl dorește, ci va selecta procesele de fabricație, va atribui mașinile, va secvența procesul de materializare în etapele necesare și va genera programele pentru mașinile cu control numeric (Toffler 1984, 275). Astfel, computerul are potențialul să înlocuiască omul și din poziția de control în care a ajuns după automatizarea producției.

Industrializarea a generat nevoia de coordonare a producției realizată în mai multe locuri. Pe fondul schimbărilor rapide de scară, a apărut

necesitatea de procesare a unor volume mari de date, ceea ce a generat o societate orientată spre informație, care a precedat dezvoltarea computerelor. În societatea agricolă, informația era transmisă în mod preponderent oral, însă acest model s-a schimbat în perioada industrială, când cantități mari de informație trebuiau consemnate în scris și eficient transmise (Toffler 1984, 33). Fără documente, coordonarea tranzacțiilor de piață complexe și menținerea unei informări de-a lungul lanțului de aprovizionare ar fi fost imposibile. In cadrul acestui sistem riguros organizat, era nevoie de o metodă de comunicare care să confere legitimitate tuturor operațiunilor. Contabilitatea, facturile, cecurile și programele au devenit instrumente vitale de management în organizarea unei afaceri. În acest context, s-a dezvoltat o birocrație structurată pentru coordonarea relațiilor comerciale, generând o cultură comercială a contractului (Rifkin 2013, 110). Această tranziție de la material la informație este legată de transformarea procesului de producție în ansamblu.

Odată cu a doua revoluție industrială, în statele dezvoltate, numărul lucrătorilor implicați în producția fizică a scăzut, în timp ce tot mai mulți s-au orientat către gestionarea datelor și activități nemateriale. Această creștere a activităților mai elevate, de natură tehnică și administrativă a fost interpretată ca o orientare către abstractizare, favorizând dezvoltarea computației. Totuși, creșterea forței de muncă din afara producției a reprezentat, inițial, o prelungire a modelului industrial. Deși munca abstractă a crescut în detrimentul celei concrete, procesele de organizare au rămas similare, iar birourile contemporane păstrează încă modelul fabricii industriale, bazat pe fragmentarea și repetitivitatea sarcinilor (Toffler 1984, 187).

Pe măsură ce producția s-a accelerat în lumea industriala, aceasta a fost mutată în țările în curs de dezvoltare. Metodele celui de-al doilea val au fost exportate din națiunile bogate către cele sărace. Cu toate acestea, din motive strategice și economice, națiunile dezvoltate nu își permit să cedeze integral producția. Imaginea unei lumi dezvoltate care se bazează exclusiv pe producția nematerială, lăsând restul globului să fabrice bunuri materiale nu este de dorit. Prin urmare, aceste state continuă să producă bunuri strategice esențiale, dar cu un număr redus de lucrători (Toffler 1984, 182). În acest context, metodele de fabricație se transformă, accentul deplasându-se către dezvoltarea tehnologică, pentru a menține controlul asupra pieței globale. Informația și difuzarea acesteia își au

originea în inventarea tiparului. Însă, odată cu dezvoltarea mijloacelor de comunicare, a poștei, telefonului, telegrafului și radioului, din perioada celei de-a doua revoluții industriale, a fost adusă în prim-plan și i-a fost și i-a fost recunoscută valoarea. Cultura contemporană a devenit posibilă datorită apariției, la sfârșitul secolului al XIX-lea și începutul secolului al XX-lea, a unei societăți bazate pe informație, fenomen care a coincis cu a doua revoluție industrială (Picon 2010, 16, 19).

Informația și difuzarea acesteia își au originea în inventarea tiparului. Însă, odată cu dezvoltarea mijloacelor de comunicare – poștă, telefon, telegraf și radio – în perioada celei de-a doua revoluții industriale, informația a fost adusă în prim-plan și i-a fost recunoscută valoarea strategică. Cultura digitală contemporană a devenit posibilă datorită apariției, la sfârșitul secolului al XIX-lea și începutul secolului al XX-lea, a unei societăți bazate pe informație, fenomen care a coincis cu a doua revoluție industrială (Picon, 2010, pp. 16, 19). A apărut, de asemenea, nevoia de transmitere a informațiilor de la sursă către milioane de persoane, printr-un nou mijloc de distribuție, nu al bunurilor materiale, ci informațiilor. Astfel, s-au dezvoltat mass-media și publicitatea în ziare și la radio, filmele și televiziunea, toate reproducând principiul de bază al fabricii: transmiterea unor mesaje identice către milioane de receptori, similar producției de obiecte standardizate pentru utilizare în milioane de gospodării. Fără acest sistem vast și eficient de distribuire a informației, civilizația industrială nu ar fi putut funcționa în mod fiabil (Toffler 1984, 36).

A doua revoluție industrială a extins alfabetizarea la scară largă, a creat sisteme riguroase de arhivare a documentelor comerciale și a construit mii de biblioteci și muzee. Prin dezvoltarea acestor instituții ca mecanisme de ordonare, stocare și diseminare a informației, au fost depășite limitele memoriei individuale. Memoria socială s-a mutat astfel în afara minții umane, extinzându-se dincolo de limitele sale anterioare. Creșterea acestui depozit de cunoștințe cumulative a accelerat procesele de inovare și transformare socială, oferind civilizației cea mai rapidă și sofisticată cultură cunoscută până atunci. Această bază de date colectivă este activă și extensivă, și continuă să aibă efecte dinamice, stimulând apariția unor noi forme de energie culturală (Toffler 1984, 177-78).

Capitol 3.

VIRTUAL ȘI MATERIAL

3. VIRTUAL ȘI MATERIAL

3.1. Abstractizare prin digital

3.1.1. Tehnologie. Matematică. Cod.

Termenul de „tehnologie" nu este frecvent întâlnit înainte de secolul al XX-lea, și în limba engleză, era asociat domeniului științelor tehnice[7], orientate către manufactură și legate de obținerea unui produs (Stratton și Mannix 2005, 190-92). Noțiunea a câștigat notorietate odată a doua revoluție industrială, când a fost folosit pentru a descrie ansamblul de unelte și mașini, mijloace, procese, abilități și idei folosite în scopul de producție (Schatzberg 2006, 486), definiție care a rămas în mare parte valabilă.

Astfel, aspecte definitorii ale tehnologiei sunt uneltele folosite pentru a produce bunuri și servicii cu scopul de a satisface nevoile societății. Tehnologia se dezvoltă pornind de la o nevoie socială, dar și din dorința de control asupra aspectelor care ne influențează viața. Ea presupune, astfel, și o legătură între regulile științei și cele ale economiei, care definesc modele de organizare de management (Davis 1987, 5). De aceea, tehnologia poate fi văzută ca aplicarea unor seturi de reguli, atribuite aspectelor legate de sistematizare și reglementare, dar și ca mijloc de îmbunătățire a unei stări de fapt prin inovare. Chiar dacă pare să definească un proces rigid, poate conduce către dezvoltarea creativă, atât a uneltelor, cât și a utilizării lor.

În perioada modernă, tehnologia a căpătat aspecte legate de control și productivitate. Astfel, tehnica modernă „cere cu insistență livrarea" și „extrage" prin constrângere (Heidegger 1995, 140), urmărind valorificarea resurselor la potențial maxim și fără a mai include o componentă de îngrijire și întreținere. Orientarea modernă către eficiență și stăpânire, mediate prin tehnologie, a condus către studierea termenului de *technê*, cu sensul său originar din greaca veche.

[7] din engleză *useful arts*, care se ocupau cu dezvoltarea abilităților practice de manufactură și meșteșugărit.

Grecii folosesc același *technê,* atât pentru a caracteriza meșteșugul cât, și arta, iar meșteșugarul și artistul purtau același nume: *technites*. Totuși, această suprapunere terminologică nu ar trebui să conducă direct la echivalarea proceselor creative cu meșteșugul. Pentru Heidegger, *technê* nu reprezintă o performanță practică, iar semnificația sa nu poate fi redusă la tehnologie, meșteșug sau artă (Leach 1997, 120, 121). Termenul are înțelesul de „scoatere din ascundere" a ceea ce există deja, fiind un mod particular de cunoaștere și de relevare, și nu o creație din nimic sau o simplă acțiune de a face (Caciuc 2007, 335).

Termenul a fost preluat de mișcarea neoraționalistă din Italia anilor 1960, ca reacție împotriva ideii de geniu creator promovată de modernism. În această interpretare, t*echnê* era orice formă de cunoaștere cu propriul sistem de reguli, care se dobândesc prin învățare, presupun îndemânare și pot conduce la inovare. În aceste condiții, arhitectura devenea un act productiv sistematizat, guvernat de reguli, iar, lipsită de exprimarea creativă a proiectantului, se transforma într-o convenție (Turan 1998, 2). Astfel, prin excluderea creativității și subiectivității arhitectului, *technê* rămânea a o aplicare rigidă și dependentă de reguli.

O altă interpretare unidirecțională asupra rolului tehnologiei în arhitectură, dezvoltată în perioada postmodernă, a fost estetica *hi-tech* care încerca să legitimeze tehnologia ca valoare estetică în sine (Caciuc 2007, 342-47). În această perspectivă, știința era cea care producea estetica (Baudrillard și Nouvel 2005, 21). Conștientizând caracterul superficial al acestei abordări, practica arhitecturală a căutat alte moduri de implicare a tehnologiei. Astfel, Renzo Piano și Richard Rogers afirmau că tehnologia era legitimă atâta timp cât se folosește în slujba protejării mediului (Piano și Richard Rogers 2006, 252-53). În această logică, au început să fie speculate aspectele legate de performanță, eficiență și economie. Însă principiile, au rămas, în mare parte, aceleași ca în perioada modernă: atingerea performanței prin utilizarea de elemente prefabricate inteligente și flexibile, exploatarea maximă a materialelor din punct de vedere structural, prevenirea risipei energetice și prin reciclare.

Din păcate, până recent, abordarea arhitectului asupra tehnologiei, moștenită poate din perioada modernă, s-a concentrat pe ce face tehnologia (Heidegger 1995, 167), nu pe ce ar putea să facă. Aceasta presupune că arhitectul s-a orientat către ceea ce poate realiza în limitele tehnologiei actuale disponibile. Constrâns să utilizeze tehnologia standard existentă, proiectantul a încercat să își afirme controlul prin stăpânirea

capacităților uneltelor existente, proiectând în mod specific pentru acestea. Prin acest proces, posibilitățile și avantajele oferite de o unealtă standard devin, în cele din urmă, convenienţă prin utilizarea repetată. Această relație dintre arhitect, tehnologie și proiectare s-a transformat într-o dispută asupra menținerii sau recâștigării controlului asupra procesului de proiectare. Proiectantul este constrâns de capacitățile uneltelor, care sunt impuse mai departe în proiect; astfel, tehnologia este folosită în sensul exercitării stăpânirii, care duce direct la puterea de a dispune.

Matematica a fost caracterizată atât ca fundament al arhitecturii, cât și ca simplă unealtă; ea poate fi un mijloc prin care arhitectul poate deține controlul, dar poate fi și limitativă, în sensul de restrângere a puterii absolute. Matematica poate părea un mijloc care reglementează și face posibil controlul și coordonarea, încurajând standardizarea înaintea inventivității, dar uneltele sale pot fi mobilizate pentru a explora necunoscutul și pot fi folosite cu scopul de a inventa (Picon 2011, 30-31).

Considerând că lumea a fost creata prin stabilirea regulilor de ordine și proporție (Bossuet 1722, 37-38), ordinele clasice pot fi văzute ca un mijloc de control, iar prin principiile lor arhitectul deține puterea asupra proiectului. Din această perspectivă, proporțiile, ca reguli matematice, pot fi considerate fundamentale pentru practica de arhitectură, reprezentând expresii ale unei puteri demiurgice (Rykwert 1981, 65-66). Pe de altă parte, atât Omul Vitruvian, cât și Modulorul lui Corbusier raportează geometria la om, explorând subiectivitatea prin geometrie (Hight 2007, 55-69). Din această perspectivă, scopul arhitecturii a fost acela de a crea o lume proporțională cu omul, iar proporțiile nu mai fac trimitere la control, ci la moderație (Picon 2011, 30).

Din nevoia de supraviețuire sau datorită setei sale de cunoaștere, omul a căutat întotdeauna să-și construiască proteze care să-i potențeze forța fizică, să îi mărească capacitatea senzorială sau să îi amplifice funcțiile cerebrale: memoria, judecata, prelucrarea informației, competența comunicațională (Marcus 2011a, 108). Computerul a fost adesea înțeles ca o extensie a minții sau o unealtă avansată de explorare logică. Antropologul francez Leroi-Gourhan urmărește progresul uman prin utilizarea de unelte tehnologice în *Le Geste et la Parole*. Acesta consideră că progresul uman a fost marcat de externalizarea treptată a funcțiilor, pornind de la primele unelte de prelucrare a materialelor brute, care extind capacitatea mâinii, până la externalizarea funcțiilor mentale prin

computer. Calculatorul poate fi înțeles ca o prelungire a minții, dar modifică în același timp și percepția noastră asupra obiectelor, prin extinderea domeniului senzațiilor (Picon 2005). Această viziune este posibilă prin hibridizarea fizicului cu digitalul. Computerul este o mașină care îndeplinește definiția lui Marx a uneltei artizanului, prin faptul că extinde și se adaptează la capacitățile de producție ale utilizatorului (Piore și Sabel 1984, 260-61).

Computerele nu sunt supraomenești sau magice, se descompun în părți și pot avea erori, uneori periculoase. Cu toate acestea, calculatoarele, în viitor, vor spori înțelegerea noastră în asupra interdependenței lucrurilor, ajutându-ne să sintetizăm datele din jurul nostru (Toffler 1984, 175). Calculatorul nu numai că ne ajută să ne organizăm sau sintetizăm în modele coerente ale realității, ci, de asemenea, extinde limitele posibilului. Computerul poate încuraja un alt mod de gândire, devenind un generator de noi teorii, idei, ideologii, intuiții artistice și progrese tehnice. Totuși, inteligența umană, imaginația și intuiția vor rămâne indispensabile și nu vor putea fi înlocuite de mașina.

Tehnologiile digitale au fost folosite inițial ca o proteză, nu în sensul înlocuirii implicării umane în proces, ci acționând ca un prelungitor, o extensie a abilităților umane. Astfel, calculatorul devine un asociat al inteligenței noastre, spațiu de desfășurare al imaginației și curiozității (Toffler 1984, 173). Gândirea algoritmică propusă de computer se insinuează în comportamentul nostru și în logica noastră , precum și în modul în care privim lumea, pornind inițial din postura de auxiliar, de proteză (Marcus 2011a, 112).

În domeniul arhitecturii contemporane, matematica oferă arhitectului atât controlul asupra modului în care se va construi clădirea, cât și un mijloc de a inventa. Toate tehnologiile digitale sunt bazate pe comanda numerică, dar la fel sunt și mijloacele de producție standardizată. Dacă, inițial, numerele au fost folosite pentru a controla și a reglementa, în prezent se explorează calitățile mediului computațional, care pot deveni generatoare de diversitate și creativitate.

Tehnologia nu este doar tehnică, ci o entitate activă care se transformă efectelor culturale noi și diverse (Feenberg 1999). Tehnologia, în acest sens, nu este o practică orientată spre eficiență, măsurată cantitativ, ci un set calitativ de relații care interacționează cu stimuli culturali (Rahim 2005, 179). Tehnologia digitală influențează procesul de proiectare a obiectelor,

care, la rândul lor, generează efecte asupra comportamentului uman și determină apariția unor unelte noi, capabile să modifice performanța. Computerul acționează asupra utilizatorilor săi, iar aceștia, prin interacțiunea cu el, exercită la rândul lor o influență asupra mediului înconjurător. Acest ciclu de efecte emergente influențează mediul cultural (Rahim 2005, 182).

Computerul este un mijloc care combină experiența și intuiția proiectantului cu raționamentul logic, iscusința cu raționalul. Calculatoarele ne ajută, ca unelte, să atingem un proces mai încărcat de semnificație, prin faptul că facilitează conturarea ideilor. Conceptele se materializează, nu le putem atinge încă, dar le putem vedea, analiza și modifica, însă cu alte unelte, diferite de cele manuale. Rolul vizualului a crescut datorită dezvoltării informaticii, prin extinderea posibilităților de aproximare a invizibilului prin vizibil (Marcus 2011a, 109) ceea ce a condus la definirea materiei prin abstract, prin cod.

În producția tradițională, meșteșugarul funcționează atât ca producător, cât și ca factor de decizie, verificând rezultatul. Atunci când este asistat de o unealtă, omul își păstrează aceste atribute, dar eforturile sale se concentrează și se intensifică. Totuși, când ne folosim de o unealtă, datorită caracterului ei specializat, putem îmbunătății aspecte pe care le adresează aceasta, dar nu neapărat întregul procesul, de aceea, uneltele digitale trebuie privite în relație cu utilizatorul lor. Interacțiunea cu computerele nu ar trebui să se concentreze exclusiv pe automatizarea operațiilor, ci pe abstractizarea meșteșugului (McCullough 1997, 63,83). În acest proces, matematica gestionează relația contradictorie dintre putere și moderație, dintre eficiență și creativitate (Picon 2011, 35).

3.1.2. Variabilitate și diferențiere în serie

Strategiile de producție din perioada industrială s-au bazat pe standardizare și prefabricare, urmărind principii de raționalizare: simplitate geometrică și componente identice produse în masă, menținând astfel o producție eficientă. Automatizarea excesivă și superspecializarea mașinilor au făcut procesul de producție mai puțin flexibil și incapabil să accepte schimbări rapide (Drucker 1990, 11). Această rigiditate nu mai condiționează producția digitală, deoarece mașinile controlate numeric se pot adapta pentru a produce elemente unice, cu forme complexe, la un cost rezonabil. Odată cu apariția noilor tehnologii, este posibilă realizarea unui număr tot mai mare de produse de calitate în loturi tot mai mici..

Varietatea nu mai compromite eficiența și economia de producție, iar procesele de proiectare și de fabricație au devenit mai flexibile datorită tehnologiilor digitale.

În concepția modernă, copiile identice și repetiția reprezentau un deziderat, iar variabilitatea era percepută ca un impediment. Totuși, arhitectura a fost întotdeauna un domeniu bazat pe elaborarea de proiecte personalizate, chiar și într-o societate a bunurilor produse în masă. Proiectele actuale caută variația ca reacție istorică asupra arhitecturii standard, generice, care poate fi plasată oriunde.

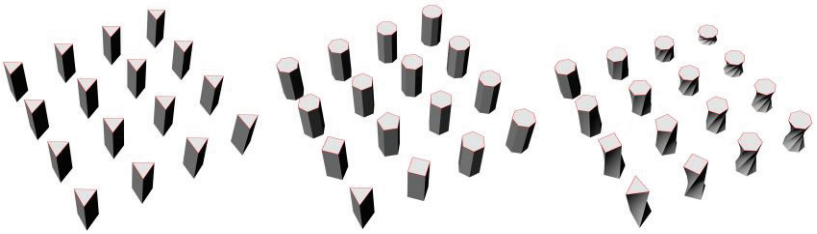
În contextul acestui discurs mediat de digital, principiile compoziționale considerate indiscutabile încep să fie privite ca fiind arbitrare. Dacă suprafețele curbe pot fi produse aproape la fel de ușor ca cele plane, geometria clasică pare să își piardă rostul. Dacă variabilitatea infinită este la fel de fezabilă precum modularitatea, atunci trama regulată, repetiția și simetria nu mai par justificate. Poate că există într-adevăr ceva fundamental în vechile vocabulare și reguli compoziționale, dar este posibil ca acestea să fie recunoscute în viitor drept convenții asociate unor capabilități tehnologice acum depășite. Formele complexe generate folosind algoritmi devin o alternativă dacă privim proiectele anterioare ca fiind compromisuri dictate de lipsa mijloacelor tehnologice. Totuși, formele libere nu trebuie create doar pentru că uneltele digitale permit acest lucru. Dacă singura calitate a uneltelor digitale este capacitatea de a fabrica orice tip de geometrie, abordarea devine reductivă și similară cu cea a producției în serie bazate exclusiv pe eficiență.

Practica actuală de arhitectură se concentrează asupra generării de spații complexe și eterogene, caracterizate de multiplicitate și variabilitate. Prin intermediul acestui limbaj comun, oferit de mediul digital, este posibilă integrarea mai multor niveluri de informație, care generează un sistem emergent în care datele colaborează și se influențează reciproc pentru a oferi un răspuns local. Astfel, variabilitatea este percepută ca un avantaj, datorită capacității sale de exprima un răspuns personalizat, spre deosebire de reciclarea și reutilizarea aceleiași soluții arhitecturale. Proiectele de arhitectură contemporane urmăresc obținerea unui răspuns specific, care să nu fie rezultatul direct al materializării formei și programului, ci generat de fiecare situație unică în parte.

Computația poate elibera arhitectura de repetarea soluțiilor standard, realizând trecerea de la proiectarea de obiecte adaptabile pentru cât mai

multe utilizări către proiectarea unor serii de obiecte unice (Spuybroek 2009, 7)). În acest sens, proiectarea se concentrează pe dezvoltarea unui sistem compus din relații între variabile, care se modifică permanent, testând limitele pentru a obține serii de răspunsuri diferite posibile.

Generarea unei forme prin procese matematice de calcul este strâns legată de conceptul de serie și repetiție. Astfel, putem distinge între o serie de elemente identice, o serie constantă și o serie continuă iterativă. Într-o serie de elemente în care diferențele care însoțesc fiecare repetare sunt liniare, este simplu de prezis următoarea geometrie, deoarece aceasta poate fi anticipată print-o ecuație matematică simplă. Într-o serie continuă sau iterativă, diferența dintre fiecare obiect din secvență este individualizată la fiecare repetare. Dacă diferența este produsul a trei sau mai multe variabile independente, schimbarea dintre fiecare iterație va fi neliniară și dificil de prezis fără ajutorul computației (Lynn 1999, 33).



(a) (b) (c)

Figura 11. (a) serie de elemente identice (b) serie cu o singură variabilă (c) serie cu trei variabile. Variație parametrică realizată de autor.

Procesul tradițional de căutare a formei se baza pe atingerea unui optim prin pași consecutivi. Mediul digital, în schimb, este un mediu de lucru dinamic, care operează cu un volum mare de informații și poate genera un număr foarte mare de variante, capabile să evolueze la nesfârșit (Picon 2010, 76). Prin proiectarea parametrică, nu mai este vorba despre un obiect singular, ci despre serii de obiecte. Formele arhitecturale par să fie din ce tot mai puțin entități statice și izolate. Softurile de modelare s-au transformat în softuri de generare formală, cu un mod de operare bazat pe calcul. Acestea produc o serie continuă de forme, variante geometrice obținute din deformare sau variație parametrică, în locul configurărilor

prestabilite. În acest context, forma devine un moment înghețat în procesul dinamic de generare (Picon 2010, 74).

Atitudinea asupra variabilității s-a transformat și este strâns legată de metoda de materializare. Când obiectele sunt realizate manual, variabilitatea inerentă procesului de producție generează diferențe și similarități între copii, iar identificarea se bazează pe asemănarea vizuală. Atunci când obiectele sunt produse mecanic, în serie, acestea sunt standardizate, iar recunoașterea se bazează pe identitate vizuală. În cazul obiectelor create și materializate digital, recunoașterea se fundamentează pe trăsături non-vizuale, pe algoritmi și pe modele ascunse (Carpo 2011, 4).

Mario Carpo consideră că lunga perioadă istorică, caracterizată de producția în masă, standardizare și copii identice, poate fi privită ca un interval închis între epoca manufacturii și mediul actual, marcat de tehnologii digitale. Astfel, orientarea către mediul digital poate fi interpretată ca o continuare a tradiției produsului manufacturat. Totuși este necesar să se facă o diferență între cele două. Chiar dacă atât obiectul manufacturat, cât și cel fabricat digital acceptă variația, capacitatea de a crea și produce variație și diferență în serie este specifică doar mediului digital actual (Carpo 2011, 11).

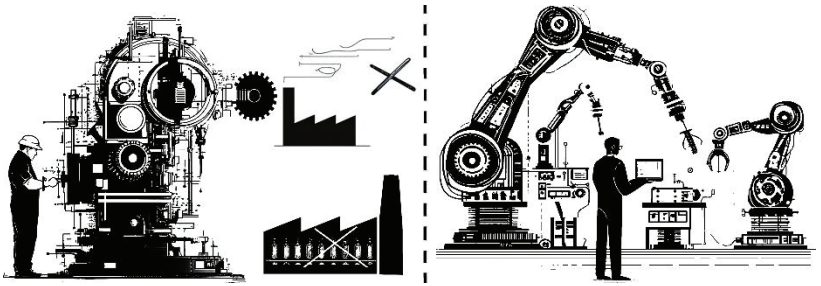


Figura 12. Tehnologiile digitale transformă modul de producție, prin trecerea de la industrial la personalizat. The Economist a realizat un raport, care abordează fabricația digitală din punct de vedere economic (Markillie 2012). Ilustrație realizată de autor.

Procesul de diferențiere poate fi astăzi programat și proiectat, astfel încât variabilitatea să devină parte integrantă a procesului de generare și producție a obiectului de arhitectură. Obiectele arhitecturale capătă

coerență prin fenomenul de diferențiere, prin variație în serie (Lynn 1993, 22-29).

Prin utilizarea aceluiași proces, tehnologia digitală are capacitatea de a genera variabilitate prin variație în serie. Pe de altă parte, procesul de producție își lasă inevitabil amprenta asupra obiectului final. Astfel, folosirea aceluiași proces, chiar dacă produce rezultate finale oarecum diferite, va genera obiecte care vor părea înrudite, ceea ce poate afecta intenția de proiectare de a obține individualități.

Utilizarea computației nu garantează în mod automat varietatea. Dobândirea abilității de a programa nu este un proces facil, iar realizarea unui algoritm complex, care să integreze aspecte conceptuale, de performanță și de fabricație, presupune o investiție considerabilă de timp și cunoștințe. Dacă scripting-ul este abordat doar ca o metodă de generare rapidă a variabilității, atunci se va utiliza același algoritm, cu diferențe minime, aplicat în situații diferite. În acest caz, rezultatele obținute vor fi diferite, dar în esență similare.

De asemenea, practica de arhitectură devine tot mai interesată de material și de procesele de materializare. Prototiparea rapidă, migrată din industria constructoare de mașini, joacă un rol important în acest proces. Prin adoptarea tehnologiilor digitale, conceptul poate fi testat pe parcursul întregului proces de proiectare. Această abordare oferă oportunitatea investigării procesului de design interactiv și a realizării de îmbunătățiri pe parcurs, prin testarea modelului intermediar. Astfel, se creează o legătură mai strânsă între virtual și material.

Compararea designului industrial cu logica de proiectare arhitecturală evidențiază abordări diferite. Producția în industriile auto, navală sau aeronautică se concentrează pe minimizarea costurilor de prelucrare a materialelor, prin crearea unei game de modele standard, obținute din componente unice produse în masă. În schimb, industria construcțiilor de clădiri încearcă să obțină proiecte unice, utilizând componente standard pentru reducerea costurilor. În ambele cazuri, rezultatul este o varietate de produse care exploatează standardizarea în moduri diferite pentru obținerea eficienței (Menges 2010, 52).

În domeniul construcțiilor, tehnologiile de fabricație au fost adoptate mai târziu decât în industriile aflate în legătură cu cele militare, care au beneficiat de investiții majore din partea armatei. În arhitectură, acestea au pătruns abia după ce au devenit mai accesibile, întrucât este un

domeniu în care au lipsit investițiile majore de capital. Problema personalizării a părut inițial un impediment, deoarece uneltele controlate numeric fuseseră dezvoltate tocmai pentru a asigura constanța și standardizarea. Un alt obstacol a fost lipsa competențelor arhitecților de a controla aceste unelte.

În paralel, industria bunurilor de consum a început, din rațiuni economice, să dezvolte un sistem care să încurajeze cererea. Acest sistem se orientează către realizarea de bunuri diferite pentru fiecare persoană, punând accent pe diferențele dintre indivizi, care trebuie totuși integrate în cadrul unui proces de producție automatizat. Diferențele nu sunt însă nelimitate, ci se încadrează între parametri ce permit menținerea eficienței de producție. Personalizarea în masă[8] este recunoscută ca un proces de producție care păstrează elemente atât din producția de masă, cât și din meșteșugul tradițional (Pine II 1993, 52). Ea combină caracterul unic al obiectului realizat manual cu eficiența producției în masă. Acest concept a devenit o alternativă la prefabricare, propunându-și să ofere bunuri personalizate pentru toți, fără creșterea costurilor de producție.

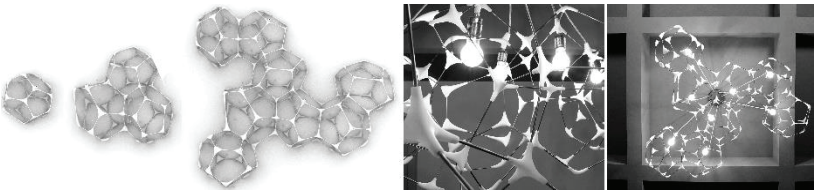


Figura 13. Folosirea unui soft de proiectare parametric permite personalizarea corpului de iluminat Aggregate Cells pentru fiecare utilizator. Algoritmul transferă informațiile din modelul digital mașinilor cu comandă numerică pentru producerea fiecărei articulații diferite. Componentele sunt realizate prin printare 3d cu plastic ABS si mai departe asamblate manual folosind și țeavă și accesorii din alamă. AGG_CELLS, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2015.

Totuși, această abordare nu ar trebui privită ca o regulă generală. Cuvântul „personalizat", pe lângă sensul comun de obiect unic, are și o semnificație mai subtilă: rar, dificil de obținut și, de obicei, rezultat al măiestriei unui

[8] t.n. din engleză *mass customization* ce se referă la realizarea de produse cu un cost scăzut dar adaptate dorințelor fiecărui utilizator.

meșteșugar. Tehnologiile digitale de proiectare și fabricație promit să dizolve această caracteristică, reducând „taxa" pe diversitate și pe unicitate.

Din acest punct de vedere, tehnologiile de producție non-standard pot tenta să fie aplicate în domenii în care nu sunt necesare, stimulând astfel cererea artificială și consumul (Carpo 2011, 102). Acesta nu reprezintă un proces general aplicabil, întrucât, în anumite cazuri variația și personalizarea nu sunt recomandate, fiind chiar nepotrivite. Generarea de forme distincte pentru același scop poate fi inutilă și risipitoare.

Chiar și în era digitală, unele obiecte vor continua să fie realizate manual, iar altele produse industrial. Personalizarea unui produs iconic este nejustificată, întrucât valoarea acestuia rezidă în permanența formei și în durabilitatea dobândită în timp. Valoarea acestuia a fost câștigată tocmai prin procesul replicării în serie. Într-o asemenea situație, trebuie acceptat că, deși suntem persoane diferite, personalizarea tuturor obiectelor pe care le folosim poate fi risipitoare. Astfel, unele obiecte trebuie să fie identice și produse în serie, altele să fie unice și realizate manual. Datorită fabricației digitale apare o a treia categorie, a obiectelor fabricate în masă care câștigă valoare prin personalizare. Personalizarea în masă reduce costul asociat unicității, dar poate adăuga valoare prin adaptarea la nevoile utilizatorilor.

În prezent, continuăm să apreciem obiectele realizate manual, însă valoarea lor pare să fie, în mare măsură, datorată modului în care au fost fabricate. Un alt factor care contribuie la această preferință este percepția personalizării ca alternativă la produsele realizate în serie începând din perioada revoluției industriale. În acest context, producția manuală, reutilizată cu o intenție nostalgică, devine o formă de copie, care imită un proces de realizare scos din contextul său istoric, social și tehnologic. Astfel de obiecte capătă valoare prin atitudinea nostalgică față de trecut, fără o înțelegere profundă a motivelor care au stat la baza fabricării lor și, mai ales, a modului în care au fost gândite și proiectate. În aceste condiții, valoarea lor se concentrează în principal pe procesul de producție.

Într-un mod similar, apreciem și obiectele realizate cu mijloacele tehnologice actuale, a căror valoare constă în primul rând în inovația procesului de fabricare și în principiul noutății pe care îl ilustrează. Dacă valoarea unui artefact se bazează exclusiv pe metoda prin care a fost produs, acesta se va devaloriza în scurt timp, fiind înlocuit cu un nou obiect

realizat prin mijloace tehnologice mai performante, datorită evoluției rapide a tehnologiei. Prin urmare, la valoarea unui obiect contribuie și alte caracteristici decât cele strict legate de metoda de producție.

În prezent, obținerea de obiecte variabile se concentrează pe interacțiunea dintre proiectant și uneltele de fabricație, valorificând atât abilitățile acestuia, cât și flexibilitatea uneltelor digitale. Uneltele sunt adaptate în funcție de proprietățile lor, determinând astfel un proces de producție flexibil, care generează obiecte unice. De asemenea, utilizarea tehnicilor și materialelor locale constituie un argument pentru adaptarea metodelor de proiectare și fabricație digitală la caracterul local. Astfel, uneltele nu mai sunt exclusiv automate și standardizate, ci devin flexibile și diferențiate, încurajând variabilitatea și specificitatea.

3.1.3. Urmele uneltelor virtuale

Modelele 3d concepute în mediul virtual au reprezentat un mijloc rapid și economic de previzualizare, deoarece pot simula o experiență cât mai apropiată de realitatea fizică, chiar și în absența obiectului material. De asemenea, spațiile virtuale, caracterizate printr-un tip de realism fotografic, pot substitui o materializare fizică imposibilă, pot reproduce spații existente sau pot imagina noi spații fără legătură directă cu realitatea fizică. Prin proiectarea computațională, modelele virtuale au început să influențeze puternic obiectului de arhitectură. Utilizarea uneltelor digitale în proiectare creează o legătură între fizic și virtual, conferind obiectelor calități specifice ambelor medii.

Conceptul de *faktura*, asociat constructivismului rus, derivă din ideea revoluției ruse conform căreia arta este rezultatul unor experimente de laborator, iar urmele rămase pe material trebuie să dezvăluie modul în care a fost realizat obiectul și să exprime geneza sa. *Faktura* nu se referă la suprafață sau la material, ci la procesul prin care obiectul a luat naștere (Gough 2005, 72). Acest concept include atât caracteristicile legate de generare, textură și material, cât și aspectele conceptuale și îndemânarea celui care concepe.

Așa cum o daltă tradițională, mânuită de meșter, lasă urme pe materialul finit, la fel se întâmplă și în cazul uneltelor digitale. Fie că este vorba de algoritmul utilizat sau de urmele fizice ale procesului de fabricație, un ochi educat poate identifica descendența obiectului final (Carpo 2011, 34). Utilizarea algoritmilor în proiectare presupune că procesul de gândire este

încorporat în proiect, ceea ce înseamnă că algoritmul utilizat lasă urme asupra obiectului finit, permițând deducerea parțială a procesului de concepție. Astfel, uneltele digitale de proiectare își lasă amprenta asupra obiectului, iar uneltele digitale de fabricație își pot imprima, la rândul lor, urmele în material - fie că este vorba de succesiunea straturilor subțiri dintr-un proces aditiv, de traseele frezei pe o suprafață tridimensională sau de decupajele complexe realizate de un laser pe o suprafață plană.

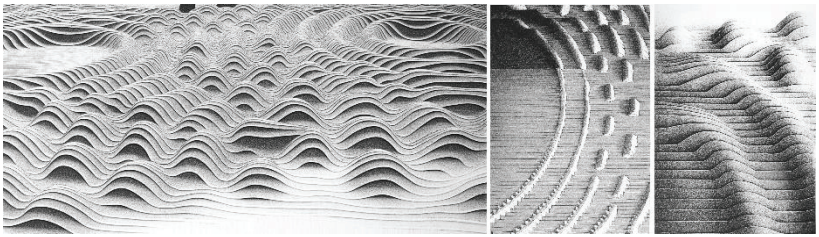


Figura 14. În cazul obiectelor fabricate prin frezare la router, modul în care mașina controlată numeric se mișcă rămâne imprimată pe obiectul final. (nervous system 2010). Ilustrație realizată de autor.

Proiectarea și producția digitală pot avea ca produs final și un alt fel de obiect, în care nicio astfel de urmă nu rămâne vizibilă. Aceste obiecte, lise și lipsite de îmbinări, pot fi considerate prototipuri ale tehnologiei digitale. Chiar dacă nu prezintă urme fizice martore procesului de producție, se poate argumenta că această continuitate a suprafeței este una dintre trăsăturile definitorii ale mediului digital. Pe ecranul computerului, formele par să plutească, lipsite de greutate și dimensiune. Această nouă tipologie formală contribuie la dificultatea de percepție a scării. Din perioada Renașterii, ochiul uman a fost antrenat să aprecieze lungimea, lățimea și adâncimea formelor rectangulare; în schimb, dimensiunea formelor libere este mult mai dificil de evaluat (Picon 2010, 124).

Obiectele fără urme vizibile ale metodei de fabricație, caracterizate prin suprafețe continue, imponderabile și imateriale, sunt specifice mediului virtual. Capabilitățile aproape nelimitate ale acestuia influențează percepția și ne determină să încercăm materializarea fizică a ceea ce se poate genera cu ușurință în mediul digital.

Atunci când interacționăm cu un spațiu arhitectural în mediul virtual, o facem indirect, prin intermediul ecranului computerului, sub forma unei

simulări. Deși această simulare poate fi extrem de realistă, ea trebuie privită cu o anumită distanță critică, având în vedere faptul că este inevitabil mediată de ecran. Perfecțiunea modelului virtual, mai ales observată din perspectivele sale cele mai avantajoase, poate fi seducătoare. Adesea, suntem atrași de continuitatea neîntreruptă a modelului digital și încercăm să reproducem în mediul real obiecte care păstrează exclusiv aceste caracteristici ale virtualului. La atingerea acestui ideal a contribuit și precizia uneltelor de fabricație digitală, capabile să reproducă fidel obiectul conceput în mediul virtual. Totuși, această oportunitate a condus inițial la diminuarea importanței articulației, accentuând continuitatea absolută în detrimentul îmbinării componentelor.

În domeniul virtual, orice obiect arhitectural poate fi conceput: articulațiile devin irelevante, suprafețele nu mai au grosime, sunt alăturate cu o precizie matematică. Nu este necesară luarea în considerare a schimbărilor de material, nu există elemente de prindere, iar detaliile nu mai sunt considerate esențiale. În lumea virtuală nu există constrângeri legate de condițiile climatice sau de gravitație, iar ideea de expresie sinceră a structurii își pierde sensul. Aceste obiecte, concepute exclusiv pentru mediul virtual, nu ar trebui transpuse în realitate — nu din cauza lipsei mijloacelor tehnologice de fabricație sau a motivației economice, ci ca reacție împotriva caracterului lor nefondat.

Această libertate, această absență a constrângerilor, proprie mediului virtual, alimentează neîncrederea în capacitatea sa de a media un proces profund ancorat în materialitate și în context, precum construirea arhitecturii. Dematerializarea este frecvent criticată și considerată incompatibilă cu arhitectura tradițională. În acest sens, distincția vehementă dintre fizic și virtual ar trebui nuanțată, deoarece materialul asimilează virtualul, iar virtualul integrează materialul (Mitchell 2009, 12).

Abordând tema „esteticii dispariției", Paul Virilio susține că toate tehnicile care urmăresc controlul sunt, în esență, tehnici ale dispariției. El pornește de la premisa că orice individ care caută puterea tinde să se izoleze, excluzându-se în mod natural din dimensiunile celorlalți (Virilio și Crary 2009, 23). În această logică, tehnologia digitală, prin procesul de virtualizare, apare în strânsă relație cu războiul, unde mașina de război tinde să fie transformată într-o „mașină de pace" totală, un instrument al pacificării absolute. În acest context, tehnologia exercită puterea prin dematerializare și printr-un control mediat, Virilio considerând că evoluția

tehnologică urmărește miniaturizarea extremă, reducerea progresivă până la nimic (Virilio și Crary 2009, 44-67). Această dispariție în virtual pune accentul pe control, pe puterea invizibilă, dizolvată în digital. Totuși, virtualul poate fi conectat cu materialul și transformat într-un mijloc de interacțiune cu mediul fizic, dar numai prin combinarea puterii de calcul a mediului digital cu creativitatea umană.

O altă critică formulată de Virilio vizează importanța instantaneului, în care momentul capătă semnificație prin mobilitatea extremă. Astfel, momentul devine o percepție iluzorie a stabilității, iar arhitectura riscă să își piardă spațialitatea, materialitatea și dimensiunea distanței odată cu apariția acestei temporalități imediate (Virilio și Crary 2009, 108). Această observație se aplică mai ales simulărilor dinamice din practica arhitecturală, orientate spre crearea unei imagini idealizate a proiectului, prin reprezentări virtuale realiste. În proiectarea computațională, însă, dinamica rămâne un aspect important, întrucât presupune generarea de variante și secvențe, din care sunt selectate momentele relevante în funcție de diferite criterii prestabilite. În acest proces, capacitatea de revenire asupra sistemului este fundamentală: fiecare moment este complet definit, poate fi reanalizat și reprezintă rezultatul suprapunerii mai multor date. Modelul virtual devine, astfel, o suprapunere de criterii reale, în legătură cu contextul fizic, capabil să genereze familii de soluții într-un proces dinamic.

Baudrillard și Nouvel abordează, la rândul lor, tema dispariției, însă o interpretează ca rezultat al procesului prin care o formă se dizolvă în alta, având loc o metamorfoză. În acest context, dispariția nu se mai referă la integrarea într-o rețea, unde fiecare element devine clona sau metastaza altuia, ci la o înlănțuire de transformări, în care fiecare formă dispare pentru a se continua într-o alta, iar totul implică propria sa dispariție (Baudrillard și Nouvel 2005, 24). Această tranziție graduală, orientată spre continuitate, are efectul de a dilua limitele, ceea ce poate conduce la pierderea identității elementelor.

Conceptul de continuitate, prezent în discursul arhitectural contemporan, este adus în prim-plan de Greg Lynn în 1993, odată cu teoria pliului, care promovează utilizarea curbelor și a suprafețelor libere pentru a realiza o trecere lină între forme, ca alternativă la colajul și ruptura deconstructivistă (Picon 2010, 64). În multe cazuri, calculatorul servit mai degrabă ca mijloc de materializare formală directă a unui concept. Totuși, computerele nu sunt unelte care impun forme și nici nu au preferințe

estetice, putând fi utilizate atât pentru generarea volumelor rectangulare, cât și a suprafețelor libere (Carpo 2004, 65).

De asemenea, componentele similare, care evoluează gradual din una în cealaltă, sunt supuse criticii asociate ideii de dispariție. Aceste elemente, deși similare, sunt fiecare unice și exprimă ideea dinamică de evoluție. În acest sens, procesul pare unul de transformare continuă, în care contrastul se estompează, iar obiectele singulare, prețuite de Baudrillard și Nouvel, nu mai apar.

O trăsătură distinctivă a obiectelor generate digital este prezența unui număr neobișnuit de mare de elemente variabile, dispuse cu precizie și caracterizate printr-un nivel sofisticat de detaliu, aplicate simultan la diferite scări de compoziție. Artefactele astfel realizate nu prezintă doar caracteristicile lumii materiale și a legilor sale fizice — precum gravitația sau proprietățile intrinseci ale materialului — ci încorporează și regulile lumii imateriale, proprii logicii digitale, cum ar fi exprimarea procesului de generare și a calculului precis (Gramazio și Kohler 2008, 7). Proiectarea în mediul digital poate intensifica particularitățile materiale, conferind obiectului coerență structurală și formală: acesta nu apare ca o textură sau ca o suprafață, ci este conceput în ansamblu, cu accent pe articulare, detaliu și variabilitate.

Dacă obiectele modelate în mediul virtual se vor construi în realitate acestea trebuie să răspundă constrângerilor, să anticipeze procesele de producție și materialele folosite, spre deosebire de cele care vor rămâne în mediul virtual. Mediul virtual nu dispune în mod natural de constrângerile fizice, dar are capacitatea de a le reproduce și de a genera un obiect de arhitectură informat și sensibil la contextul său. În ultima perioadă, depășind fascinația inițială față de potențialul nelimitat al digitalului, arhitecții tind să intervină activ pentru a transforma și adapta noile competențele dobândite la practica arhitecturală. Totodată, sunt din ce în ce mai conștienți de importanța materializării obiectului arhitectural, și încep să întrezărească potențialului creativ pe care uneltele de fabricație digitală pot să-l ofere.

3.2. Evoluția sistemelor CAD

În prezent, computerul ascunde complexitatea matematicii prin efectele vizuale afișate pe ecran. În practica arhitecturală, rolul matematicii a fost preluat de sistemele CAD, utilizate cu presupunerea că software-ul va

gestiona integral calculele. Robert Aish identifică trei etape majore în evoluția CAD: desenul 2D, BIM și proiectarea computațională (Aish 2013, 40-41). Implicarea computerelor în practica de arhitectură s-a concentrat, inițial, pe componenta tehnică, vizând obținerea unor rezultate imediate în plan comercial. Din acest motiv, investițiile au fost direcționate în domeniul cercetării uneltelor de desen (Burry 2011, 17). În schimb, domeniul cercetării uneltelor de proiectare este unul mai puțin specific, care nu ar fi avut rezultate imediate pentru a justifice investiția. Primele unelte de desen digitale, dezvoltate în cadrul sistemelor CAD, nu erau orientate spre proiectare, ci spre reprezentare, oferind mediul virtual în locul planșelor, dar replicând aceleași operații.

Înlocuirea hârtiei și a creionului cu ecranul computerului și cursorul a fost percepută, pe de o parte, ca o modalitate de a păstra autonomia profesiei, prin păstrarea metodelor și convențiilor specifice acesteia. Totuși, replicarea în mediul digital a desenului 2D a condus la ignorarea potențialului creativ al uneltelor computaționale. În prezent, practica arhitecturală utilizează simultan toate cele trei sisteme CAD, care se suprapun funcțional, însă doar BIM și proiectarea computațională exercită o influență directă asupra procesului de proiectare.

Digitalizarea arhitecturii, care inițial a condus la îndepărtarea matematicii din procesul de proiectare, este astăzi responsabilă pentru reînnoirea interesului față de aceasta. Această revenire se explică, în parte, prin eșecul de a realiza un flux continuu între CAD, CAE și CAM[9]. Matematica a redevenit o componentă esențială a procesului de fabricație (Cache 1998, 67). Prin computație, informațiile proiectului sunt traduse în date, conectate în structuri algoritmice, procesate și, în cele din urmă, transmise uneltelor de fabricație digitală, care produc obiectul fizic. Totuși, acest proces nu poate fi redus la simpla apăsare a unui buton de către arhitect (Scheurer și Stehling 2011, 72).

3.2.1. Building Information Modeling (BIM)

Trecând treptat printr-un proces de distanțare față de execuția propriu-zisă a construcției, arhitectul a ajuns să își comunice intenția creatoare prin desene bidimensionale, care sunt ulterior preluate și interpretate de către

[9] Computer Aided Design-CAD, Computer Aided Engineering-CAE, Computer Aided Manufacturing-CAM

constructor. Aceste desene oferă o informație, care are intenția de a rezolva atât detalii particulare, cât și de a definii caracteristicile generale ale clădirii. Astfel, arhitectul are o viziune globală asupra clădirii, păstrată în imaginația sa, pe care o comunică părților implicate prin intermediul unor reprezentări locale, devenite standard. Acest lanț de comunicare între proiectare și execuție lasă însă loc pentru interpretarea subiectivă a numeroase aspecte ale construcției.

Pentru a facilita comunicarea cu beneficiarii sau pentru a transmite un anume tip de informații colaboratorilor, arhitectul trebuie adesea să realizeze diverse reprezentări bidimensionale sau tridimensionale ale clădirii. În practica tradițională, arhitecții folosesc un set de desene 2D ca documentație de autorizare sau execuție, alte seturi 2D pentru prezentări adresate clienților, precum și un model 3D pentru vizualizări. Fiecare linie desenată este trasată manual de către arhitect: o dată în plan, o dată în fațadă, o dată în secțiune și din nou în modelul tridimensional. Orice modificare adusă proiectului trebuie apoi implementată în mod repetat în toate aceste reprezentări, ceea ce presupune un proces consumator de timp și predispus la erori.

Building Information Modeling (BIM) reprezintă un model digital complex al intenției de proiectare care, pe lângă descrierea geometrică tridimensională a elementelor constructive, are asociate și caracteristici fizice și funcționale ale acestora. Astfel, BIM nu este doar un model tridimensional utilizabil pentru vizualizare, ci un sistem integrativ ce reunește date provenite de la toate specialitățile implicate în proiect. Prin această abordare, BIM reduce ambiguitatea, diminuează erorile, mărește controlul arhitectului și, nu în ultimul rând, optimizează componenta economică a investiției (Pittman 2005).

Atât proiectarea, cât și industria construcțiilor, trebuie să implementeze un grad mai ridicat de relaționare și integrare a cerințelor și al elementelor constructive în ansamblul unei clădiri. Această schimbare implică însă investirea unui timp și efort considerabil pentru coordonarea și gestionarea volumului tot mai mare de informații conținute în proiect.

Principalul avantaj al acestui concept este faptul că informațiile întregului proiect constituie o bază de date, care poate fi ușor modificată, actualizată și transferată între diferitele specialități ale echipei de proiect. Prin intermediul BIM, arhitectul transpune proiectul într-un model tridimensional, îmbogățit cu multiple straturi de informații referitoare la

funcțiuni, materiale, compoziția elementelor constructive și care poarta caracteristici intrinseci dimensionale și cantitative. Odată modelată, această informație poate fi extrasă și afișată selectiv, în funcție de necesitate. În acest context, reprezentările bidimensionale tradiționale devin un produs secundar al modelului, o radiografie a clădirii virtuale, care este regenerată în mod automat cu fiecare schimbare adusă modelului global.

Asocierea elementelor volumetrice cu informații privind materialele permite modelului BIM să genereze rapid evaluări cantitative în orice etapă a proiectării. Această capacitate de extragere automată a datelor poate reduce semnificativ timpul necesar pentru obținerea de rapoarte sau liste de cantități, esențiale în evaluarea economică a proiectului, și constituie un avantaj major în primele faze de proiectare, când aceste informații pot fi actualizate instantaneu.

Prin utilizarea unui singur model global, în care sunt integrate modelele realizate de toate specialitățile și care elimină necesitatea redesenării elementelor constructive la fiecare schimb de informații între parteneri, se obțin reduceri semnificative ale timpului de proiectare și se asigură o mai bună coordonare a specialităților.

Modelarea tridimensională completă a tuturor elementelor conduce la o precizie sporită în proiectare și facilitează identificarea timpurie a problemelor ce trebuie soluționate de echipa implicată. Prin intermediul BIM, arhitecții construiesc clădirea mai întâi în mediul virtual, ceea ce le permite să comunice intenția arhitecturală încă din primele stadii de proiectare conceptuală, să partajeze informații precise în format tridimensional cu partenerii de proiect și să coordoneze mai eficient întreaga activitate de proiectare (Anton și Tănase 2014, 24)

Tehnologia BIM poate fi utilizată și pentru pre-vizualizarea întregului proces de construire printr-o simulare tridimensională relaționată în timp, în care elementele constructive sunt adăugate în secvența lor logică de execuție. Această simulare are rolul de a evidenția punctele-cheie ale etapizării și de a detecta eventualele erori de proiectare, care ulterior pot fi corectate. În plus, o astfel de vizualizare se dovedește utilă și pentru echipa de construcție, facilitând transmiterea clară a intenției de proiectare și reducând astfel erorile și neconcordanțele.

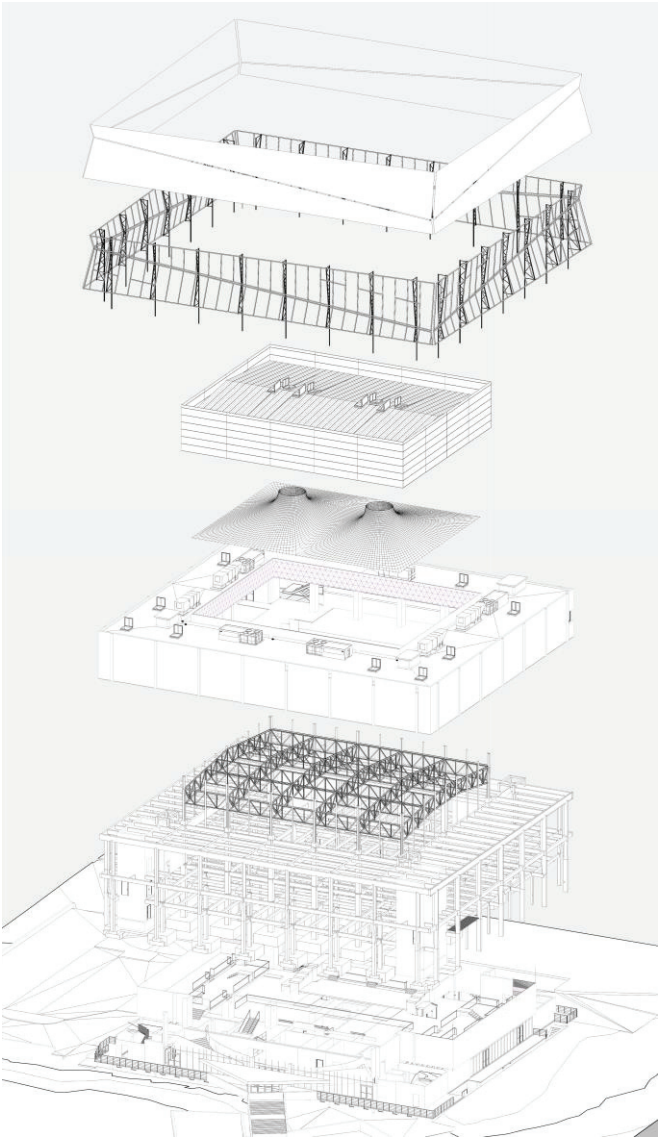


Figura 15. Model BIM, idz arhitectură, 2012, (Anton și Tănase 2014, 25)

Prin pre-realizarea completă a construcției în spațiul virtual și prin utilizarea unui limbaj comun, unde toate elementele sunt testate și integrate, se poate susține că arhitectura a atins un statut complet olografic. Mai mult, prin BIM, procesul devine și autografic, datorită testării multiplelor posibilități și orientării către materializare, reprezentând o reîntoarcere la meșteșug (Picon 2010, 76). Astfel, asistăm la o tranziție de la un model reprezentațional al clădirii, tributar unei tradiții olografice a arhitecturii, către un model ce tinde spre simularea procesului efectiv de construire (Carpo 2011).

Prin intermediul BIM, materializarea devine parte integrantă a procesului de proiectare, iar procesul de realizare nu mai este liniar, ci devine ciclic, cu bucle de feedback. În prezent, producătorii se pot implica în fazele de proiectare, iar proiectanții pot influența procesele de producție (Kieran și Timberlake 2003, 13, 15). Astfel, procesul tradițional ierarhizat de proiectare și construcție evoluează într-un câmp de relații interdependente facilitate prin intermediul computației. Folosind acest principiu integrativ, arhitectul are oportunitatea de a se implica mai mult în materializarea fizică a proiectului.

Deși BIM pare a fi un produs al mediului virtual, este evident că acesta are o contribuție semnificativă la materializarea fizică a proiectului, datorită capacității sale de anticipare. Proiectantul are posibilitatea de a transforma conceptul și de a integra informații referitoare la materiale și procesele de fabricație în etapa de proiectare, generând astfel un obiect arhitectural care se bazează pe un volum mult mai mare de informație.

Totuși, pe lângă avantajele oferite de modelarea BIM, există și dificultăți în adoptarea acestei noi unelte în practica curentă de proiectare. Pentru proiectele simple, modelarea tridimensională a tuturor elementelor componente, care pot fi diferite din punct de vedere al concepției arhitecturale, poate reprezenta o operație ce necesită mai mult timp comparativ cu metodele tradiționale. De asemenea, costul tehnologiei e posibil să fie inaccesibil pentru o mare parte a arhitecților, software-ul BIM având un preț superior celui al pachetelor CAD tradiționale, iar utilizatorul are nevoie de o pregătire specializată în prealabil.

Deși majoritatea pachetelor BIM oferă librării extinse cu elemente constructive standard, acestea se dovedesc încă insuficiente pentru a acoperi toate condițiile locale specifice fiecărei țări. Editarea sau crearea de elemente constructive personalizate, deși posibilă, se dovedește uneori

ineficientă prin prisma raportului dintre timpul investit și rezultatul obținut. Un alt impediment al modelării BIM este legat de modul în care arhitectul trebuie să abordeze proiectarea și transpunerea intenției sale în model, fiind nevoit să își schimbe, în mod conceptual, modalitatea de lucru. Arhitecții sunt astfel constrânși să proiecteze direct în mediul tridimensional, ceea ce implică un consum crescut de timp pentru realizarea planurilor și generarea unor dificultăți în implementarea completă a clădirii în mediul digital.

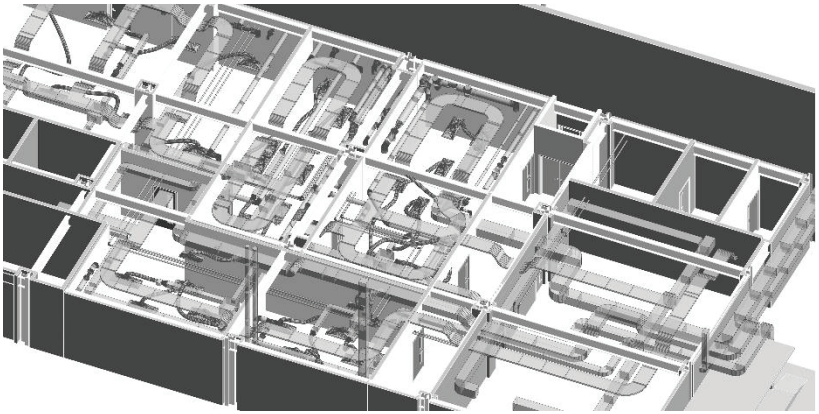


Figura 16. Model BIM, idz arhitectură, 2011 (Anton și Tănase 2014, 22-23)

Pentru proiectele de mici dimensiuni, tehnologia BIM poate reduce timpul de proiectare, oferind avantaje semnificative în vizualizare și în extragerea informațiilor cantitative, însă necesită o modelare atentă și detaliată a tuturor elementelor constructive speciale implementate. În cazul proiectelor de mari dimensiuni, cu un grad ridicat de complexitate și cu implicarea unui număr mare de specialiști, avantajele BIM devin mult mai evidente.

Atunci când arhitectura se bazează pe o serie finită de componente standardizate care sunt utilizate la o scară largă, sau în situațiile în care geometria neliniară a proiectului impune noi unelte de modelare și de control al spațiului arhitectural, iar elementele componente deviază de la standard, devenind piese unice ce trebuie gestionate și fabricate individual, tehnologia BIM excelează. Totuși, BIM nu trebuie interpretat ca

o filozofie de proiectare care să justifice realizarea unui anumit tip de proiecte (Aish 2013, 43).

Modelarea BIM se afirmă tot mai mult ca un standard internațional, adoptat în numeroase țări și de un număr crescând de arhitecți. Atât în Statele Unite ale Americii, cât și în Regatul Unit (RIBA Enterprises Ltd 2014) sau în China, utilizarea BIM a devenit obligatorie pentru autorizarea construcțiilor. Urmând exemplul acestora, este doar o chestiune de timp până când vom asista la o răspândire globală a modelării BIM.

Cu toate acestea, accentul nu ar trebui să fie pus exclusiv pe capacitatea de management, control și standardizare a proiectării, ci pe conexiunea dintre virtual și real pe care BIM o facilitează. Astfel, pentru a nu deveni un proces automat de proiectare, care contribuie la proliferarea unor soluții standard ce satisfac exclusiv criterii de eficiență cantitative, este necesară transformarea acestuia într-un proces mai flexibil, ce să permită elaborarea unor soluții personalizate. În această direcție, tehnologia BIM a început deja să se orienteze către integrarea și comunicarea cu alte softuri de proiectare parametrică. De asemenea, s-au dezvoltat posibilități de construire a componentelor personalizate, ce pot înlocui librăriile de componente standard.

Cercetarea actuală se concentrează pe interoperabilitatea între diferite softuri, în vederea valorificării avantajelor specifice fiecăruia. Din modelul BIM pot fi extrase date geometrice utilizabile în analize de performanță structurală, energetică sau acustică, ale căror rezultate pot modifica geometria, aceasta fiind apoi reîncărcată în modelul central. Astfel, elemente de analiză referitoare la sustenabilitate și viabilitate economică pot fi integrate încă din primele faze de proiectare. Utilizarea unui astfel de model are avantajul că poate explora cu ușurință mai multe variante, iar gesturile de proiectare pot fi influențate de factori multipli, inclusiv cei legați de performanță și economie.

Prin combinarea tehnologiei BIM cu modelarea parametrică, informată de condiții reale, arhitecții contemporani pot explora o mare varietate de opțiuni, pot analiza performanțele obiectului proiectat și pot lua decizii informate asupra gesturilor arhitecturale. Acest proces de lucru reduce timpul necesar redactării și desenării pentru fiecare analiză și reprezentare, oferind astfel mai mult timp pentru actul propriu-zis de proiectare sau permițând realizarea analizelor de performanță și în cazul proiectelor mai mici sau cu termene mai restrânse.

3.2.2. Proiectare computațională

Limbajul arhitectural a fost mult timp constrâns de bibliotecile de elemente prestabilite, ceea ce a limitat expresia arhitecturală, justificând această restricție prin eficiența crescută și excluzând astfel abordările ce utilizează componente și configurații mai puțin convenționale. În contrast, uneltele actuale de proiectare computațională aduc elemente constructive mai abstracte și un sistem flexibil, capabil să se modifice și să se adapteze, permițând proiectantului să-și construiască componente specifice fiecărei situații. Astfel, proiectantul nu mai este constrâns de economia locală impusă de sistemele restrictive, ci dobândește posibilitatea de a-și defini propriul vocabular arhitectural, însă doar după ce a înțeles și configurat partea abstractă, algoritmică și geometrică (Aish 2011, 23). În loc să modeleze direct o clădire, proiectantul dezvoltă o secvență logică, un script, a cărui execuție generează modelul. Proiectarea computațională estompează limita dintre proiectant și programator, deoarece acesta poate să-și creeze prin scripting uneltele ce îi definesc logica proprie de proiectare (Aish 2013, 47-48). Prin urmare, proiectarea este abordată în termeni mai abstracți, ca relații ce interconectează principiile de proiectare. Programarea nu este doar o operațiune tehnică, ci o unealtă a minții și, în context arhitectural, o metodă de comunicare simbolică a intențiilor (Reas și McWilliams 2010, 15). Modelul digital devine astfel o formă de abstractizare, prin traducerea intențiilor și transpunerea lor în algoritmi (Anton 2012, 191-97). Din acest motiv, este importantă încurajarea dezvoltării abilităților cognitive și creative, pentru a putea folosi posibilitățile geometrice și computaționale ale noilor softuri de proiectare (Aish 2013, 37). Pentru realizarea unui model digital care să fie utilizabil în procesul de fabricație cu control numeric, acesta trebuie definit cu precizie matematică, deoarece chiar și cele mai mici erori pot avea un impact semnificativ în execuția finală. Conceptul NURBS[10] a reprezentat un pas important în abstractizarea și definirea precisă a formelor în mediul virtual, prin definirea în termeni matematici a geometriei. Astfel,

[10] Din engleză, Non Uniform Rational Bezier Splines – NURBS, concept ce începe a fi cercetat în 1950, în domeniul industriilor automobilelor, aerospațial și aeronaval, pentru a putea definii precis suprafețe cu forme libere, folosind puncte de control. NURBS este un model matematic utilizat în softurile de modelare 3d pentru generarea și reprezentarea curbelor si suprafețelor. Principiul NURBS oferă o mare flexibilitate și precizie pentru editarea de suprafețe prin definirea lor matematică.

suprafețele complexe nu mai sunt simple aproximări construite din fațete, așa cum se întâmplă în cazul mesh-urilor.

Chiar și atunci când modelul este definit precis matematic, prin NURBS, acest lucru nu garantează automat posibilitatea fabricării lui. Pentru a putea genera modele care să se poată materializa cu unelte controlate numeric, este necesară o înțelegere profundă a conceptului matematic care stă la baza exprimării geometrice. Pentru a genera informații pentru materializare, este nevoie și de abstractizarea caracteristicilor specifice ale materialelor, articulațiilor și detaliilor constructive. Scripturile dezvoltate în acest scop sunt optimizate pentru a se adapta fiecărei situații particulare, astfel încât să acopere toate ipostazele extreme fără a deveni excesiv de specifice (Scheurer și Stehling 2011, 75). În acest context, se introduc parametri care definesc intervalele posibile de variație.

Pentru a ne folosi de unelte digitale de modelare și fabricație, procesul de proiectare presupune suprapunerea și abstractizarea mai multor criterii interdependente, care corelează conceptul, factorii de performanță, materialele și, mai ales, metodele de fabricație și asamblare. În acest context abstractizarea devine un proces de mediere între componente materiale, precise, și aspecte conceptuale, subiective.

Această abstractizare, prin cod și algoritm, a fost adesea interpretată ca fiind responsabilă pentru excluderea experienței intuitive din procesul de proiectare. O astfel de percepție este legată de faptul că, până recent, scripting-ul nu a făcut parte din proiectarea de arhitectură, fiind de regulă implementat prin colaborarea cu un programator. Pe de o parte, arhitectul trebuie să aibă cunoștințe de programare pentru a comunica eficient în acest mediu; pe de altă parte, codul însuși trebuie să fie influențat de aspecte proprii practicii de arhitectură (Burry 2011, 31). Astfel, uneltele considerate rigide pot deveni creative atunci când sunt utilizate direct de către arhitect, încărcându-se cu atribute specifice procesului de proiectare. Modificarea practicii de arhitectură prin introducerea programării în interiorul softurilor de modelare oferă un mod de lucru personalizat, punând la dispoziție atât un mediu de explorare creativă cât și o metodă productivă și eficientă.

Mediul computațional nu poate substitui arhitectul în actul creativ, dar funcționează ca o unealtă de proiectare. Un algoritm descrie prelucrarea datelor ca o succesiune de etape individuale de calcul (Anton, 2012, p. 14). În mod similar, fabricarea unui element constructiv presupune o

succesiune temporală a etapelor individuale din fabricație. Această paralelă între procesele algoritmice și procesele constructive evidențiază caracterul modular al arhitecturii, care constă în asamblarea unor componente, și stabilește o legătură directă între proiectarea computațională și materializarea fizică a obiectului arhitectural. Prin descrierea construirii într-un proces programat se conectează proiectul cu materializarea sa fizică.

Nu se mai proiectează forma care va fi produsă, ci procesul de producție în sine. Proiectul integrează ideea și metoda de fabricație încă din momentul concepției, ceea ce determină o înțelegere a construcției ca un proces integrat proiectării - o abordare ce amintește de perioada meșteșugărească. Prin includerea programării în practica arhitecturală, uneltele digitale devin, la rândul lor, obiecte proiectate, iar întregul proces se reorientează către materializarea proiectului.

Logica digitală permite definirea relațiilor și intențiilor sub forma unor seturi de reguli, evaluând modul în care diverși factori generatori ai proiectului se influențează reciproc. Programarea oferă posibilitatea modelării proceselor decizionale complexe ale proiectarii, care pot fi verificate și rafinate iterativ. În această paradigmă, arhitectura este concepută printr-o succesiune de operațiuni precise, proceduri ce necesită ele însele o proiectare atentă. Pentru a valorifica pe deplin potențialul programării, aceasta trebuie integrată organic în metodele tradiționale de proiectare.

Pentru a se adapta practicii de arhitectură, softurile de programare evoluează, concentrându-se tot mai mult pe interacțiunea vizuală, dar, în același timp, păstrând un caracter generic, pentru a permite abordări diferite. În contextul proiectării, excepția este adesea la fel de relevantă ca regula, iar ierarhiile dintre componente pot suferi modificări pe parcursul procesului. Arhitecții pot interveni în această evoluție a uneltelor de programare prin dezvoltarea propriilor dialecte, adaptate specificului construcției, materialelor și spațiului (Gramazio și Kohler 2008, 8).

În acest cadru, obiectivul arhitectului nu ar trebui să fie simpla deprindere a unui anumit software, ci mai degrabă adaptarea uneltelor în așa fel încât acestea să devină compatibile cu logica practici de arhitectură. Accesul la aceste mijloace generice le permite arhitecților să își creeze uneltele individuale de proiectare și, prin urmare, să transforme procesul de lucru. Astfel, vor fi în măsură să răspundă mai adecvat cerințelor contemporane,

utilizând mijloace și concepte actuale, creând legături între tehnologie și mediul construit (Gramazio și Kohler 2008, 9).

Când arhitectura devine proiectarea proceselor materiale, ea nu mai este reprezentată prin desene bidimensionale statice, ci printr-un set de reguli dinamice. Se proiectează un comportament, ceea ce oferă avantajul posibilității de a interveni în orice moment al procesului, atâta timp cât modificările sunt anticipate ca parametri deschiși. Astfel, se poate lucra într-un mod determinat, dar cu condiții rămase deschise, care vor fi definite doar într-un stadiu avansat al proiectării (Gramazio și Kohler 2008, 10).

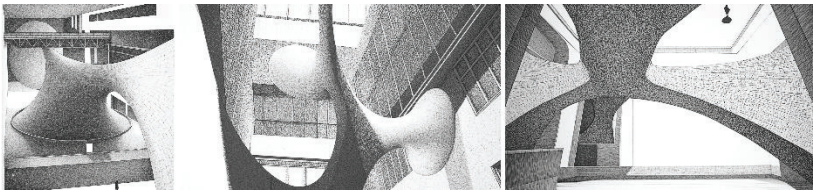
Deși dezvoltarea softurilor este substanțială, în special prin direcția de a oferi unelte de computație tot mai accesibile și performante, rezultatele generate prin utilizarea acestora nu sunt întotdeauna pe măsura potențialului tehnologic și par adesea lipsite de originalitate. La această uniformizare contribuie și tendința către soluții similare, deși prezența unei comunități active ar trebui să stimuleze apariția unor abordări creative și diferite. Încurajarea unui mediu open-source, deși benefică în principiu, a dus frecvent la combinarea de scripturi existente, în loc ca acestea să fie utilizate ca sursă de inspirație pentru dezvoltarea unor scripturi proprii (Burry 2011, 31).

S-a observat că, odată creat un algoritm, există o tendință pronunțată de a-l refolosi în mai multe proiecte, adesea cu modificări minime. Această practică se explică prin ușurința de a genera soluții relativ diferite prin ajustări minore ale aceluiași algoritm. Totuși, artefactele rezultate tind să fie prea asemănătoare, pierzându-și caracterul distinctiv.

Dezvoltarea unui proces de lucru care să se dovedească funcțional de la concept la materializare nu este o sarcină simplă, motiv pentru care acesta este adesea reprodus sau adaptat marginal în proiecte ulterioare. Motivele sunt atât de natură economică, legate de reducerea consumului de resurse și a timpului, cât și legate de minimizarea riscurilor asociate cu fiecare nou proces. Mulți designeri și arhitecți care utilizează unelte computaționale au ajuns să asume această asemănare între propriile proiecte ca fiind o marcă personală, un stil propriu. Astfel, ceea ce este perceput ca o trăsătură unică de autor se dovedește, în multe cazuri, a fi rezultatul repetării aceluiași algoritm de concepere și materializare. În consecință, creativitatea proprie practicii de proiectare ajunge adesea să fie înlocuită

de eficiența computației: deși se susține obținerea unor rezultate diferite, în realitate se aplică același mecanism algoritmic.

Tendința de repetare a soluțiilor poate fi atribuită, în parte, și modului de interacțiune cu softurile de proiectare, care impun constrângeri prin propriul limbaj. Astfel, libertatea de proiectare poate fi compromisă de limbajul de programare (Burry 2011, 22). Pe de o parte, eșecul poate reflecta lipsa de competențe în programare, conducând la adoptarea unor soluții simple sau deja testate. Pe de altă parte, poate indica inconsistența sau fragilitatea conceptului propus. Problema nu constă neapărat în deprinderea abilității de a programa sau asimilarea sintaxei programului folosit, ci în transpunerea problemei de proiectare în cod. Dacă logica nu este corectă, cunoștințele de programare, oricât de avansate ar fi, nu ar putea să compenseze (Burry 2011, 30).



(a) (b) (c)

Figura 17. Instalații cu suprafețe minimale. (a) Marsyas / Anish Kapoor (Kapoor 2003), (b) Green Void / LAVA (LAVA 2008), (c) pAlice (SOFTlab 2009) Ilustrații realizate de autor.

Tehnologia digitală este valorificată pentru capacitatea de a gestiona seturi mari de date și de a integra multiple straturi de informație, cu scopul de a genera complexitate. În acest context, matematica euclidiană este percepută ca caz particular al matematicii non-standard, al cărei rol este tocmai reducerea complexității pentru a o face inteligibilă. Spre deosebire de abordarea umană, care tinde să reducă și să ordoneze complexul, logica algoritmică accelerează ritmurile umane, ridicând nivelul de complexitate (Marcus 2011b, 163). Arhitectura contemporana încercă să lucreze cu complexitatea lumii înconjurătoare și să-i multiplice efectele, nu să-i limiteze potențialul. Idealul clasic al frumuseții, bazat pe simplitate, simetrie și armonie, este înlocuit de o viziune în care ordinea și frumosul se manifestă în complexitate și în infinitate.

Evoluția proiectării computaționale a fost inițial motivată de fascinația pentru formele complexe, imposibil de conceput sau realizat fără ajutorul uneltelor digitale (Picon 2010, 70). Computația a devenit astfel un mijloc prin care se generează efecte ale complexității,. Totuși, odată cu utilizarea tot mai frecventă și repetitivă a acestor metode, proiectele tind să devină mai puțin inovatoare și, paradoxal, mai puțin complexe.

Totuși, capacitatea integratoare și de relaționare a computației poate fi folosită și în scopul, mai subtil, de a simplifica și esențializa (Burry 2011, 40). În acest sens, în locul unei simple exploatări a capacității algoritmilor de a genera forme complexe din reguli simple, apare ca alternativă conceptul de simplexitate, preluat din teoria sistemelor, care presupune obținerea simplității prin relaționarea unor seturi complexe de reguli (Kaijima și Panagiotis 2008, 130).

Scopul proiectării computaționale ar trebui să urmărească adaptarea uneltelor de programare la practica de arhitectură, un proces creativ, și nu aplicarea automată a unor algoritmi standard. Se urmărește ca intenția proiectului să se abstractizeze într-un algoritm, nu ca proiectul să fie produsul unui algoritm ales doar pentru gradul de complexitate.

3.2.3. Criterii de performanță

De-a lungul timpului, abordarea funcționalistă, concentrată exclusiv pe eficiență, performanță și optimizare, a evoluat. Acest tip de concepere, bazat pe criterii strict cantitative, punea accent doar pe parametrii măsurabili în proiectarea de arhitectură, ignorând aspectele mai puțin cuantificabile, care rămâneau astfel nesoluționate.

Performanța nu ar trebui înțeleasă ca o constrângere asupra proiectului, nici ca un mod de a elabora soluții generice menite să rezolve un număr mare de probleme practice. O asemenea abordare reductivă, axată exclusiv pe eficiență și performanță, riscă să revină la un principiu funcționalist de proiectare.

În prezent, domeniul criteriilor de performanță se extinde, fiind perceput ca o oportunitate de a dezvolta procesul de generare formală pornind de la informații locale, specifice fiecărui proiect: culturale, tehnice și de mediu. Mai mult, această abordare ar trebui să urmărească integrarea simultană a mai multor dimensiuni ale performanței într-un proiect, realizând un echilibru între creativitate și eficiență (Kolarevic 2005a, 195).

Leatherbarrow definește performanța în arhitectură prin două dimensiuni inseparabile: una tehnică și productivă, ce determină în mod precis rezultatul final al materializării obiectului arhitectural, și una contextuală și proiectivă, care anticipează relațiile dinamice cu mediul (Leatherbarrow 2008, 18). Astfel, arhitectura implică atât aspecte care se pot proiecta și determina, cât și reacții neprevăzute, ce necesită flexibilitate și capacitate de adaptare.

Când vorbim de producția în masă, eficiența era calculată global, și se punea accent pe aspectul economic, conform raportul dintre investiție și profit. Astfel, datorită economiei de scară, costul mașinilor de producție, sau pierderile din producție, deși erau foarte mari, deveneau nesemnificative prin producția în masă.

Componenta tehnică a performanței este strâns legată de mijloacele de producție și de atitudinea asupra economiei. În perioada meșteșugărească, când producția era manuală, iar proiectantul coincide adesea cu executantul, economia de efort și material era o consecință firească, (Kieran și Timberlake 2003, 5). În contextul producției de masă, eficiența era calculată global, accentul fiind pus pe raportul dintre investiție și profit. Astfel, datorită economiei de scară, costul mașinilor de producție, sau pierderile din producție, deși erau foarte mari, deveneau nesemnificative raportate la volumul de producție.

Tehnologia digitală aduce o nouă formă de eficiență: posibilitatea de a adapta producția la condițiile unice ale fiecărui proiect. În procesul de proiectare, mediul digital permite optimizarea geometriei, împărțirea eficientă a formelor și utilizarea rațională a materialelor brute. În procesul de producție, precizia și controlul uneltelor digitale de fabricație contribuie semnificativ la reducerea pierderilor și la creșterea eficienței de prelucrare.

Proiectarea computațională a fost adesea criticată pentru aspirația către control absolut și pentru accentul pus pe caracterul high-tech al procesului. Au fost formulate analogii cu organismele vii, sugerând că dorința de inovație și perfecționare transformă clădirile în clone sau hibrizi genetic programați, proces mai ușor de realizat în cazul obiectelor decât în cel al ființelor umane. Este descris astfel un nou tip de super-funcționalism - un funcționalism virtual, care nu mai are legătură cu funcțiile organice sau sociale, ori cu valorile de întrebuințare, ci cu un funcționalism virtual lipsit de date sensibile (Baudrillard și Nouvel 2005, 44).

Dacă performanța este înțeleasă exclusiv ca mijloc de atingere a optimului, accentul cade inevitabil pe nevoia de control. Uneltele digitale, atât cele utilizate în proiectare, cât și cele din fabricație, prin capacitățile lor de gestionare, integrare și precizie, devin mijloace eficiente în exercitarea acestui control. Astfel, arhitectul se poate asigura că obiectul construit este copia modelului virtual proiectat.

Deși uneltele digitale au fost folosite în domeniile inginerești pentru calitățile lor tehnice, legate de gestionare, eficiență și control, în domeniile creative aceste unelte ar trebui să fie abordate și adaptate practicilor creative. Mediul digital devine astfel un mijloc de reglementare al procesului de elaborare a proiectului, în cadrul căruia arhitectul se detașează de obiectul construit, dar își păstrează autoritatea și controlul asupra lui. Reprezentarea arhitecturală tradițională prin proiecții ortogonale este înlocuită de o formă nouă, mai complexă, care constă într-o replică completă a proiectului în mediul virtual. Deși uneltele digitale au fost folosite în domeniile inginerești pentru calitățile lor tehnice, legate de gestionare, eficiență și control, în domeniile creative ele ar trebui reinterpretate și adaptate pentru a sprijini procesele de creație și explorare.

Dacă privim arhitectura bazată pe performanță din perspectiva celui de-al doilea aspect definit de Leatherbarrow, interesul nu se mai concentrează pe forma clădirii în sine, ci se reorientează către procesul de generare, bazat pe performanțe imaginate, dinamica de utilizare, și poetica schimbării spațiale și temporale. Rolul arhitecților nu mai constă în prefigurarea, prestabilirea sau atingerea unei performanțe optime, ci în inițierea, integrarea, diversificarea și multiplicarea efectelor arhitecturale în timp și în material (Kolarevic 2005e, 212).

Potențialul calitativ al spațiului nu poate fi atins exclusiv prin eficiență. El este rezultatul unor procese de feedback și negociere continuă, în care proiectarea, fabricarea și optimizarea nu mai reprezintă etape distincte și statice în dezvoltarea unei clădiri, ci devin actori în cadrul unui model dinamic, parte integrantă a unui proces aflat în evoluție. Această abordare transformă optimizarea și fabricația din practici centrate pe eficiență și măsurare cantitativă, într-un cadru orientat către posibilitățile de dezvoltare și experiențele spațiale pe care le pot genera (Rahim 2005, 186).

Prin utilizarea computației, caracteristicile uneltelor de fabricație pot fi anticipate și testate chiar în faza de generare a formei. Astfel, proiectantul

poate integra potențialul acestor unelte încă din stadiul conceptual, iar uneltele de fabricație digitală pot avea un potențial creativ în proiect și materializare. Prin încorporarea fabricației în acest model dinamic, procesul de materializare dobândește valențe calitative, devine propriu proiectului și nu se mai reduce la un simplu aspect economic. O astfel de abordare, care tratează materializarea și în termeni calitativi, permite realizarea unor proiecte mai ancorate în contextul fizic, în care materialul și procesele de fabricație pot fi explorate și valorificate ca parte din intenția de proiectare.

3.2.4. Simulare, analiză și sinteză

Evoluțiile din ultimii ani realizate în domeniul computației au condus la posibilitatea de a utiliza mediul digital pentru simularea comportamentului real al obiectului de arhitectură și al componentelor sale. Simularea performanței clădirilor are ca scop anticiparea comportamentului unei clădiri, de la faza de concepție până la demolare (Malkawi 2005, 87).

Inițial, simularea era aplicată după proiectare, asupra unei soluții deja elaborate, care putea suporta doar modificări minore - sau, în unele cazuri, era folosită doar pentru a constata o stare de fapt. Însă, atunci când criteriile de performanță deveneau relevante pentru proiect, procesul de optimizare se dovedea a fi laborios. Astfel, după fiecare modificare din proiect, modelul trebuia refăcut pentru analiză, apoi analiza era reluată pentru noua versiune a modelului, se trăgeau concluziile, iar procesul începea din nou — până la atingerea unui rezultat optim.

În prezent, preocuparea s-a deplasat către capacitatea mediului digital de a susține nu doar calculul, ci și sinteza. Din acest motiv, softurile de simulare, care se ocupă de tipuri diferite de analiză, pun accent pe interoperabilitate. Se urmărește utilizarea unei suite de softuri specializate, fiecare responsabil pentru un anumit tip de calcul, dar care contribuie la dezvoltarea aceluiași proiect.

Problemele de performanță nu mai sunt tratate izolat sau într-o progresie liniară, ci sunt abordate simultan și integrate încă din etapele conceptuale ale proiectului, bazându-se pe o colaborare strânsă între numeroasele specialități implicate. Integrarea și controlul diferitelor niveluri de informație reprezintă una dintre cele mai promițătoare direcții de dezvoltare recentă a tehnologiei digitale. Obiectul final nu mai este

impunerea viziunii autorului, ci devine un răspuns bazat pe performanță, rezultat al analizei și colaborării dintre o multitudine de variabile.

Potrivit lui Greg Lynn, contextul de proiectare devine un spațiu abstract și activ, în care acționează forțe de modelare încorporate sub formă de informație în interiorul formei generate (Lynn 1999, 11). Se urmărește astfel obținerea unei complexități formale care motivează procesele de construcție, operare și selecție. Prin această abordare, forma finală a clădirii este determinată de parametri bazați pe performanță. Totuși, această metodă de generare formală nu trebuie interpretată exclusiv din perspectiva aspectului formal (Kolarevic 2005a, 195), întrucât forțele modelatoare includ atât dimensiuni obiective, cât și subiective.

Putem distinge astfel două procese distincte, ambele utilizând unelte digitale, dar în mod fundamental diferit: post-raționalizarea și pre-raționalizarea. Deși ambele urmăresc optimizarea geometriei pentru a putea fi fabricată, diferă modul în care sunt integrate criteriile de performanță în proiect.

Post-raționalizarea reprezintă abordarea prin care se caută soluții de materializare a unei geometrii generate în principal pentru expresia formală. În acest context procesul de căutare formală a fost motivat de rațiuni estetice (Ceccato 2012, 99). Astfel, computerul este folosit pentru a reconstitui proiectul realizat prin metode tradiționale și pentru a-l ajusta: „computerul este o unealtă, nu un partener, un instrument pentru a reda curbe, nu pentru a le inventa”[11] (Bodden și Gehry 2008, 44). Softurile de analiză sunt aplicate ulterior conceperii obiectului de arhitectură, pentru a verifica viabilitatea structurală, economică sau energetică. Acest model de optimizare caută să maximizeze eficiența în raport cu o formă deja stabilită, urmărind atingerea unui optim în condițiile date (Rahim 2005, 186).

Pre-raționalizarea desemnează un proces de proiectare care utilizează un set de reguli geometrice și metode pentru a genera o soluție viabilă. Aceste reguli pot integra parametri de fabricație, caracteristici ale materialului, limite funcționale, implicații de cost și performanță. Ele nu sunt statice, ci evoluează printr-un proces iterativ de tip încercare - eroare, din care forma

[11]afirmația lui Frank Ghery în engleză: ”The computer is a tool not a partner, an instrument for catching a curve, not for inventing it.”

arhitecturală poate rezulta direct. Acest proces încorporează încă din faza de generare constrângerile de asamblare și logica de proiectare, astfel încât sistemul produce exclusiv forme care pot fi materializate. Avantajele acestui proces sunt legate de anticiparea costurilor și a tehnologiilor de materializare (Ceccato 2012, 98-99).

În prezent, softurile de analiză evoluează către capacitatea de a integra datele rezultate din simulări în mod direct în procesul de proiectare, generând modificări automate în modelul digital. Această direcție urmărește realizarea unei legături directe între simulare și optimizarea obiectului proiectat.

În practica arhitecturală contemporană, mediul digital nu mai este doar un instrument de reprezentare, ci devine un factor generator de formă. Proiectarea parametrică stabilește relații între diferiți agenți care vor influența forma finală, înlocuind astfel abordările bazate pe forme arbitrare. Interesul se deplasează de la „făurirea" formei către „descoperirea" acesteia prin căutare digitală, iar procesul de proiectare se transformă dintr-o practică rigidă, predefinită, într-una dinamică, bazată pe proces. Atât rezultatul final, cât și procesul de devenire dinamic al formei capătă o importanță egală pentru practica de proiectare (Marcus 2011c, 48).

În acest sens, se utilizează și algoritmi genetici, împreună cu metode de vizualizare intermediară (Malkawi 2005, 91). Abordarea evolutivă este de tip generare–testare, un principiu care corespunde în mod natural procesului de proiectare. Într-un astfel de proces, datele de proiectare sunt formulate ca parametri, fiecare cu anumite constrângeri. În acest mod, sunt generate doar variantele care răspund cel mai bine condițiilor definite ca input. Procesul se desfășoară recursiv, până la identificarea unor rezultate care îndeplinesc obiectivele de performanță stabilite. Se conturează astfel o varietate de soluții posibile, oferind proiectantului un spațiu extins de explorare.

De-a lungul procesului, sunt urmărite și rezultatele intermediare, care pot deveni relevante pentru proiect, prin capacitatea lor de a stimula creativitatea arhitectului. Scopul nu este obținerea unui rezultat optim singular, ci negocierea dinamică a ponderii criteriilor pe parcursul procesului.



Figura 18. Prin folosirea unui algoritm genetic se caută suprafața care are valoarea de energie solară absorbită minimă, dar care realizează și o umbră maximă. S-a pornit de la o suprafață realizată din subdiviziuni triunghiulare, cu fiecare triunghi perforat în funcție de cantitatea de energie solară absorbită. Algoritm genetic, Daniela Anton și Ionut Anton, 2013.

Capacitatea de a genera noi modele este, în acest context, direct dependentă de abilitățile arhitectului. El este cel care editează sistemul de morfogeneză, iar formele emergente sunt determinate atât de obiectivele de performanță cuantificabile, cât și de creativitatea arhitectului. Astfel, capacitatea generativă a mediului computațional este condiționată de modul în care arhitectul interpretează rezultatele și ajustează criteriile, într-un proces continuu și dinamic.

Cu ajutorul simulării virtuale, se pot pre-vizualiza chiar și cele mai complexe operațiuni de fabricație și asamblare ale componentelor arhitecturale. Unul dintre cele mai recente teritorii de explorat în acest sens îl constituie utilizarea roboților industriali ca unelte de fabricație. Astfel, simularea și pre-vizualizarea mișcărilor acestor unelte de fabricație digitală devin nu doar etape necesare, ci și mijloace de înțelegere a modului în care se va materializa proiectul.

Prin simulare, pot fi identificate limitările uneltelor și poate fi ajustat procesul care generează geometria. Mișcarea uneltei pentru a realiza un obiectiv este unul relativ automat: aceasta primește ca date de intrare poziții în spațiu, dar traiectoriile de deplasare între aceste puncte sunt

generate automat. Acest lucru, pe de o parte, simplifică programarea, dar presupune, în același timp, un proces de testare și optimizare a dinamicii de fabricație. Astfel, simularea devine un mecanism activ de feedback, întrucât, urmărind comportamentul sistemului în timpul pre-materializării, se poate reveni asupra geometriei inițiale, care este reconfigurată în funcție de noile informații obținute din procesul de testare.

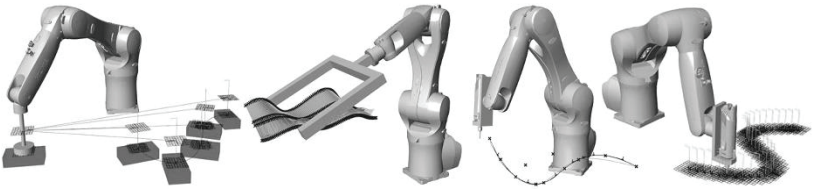


Figura 19. Simularea mișcării roboților industriali pentru mai multe tipuri de fabricație: pick_and_place, tăiere cu fir încins, frezare, Daniela Anton și Ionut Anton, 2013.

Proiectarea se adaptează la mediul contemporan prin intermediul unor procese de testare a modelului real, pornind de la abstractizare, evaluarea alternativelor, a posibilelor configurări, a scenariilor de utilizare și a materializărilor intermediare, testând fiecare ipoteză (Menges 2010, 32). Aceste modele analoage propun noi moduri de abordare, care transformă proiectul și influențează semnificativ produsul fizic final.

3.3. Meșteșugul digital

Meșteșugul reprezintă relația dezvoltată între creator, unelte și materiale. Definește legătura dintre ceea ce materialul ar dori să fie, intenția creatorului - care este impusă materialului și acțiunea - care va modela obiectul final. În prezent, această relație poate fi mediată de digital, care are capacitatea de a integra, transforma și anticipa toate aceste informații într-un proces, orientat către materializarea fizică. Astfel, mediul virtual devine o unealtă esențială în materializarea de arhitectură.

Meșteșugul digital combină unelte digitale cu abilitățile creative are proiectantului, precum în producția tradițională. Uneltele s-au transformat, au devenit digitale, dar procesul de proiectare și fabricație nu este în întregime digital, ci îl are în continuare în centrul său pe meșter, ce este creatorul obiectului final.

Meșteșugul digital combină uneltele digitale cu abilitățile creative are proiectantului, precum în producția tradițională. Deși uneltele s-au transformat, devenind digitale, procesul de proiectare și fabricație nu este în întregime digital: în centrul său rămâne în continuare meșterul - cel care creează obiectul final. Meșteșugul presupune realizarea unei lucrări printr-o varietate de tehnici și unelte, în care calitatea rezultatului nu este predeterminată, ci depinde în mod direct de judecata, îndemânarea și grija cu care lucrează meșterul. Calitatea rezultatului este continuu în pericol în timpul procesului de lucru, astfel acest proces de facere este caracterizat de risc (Pye 1968, 20).

Rezultatele unui proces meșteșugăresc sunt artefacte unice, realizate în urma unei serii de decizii personale și subiective ale artizanului, care vor defini obiectul final. Meșteșugarul tradițional, lucrând cu materiale analogice, nu are la dispoziție o istorie digitală a acestor decizii – o documentare explicită la care să poată reveni sau pe care să o poată reface (Zoran și Buechley 2013, 6). La sfârșitul procesului, doar obiectul în sine rămâne ca documentare a efortului atât de creație cât și de fabricație. În opoziție cu acest proces marcat de risc și incertitudine, metodele de producție automatizate sunt definite prin certitudine: rezultatul este în întregime predeterminat și reproductibil în copii identice. Deoarece mașinile au preluat eficient sarcina fabricației, dexteritatea manuală și expertiza implicată în construcția obiectelor s-au pierdut treptat. În schimb, capacitatea de a imagina, de a planifica pentru producția în serie și de a proiecta a căpătat o importanță din ce în ce mai mare (Zoran și Buechley 2013, 6).

Pe măsură ce fabricația digitală devine accesibilă, ea apare ca o tehnologie care, în multe privințe, pare să sprijine meșteșugul. Totuși, cele două abordări – meșteșugul tradițional și cel digital – prezintă diferențe esențiale. Artefactele produse digital, asemenea celor realizate manual, sunt rezultatul deciziilor subiective ale creatorilor. Ele reflectă, de asemenea, abilitățile, perspectivele și valorile acestora (McCullough 1997). În acest sens, lucrul digital este la rândul său expus riscului – nu în ceea ce privește reproductibilitatea, ci în ceea ce privește alegerile de proiectare. Spre deosebire de artizanul tradițional, meșteșugarul digital beneficiază de o istorie completă a procesului de creație, sub forma fișierelor digitale, pe care le poate edita, modifica sau testa în variante intermediare, prin instanțe fabricate digital la o scară mai mică pe parcursul proiectării. Mai mult, acesta are la dispoziție parametri care pot fi manipulați pentru a

influența rezultatul final, precum și procese generative, care corelează acești parametri în vederea obținerii celor mai eficiente soluții. În acest fel, mediul digital contribuie la reducerea semnificativă a riscurilor datorită computației, prin precizie și control. Astfel, riscul devine considerabil mai mic în meșteșugul digital decât în cel artizanal.

În fabricația digitală propriu-zisă, fișierul de proiect specifică exact ceea ce mașina va produce, iar rezultatul este predeterminat. Obiectul este, astfel, infinit reproductibil odată ce fișierul a fost creat (Zoran și Buechley 2013, 6). Totuși, această certitudine tehnologică nu elimină complet riscul creativ, care persistă în faza de definire a parametrilor, în alegerea gradului lor de influență și în modul în care aceștia sunt corelați. Responsabilitatea pentru produsul fizic revine, în mâinile noului meșteșugar digital, cel care coordonează întregul proces de generare, evaluare și fabricare.

3.3.1. Continuum digital

Mediul computațional oferă oportunitatea de a integra proiectarea, analiza, reprezentarea, fabricația și asamblarea ca părți ale aceluiași proces colaborativ. Prin aducerea în prim plan a informației se urmărește realizarea unui continuum digital (Kolarevic 2005d, 7), o legătură directă între proiect și obiectul construit. Prin constituirea unui flux comun de date, informația poate fi extrasă, interschimbată, și astfel utilizată mai facil și mai rapid.

Practica de arhitectură contemporană valorifică potențialul tehnologiilor digitale, acoperind întregul parcurs, de la concepție până la materializare, ceea ce generează nevoia de comunicare între numeroasele aplicații digitale implicate în proces. Mediul computațional oferă oportunitatea de a integra proiectarea, analiza, reprezentarea, fabricația și asamblarea ca părți ale aceluiași proces colaborativ. Prin aducerea în prim-plan a informației, se urmărește realizarea unui *continuum digital* (Kolarevic 2005d, 7), adică stabilirea unei legături directe între procesul de proiectare și obiectul construit. Prin constituirea unui flux de date comun, informația poate fi extrasă, transferată și reutilizată cu eficiență sporită și viteză crescută în toate etapele proiectului.

Această integrare se bazează pe continuitatea CAD-CAM, respectiv pe capacitatea mediului digital de a converti datele conținute în modelele tridimensionale generate de arhitecți în coduri pentru mașinile de fabricație. Cu toate acestea, procesul denumit *file-to-factory* nu se

realizează automat. Una dintre provocările majore este cea legată de scară, întrucât uneltele de fabricație digitală pot produce doar componente de dimensiuni limitate, la nivelul componentelor de clădiri.

Deși tehnologiile de fabricație digitală devin din ce în ce mai accesibile, acestea nu pot fi considerate, încă, drept înlocuitori ai mijloacelor de producție convenționale. Unul dintre cele mai promovate atuuri ale tehnologiei digitale este capacitatea de a stabili o comunicare instantanee între mediul virtual și cel material. Chiar dacă această comunicare este teoretic posibilă, în practică tehnologiile digitale de fabricație nu permit încă producerea imediată și eficientă a obiectelor unice proiectate în

Conceptul de *continuum digital* accentuează această trecere intermediată de digital de la concept la model virtual și, în final, la obiectul fizic. În acest context, principiul *file-to-factory* diluează limitele dintre model, prototip și arhetip (Burry 2012, 52). Modelul – fie fizic, fie virtual – este definit de Marc Burry ca o abstractizare a ideii sau a conceptului arhitectural. Dacă inițial acest model era reprezentat de machetele de concept, în prezent, în contextul digital, el este înlocuit de modelul virtual. Burry înțelege modelul 3D ca o reprezentare ce precedă obiectul final, și are rol predictiv.

În proiectarea computațională, modelul devine parametric și permite generarea de componente unice, ceea ce îl transformă într-o serie de potențiale prototipuri. Prototipul, ca obiect original, are o legătură directă cu mediul fizic și servește drept referință pentru producția ulterioară. În arhitectură, prototipul nu este doar o formă de testare formală, ci și de evaluare funcțională – fiind un element arhitectural cu atribute de performanță. În acest sens, prototipul semnalează o evoluție importantă: de la o practică dominată de strategii de reprezentare spre o practică centrată pe materializare, fiind încurajată de introducerii uneltelor computaționale în practica de arhitectură (Barcow 2010, 96). Astfel, software-urile dedicate anterior simulării fotorealiste sunt înlocuite de metode de materializare a modelelor. În contextul tehnologiilor de fabricație digitală, acest proces se realizează prin tehnici de prototipare rapidă. Aici intervine, însă, o limitare legată de scară: aceste metode se aplică, în general, obiectelor de mici dimensiuni și oferă doar versiuni mai mici ale componentelor finale.

Prototipul, odată testat și acceptat, devine arhetip, adică modelul originar după care se realizează toate versiunile ulterioare. Astfel, modelul virtual

devine prototip fizic, iar acesta, prin validare, se transformă în arhetip (Burry 2012, 56).

Deși conceptul *file-to-factory* are ca obiectiv transformarea rapidă prototipului în obiect final, punând accent pe automatizare și eficiență, această abordare presupune eliminarea etapelor intermediare de testare, considerate drept redundante. Se argumentează că modelul virtual este deja capabil să previzioneze cu acuratețe toate aspectele legate de materializare și performanță materială, astfel încât prototiparea rapidă ar deveni inutilă. Totuși, acest tip de proces complet automat nu este încă posibil în practică. Persistă nevoia de anticipare, testare și adaptare a conceptului pentru a-l transforma într-un proiect informat, adaptat și pregătit pentru fabricație. În pofida progreselor tehnologice, aceste etape rămân esențiale în arhitectură, tocmai din cauza complexității contextuale și a variabilității materialelor, condițiilor de șantier și cerințelor de performanță.

Astăzi se pune tot mai mult accent pe reacția *în timp real*[12], iar unele domenii au reușit, prin intermediul tehnologiei, să obțină o legătură directă și imediată între input și output, eliminând aproape complet timpul de reacție. Cu toate acestea, nu toate procesele pot fi adaptate la acest model, din cauza caracterului lor strategic și al modului de organizare specific (Davis 1987, 20). Dacă analizăm strict din perspectiva eficienței și, în mod particular, din punctul de vedere al timpului de producție, tehnologiile de fabricație digitală nu au atins încă producția instant, anticipată încă din era industrială. Un exemplu relevant este cel al Japoniei, unde s-au testat metode de fabricație arhitecturală la scară mare cu ajutorul tehnologiilor controlate numeric. Obiectivul acestor experimente era obținerea unui proces de construcție complet automat, dar datorită caracterului rigid, acest proces a fost în cele din urmă abandonat. În prezent, fabricația digitală în domeniul arhitecturii nu presupune un proces complet automat. Aceasta este implementată la nivelul componentelor arhitecturale, folosindu-se numeroase metode de fabricație combinate. Prin urmare, procesul rămâne adaptabil și specific fiecărui proiect, necesitând decizii informate din partea proiectanților și o gestionare atentă a etapelor de producție.

[12] Din engleză: real-time feedback

În prezent, printarea 3D este una dintre cele mai explorate metode de fabricație digitală aplicabile la scară arhitecturală. Provocarea constă în dezvoltarea unui sistem suficient de flexibil pentru a oferi un răspuns personalizat pentru fiecare situație specifică și cerințelor diferite de proiectare. O direcție promițătoare este reprezentată de dezvoltarea imprimantelor 3D capabile să realizeze componente arhitecturale de mari dimensiuni, punând accent atât pe diversificarea materialelor, cât și pe metodele de articulare a elementelor.

În practica curentă, proiectanții se folosesc de uneltele digitale de modelare pentru a defini geometria la nivel global. În această etapă, geometria este adesea un volum general și trebuie ulterior transformată în componente ce pot fi fabricate. De cele mai multe ori, modelele digitale sunt construite la nivel volumetric și nu includ detalii referitoare la fiecare element constructiv sau la modul de articulare, deoarece servesc unor studii formale.

Odată cu implicarea în practica de arhitectură a uneltelor BIM (Building Information Modeling), nivelul de detaliere a crescut semnificativ. În acest context, componentele clădirii sunt reprezentate cu precizie, iar avantajul major constă în utilizarea unui model comun, în care sunt suprapuse și corelate mai multe tipuri de date. Totuși, chiar și în acest caz, caracteristicile componentelor trebuie extrase, procesate și reinterpretate, deoarece între modelul digital și faza de fabricație mai există un proces intermediar, de traducere a geometriei tridimensionale în informație pentru fabricație. (designtoproduction 2008, 161).

Prin proiectarea computațională, unde forma este generată prin scripting, se face un pas mai aproape de uneltele de fabricație care lucrează tot cu cod. În acest mod, caracteristicile procesului de fabricație pot fi integrate încă din etapa de generare a geometriei, ceea ce permite realizarea unei legături strânse dintre proiect și materializare.

Elaborarea unui model tridimensional nu este suficientă pentru a garanta transformarea acestuia într-un obiect fizic prin intermediul fabricației digitale. Este necesară dezvoltarea unei strategii de materializare, care de obicei, este valabilă pentru fiecare proiect în parte, pentru că este foarte specifică (Scheurer 2010, 93). Designtoproduction identifică un proces în patru etape pentru această tranziție de la digital la fizic. Prima etapă constă în stabilirea relațiilor parametrice între întreg și părțile componente. A doua presupune un proces de optimizare, în care se

negociază reciproc influențele între întreg și componente. A treia etapă urmărește simplificarea geometriei elementelor, pentru a eficientiza producția. Ultima etapă este generarea informației de fabricație, pentru a putea fi transmisă către uneltele digitale de producție (designtoproduction 2008, 162-263).

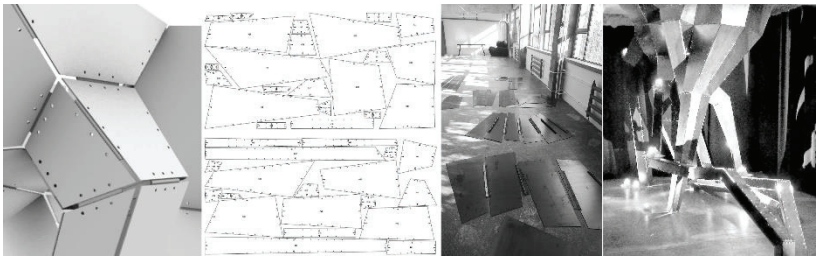


Figura 20. Obiectul Maelstrom este un instalație de artă, care a pornit de la un tablou realizat de artista Oana Olăhuț. Ionuț Anton a transformat desenul bidimensional într-un obiect care poate fi fabricat digital, folosind proiectarea computațională. Un model tridimensional a fost realizat, de aici s-au extras desene cu fațetele cu perforațiile de prindere care au fost tăiate cu mașini cu comanda numerică din tabla, conectate cu corniere pliate la unghiuri variabile. Ionuț Anton, 2019

În acest sens, principiul *file_to_factory* nu trebuie înțeles ca o celebrare reductivă a eficienței mediului computațional, ci ca o provocare permanentă de a mări numărul de conexiuni de feedback dintre proiect, material și materializare. (FABLAB, Taubman College of Architecture 2011, 74). În prezent, utilizarea uneltelor de fabricație digitală în arhitectură nu urmărește automatizarea procesului constructiv, ci îmbunătățirea comunicării dintre modelul digital și metoda de fabricație, printr-o abordare capabilă să se adapteze caracterului specific al fiecărui proiect.

3.3.2. Arhitectul, maestrul de construcție digital

Din perspectiva proiectanților, tehnologia a fost percepută mult timp ca inflexibilă, constrângându-i să lucreze cu uneltele disponibile, fără posibilitatea de a le adapta propriilor nevoi. Până de curând, arhitecții au așteptat ca alte discipline să dezvolte aceste unelte, limitându-se la alegerea dintr-un catalog de posibilități. Procedând astfel, arhitectura riscă să își piardă cultura proprie și specificul său, bazate pe experiența și cunoștințele profesionale individuale (Kohler și Kara 2011, 116-23).

Această limitare a condus la ruperea legăturii dintre arhitect și procesul de producție, transformând rolul arhitectului într-unul din ce în ce mai abstract. Tehnologiile digitale oferă însă oportunitatea de recuperare a acestei legături, prin proiectarea și adaptarea unor unelte digitale extrem de personalizabile, ce pot fi utilizate în proiectarea și fabricația digitală.

Odată cu separarea proiectării de construcție, propusă de Alberti, s-a limitat de asemenea și spațiul de posibilități, a ceea ce se poate proiecta și construi (Pigram et al. 2012, 144). Arhitecții tradiționali își exprimau intențiile prin reprezentări bidimensionale, dar arhitecții tind să deseneze ceea ce se poate construi, iar în consecință, se construiește doar ceea ce este desenat (Mitchell 2001, 354).

Astfel, constrângerile impuse de reprezentare s-au adăugat altor limitări care fac parte din practica arhitecturală, precum cele legate de integritate structurală, timp și buget (Benjamin 1991). În acest context, explorarea potențialului proiectării algoritmice și a metodelor de fabricație robotice au rolul de a extinde domeniul de proiectare, până recent limitat de constrângeri de reprezentare și exprimare.

Dispariția arhitectului în calitate de responsabil direct al construcției a fost accentuată, în ultimele secole, de separarea dintre programele educaționale și de existența unor organizații profesionale distincte pentru proiectanți și constructori. Industrializarea producției materialelor de construcție a condus la standardizarea metodelor constructive, limitând astfel creativitatea. În mod ironic, prin limitarea domeniul său principal de interes la aspect, arhitectura a sacrificat controlul său asupra formei (Kieran și Timberlake 2003, 29).

Problema calității de autor al clădirii a fost una dintre preocupările arhitecților, de-a lungul timpului. Maestrul constructor medieval era simultan proiectant și coordonator al execuției, dar avea un statut anonim. Ulterior, arhitectul a fost recunoscut ca autor al clădirii prin construirea acesteia ca o copie a proiectului desenat, însă lipsa implicării directe în construcție a condus adesea la o detașare de obiectul final. În perioada modernă, valoarea arhitectului a fost atribuită capacității creative de a obține obiecte unice prin utilizarea de componente standard, predefinite. Astfel, de-a lungul timpului arhitectul a împărțit meritul în funcție de circumstanțe. În prezent, utilizarea scripturilor în proiectarea de arhitectură, ridică din nou problema autorității asupra rezultatului. Dacă arhitectul folosește în proiect un script, care nu este realizat de el, ci doar

generează o instanță care este asimilată în soluția respectivă, de fapt își asumă credit pentru ceva ce nu este în întregime produs de el (Burry 2011, 39).

Transpunerea unui concept în cod nu este un proces mecanic sau automat și nu ar trebui perceput ca un obstacol ci ca o oportunitate de dezvoltare a ideii și de explorare a posibilului.

Una dintre provocările cu care se confruntă arhitecții în utilizarea uneltelor computaționale este câștigarea abilității de a programa. În acest context, proiectanții obișnuiți să gestioneze probleme ambigue și deschise sunt puși în situația de a propune soluții clar definite, prin procese de abstractizare și stabilire de relații, care negociază între variabilele și constrângerile cuprinse în proiect (Scheurer 2010, 89).

Modelul conform căruia arhitectul rămâne un factor de decizie prin implicarea sa doar în etapa finală a procesului generativ a oferit un confort prin deținerea unui aparent control. Limitarea implicării arhitectului în proiectarea computațională doar la selectarea unei soluții finale, bazată pe criterii subiective, dintr-o familie de variante generate de algoritm trebuie depășită. În loc să acționeze doar ca un curator al opțiunilor generate, arhitectul trebuie să devină un actor activ în procesul de generare, capabil să traducă cerințele proiectului în cod, să prevadă implicațiile materializării și să dezvolte unelte specifice pentru fiecare proiect.

Asumarea acestui nou rol presupune și cedarea parțială a controlului în anumite aspecte ale procesului de proiectare, pentru a obține o mai mare implicare în proiect. Tehnologia digitală deschide posibilitatea unui teren comun de colaborare între creativitate, modelare computațională și fabricație digitală, într-un sistem de feedback flexibil. Propunând o negociere între proiectare, fabricație și computație, prin intermediul uneltelor digitale, aspectul autocratic este dizolvat. Astfel, prin utilizarea tehnologiei digitale în practica arhitecturii de la concept la fabricație, apare oportunitatea de a obține un răspuns specific unic, mai informat și un obiect de arhitectură adaptat local (Tănase și Anton 2014, 76).

Prin utilizarea tehnologiilor digitale, arhitectul este provocat să își asume o responsabilitate mai mare, atât în proiectare, cât și în materializare. Informația este integrată procesului de proiectare, iar metoda de producție a câștigat semnificație pentru proiect. În acest context, arhitecții devin responsabili de dezvoltarea uneltelor conceptuale și fizice, care să

integreze atribute, informații și cunoștințe specifice pentru practica de arhitectură.

Responsabilitatea proiectantului nu ar trebui să se rezume doar la livrarea unui proiect la timp, suficient de detaliat și încadrat într-un buget prestabilit. O astfel de abordare poate conduce la pierderea oportunității unei explorări creative, la ratarea unor posibilități emergente și la ignorarea unei alternative mai flexibile la practica convențională. În schimb, interacțiunea directă cu uneltele digitale permite deschiderea către noi moduri de gândire și acțiune, ducând la transformare activă a procesului de proiectare (West și Burry 2011, 124-33).

Dacă inițial arhitecții colaborau cu programatori și specialiști tehnici pentru a traduce proiectele în date relevante pentru fabricație, în prezent se reconfigurează atribuțiile proiectantului. Astfel, metoda de fabricație este integrată în proiect, devenind parte constitutivă a procesului creativ. Primele studiouri de arhitectură care promovau proiectarea asistată de computer erau adesea conduse de parteneri care interacționau minim cu tehnologia digitală. Implementarea propriu-zisă era realizată de tineri arhitecți, care traduceau ideile seniorilor în medii digitale (Picon 2010, 60). În prezent, înțelegerea logicii de lucru a mediilor digitale este recunoscută ca o competență a arhitectului, marcând o redefinire a rolului său în raport cu procesele de proiectare și fabricație.

Arhitecții nu ar trebui percepuți doar ca furnizori de concepte abstracte, care evită să se implice în numeroasele aspecte ale unui proiect, considerate prea tehnice sau nesemnificative pentru a le merita atenția. O astfel de viziune contribuie la o slăbire a implicării profesionale, care vulnerabilizează poziția arhitectului în cadrul procesului de proiectare și construcție, văzut ca o colaborare interdisciplinară. În acest context, rolul arhitectului este supus unei renegocieri, ce presupune o implicare directă și activă, în locul unei așteptări pasive ca tehnologia să evolueze în jurul său. Prin valorificarea atributelor mediului digital, arhitecții au oportunitatea de a-și aplica cunoștințele în mod relevant și de a recăpăta credit, în ceea ce privește expertiza interdisciplinară.

Pentru a-și păstra relevanța, arhitecții trebuie să își dezvolte activ propria cultură de proiectare, ceea ce presupune nu doar adoptarea tehnologiei existente, ci și crearea propriilor unelte digitale ca parte a practicii lor profesionale.

Prin facilitarea apropierii arhitectului de materializare, se revine la meșteșug, reamintindu-se astfel statutul de maestru al construcției pe care arhitectul îl avea în trecut, atât în calitate de proiectant, cât și ca expert în construire. Relația strânsă care există între proiectare și fabricația digitală are ca rezultat o creștere a implicării arhitectului în rezultatul final construit. Inevitabil, se mărește și responsabilitatea acestuia.

Această responsabilizare nu trebuie interpretată ca o revendicare a unui control absolut asupra tuturor proceselor de proiectare și construcție. Dimpotrivă, ea reprezintă o invitație la explorarea dimensiunii colaborative a construcției, prin integrarea uneltelor conceptuale de proiectare, a uneltelor digitale de modelare și a tehnologiilor digitale de fabricație.

Calculatorul realizează conexiuni între mai multe variabile, fără să judece coerența sau legitimitatea asocierii acestora. Inițial, reacția a fost aceea de a dezvolta o sensibilitate în interiorul mașinilor înseși, dar eșecul dezvoltării unei inteligențe artificiale veritabile sugerează o nevoie de a dezvolta intuiția umană în relație cu operațiile mașinii, nu de a construi o mașină cu abilități critice (Lynn 1999, 19).

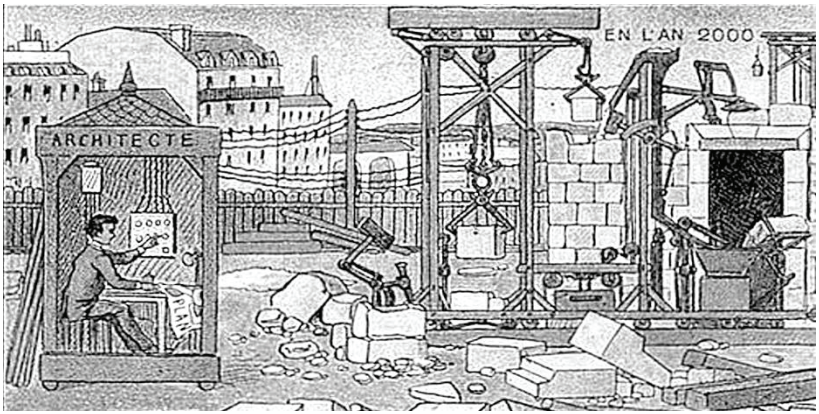


Figura 21. Artistul francez Villemard și-a imaginat anul 2000 într-o colecție de cărți poștale, datând din 1910. Retro-futurism: Șantier electric (Vilemard 1910). Imagine liberă de drepturi.

Inovația tehnologică facilitează implicarea atât a proiectantului, cât și a beneficiarului în procesul de proiectare. Astfel, clientul achiziționează obiectul pe care îl dorește, în acord cu nevoile și preferințele sale. În

practica de arhitectură, clientul interacționează întotdeauna cu proiectantul pentru a identifica soluția ideală. Generarea unui număr mare de variante pornește de la premisa că utilizatorul înțelege opțiunile nelimitate pe care le are la dispoziție și că este dispus să investească timp în căutarea acelei soluții care i se potrivește cel mai bine. În acest context, este necesar să evaluăm în ce măsură utilizatorul are nevoie să cunoască aceste posibilități nelimitate, dacă nu cumva riscă să fie copleșit de varietatea acestora, sau dacă dorește, într-adevăr, să fie implicat în fiecare etapă a procesului decizional. În acest caz, proiectantul ar trebui, așa cum a făcut întotdeauna, să medieze relația dintre dorințele și nevoile utilizatorului, conceptul arhitectural și procesul de materializare. Datorită capacității tehnologiei digitale de a corela numeroase criterii, arhitectul are posibilitatea de a dezvolta opțiuni variate, oferind, în cele din urmă, un proiect care reprezintă un răspuns specific, adaptat fiecărei situații particulare.

Proiectantul digital urmărește ca uneltele sale să poată fi personalizate în funcție de fiecare proiect. Pentru a avea o contribuție creativă în proiect, proiectanți adaptează unelte flexibile, utilizându-le în altele moduri decât cele pentru care au fost făcute. În acest context, arhitectul ar trebui să cunoască caracteristicile de producție ale uneltelor de fabricație digitală și să proiecteze folosindu-se în mod creativ de capacitățile specifice ale acestora. Mai mult decât atât, proiectantul digital își poate construi propriile unelte, extinzând astfel domeniul creativ până la nivelul uneltelor.

Cum proiectăm a devenit la fel de important ca ce proiectăm. Proiectarea a devenit un domeniu care se extinde și pătrunde în domenii stăpânite, până recent, de alți specialiști: matematicieni, geneticieni, artiști și producători. Proiectanții post-digitali lucrează mai degrabă prin manipulare decât prin determinism, iar ceea ce este proiectat capătă o dimensiune intuitivă, speculativă și experimentală - o arhitectură a prototipurilor, a modelării, a experimentării și a generării de variante (Sheil 2008).

3.3.3. Model și articulare.

În centrul meșteșugului digital poate fi plasat modelul - un principiu care combină aspecte abstracte și geometrice cu materialul și cu strategia de articulare. Conceptul de model este folosit în practica contemporană cu sensul de secvență, distribuție, progresie, definind o serie de unități identice sau similare, dar implicând totodată un proces de generare.

Modelul presupune existența unei reguli de generare geometrică; nu este rezultatul unei construcții întâmplătoare. El exprimă o succesiune logică, o gândire secvențială guvernată de un set de reguli, apropiindu-se astfel de noțiunea de algoritm. În același timp, modelul implică existența unei unități care se repetă, se multiplică și se articulează pentru a genera continuitate.

În practica de arhitectură, modelul cuprinde aspecte legate de modul de articulare, de principii funcționale, de stilul arhitectural, având și valențe decorative. Este profund influențat de ritual, geometrie, matematică precum și de meșteșug. De-a lungul timpului, modelul a fost în mod constant asociat cu stilul, reprezentând exprimarea grafică sau chiar diagrama acestuia (Garcia 2010, 9).

Modelul construit geometric

Primele modele grafice descoperite, ce datează din perioada Neolitică, își au originea în ritual și sunt reprezentări abstracte, diagrame cu rol de talisman protector. În arhitectura islamică, modelul este un atribut fundamental, fiind asociat cu conceptul filozofic de *nizam*, conform căruia înțelepciunea se manifestă prin recunoașterea și înțelegerea tiparelor din tipare (Garcia 2010, 9-12). În aceste cazuri, componenta simbolică este cea care definește modelul, acesta fiind profund influențat de ritual, religie sau filozofie.

Apariția tiparului a contribuit la publicarea primelor cărți cu modele în Europa, încă din secolul al XV-lea. Modelul, în calitate sa de construcție geometrică repetabilă, un fel de rețetă generică, s-a potrivit firesc cu atributele tiparului. Importanța acestuia a crescut începând cu secolul al XVII-lea și până în secolul al XIX-lea, datorită dezvoltării imperiilor coloniale, care au favorizat contactul cu noi culturi.

Prin constituirea imperiilor coloniale se pun față în față mediul controlat de tradiție și ritual din noile teritorii descoperite și metropolele care sunt marcate de dezvoltarea industrială. În acest context, modelul devine un limbaj de comunicare, cu un statut dual, fiind legat atât de meșteșug, cât și de producția în masă. Cele mai multe cărți de modele au fost publicate în secolul al XVIII-lea și s-au concentrat pe industria bunurilor de lux, în special în domeniul textil, axat pe mătase și lână. Desenul devine, astfel, un mijloc de generalizare – o monedă de schimb a informației estetice între

industriile orientate către tratarea suprafeței: textile, tapiserii, ceramică (Dutta 2007, 129).

Între lucrătorul industrial din metropolă și artizanul tradițional din colonii exista o diferență profundă, care a încercat să fie depășită prin interpretarea modelului ca desen. Desenul devine astfel un filtru aplicat uniform peste obiecte din culturi diferite, realizate din materiale diferite, cu semnificații diferite. Desenul, ca reprezentare bidimensională, văzut ca fiind o construcție geometrică, reprezintă un criteriu abstract la care se reduce interpretarea. Procedând astfel, particularitățile locale, legate de material, și tehnologia de realizare, sunt treptat eliminate. În mod similar, componenta simbolică dispare, fiind înlocuită cu aspecte geometrice abstracte. Modelul funcționează ca un cod, prin care creația subiectivă a artizanului este descifrată și tradusă în informație cuantificabilă.

Prin orientarea către construcție geometrică, modelul este investit cu valoare estetică, devenind o condiție a bunului gust. Se considera că repetiția poartă în ea o imagine de consonanță, iar modelul repetitiv poate conduce la un sentiment de frumos (Good 1888, 185). Astfel, frumusețea poate fi produsă printr-o repetiție automatizată, ușor de realizat de mașinile industriale.

Se considera că originalitatea într-un design nu constă în elementele sale abstracte, care pot fi produse de oricine, ci în concepția și efectul general al asocierii și dispunerii acestora în noi forme, asemenea notelor muzicale, conducând astfel la o varietate nesfârșită. Această premisă pornea de la ideea conform căreia originalitatea unui obiect se datorează designerului, care, deși lucrează cu aceleași elemente abstracte, va obține rezultate unice prin simpla lor articulare. Astfel, se presupunea că doi artiști diferiți, folosind exact aceleași modele, ar trebui, prin modul propriu de articulare, să producă obiecte distincte – la fel ca două caleidoscoape (James Emerson Tennent 1841, 112).

În perioada revoluției industriale, modelul dobândește și ramificații legate de raportul dintre original și copie, legitimitate și fraudă. Ucenicii din colonii învățau meseriile prin repetarea modelelor existente, astfel încât se putea interpreta că meșteșugul se transforma treptat într-o practică de copiere mecanică. Deoarece nici lucrătorul metropolitan, nici artizanul colonial nu era considerat împuternicit cu rațiune sau gust, replicarea modelelor devine motivația pentru a-i defini pe amândoi drept executanți (Dutta 2007, 155, 192).

În secolul al XIX-lea are loc o creștere exponențială a suprafețelor produse în masă în domeniul arhitecturii: tapet, gresie, teracotă, covoare și sticlă. Evoluția tehnologiilor de tratare a suprafeței a generat o predispoziție pentru utilizarea modelelor. Acestea au devenit elementul unificator, capabil să stabilească o continuitate între obiecte diferite sau între obiecte și context (Dutta 2007, 127).

În această perioadă, John Ruskin, Gottfried Semper și Louis Sullivan au scris numeroase tratate despre modele, iar odată cu revoluția industrială, modelul a devenit una dintre direcțiile esențiale explorate de producția în masă. Prin concentrarea asupra geometriei, această epocă este marcată de cercetări în domeniul taxonomiei, morfologiei și teoretizării modelelor (Garcia 2010, 9-12). În căutarea unor metode de generare formală, modelele biologice evolutive și variabile au devenit subiectele preferate ale cercetării.

Geometria a fost percepută atât ca expresie a gândirii logice, cât și ca model prezent în natură. Rămâne totuși o dezbatere deschisă dacă geometria este o parte integrantă a lumii, o metodă care explică lumea sau o construcție speculativă impusă asupra fenomenelor existente (Dutta 2007, 104). Totuși, geometria, ca practică rațională, nu este cea care determină forma elementelor regăsite în natură, chiar dacă unele prezintă construcții geometrice ordonate, de simetrie, repetiție sau relații de proporționalitate. Regularitatea acestor forme este rezultatul proceselor interne de creștere naturală. De asemenea, se considera că distincția dintre geometria liniilor drepte și cea a formelor curbilinii coincide cu diferența dintre organic și anorganic în natură. Geometria formelor naturale a fost împărțită în două tipologii: una caracterizată prin linii drepte, regăsite în formele minerale, iar cealaltă prin linii curbe, specifice formelor organice. Astfel, formele anorganice au fost interpretate ca rezultat al unor fenomene naturale de agregare mecanică. Această distincție ajunge să structureze și opoziția dintre mecanic și biologic. În secolul al XIX-lea, modelul capătă o importanță deosebită, oscilând între variație și repetiție, între mecanic și natural (Dutta 2007, 192).

Se considera că geometria rectilinie, regulată, are o proveniență pur mentală și este adecvată producției industriale, care o poate realiza foarte precis. În schimb, formele curbe, inspirate din natura organică, puteau fi concepute și materializate doar prin intermediul abilității artizanale instruite. Era vorba despre o activitate ce se baza pe aspecte subiective, în care, în faza de concepție, se încerca reproducerea unor caracteristici

formale neuniforme - trăsături care, în natură, rezultă din procese de generare, iar în faza de execuție, forma era materializată treptat, din aproape în aproape. Astfel, acest proces nu a putut fi abstractizat sau mecanizat, deoarece este dependent de aprecierea pe parcurs a rezultatului, evaluare ce nu poate fi tradusă în reguli simple. Se conturează, așadar, o legătură directă între modul de proiectare și modul de materializare asociat acestuia. În consecință, modelele curbe nu erau potrivite reproducerii mecanizate și au fost abandonate, din rațiuni de eficiență, în favoarea celor rectilinii.

Practica actuală, marcată de digital, nu mai distinge între geometria rectilinie și cea curbă din perspectiva metodelor de construire și materializare. Uneltele digitale de concepție și fabricație pot opera cu ambele tipuri de forme, atâta timp cât acestea sunt definite cu precizie. Astfel, datorită noilor oportunități oferite de mediul digital, domeniul suprafețelor cu formă liberă a fost printre primele explorate.

Această tendință nu este însă doar rezultatul unei facilitări tehnologice, ci reflectă și o orientare focalizată a practicii arhitecturale contemporane către suprafață (Picon 2013, 26). În acest context, unul dintre domeniile în care aplicarea modelului a fost intens experimentată este cel al anvelopei clădirii. Anvelopa reprezintă elementul de suprafață cel mai continuu al construcției și, prin urmare, a devenit punctul de plecare pentru utilizarea modelului în sensul de desen bidimensional. În cultura digitală, modelul a s-a regăsit cu precădere la nivelul texturii superficiale (Picon 2013, 30).

Forma arhitecturală ar trebui să rezulte din suprapunerea criteriilor generatoare, din relaționarea și negocierea acestora ca ansamblu coerent. Cu toate acestea, arhitectura contemporană a preferat inițial o abordare orientată pe elemente izolate, în detrimentul relaționării și gestionării multicriteriale. În acest context, suprafața a atras atenția arhitecților, devenind principalul mijloc de exprimare al celor mai noi abilități tehnologice și creative (Hensel 2013, 31-32). Accentul s-a deplasat astfel asupra performanței clădirii, însă nu în sens funcțional, ci în sensul unui spectacol vizual.

Adesea, această suprafață este tratată ca o entitate autonomă, detașată de restul obiectului arhitectural, o membrană care exprimă flexibilitate și adaptabilitate. Anvelopanta devine o piele care s-a eliberat de corpul clădirii, pretinzând că nu mai are nicio obligație față de interior (Lavin 2011, 25). Această atitudine este susținută și de principiul proiectului

deschis, care trebuie să permită schimbări ulterioare de funcțiune, sau reutilizarea eficientă cu modificări minime. De fapt, această detașare a fațadei permite fragmentarea proiectului în componente, ce pot fi tratate individual. Pe de o parte, interiorul poate fi abordat prin soluții standardizate, ce răspund normativelor, iar pe de altă parte, anvelopanta devine locul unde arhitectul poate să epateze.

Dacă această detașare de interior și orientare către exterior nu a ținut cont de context, atunci atuurile tehnologice au fost folosite doar ca mijloc de compensare. Dacă tehnologia nu își găsește o aplicație care să stabilească o legătură cu situația specifică și cu contextul, ea ajunge să fie utilizată ca un nou tip de abordare generică (Hensel 2013, 32). Anvelopa clădirii este considerată ca fiind responsabilă de medierea între clădire și context, căpătând astfel atribute legate de comunicare. Prin tratarea ei ca o componentă detașată de interior și indiferentă față de exterior, mesajul transmis devine unul repetitiv, generic, lipsit de referințe, dependent de spectacolul tehnologic.

Spre sfârșitul anilor 1990, odată cu dezvoltarea conceptului de „pliu" în arhitectură, au început să fie explorate noi posibilități de creare de modele, prin maparea de texturi pe suprafețe NURBS. Deformarea topologică a unei imagini pe o suprafață a fost cel mai simplu mod de a le asocia. Astfel de efecte au fost realizate preponderent în mediul digital, iar în momentul materializării acestor proiecte, efectele au fost obținute, inițial, prin proiecții de imagini video pe suprafețe curbe sau prin încorporarea de sisteme de afișaj digital în suprafețe (Schumacher 2010, 33).

Datorită softurilor, a devenit posibilă texturarea oricărei suprafețe cu orice imagine, astfel că distincția dintre textură și imagine devine tot mai vagă (Perrella 2000, 5-8). Treptat, imaginile au început să treacă printr-un proces de abstractizare, apropiindu-se de modelul geometric. Pixelii au reprezentat un prim exemplu de transformare a imaginii în textură prin intermediul modelului. Suprafețele NURBS, fiind suprafețe definite matematic, capabile să adopte forme fluide, dar foarte precis modelate, pot integra modelul ca proces geometric asociat. Astfel, modelul contemporan păstrează ca punct de plecare trama și rețeaua, însă acestea devin flexibile, deformabile, dar totodată precise și definite matematic. În această etapă, modelul se adaptează noului suport, suprafața deformată, dar rămâne integrat în planul acesteia. El rămâne un desen de suprafață, supus transformărilor topologice aplicate ansamblului.

Pe măsură ce obiectele modelate în mediul virtual au început să fie construite, modelul a fost asociat direct cu procesul de materializare fizică. Suprafețele libere au început să fie subdivizate, iar modelul a devenit un instrument de fragmentare a suprafețelor mari în unități fabricabile. Odată cu trecerea la subdivizări geometrice ale suprafețelor, maparea a rămas doar ca o metodă de testare, utilă în simularea vizuală a efectelor. Modul în care suprafețele NURBS pot fi subdivizate prin procese precise, matematice, a devenit o provocare. Astfel, tehnica vizuală a mapării texturilor a fost înlocuită treptat de scripting. Dificultatea de a realiza modele de subdivizare care să fie în același timp fezabile și elegante pentru suprafețele cu dublă curbură a reprezentat oportunitatea prin care modelarea parametrică și scripting-ul au ajuns în prim-plan.

Nevoia de împărțire a început să fie privită ca o oportunitate de articulare, prin dobândirea unor atribute materiale. Obiectele fizice au grosime, iar geometria lor este condiționată de caracteristicile materiale și de cerințele procesului de fabricație, motiv pentru care procesul de subdivizare a început să încorporeze atribute legate de mediul fizic. Problema panourilor care trebuie realizate ca parte dintr-o suprafață liberă a condus la dezvoltarea unui sistem de modelare parametric și asociativ, cu elemente capabile să se adapteze variațiilor. Scopul acestui demers este menținerea identității fiecărei componente, prin compensarea diferențelor morfologice ale suprafeței de bază, obținând în același timp o imagine globală omogenă (Schumacher 2010, 33).

Treptat, modelul depășește planul bidimensional deformat al suprafeței și dobândește o a treia dimensiune. Primele încercări de fabricare a suprafețelor NURBS subdivizate au apărut odată cu introducerea mașinilor de frezare cu control numeric. Bernard Cache și Greg Lynn au experimentat cu efecte de accentuare a liniilor de contur și a urmelor frezei, propunând o interpretare contemporană a conceptului de *faktura* — evidențiere deliberată a urmelor lăsate de procesul de fabricație.

Proiectarea de arhitectură contemporană tinde să se îndepărteze de abordarea top-down, în care geometria este impusă, iar pentru a putea fi construită este necesară descompunerea ei în părți. În acest tip de demers, fabricația are un rol secundar, concentrat exclusiv pe eficiența economică și bazat pe metode prestabilite. Ca alternativă, subîmpărțirea obiectului de arhitectură este integrată în procesul de proiectare, devenind parte integrantă a conceptului arhitectural. Astfel, procesul de proiectare capătă o logică bottom-up, în care geometria ansamblului nu mai este dictată de o

formă impusă, ci este generată prin articularea componentelor. În această paradigmă, componentele nu mai trebuie să fie identice, ci pot varia în funcție de condițiile locale ale ansamblului, făcând posibilă adaptarea între formă, materialitate și context.

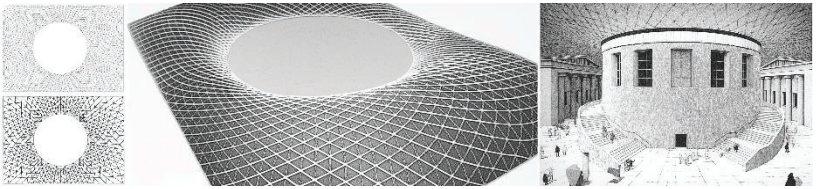


Figura 22. Modelul parametric al structurii de acoperire. Great Court British Museum, Foster+Partners Londra, 1994 - 2000 (Pottmann et al. 2007, 394-95). Ilustrație realizată de autor.

Nu mai este vorba despre suprafețe libere, ci despre structuri articulate, în care diferențierea devine un mod de articulare. Se produce astfel o tranziție graduală prin articulație, unde forma se transformă pentru a se adapta diferitelor situații din cadrul ansamblului. Generarea formei variabile rezultă din corelarea între aspectele conceptuale, geometrice sau funcționale ale spațiului, însă tranziția între situații diferite nu se face brutal, ci prin continuitate. În acest sens, articulația reflectă, la nivelul ansamblului, atât o logică globală, cât și un caracter local. Modelul parametric permite exprimarea simultană a unității ansamblului și a diferențierii interne, pe care o amplifică în mod controlat (Schumacher 2010, 34).

Degradeurile devin o caracteristică recurentă în generarea modelelor contemporane. Acestea sunt definite prin parametri numerici legați dinamic prin expresii care influențează forma obiectelor în raport cu condițiile proiectului. Degradeurile sunt zone care nu au contururi sau limite clare, ci sunt definite de disiparea de puncte, exprimând mai degrabă articularea. Modelul nu este definit prin coordonate locale, ci prin domenii de influență. Astfel, se generează o modificare continuă și progresivă a intensității unui câmp. Parametrii în degrade pot semnifica tranziția, recurența, atracția sau densitatea, influențând geometria prin câmpuri numerice de forță (Lynn 1999, 32, 25).

Principiul de articulație moale a pornit de la intenția de a construi o coerență urbană fără a recurge la reproducerea structurilor materiale

preexistente ale orașului, fiind inițial formulat prin intermediul conceptului de pliu (Lynn 1993, 24-27). Același principiu se extinde și la articularea dintre părți și întreg în cazul artefactelor arhitecturale. Tehnologia digitală permite astăzi modelarea cu precizie a trăsăturilor de mediere, în opoziție cu o viziune idealistă în care întregul este conceput ca o acumulare de părți. Interesul actual pentru modele este, probabil, un răspuns la nevoia culturală de a întruchipa complexitatea nu prin contradicție, ci prin consistență (Zaera-Polo 2010, 20). Această tendință a fost consolidată de disponibilitatea noilor tehnologii, care au permis practicii de arhitectură să dezvolte modele din ce în ce mai elaborate la diferite scări de intervenție, de la urbanism la detalii constructive.

Articulația, în sensul detaliului constructiv, a fost privită încă din modernitate ca unitatea fundamentală a tectonicii (Semper 1951), fiind considerată cel mai mic element al construcției arhitecturale și, totodată, generatorul acesteia (Frampton 2001). Prin detaliu, se exprimă caracteristicile materiale ale construcției, dar și logica ei internă.

Schumacher pune și el preț pe articulație, considerând-o responsabilă de înțelegerea subiectivă a ordinii spațiale. Articularea se bazează pe ideea că obiectele de arhitectură funcționează doar prin lectura activă a utilizatorului asupra organizării spațiale. Contează cum arată lucrurile: articulația ar trebui să faciliteze orientarea, prin exprimarea organizării spațiale. Dependența de câteva tipuri nu mai poate epuiza modul de articulare. Strategiile de articulare trebuie să fie concepute astfel încât să ordoneze câmpul vizual și să ghideze privirea în recunoașterea configurațiilor abstracte și în distincția momentelor-cheie din cadrul acestora (Schumacher 2010, 31).

Pentru a putea fi realizat la scară mare, orice obiect arhitectural este gândit ca fiind compus din unități mai mici care pot fi realizate individual. Geometria componentelor a fost determinată de caracteristicile uneltelor care ajutau la realizarea lor. Când erau făcute manual, părțile componente erau diferite, realizate de mai mulți meșteșugari în funcție de pregătirea și abilitățile fiecăruia, dar coordonate astfel încât să se obțină unitatea ansamblului. Odată cu mecanizarea, arhitecții s-au străduit să-și adapteze practica la uneltele mecanice ale producției în masă (Carpo 2011, 13). Se urmărea utilizarea unui număr cât mai mare de elemente identice, prefabricate. În prezent, deși uneltele s-au schimbat, încă mai proiectăm raportându-ne la metodele de producție specifice producției în serie. Uneltele actuale de fabricație, deși au posibilitatea de a produce elemente

diferite, sunt folosite, de cele mai multe ori, tot pentru a produce obiecte în serie, poate mai eficient decât în perioada modernă.

În perioada pre-industrială, detaliile de articulare ale părților erau diferite, iar problema era abordată la nivel local, cu rezolvări specifice. Odată cu orientarea către elemente prefabricate, proiectul a început să controleze procesul la nivel global, lucrând cu cât mai puține tipuri de elemente care se articulau. Astfel, detaliile erau puține și folosite repetat. Proiectul urmărea să controleze construcția, dar era la rândul său subordonat uneltelor de producție.

Articulația contemporană face parte din procesul digital de generare și este definită prin algoritmi, integrând în același timp și dimensiunea materială. Modelul devine rezultatul abstractizării aspectelor conceptuale, materiale și de fabricație. Este caracterizat prin variabilitate, țesere și asamblarea de componente diferite. Articulația poate fi definită fie ca un component în sine, fie ca rezultat al intersecției dintre componentele vecine. Ea devine un loc de sincronizare a ambiguităților, o interacțiune moale, o conexiune care, simultan, contribuie la definirea geometriei globale și delimitează componentele.

Modelul și decorația

În arhitectura tradițională, modelul are valențe de decorație, însă aceasta nu presupune întotdeauna folosirea unui model geometric. Modelul presupune o continuitate, bazată pe reguli de construcție geometrică, în timp ce decorația, chiar dacă se folosește de proporții, nu este întotdeauna formulată exclusiv de aceste reguli generatoare. În acest caz, când nu este definită prin model, decorația poate cel mult să creeze o continuitate perceptibilă la nivel global.

Până în secolul al XIX-lea, înainte ca elementele decorative să fie produse industrial, ornamentul era realizat manual, de către artiști, meșteșugari sau constructori. În acest context, arhitectul, deși colabora cu producătorii, nu era implicat direct în conceperea ornamentelor, ceea ce poate fi interpretat ca un gest de încredere în competențele meșteșugarilor. Odată cu industrializarea, însă, fabricarea a devenit un subiect central al preocupărilor arhitecților, accentul mutându-se pe procesul de asamblare și modulare eficientă a elementelor.

Astfel, decorația tinde să se apropie tot mai mult de model, ca urmare a gândirii modulare, care presupune realizarea unor elemente capabile să fie

asamblate. Accentul pus pe eficiență conduce, adesea, la utilizarea unui număr cât mai mare de unități identice, repetate. Pe de o parte, această abordare întărește controlul arhitectului asupra procesului de construcție, iar pe de altă parte, elimină personalizarea. Practica și construcția de arhitectură se reorientează astfel către logica asamblării elementelor prefabricate (Picon 2013, 73).

Când erau realizate manual, ornamentele presupuneau un efort considerabil din partea sculptorilor profesioniști, ceea ce genera costuri ridicate. Această realitate economică a contribuit la dozarea atentă a ornamentelor, conferindu-le o valoare reprezentativă. Prezența decorației devenea astfel un semn al statutului social, reflectând un sistem de diferențiere socială bazat pe accesul la resurse. În această logică, ornamentul acționează ca un operator: transformă capitalul financiar în semn, valoarea materială în distincție socială, iar costul și materialul în comunicare vizuală și socială (Picon 2013, 49).

Posibilitățile de producție în masă a ornamentelor din teracotă și fontă, datorită matrițelor, au dus la decoruri încărcate, mai ales în America (Picon 2013, 34). Prin producția în serie, prețul a scăzut, iar ornamentul a devenit accesibil, nu mai era marca unei societăți elitiste. Astfel, cei care au câștigat din boom-ul industrial au încercat să-și arate puterea nou obținută în mod tradițional, prin decorație, dar produsă prin metodele industriale. Ca rezultat, decorația și-a pierdut din semnificație, ajungând astfel să fie folosită superficial.

Treptat, producția industrială în domeniul arhitecturii, care era prezentă inițial la nivelul ornamentației, a evoluat, odată cu cea de-a doua revoluție industrială, către aspectele structurale și tehnologiile de construire, odată cu dezvoltarea industriei oțelului, la începutul secolului al XX-lea. Atât orientarea producției către domeniul structural al construcției, cât și golirea de semnificație a ornamentului, transformat într-un produs industrial de serie, au condus la denigrarea decorației de către moderniști. Decorația, care avea și scopul de a diferenția, era apreciată pentru calitățile sale de unicitate, prețiozitate și raritate. Tocmai această funcție de individualizare a intrat în contradicție cu concepția modernă (Picon 2013, 48). Pentru Adolf Loos, ornamentul era specific societății tradiționale, unde era folosit pentru a favoriza diferențierea, în timp ce societatea modernă ar trebui, dimpotrivă, să suprime ideea de individual, ceea ce făcea ornamentul inutil prin pierderea funcției sale sociale (Loos 1997).

Gridul modular promovat în epocă semnifica egalitatea democratică și preferința pentru o organizare non-ierarhică, în care indivizii sunt egali și supuși votului majorității (Zaera-Polo 2010, 23). Perioada modernă, prin concentrarea pe funcționalism și pe claritatea formelor, prin eliminarea decorației, a lăsat modelului o influență izolată. În anii 1930, modele moderniste pot fi întâlnite în special în planurile de urbanism ale lui Le Corbusier sau în tipologiile urbane propuse de Kevin Lynch.

Denigrarea ornamentului de către moderniști nu poate fi explicată exclusiv prin înlocuirea producției artizanale cu cea industrială, întrucât mecanizarea precede perioada modernă. Ornamentul stătea în calea cercetării fără limite a modernismului, motiv pentru care trebuia eliminat (Schumacher 2010, 33). Dacă modernismul a investigat autonomia obiectului față de context, postmodernismul a explorat autonomia dintre părți și întreg. Astfel, a recurs la fragmentare și hibridizare ca reacție la uniformitatea și coerența modernistă. Spre deosebire de modularea specifică modernismului, postmodernismul a utilizat colajul și montajul ca tehnici compoziționale, la care, treptat, s-au adăugat deformările topologice.

Postmodernismul a abordat tocmai această lipsă a decorației și a readus motivele istorice, într-un mod eclectic. S-au folosit multiple tehnici de tratare a suprafețelor, îndreptându-se către suprafețe texturate, cu suprapuneri de diferite modele. Robert Venturi și Denise Scott Brown propun o desprindere a funcțiunii clădirii de modul de reprezentare. În acest context, creativitatea devine contradicția dintre spațiu, structură, program, pe de o parte, și reprezentare, pe de alta. Se pune accentul pe comunicare, motiv pentru care sunt utilizate simboluri, referințe culturale și de context, iar modelul revine, dar ca o piesă încărcată de semnificații, parte a unui colaj (Kubo et al. 2006).

În arhitectura contemporană, modelul primește atribute ornamentale prin complexitate. Dacă inițial formele cu suprafețe libere erau percepute ca fiind marcate de caracteristicile mediului digital, treptat, digitalul s-a exprimat prin alte tipuri de forme. Geometria complexă, realizată prin suprapunerea mai multor criterii și combinarea mai multor reguli de generare, a devenit domeniul explorat prin scripting. Astfel, au rezultat modele caracterizate de variabilitate, transformări graduale și articulare prin detaliu. Formele arhitecturale cu geometrie complexă sunt ușor de realizat pe computer și au devenit foarte accesibile, iar uneltele digitale de fabricație au simplificat materializarea elementelor cu detalii complexe.

Elementele diferite, dar similare, sunt caracteristice abordării contemporane. Astfel, seria se transformă în secvență, iar unitatea identică și repetabilă este înlocuită de componente similare. Devine esențială relația dintre componente, definită topologic. Secvența desemnează o succesiune nelineară și discontinuă, o serie de evenimente coordonate, dar nu reiterate, o sumă de instanțe, dar și un întreg (Bru et al. 2003, 546-47). Variabilitatea, transformarea graduală și complexitatea devin, în acest context, trăsături definitorii ale obiectelor generate digital.

Anumiți teoreticieni ai arhitecturii contemporane susțin că ornamentului nu ar trebui să i se atribuie o semnificație simbolică. Reiser și Umemoto afirmă că o arhitectură care trebuie să se explice pentru a-și justifica calitățile nu reușește, de fapt, să le exprime. Prin asocierea simbolurilor, arhitectura este definită din exterior și devine o reprezentare a ceea ce este deja cunoscut, în timp ce arhitectura contemporană urmărește să rămână deschisă, capabilă să genereze efecte neprevăzute (Reiser și Umemoto 2006, 172-73).

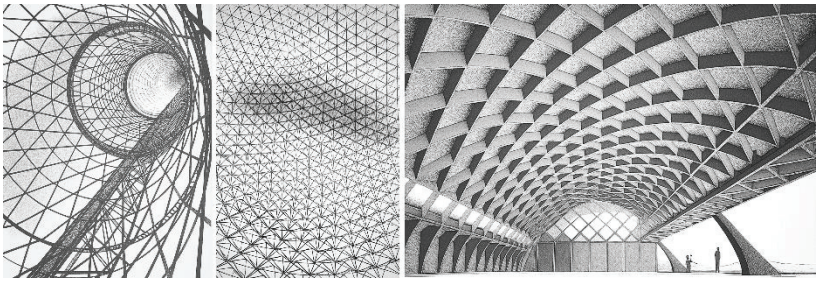
Kubo și Moussavi consideră, la rândul lor, că ornamentul contemporan nu mai este asociat cu o semnificație simbolică venită din afara arhitecturii. În contextul globalizării și multiculturalității, nu mai este necesară recunoașterea simbolurilor locale particulare, deoarece acestea devin dependente de factori exteriori, care nu acceptă schimbarea. Astfel, ornamentul devine un semn gol, dar capabil să genereze rezonanțe nelimitate (Kubo et al. 2006). Această poziție poate fi interpretată și ca o reacție de precauție față de posibila revenire la atitudinea postmodernă, care a utilizat în mod declarat simboluri încărcate, adesea superficial, fără a influența organizarea arhitecturală de ansamblu. În acest sens, respingerea referințelor exterioare arhitecturii poate conduce la o atitudine care promovează genericul.

Accentul se deplasează în prezent asupra senzațiilor și a rezonanțelor pe care clădirile le generează, desemnate de Kubo și Moussavi prin termenul de *afecte*. Arhitectura se îndepărtează de nevoia de a comunica printr-un limbaj comun sau convențional. *Afectul* este înțeles ca un proces de interpretare dinamic, deschis transformării, capabil să se adapteze și să genereze noi moduri de experiență. În acest context, decorația apare într-o manieră secundară, accidentală, nesolicitată explicit, scopul principal fiind producerea de afecte și rezonanță. *Afectele* pot da naștere unor analogii, dar intenția nu este una de reprezentare simbolică, ci de exprimare a caracteristicilor invizibile ale arhitecturii contemporane. Prin intermediul

experimentelor cu date și al diagramelor, utilizate ca metode fără caracter de reprezentare, se explorează posibilitatea de a vizualiza tehnologia nu doar ca mijloc, ci ca forță culturală (Kubo et al. 2006).

Modelul generat de performanță

În mod tradițional, înainte de revoluția industrială, ornamentele erau concentrate în anumite puncte ale fațadei, fiind corelate cu ordinele arhitecturale. Pe de o parte, ornamentul nu era legat strict de structură, iar pe de alta, exista totuși o relație între acesta și articulațiile clădirii, structura și proporțiile sale (Picon 2013, 38). Pentru Gottfried Semper, cerințele funcționale și structurale erau subordonate scopurilor semiotice și artistice ale ornamentului (Semper 1951). În schimb, Viollet-le-Duc considera că ornamentul ar trebui să apară ca o consecință logică a tectonicii, admirând în mod deosebit arhitectura gotică (Picon 2013, 78). Această apreciere se datora în mare parte standardizării pieselor din piatră care compuneau arcele gotice, principiu ce avea să contribuie ulterior la logica raționalizării moderniste.



(a) (b) (c)

Figura 23. (a) Shabolovka / Vladimir Shukhov (Shukhov 1919), (b) Buckminster Fuller / US pavilion Expo'67 (Fuller 1967), (c) Orvieto Hangars / Pier Luigi Nervi (Nervi 1935). Ilustrație realizată de autor.

Pentru că una dintre temele urmărite de modernism este exprimarea clară a structurii, modelul apare ca rezultant al structurilor speciale. Astfel, începând cu perioada modernă, structura devine strâns legată de model, iar modelul capătă valențe decorative, datorită complexității structurale. Modelul se constituie astfel ca rezultat al îndeplinirii unor cerințe funcționale. Structura tinde să primească un caracter ornamental, în dorința de a se elibera de modelul cartezian (Balmond et al. 2007, 64).

Explorările modelului structural încep cu suprafețele cu dublă curbură ale lui Vladimir Shukhov și cu modelele agățate ale lui Gaudí. Ulterior, cupolele geodezice ale lui Buckminster Fuller, urmate de cercetările lui Frei Otto, Le Ricolais și Pier Luigi Nervi, au investigat posibilitatea deformării topologice a modelelor, în scopul adaptării structurii la comportamente diferențiate.

Explorările actuale au modificat relațiile convenționale de la nivelul anvelopei clădirii și le-au înlocuit cu variante mai nuanțate, în care diferitele straturi de performanță se influențează reciproc pentru a produce efecte complexe. Fabricarea, materialitatea, geometria și modelul anvelopantei au preluat rolurile de reprezentare, care în trecut aparțineau elementelor de limbaj arhitectural (Zaera-Polo 2010, 22).

În practica contemporană, diversitatea este percepută ca un factor pozitiv, mai mult decât ca o simplă variație a uniformității, și pornește de la ideea că totul este produs prin accident și diferențiere. Iar diferențierea este înțeleasă ca un proces creativ, evolutiv, prin generarea de singularități (DeLanda 1997). Această abordare a fost aplicată inițial doar la nivel formal. Philip Ball, vorbind despre sisteme naturale, descrie modelele ca serii de unități care sunt similare, dar nu neapărat identice, și care se repetă, dar nu neapărat într-un mod regulat (Ball 2001, 9). De asemenea, modelele sunt caracterizate ca evenimente recurente sau formațiuni materiale repetitive. Această descriere implică faptul că modelele pot face referire atât la energie, cât și la materie. În sistemele naturale, cele mai multe modele sunt generate prin interacțiunea și modelarea reciprocă a energiei și materiei. Astfel, variabilitatea este înțeleasă ca un răspuns la aplicarea unor criterii de performanță.

Rezultatele proceselor generative computaționale pot fi comparate cu taxonomia din domeniul biologiei. Diferențele apar atunci când este vorba despre factorii care determină variabilitatea și despre principiile evoluției naturale. Capacitatea organismelor vii de a evolua depinde de existența unui material genetic autoreplicabil, însă această capacitate nu ar putea funcționa fără variabilitate. Dacă nu ar exista diferențe în procesul de replicare, nu ar exista niciun element care să poată fi filtrat prin selecția naturală. În consecință, evoluția depinde de diferențele apărute în cadrul procesului morfogenetic. Sistemele naturale pot astfel încorpora mutații în procesul lor generativ, datorita unei flexibilități și adaptabilități ridicate. În schimb, procesele computaționale, chiar dacă pot fi programate pentru a genera variabilitate, nu pot suporta mutații reale, așadar nu pot fi considerate evolutive (DeLanda 2009, 16, 17).

În cazul sistemelor naturale, atât forma, cât și modelul derivă din procese de auto-organizare, astfel încât distincția dintre aceste două noțiuni devine discutabilă. Ball sugerează că modelele sunt, de obicei, extinse în spațiu, în timp ce formele sunt finite, dar avertizează că această diferențiere nu ar trebui considerată o regulă generală (Ball 2001, 10). În acest sens, reducerea modelului la o stare exclusiv materială pare contraproductivă, la fel ca și reducerea acestuia la un simplu aspect vizual, ignorând procesele care stau la baza formării și transformării modelelor. Astfel, procesele de auto-organizare, care generează modele, au devenit un domeniu de cercetare relevant pentru studiul relației dintre formă și performanță, explorând modul în care apar aceste modele, condițiile în care se generează și capacitățile lor în raport cu performanța (Hensel și Menges 2010, 91). În acest context, modelele generate computațional încorporează variația ca răspuns la criterii de performanță.

Deși poate genera forme care exprimă deformare și inflexiune, computerul nu reproduce același proces precum cel natural. Aspectul organic al acestor forme este rezultatul unor principii de organizare bazate pe relații matematice, care conduc la obținerea unei geometrii complexe. Astfel, formele sunt adesea percepute ca fiind organice tocmai din cauza imposibilității de a le reduce la geometrii pure (Lynn 1999, 19). Din acest motiv, inspirația din structurile biologice se îndreaptă către procesul de generare formală, înțeles ca o negociere între criteriile de performanță.

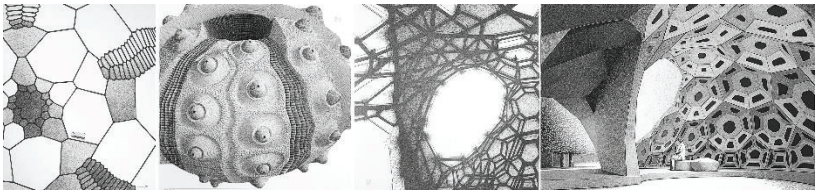


Figura 24. ICD/ITKE Research Pavilion 2011, ICD/ITKE Achim Menges & Jan Knippers, 2011 (Menges și Knippers 2011). Ilustrație realizată de autor.

Scopul devine acela de a dezvolta sisteme performante și diferențiate, bazate pe relația dintre caracteristicile materiale și comportamentale, pe procesele de auto-organizare, integrând constrângerile impuse de fabricație și de logica de asamblare. În acest context, relațiile de tip feedback dintre constrângerile interne, capacitățile materiale și condițiile

specifice ale mediului exterior sunt cele care generează soluția. Forma, generată prin proiectare computațională, este definită de un sistem de unități interdependente, definite parametric. Diferențierea și variația acestor unități rezultă din procesele de auto-organizare care negociază între limitele de producție și de asamblare, influențele mediului și cerințele de performanță (Hensel și Menges 2010, 91).

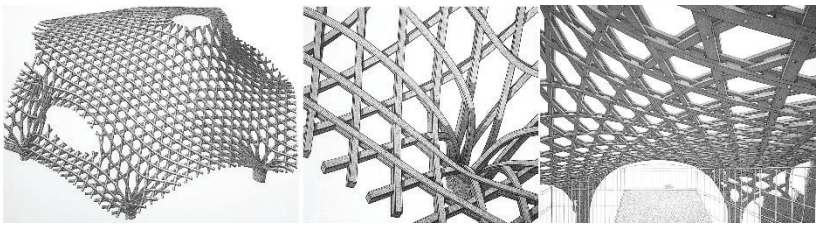


Figura 25. Centre Pompidou-Metz, Shigeru Ban & Jean de Gastines, consultant pentru fabricație designtoproduction, 2010, Metz, Franța (Scheurer 2010, 90). Ilustrație realizată de autor.

Geometria obiectului arhitectural devine flexibilă, capabilă să accepte mai multe variante în funcție de diferite criterii de performanță. Generarea componentelor reflectă în același timp caracteristicile structurale, logica de fabricație și intenția conceptuală. În acest sens, modelul devine operativ (Kubo et al. 2006): el se naște din potențialul materialului, din expresia forțelor de construcție, de asamblare și de creștere. Modelul ajunge să fie inseparabil de obiect, nu mai este un simplu înveliș sau o decizie formală prealabilă, ci exprimă logica de generare.

Modelul complex reprezintă o trăsătură definitorie a arhitecturii contemporane; acesta răspunde simultan unor cerințe multiple și suprapuse. El se manifestă prin discontinuități într-un model continuu, prin țeseri sau geometrii deformate, capabile să se adapteze situațiilor diferite, suprapunând straturi care se articulează coerent. Modelul contemporan este caracterizat de structuri iterative neliniare, ce pot tolera și integra accidentul (Bru et al. 2003, 361-62).

Capitol 4.

UNELTE DE FABRICAȚIE DIGITALĂ

4. UNELTE DE FABRICAȚIE DIGITALĂ

4.1. Fabricația digitală

În prezent, uneltele digitale, atât cele de proiectare, cât și cele de fabricație, sunt din ce în ce mai cunoscute și aduc cu sine legătura directă dintre procesul de creație și cel de materializare. Fabricația digitală este acum inclusă în procesul de proiectare, care abordează atât aspecte conceptuale, cât și aspecte legate de realizarea fizică a proiectului.

În termeni tehnici, fabricația digitală presupune realizarea de obiecte fizice prin utilizarea de unelte controlate de computer. Fabricația este definită ca fiind un proces de construcție din elemente și este împărțită pe categorii în funcție de modul în care părțile sau materiile prime sunt manipulate. Cele trei categorii de fabricație larg acceptate definesc procese aditive, procese subtractive și procese de modelare formală (Chua et al. 2010, 25).

Fabricația digitală pornește de la un model digital realizat cu ajutorul softurilor de modelare. Geometria este apoi transformată în informații și în instrucțiuni specifice metodei de fabricație folosite. Urmează simularea procesului în mediul digital, pentru a evita eventualele erori, iar codul rezultat este transmis către unealtă. Fiecare tip de unealtă controlată de computer are propria abordare specifică, însă, în principiu, se bazează pe o terminație mecanizată care se deplasează într-o rețea spațială, urmând instrucțiunile în coordonate primite.

Tehnologiile de substracție îndepărtează materialul pentru a produce obiectul fabricat. Cele mai comune tehnologii de fabricație sunt cele bidimensionale, realizate prin decupare, care implică mișcarea pe două axe a capului de tăiere, a bazei pe care este poziționat materialul sau combinații ale celor două. Capul de tăiere poate utiliza laser, plasmă-arc sau jet de apă, fiecare având aplicații diferite în funcție de materialul prelucrat. Fabricația prin substracție tridimensională presupune înlăturarea unui volum de material dintr-un solid prin procedee electrice, chimice sau mecanice (Tănase 2011, 38). Cea mai utilizată este tehnologia mecanică de frezare pe trei sau mai multe axe. Aceasta este folosită în special pentru

realizarea de matrițe unice, destinate turnării de materiale diverse, precum și pentru modelarea prin încălzire sau aplicarea de forțe.

Procesele de fabricație aditivă sunt metode prin care se adaugă material pentru a produce un obiect. Majoritatea tehnologiilor de imprimare 3D se încadrează în această categorie (Tănase 2011, 39). În funcție de tipul de imprimare, capul de printare fie depune un liant peste straturi uniforme de pulberi succesive, fie solidifică rășini cu ajutorul unui laser, fie suprapune straturi de material plastic încălzit[13]. Această tehnologie, utilizată până de curând mai ales la scară mică, evoluează rapid; în prezent, se urmărește realizarea de componente la scară mare prin turnarea în straturi a betonului.

În procesele de fabricație prin modelare formală se aplică forțe mecanice, se restricționează deformările prin utilizarea de matrițe sau se încălzesc materiale, astfel încât acestea să fie transformate în forma dorită, prin remodelare sau deformare. Prin aceste procese, cu control numeric, se pot modela piese liniare din metal sau elemente de suprafață, cum ar fi sticla cu dublă curbură. Aceste categorii de fabricație nu sunt întotdeauna clar delimitate, existând suprapuneri atunci când uneltele sunt foarte flexibile și pot fi folosite în mai multe moduri. În această zonă se încadrează roboții industriali, unelte flexibile și versatile. Acesta este și domeniul cel mai deschis explorărilor creative.

În ceea ce privește fabricația digitală la scară mică, aceasta devine tot mai accesibilă prin dezvoltarea numeroaselor kituri de imprimante tridimensionale și a CNC-urilor open-source. Nu numai posibilitatea de a realiza un obiect prin fabricație digitală a devenit accesibilă, ci și tehnologia în sine. Astfel, obținerea de obiecte unice și personalizate începe să se manifeste ca un fenomen la scară globală.

Metodele de fabricație digitală sunt relativ noi în domeniul practicii de arhitectură, însă au început să fie abordate și explorate tot mai frecvent. Majoritatea acestor tehnologii digitale sunt testate în mediul academic.

[13] Domeniul imprimării 3D este un domeniu efervescent de cercetare, unde apar în mod constant noi metode, dar cele mai cunoscute categorii sunt: *Selective Laser Sintering* (SLS), *Stereo-lithography* (SLA), *Fused Deposition Modeling* (FDM), *Laminated Object Manufacturing* (LOM). Toate aceste metode pornesc de la realizarea modelului pe care îl fabrică prin adăugarea de straturi orizontale succesive.

Există atât proiecte de cercetare desfășurate în cadrul universităților de arhitectură, cât și un număr tot mai mare de workshop-uri care pun accent pe proiectarea digitală în relație directă cu metoda de materializare a obiectului. Interesul cercetării actuale se concentrează pe adoptarea și adaptarea acestor tehnologii digitale de materializare, concepute inițial pentru alte scopuri, pentru a fi folosite creativ în proiectarea de arhitectură.

Pe lângă experimentele din zona de cercetare, metodele de fabricație digitală sunt utilizate din ce în ce mai frecvent în realizarea de proiecte arhitecturale iconice. Obținerea de forme complexe, care testează limitele tehnologiei, a devenit posibilă prin aplicarea metodelor de fabricație avansată, provenite din domeniile inginerești, în arhitectură și construcții. Eficiența este un obiectiv declarat, iar căutarea constantă a preciziei și a controlului își găsește răspunsul în fabricația digitală, întrucât elementele produse sunt identice cu modelul digital. Cu toate acestea, de cele mai multe ori, fabricația digitală a fost folosită doar pentru a reproduce o formă deja stabilită, fără a aduce o contribuție creativă.

Uneltele de bază utilizate în fabricația digitală sunt, în esență, similare celor folosite de meșteșugari în producția tradițională. Acestea au fost rafinate de-a lungul timpului, modificându-se modul în care sunt puse în mișcare și metoda de control. Noutatea adusă de fabricația digitală constă în faptul că unealta nu mai este controlată în mod variabil de om sau repetitiv și precis de un sistem mecanizat, ci variabil și precis în mod digital. Mișcarea uneltei controlate digital este definită prin coordonate spațiale precis determinate, prin secvențe logice.

Materialitatea este din ce în ce mai îmbogățită de caracteristici digitale, care influențează în mod substanțial arhitectura. În mediul digital, datele și materialul, programarea și construcția se află într-o relație strâns întrețesută. Materialitatea este determinată digital și evoluează prin interacțiunea dintre procesele computaționale și cele materiale, atât în proiectare, cât și în construcție. Această sinteză este posibilă datorită tehnicilor de fabricație digitală, care permit arhitectului să controleze procesul de producție prin intermediul datelor de proiectare. Materialul este astfel profund influențat de mediul digital, fiind îmbogățit și devenind informat (Gramazio și Kohler 2008, 7).

Prin reorientarea proiectanților către materializare, rezultatul nu mai este doar un proiect, o imagine sau un desen, ci un proces integrat, ce cuprinde

atât proiectarea, cât și fabricarea. Nu mai este vorba despre programarea unor sisteme constructive în mediul virtual, capabile să se reconfigureze la nesfârșit, ci despre îmbinarea logicii constructive cu programarea și cu realizarea materială(Bernard Cache 2004, 103).

Astăzi este posibilă generarea oricărei forme în mediul digital tridimensional, iar aproape orice astfel de obiect poate fi construit. În acest context, fabricația digitală a fost privită, până de curând, doar ca o modalitate de materializare a modelelor generate digital. Cele mai recente cercetări și practici contemporane de arhitectură pornesc însă de la procesul de fabricație, integrat în proiectare încă din faza de concept. Astfel, relația dintre concept, computație și fabricație se reconfigurează, devenind un proces continuu de feedback, care generează un obiect final determinat de toți acești parametri.

Modul în care este percepută unealta digitală a evoluat de la simplu executor de comenzi convenționale la generator activ în procesul de proiectare. Se recunoaște astfel capacitatea acesteia de a încorpora informații care pot influența conceptul. Unealta devine un mijloc creativ atunci când îi oferă proiectantului posibilitatea de a utiliza propria sa logică drept factor generator încă din primele faze ale proiectului. Importanța pe care o capătă uneltele de fabricație digitală nu trebuie înțeleasă ca o dependență unidirecțională a obiectului față de modalitatea de materializare, întrucât aceste unelte nu ar trebui să limiteze procesul de proiectare. Ele nu au fost concepute special pentru practica de arhitectură, însă pot fi adaptate.

Provocarea arhitecților contemporani este de a transforma aceste unelte adoptate, folosindu-le în procesul arhitectural și integrându-le în propria practică. Între arhitectură, design și dezvoltarea tehnologică a existat întotdeauna o legătură; însă aceste obiecte străine, provenite din diferite industrii și concepute pentru alte procese, trebuie mai întâi însușite și adaptate mediului creativ specific arhitecturii.

Scopul utilizării uneltelor digitale nu se rezumă la eficiență și control, ci constă în combinarea abilităților și limitărilor umane cu cele ale mașinilor. Mașina, prin logica sa numerică, poate gestiona cantități mari de date, în timp ce omul, prin capacitățile sale cognitive și intuitive, conferă înțeles (Willmann et al. 2012, 14). Se creează astfel o conexiune interactivă între om și mașină, într-un proces în care nu sunt egali, ci parteneri cu atuuri diferite.

Atât uneltele conceptuale digitale, cât și cele de fabricație digitală, au devenit atractive pentru procesul arhitectural datorită faptului că arhitecții se numără printre puținii profesioniști care oferă servicii personalizate, conducând la un obiect final unic. Această unicitate a produsului de arhitectură a fost, până de curând, realizată prin utilizarea în mod diferit a cât mai multor componente standard, adesea prefabricate, alături de un număr redus de elemente diferite. O astfel de abordare indică lipsa de creativitate și flexibilitate pe care procesele de materializare o aduceau proiectării.

Tehnologia digitală face posibilă nu doar proiectarea și producerea de obiecte unice, ci, mai important, oferă posibilități care pot contribui creativ la proiect. Astfel, avantajul pe care aceste unelte digitale îl oferă nu constă în componenta *high-tech,* ci în faptul că atât computerele, cât și uneltele de fabricație sunt extrem de personalizabile pentru o varietate de procese.

Dacă, în trecut, era necesară simplificarea proiectului pentru a putea fi construit cu tehnologia disponibilă, astăzi această reducere nu mai este obligatorie. Putem utiliza tehnologiile digitale pentru a crea obiecte arhitecturale fără a renunța la caracteristici care, până acum, erau excluse din lipsa capacităților de producție, nu pentru că ar fi fost nesemnificative. Această eliminare a limitărilor generează o gamă largă de posibilități anterior inaccesibile din cauza constrângerilor legate de eficiență. Cu toate acestea, utilizarea tehnologiilor digitale în practica de arhitectură nu garantează, în sine, obținerea unui produs mai valoros.

Succesul proiectului, chiar și în acest mediu profund influențat de digital, depinde în continuare de capacitățile proiectantului, chiar dacă uneltele sale au evoluat. Această nouă oportunitate implică, de asemenea, necesitatea dezvoltării unor mijloace adecvate de explorare și adaptare a capacităților uneltelor digitale, astfel încât acestea să contribuie la îmbunătățirea practicii arhitecturale și la generarea unui obiect de arhitectură cu adevărat valoros. Arhitectura și-a modelat așteptările în funcție de posibilitățile de materializare. Pornind de la aceste date fixe și chiar limitări, procesul de proiectare s-a bazat pe posibilitățile materiale disponibile. Astfel, a început să dezvolte un standard, o obișnuință.

În prezent, limitările legate de materializare și eficiență devin tot mai mici și tind să dispară, iar această libertate a șters reperele tradiționale, cunoscutul, nu mai există un standard nici în producerea, nici în critica obiectului realizat. Această deschidere nelimitată către variante și opțiuni a

condus, inițial, în faza experimentală, la validarea oricărui obiect produs prin tehnologiile digitale. Însă, în prezent, cercetarea în acest domeniu se orientează spre dezvoltarea unor proiecte care integrează multiple straturi de informație, care interacționează cu conceptul și pot genera, în final, un obiect de arhitectură ce răspunde unei cerințe specifice, dar este mai mult decât atât.

4.2. Fabricație aditivă - printarea 3D.

Primele mașini de prototipare rapidă cu scop comercial au apărut între anii 1980 și 1990, reușind să construiască obiecte fizice pornind de la modele CAD. Procesul utilizat consta în solidificarea strat după strat a unui praf sau a unui lichid. Această tehnologie a fost inițial adoptată în domeniile inginerești, pentru testarea designului prin realizarea de prototipuri. Materialele folosite de aceste prime mașini de prototipare rapidă aveau performanțe reduse, erau fragile și se deteriorau în timp (Kestelier 2011, 244).

În ultimii ani, tehnologiile de printare 3D au depășit sfera inginerească, unde erau folosite pentru producerea de obiecte cu geometrie complexă, în serii mici. În prezent, imprimarea 3D se regăsește în aria producerii bunurilor de consum, fiind cel mai frecvent utilizată în crearea obiectelor de design, dar și în arhitectură, pentru realizarea machetelor.

Datorită concentrării intense a resurselor de cercetare asupra metodelor de imprimare 3D, aceste tehnologii au evoluat considerabil. Aspectele ce se îmbunătățesc constant includ rezoluția de imprimare și calitatea materialelor folosite. Performanța materialelor a crescut atât de mult, încât obiectele obținute prin printare 3D nu mai sunt simple prototipuri, ci devin produse finale. Astfel, s-a realizat tranziția de la prototiparea rapidă la materializarea propriu-zisă.

4.2.1. Printarea 3D ca înlocuitor al metodelor de producție.

Potențialul printării 3D în domeniul producerii bunurilor este adesea comparat cu impactul revoluționar pe care l-a avut dezvoltarea Internetului. Așa cum Internetul a redus semnificativ costurile de generare și diseminare a informației, facilitând apariția și dezvoltarea unor noi companii, fabricația aditivă are capacitatea de a diminua costurile de producție a bunurilor și de a stimula apariția micilor producători. Reducerea costurilor de investiție va conduce la dezvoltarea unui număr

crescut de afaceri mici, capabile să concureze cu marile corporații care au dominat economia în cadrul primei și celei de-a doua revoluții industriale (*The Economist* 2011).

Răspândirea imprimării 3D este percepută ca o nouă revoluție în modul de fabricare a bunurilor. Producția centralizată, caracteristică sistemelor tradiționale de materializare, este înlocuită de un model descentralizat. În locul unui număr redus de corporații gigant apar numeroase laboratoare de fabricație. Controlul asupra resurselor, deținut anterior de marii producători, este substituit prin utilizarea inovatoare a materialelor accesibile și ieftine. Odată cu adoptarea pe scară largă a acestei tehnologii, sistemele complexe de distribuție nu vor mai fi necesare, deoarece materia primă va fi disponibilă local, iar obiectele vor fi produse aproape de utilizatorul final. Singurul element care va circula în continuare va fi informația – modelul 3D care se transformă în obiect.

Mai mult decât atât, orice persoană poate deveni propriul producător, pe măsură ce imprimantele 3D trec de la echipamente profesionale la dispozitive de uz personal. Analiștii din industrie estimează că în viitor milioane de utilizatori vor descărca modele digitale, le vor personaliza și le vor imprima direct acasă (Rifkin 2013, 116).Tendințele din mișcările do-it-yourself reflectă aceeași implicare sporită a consumatorilor în procesul de producție (Toffler 1984, 276). Într-o astfel de paradigmă, distincțiile convenționale dintre producător și consumator tind să dispară, iar producția de bunuri devine un proces orientat spre consumatorul-producător.

Făcând produsele și serviciile mai puțin dependente de un spațiu fizic fix, crește și competitivitatea, atingând principiul accesibilității oriunde și oricând. În perioada industrială, bunurile erau produse în spațiul fizic al producătorului și ulterior, prin intermediari, distribuite către consumator. În prezent, asistăm la o schimbare spre un nou proces de producție, în care bunurile sunt create direct de consumatori, în spațiul lor propriu. Această idee nu este complet nouă și a început de la aparatele foto Polaroid, primele dispozitive care au redus timpul de așteptare pentru obținerea produsului.

Scopul final al acestei evoluții este evident: produse complet personalizate, realizate printr-un proces digital integral, aflat sub controlul direct al consumatorului (Toffler 1984, 186). Astfel, consumatorii care își creează și controlează propriul proces de producție al bunurilor și serviciilor devin

independenți de factori externi. Pentru ca acest scenariu să devină realitate, imprimantele 3D trebuie să devină la fel de răspândite în casele oamenilor precum imprimantele obișnuite, permițând materializarea unei game largi de produse, de la bijuterii până la telefoane mobile (*The Economist* 2011).

Această deplasare a locului de producție în spațiul consumatorului are consecințe practice semnificative. Odată ce tehnologia de imprimare 3D va deveni foarte răspândită, ea va stimula și consumul. Atunci când distanțele se reduc, iar bunurile devin ușor accesibile, oamenii sunt predispuși să consume mai mult. Un exemplu relevant îl reprezintă principiul *do-it-yourself*, apărut inițial din rațiuni economice, dar care, prin creșterea utilizării, poate conduce la un consum mai ridicat de materii prime (Davis 1987, 53).

Viziunea idealizată a imprimării 3D presupune că, prin simpla apăsare a unui buton, modelul digital este transmis imprimantei 3D, care îl materializează instantaneu. În realitate, pentru a putea fi imprimat, un model trebuie să respecte specificații tehnice stricte. Astfel, obținerea unui obiect care poate fi printat necesită cunoștințe avansate de modelare 3D. Din acest motiv, utilizatorii fără experiență în modelare preferă să imprime obiecte pentru care există deja fișiere corect pregătite, ceea ce face ca imprimantele 3D să fie, adesea, folosite mai degrabă ca instrumente de copiere decât de creație originală.

Pentru ca oricine să își poată modela propriile obiecte, e nevoie ca mediul digital să devină mai intuitiv, prin îmbunătățirea interfeței cu utilizatorul. În prezent, realizarea de modele 3D unice de către fiecare consumator rămâne o sarcină dificilă. În plus, nu toți utilizatorii doresc să investească timp și energie în acest proces creativ, preferând să selecteze modele deja existente. Prin urmare, chiar dacă personalizarea va deveni accesibilă atât la nivel de proiectare digitală, cât și la nivel de fabricație, pe piață vor continua să existe și bunuri deja materializate.

O altă posibilitate pentru obținerea de obiecte personalizate, aflată în curs de explorare, este modificarea geometriei unor obiecte generate în funcție de parametri. În acest fel, oricine își poate adapta obiectul fără a avea cunoștințe avansate de programare. După personalizare, se generează fișierul în format compatibil cu imprimarea 3D, iar obiectul este produs.

Există deja numeroase aplicații online prin care utilizatorii își pot personaliza obiecte, fie piese de mobilier, fie accesorii vestimentare.

Interfața, foarte simplu de utilizat, permite ca, pornind de la o formă de bază, aceasta să fie modificată în funcție de mai mulți parametri. Pe lângă dimensiune, culoare și geometria componentelor, în unele cazuri se pot realiza și transformări topologice. Principiul de transformare se bazează pe atracția sau respingerea unor puncte de influență, care se pot plasa pe suprafața geometriei. După stabilirea formei finale, aplicația generează prețul, care variază în funcție de dimensiune și de materialul ales. Fișierul este trimis spre procesare, obiectul este imprimat 3D și livrat clientului. Aplicația este concepută astfel încât să țină cont de posibilitățile de fabricație – dimensiuni, grosimi –, aceste limitări fiind integrate în sistem pentru ca toate obiectele să poată fi realizate.

Răspândirea imprimantelor 3D la nivelul consumatorilor a luat probabil amploare în jurul anului 2005, odată cu dezvoltarea, în mediu open-source, a unor modele pentru uz personal de către comunitatea RepRap (Bowyer 2004). Principiul de la care s-a pornit a fost crearea unor imprimante capabile să imprime componentele necesare construirii altor imprimante, readucând în discuție un subiect controversat încă din perioada revoluției industriale: mașinile capabile să se reproducă singure. Până în prezent, deși tehnologia de printare 3D se dezvoltă rapid, dintr-o imprimantă 3D pot fi realizate prin printare doar aproximativ jumătate dintre propriile componente. Odată cu progresul materialelor utilizate, este de așteptat ca și părțile electronice, precum și elementele de structură metalice, să poată fi fabricate prin aceeași tehnologie.

4.2.2. Materiale pentru 3D print

Imprimarea 3D a fost privită cu entuziasm de cei implicați în domeniul producției, ceea ce a dus la așteptări foarte mari de la această metodă de fabricație. Economiștii subliniază în special aspectul reducerii costurilor, estimând că această tehnologie necesită mai puțin de 10% din materia primă folosită în procesul tradițional și consumă mai puțină energie decât producția convențională. Pe măsură ce se răspândește, imprimarea 3D va reduce și costurile logistice. Economia de energie se realizează în fiecare etapă a procesului: prin diminuarea consumului de materiale, prin reducerea energiei necesare pentru fabricarea produsului și prin eliminarea unei părți a energiei asociate transportului (Rifkin 2013, 117). Aceste considerente economice au stimulat dezvoltarea unor materiale de imprimare 3D mai ieftine, mai accesibile și mai puțin poluante. În paralel, cerințele de performanță au determinat diversificarea și optimizarea

compozițiilor, astfel încât să poată fi obținute proprietăți tehnice adaptate unei game variate de aplicații.

O direcție importantă a cercetării o constituie utilizarea simultană a mai multor materiale cu proprietăți diferite, în cadrul aceluiași proces de imprimare. Această abordare reduce timpul de asamblare, minimizează erorile potențiale la îmbinări și optimizează performanța produsului final, care apar chiar și atunci când componentele sunt fabricate cu precizie ridicată. Arup, în colaborare cu CRDM/3D Systems, a dezvoltat un sistem de imprimare 3D capabil să producă articulații structurale din oțel. Motivația proiectului a fost aceea de a materializa componente cu o geometrie rezultată direct din analiza structurală, fără a recurge la modificări dictate de constrângeri ale eficienței producției. Prin această abordare, elementele obținute sunt stabile structural, au un consum minim de material și pot fi diferite în funcție de performanțele structurale specifice. Tehnologia utilizată este una de înaltă precizie și cost ridicat, fiind esențial ca procesul să fie riguros controlat pentru a asigura obținerea unor piese omogene, capabile să îndeplinească performanțele structurale pentru care au fost proiectate.

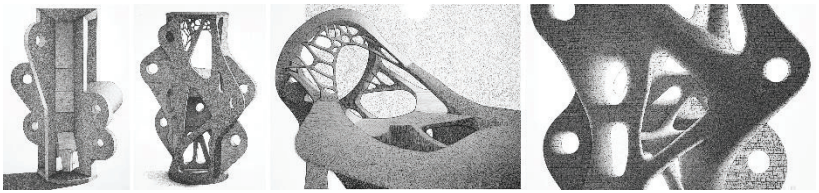


Figura 26. *Structural Steel*, Arup & CRDM/3D Systems, proiect de cercetare, 2014 (Arup 2014). Ilustrație realizată de autor.

Domeniul imprimării 3D investighează, de asemenea, posibilitatea utilizării unor materiale mai economice. Proiectul *Degenerate Chair*, realizat de Daniel Widrig, îmbină capacitățile tehnologiei digitale de generare cu explorarea unor metode de imprimare 3D accesibile. Geometria piesei este rezultatul unei agregări de pixeli tridimensionali, supusă ulterior unui proces de optimizare pentru reducerea consumului de material, menținând în același timp stabilitatea structurală. În momentul în care partenerul responsabil de fabricația obiectului s-a retras, au fost identificate soluții alternative de producție. Widrig a recurs la o rețetă open-source și cu cost redus pentru obținerea unui material compatibil cu

imprimarea 3D. Astfel, folosind o imprimantă Z Corp, praful comercial a fost înlocuit cu un amestec de zahăr și ipsos, iar liantul – cu vin de orez japonez, sake. Comparativ cu materialele standard furnizate de Z Corp, cele utilizate în fabricarea Degenerate Chair au prezentat un cost semnificativ mai scăzut.

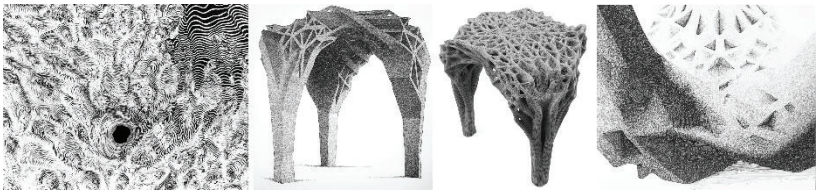


Figura 27. *Degenerate Chair*, Daniel Widrig, expus în cadrul colecției permanente la FRAC Centre în Orléans, Franța, 2012 (Widrig 2012). Ilustrație realizată de autor.

Saltygloo, realizat de Emerging Objects, constituie un exemplu relevant de explorare a imprimării 3D prin valorificarea materialelor locale. Proiectul utilizează sare recoltată din iazurile de cristalizare din Redwood City, San Francisco. Acest sit este exploatat de peste 109 ani, în cadrul unui proces de recoltare care se desfășoară pe durata a cinci ani și implică circulația apei din golf printr-o succesiune de iazuri de evaporare. Pavilionul este compus din 336 de componente imprimate 3D din sare, fixată cu un liant ce conferă structurii finale rezistență mecanică, impermeabilitate, greutate redusă, transluciditate și cost redus. Componentele sunt asamblate prin cleme și tije de aluminiu, formând un înveliș rigid. Caracterul translucid al pavilionului rezultă din îmbinarea proprietăților naturale ale sării cu particularitățile procesului de fabricație.

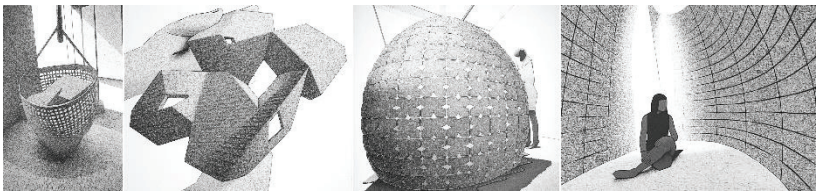


Figura 28. *Saltygloo*, Emerging Objects, 2013 (Emerging Objects 2013). Ilustrație realizată de autor.

Tot cei de la Emerging Objects au experimentat și cu printarea unui material realizat din fibre de lemn reciclat și alte deșeuri agricole. În compoziția materialului intervine un liant care dă stabilitate structurală fără să altereze aspectul. Această formulă păstrează efectul de stratificare de la procesul de fabricație aditiv, și se apropie de textura lemnului natural, fără să încerce neapărat să o imite.

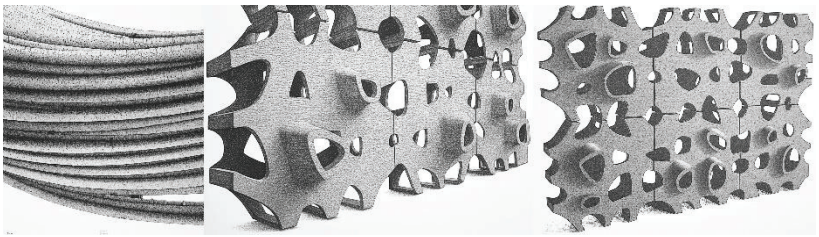


Figura 29. *Poroso*, Emerging Objects, 2013 (Emerging Objects 2014). Ilustrație realizată de autor.

Un proiect de cercetare dezvoltat de ELstudio investighează potențialul imprimării 3D cu lut în arhitectură, pornind de la premisa realizării unei arhitecturi sustenabile din materiale locale. Procesele tradiționale, bazate pe materiale naturale, nepoluante și economice, sunt privite ca un model de referință ce nu trebuie replicat, ci reinterpretat în context contemporan. Fabricația digitală este utilizată pentru a transpune metodele de construcție tradiționale în practica arhitecturală actuală, urmărind adaptarea acestora la noile unelte și integrarea avantajelor ambelor tipuri de procese.

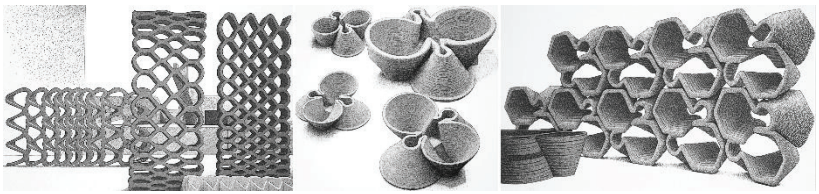


Figura 30. *3D printind clay*, 2014 (ELstudio 2014). Ilustrație realizată de autor.

Un exemplu orientat către principiul economiei de resurse și utilizarea materialelor locale este printerul 3D *Solar Sinter*. Acesta combină resurse naturale cu un mod de producție nepoluant, fiind un sistem auto-suficient

ce folosește nisipul drept material de imprimare și energia solară pentru a furniza atât căldura, cât și energia electrică necesară topirii nisipului în sticlă, generând astfel obiecte tridimensionale. Proiectul, dezvoltat de Markus Kayser în cadrul lucrării sale de licență, are un caracter experimental. Deși nivelul de precizie este redus, iar timpul de fabricație este ridicat, dispozitivul reprezintă un prototip valoros, deschizând direcții de cercetare în domeniul fabricației *in situ* pe baza resurselor locale.

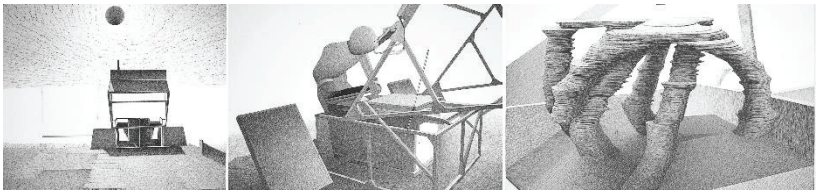


Figura 31. *Solar Sinter*, Markus Kayser, 2011 (Kayser 2011). Ilustrație realizată de autor.

Deoarece tehnologia de printare 3D este, în prezent, dezvoltată preponderent la scară mică, accentul s-a orientat asupra principiului de articulare. În această abordare, obiectele sunt concepute ca ansambluri compuse din elemente individuale, imprimate separat. Această strategie favorizează realizarea unor obiecte unice și personalizabile, în care fiecare componentă este adaptată situației specifice, fără a altera principiul general de proiectare. Obiectivul declarat este obținerea unor produse personalizate care, prin optimizarea procesului, să devină ușor accesibile.

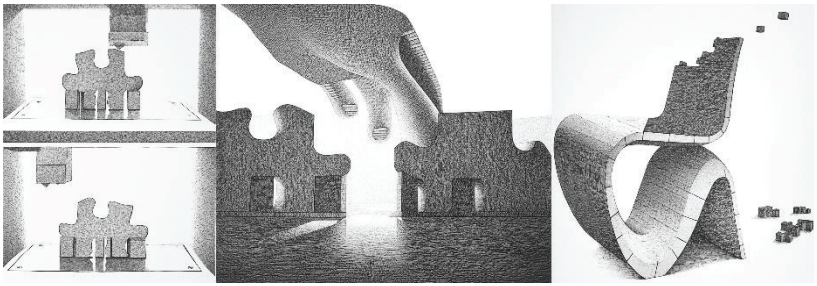
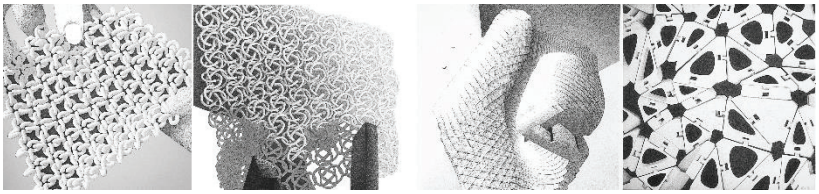


Figura 32. *Makerchairs*, proiect de cercetare, 2014 (Laarman 2014a). Ilustrație realizată de autor.

Un exemplu relevant este proiectul *Makerchairs*, realizat de Joris Laarman, în care scaunul este conceput ca un puzzle tridimensional alcătuit din componente imprimate individual și ulterior asamblate. În acest caz, sistemul de articulare nu asigură singur stabilitatea structurală, fiind necesară lipirea elementelor.



(a) (b)

Figura 33. *Flexible Textile Structures*, [trans]LAB, proiect de cercetare ([trans]LAB 2014) (b) Kinematics, nervous systems, colier, 2008 (nervous system 2013). Ilustrație realizată de autor.

Articularea este explorată mai departe în numeroase experimente care pun accent pe mobilitatea articulațiilor. Astfel se obțin obiecte asemănătoare cu țesăturile, printate 3D, în care logica de articulare este integrată încă din faza de proiect. Unul dintre avantajele imprimării 3D constă în posibilitatea realizării articulațiilor ca parte a aceluiași proces de fabricație aditivă. Se pot astfel produce materiale flexibile în cadrul aceluiași proces, fără a mai fi necesar prelucrarea și îmbinarea ulterioară. Prin această abordare, obiectele nu mai sunt alcătuite din componente separate ce trebuie asamblate, ci dintr-un material care încorporează logica de articulare în structura sa.

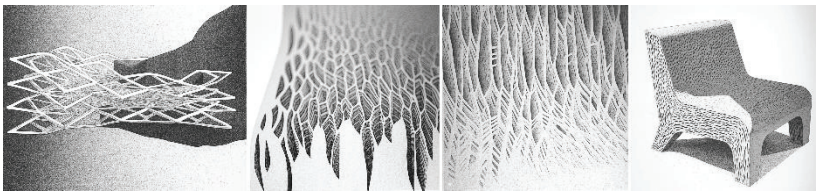


Figura 34. *Biomimicry: 3D printed soft seat*, Lilian van Daal, proiect de cercetare și design de obiect, 2014 (van Daal 2014). Ilustrație realizată de autor.

Practicile de design se concentrează pe dezvoltarea de materiale eterogene, fabricate prin același proces dar cu comportamente diferite, generate digital ca răspuns la forțele și funcțiile la care obiectul final trebuie să se adapteze. Un exemplu este Biomimicry, un scaun printat 3D conceput ca alternativă la mobilierul tapițat convențional, care utilizează mai multe materiale și procese de producție și asamblare.

Obiectul realizat de designerul van Daal folosește un singur material, dar variază densitatea acestuia pentru a obține atât zone flexibile pentru relaxare, cât și zone dure pentru rezistența structurală. Utilizarea imprimantelor 3D în producția de mobilier pune accent pe principiul sustenabilității. Astfel, această metodă poate reduce emisiile generate de transportul materialelor diferite și diminuează consumul de material. Prin utilizarea softurilor de analiză și optimizare, materialul este distribuit eficient în masa obiectului, evitând risipa de resurse.

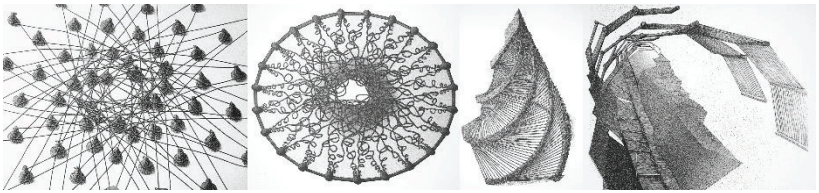


Figura 35. *Filament Sculptures*, LIA, 2014 (LIA 2014). Ilustrație realizată de autor.

O altă abordare care explorează caracteristicile materialului în relație cu metoda de fabricație este proiectul *Filament Sculptures.* Accentul cade pe modul în care unealta poate influența obiectul fabricat, prin editarea comenzilor direct din software. Astfel, artista LIA, în loc să modeleze obiecte 3D, le-a materializat direct prin modificarea codului pe care îl citește imprimanta 3D. În mod obișnuit, pentru ca un obiect să fie printat 3D, acesta trebuie mai întâi modelat. În cazul *Filament Sculptures*, etapa de pre-vizualizare a fost înlocuită cu un proces mai abstract, bazat pe scrierea de cod, iar obiectul capătă formă prin fabricație fizică. Variabilele manipulate în codul pentru imprimantă au fost: localizarea capului de imprimare, viteza de mișcare a acestuia și cantitatea de filament extrudat. Prin variația acestor parametri, s-a obținut o serie de structuri ce combină predeterminarea cu neașteptatul. S-au generat suprafețe definite fie continuu, fie haotic, linii rigide sau organice, iar filamentul a fost fie controlat strict, fie lăsat liber pentru a-și găsi singur forma.

Deși imprimantele 3D sunt adesea promovate ca o metodă eficientă și economică de producție la scară redusă, adevăratul lor potențial în domeniile creative rezidă în altă parte. . Acestea trebuie abordate ca unelte care pot duce la un design inovativ care influențează obiectul fabricat la nivelul proiectului. Dezvoltarea efervescentă în domeniul materialelor pentru printare ar trebui să stimuleza crearea de ansambluri complexe care se articulează în același proces de generare computațională dar și de fabricație digitală.

4.3. Fabricație digitală la scară arhitecturală. Studii de caz.

Există deja unelte de fabricație digitală care și-au demonstrat aplicabilitatea la scară mare și sunt utilizate pentru materializarea artefactelor arhitecturale. Adesea, acestea fac posibilă realizarea unor clădiri cu valoare reprezentativă ridicată, care explorează geometrii complexe. Primele proiecte ce au folosit tehnologiile digitale pentru construcție au preluat metode și principii din domeniul ingineresc. Treptat însă, aceste tehnologii au început să fie integrate în practica arhitecturală încă din faza de concept, adaptându-se specificului disciplinei și fiind tot mai des recunoscute pentru potențialul lor creativ.

Guggenheim Museum, Frank Gehry, 1997, BIlbao, Spania

Pentru Frank Gehry, procesul de proiectare este complet independent de mediul digital, materialitatea machetelor fiind preferată mediului computațional. Tehnologiile digitale nu sunt utilizate ca unelte de concepție, ci ca mediu de traducere a modelelor fizice în informație digitală, pentru a permite materializarea lor cu ajutorul mijloacelor de fabricație digitală (Kolarevic 2005c, 31).

Gehry a fost primul arhitect care s-a folosit de unelte digitale pentru a-și construi proiectele, însă a preluat softuri și metode de fabricație concepute și folosite anterior în alte industrii. Din acest motiv, nu există încă o continuitate pe parcursul procesului de proiectare și construcție: după încheierea etapei de concepție începe etapa computațională, utilizată doar pentru materializarea formelor deja stabilite.

Medierea între mediul fizic de creație și cel digital de optimizare și fabricare se realiza prin scanarea machetelor. Acest proces demonstrează lipsa interacțiunii directe cu uneltele digitale de concepere. Scanarea 3D este strămoșul unui proces apărut în perioada în care se dezvoltau metode

pentru obținerea de copii identice. În 1603, Christoph Scheiner a inventat pantograful, iar în 1621 Ottavio Reversi a realizat un mecanism asemănător pentru scalarea ordinelor clasice. Același principiu îl folosește și Gehry, însă cu unelte digitale, computația având rol doar de copiator. Prin scanare 3D, acesta a utilizat un proces pantografic digital (Carpo 2011, 16).

Baudrillard și Nouvel, discutând despre procesul de lucru al lui Gehry, consideră că revoluția informatică în arhitectură constă în fixarea a ceea ce este mai trecător și imediat, în materializarea ideii (Baudrillard și Nouvel 2005, 38-39). Astfel, odată încheiat procesul de creație, care, pentru Gehry, este foarte asemănător cu sculptura și presupune de obicei modelarea fizică a machetei (Glymph 2005, 105), computerul preia ștafeta. Modelul fizic este reprodus fidel în mediul digital, ceea ce face posibilă materializarea a ceva ce ține de instantaneu și instabil, mediul digital oferind o trecere directă de la dorință la realitatea construită.

Modificările asupra formei, din rațiuni estetice, se realizau exclusiv pe machetă, computerul fiind utilizat doar ca unealtă pentru concilierea aspectelor tehnice (Glymph 2005, 106). Aceasta se întâmpla deoarece arhitecții nu interacționau direct cu uneltele computaționale, ci cu specialiștii care le operau. Sistemul era, așadar, preluat ca atare, fără posibilitatea de modificare. Efortul s-a concentrat pe realizarea unor forme complexe și, deoarece singurele metode validate proveneau din industria aeronavală, acestea au fost aplicate în mod direct. Chiar dacă geometria era clar definită, atribuirea caracteristicilor legate de material și execuție depindea de software-ul și procesele de fabricație preluate din industriile de origine.

În industria aerospațială, fluxul de lucru era justificat: modelele fizice erau testate în tuneluri aerodinamice și apoi scanate pentru a genera date digitale esențiale în fabricarea componentelor. Gehry preia acest proces tehnic, gândit pentru eficiență și optimizarea panourilor metalice exterioare, și îl transferă fără modificări în arhitectură. Astfel, aplică un sistem adaptat unei industrii cu cerințe foarte diferite, unde această rigurozitate și dependență nu mai sunt neapărat necesare, limitând potențialul creativ al uneltelor digitale. Astfel, Gehry recurge la *reverse engineering*[14], proces care, în domeniul arhitecturii, desemnează utilizarea

[14] Din engleză, *reverse engineering* - inginerie inversă - este procesul de analiză a unui artefact existent cu scopul de a deduce principiile care l-au generat.

scanării tridimensionale pentru obținerea unui nor de puncte definite în coordonate XYZ, Aceste date sunt ulterior prelucrate pentru a genera curbe și suprafețe, care pot fi utilizate în proiectarea asistată de calculator, permițând integrarea obiectelor concepute fizic în fluxuri digitale de fabricație. Pentru a da materialitate suprafețelor adimensionale rezultate în urma scanării, Gehry a utilizat frecvent tot un principiu specific industriilor navale, numit *contouring*[15].

Această metodă nu este aleasă neapărat în relație cu expresia arhitecturală urmărită, ci rezultă din softul utilizat, Bocad. Acesta generează secțiuni consecutive prin volume cu forme fluide, care devin structura clădirii (Stephens 1999, 168). Formele libere primesc astfel caracteristici materiale, fără ca geometria să fie influențată.

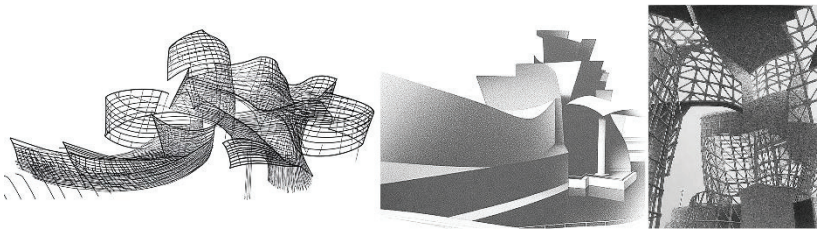


Figura 36. *Guggenheim Museum*, Frank Gehry, 1997, BIlbao, Spania, (Glymph 2005). Ilustrație realizată de autor.

Subdivizarea suprafețelor în panouri urmează o metodă similară celei folosite în construcția avioanelor. Panourile, diferite între ele, sunt realizate din titan, material ales nu doar pentru proprietățile estetice și mecanice, ci și pentru prețul redus la momentul construcției, datorat exporturilor din Rusia (Glymph 2005, 109).

După fabricație, pe fiecare componentă structurală a fost aplicat un cod de bare și marcate punctele de intersecție cu componentele adiacente. Pe șantier, codurile de bare au fost scanate pentru a identifica coordonatele fiecărei piese în modelul tridimensional relizat în CATIA. Pentru asigurarea

[15] Din engleză, *contouring,* proces preluat din industria navală unde se numea *lofting*. Pentru a construi corpul navei este nevoie de realizarea de ranforsări transversale succesive ce compune osatura, structura navei, peste care vine învelișul exterior.

poziționării exacte, s-a folosit un scanner cu laser, o practică comună în industria aerospațială (LeCuyer 1997, 43-45).

Odată demonstrată eficiența acestui flux de lucru, el a fost asumat ca o caracteristică definitorie a practicii lui Gehry. Totuși, meritul utilizării uneltelor digitale de fabricație în arhitectură îi revine lui Gehry, iar procesul s-a transformat treptat, adaptându-se specificului arhitecturii. În 2002, a fost fondată Gehry Technologies, companie dedicată aplicării tehnologiei în arhitectură, inginerie și construcții. Aceasta a colaborat cu CATIA pentru dezvoltarea softului BIM Digital Project, adaptând tehnologiile din industriile aeronavale domeniului arhitecturii.

Villa NURBS, CLoud 9, 2003-2011, Girona, Spania

Scopul declarat al biroului Cloud 9, condus de arhitectul Enric Ruiz-Geli, este de a testa idei neconvenționale. Practica de design a acestui studio este structurată în întregime în jurul acestui principiu, care urmărește implicarea tehnologiei în arhitectură și construcție. Cloud 9 dezvoltă, împreună cu un grup restrâns de investitori, soluții inovatoare pe care le brevetează. Astfel, biroul adoptă o practică de arhitectură ce pune accent pe materializare, iar arhitectul devine inventator.

Villa NURBS a fost unul dintre primele proiecte construite care au pus la încercare unelte digitale. Proiectarea acesteia a început la sfârșitul anilor ’90, în paralel cu teoriile lui Greg Lynn despre blob-uri. Concepută ca un proiect de cercetare, Villa NURBS a funcționat ca o casă laborator, în cadrul căreia șase soluții inovatoare au fost dezvoltate și patentate. Dorința de a constitui un manifest arhitectural se reflectă încă din relația cu contextul proiectului, situat într-o zonă dominată de copii de case în stil hacienda, prevăzute cu turnuri. Ruiz-Geli descrie gestul său arhitectural drept un virus pozitiv care se inserează în acest peisaj asemănător unui Disneyland. (McGuirk 2011).

Scopul a fost de a avea un proces de lucru digital, de la model la fabricație, testând continuitatea CAD-CAM. Premisa de la care au pornit a fost existența unui singur model digital, folosit de toți cei implicați în proiect. Modelul devine o modalitate de comunicare directă și de gestionare a construcției. Cu toate acestea, procesul de lucru nu a fost unul rapid, iar construirea propriu-zisă a durat mai mulți ani. Unul dintre motive este faptul că Villa NURBS a fost una dintre primele explorări ale legăturii între model și materializare, aplicate la o scară arhitecturală. Pe de altă parte,

fluxul continuu între mediul digital și cel material nu exista încă; fiecare disciplină folosind alte softuri, ceea ce a impus găsirea unor mijloace de comunicare între echipele implicate în proiect.

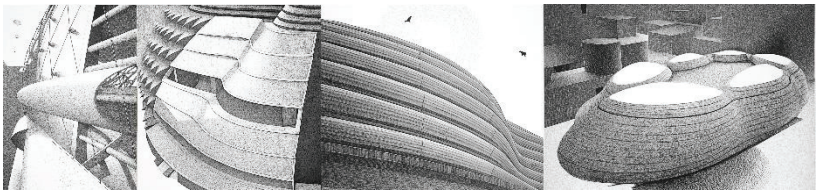


Figura 37. *Villa NURBS*, CLoud 9, componente din corian pentru fațadă 2003-2011, Girona, Spania (Ruiz-Geli et al. 2011, 158, 160) Ilustrație realizată de autor.

Villa NURBS este un blob, susținut de un nivel masiv, ce pare o suită de secțiuni suprapuse care aproximează o suprafață (Burry și Burry 2010, 194). Casa pare că devine din ce în ce mai ușoară pe măsură ce se înalță. Baza este o structură din beton armat post-tensionat. Primul etaj are o structură metalică ușoară ce susține fațada dublu ventilată. Închiderea la partea superioară este realizată cu perne din membrane ușoare. Etajul principal reia principiul patio, iar elementul central în jurul căruia se dezvoltă programul de locuit este o piscină în aer liber. Separarea în această zonă se face cu sticlă curbă, care reprezintă singurul element unde suprafața NURBS nu este supusă unui proces de simplificare înainte de producție. Pe fațada de nord sunt montați solzi ceramici care, în funcție de direcția suprafeței libere, au scopul de a proteja de soare și vânt puternic, dar și de a lăsa briza mării să treacă.

Elementele de ceramică au câteva tipuri diferite de geometrie, realizate prin mulaj pe matrițe din polistiren frezate la router. Solzii sunt fixați cu cabluri tensile de structura metalică, după ce au fost pictați de artistul Frederic Amat. Pentru fațada de nord-est s-a folosit corianul, datorită caracterului său translucid. Au fost tăiate piese planare de forme diferite, care apoi au fost termoformate pe matrițe din polistiren (Ruiz-Geli et al. 2011, 160).

Închiderea superioară este realizată din patru straturi de ETFE — trei transparente și unul translucid, între care se intercalează două membrane opace perforate. Între straturile de ETFE se formează trei perne care își modifică grosimea în funcție de radiația solară, suprapunându-se astfel

pentru a regla cantitatea de lumină ce pătrunde în interior (Ruiz-Geli et al. 2011, 162).

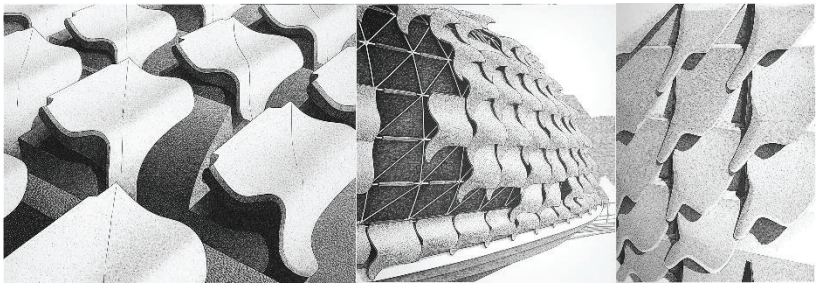


Figura 38. *Villa NURBS*, CLoud 9, elemente ceramice pentru fațadă, 2003-2011, Girona, Spania (Ruiz-Geli et al. 2011, 158, 160; Ruiz-Geli 2003)(Ruiz-Geli et al. 2011, 158, 160; Ruiz-Geli 2003). Ilustrație realizată de autor.

Deși Villa NURBS a fost concepută ca un proiect inovator, menit să integreze tehnologiile digitale și materialele noi în procesul de proiectare și fabricație, rezultatul a scos la iveală limitele unei tranziții încă incomplete între mediul digital și cel material. Forma, deși intenționată ca expresie specifică digitalului, rămâne în esență un blob, mai degrabă un principiu formal decât un produs al unei interacțiuni dinamice între creativitatea arhitectului și mediul digital. Lipsa continuității între software-urile utilizate a generat dificultăți de comunicare, proiectul precedând apariția platformelor BIM capabile să gestioneze un flux comun de informație. În plus, acumularea de soluții inovatoare, poate prea numeroase, pare să fi fost dictată mai degrabă de atractivitatea tehnologiei în sine decât de o necesitate arhitecturală clară, încărcând procesul și diminuând coerența ansamblului. Astfel, procesul de lucru de la Villa NURBS evidențiază că inovația tehnologică în arhitectură nu constă doar în utilizarea uneltelor digitale, ci și în modul în care acestea sunt integrate în mod coerent și flexibil în fluxurile creative și constructive.

Metropol Parasol - Plaza de la Encarnacion, Jürgen Mayer, 2011, Sevilia, Spania

Metropol Parasol explorează relația dintre suprafață și volum printr-un sistem structural alcătuit din plăci de lemn lamelar, îmbinate astfel încât să formeze un volum suspendat deasupra pieței. Acest sistem urmărește

principiul pergolei, oferind umbră, dar permițând în același timp pătrunderea luminii.

Principiul realizării unui volum prin secțiuni consecutive nu este nou, fiind folosit în mod obișnuit pentru a conferi stabilitate obiectului. Elementele de suprafață sunt chertate și rigidizate prin intersecție. În mod obișnuit, un asemenea sistem reprezintă structura interioară a unui obiect, care ulterior urmează să fie acoperit cu o anvelopantă. În acest caz însă, pe lângă rolul structural, principiul de articulare este folosit pentru a aproxima o geometrie complexă, materializată din componente bidimensionale, de suprafață care rămân vizibile. Volumul rezultat, derivat dintr-o suprafață liberă, ia formă în mod eficient prin planuri succesive pe două direcții, sugerând forma fluidă fără a recurge la suprafețe cu dublă curbură. De asemenea, se urmărește obținerea unei imagini care evidențiază modelul generat de intersecția elementelor, probabil cu scopul de a produce un efect vizual de fragmentare, atenuând astfel percepția asupra obiectului de dimensiuni foarte mari.

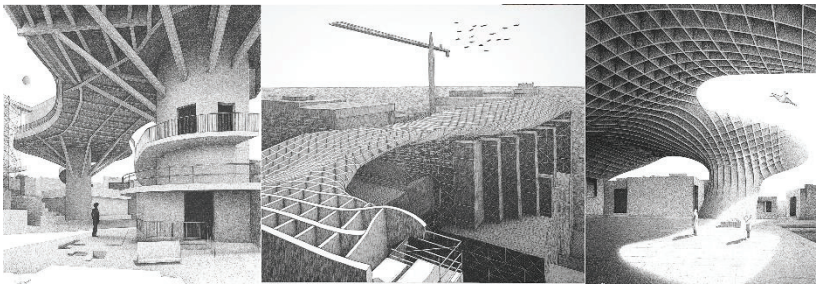


Figura 39. *Metropol Parasol* – acoperirea de la Plaza de la Encarnacion, Jürgen Mayer, 2011, Sevilia, Spania (Mayer 2011). Ilustrație realizată de autor.

Atuul proiectului constă în intenția clară de a exprima principiul generator al formei, menit să îndeplinească simultan roluri structurale, funcționale și arhitecturale, însă realizarea efectivă a acestei integrări s-a dovedit a fi greu de realizat. Deoarece construcția se află deasupra unui sit arheologic cu ruine romane, fundația a trebuit să transmită încărcările doar în anumite puncte și să permită deschideri ample. Astfel, pentru a asigura stabilitatea structurală, a fost necesară introducerea unor tuburi de beton integrate în volumul format de planele intersectate, iar în zonele cu

deschideri mari intervin și componente metalice, tot din rațiuni structurale. În acest context, elementele din lemn lamelar ajung să funcționeze mai degrabă ca o placare volumetrică, ce maschează alte elemente portante.

Deși imaginea finală pare coerentă, cerințele structurale și scara mare a intervenției au condus la o dependență de structuri ascunse, ceea ce a slăbit logica conceptuală inițială și a transformat lemnul lamelar mai degrabă într-un înveliș expresiv, decât într-un element structural autentic.

Dacă privim structura realizată din elemente chertate, observăm că, din cauza dimensiunii mari a obiectului arhitectural, principiul realizării unor elemente continue care să se intersecteze nu a putut fi aplicat pe toata lungimea. Deși intuim un sistem structural în care toate elementele unei direcții sprijină elementele celeilalte, realitatea constructivă este diferită. Piesele lungi au fost împărțite în segmente mai mici, conectate prin elemente metalice cu rol de articulare, sprijinindu-se alternativ unele pe altele. Astfel imaginea arhitecturală care pare să fie rezultatul exprimării logicii structurale, este, de fapt, una construită și căutată. Principiul structural aparent nu corespunde celui real.

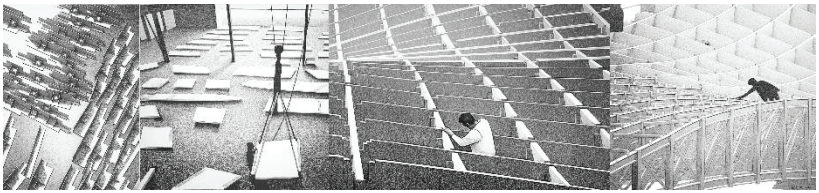


Figura 40. *Metropol Parasol* - acoperirea de la Plaza de la Encarnacion, Jürgen Mayer, 2011, Sevilia, Spania (Mayer 2011). Ilustrație realizată de autor.

Principiul formal al intersecției elementelor plane pentru a aproxima o formă liberă, des utilizat în proiectarea computațională, începe să fie tot mai comun. Metropol Parasol pare să evidențieze o tensiune între forma generată digital și adaptarea acesteia la condițiile reale ale sitului și scară. Principiul funcționează bine la o anumită rezoluție, însă la dimensiuni mari este necesară segmentarea elementelor și adaptarea soluțiilor din punct de vedere constructiv. Această diferență reflectă o tranziție încă destul de abruptă între mediul virtual și cel fizic, unde constrângerile legate de context, scară și material trebuie integrate mai atent. Proiectul evidențiază astfel anumite limitări în armonizarea proiectării digitale cu procesele de

fabricație și execuție la scară mare, fără însă a diminua rolul esențial al arhitectului în menținerea coerenței conceptuale și a raportului adecvat cu contextul și scară.

Galaxy Soho, ZHA, 2009-2012, Beijing China

Odată cu popularizarea computației, utilizarea acestor unelte a depășit domeniul cercetării și s-a încercat aplicarea directă în practica arhitecturală. Cu această orientare către practică s-au diluat aspectele teoretice și cercetarea pură, de la care se pleacă în mediul academic.

Pentru arhitecți, cea mai mare provocare este de a traduce formele complexe în artefacte construite care să exprime conceptul, și în același timp să medieze relația dintre uneltele digitale și metodele tradiționale de procurare, fabricație și construcție.

Galaxy Soho este un proiect de mari dimensiuni care a folosit mediul digital pentru proiectare, coordonare și fabricație. La începutul procesului, s-a realizat un model parametric în Maya pentru explorarea formală, generând cele patru volume ovoidale și conexiunile dintre ele. Această geometrie de masă a fost punctul de plecare pentru realizarea unui mod BIM, folosind CATIA Digital Project (Ceccato 2011, 168). Modelul BIM a fost folosit și ca mijloc de gestionare a relațiilor contractuale între arhitect, constructor și beneficiar, fațada 3D făcând parte din contract.

Procesul de transformare a geometriei fațadei este relevant pentru a observa un proces de feedback între proiect și materializare. Pentru alegerea materialului panourilor fațadei s-au realizat prototipuri, iar în final s-a optat pentru panouri din aluminiu. Odată stabilit materialul, s-a urmărit folosirea a cât mai puține metode costisitoare de prelucrare, modelare sau presare, care necesită matrițe diferite. Astfel s-au realizat etape de raționalizare, prin care treptat din panourile cu dublă curbură s-au obținut 95% panouri cu simplă curbură, dar diferite. Din acestea, 90% au fost panouri conice, apoi panourile foarte similare au fost optimizate și au devenit identice. Toate aceste transformări au fost realizate folosind modele parametrice, fără modificări substanțiale ale formei inițiale.

Aceste caracteristici ale panourilor au fost incluse în documentația pentru alegerea constructorului. Pentru a putea fi realizate a fost nevoie de o informație foarte precisă, astfel modelul digital și specificațiile fiecărui panou au făcut parte din contractul constructorului. De asemenea, licitația

a cerut ca fiecare participant să construiască o parte din fațadă la scară reală pentru a demonstra capacitatea de execuție.

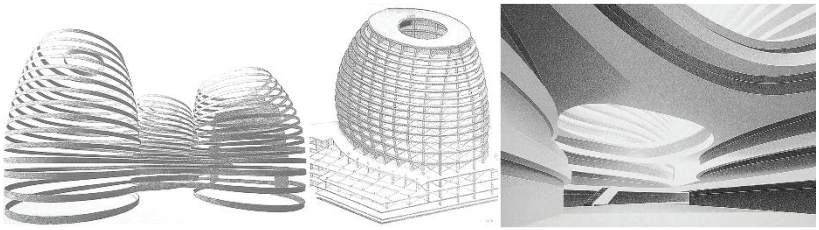


Figura 41. *Galaxy Soho*, ZHA, 2009-2012, Beijing, China (Zaha Hadid Architects 2012). Ilustrație realizată de autor.

Gradul de implicare al arhitectului în materializarea proiectului nu a fost clar definit, rămânând un domeniu vag, dependent de abilitățile tehnice ale arhitectului, de cadrul legal local sau de cutumă. Totuși, în contextul utilizării uneltelor digitale de concepție și fabricație, preocuparea pentru materializarea proiectului ar trebui să fie implicită.

Pe de altă parte, aceste unelte abia încep să fie folosite în practică și presupun transformarea unui proces intrat în rutină. Concepte precum *file-to-factory* și fabricația digitală pot rămâne nesemnificative în practică dacă cadrul legal, domeniul de aplicare și răspunderea nu sunt bine înțelese. Riscul este ca arhitectul să fie privit doar ca un consultant, iar ambiția designului și calitatea arhitecturală să fie compromise în favoarea minimizării riscului și a costurilor gestionate de constructor (Ceccato 2012, 103).

Realizat de un birou de arhitectură de renume internațional, proiectul amplasat în China poate fi interpretat și ca o demonstrație a capacității tehnologice și industriale locale, contribuind astfel la consolidarea statutului său de obiect arhitectural reprezentativ și la afirmarea unei mândrii naționale asociate execuției. După definirea conceptului, în stilul caracteristic al biroului, cu forme fluide și expresive generate prin modelare parametrică, implicarea proiectanților în pregătirea pentru materializare a fost relativ limitată, probabil și din cauza unor bariere culturale. Rolul proiectanților a fost mai degrabă acela de a selecta dintre variantele propuse, fără o adaptare fundamentală a geometriei la soluțiile tehnice alese. Această abordare ridică riscul ca materializarea să se

disocieze de intenția conceptuală inițială. Astfel, apare necesitatea implicării arhitecților în procesul de materializare, proces prin care și conceptul să poată fi flexibil și ajustat în funcție de particularitățile materialelor și al proceselor tehnologice.

Smithsonian Institute Courtyard Enclosure, Foster + Partners, 2004-2007, Washington, S.U.A

În cadrul Foster + Partners există din 1998 un grup de cercetare și dezvoltare, Specialist Modeling Group (SGM), care funcționează ca un consultant intern care dezvoltă și integrează unelte computaționale pentru gestionarea geometriei complexe și rezolvarea problemelor de fabricație.

Prin crearea unui grup dedicat cercetării și integrării uneltelor digitale în practica arhitecturală, în cadrul unuia dintre cele mai prestigioase birouri de proiectare, se recunoaște potențialul acestora. Pe măsură ce au realizat proiecte reprezentative, SGM a dezvoltat principii ce descriu unul dintre primele procese de lucru ce combină aspectele conceptuale cu mediul computațional.

SGM a construit unelte noi adaptate fiecărui proiect și a dezvoltat o strategie care să răspundă noilor provocări. Aceasta reprezintă un exemplu reprezentativ al transformării procesului de lucru prin folosirea uneltelor digitale. Printre principiile declarate care caracterizează această abordare se numără: geometria ca mecanism, strategiile de raționalizare, relațiile parametrice, schița văzută ca metaforă, proiectantul ca programator și computerele ca amplificatori ai intelectului (Whitehead 2013, 233).

SGM folosesc geometria ca pe un mecanism, o metodă de comunicare cu cei care se ocupă de materializarea proiectului. Astfel, geometria este transmisă mai departe, nu ca formă, ci ca reguli de generare a logicii de articulare. Această informație era implementată în softurile diferite folosite de toți cei implicați în proiect (Whitehead 2013, 235).

În acest context, relațiile dintre părți au început să definească procesul de căutare formală, orientându-se către proiectare parametrică. De asemenea, urmărirea unor criterii de performanță a fost facilitată prin realizarea de modele parametrice care contribuie la căutarea unor soluții eficiente. A câștigat importanță și modul de abordare al conceptului. Astfel, schițele de concept nu au fost replicate întocmai în mediul digital, precum făcea Gehry. Ci erau interpretate, astfel încât să surprindă ideea

care a stat la baza realizării unei schițe, abstractizarea ei (Whitehead 2013, 239).

SGM justifică utilizarea computerelor în proiectare datorită capacității acestora de a amplifica intelectul, subliniind însă că succesul depinde de conținutul ce trebuie amplificat. Astfel nu softurile, ca unelte au cea mai mare importanță ci modul în care sunt înțelese și aplicate.

În 2004, Foster + Partners a câștigat competiția pentru acoperirea curții Smithsonian, iar SGM a fost implicat încă din faza conceptuală a proiectului. Soluția a pornit de la o suprafață undulată cu trei domuri realizată dintr-o structură metalică cu subdiviziuni pătrate, închisă cu sticlă și descărcând perimetral pe opt coloane. Rețeaua pătrată a fost aleasă pentru a reduce numărul elementelor ce ar putea împiedica lumina să pătrundă în curte.

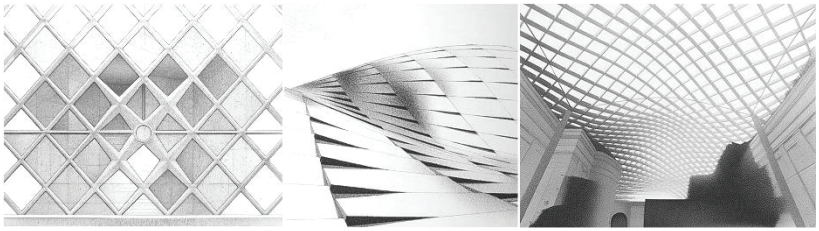


Figura 42. *Smithsonian Institute Courtyard Enclosure*, Foster + Partners, 2004-2007, Washington, S.U.A (Foster and Partners 2004). Ilustrație realizată de autor.

S-a realizat un model 3D parametric în care constrângerile și intenția de design au fost traduse într-o geometrie asociativă. Modelul a integrat aspecte legate de performanța structurală, acustică, iluminare și gestionarea apelor pluviale. Scripting-ul a fost utilizat ca o unealtă de testare a ideilor, într-un mod explorativ, combinând abilități de programare, proiectare și interpretare (Menges 2010, 48). Astfel, modelul parametric a sintetizat toate ideile de proiectare, a inclus rezultatele simulărilor de performanță și a generat informațiile necesare fabricației.

Deși geometria este o suprafață complexă cu dublă curbură, aceasta a fost optimizată și subdivizată în componente planare. Fiecare panou de sticlă este planar, unic și, după debitare, a fost marcat cu un cod de bare pentru a asigura montajul în poziția potrivită.

Structura metalică din oțel a fost fabricată prin debitare cu plasmă pentru obținerea pieselor diferite, care ulterior au fost sudate în subansamble. Dimensionarea structurii variază în funcție de eforturile structurale, cu îngroșări în apropierea coloanelor. Pe marginea grinzilor sunt montate panouri acustice din material textil.

Panourile de sticlă sunt fixate pe structură prin intermediul unor piese din aluminiu tăiate cu laser, creând un plan distinct față de structură. De-a lungul panourilor există un decalaj pentru colectarea și scurgerea apei de ploaie către coloanele poziționate în punctele cele mai joase ale acoperirii.

Proiectul acoperirii curții Smithsonian evidențiază importanța integrării procesului de materializare încă din faza conceptuală, demonstrând cum aceasta poate conduce la soluții arhitecturale adaptate în mod coerent nevoilor specifice și contextului local.

Museo Soumaya, FR-EE, consultant pentru fabricație Gehry Technologies, 2009-2011, Mexic

Intenția de proiect pentru muzeul Soumaya a fost realizarea unui obiect de arhitectură de avangardă, sculptural, care să găzduiască o colecție de obiecte de artă din secolul al XIV-lea până în prezent. În acest caz, intervenția mediului computațional a survenit ulterior definirii formei, fiind utilizată pentru optimizarea și fabricația fațadei.

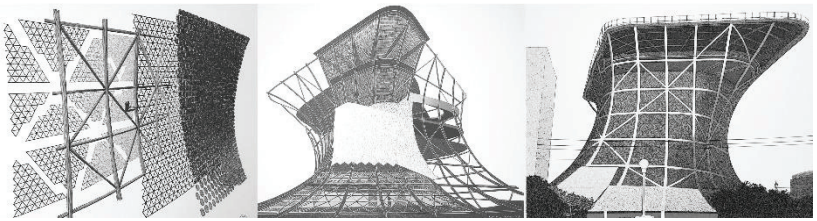


Figura 43. Sistemul fațadei, structura clădirii, structura spațială și panourile hexagonale. *Museo Soumaya*, FR-EE, consultant pentru fabricație Gehry Technologies, 2009-2011, Mexic (Sidelko 2013). Ilustrație realizată de autor.

Gehry Technologies a avut un rol esențial în materializarea fațadei, colaborând îndeaproape cu arhitectul, a optimizat geometria fațadei și a gestionat procesul de pregătire a proiectului pentru fabricație. Suprafața

cu dublă curbură a fost dezvoltată prin lucrul cu machete de studiu, ulterior scanate pentru a fi integrate în mediul digital. Structura suprafeței a fost realizată de Arup, și urmărește geometria complexă, ca un grid deformat (Romero și Ramos 2013, 67).

Provocarea a constat în realizarea fațadei astfel încât să respecte intenția de design, în special în ceea ce privește geometria panourilor hexagonale din aluminiu. Structura principală fusese deja fabricată și se afla în proces de asamblare înainte de stabilirea definitivă a geometriei panourilor exterioare. După finalizarea structurii, a apărut necesitatea unui releveu care a evidențiat diferențe între modelul digital și situația reală, diferențe care ar fi generat decalaje în montajul panourilor.

Între panourile hexagonale exterioare și finisajul interior a fost propus un grid spațial tridimensional, în care fiecare element este unic. Fiecare nod al acestei structuri reprezintă punctul de montaj al unui panou hexagonal. Această structură a preluat și corectat decalajele identificate în urma releveului, fiind gestionată printr-un model digital complet și precis, dezvoltat de Gehry Technologies (Sidelko 2013, 40). Modelul a fost dezvoltat în softul Digital Project, de unde au fost extrase și datele pentru fabricație.

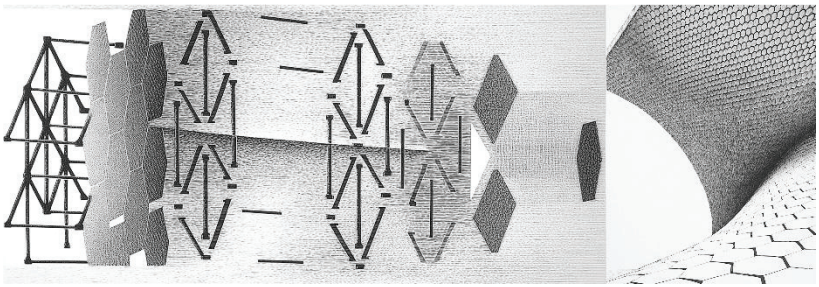


Figura 44. Familiile diferite de panouri hexagonale și principiul de prindere. *Museo Soumaya*, FR-EE, consultant pentru fabricație Gehry Technologies, 2009-2011, Mexic (FR-EE și Gehry Technologies, f.a.) Ilustrație realizată de autor.

Deoarece problema geometriei panourilor a apărut după finalizarea structurii, s-au impus numeroase constrângeri. Studiul a pornit cu analiza curburii suprafeței fațadei, care urma să determine deformarea modelului hexagonal. Intenția proiectului era ca panourile să fie poziționate la

distanțe egale între ele (Romero și Ramos 2013, 68). Din analiza inițială au rezultat aproximativ 16.000 de panouri unice, ceea ce a impus o raționalizare pentru reducerea costurilor de fabricație.

În acest context, Gehry Technologies a facilitat negocierea între arhitect, care punea accent pe păstrarea distanței uniforme dintre panouri, și producător, care urmarea să minimizeze numărul panourilor diferite. Aplicând mai mulți algoritmi care verificau similitudinea dintre panouri, s-a ajuns la o clasificare finală în 52 de familii pentru 80% din suprafața fațadei și 252 de familii pentru restul de 20%. Astfel, gestionarea variației panourilor s-a realizat ca un echilibru între intenția de proiect și eficiența de producție și a costurilor.

Detașarea arhitectului de procesul de materializare, precum și lipsa cunoștințelor privind uneltele digitale, au condus la pierderea controlului asupra imaginii finale a proiectului. Absența unui model integrator a generat discrepanțe semnificative între reprezentarea virtuală și realitatea materială. Astfel, o formă arbitrar stabilită, deși spectaculoasă ca obiect arhitectural, a necesitat intervenția unui specialist extern în fabricație pentru a corecta disfuncționalitățile apărute. În acest caz, uneltele digitale au funcționat mai degrabă ca mijloc de remediere a unei viziuni imaginată de mintea umană, dar fără abilitățile necesare pentru a asigura o corelare coerentă între concept și materializare.

4.4. Fabricația robotică

Termenul „robot" apare pentru prima dată în 1921, în piesa de teatru *R.U.R.*[16] scrisă de Karel Čapek, provenind din cuvântul „robota", care în cehă înseamnă muncă forțată, sau din „robotnik", cu sensul de servitor ori sclav. Mai târziu, în anii 1940, Isaac Asimov popularizează prin romanele sale SF domeniul roboticii și anticipează dezvoltarea acestei industrii. În scrierile sale, roboții sunt imaginați ca oameni artificiali, creați pentru a servi și a ușura viața oamenilor. Celebrele Legi ale Roboticii (Asimov 1950) au atras atenția datorită posibilelor implicații ale tehnologiei și rămân până astăzi un punct de referință, inclusiv în contextul cercetării actuale în

[16] Din engleză Rossum's Universal Robots, piesă de teatru în care roboții se revoltă împotriva oamenilor, preluând controlul lumii.

domeniul inteligenței artificiale[17]. Această viziune a depășit granițele ficțiunii și a modelat percepția socială asupra sistemelor automate, considerate mașini capabile să execute operații repetitive, precise și invariabile, dar lipsite de spontaneitate.

George Devol brevetează în 1954 primul robot programabil. Compania Unimation, fondată împreună cu Joseph F. Engelberger, realizează în 1962 *Unimate*, primul robot utilizat în industrie, introdus pe linia de producție a General Motors pentru extragerea pieselor dintr-o mașină de turnare sub presiune. Ulterior, acesta a fost folosit și de Ford Motor Company pentru sudură, aplicație care avea să devină cea mai răspândită întrebuințare industrială a roboților, dat fiind că reprezintă una dintre cele mai solicitante și riscante activități pentru muncitori (Engelberger 1999, 3).

Apariția Sistemului de Producție Flexibil[18], în anii 1960, a consacrat domeniul roboticii ca disciplină științifică (Mathia 2010, 2). Roboții industriali au devenit un element central al acestei strategii, reducând dependența de forța de muncă umană, permițând modificarea rapidă a liniilor de asamblare fără înlocuirea unor echipamente costisitoare și facilitând producția economică a loturilor personalizate (Paul Aron 1981, 57). Cu toate acestea, flexibilitatea oferită de acest sistem a fost exploatată mai ales în raport cu eficiența economică, ceea ce a făcut ca noul concept de producție să rămână, în esență, apropiat de logica producției în serie.

Roboții industriali ai anilor 1950 și 1960 erau departe de complexitatea și versatilitatea roboților umanoizi imaginați de Čapek și Asimov, fiind limitați

[17] Legea 1: Un robot nu are voie să pricinuiască vreun rău unei ființe umane, sau, prin neintervenție, să permită ca unei ființe omenești să i se facă un rău. Legea 2: Un robot trebuie să se supună ordinelor date de către o ființă umană, atât timp cât ele nu intră în contradicție cu Legea 1. Legea 3: Un robot trebuie să-și protejeze propria existență, atât timp cât acest lucru nu intră în contradicție cu Legile 1 sau 2 (Asimov 1950).

[18] din engleză *Flexible Manufacturing System (FMS)*, este un sistem de producție în care există un oarecare grad de flexibilitate, care permite sistemului să reacționeze în cazul unor modificări. Astfel de sisteme folosesc roboți industriali, mașini cu control numeric și senzori. Gradul de flexibilitate al sistemului poate varia și se poate referi la: capacitatea de producție de noi tipuri de produse, schimbarea ordinii operațiilor de producție sau la capacitatea de acomodare la schimbări de scară și volum de producție, adică va fi ușor de îmbunătățit (Tolio 2008, 36).

la efectuarea unor operațiuni simple și repetitive. Chiar dacă generațiile următoare de roboți industriali au cunoscut îmbunătățiri semnificative în plan mecanic și electronic, sarcinile lor au rămas, în mare parte, aceleași: execuția repetitivă a unor operații în cadrul proceselor industriale automatizate.

Brațul robotic modern își are originea în dezvoltările din industrie din anii 1970 și este descendentul lui *Stanford Arm*, realizat de Victor Scheinman în 1969. În 1973, compania ASEA a lansat IRB-6, un braț robotic cu șase axe, controlat de computer, primul robot industrial electric capabil de mișcare continuă, controlat de un microcomputer. În același an, KUKA a introdus modelul *Famulus* (Hägele et al. 2008, 967).

Plecând de la principiul „roboților care fabrică alți roboți", a apărut conceptul de *producție cu lumina stinsă*[19], definit mai degrabă ca metodologie de fabricație decât ca proces specific. Fabricile care adoptă acest sistem sunt complet automatizate și nu necesită prezență umană la locul de producție, ceea ce permite funcționarea fără oprire și cu lumina stinsă. Deși multe unități industriale pot opera în regim *lights-out*, puține îl utilizează exclusiv. Inițial, această metodă a fost introdusă între schimburile obișnuite, fie pentru a răspunde unei cereri crescute, fie pentru a reduce costurile. Într-o astfel de fabrică automată, materia primă intră, iar produsul finit iese fără intervenție umană. Un exemplu notabil îl reprezintă, paradoxal, fabrica producătorului de roboți industriali FANUC, care funcționează în regim *lights-out* încă din 2001, realizând 50 de roboți în 24 de ore și putând opera nesupravegheat timp de până la 30 de zile. Ideea unei fabrici operate de mașini capabile de autoreplicare apare încă din 1955, într-o nuvelă a lui Philip K. Dick, unde conflictul central este dorința oamenilor de a recăpăta controlul asupra mașinilor, producției și resurselor (Philip K. Dick 1955).

La începutul anilor 1960, Statele Unite nu aveau competitori în domeniul cercetării și producției robotice (Aron, 1981, 33). Situația s-a schimbat în 1969, când Japonia a început să producă roboți în urma unui acord cu Unimation. În anii 1980, industria robotică japoneză a cunoscut o expansiune semnificativă, alimentată de boom-ul economic din sectorul auto din a doua jumătate a deceniului. Astfel industria robotică din Japonia a câștigat competiția globală, consolidându-și poziția, doar un număr mic

[19] din engleză lights-out manufacturing

de companii non-japoneze au supraviețuit (Mathia 2010, 2-3). Totuși, acest avantaj s-a diminuat treptat odată cu criza economică națională din anii 1990. În 2005, principalii producători mondiali de roboți industriali erau Fanuc și Motoman (Japonia), ABB (Suedia) și KUKA (Germania).

4.4.1. Fabricația robotică în arhitectură

Implicarea roboților în domeniul arhitecturii și construcțiilor a urmat două direcții principale. Prima, una pragmatică, s-a concentrat pe rezolvarea problemelor lucrului de mână: inconsecvență, productivitate scăzută, lipsa personalului calificat, de aceea s-a orientat către automatizarea șantierului (Bechthold și King 2012, 119). Această orientare către eficiență, similară principiilor care au condus revoluția industrială, a depășit însă domeniul producției și a fost exploatată în special de marile companii de construcții japoneze. Cea de-a doua abordare, explorată în prezent, urmărește extinderea orizontului creativ de proiectare, prin conceperea unor instalații robotice de fabricație unice, menite să transforme roboții industriali în unelte versatile și flexibile.

În anii 1980-1990, pe fondul creșterii economice, industria construcțiilor din Japonia a investit masiv în dezvoltarea de sisteme care să înlocuiască munca umană pe șantier, cu scopul de a crește siguranța și, în același timp, productivitatea (Tanijiri et al. 1996). Profesia de muncitor pe șantier devenise neatractivă pentru generația tânără, fiind considerată periculoasă, murdară și solicitantă. Astfel, au fost dezvoltate mașini capabile să execute sarcini diferite, de la sudură la vopsitorii, aplicarea izolațiilor anti-foc sau instalarea elementelor prefabricate (Best și Valence 2007, 439).

Cele mai spectaculoase au fost însă sistemele automatizate de ridicare a zgârie-norilor, care, datorită scării lor, reprezentau un domeniu de investiție cu potențial ridicat. Inspirându-se din adoptarea Sistemului de Producție Flexibil, constructorii japonezi au dezvoltat Sistemul Automat de Construcție[20]. În acest cadru, construcția unei clădiri era abordată ca un proces industrial: șantierul devenea o fabrică, iar procesul de construire era tratat ca o automatizare completă. Între 1989 și 1997, marile companii de construcții japoneze au dezvoltat opt astfel de sisteme (Best și Valence 2007, 446). Acestea fie aveau un etaj de asamblare situat în partea

[20] din engleză Automated Building System (ABS)

superioară, care se ridica pe măsură ce finaliza nivelurile inferioare, fie introduceau un nou etaj la partea inferioară, ridicând întreaga structură de deasupra printr-un sistem de cricuri (Bechthold și King 2012, 119). Pentru asigurarea calității, au fost integrate sisteme de verificare cu laser, capabile de a oferi un control în timp real. Întregul proces de construcție era gestionat prin modele 3D complexe și sisteme avansate de management al fluxului de lucru (Mechthold 2010, 119).

Aceste sisteme automate depindeau de standardizarea construcției, orientându-se către elemente prefabricate și sarcini repetitive. Limitarea provenea din gradul lor ridicat de specializare: deși eficiente în industrii unde procesele sunt constante, ele nu puteau fi adaptate ușor condițiilor variabile ale șantierelor. În plus, costurile ridicate de dezvoltare puteau fi justificate doar printr-o utilizare repetată. Chiar dacă au crescut productivitatea, diferența de cost nu a fost suficient de semnificativă pentru a susține investiția.

În construcții, contextul este mereu diferit, iar mediul de lucru nu este unul controlat, ca în fabrică. Condițiile de exploatare sunt mai dure, ceea ce a făcut ca aceste sisteme să se dovedească nepotrivite. În încercarea de a prelua principiile de automatizare din industria de producție, domeniul construcțiilor a ignorat caracterul său bazat pe proiect; astfel, fiecare clădire este unică, concepută pentru un anumit scop, într-un context mereu diferit, cu o echipă de specialiști responsabili de îndeplinirea cerințelor particulare ale clientului (Bonwetsch et al. 2012, 81).

Utilizarea roboților s-a concentrat pe producție, vizând înlocuirea muncii manuale, cu scopul de a accelera standardizarea și de a controla profitul. Aceștia erau priviți mai degrabă ca unelte avansate de producție, nu ca instrumente programabile pentru proiectare, iar potențialul lor de flexibilitate nu a fost explorat de designeri (Bonwetsch et al. 2012, 79).

Astfel, în Japonia, abordarea inițială a fost aceea de a crea mașini personalizate pentru executarea unor sarcini standard. Astăzi, direcția s-a inversat: se urmărește realizarea de operațiuni diferite folosind unelte generice, precum roboții industriali (Mechthold 2010, 119).

4.4.2. Roboții industriali

Robotul industrial este definit ca un manipulator multifuncțional, cu control automat, reprogramabil, în trei sau mai multe axe („ISO Standars 8373” 2012). Chiar prin modul în care este conceput, robotul industrial nu

este destinat să execute exclusiv o singură operație (Menges și Schwinn 2012). Acesta este alcătuit din două componente: brațul mecanic articulat și unitatea de control, care procesează și transmite codul pentru mișcările brațului robotic. Pentru că roboții industriali sunt dispozitive programabile, aceștia sunt, în consecință, flexibili și versatili, spre deosebire de mașinile automate cu destinație specială. În plus, sunt multifuncționali datorită posibilității de a fi echipați cu o mare varietate de unelte, denumite end-efectori. Astfel, roboții industriali pot executa sarcini cu precizie și acurateță, conform instrucțiunilor programate, au capacitatea de a ajunge în puncte precise în spațiu și pot fi utilizați în moduri diferite (Mathia 2010, 4).



Figura 45. Toate tipurile de roboți industriali de la ABB și KUKA, preluați din softul de simulare HAL. Daniela Anton și Ionut Anton, 2013

Brațul robotic este un ansamblu mecanic complex, a cărui mecanică este guvernată de principiul conform căruia fiecare mișcare a mașinii este geometrică și măsurabilă (Canguilhem 1992, 46). El este alcătuit din piese interconectate, aflate în relație unele cu altele, având, de regulă, șase grade de libertate de mișcare. Aceste grade diferite de libertate pot fi cuantificate, ceea ce înseamnă că pot servi drept parametri concreți pentru stabilirea limitelor de mișcare între oricare dintre unitățile conectate. În acest fel, mișcarea devine o caracteristică ce definește atât interacțiunea dintre părți, cât și modul de funcționare al ansamblului.

Cele șase articulații ale robotului oferă avantajul de a controla nu doar poziția în spațiu a end-efectorului, ci și orientarea acestuia. Părțile mobile lucrează împreună astfel încât mișcările lor să nu afecteze integritatea ansamblului. Cinematica se referă la studiul poziției, vitezei și accelerației în raport cu timpul, descriind proprietățile geometrice, poziția părților rigide și a articulațiilor robotului pe parcursul mișcării (Craig 1986, 6).

Cinematica inversă desemnează calcularea pozițiilor articulațiilor și părților rigide ale robotului astfel încât end-efectorul să atingă o anumită poziție și orientare. Determinarea poziției și a unghiului de rotație pentru toate cele

șase articulații este realizată automat de controlerul robotului. Integrarea cinematicii inverse în controlul roboților contribuie semnificativ la simplificarea procesului de programare.

Controlul roboților industriali se realizează cel mai frecvent prin programare offline, folosind unelte software independente de robot. În acest proces, robotul și toate mecanismele din spațiul său de lucru sunt reprezentate în mediul virtual, împreună cu caracteristicile lor, pentru a putea previziona modul de funcționare. Simularea permite crearea de aplicații pentru robot fără a depinde de operarea fizică a brațului și a end-efectorului. Cu ajutorul software-ului de programare, se simulează secvența de operații pe care robotul urmează să le execute, se generează programul în limbajul specific producătorului și acesta este apoi transmis sistemului de control.

Un caz special în programarea mișcărilor îl constituie singularitățile, puncte în care anumite axe ale robotului se aliniază, determinând mișcări cu rotații și viteze mari. Aceste situații pot fi evitate prin simularea mișcărilor, detectarea momentelor problematice și ajustarea traiectoriei robotului.

În domeniul industrial, integrarea unui sistem robotic este un proces laborios și costisitor, realizat de firme specializate. Aceasta presupune proiectarea și realizarea unui sistem de producție personalizat, denumit celulă robotică, care include robotul, end-efectorul și alte echipamente cu care acesta trebuie coordonat. Procesul implică corelarea componentelor din cadrul celulei robotice, rezolvarea incompatibilităților și asigurarea unui nivel ridicat de precizie.

Controlul brațelor robotice ridică probleme ce țin de evitarea coliziunilor, respectarea restricțiilor de greutate, prevenirea singularităților și atingerea toleranțelor minime. Precizia, una dintre caracteristicile definitorii ale celulelor robotice, depinde de calibrarea acestora. Calibrarea asigură echivalența între celula reală și modelul său virtual, evitând astfel erorile de fabricație și coliziunile dintre brațul robotic, celelalte mașini și end-efector. Integratorii dispun de propriile softuri pentru controlul sistemului, însă, pentru fiecare aplicație în parte, dezvoltă un software personalizat. Prin urmare, procesul de integrare presupune investiții semnificative de timp, precum și cunoștințe avansate de inginerie și programare, cu scopul realizării unor sisteme personalizate, precise, dar în același timp foarte specializate (Hägele et al. 2008, 980).

În industria auto, datorită volumului mare de producție, investiția de timp și resurse în integrarea sistemelor robotice este justificată, operațiunile fiind standardizate și repetitive. În aceste sectoare, accentul se pune pe precizia și automatizarea proceselor, nu pe varietatea aplicațiilor. Pentru realizarea de sarcini variate, însă, este necesară o flexibilitate sporită în programare (Mechthold 2010, 121). Recent, producătorii de roboți industriali au început să se orienteze către domenii mai diverse decât cele tradiționale, cu scopul extinderii pieței. Astfel, sectoarele creative au devenit medii potențiale de utilizare a roboților, generând interes pentru dezvoltarea de softuri de programare mai accesibile.

În prezent, se dezvoltă programe de control și simulare care facilitează interacțiunea cu limbajele specifice robotului (Hägele et al. 2008, 977-78). Ca urmare, cunoștințele de programare necesare devin treptat mai generice, iar operatorul nu mai trebuie să fie un programator profesionist, putându-se concentra pe procesul fizic pe care robotul trebuie să-l execute.

4.4.3. Potențialul roboților industriali

Datorită utilizării lor pe scară largă în mediul industrial, roboții industriali au depășit faza de acomodare tehnică: sunt mașini testate, utile și continuu îmbunătățite. Fiind o tehnologie matură, costul lor a scăzut semnificativ, fiind cu aproximativ 70% mai redus decât în anii 1990, când s-au răspândit inițial în industrie. În arhitectură, cercetarea nu urmărește reinventarea brațelor robotice, ci explorarea modului în care acestea pot fi integrate în practica de proiectare și fabricație, prin utilizarea de end-efectori sau prin dezvoltarea unor interfețe de lucru mai intuitive, adaptate domeniului arhitecturii.

Roboții industriali devin astfel relevanți pentru domeniile creative datorită caracterului lor multifuncțional și a costului relativ redus pentru dezvoltarea de aplicații diferite. În locul mai multor mașini specializate, un singur robot poate fi echipat cu o gamă largă de unelte, end-efectori diferiți, apropiindu-se de principiul producției tradiționale, în care meșterul își adapta uneltele la sarcina curentă (Brell-Cokcan și Braumann 2012, 8).

Prin integrarea fabricației în procesul de design nu se urmăresc doar rațiuni de eficiență legate de reducerea timpului sau a etapelor dintre proiect și construcție (Pigram et al. 2012, 147). Scopul este realizarea unui feedback continuu între intenția de proiect și logica de fabricație. Chiar dacă practica

de arhitectură tinde să se orienteze tot mai mult către materializare, aceasta nu înseamnă concentrarea exclusivă asupra obiectului produs. Nu ar trebui să ne intereseze doar modul de fabricare, ci mai degrabă explorarea unor noi modalități de materializare care să extindă domeniul creativ.

Robotul nu trebuie utilizat în situații în care procesul poate fi realizat mai simplu prin alte mijloace. În același timp, simpla posibilitate de a produce ceva ce nu ar fi realizabil fără robot nu constituie un argument suficient pentru implicarea sa. Potențialul roboților se manifestă în situațiile care este nevoie de realizarea de conexiuni complexe, însă numai prin interacțiunea cu proiectantul (Willmann et al. 2012, 20). Capacitățile tehnice ale roboților industriali nu sunt singurul criteriu care justifică utilizarea lor; integrarea lor în proiect, ca factori ce influențează procesul de design, motivează această implicare. Relevanța nu constă în aspectul hi-tech, ci în explorarea aplicațiilor roboților, adaptarea lor la contextul fiecărui proiect și integrarea efectivă în procesul de proiectare (Tănase și Anton 2014, 77).

Robotul industrial a devenit un standard în automatizare tocmai pentru că, asemenea computerului personal, nu a fost conceput pentru o singură sarcină, ci poate fi utilizat într-o gamă largă de aplicații. În loc să fie constrâns să funcționeze în parametri predefiniți, ca o mașină specializată, abilitățile sale pot fi programate de către proiectant pentru fiecare situație în parte. Astfel, procesul de proiectare integrează feedback-ul provenit din logica comportamentului materialului și modul de materializare.

Fabricarea cu roboți combină un echipament generic cu un proces personalizat, transformând roboții într-o unealtă de fabricație open source. Deși performanțele lor s-au îmbunătățit de-a lungul timpului, esența lor rămâne similară cu cea a strămoșului lor, Unimate. Chiar dacă sunt mai ușori, mai ergonomici, mai rapizi sau mai preciși, motivul principal al aprecierii lor continuă să fie flexibilitatea. Fabricația robotică permite realizarea de mișcări precise și variate prin reprogramarea robotului, accentuând astfel personalizarea procesului. În consecință, evoluția viitoare a fabricației robotice nu se va concentra pe creșterea performanței tehnice a roboților, ci pe dezvoltarea unor interfețe accesibile și intuitive pentru utilizatorii din domeniile creative.

Semnificativ nu este valoarea intrinsecă a acestor mașini sau a unei anumite metode de fabricație, ci mai degrabă îndepărtarea de o atitudine

deterministă sau neutră față de procesul de materializare. Orientarea către un model operativ presupune ca materializarea, modul în care un proiect se manifestă și ocupă realitatea, să devină o componentă intrinsecă a procesului de proiectare (FABLAB, Taubman College of Architecture 2011, 74-75).

În continuare, vor fi prezentate studii de caz care ilustrează flexibilitatea acestor unelte generice, explorată prin proiect. Aplicațiile cu roboți industriali sunt extrem de variate și nu pot fi încadrate în categorii clar delimitate, însă toate împărtășesc caracteristicile fundamentale ale uneltelor digitale: operare programată, precizie și suprapunere de criterii. Majoritatea acestor aplicații sunt dezvoltate în cadrul proiectelor de cercetare ce urmăresc descoperirea unor utilizări potențiale ale roboților în arhitectură.

Proiectele explorează principii constructive specifice edificării, de la asamblarea modulară, până la turnare sau prelucrarea precisă a unităților ce compun un obiect de arhitectură. Se remarcă un interes pentru tehnicile și materialele tradiționale de construcție, combinate însă cu abilitățile roboților industriali. Astfel, se lucrează cu piatră, cărămidă, lut, lemn sau tije de oțel, care sunt prelucrate în elemente mereu diferite, explorând potențialul uneltelor cu control numeric și capacitatea lor de a produce elemente unice.

Prin reprogramare și prin schimbarea end-efectorilor, roboții pot fi folosiți într-o varietate mare de moduri: în procese de debitare, asamblare, imprimare 3D, modelare și altele, lista rămânând deschisă. Atunci când în sistemul de fabricație sunt integrați și senzori, se realizează legături între mediul fizic și cel virtual, care influențează comportamentul robotului pe durata procesului de fabricație. În astfel de contexte, roboții sunt exploatați ca unelte adaptabile, în care obiectul final nu este complet previzionat, ci ia formă ca rezultat al unui proces de feedback continuu.

Roboții industriali sunt utilizați și în aplicații care au ca rezultat obiecte de design, unde end-efectorul poate funcționa ca un printer 3D la scară mai mare. Interes prezintă și sistemele de fabricație ce implică mai mulți roboți, pentru procese foarte variabile, dar precise. În aceste cazuri, mișcările roboților sunt coordonate cu precizie, permițând realizarea unor sarcini diferite, dar corelate între ele.

R-O-B Structural Oscillations, Gramazio & Kohler, 2007-2008, Bienala de Arhitectură de la Veneția

Cuvinte cheie: fabricație aditivă, pick_and_place, material tradițional, fabricație in situ, scară arhitecturală

Unitatea de fabricație mobilă ROB reprezintă o metodă de construcție de precizie, la scară arhitecturală, realizată *in situ*. Aceasta combină avantajele prefabricării, precizia și consistența execuției, cu beneficiile producției pe șantier, evitând problemele legate de logistică și transport. Robotul este integrat într-un container și poate glisa pe o șină de-a lungul acestuia. ROB nu este limitat la un singur proces de fabricație sau la un anumit material de construcție; prin înlocuirea end-efectorului, adaptarea codului de control și schimbarea materialului, poate fi utilizat într-o varietate de moduri.

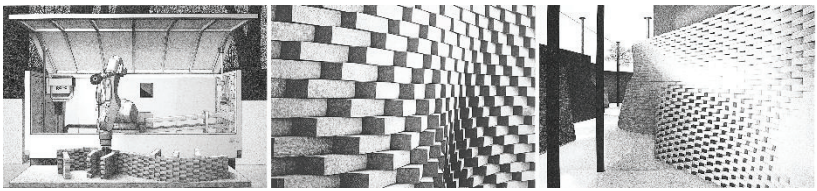


Figura 46. *R-O-B Structural Oscillations*, Gramazio & Kohler, 2007-2008, instalație, Bienala de Arhitectură de la Veneția (Gramazio și Kohler 2007). Ilustrație realizată de autor.

Întrucât arhitectura se bazează, în mare măsură, pe adăugarea de unități sau pe agregarea de materiale, acest lucru favorizează aplicarea fabricației digitale aditive de tip *pick-and-place*. Această metodă de construcție depășește paradigma proiectării exclusiv a suprafețelor: prin stabilirea acumulării de material exact în punctele unde este necesar, devine posibilă conceperea simultană a formei, structurii și funcțiunii. Utilizarea robotului industrial în procesul de asamblare permite transpunerea acestui principiu aditiv la scară arhitecturală (Gramazio și Kohler 2008, 9).

Unitatea de fabricație mobilă a fost folosită pentru a construi instalația ce a reprezentat Elveția la Bienala de Arhitectură de la Veneția din 2008. S-a realizat un zid de cărămidă cu lungimea de 100 de metri, conceput ca o panglică continuă care se împletește printre elementele moderniste ale pavilionului construit în 1951 de arhitectul elvețian Bruno Giacometti.

Zidul a fost conceput ca un sistem cu parametri deschiși, capabil să se adapteze contextului, și a presupus asamblarea a 14.961 de cărămizi rotite. Geometria a fost subdivizată în ansambluri cu lungimea de patru metri, astfel încât ROB să le poată fabrica. Forma a fost determinată de cerința constructivă ca fiecare secțiune realizată să fie stabilă: fiecare curbură din straturile inferioare a fost echilibrată de o contra-curbură în straturile superioare. Rotația cărămizilor a fost determinată în funcție de gradul de concavitate, astfel încât, cu cât concavitatea era mai pronunțată, cu atât rotația era mai mare. Această strategie a accentuat maleabilitatea plastică a peretelui, conferindu-i un caracter aproape textil, în contrast cu stabilitatea pereților de cărămidă urmărită în mod tradițional.

Robotic Clay Molding, Gramazio & Kohler, 2012, Barcelona

Cuvinte cheie: fabricație prin modelare, subcomponente, material tradițional

Modurile eficiente de producție a structurilor complexe din beton sunt în continuare limitate, chiar dacă generarea acestor forme în mediul virtual este relativ ușoară.

Fabricarea structurilor complexe din beton presupune adesea realizarea unor cofraje personalizate pentru fiecare element, ceea ce face procesul costisitor și consumator de timp. Din acest motiv, se caută alternative economice de producere a cofrajelor care să poată fi utilizate în construcția structurilor complexe din beton.

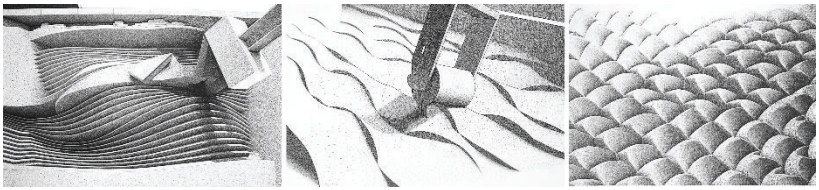


Figura 47. *Robotic Clay Molding*, Gramazio & Kohler, 2012, workshop, Barcelona (Gramazio și Kohler 2012b). Ilustrație realizată de autor.

Workshopul *Robotic Clay Molding* a investigat utilizarea lutului ca material de cofrare reutilizabil, cu scopul de a fabrica elemente de construcție unice din beton, reducând la minimum deșeurile generate de cofraje. Cercetarea a explorat diferite modalități de obținere a formei prin utilizarea unor unelte variate, adaptate proprietăților materialului. Au fost folosiți end-efectori pentru amprentare, sculptare și tasare. După realizarea cofrajelor

din lut, au fost turnate panouri din beton pentru a testa și evalua strategiile de proiectare la scara 1:1 (Gramazio și Kohler 2012b).

Prin această aplicație se demonstrează că materialele utilizate în procesele tradiționale meșteșugărești pot reveni în prim-plan, căpătând o interpretare contemporană. Lutul a fost ales datorită proprietăților sale, este maleabil și potrivit pentru modelare fără aplicarea unor forțe mari. Astfel, după utilizarea pentru un element, poate fi ușor remodelat pentru realizarea altor componente diferite.

Landesgartenschau Exhibition Hall, ICD/ITKE/IIGS, 2014, Schwäbisch Gmünd

Cuvinte cheie: fabricație prin frezare, transformarea unui proces specific construcției, articulație structurală

Proiectul investighează aplicarea fabricației robotice la scară arhitecturală, utilizând lemnul și tehnicile de chertare. Geometria pavilionului este generată din panouri planare de placaj cu grosimea de 5 cm. Coaja ușoară din lemn îndeplinește simultan rolul de structură portantă și de anvelopantă, transmiterea sarcinilor structurale fiind optimizată prin articulații în zig-zag, fabricate robotic.

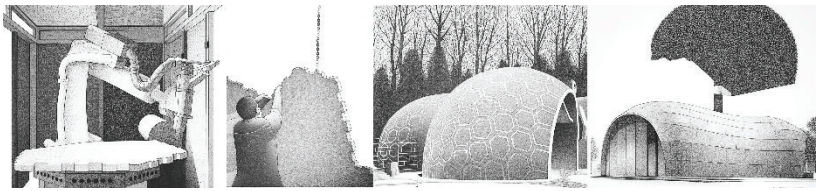


Figura 48. *Landesgartenschau Exhibition Hall*, ICD/ITKE/IIGS University Stuttgart, 2014, Schwäbisch Gmünd (ICD et al. 2014). Ilustrație realizată de autor.

Procesul de generare formală a corelat parametri legați de performanța structurală cu capacitățile robotului. Astfel, dimensiunile și geometria panourilor au fost rezultatul unui proces de căutare formală prin simulare și optimizare, modificând forma clădirii până la atingerea tuturor criteriilor de performanță. Datorită acestui proces digital a putut fi realizată construcția din elemente de suprafață care sprijină unele pe celelalte pe o zonă minimă de contact, pe cantul chertat.

Coaja structurală rămâne către interior, iar către exterior se adaugă straturile de hidroizolație și confort termic. Coaja exterioară este alcătuită din panouri de lemn care urmează forma clădirii și care, de această dată, sunt montate cu nut între ele pentru a permite ventilarea. Proiectul constituie un exemplu al abordării bottom-up, pornind de la principiul de articulare care a generat conceptul arhitectural și forma finală.

Auto-Eclipsis, SCI-ARC, 2010

Cuvinte cheie: fabricație de precizie

Eclipsis este o fațadă realizată pentru Lumenhouse, proiect câștigător al competiției Solar Decathlon din 2010. Această cercetare explorează potențialul fabricării robotice pentru sisteme de umbrire. Geometria fațadei este generată algoritmic, ținând cont de gradele diferite de intimitate, precum și de criteriile de performanță ale contextului, inclusiv iluminarea și ventilația. Fațada este compusă din panouri de tablă cu găuri rotunde tăiate la laser, fiecare panou având în plus două puncte de prindere.

În funcție de geometria rezultată după aplicarea criteriilor de performanță, fiecare semi-perforație trebuie înclinată la un anumit unghi, proces realizat de un robot industrial. Această înclinare a fost determinată prin analize și simulări, pentru a asigura un comportament variabil al sistemului de umbrire de-a lungul zilei, în funcție de poziția soarelui.

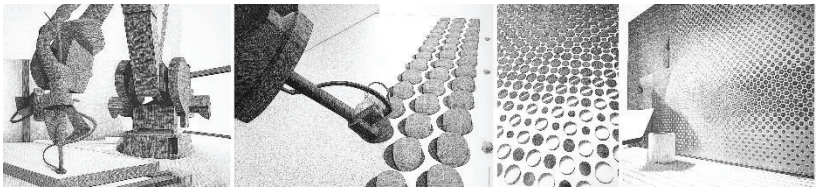


Figura 49. *Auto-Eclipsis, SCI-ARC*, proiect la Solar Decatlon, 2010 (King și Grinham 2012). Ilustrație realizată de autor.

Robotul este utilizat ca o unealtă de mare precizie, capabilă să realizeze unghiuri foarte variate, esențiale pentru asigurarea unui comportament energetic eficient. În contextul construcțiilor sustenabile, acestea pot fi rezultatul unui proces digital care corelează datele fizice și pot fi construite folosind unelte de fabricație digitală. Astfel, geometria variabilă obținută

prin calcule și simulări nu mai este compromisă de limitările impuse de metodele de construcție.

ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14, Stuttgart

Cuvinte cheie: fabricație prin țesere, end-efectori ajustabili, material nou

Cercetarea pentru construirea pavilionului a urmărit dezvoltarea unei tehnici de țesere pentru realizarea unei structuri modulare. Obiectivul a fost crearea unui sistem robotic capabil să producă componente variate, utilizând fibre impregnate cu rășină. Această abordare permite reducerea la minimum a cofrajului, menținând totodată un grad ridicat de libertate geometrică. Fibra de sticlă și fibra de carbon combinate cu rășini pe bază de polimeri au fost alese drept materiale de construcție datorită raportului ridicat rezistență-greutate și potențialului de a genera un material cu proprietăți diferențiate, în funcție de densitatea fibrelor.

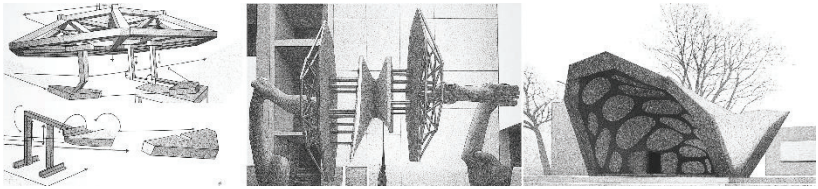


Figura 50. *ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14*, 2014, Stuttgart (Menges și Knippers 2013). Ilustrație realizată de autor.

Metodele convenționale de fabricare a elementelor compozite din fibre necesită utilizarea unei matrițe pentru definirea formei, ceea ce ar fi implicat pierderi semnificative în cazul unui număr mare de componente diferite. Pentru producerea modulelor unice cu dublă curbură, a fost dezvoltată o aplicație de țesere care utilizează doi roboți industriali ce înfășoară fibrele între două cadre de oțel fixate pe roboți. End-efectorii sunt ajustabili în funcție de geometria componentelor, permițând utilizarea unui singur tip de cadru reconfigurabil pentru toate cele 36 de elemente.

Clouds of Venice, Supermanoeuvre & Matter Design, 2012, Bienala de Arhitectură de la Veneția

Cuvinte cheie: fabricație prin pliere, rigidizare

Instalația explorează realizarea unui ansamblu volumetric difuz, obținut prin asamblarea componentelor spațiale realizate din tije de oțel îndoite.

Rezultatul este o rețea spațială deformabilă, construită din 1000 de componente unice.

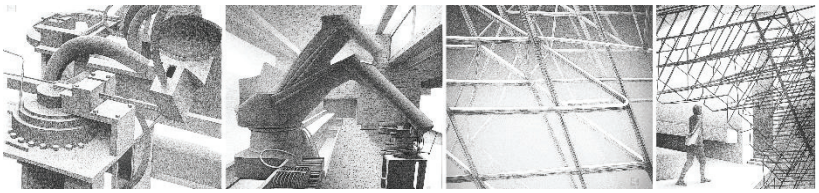


Figura 51. *Clouds of Venice*, Supermanoeuvre & Matter Design, 2012 instalație în cadrul Bienalei de Arhitectură de la Veneția (Supermanoeuvre și Matter Design, f.a.). Ilustrație realizată de autor.

Metoda de fabricație investighează modul de generare a componentelor spațiale pornind de la un material unidimensional; prin agregare și variația geometriei se obțin efecte volumetrice complexe.

Un mecanism special a fost dezvoltat pentru îndoirea firelor de oțel, iar robotul controlează unghiul, planul și distanța de îndoire. Pentru buna funcționare, sistemul necesită o coordonare precisă între mișcările robotului și cele ale mașinii de îndoit. Procesul reprezintă o adaptare a tehnicilor de îndoire a tuburilor utilizate în producția industrială, transformând un procedeu standard într-un proces flexibil prin integrarea unui robot industrial.

Periscope: Foam Tower, Matter Design, 2010

Cuvinte cheie: fabricație prin tăiere cu fir încins, material reciclabil, fabricație rapidă

Periscope este un proiect de arhitectură temporară cu rol de semnal. Turnul, înalt de 15 m, este construit din blocuri de spumă de polistiren, tăiate robotic, stivuite și fixate prin compresie cu cabluri, care echilibrează instalația împotriva forțelor vântului și o conectează la o fundație grea de stabilizare. În acest caz, economia de timp la producție, montaj și material a fost definitorie. Procesul de fabricație a fost eficient și a permis realizarea rapidă a secțiunilor succesive, care au fost apoi asamblate cu ușurință.

Se poate observa că arhitectura și construcția contemporană s-au concentrat în mare parte pe procese bidimensionale. Uneltele computaționale au încurajat lucrul cu suprafețele, prin principiile lor de

calcul și prin dezvoltarea de software care permite modelarea rapidă a suprafețelor. În consecință, s-au dezvoltat metode eficiente de subdivizare, desfășurare și aranjare a elementelor de suprafață pe plăci. În paralel, metodele de fabricație digitală au stimulat prelucrarea materialelor bidimensionale, prin proliferarea echipamentelor precum laserele și routerele, capabile să taie rapid în două dimensiuni.

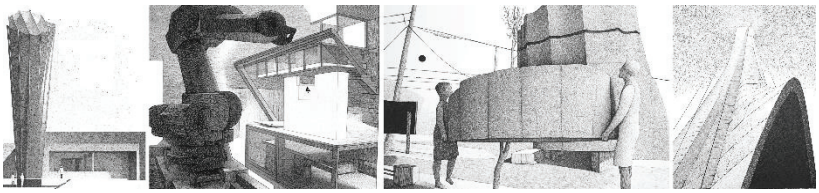


Figura 52. *Periscope: Foam Tower*, Matter Design, instalație, 2010 (Matter Design 2010). Ilustrație realizată de autor.

În prezent, se caută metode de lucru cu materiale volumetrice în construcții, ca alternativă la materialele bidimensionale. Polistirenul a fost utilizat pentru realizarea matrițelor în industria construcțiilor pentru că este un material ieftin, reciclabil, are o greutate mică și este ușor de modelat. Pentru suprafețele cu dublă curbură, polistirenul este frezat cu ajutorul routerelor CNC de mari dimensiuni, însă timpul necesar modelării rămâne foarte mare. Orele de mașinare pot fi reduse prin compromisuri asupra texturii suprafeței, însă, dacă polistirenul este folosit ca matriță, această economie se traduce prin creșterea timpului de finisare a piesei finale. Odată realizată, o matriță trebuie reutilizată de mai multe ori pentru a justifica efortul de producție, ceea ce recomandă procesul pentru fabricarea unui număr mai mare de copii.

Polistirenul poate fi, de asemenea, prelucrat prin tăiere cu fir încins, un proces mult mai rapid. Utilizarea unui robot industrial face ca această metodă să devină extrem de flexibilă, permițând obținerea de suprafețe fine, cu geometrie variabilă, într-un timp scurt (McGee et al. 2012, 63-65). Totuși, tăierea cu fir încins nu permite realizarea suprafețelor cu dublă curbură, fiind, din punct de vedere geometric, mai limitativă decât frezarea CNC. Procesul de substracție volumetrică seamănă, în principiu, cu prelucrarea pietrei folosind fir abraziv. Chiar dacă materialul utilizat este relativ ieftin, aceste experimente de fabricație volumetrică deschid calea

dezvoltării unor aplicații capabile să prelucreze materiale mai nobile, precum piatra.

Passion Facade, Mark Burry, 2010, Bacelona, Spania

Cuvinte cheie: fabricație frezare abrazivă,

Proiectul lui Gaudí pentru fațada Patimilor a fost documentat sub forma unei fotografii realizate după un desen foarte elaborat. Registrul inferior a fost construit în 1978, în timp ce partea superioară se află încă în curs de realizare. Din imagine, forma coloanelor pare organică, însă analiza procesului de generare a formei conceput de Gaudí a evidențiat că acestea erau rezultatul unor reguli matematice. Geometria celor 18 coloane a fost determinată prin aplicarea principiilor de intersecții și substracții volumetrice, inspirate de procesul de proiectare al arhitectului. Astfel, a fost realizat un model parametric care intersecta un hiperboloid de rotație cu opt paraboloizi hiperbolici, obținându-se același principiu de generare pentru toate coloanele, chiar dacă sunt diferite (Burry 2012, 55).

Procesul de realizare a acestei colonade a explorat posibilitățile de fabricație digitală disponibile și le-a combinat cu experiența acumulată pe parcursul construcției. Inițial, a fost realizată o machetă la scara 1:25 a fațadei prin prototipare rapidă, folosind printarea 3D. Ulterior, au fost realizate, la scară reală, trei coloane diferite, printr-o tehnologie cu control numeric utilizată anterior la construirea bărcilor. În acest mod au fost fabricate matrițe din polistiren, acoperite cu fibră de sticlă impregnată cu rășini, pentru a testa validitatea designului și a principiilor de construcție ce urmau să fie aplicate coloanelor finale (Burry 2012, 56).

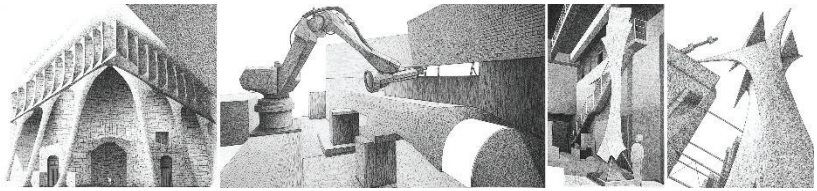


Figura 53. Fabricarea fațadei Patimilor de la *Sagrada Familia*, Mark Burry, 2010 (Burry 2012, 48,53,54). Ilustrație realizată de autor.

Pentru prelucrarea coloanelor din piatră, Jordi Barbany, maestrul pietrar responsabil cu realizarea acestora, a dezvoltat un sistem de fabricație cu control numeric flexibil, care permite frezarea coloanelor diferite. Astfel,

prin utilizarea unui robot industrial ce culisează pe o șină, dotat cu un disc diamantat ca end-efector, se pot modela, într-un singur proces de fabricație, secțiuni din coloanele de granit fixate pe un ax rotativ. În mod obișnuit, piatra este tăiată cu fir abraziv, proces care generează suprafețe plane, însă discul diamantat funcționează ca o freză și permite realizarea suprafețelor cu dublă curbură. Folosind această celulă robotică, care acceptă variația geometrică, pot fi realizate cele nouă perechi de coloane diferite.

Construirea colonadei combină procesul de căutare formală fizică al lui Gaudí cu experiența specialiștilor în material, abilitățile mediului computațional și capacitățile uneltelor de fabricație.

Freemolding, Yaron Elyasi, 2013

Cuvinte cheie: fabricație extrudare plastic

În domeniul designului de produs, fabricația se baza pe existența unui prototip, care servea drept model pentru realizarea unei matrițe, utilizată ulterior pentru producerea obiectelor în serie. Plasticul reprezintă unul dintre materialele cele mai frecvent utilizate în acest domeniu, procesul de injectare fiind metoda predominantă de fabricație.



Figura 54. *Freemolding*, Yaron Elyasi, design de obiect, 2013 (Yaron Elyasi 2013). Ilustrație realizată de autor.

Designerul Yaron Elyasi a explorat metode alternative de obținere a obiectelor din mase plastice, căutând soluții diferite de producția prin injectare. Inițial, a utilizat un sistem de extrudare care topea plastic reciclat, combinat cu o matriță rotită manual sub jetul de material, proces pe care l-a patentat sub denumirea de *freemolding*. În această variantă, plasticul se depunea aleatoriu pe matriță, iar rezultatul era influențat de mișcările artistului.

Odată cu introducerea robotului industrial în proces, mișcările au devenit controlate, iar geometria obiectelor a putut fi proiectată, astfel încât rezultatul să fie anticipat. Un avantaj al acestei metode aplicate în design constă în posibilitatea de a obține obiecte personalizate, adaptate preferințelor utilizatorilor.

Endless furniture design, Dirk Van der Kooij, 2010

Cuvinte cheie: fabricație extrudare plastic

Designerul Dirk Van der Kooij a utilizat un robot industrial reutilizat din mediul industrial, echipat cu un end-efector capabil să extrudeze granule de plastic. Robotul a fost folosit ca o imprimantă 3D cu rezoluție redusă, permițând realizarea de mobilier din materiale reciclate, provenite de la frigidere uzate.

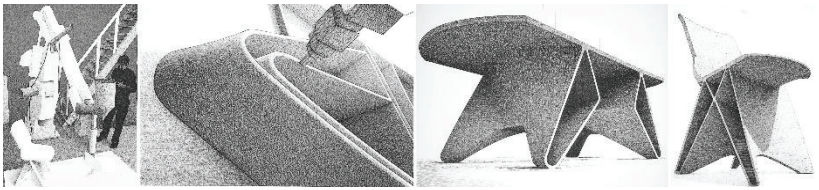


Figura 55. *Endless*, Dirk Van der Kooij, design de obiect, 2010 (Kooij 2010). Ilustrație realizată de autor.

Designerul intervine activ și în procesul de fabricație prin alegerea culorilor granulelor pe măsură ce plasticul este depus, astfel încât procesul nu este în întregime programat. Utilizarea unui robot industrial într-un proces aditiv permite realizare de obiecte la o scară mai mare, iar rezoluția redusă asigură un proces relativ rapid. Obiectele rezultate reflectă atât urmele metodei de materializare controlată digital, în straturi succesive, cât și tranzițiile subtile de culoare generate de intervenția spontană a designerului pe parcursul fabricației.

MX3D-Metal Printing, Joris Laarman, 2014

Cuvinte cheie: fabricație adiție metal

O altă aplicație care explorează printarea 3D cu roboți industriali este *MX3D-Metal Printing*. De această dată, procesul de printare se realizează prin sudură. Datorită faptului că roboții sunt unelte precise, capabile să se orienteze la unghiuri variabile în spațiu, sudura reprezintă domeniul în care

aceștia sunt cel mai frecvent utilizați. Designerul Joris Laarman folosește astfel un braț robotic echipat cu un end-efector asemănător unui aparat de sudură, pentru a topi și a depune metalul. Aplicația este de apreciat prin posibilitatea de a realiza geometrii complexe fără a recurge la suport, ceea ce se datorează atât procesului de depunere, cât și materialului folosit.

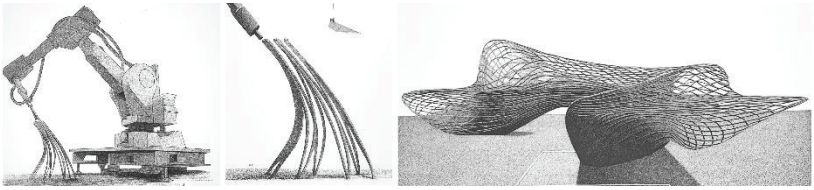


Figura 56. *MX3D-Metal Printing*, Joris Laarman, proiect de cercetare, 2014 (Laarman 2014b). Ilustrație realizată de autor.

Metoda *MX3D-Metal Printing* este similară imprimării 3D tradiționale, însă utilizează metalul ca material, fiind compatibilă cu oțel, aluminiu, bronz sau cupru. Prin adăugarea controlată a cantităților mici de metal topit, se construiesc structuri filiforme suspendate în aer. Această tehnologie permite realizarea structurilor în direcții orizontale, verticale sau curbe, fără a fi nevoie de structură de sprijin.

Datorită proprietăților metalelor, imprimarea MX3D poate genera structuri portante, obținute prin intersectarea firelor, cu consum redus de material și fără reziduuri, eliminând necesitatea straturilor suport sau a matrițelor. Procedeul se diferențiază astfel de depunerea aditivă obișnuită, bazându-se pe o depunere punctuală și controlată a materialului.

ARUM, ZHA, consultant pentru fabricație RoboFold, 2012, instalație în cadrul Bienalei de Arhitectură de la Veneția,

Cuvinte cheie: fabricație multi_robots, curve folding

Aplicațiile care implică mai mulți roboți industriali reprezintă un domeniu care începe să fie explorat. Sistemele *multi-robots* oferă mai multe grade de libertate, ceea ce permite aplicarea unui singur principiu de fabricație pentru realizarea obiectelor diferite. În cazul celulelor care integrează mai mulți roboți, coordonarea mișcărilor este complexă, însă rezultă un sistem de fabricație precis și sincronizat, capabil să producă elemente cu geometrie complexă și variabilă prin același proces.



Figura 57. *ARUM*, Zaha Hadid Architects, consultant pentru fabricație RoboFold, 2012, instalație în cadrul Bienalei de Arhitectură de la Veneția (Zaha Hadid Architects și RoboFold 2012). Ilustrație realizată de autor.

Cercetarea RoboFold s-a concentrat pe generarea structurilor volumetrice pornind de la materiale bidimensionale, de la hârtie până la tablă plană. Procesul derivă din metoda tradițională origami, însă plierea se realizează după linii curbe. Pentru definirea curbelor de pliere și pentru integrarea componentelor între ele, au dezvoltat un proces patentat, numit *curve folding*. Acesta realizează un calcul automat generând pentru fiecare component geometria, curbele și unghiul de pliere. Pentru a transforma geometria digitală în realitate, componentele trebuie pliate cu precizie la diferite unghiuri, lucru realizat într-o celulă de fabricație cu doi roboți, care au pliat componentele diferite din tablă.

RoboFold a fost consultantul pentru fabricație pentru realizarea instalației ARUM. Rolul său a fost să adapteze procesul de lucru *curve folding*, pentru softul folosit de ZHA, care ulterior și-a dezvoltat propria geometrie. Cele 488 de componente diferite au fost pliate cu ajutorul a doi roboți și fixate prin nituri, formând o structură rigidă în formă de pâlnie.

Stratifications, Gramazio & Kohler, 2011, Londra

Cuvinte cheie: fabricație pick_and_place, senzori pentru feedback, rezultat parțial nedeterminat

Roboții sunt apreciați în industrie pentru calități tipice mașinilor: disponibilitate neobosită, predictibilitate, fiabilitate, precizie și rezistență în medii ostile. Totuși, ei nu posedă încă mai multe capacități importante care sunt caracteristice oamenilor, precum abilitatea de a reacționa la situații neprevăzute sau la medii în schimbare și de a-și îmbunătăți performanța pe baza experienței anterioare (Ayres și Miller 1981, 1).

Din rațiuni de eficiență, roboții au fost utilizați în medii industriale foarte structurate, unde variabilitatea și deciziile pot fi anticipate și programate.

În cercetarea avansată, însă, roboții industriali au dobândit abilități similare simțurilor umane, precum vederea și atingerea, prin dotarea cu senzori. Aceștia devin astfel oarecum sensibili la contextul lor și câștigă o abilitate limitată de a-și modifica comportamentul în funcție de intrările de la senzori. Pentru a interacționa cu spațiul real, robotul se poate folosi de senzori pentru a înregistra împrejurimile sale și poate evalua situația. Robotul conectează astfel lumea logică imaterială, cu cea de construcție materială în modul cel mai direct.

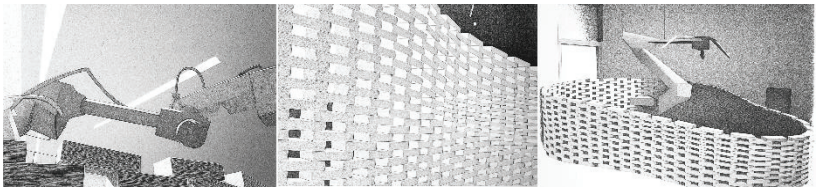


Figura 58. *Stratifications*, Gramazio & Kohler, 2011, instalație în cadrul FABRICATE 2011, Londra (Gramazio și Kohler 2011b). Ilustrație realizată de autor.

Instalația *Stratifications* a fost prezentată în cadrul conferinței FABRICATE 2011, organizată de UCL London. Proiectul utilizează un robot industrial care suprapune, prin fabricație de tip *pick-and-place*, unități din lemn de dimensiuni variate, generând un ansamblu complex, al cărui rezultat nu este determinat complet prin simulare, ci evoluează pe măsură ce are loc asamblarea.

Sistemul de fabricație demonstrează capacități de adaptare: după plasarea fiecărui strat, robotul folosește un scaner pentru a-și ajusta pașii următori în procesul de asamblare. Astfel, se creează un feedback continuu între modelul construit și procesul de generare. Strategia de asamblare se adaptează la forma reală obținută printr-un proces de sondare în stadii intermediare. Se evidențiază astfel potențialul adaptiv al uneltei, care promovează o strategie evolutivă în locul materializării unor forme predefinite.

Procedural Landscapes, Gramazio & Kohler, 2011, Londra

Cuvinte cheie: fabricație aditivă, rezultat parțial nedeterminat

Procedural Landscapes este un proiect dezvoltat pe parcursul unui curs opțional, care testează utilizarea materialelor accesibile pentru cofraje de

beton reutilizabile. Studiul nu s-a concentrat doar pe materializare, ci și pe generarea formală: obiectivul principal a fost analiza și documentarea proprietăților specifice ale materialelor și proceselor de agregare, mai degrabă decât realizarea unei forme predefinite.

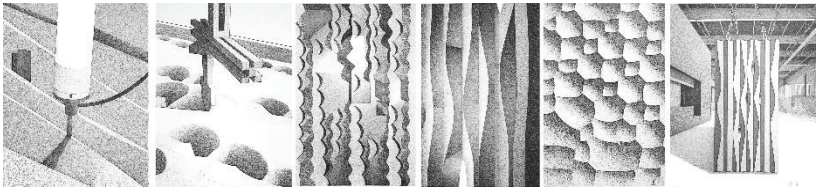


Figura 59. *Procedural Landscapes 2*, Gramazio & Kohler, 2011, curs opțional la ETZ Zurich (Gramazio și Kohler 2011a). Ilustrație realizată de autor.

Se pune accent pe modul în care uneltele precise și programabile pot lucra cu logica intrinsecă a materialului, în acest caz nisipul. Astfel se programează modul în care se deplasează robotul și utilizarea mai multor end-efectori. Rezultatul final nu este complet predeterminat: se proiectează logica de fabricație, însă forma nu este previzualizată într-un model virtual.

4.5. Aplicații viitoare ale uneltelor de fabricație

Pe lângă utilizarea tehnologiilor de fabricație în producția de obiecte de design sau la scară arhitecturală, se remarcă o preocupare constantă pentru dezvoltarea viitoare a uneltelor de fabricație digitală. În mediul academic și profesional sunt investigate modalități prin care aceste tehnologii pot deveni adaptate și integrate practicii de arhitectură.

Fabricația digitală este privită nu doar ca mijloc de generare a unor geometrii complexe, ci ca oportunitate de a dezvolta unelte și procese proprii domeniului arhitectural. Cercetările actuale urmăresc explorarea materialului și a proceselor de materializare, investigând comportamente emergente ale materiei și posibilitatea de a crea mecanisme flexibile, capabile să combine programarea și previziunea cu procese dinamice, mai puțin controlate, mai autonome.

Un accent important se pune pe dezvoltarea unor sisteme de fabricație personalizate, concepute pentru scenarii specifice și capabile să *opereze in situ*. Astfel de mecanisme pot deveni mai viabile pentru practica

arhitecturală decât procedeele industriale standard, care sunt orientate spre producția de masă și presupun o separare clară între proiectare și execuție.

Proiectele actuale de cercetare investighează natura emergentă a modelelor computaționale descentralizate și capacitatea acestora de a funcționa ca sisteme relaționate, inspirate adesea de procesele de auto-organizare din natură. Astfel de propuneri se bazează pe un proces dinamic și adaptiv, capabil să reacționeze la condițiile de mediu și să genereze forme care se adaptează specificului (Male-Alemany et al. 2011, 39).

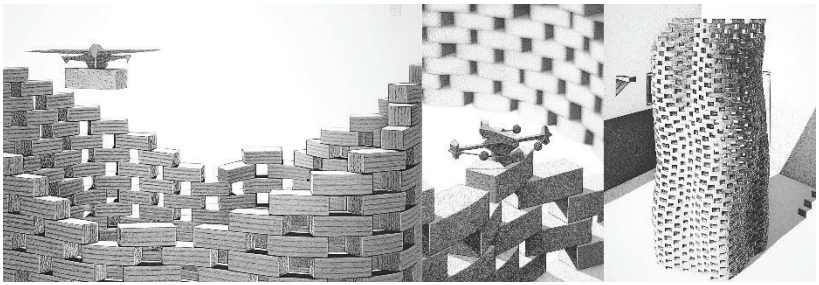


Figura 60. Flight Assembled Architecture, Gramazio & Kohler și Raffaello D'Andrea, 2011-2012, instalație la FRAC Centre Orléans (Gramazio și Kohler 2012a). Ilustrație realizată de autor.

O referință relevantă pentru principiul auto-organizării este instalația *Flight Assembled Architecture*, dezvoltată de Gramazio & Kohler împreună cu Raffaello D'Andrea. Prototipul explorează un mod vizionar de construcție robotică, folosind peste 1.500 de module asamblate de mici drone zburătoare, programate să colaboreze prin algoritmi matematici care traduc datele de design digital în comportamente de zbor. Procesul de construcție este coordonat de un sistem *multi-agent*[21], în care algoritmul interpretează modelul 3D al ansamblului, stabilește poziția fiecărei unități și secvența de montaj, iar roboții de asamblare se sincronizează printr-un

[21] Sistemele *multi-agent* sau *swarm*, sunt sisteme inteligente cu un comportament colectiv și descentralizat, care se autoorganizează. Agenții urmează reguli simple, și, deși nu există nici o structură de control centralizată, interacțiunea dintre agenți duce la apariția unui comportament global emergent. Aceste sisteme sunt inspirate din natură, de la stolurile de păsări sau bancurile de pești.

sistem de feedback care urmărește progresul lucrării. Comportamentul lor este unul dinamic și interdependent, incluzând mecanisme de evitare a coliziunilor și adaptare la stadiul construcției.

Arhitecții explorează de mai mult timp utilizarea tehnologiilor digitale pentru proiectarea și asamblarea structurilor, însă metodele de fabricație sunt adesea limitate de spații de lucru predefinite, care constrâng dimensiunea și geometria elementelor. Dimpotrivă, aparatele de zbor depășesc aceste limite, acționând pe suprafețe mai extinse decât dimensiunea mașinii în sine și făcând posibilă intervenția directă asupra structurii la scară 1:1 (Federico Augugliaro et al. 2014, 46-64). Totuși, sistemul ilustrat rămâne orientat către asamblarea unor unități discrete, ceea ce presupune în continuare o proiectare atentă a subdivizării ansamblului și a detaliilor de fabricație, asamblare și articulare.

Dezvoltarea acestor sisteme de asamblare emergente favorizează un comportament capabil să se adapteze în mod natural la condițiile locale. Într-un astfel de cadru, programarea se concentrează mai degrabă pe definirea regulilor de comportament ale agenților decât pe controlul strict al rezultatului. Obiectul realizat nu mai poate fi în întregime previzionat, ci devine produsul unei interacțiuni dinamice între parametri, context și comportamentul colectiv al sistemului. Această lipsă de control direct asupra formei finale deschide noi perspective și aduce provocarea de a transpune în cod acele aspecte sensibile, greu cuantificabile, care până acum țineau de intuiția și experiența proiectării arhitecturale.

Toate aceste proiecte de cercetarea nu au o aplicabilitate imediată, dar investighează noile posibilități pe care le deschid uneltele digitale. Se pune accent pe adaptarea acestora practicii de arhitectură. De asemenea se încearcă dezvoltarea de sisteme de fabricație flexibile și adaptabile, la scară arhitecturală, pentru construcția *in situ.*

Capitol 5.

EXPLORĂRI PROPRII ÎN DOMENIUL FABRICAȚIEI DIGITALE

5. EXPLORĂRI PROPRII ÎN DOMENIUL FABRICAȚIEI DIGITALE

În acest capitol sunt prezentate abordările personale ale autorului în contact cu proiecte ce implică fabricația digitală, privite atât ca exerciții de înțelegere a uneltelor, cât și ca oportunități de explorare creativă. Testarea capacităților acestora se realizează prin trei metode de lucru: (1) workshop-uri, ca dezvoltare a unei teme date, dar fără un rezultat prestabilit, pentru a încuraja experimentarea; (2) obiecte de design, ca interpretări personale ale unor idei sau contexte; și (3) fabricația robotică, ca formă de cercetare exploratorie orientată spre aplicații viitoare.

5.1. Workshop-uri

Ca parte a cercetării, workshop-urile constituie metode care îmbină abordarea personală asupra mediului computațional și a fabricației digitale cu interacțiunea directă cu un grup de studiu.

Workshop-urile pe care le-am dezvoltat împreună cu Ionuț Anton sunt rezultatul unei cercetări îndelungate, în cadrul căreia împărtășim din experiența acumulată, iar participanții se confruntă cu realitatea transpunerii în practică a unor cunoștințe adesea abstracte. Scopul lor este de a demonstra posibilitatea dezvoltării unor proiecte parametrice sau algoritmice, cu rezultate orientate intenționat către fabricația digitală.

Deși tema și uneltele utilizate sunt clar definite, workshop-urile nu au un rezultat prestabilit. Prin folosirea resurselor puse la dispoziție, participanții au ocazia de a explora și de a-și testa propria viziune, astfel încât prototipurile obținute devin interpretări personale distincte. În acest sens, workshop-urile funcționează ca exerciții de cercetare prin proiect, care investighează modul în care noile unelte digitale pot fi integrate în practica de arhitectură.

Aceste căutări depășesc simpla generare a unei noi expresii arhitecturale sau dependența de unelte digitale, orientându-se spre esență: cercetarea modului în care gândim și producem arhitectura și designul prin intermediul tehnologiilor digitale.

5.1.1. COMPONENT_BUILD

14-16 iunie 2013
Tutori: Daniela Anton, Ionuț Anton
Participanți workshop: Ioana Anton, Adina Stanică, Mădălina Rădulescu, Simona Năstăsoiu, Carmen Tănase, Ileana Săvescu, Oana Truşcă, Anamaria Vâlcoreanu.

Conceptul workshop-ului COMPONENT_BUILD pornește de la investigarea principiului arhitecturii de a construi din componente. În mod obișnuit, din motive de economie a construcției, elementele din care era compusă o clădire erau identice. Astăzi, arhitecții pot lucra cu componente de construcție care sunt fiecare unice și diferite de celelalte, dar produse prin același proces tehnologic. Avem, așadar, elemente diferite, dar în același timp similare.Forma arhitecturală nu mai este constrânsă la serialitate, ci poate include variabilitatea componentelor, generând diferențiere la nivelul ansamblului.

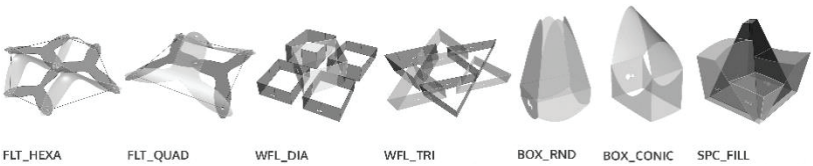


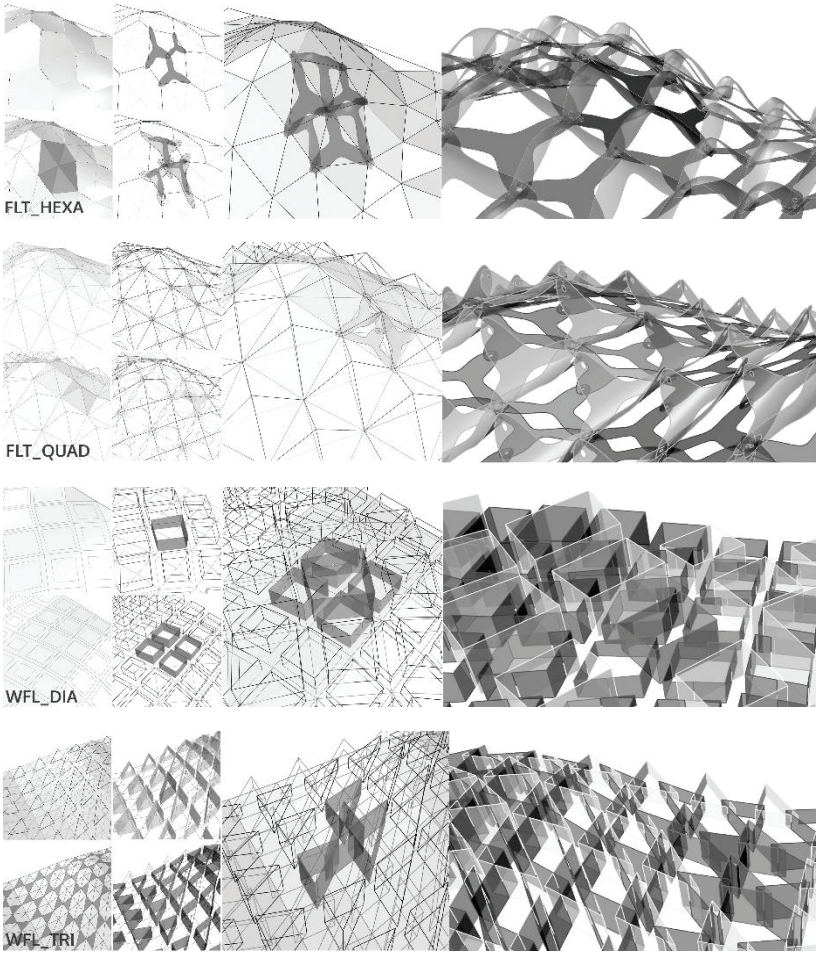
Figura 61. COMPONENT_BUILD, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, geometria componentelor

În acest context, tema workshop-ului a indicat câteva aspecte comune ce urmau să fie incluse în fiecare soluție. Intenția declarată a fost aceea de a implica materialul și metoda de fabricație în procesul de concepție. Considerând ca date de temă materiale bidimensionale, sub formă de plăci, și fabricația în două dimensiuni, debitarea cu laser, am propus realizarea de componente volumetrice. Au fost explorate astfel procedee de pliere și de tensionare.

Faptul că toate componentele erau diferite a condus la necesitatea dezvoltării unor strategii care să permită articularea lor precisă. A fost nevoie de corelarea parametrilor care generau diversitate cu cei ce descriau constrângerile de suprapunere pentru articulare. De asemenea a necesară identificarea unității, adesea compusă din subcomponente. În urma acestui proces, au fost realizate șapte soluții, fiecare cu componente volumetrice diferite și trei metode distincte de articulație.

Proces. Căutare formală.

Workshop-ul a propus participanților dezvoltarea unor proiecte pornind de la modelarea parametrică a unui element capabil să populeze o suprafață. Obiectivul a fost ca, prin adaptarea locală a geometriei componentelor, să se obțină o formă globală coerentă, capabilă să integreze atât variația cât și constrângerile tehnice.



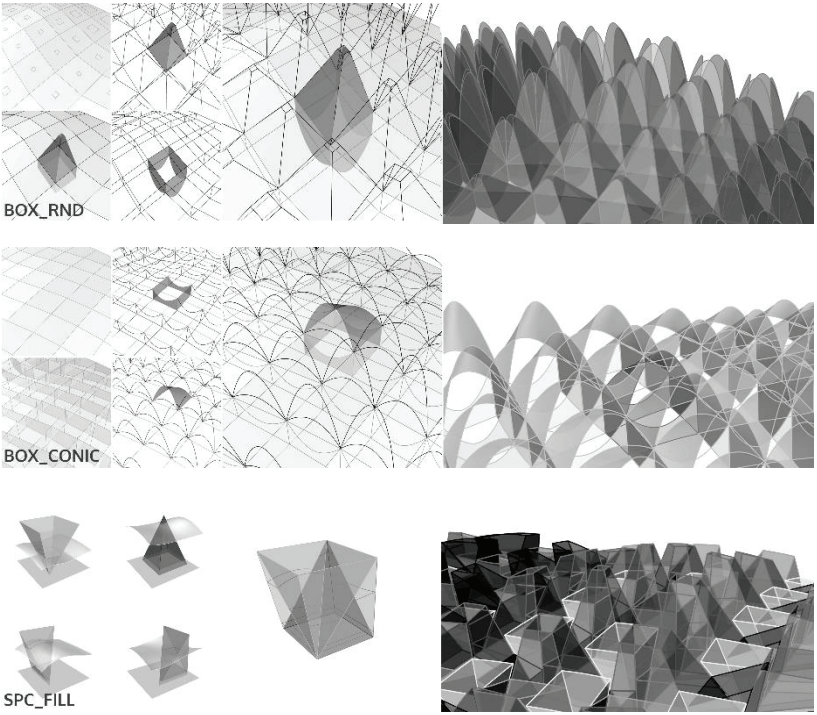


Figura 62. COMPONENT_BUILD, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, dezvoltarea componentelor pe suprafață

Geometria fiecărui component a fost influențată de factori exteriori și de condiționările procesului de fabricație și asamblare. Suprafețele au fost generate prin articularea componentelor, care, prin geometrie și metoda de articulare, trebuiau să asigure integritatea formei globale. În urma procesului au rezultat șapte tipuri de componente, grupate în trei strategii distincte, în funcție de geometria lor și de metoda de articulare: FLT, WFL și BOX.

FLT se bazează pe componente planare, în care diferențierea subcomponentelor, unele întinse pentru a asigura continuitatea, altele tensionate pentru a conferi volum, este generată de o suprafață de bază cu dublă curbură, pe care acestea se mulează. Această strategie valorifică utilizarea minimă a materialului pentru a crea efecte volumetrice prin tensionare.

WFL utilizează cutii care se suprapun și intersectează prin chertări, obținând stabilitatea globală prin contact minim între componente. Grosimea suprafeței este determinată de înălțimea variabilă a cutiilor ce se intersectează.

BOX lucrează cu cutii care, prin alăturare, generează o suprafață cu grosime. Componentele includ două sau mai multe subcomponente: unele dedicate alipirii, iar altele concepute pentru a defini aperturi variabile în geometria globală.

În esență, cele trei strategii arată moduri complementare de a integra variabilitatea locală în cadrul unei suprafețe cu dublă curbură ca un ansamblu continuu: de la planeitatea tensionată a strategiei FLT, prin intersectarea structurală a principiului WFL, până la volumele articulate și perforate a variantei BOX. Acest spectru de abordări urmărește potențialul proiectarii parametrice de a gestiona soluții adaptabile, și de a integra criterii formale, structurale și de fabricație.

Geometrie, model și subdivizare.

Geometria globală este definită de o suprafață liberă deformată, care este subdivizată prin mai multe tipuri de grid-uri: pătrat, triunghiular sau hexagonal. În funcție de celulele grid-ului se delimitează componente, care pot fi la rândul lor împărțite în subcomponente. Aceste modele geometrice, grid-urile, care în mod obișnuit exprimă modularitatea și repetabilitatea, sunt folosite tocmai pentru a evidenția modul în care pot deveni flexibile, fie prin mularea pe suprafață, fie prin deformarea lor sub influența atractorilor.

Modelul utilizat pentru categoria FLT pornește de la triunghiuri, care sunt modelate sub formă de Y, astfel încât să piardă din substanță, să permită trecerea luminii și să capete elasticitate. În cazul FLT_HEXA, grid-ul inițial este hexagonal, iar fiecare celulă hexagonală este subdivizată în șase triunghiuri. Aceste subcomponente triunghiulare sunt alese alternativ, câte trei: unele rămân în planul suprafeței, întinse, iar celelalte sunt mărite, prinse de primele, dar tensionate.

În cazul FLT_QUAD, modelul pleacă de la un grid pătrat, iar fiecare celulă pătrată este subdivizată în patru triunghiuri. Aceste elemente triunghiulare sunt alese alternativ, câte două: unele rămân în planul suprafeței, întinse, iar celelalte sunt mărite doar pe o dimensiune și prinse atât între ele, cât și

de primele, asigurând astfel stabilitatea suprafeței și consistența modelului.

Pentru categoria WFL, componentul folosit este un ansamblu format din două tipuri de cutii extrudate pe axa z și intersectate. Aceste cutii sunt micșorate astfel încât să se susțină reciproc doar prin intersecție, fără a avea fețe comune. În cazul WFL_DIA, sunt suprapuse două grid-uri pătrate, dintre care unul este rotit față de celălalt cu 45 de grade. Fiecare component pornește de la două tipuri de cutii: patru cutii pătrate intersectate cu o cutie mai mare, a cărei latură este egală cu diagonala cutiilor mai mici. În cazul WFL_TRI, se pleacă de la un grid triunghiular, cu triunghiurile micșorate. Fiecare component este compus din două tipuri de cutii triunghiulare: o cutie intersectată cu alte trei cutii.

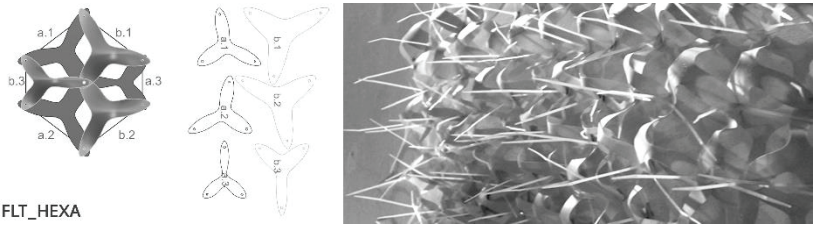
Pentru categoria BOX, grid-ul de pornire este pătrat, iar componentele sunt definite prin diverse tipuri de cutii alipite. În cazul BOX_RND, componentul are două subcomponente diferite: o ramă inferioară realizată din pereți laterali verticali și un trunchi de piramidă deasupra, ambele definite prin tăieturi curbe. Fiecare component pornește de la celula pătrată, care este mai întâi extrudată pe axa z. Partea superioară este formată din trunchiuri de piramidă cu înălțimi și goluri variabile. Vârful trunchiului de piramidă este tăiat de linii curbe ce accentuează deschiderea, iar pentru pereții verticali aceste curbe sunt reflectate simetric.

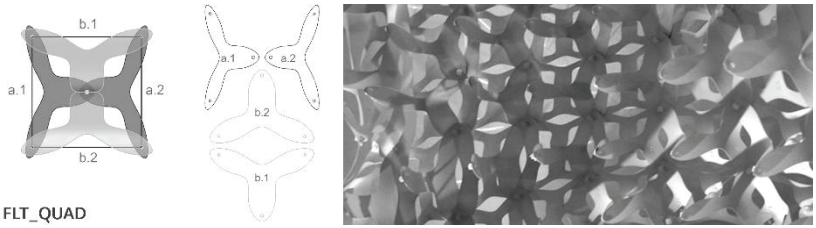
În cazul BOX_CONIC, componentul are tot două subcomponente distincte: pereți laterali verticali, tăiați de linii curbe, și o acoperire conică cu înălțimi variabile în funcție de atractori. Fiecare component este definit pornind de la celula pătrată, care este extrudată pe axa z și tăiată pe două laturi opuse după curbe. La partea superioară, pereții verticali sunt conectați printr-o suprafață tensionată conică, care se desprinde de pe cele două laturi tăiate, generând aperturi variabile.

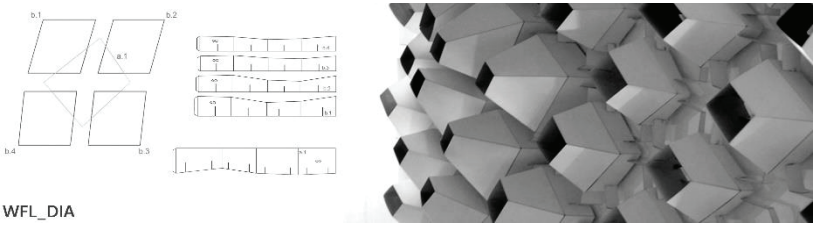
În cazul SPC_FILL, componentul este un ansamblu volumetric care umple spațiul dintre două suprafețe și este compus din patru subcomponente: două trunchiuri de piramidă cu bază pătrată și două tetraedre secționate. Fiecare component este definit pornind de la aceste patru volume de bază, care umplu spațiul: o piramidă cu vârful în sus, una cu vârful în jos și două tetraedre, secționate fiecare cu aceeași suprafață la bază și cu suprafețe diferite în partea superioară.

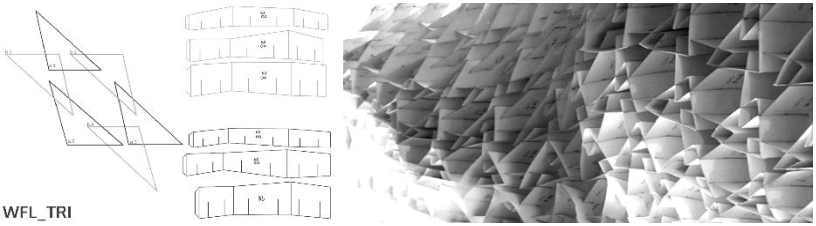
Metodă de articulare. Fabricație.

Fabricarea s-a realizat prin debitare cu laser, fiecare component, chiar și atunci când era volumetric, fiind construit din suprafețe plane: tensionate, în cazul FLT, sau pliate, în cazul WFL și BOX, după liniile de pliere gravate. Întreaga informație necesară debitării a fost integrată în designul fiecărui component.









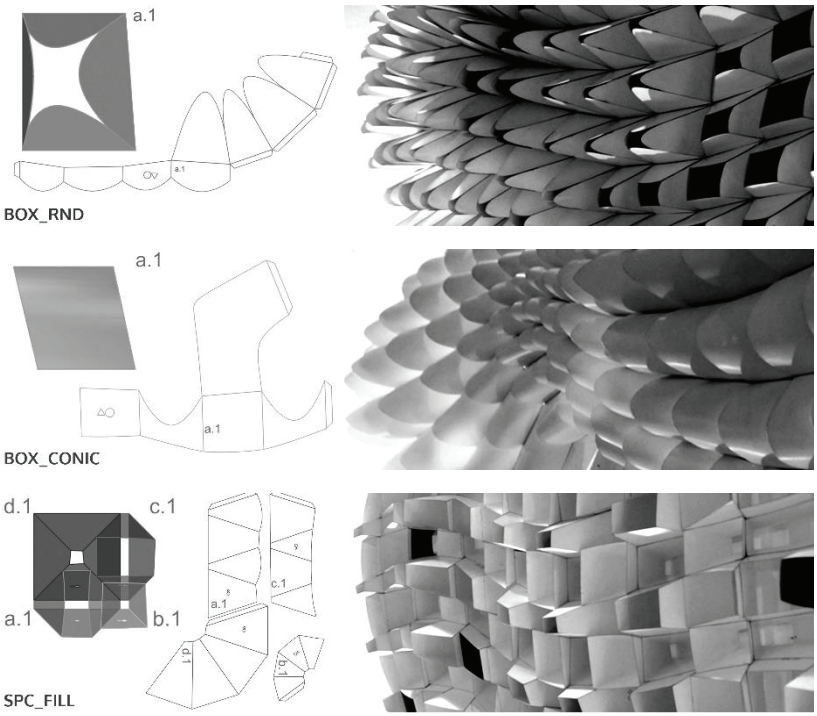


Figura 63. COMPONENT_BUILD, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, dezvoltarea geometriei de fabricație

Pentru a putea fi procesate, piesele generate în modelul 3D au fost desfășurate în plan orizontal, fiecare tip de subcomponent definind o clasă distinctă de numerotare. Deoarece toate piesele sunt în același timp atât diferite cât și similare, numerotarea este esențială, atât în modelul 3D, cât și după desfășurarea lor în plan.

Pentru obiectele FLT, materialul folosit pentru realizarea modelului este unul relativ deformabil, un material plastic, care sa permită tensionarea fără să compromită geometria fiecărui component, iar prinderile sunt realizare cu panglici (zip-tie). Pentru a facilita asamblarea, fiecare subcomponent triunghiular are trei forme diferite pentru găurile de prindere, ceea ce permite identificarea orientării fiecărui component.

În cazul FLT_HEXA golurile sunt poziționate pe fiecare component astfel încât într-un nod să existe un singur tip de gol, cerc, triunghi sau pătrat. În

cazul FLT_QUAD fiecare component pătrat are în nod același tip de gol. Pentru a asambla componente între ele, orientarea este dată de cele două triunghiuri ridicate ale fiecărui component.

Pentru categoriile WFL și BOX, materialul folosit pentru realizarea modelului este unul care să permită plierea formei desfășurate pe liniile gravate, un carton. Rigiditatea fiecărui component este asigurată prin lipire, după construirea unor aripioare de prindere. Pentru a facilita asamblarea, fiecare component are pe aceeași față a subcomponentului vertical două semne. În acest caz, s-au desenat un cerc și un triunghi pentru a determina orientarea piesei în relație cu vecinii și pentru a asigura plierea pe fața corectă.

În cazul WFL, geometria modelului este determinată de îmbinarea cutiilor între ele prin chertări, partea superioară a subcomponentelor rămânând orizontală pentru a elimina erorile de aliniere. În cazul BOX, geometria este definită de lipirea cutiilor între ele, iar asamblarea este facilitată de forma subcomponentelor verticale, care oferă suprafețe de contact identice, care se suprapun perfect.

Deoarece piesele desfășurate, în special în cazul BOX, ocupă o suprafață extinsă, a fost necesară optimizarea paginării acestora pe formatul standard al plăcilor utilizate la debitare, proces realizat cu unelte digitale specializate. Astfel, fluxul de lucru a devenit complet digital, de la etapa de design până la fabricație. Asamblarea finală a componentelor a fost realizată manual, dar a fost optimizată prin sistemul de numerotare și prin marcajele de orientare.

5.1.2. INformed geometries

Tutori: Ionuț Anton, Daniela Anton
8-10 noiembrie 2013
Participanți workshop: Mădălina Rădulescu, Otilia Sandu, Carmen Tănase, Raluca Frusina, Simona Năstăsoiu, Oana Truşcă, Raluca Becheru, Simina Dimcea, Livia Zaharia, Alexandru Petre Vlad, Filip Mihai Cristescu.

Workshop-ul *INformed geometries* a explorat procese de căutare formală și generarea de geometrii influențate de date reale, analize de performanță și simulări de forțe fizice. Tema principală a urmărit stabilirea unei relații strânse între mediul fizic și cel virtual.

Capabilitățile actuale ale mediului digital deschid calea unor explorări formale asupra geometriilor complexe, imposibil de materializat fără

metode avansate de fabricație. În cadrul workshop-ului, unul dintre principalii factori generatori a fost utilizarea tehnologiei de imprimare 3D, care permite realizarea la scară redusă a unor obiecte cu un grad ridicat de complexitate. Logica de fabricație a fost integrată încă din etapa de design, prin explorarea unor forme fluide, concepute ca suprafețe subțiri, cu texturi vibrate și detalii complexe.

Machetele rezultate sunt imaginate ca aparținând unor lumi virtuale, dar reprezintă interpretări personale ale unor obiecte cu potențial arhitectural. Imaginea propusă este voit împinsă la limita realității, exprimând potențialul uneltelor digitale atât în controlul unor geometrii informate de date reale, cât și în materializarea lor prin imprimare 3D. Deși formele par să aparțină exclusiv mediului virtual, ele sunt generate în funcție de parametri fizici, de date reale, și sunt gândite ca aparținând unui sit real. Complexitatea geometrică este rezultată din relaționarea mai simultană multor criterii de performanță, ce își negociază influența asupra formei. Rezultatul este o materializare controlată a complexității digitale, în care criteriile de performanță și expresia formală se condiționează reciproc.

Proces. Căutare formală.

S-a urmărit stabilirea unei legături între modelul virtual și contextul real. Mediul digital este utilizat atât pentru analiza de performanță și simularea forțelor fizice, cât și pentru implementarea rezultatelor obținute în procesul de generare formală. Se creează astfel bucle de feedback capabile să optimizeze proiectul, generând un obiect receptiv la condițiile fizice. Forma devine, în acest mod, un răspuns informat, capabil să îndeplinească criteriile de performanță stabilite în algoritmul de generare.

Formele globale sunt obținute prin interacțiunea dintre forțe fizice, interne sau externe sistemului. Geometria inițială este concepută prin definirea de relații de elasticitate între subcomponente. Procesul de căutare formală pornește de la definirea condițiilor inițiale: geometria de bază, elementele ce rămân fixe și tipurile de forțe care acționează asupra acesteia.

Urmează simularea, printr-un proces de relaxare dinamică, a transformării geometriei până la atingerea unei stări de echilibru. Formele rezultate, deși inspirate de structuri precum membranele tensile sau rețele de lanțuri suspendate, nu derivă dintr-o căutare fizică directă, ci reprezintă produsul unei explorări formale digitale.

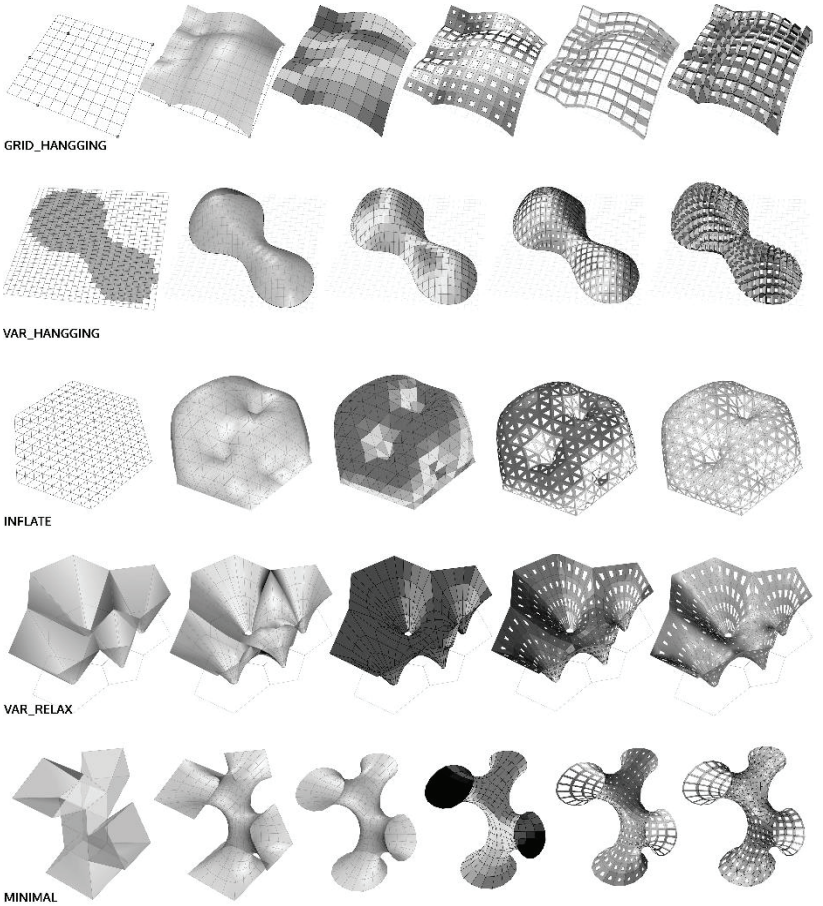


Figura 64. INformed geometries, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, geometria rezultată din corelarea criteriilor de performanță

Suprapunerea mai multor criterii de performanță pe același model a fost posibilă datorită capacității mediului de programare vizual Grasshopper de a comunica, în timp real, cu multiple aplicații de analiză, structurală și de mediu. Astfel, informațiile obținute din analize au fost integrate direct ca factori activi în generarea geometriei. Forma globală a rezultat din aplicarea forțelor fizice, iar datele furnizate de analizele structurale și de mediu au devenit criterii ce au influențat modul de populare a suprafeței.

În funcție de relația dintre geometria inițială, forțele aplicate și elementele fixe, au fost dezvoltate cinci strategii distincte de generare a formei:

Prima categorie, GRID_HANGING, pornește de la un grid orizontal, supus unei forțe verticale, similară gravitației, și ancorat în câteva puncte fixe, așezare neuniform în interiorul suprafeței. Rezultatul este o structură suspendată, prinsă punctual.

A doua categorie, VAR_HANGING, utilizează un grid orizontal și o curbă plană închisă. Din grid se păstrează doar celulele aflate în interiorul curbei, acestea fiind supuse atât unei forțe verticale, cât și unei forțe de atracție către conturul curb. În acest mod se obține o structură agățată cu un contur curb, continuu și orizontal.

A treia categorie, INFLATE, are la bază un grid triunghiular cu contur hexagonal. În acest caz se aplică o presiune internă, simulând umflarea unei membrane fixate pe contur și prinsă în câteva puncte din interior. Rezultatul este o structură cu aspect gonflabil.

A patra categorie, VAR_RELAX, pornește de la o geometrie alcătuită din trunchiuri de piramide alipite. Se consideră fixe atât conturul exterior neregulat, cât și bazele mici ale trunchiurilor, iar asupra ansamblului se aplică o forță verticală. Datorită caracterului elastic al geometriei, forma finală este rezultatul negocierii între forțele interne și acțiunea verticală exterioară.

A cincea categorie, MINIMAL, pornește de la o geometrie formată din tuburi dreptunghiulare subdivizate. Se urmărește obținerea unei suprafețe în care, în fiecare nod, forțele se află în echilibru. Nu se aplică forțe exterioare; forma rezultată depinde exclusiv de condițiile de margine și de relațiile dintre fiecare nod și vecinii săi. Geometria se determină printr-un proces iterativ, calculând poziția fiecărui nod ca medie a pozițiilor vecinilor săi imediați.

Geometrie, model și subdivizare.

Datele obținute din analizele structurală și de mediu au fost implementate la nivelul consistenței suprafeței relaxate, astfel încât modelul care popula suprafața era direct influențat de aceste informații.

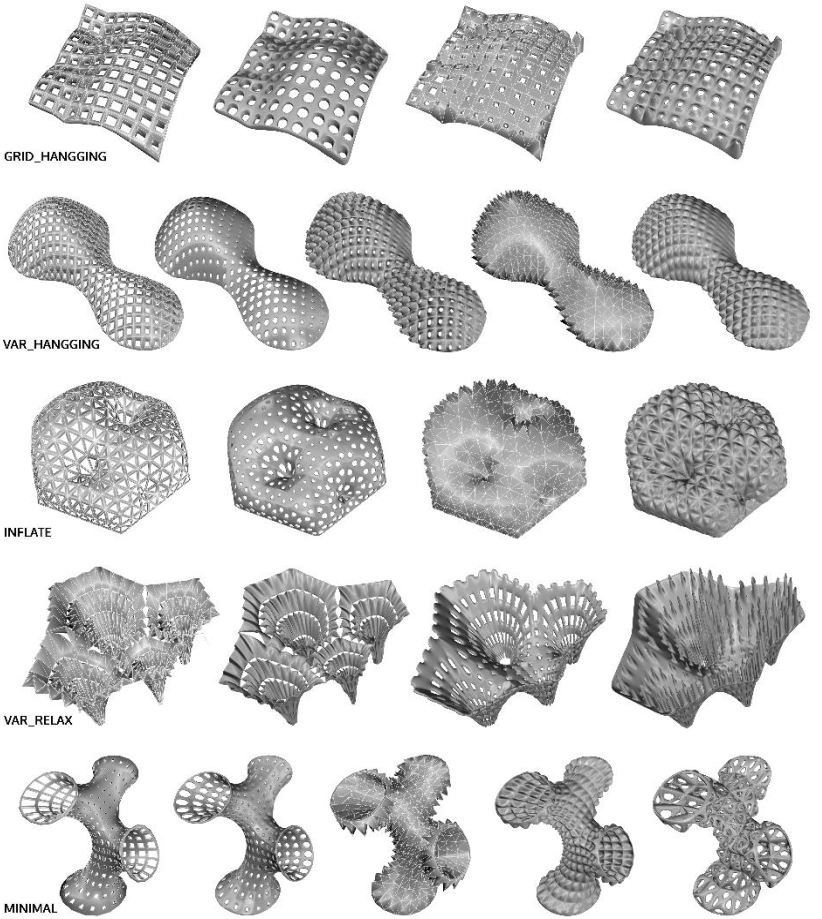


Figura 65. INformed geometries, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, modele variate de subdivizare

Intenția a fost de influența cât mai multe elemente geometrice variabile ale modelului aplicat pe suprafață de date diferite. Rezultatul constă într-o serie de modele care pot fi aplicate pe fiecare categorie de forme.

Atunci când geometria era influențată de un singur tip de date reale, au fost generate piramide cu înălțime variabilă sau goluri cu dimensiune variabilă. În situațiile în care același component era controlat de două tipuri de date, au fost create trunchiuri de piramidă, în care dimensiunea

golurilor depindea de un criteriu, iar înălțimea de altul. Toate aceste variante, construite din fețe planare, au fost ulterior supuse unui proces de subdivizare de tip *mesh*, pentru a obține forme fluide și continue.

Metodă de articulare. Fabricație.

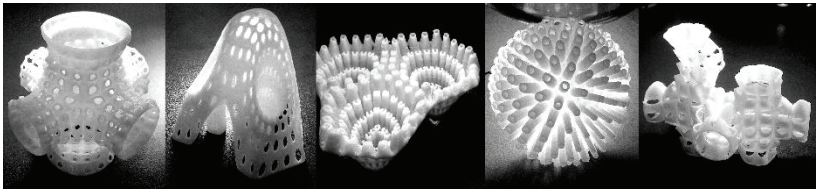


Figura 66. INformed geometries Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, modele printate 3D

Pentru a putea fi printate 3D, geometria obiectelor a trebuit să fie transformată din suprafață în volum, ceea ce a presupus adăugarea unei grosimi. Totodată, volumele trebuiau să fie complet închise și construite corect din punct de vedere topologic. Având în vedere dimensiunea redusă a obiectelor, înscrise într-un volum maxim de 7×7×7 centimetri, gradul de subdivizare a fost calibrat astfel încât componentele de pe suprafețe să aibă dimensiuni adecvate rezoluției imprimantei 3D.

5.2. Design de obiect

Proiecte de design reprezintă explorări proprii menite să testeze legătura dintre proiectarea computațională, metodele de fabricație digitală și material. Fiecare proiect se bazează pe o strategie de lucru care îmbină creativitatea cu procesul de materializare. Dimensiunea fizică a rezultatului implică integrarea și abstractizarea parametrilor legați de material și fabricație, astfel încât aceștia să devină parte din metoda de generare computațională. Procesul este unul bazat pe feed-back între concept, geometrie și material, toate fiind traduse în cod.

În numeroase cazuri, procedeele digitale sunt completate de metode tradiționale. Scopul nu este acela de a obține un proces exclusiv digital, ci de a relaționa pe de-o parte metodele de proiectare intuitive cu cele computaționale, și pe de altă parte fabricația digitală cu procese

tradiționale de materializare. Deși obiectele realizate au dimensiuni reduse, procesul de lucru poate fi preluat și aplicat la scară arhitecturală.

5.2.1. QUAD_LIGHT

Autori: Daniela Anton, Ionuț Anton

QUAD_LIGHT este un corp de iluminat proiectat și fabricat cu ajutorul uneltelor digitale, a cărui geometrie și concept derivă din interacțiunea dintre creativitate, potențialul mediului computațional și posibilitățile metodei de fabricație.Proiectul își propune să testeze capacitatea mediului virtual de a simula comportamente reale și să valorifice acest potențial în realizarea unui obiect de design. Conceptul constă în libertatea obiectului de a-și determina propria formă: deși este rezultatul unui act de creație, aceasta nu este unul cu forma impusă a priori.

Procesul de generare pornește de la un set de parametri ce descriu caracteristici de ansamblu, forma finală fiind obținută prin simularea interacțiunii dintre forțe elastice și gravitaționale. În acest mod, responsabilitatea generării formale este transferată mediului computațional, iar intervenția autorilor se concentrează asupra designului procesului de căutare formală, nu asupra a formei finale.

Proces. Căutare formală.

Principiul de pornire a constat în conceperea unui obiect flexibil, care ia formă ca rezultat al atingerii echilibrului gravitațional, determinată prin modelarea geometriei sub acțiunea forțelor fizice. Forma nu este, așadar, impusă, ci una căutată, ca rezultat al simulării în mediul digital a forțelor fizice. Mediul computațional este util nu doar pentru analiză și simulare, ci și ca instrument de reintegrare a rezultatelor obținute în fluxul de generare formală, permițând o rafinare iterativă a geometriei.

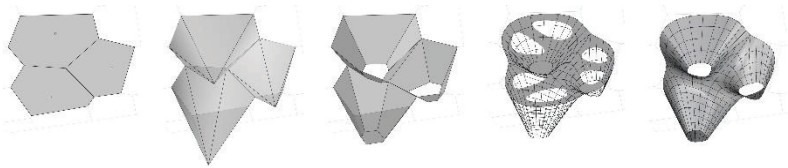


Figura 67. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, proces de generare formală

Unealta computațională folosită a fost plug-in-ul Grasshopper pentru Rhinoceros, un mediu de programare vizuală. În Grasshopper a fost dezvoltat un algoritm care integrează atât criteriile de generare formală, cât și caracteristicile de fabricație.

Geometria este definită pornind de la elemente simple: un perimetru rectangular și un set de puncte ce determină localizarea și numărul pâlniilor. Punctele, utilizând diagrama Voronoi, generează celule conținute în dreptunghiul predefinit; acestea devin baza unor trunchiuri de piramidă cu înălțime variabilă.

Prin intermediul plug-in-urilor Kangaroo și Weaverbird, aceste trunchiuri de piramidă au fost subdivizate și relaxate, ținând cont atât de forțele fizice exterioare, cât și de cele interne ale geometriei. Poziția fiecărui nod a fost determinată iterativ, ca medie a poziției vecinilor săi direcți.

Conturul exterior al celulelor a fost considerat element fix, ceea ce a permis simularea comportamentului suprafeței subdivizate ca o rețea agățată, prin aplicarea unei forțe gravitaționale. Geometria finală a obiectului rezultă din interacțiunea dintre regulile interne ale sistemului geometric și forța aplicată global. În partea superioară, a fost definită o suprafață orizontală pentru determinarea conturului de prindere, perforată în funcție de poziționarea pâlniilor.

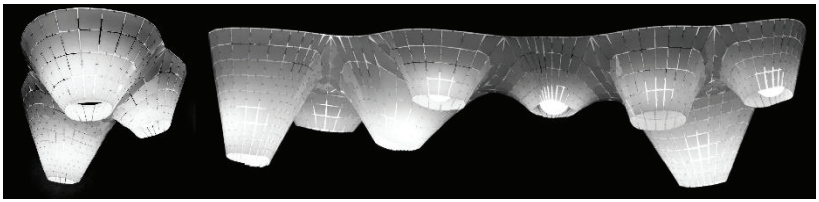


Figura 68. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, varierea formei

Folosirea unui software de proiectare parametric și utilizarea unui algoritm ne permite personalizarea formei, astfel adaptându-se la cerințele personale ale fiecărui utilizator. Variabilele din proces sunt dimensiunile globale ale obiectului în plan, numărul pâlniilor, înălțimea fiecăreia și modul lor de agregare, care poate favoriza fie o orientare liniară, fie una concentrată.

Geometrie, model și subdivizare.

Dacă componentele erau triunghiulare, numărul de piese ar fi fost prea mare. De aceea suprafața s-a subdivizat în componente patrulatere, astfel încât prin dimensionarea lor, chiar dacă au dublă curbură să poată fi aproximate cu suprafețe planare fără să aibă o deviație foarte mare de la geometria generată.

Având în vedere că geometria obiectului rezultă dintr-un proces de căutare formală digitală, bazat pe modelul unei rețele agățate, forma obținută are un caracter fluid. Pentru menținerea acestei calități, geometria a fost subdivizată în componente planare cu patru laturi, a căror dimensiune este controlată. Rezultatul este o suprafață complexă, cu dublă curbură, a cărei subdivizare a trebuia realizată din suprafețe planare. Alegerea componentelor patrulatere, în detrimentul celor triunghiulare, a urmărit reducerea numărului total de piese. Scara de subdivizare a fost atent controlată, astfel încât elemente cu dublă curbură să poată fi aproximate cu suprafețe planare fără să aibă o deviație foarte mare de la geometria generată.

Metodă de articulare. Fabricație.

Prin utilizarea programării vizuale a fost posibilă obținerea unui flux digital continuu, de la etapa de proiectare până la cea de fabricație. În acest mod, componenta de fabricație a fost integrată în algoritm, reprezentând un o parte substanțială a procesului. Pentru elementele componente ale obiectului, alcătuite din suprafețe planare diferite, fabricarea s-a realizat prin debitare laser

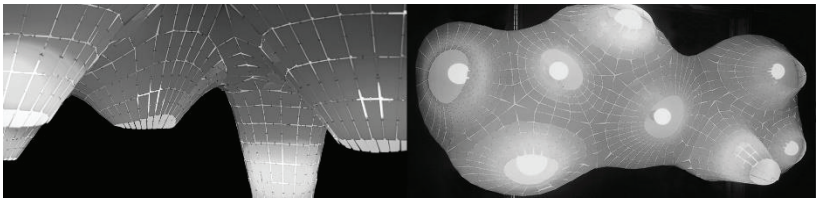


Figura 69. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, corpul de iluminat fabricat

. Piesele ce formează rețeaua agățată a pâlniilor au fost executate din material plastic translucid alb, cu grosimea de 1 mm, în timp ce structura

portantă a obiectului a fost realizată din tablă plană de oțel cu grosimea de 2 mm, de asemenea decupată de mașini cu comandă numerică.

Pentru a obține o suprafață flexibilă, elementele patrulatere care compun pâlniile au fost articulate prin intermediul unor zale metalice. Acestea sunt amplasate la mijlocul fiecărei laturi, permițând conectarea pieselor câte două, și evitând articularea directă în nodurile unde se întâlnesc patru componente, situație ce ar fi complicat logica de conectare.



Figura 70. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, variante diferite

Pentru a putea fi debitate, piesele generate în modelul 3D au fost desfășurate în plan orizontal, fiecare pâlnie corespunzând unei clase distincte de componente. Deși toate piesele sunt unice, ele prezintă similitudini de formă, motiv pentru care au fost numerotate atât în modelul digital, cât și după desfășurare. Pentru ca marcajele să nu fie vizibile în produsul final, inscripțiile au fost gravate pe fața interioară a componentelor. Pentru a păstra forma globală a ansamblului, dimensiunile fiecărei piese au fost ajustate în funcție de dimensiunea zalelor, asigurând o distanțare controlată între elemente. Pe fiecare componentă au fost poziționate patru goluri, corespunzătoare punctelor de prindere.

Întrucât piesele sunt foarte asemănătoare și orientarea lor corectă poate fi dificil de stabilit chiar și în prezența numerotării, această problemă a fost anticipată prin introducerea unui marcaj de orientare: un arc de cerc decupat în colțul din stânga-jos al fiecărei piese.

Algoritmul integrează încă din faza de proiectare constrângeri legate de metoda de fabricație. În cazul în care o piesă rezulta sub dimensiunea minimă admisă, sistemul semnala această problemă, iar ajustarea parametrilor permitea evitarea situației.

De asemenea, algoritmul include calcule detaliate privind costul de producție, determinând lungimea totală necesară pentru debitare și asociind aceste valori cu mai multe tipuri de materiale și grosimi. Astfel, se

poate realiza o analiză comparativă, incluzând și pierderile de material. Pentru a reduce consumul de resurse, a fost implementat un sistem automat de poziționare eficientă a pieselor pe formatul standard al plăcilor din care se debita.

5.2.2. SOFT_GEOMETRY

Autori: Daniela Anton

Colecția SOFT_GEOMETRY explorează modele complexe care pornesc de la o geometrie rigidă și ordonată, transformată și adaptată în procesul creativ pentru a deveni maleabilă. Intenția a fost obținerea unei imagini unitare prin explorarea unor principii de agregare. Colecția investighează mai multe geometrii și reguli de deformare, iar formele rezultate sunt diferite dar similare, toate având în comun trecerea graduală și dispunerea ierarhizată.

Modelele inițial omogene și uniforme sunt destabilizate pentru a deveni eterogene și concentrate. Prin atragerea către puncte sau linii, celule își modifică geometria, nu mai sunt identice, devin diferite dar rămân în aceeași relație unele cu altele. Chiar și perturbat, sistemul se adaptează, păstrând conexiunile dintre celule.

Colecția urmărește realizarea unui echilibru între ordinea geometrică și variabilitatea în serie, în care obținerea unor celule diferite, dar similare, sugerează o transformare continuă a gridurilor euclidiene inițiale. Modelul static inițial, prin deformare topologică, devine dinamic și tensionat.

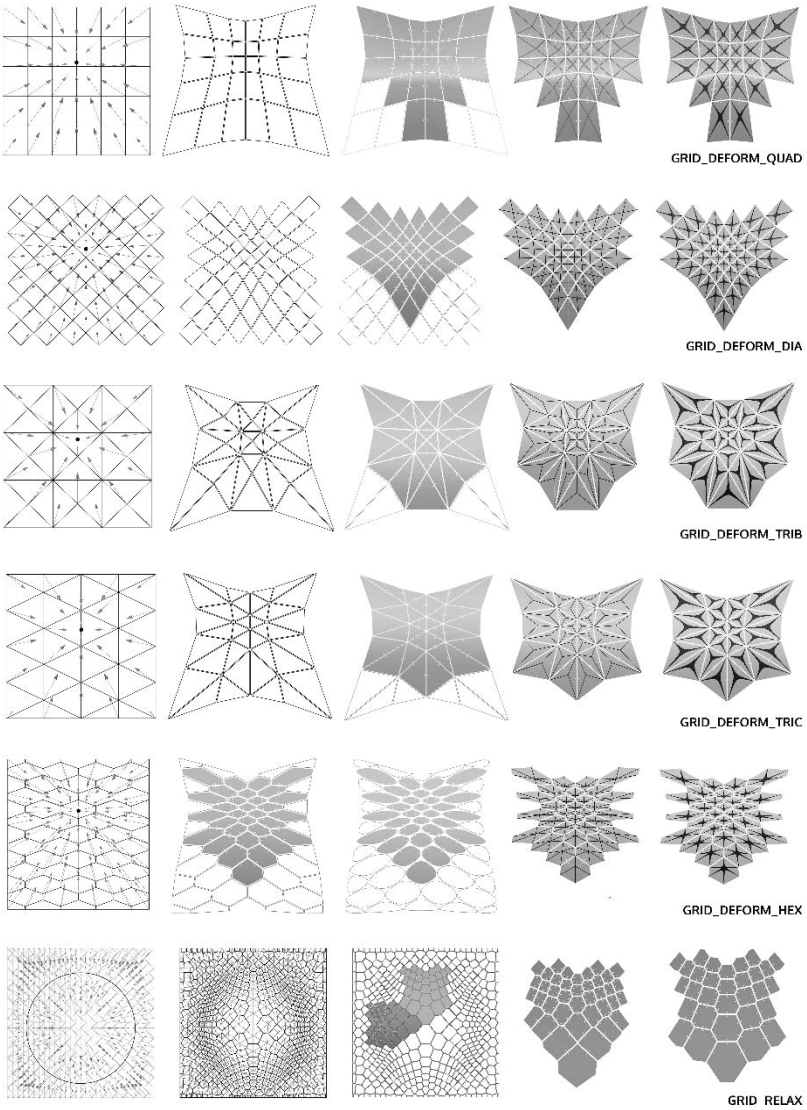
Proces. Căutare formală.

Sistemul, inițial compus din unități identice și ordonate, este supus unor forțe de deformare care induc variații individuale fiecărui element. Fiecare celulă își negociază forma și poziția în spațiu prin interacțiunea cu vecinii săi.

Metodele de generare formală se pot grupa în trei strategii distincte, în funcție de geometria de pornire și de tipul de forțe de deformare aplicate.

Peste celulele deformate se suprapun două tipuri de modele: fie un model liniar, generat prin conectarea vârfului fiecărei celule cu centrul acesteia, fie un model de suprafață, format din curbe construite din trei puncte de control, ce leagă două puncte vecine de pe fiecare celulă cu centrul

acesteia. Suprafețele rezultate din aceste curbe creează un model în interiorul fiecărei celule.



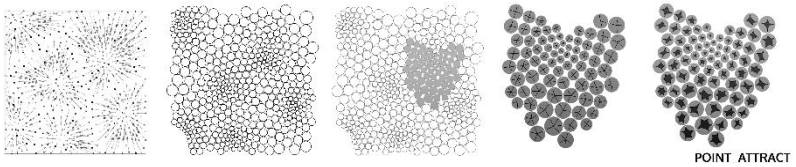


Figura 71. SOFT_GEOMETRY, Daniela Anton, 2013, strategii de generare formală

În cazul celei de-a doua categorii, GRID_RELAX, gridul triunghiular deformat este înlocuit cu celulele Voronoi. Acestea sunt definite de apropierea dintre puncte, au un număr variat de laturi și umplu spațiul. Spre deosebire de prima categorie, atractorul nu mai este punctual, ci o curbă regulată, în acest caz, un cerc, care determină orientarea celulelor. Punctele se aglomerează în proximitatea curbei, iar celulele Voronoi din această zonă devin mai mici.

A treia categorie, POINT_ATTRACT, utilizează ca unitate cercul, care nu face parte dintr-o grilă și nu își modifică forma, ci doar dimensiunea. Cu cât cercurile sunt mai apropiate de punctele de influență, cu atât raza lor este mai mică. Dispunerea cercurilor urmărește o agregare eficientă, astfel încât fiecare cerc are între doi și șase vecini. Modelul suprapus preia relațiile de tangență dintre cercuri, iar prin conectarea centrului fiecărui cerc cu centrele vecinilor se conturează direcțiile pentru modelele de linie și suprafață, similare celor din GRID_DEFORM.

Metodă de articulare. Fabricație.

Geometria obiectelor a fost generată în plan, iar forma finală rezultă din articularea celulelor, fabricate prin debitare laser. Pentru a materializa modelele suprapuse peste celule, unele coliere includ linii sau suprafețe gravate cu laser. Componentele sunt realizate din suprafețe planare, însă pentru a conserva flexibilitatea ansamblului, acestea sunt articulate prin intermediul zalelor metalice.

Piesele au fost fabricate din materiale variate, cu grosimi cuprinse între 1 și 3 milimetri. Pentru a menține forma globală, componentele au fost dimensionate în funcție de mărimea zalelor și de grosimea materialului, detașând piesele unele de celelalte. De asemenea, pe fiecare piesă sunt poziționate golurile ce corespund prinderii cu zale. Pentru a putea fi articulate, celulele au minim un punct de tangență, astfel avem două

situații. Pentru celulele cu geometrie din poligon, pentru că au o latură comună cu vecinul, găurile sunt date pe mijlocul laturii respective. Pentru celulele ce au formă fie de cerc, fie sunt curbe, găurile sunt date în punctul de tangență, care se află pe direcția care unește centrele celulelor vecine.

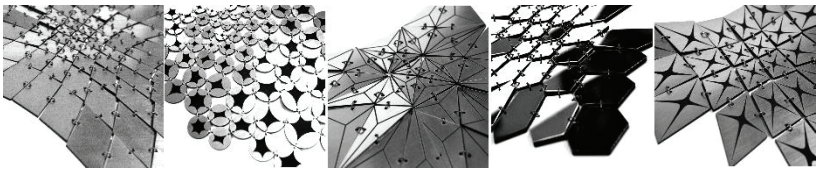


Figura 72. SOFT_GEOMETRY, Daniela Anton, 2013, obiecte fabricate și asamblate

Pentru a permite articularea, fiecare celulă are cel puțin un punct de tangență, ceea ce generează două situații distincte. În cazul celulelor cu geometrie poligonală, care au o latură comună cu celula vecină, golurile sunt poziționate pe mijlocul acestei laturi comune. În schimb, pentru celulele cu formă circulară sau curbată, golurile sunt amplasate în punctul de tangență, situat pe direcția ce unește centrele celulelor adiacente.

5.2.3. DIGITAL_SILVER

Autor: Daniela Anton

Bijuteria aparține unui domeniu care lucrează cu materiale prețioase și care presupune modelarea precisă, la o scară foarte mică, a unor artefacte. Este, așadar, un proces laborios, ce depinde de profesioniști cu un nivel ridicat de pregătire. În acest context, mediul computațional a devenit atractiv și pentru bijutieri, existând deja numeroase imprimante 3D care fie printează matrițe din ceară, fie realizează direct bijuterii din materiale prețioase, la o rezoluție înaltă, însă cu un cost ridicat.

Colecția de bijuterii DIGITAL_SILVER explorează modul în care proiectarea computațională și fabricația digitală pot transforma meșteșugul tradițional al prelucrării argintului. Intenția a fost de a păstra procesul clasic de turnare, dar de a modifica metoda prin care se obține matrița. Astfel, au fost utilizate modele printate 3D, cu o rezoluție mai mică și din materiale mai accesibile. Folosind drept matrițe piese ale căror straturi de material, rezultate prin suprapunerea succesivă în procesul aditiv, sunt mai proeminente, am urmărit modul în care acestea influențează obiectul final

din argint. În contrast, imprimantele profesionale pentru bijuterie pun accent pe rezoluția înaltă, pe continuitatea obiectelor care nu au straturi vizibile și pe reproducerea fidelă a modelului virtual.

Faptul că straturile rămân vizibile conferă obiectului rezultat un sens suplimentar, dezvăluind procesul prin care a fost fabricat. Chiar dacă, în modelul virtual, aceste straturi nu erau prezente, geometria fiind netedă, ele devin totuși parte integrantă a modului de formare a obiectului. Textura obținută astfel, chiar dacă nu a fost intenționată ca ornament, adaugă detaliu și îmbogățește cu semnificație piesa din argint.

Proces. Căutare formală.

Procesul de căutare formală a urmărit generarea unor obiecte cu geometrie complexă, caracterizate printr-o formă globală neregulată și o textură variabilă. În urma explorărilor au rezultat trei piese, dezvoltate în mediu digital prin metode de căutare formală, ulterior printate 3D și, în etapa finală, turnate în argint.

S-a pornit de la griduri triunghiulare sau pătrate, supuse unor forțe de atracție sau unor forțe gravitaționale simulate prin relaxare dinamică. În unele cazuri, punctele grilei au fost atrase către o curbă, devenind centre ale unor celule Voronoi; în altele, asupra grilei s-au aplicat simultan forțe de gravitație și de elasticitate, menținând conturul fix. O a treia variantă a combinat forțele gravitaționale cu atracția către o curbă, pentru a defini un contur neregulat fix. Fiecare celulă a gridului, supusă acestor deformări, își modifică dimensiunea în funcție de proximitatea față de punctele de influență, generând o variație graduală în ansamblul geometric.

Geometrie, model și subdivizare.

Gridul deformat trebuie transformat într-o suprafață cu grosime, pregătită pentru printarea 3D. În acest scop, fiecare celulă a gridului este supusă unor diferite tratamente, transformate de poziția și intensitatea punctelor de influență. Celulele au fost micșorate, generând o suprafață perforată. Pe suprafața fiecărei celule s-au construit fie piramide cu înălțime variabilă, fie trunchiuri de piramidă cu deschideri dimensionate în funcție de distanța față de punctele de influență.

Modelele rezultate sunt alcătuite din componente fațetate, care sunt ulterior transformate în suprafețe continue prin aplicarea de subdivizări ale mesh-urilor. După stabilirea geometriei de suprafață, aceasta este

îngroșată pentru a obține un volum închis, adecvat procesului de fabricație aditivă.

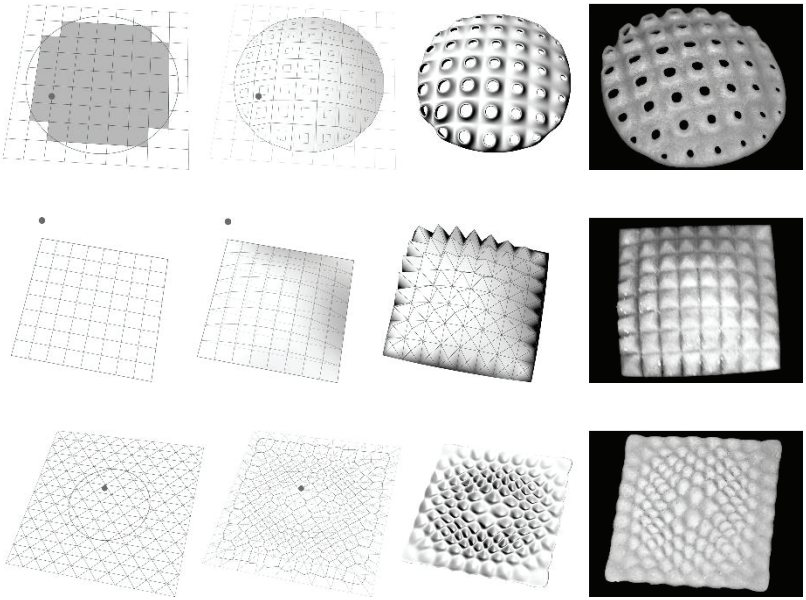


Figura 73. DIGITAL_SILVER, Daniela Anton, 2013, proces de generare a formei și obiecte printate 3d

Metodă de articulare. Fabricație.

Procesul de fabricare a inclus două etape: prima, printarea 3D a pieselor utilizând plastic ABS sau PLA; a doua, turnarea acestora în argint, folosind piesele printate ca matriță pierdută. Pentru a putea fi turnate, piesele au trebuit să se încadreze într-un volum maxim de 5 × 5 × 2 cm, iar grosimea lor a variat între 0,8 și 1 mm.

Turnarea argintului, în mod tradițional presupune modelarea inițială a piesei din ceară, urmată de realizarea unui negativ care va servi drept formă pentru turnare. Peste modelul din ceară se toarnă ipsos, care este vibrat pentru eliminarea bulelor de aer, apoi întărit prin încălzire în cuptor. În această etapă, ceara se topește, lăsând un gol cu forma piesei. Argintul

topit este apoi turnat prin centrifugare, asigurând umplerea completă a formei, inclusiv în zonele de detaliu fin.

Riscul asociat utilizării matrițelor pierdute realizate din materiale care ard constă în posibilitatea generării de impurități care pot împiedica argintul topit să reproducă fidel forma negativului. În mod tradițional, ceara este preferată tocmai pentru că se elimină complet în cuptor, fără a lăsa reziduuri. În cadrul proiectului, a fost testată utilizarea pieselor printate 3D din ABS și PLA ca matrițe pierdute, demonstrându-se că, prin ardere în cuptor, acestea nu generează o cantitate semnificativă de impurități.

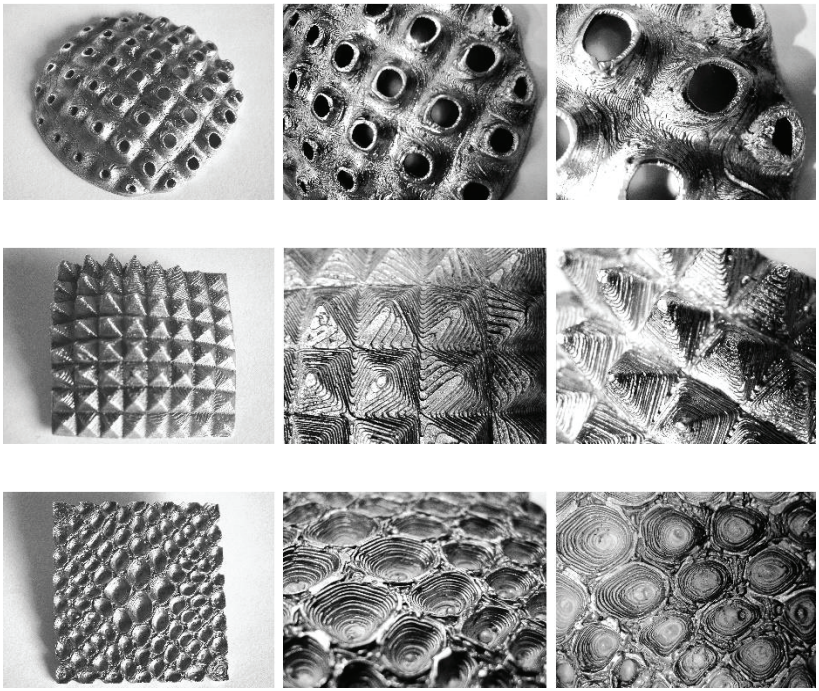


Figura 74. DIGITAL_SILVER, Daniela Anton, 2013, obiectele din argint

Printarea 3D prin depunere de material plastic (FDM) este o metodă de fabricație aditivă, în care obiectul se realizează prin suprapunerea succesivă a straturilor de material plastic topit. Această tehnologie permite obținerea unor geometrii complexe cu un grad ridicat de fidelitate, însă lasă vizibile straturile de material, a căror grosime depinde de rezoluția

imprimantei 3D utilizate; în acest caz, grosimea fiecărui strat a fost de 0,2 mm. În procesul de turnare, obiectul din argint preia cu precizie toate detaliile matriței, inclusiv urmele rezultate din adiția straturilor. Astfel, obiectul dobândește o textură suplimentară, care nu făcea parte din geometria inițială generată digital, dar care devine o amprentă a procesului de materializare. Rezultatul este un obiect ce, deși turnat în mod tradițional, păstrează întreaga istorie a realizării sale, de la modelarea digitală și printarea 3D, până la turnarea finală în argint.

5.2.4. CELL_AGGREGATION

Autor: Daniela Anton

Intenția proiectului a fost aceea de a explora metode de construcție care nu mai pornesc de la suprafețe subdivizate, ci de la celule volumetrice capabile să se agrege. În paralel, au fost investigate diferite modalități de reprezentare a acestor structuri agregate, concentrându-se pe relația dintre negativ și pozitiv. Astfel, au rezultat două variante distincte, generate pe baza aceluiași principiu de asociere: una care exprimă integral volumul celulelor și alta, poroasă, care sugerează doar muchiile acestora.

Totodată, proiectul a urmărit explorarea geometriei celulelor prin aplicarea unor principii de deformare asupra unor poliedre regulate, care își pierd astfel caracterul de simetrie, dar păstrează relațiile geometrice. Transformarea unor structuri geometric stabile produce o imagine familiară, dar alterată, în care accentul cade pe deformarea topologică și pe relațiile dintre elemente.

Proiectul de design investighează metode de articulare a celulelor pentru a obține structuri eterogene, care totuși păstrează o ordine de generare. Obiectele rezultate oscilează între aleatoriu și ordonat, între masivitate și fluiditate. Caracteristicile materiale au ghidat transformările geometrice și au fost puternic influențate de metoda de fabricație aleasă.

Proces. Căutare formală.

Procesul de căutare formală pornește de la geometria celulei și se desfășoară ca un proces evolutiv. Fiecare celulă este definită conform diagramei Voronoi: un ansamblu de puncte poziționate în spațiu generează fețe ale căror contururi se stabilesc printr-o negociere geometrică, ca medie a pozițiilor acestor puncte. Fiecărei fețe îi corespunde un punct care o influențează direct. Acest algoritm produce rezultate complexe atunci

când este combinat cu principiile agregării și aplicat pe ansambluri de celule tangente, care împreună umplu spațiul. Procesul implică definirea centrelor celulelor și a punctelor de influență, geometria finală rezultând din corelarea acestor parametri.

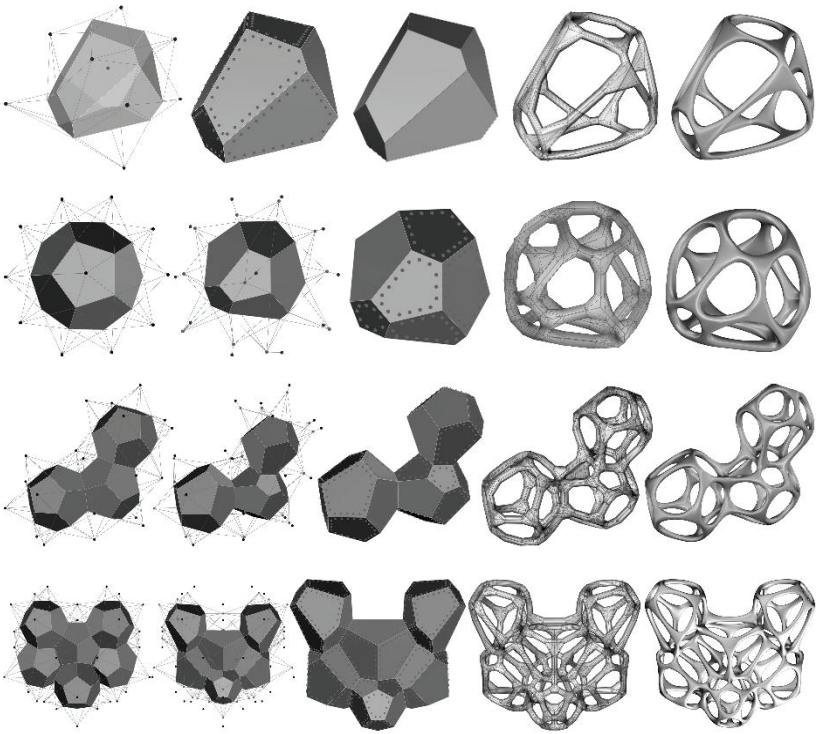


Figura 75. CELL_AGGREGATION, Daniela Anton, 2014, procese de generare a formei

Geometrie.

Geometria a evoluat treptat, primul proces de generare pornind de la o celulă definită printr-o colecție de puncte poziționate aleatoriu în spațiu.

Pentru cel de-al doilea tip de celulă a fost adoptat un proces invers. Celula de pornire a fost un poliedru regulat, un dodecaedru, care, fiind un volum închis și fațetat, poate fi definit ca un caz particular al principiului Voronoi 3D. Astfel, s-au identificat punctele ce influențează fiecare fațetă prin

poziționarea în oglindă a centrului celulei față de fiecare față în parte. Odată determinate aceste puncte, pentru a deforma celula, ele au fost deplasate cu distanțe variabile, mici, în funcție de un punct de atracție. Rezultatul a fost un poliedru cu fețe constituite din poligoane cu cinci laturi, similar cu poliedrul inițial, dar cu o geometrie ușor alterată.

A treia structură reprezintă o alăturare liniară a trei celule, fiecare având o față comună cu vecina sa. Pornind de la trei dodecaedre alipite, care împart câteva puncte de influență comune, deplasarea acestor puncte în funcție de un atractor menține relațiile dintre celulele alăturate, iar ansamblul se deformează unitar, ca un tot coerent.

Folosind același poliedru regulat deformat, se pot genera structuri volumetrice care umplu spațiul. Pornind de la o configurație de șase dodecaedre dispuse simetric, cu mai multe fețe comune, se repetă procesul de deformare. De această dată, s-au utilizat trei puncte de influență poziționate și ele într-o structură simetrică, pentru a menține simetria și după transformare.

După deformarea celulelor, se aplică două prelucrări distincte, corespunzătoare celor două metode diferite de fabricație. Pentru generarea celulelor volumetrice, pe fiecare față se definesc cercuri care indică perforațiile necesare asamblării. Astfel, pe fiecare muchie sunt plasate planuri perpendiculare, iar distanțele față de margini, distanțele dintre perforații și dimensiunile acestora sunt stabilite cu precizie.

Al doilea proces de transformare a formei exploatează muchiile și punctele lor de intersecție, nodurile. Muchiile capătă grosime, iar nodurile primesc un volum mai consistent, adaptat în funcție de numărul de muchii care converg în fiecare nod. Această operație generează o structură fațetată, care ulterior trece printr-un proces de relaxare pentru a obține o geometrie moale și continuă, ce se îngroașă în punctele de articulare, similară unei structuri osoase.

Metodă de articulare. Fabricație.

Celulele au fost materializate prin două strategii distincte de fabricație digitală. Deși geometria de bază a fost aceeași, componentele au fost adaptate pentru a se integra procesul de fabricație ales.

Prima metodă a fost debitarea cu laser, utilizând materiale bidimensionale diferite, care, după tăiere, au fost asamblate manual prin coasere. Având în

vedere că este o tehnică de fabricație de suprafață, s-a folosit coaja celulelor fațetate, asupra căreia, prin script, au fost marcate punctele pentru realizarea perforațiilor. Acestea au fost poziționate la distanțe egale și în număr identic pe fiecare dintre cele două fețe adiacente. Ulterior, fețetele au fost desfășurate, numerotate și poziționate eficient pe placa de debitare pentru optimizarea consumului de material.

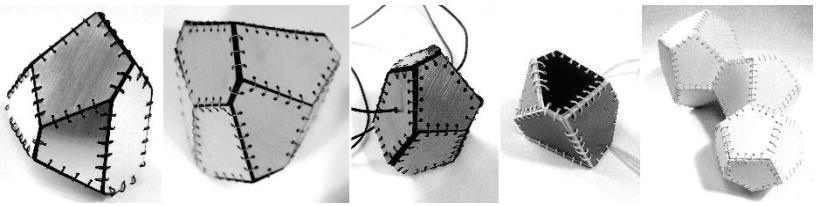


Figura 76. CELL_AGGREGATION, Daniela Anton, 2014, obiecte fabricate prin debitare cu laser și articulare.

În procesul de asamblare, fețetele nu se îmbină perfect, fapt cauzat de grosimea materialului și de imposibilitatea tăierii la unghiuri diferite cu tehnologia laser utilizată. Această constângere a fost exploatată prin utilizarea unor materiale subțiri, cu grosimi de până la 1,5 mm, care au o culoare diferită în secțiune față de suprafața vizibilă. Astfel, s-a utilizat metalexul, un material cu o față acoperită cu o foiță metalică fină lipită pe un suport alb sau negru. De asemenea, s-a folosit placajul, a cărui margine se înnegrește datorită arderii produse de tăierea cu laser, obținându-se astfel o diferențiere cromatică la îmbinările fațetelor.

Această metodă de materializare nu este complet digitală, combinând tehnologia cu control numeric de debitare cu laser cu un proces manual și tradițional de asamblare.

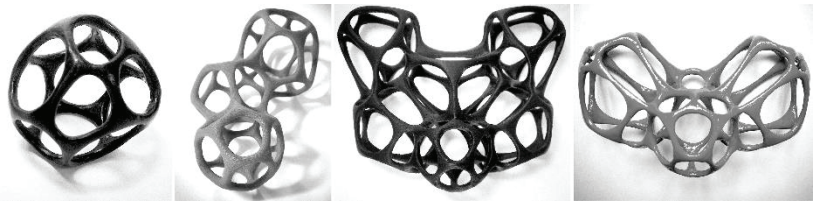


Figura 77. CELL_AGGREGATION, Daniela Anton, 2014, obiecte printate 3D

Cea de-a doua metodă explorată este complet digitală și constă în printarea 3D. De această dată, au fost folosite muchiile și nodurile celulelor fațetate ca elemente de pornire.

Având în vedere că imprimarea 3D este adecvată pentru forme cu structuri complexe, s-a urmărit transformarea geometriei generate astfel încât să se valorifice atuurile acestei metode de fabricație. Astfel, geometria rezultată este filiformă și moale, exprimând o structură delicată, dificil de realizat prin metode tradiționale.

5.3. Fabricație robotică

Roboții industriali sunt cele mai versatile unelte ce pot fi controlate numeric, folosind mediul computațional. De aceea, ei sunt foarte potriviți pentru practicile creative, care presupun, de cele mai multe ori, dezvoltarea de proiecte unice.

Odată cu utilizarea roboților industriali în proiectare, apare și nevoia de a proiecta modul în care aceștia sunt folosiți. Au început să apară unelte din ce în ce mai accesibile pentru cei care nu au studii aprofundate de programare, automatizare sau control al roboților. Astfel, rolul proiectantului se transformă, asumându-și și responsabilități de control al uneltelor, iar uneltele de fabricație digitale devin astfel parte din proiect și pot fi folosite în avantajul acestuia.

Căutările proprii în domeniul fabricației robotice au un caracter exploratoriu și urmăresc testarea flexibilității roboților industriali. Aplicațiile nu au întotdeauna ca scop fabricarea obiectelor, ci folosirea acestor unelte în moduri diferite față de cele pentru care au fost inițial create.

5.3.1. ROBOTS IN ARCHITECTURE 2013

14-16 decembrie 2012
Tutore: Thibault Shwartz
Autori: Ionuț Anton, Daniela Anton

În alte industrii, roboții sunt folosiți pentru o singură sarcină repetitivă, iar softurile pentru programarea lor sunt adesea mai puțin accesibile. Astfel, programarea unui robot pentru a executa mereu sarcini diferite nu reprezenta o practică curentă. Însă, pentru a adapta aceste unelte domeniilor creative, este necesară valorificarea flexibilității lor și explorarea potențialului creativ care decurge din această versatilitate.

Cu ocazia participării la unul dintre cele opt ateliere de lucru simultane, organizate în mai multe locații din Europa și dedicate utilizării fabricației robotice în arhitectură, parte a conferinței RobArch 2012, s-a observat caracterul emergent al acestor unelte în cercetarea arhitecturală. Utilizarea roboților industriali în domeniul arhitecturii este încă la început, iar în prezent ne aflăm în punctul în care se dezvoltă metode de control care să fie, totuși, accesibile și profesioniștilor din domeniile creative.

Workshop-ul Viena I: *Man Machine Cohabitation*, avându-l ca tutore pe Thibault Schwartz, a explorat modalitățile de interacțiune cu roboții industriali într-un mod vizual și intuitiv. Pentru controlul robotului, am utilizat plugin-ul HAL pentru Grasshopper, o unealtă foarte flexibilă, capabilă să susțină multiple aplicații diferite. Prin utilizarea unui singur soft vizual, apropiat domeniului arhitecturii și concentrat pe relații geometrice, fără a fi dependent direct de cod, s-a realizat o conexiune imediată între geometrie și controlul uneltei de fabricație.

Scopul atelierului a constat în dezvoltarea, de către fiecare participant, a propriului cod destinat unei aplicații ce presupunea colaborarea directă cu robotul. La finalul primei zile s-a obținut o definiție funcțională și o primă interacțiune prin rularea scriptului. Robotul utilizat, ABB IRB 120, unul dintre cei mai mici roboți industriali produși de ABB, nu a constituit un obstacol, permițând dezvoltarea a două aplicații diferite pe parcursul celor trei zile de workshop. Ulterior, s-a constatat că acest atelier a fost singurul care a oferit o libertate reală de explorare a capacităților robotului, asigurând acces direct atât la unealtă, cât și la programarea acesteia. În contrast, celelalte ateliere au adoptat un flux de lucru diferit, în care participanții erau limitați la modificarea sau dezvoltarea unor geometrii preexistente, care erau apoi procesate printr-un mecanism de tip „cutie neagră" pentru validarea prin simulare, tutorii fiind responsabili de transformarea codului pentru controlul robotului.

Proces.

De-a lungul celor trei zile de workshop s-au dezvoltat două aplicații. Niciuna dintre aceste aplicații nu a avut ca scop final obținerea unui obiect caracterizat printr-o geometrie explicit proiectată sau definită în prealabil. Explorările au pus accent pe proces și pe modul în care putem interacționa cu robotul, de fiecare dată diferit. Și versatilitatea metodei de programare a robotului a fost testată, dovedindu-și calitățile.

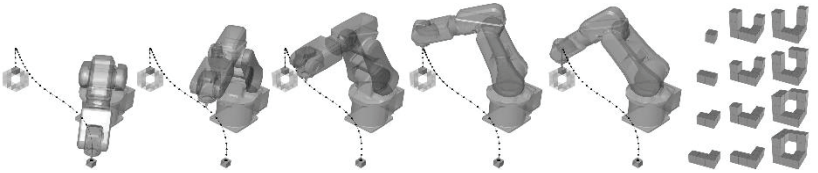


Figura 78. ROBOTS IN ARCHITECTURE, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2012, simularea mișcării robotului pentru aplicația PICK_AND_PLACE

PICK_AND_PLACE, pune accent pe utilizarea robotului ca agent activ în procesul de asamblare, cu scopul de a testa și optimiza modul de interacțiune dintre operator, codul de control și unitățile utilizate. Pe robot este montată o unealtă cu un magnet, folosită ca să apuce piese tridimensionale, cuburi, ce au și ele un magnet pe fiecare față. S-a urmărit construirea unor obiecte realizate prin apucarea cuburilor dintr-un punct și poziționarea lor într-un compoziție pre-definită, folosind robotul.

S-a explorat integrarea caracteristicilor materiale ale componentelor în algoritmul de asamblare, astfel încât programarea robotului să țină cont nu doar de poziționarea geometrică, ci și de comportamentul fizic al pieselor în procesul de îmbinare. De asemenea, s-a avut în vedere optimizarea și anticiparea etapelor legate de articularea componentelor, cu scopul de a preveni erori sau dificultăți la montaj.

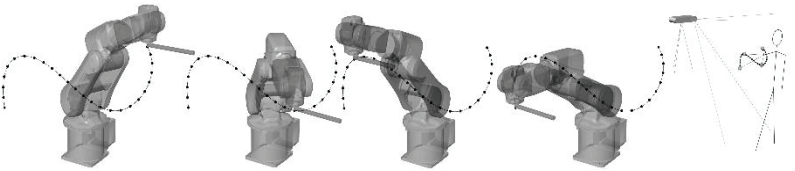


Figura 79. ROBOTS IN ARCHITECTURE, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2012, simularea mișcării robotului pentru aplicația REAL_TIME.

REAL_TIME, a urmărit interacțiunea cu robotul în timp real. În acest context, s-a utilizat un senzor Kinect capabil să detecteze și să urmărească mișcările scheletului uman cu articulațiile acestuia. Poziția mâinii drepte a fost folosită ca parametru pentru controlul mișcării robotului, permițând astfel mutarea acestuia în timp real, sincronizată cu mișcările brațului operatorului. Această interacțiune funcționează, deocamdată, ca o oglindă

între om și unealtă, anticipând un dialog în timp real care caută să definească natura coabitării dintre om și mașină. Procesul a integrat preluarea datelor în timp real, prelucrarea lor și generarea codului specific de comandă pentru robot, toate acestea fiind realizate în același mediu software, Grasshopper, completat cu numeroase plugin-uri. Astfel, s-a reușit nu doar controlul efectiv al robotului în funcție de inputul uman, ci și simularea simultană a mișcărilor, subliniind potențialul interactiv și adaptabil al roboților industriali.

Geometrie.

Deoarece modul în care se mișcă robotul pornește de la definirea poziționării sale în spațiu, geometria care definește această mișcare devine un aspect esențial. În prima aplicație, PICK_AND_PLACE, procesul de asamblare a fost structurat în trei etape distincte. Prima etapă presupune apucarea cubului, urmată de transportul acestuia către ansamblu, iar ultima constă în poziționarea precisă, unde cubul rămâne fixat prin atracția magneților de pe fețele cuburilor învecinate. Pentru realizarea acestor operații s-a avut în vedere atât precizia necesară la prinderea cuburilor, cât și optimizarea procesului prin varierea vitezelor de mișcare ale robotului, adaptate fiecărei etape a asamblării. Aceste ajustări au fost implementate pe baza rezultatelor testelor fizice, deoarece problemele legate de precizie, existente în realitate, nu se manifestau în simulările digitale generate.

Cea de-a doua aplicație, REAL_TIME, depinde de mișcările unui operator, surprinse în timp real de senzorul Kinect. Pentru transmiterea geometriei acestor mișcări către robot, a fost necesară corelarea spațiului în care se desfășoară mișcările umane cu spațiul de lucru al robotului. Astfel, s-a definit un volum de mișcare pentru operator delimitat de spațiul dintre doi cilindri concentrici. În situația în care mișcările ieșeau din acest spațiu, acestea erau proiectate pe suprafața cilindrului celui mai apropiat. Ulterior, geometria descrisă de mișcări era scalată proporțional pentru a se încadra în limitele accesibile ale spațiului de lucru al robotului.

Fabricație.

La prima aplicație, PICK_AND_PLACE, robotul pornea de la un punct fix în spațiu, unde i se așezau succesiv cubulețe în aceeași poziție, fiecare fiind prins prin atracția magnetului montat pe robot. Deoarece cuburile erau poziționate manual, existau mici variații de poziționare, astfel că robotul trebuia să efectueze mișcări lente deasupra lor, descriind o traiectorie

circulară mai extinsă pentru a asigura prinderea magnetică corectă între cub și unealta robotului. Ulterior, robotul se deplasa către ansamblu cu o viteză mai mare, iar la apropierea de structura deja montată urma operația de atașare a cubului. Pentru a nu afecta stabilitatea structurii deja asamblate, robotul nu executa mișcări verticale sau orizontale directe, ci o traiectorie de atașare la un unghi calculat în spațiu, care ținea cont de poziția și orientarea pieselor deja integrate în ansamblu. În ultima fază, poziționarea finală a cubului se realiza cu viteză redusă, pentru a permite magneților să se atragă.



Figura 80. ROBOTS IN ARCHITECTURE, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2012, imagini cu expunere lungă din timpul aplicației REAL_TIME.

În cadrul aplicației REAL_TIME, nu a fost necesară utilizarea unei unelte speciale, însă pe robot a fost montat un corp luminos, un neon, pentru a face procesul mai vizual și ușor de urmărit. Dat fiind caracterul dinamic al aplicației, rezultatul putea fi observat în timp real. Pentru documentarea procesului, au fost realizate filme și fotografii cu expunere lungă, care au surprins traiectoriile și mișcările robotului iluminat pe intervale de timp extinse. Provocarea acestei aplicații a fost gestionarea feedback-ului continuu din procesul de interacțiune. Corelarea dintre mișcarea reală a operatorului, captată de senzor și procesata în Grasshopper, și generarea ulterioară a codului transmis către robot a condus la apariția unor întârzieri în răspunsul acestuia. Deși scriptul a fost optimizat pentru a reduce aceste întârzieri, nu s-a reușit obținerea unei mișcări complet fluide. Astfel, optimizarea continuă a timpului de reacție și a fluidității mișcării reprezintă direcții de explorat pentru cercetările viitoare.

5.3.2. ROBO_CRAFT WALL

Autori: Ionuț Anton, Daniela Anton

ROBO_CRAFT reprezintă o serie de proiecte de cercetare ce își propun să exploreze utilizarea roboților industriali în creația și fabricația artefactelor arhitecturale. Cercetarea se concentrează pe utilizarea robotului industrial

ABB IRB140 și pe testarea potențialului său creativ în procesul de proiectare, prin dezvoltarea unor aplicații diferite.

Primul proiect din această serie dezvoltă o aplicație de fabricație robotică prin tăiere cu fir încins a unui obiect compus din 81 de componente volumetrice distincte, realizate prin operații de substracție. Scopul a fost investigarea unei metode de fabricație volumetrică care utilizează un material relativ accesibil și reciclabil. În comparație cu procedeul de frezare, tăierea cu fir încins oferă o viteză mult superioară, dezavantajul constând în imposibilitatea de a genera suprafețe cu dublă curbură. Deși polistirenul nu un material apreciat, este ușor de modelat și poate fi folosit ca matriță pentru materiale precum betonul, ipsosul sau ceramica. Intenția a fost de a aborda un principiu familiar practicii de arhitectură, cel al suprapunerii elementelor, însă de această dată acestea au fost variabile. Totodată, au fost explorate aspecte legate de materialitate, precum apertură, textură, model și stabilitate.

Proces. Căutare formală.

Fiind prima aplicație dezvoltată cu robotul, s-a propus realizarea unui obiect arhitectural simplu, astfel fiind ales un perete vertical obținut prin articularea componentelor. Pentru a asigura stabilitatea acestuia fără a recurge la elemente suplimentare de susținere, peretele capătă o formă sinuoasă în plan.

Peretele este compus din componente volumetrice, pornind de la principiul arhitectural de construire din cărămizi, însă în contextul fabricației robotice fiecare cărămidă este unică. Geometria peretelui exprimă o trecere variabilă, dar continuă, obținută prin alăturarea acestor componente diferite.

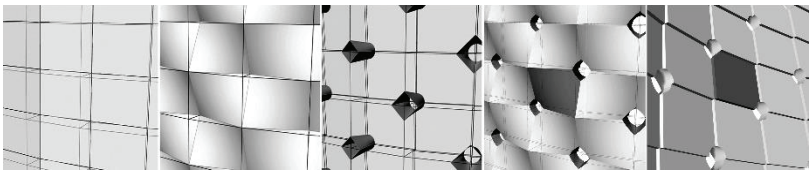


Figura 81. ROBO_CRAFT WALL, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2013, proces de generare a formei componentelor

Procesul de generare a geometriei începe cu popularea unei suprafețe verticale, sinuoase în plan, cu componente volumetrice. Rezultatul este un perete cu grosime, cu perforații alternative și variabile și cu variații de textură. Obiectul prezintă două fețe diferite, din dorința de a explora două grade de variabilitate: pe o față, geometria componentelor variază în funcție de forma globală, fiind influențată atât de variația parametrică a razei perforațiilor, cât și de adâncimea suprafeței riglate; pe fața opusă, perforațiile prezintă o rază constantă, iar componentele sunt ușor decalate, însă dimensiunile lor rămân constante, astfel că variabilitatea este dată doar de forma sinuoasă suprafeței.

Geometrie, model și subdivizare.

Modelul pornește de la un grid pătrat, care este transformat în volum prin extrudarea celulelor. Componentele sunt împărțite alternativ, după modelul tablei de șah. Se realizează tăieturi pe colțurile de pe diagonala fiecărui component, astfel încât în noduri alternative să se realizeze un gol complet.

Tăieturile realizează o trecere treptată de la un contur de formă pătrată cu dimensiune variabilă către față, la un contur de cerc cu aceeași rază către spate. Procesul de tăiere cu fir încins exclude realizarea de suprafețe cu dublă curbură, de aceea geometria componentelor este generată din suprafețe plane sau suprafețe riglate.

Suprafața componentelor dinspre fața peretelui este determinată de o suprafață riglată, astfel încât, în nodurile ce alternează cu golurile, să se realizeze intersecția punctelor de înălțime maximă a celor patru suprafețe riglate ce se întâlnesc. În acest mod se determină o suprafață continuă, unde componentele se aliniază. Astfel, către față, sunt două criterii de variabilitate: primul este dimensiunea golurilor pătrate, iar al doilea, înălțimea variabilă a suprafețelor riglate. Variația parametrică a dimensiunii golurilor și a înălțimii suprafeței riglate este determinată în funcție de apropierea față de un punct de influență localizat în zona mediană a extremității peretelui, ceea ce permite obținerea unei game largi de rezultate.

Pe partea opusă, componentele prezintă o față plană, însă sunt ușor înclinate în plan vertical, cu aceeași distanță, generând astfel un efect volumetric dinamic. Această configurație contribuie la crearea unei imagini

uniforme, susținută și de păstrarea constantă a dimensiunii și geometriei golurilor.

Metodă de articulare. Fabricație.

Roboții industriali sunt foarte flexibili și pot fi utilizați în procese diverse, datorită posibilității de a li se atașa unelte diferite. În acest caz, a fost folosită o furcă construită special pentru robot, realizată din profile de aluminiu cu fir încins, proiectată ținând cont de dimensiunile pe care robotul le poate manipula, greutatea maximă pe care o poate ridica și volumul pe care îl poate prelucra.

Tăierea cu fir încins este un procedeu de substracție, care presupune eliminarea succesivă a materialului dintr-un volum inițial. Materialul folosit a fost polistirenul expandat grafitat, ceea ce a limitat grosimea componentelor la 10 centimetri.

Toate componentele se înscriu într-un volum standard, al cărui dimensiune a fost stabilită prin modularea plăcii standard de polistiren, astfel încât să se obțină pierderi minime. În stabilirea dimensiunii volumului standard s-a ținut cont și de erorile ce pot apărea, deoarece volumul este poziționat manual în poziția de tăiere. Ca primă etapă de fabricație, robotul a tăiat pe rând piesele identice în care se înscriu componentele din placa de polistiren.

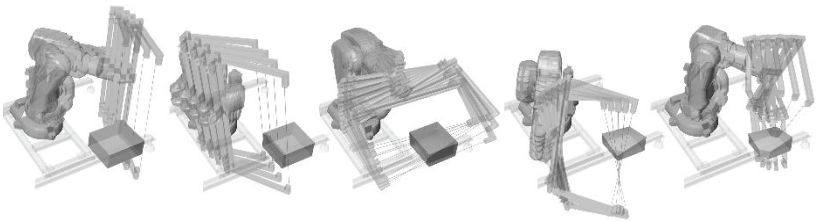


Figura 82. ROBO_CRAFT WALL, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2013, simularea mișcării robotului pentru prelucrarea unui component

Peretele a fost realizat din 81 de componente cu geometrie variabilă, însă procesul de fabricație robotică a fost împărțit în pași repetați. Astfel, pentru fiecare componentă s-au realizat cinci tăieturi succesive, dar variabile ca poziție. Primele două operații elimină, pe rând, două dintre lateralele componentelor. A treia operație constă într-o mișcare realizată

în lanț, care taie a treia laterală, realizează suprafața riglată și taie ultima laterală. Urmează cele două operații care elimină colțurile piesei, însă, deoarece piesele au goluri pe diagonale alternative, există două tipuri de mișcări. Astfel, operațiile de substracție se împart în două categorii de operații succesive.

Integrând în același algoritm atât generarea formală, cât și fabricația robotică, s-a implementat un sistem digital complet, care acoperă întregul flux de lucru: de la realizarea geometriei, la controlul parametric al robotului industrial și până la fabricarea efectivă.

După stabilirea pașilor succesivi de tăiere, procesul de tăiere a componentelor a fost simulat în mediul digital. Softul de programare a robotului verifica eventualele coliziuni între robot și furca cu fir încins, precum și existența punctelor inaccesibile robotului pentru decuparea componentelor. Integrând în același algoritm atât generarea formală, cât și fabricația robotică, s-a implementat un sistem digital complet, care acoperă întregul flux de lucru: de la realizarea geometriei, la controlul parametric al robotului industrial și până la fabricarea efectivă.

După stabilirea pașilor succesivi de tăiere, procesul de tăiere a componentelor a fost simulat în mediul digital. Softul de programare a robotului verifica eventualele coliziuni între robot și furca cu fir încins, precum și existența punctelor inaccesibile robotului pentru decuparea componentelor. Pentru a eficientiza procesul și a evita verificarea tuturor celor 81 de componente, suprafața a fost împărțită în patru intervale de testare, iar simulările s-au realizat pe limitele acestor intervale. Astfel, s-a simulat procesul de substracție pentru componenta cu cele mai mici goluri și cu suprafața riglată de cea mai mare înălțime, pentru componenta cu cele mai mari goluri și suprafața riglată de cea mai mică înălțime, precum și pentru câteva componente cu valori medii.

Pentru realizarea acestor simulări, furca de tăiere cu fir încins a fost modelată în mediul virtual. Totuși, au existat mici diferențe între modelul real și cel virtual, diferențe care au trebuit măsurate și traduse în modelul digital, pentru ca simulările să fie cât mai apropiate de situația reală.

Măsurătorile acestor decalaje au fost esențiale, având în vedere importanța preciziei atunci când lucrăm cu unelte de fabricație digitale și când raportăm situația reală la un model virtual ideal.

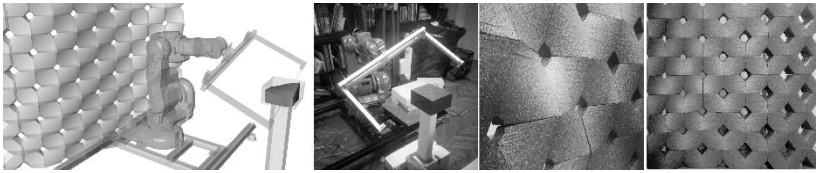


Figura 83. ROBO_CRAFT WALL, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2013, imagini cu procesul de fabricație și peretele asamblat

Simularea detectează coliziunile prin evaluarea poziției robotului secvențial, adică la anumite momente de-a lungul traiectoriei. Deoarece simularea nu analizează mișcarea robotului ca un proces continuu, au apărut situații în care, deși simularea nu indica coliziuni, robotul s-a lovit cu furca în timpul procesului de fabricație. Acest fenomen a fost cauzat de faptul că, între punctele de evaluare ale simulării, coliziunile mici, de ordinul 1-2 milimetri, au trecut neobservate. Dacă existau coliziuni sau operația nu putea fi realizată, geometria trebuia ajustată parametric. Datorită legăturii dintre geometrie și procesul de fabricație, a fost posibil un feedback instantaneu între acestea. După tăierea fiecărui component, acesta era numerotat și asamblat prin lipirea de vecinii săi, conform ordinii din modelul 3D.

5.3.3. ROBO_CRAFT LIGHT

Autori: Ionuț Anton, Daniela Anton

Al doilea proiect din seria ROBO_CRAFT explorează o nouă aplicație robotică, de această dată axată pe desenul cu lumină. Ideea este de a testa capacitatea robotului de a se deplasa la coordonate precise în spațiu cu o mișcare continuă, corelând în același timp controlul unui LED care se aprinde și își schimbă culoarea, astfel generând un volum modelat în mediul virtual. În această aplicație, fabricația devine imaterială, rezultatul concret fiind fotografii cu expunere lungă, care surprind pozițiile prin care a trecut LED-ul și schimbările sale de culoare.

Procesul de lucru implică numeroase aspecte virtuale: modelul ce urmează a fi reprezentat este creat în mediul digital, apoi se simulează mișcările robotului în același mediu virtual. În final, robotul execută fizic acele mișcări corelate cu controlul LED-ului, generând o imagine în lumea reală, dar care rămâne o reprezentare virtuală a conceptului inițial. Astfel,

procesul combină concepția virtuală, cu un rezultat lipsit de permanență lumea reală și o fabricație fizică, dar non-materială.

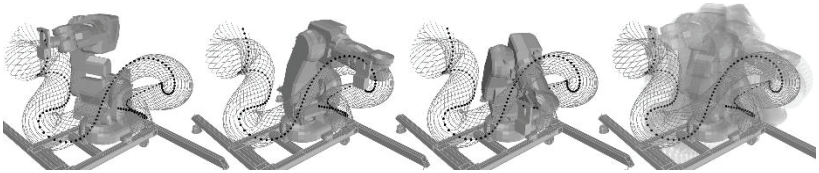


Figura 84. ROBO_CRAFT LIGHT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, simularea mișcării robotului pentru una dintre geometriile generate

Proces. Căutare formală.

Această aplicație urmărește reprezentarea unei geometrii tridimensionale generate prin proiectare parametrică, în spațiu. Rezultatul este tridimensional, dar efemer, motiv pentru care a fost necesară găsirea unei metode de vizualizare adecvate. Astfel, desenul în spațiu este realizat prin montarea pe robot a unui LED RGB care își schimbă gradual culoarea. Mișcarea LED-ului este captată prin fotografii cu expunere lungă.

Geometrie, model și subdivizare.

Prin folosirea aceluiași mediu atât pentru generarea geometriei, cât și pentru controlul robotului, s-a reușit dezvoltarea mai multor tipuri de forme compatibile cu același proces. Pentru reprezentarea lor, aceasta trebuie aproximată prin puncte, linii sau curbe, deoarece desenul de suprafață este dificil de realizat folosind o sursă de lumină punctuală.

Primul model testat este un cub subdivizat în puncte, fiecare punct având o culoare diferită, ceea ce generează un efect de degrade. Cea de-a doua geometrie testată a fost generată din curbe, formând o țesere care creează un tub cu grosime variabilă, răsucit în spațiu. Robotul se deplasează de-a lungul fiecărei curbe subdivizate, schimbând culoarea fiecărui segment în funcție de apropierea de câteva puncte de influență din spațiu, ce determină anumite culori.

O altă geometrie pornește de la realizarea unei suprafețe minimale tridimensionale subdivizate, prin desenarea unei curbe pe fiecare celulă a suprafeței. În acest caz, tranziția între două culori se face în funcție de

adâncime. S-a urmărit un proces selectiv, alegând doar curbele vizibile din întreaga geometrie, astfel încât să nu se suprapună. Pentru o redare corectă a imaginii, fotografia este realizată din același punct de vedere din care a fost calculată vizibilitatea.

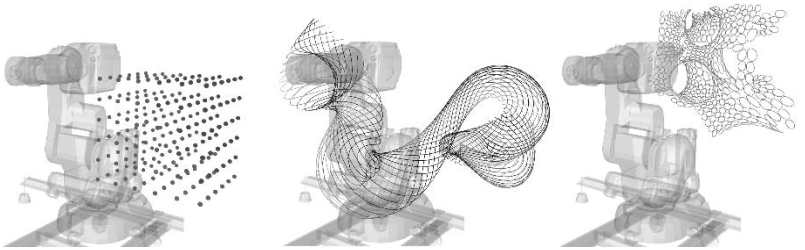


Figura 85. ROBO_CRAFT LIGHT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, simularea în mediul digital a dimensiunii și culorii geometriilor generate

Fabricație.

ROBO_CRAFT LIGHT se folosește de capacitatea mașinilor cu control numeric, în acest caz, a roboților industriali, de a reda linii și puncte cu mare precizie în spațiul tridimensional. Pentru această aplicație a fost construit un accesoriu personalizat, compus dintr-un LED RGB și un microcontroler Arduino.

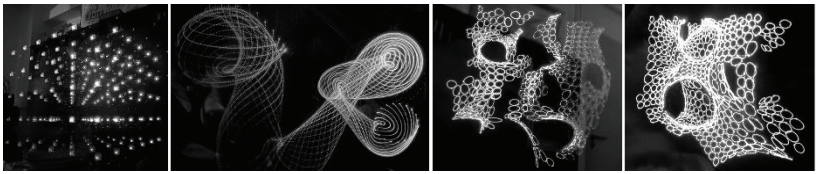


Figura 86. ROBO_CRAFT LIGHT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, imagini cu expunere lungă a desenelor cu lumina

În acest caz, provocarea a fost coordonarea dintre LED-ul RGB și poziționarea robotului în spațiu. S-a constatat că, deși robotul se deplasează la coordonate precise, timpul de mișcare nu poate fi determinat cu aceeași exactitate. Dacă aprinderea sau schimbarea culorii

LED-ului era programată în funcție de coordonate calculate pe baza timpului, apăreau întârzieri, iar desenul nu se reda corect.

Aceste diferențe de poziționare ale robotului în raport cu timpul sunt determinate de controlerul robotului care îi comandă mișcarea. Prin urmare, comenzile către LED trebuie sincronizate cu controlerul. Deoarece datele referitoare la poziția în spațiu sunt cele mai precise, acestea au fost folosite pentru sincronizare: în momentul în care robotul ajunge într-un anumit punct, controlerul transmite comanda către LED.

A fost realizată o legătură între controlerul robotului și placa Arduino, care comunică informații în limbaj binar. În acest mod, controlerul transmite către Arduino coduri de culoare pentru LED-ul RGB. A fost dezvoltat un cod adaptat la acest proces specific pentru placa Arduino, iar culorile RGB au fost codificate în Grasshopper în limbaj binar, pentru a putea fi transmise în ordine sub forma unei combinații de nouă cifre, formate din 0 și 1. Această metodă asigură o coordonare perfectă între mișcarea robotului și culoarea luminii în punctele precise din spațiu.

5.3.4. ROBO_CRAFT PAINT

Autori: Ionuț Anton, Daniela Anton

Cel de-al treilea proiect din seria ROBO_CRAFT explorează diferite metode de abstractizare a fotografiilor de tip portret. Punctul de plecare a fost identificarea unei modalități prin care robotul industrial să poată fi folosit pentru realizarea de imagini fotografice. Imaginile obținute reprezintă portrete ale vizitatorilor din cadrul unei expoziții, motiv pentru care a fost concepută o aplicație interactivă. După realizare unei fotografii de tip portret, aceasta este prelucrată printr-un proces digital automat, se simulează mișcările robotului, apoi informația rezultată este transmisă către controlerul robotului, care o reproduce sub forma unui desen într-un timp relativ scurt.

Rezultatul este o interpretare abstractă a unei imagini reale, iar fiecare execuție este unică, deoarece robotul, simulând un act artistic, se mișcă diferit de fiecare dată și generează un alt portret. Astfel, se demonstrează că roboții industriali pot fi utilizați și în afara repetării unor mișcări prestabilite, explorând domenii creative. Desenele realizate nu sunt foto-realiste, ci trec printr-un proces digital de transformare, astfel încât să poată fi reproduse de robot. Fotografiile sunt abstractizate printr-un algoritm și transformate într-un model geometric.

Prin această aplicație s-a urmărit utilizarea robotului într-un proces care să îl îndepărteze de mediul industrial, cu care este cel mai des asociat. S-a intenționat simularea unui proces creativ, pentru a demonstra că robotul este o unealtă accesibilă și versatilă. Prin implicarea roboților industriali în medii care nu pun accent exclusiv pe eficiență, aceștia pot contribui la dezvoltarea procesului creativ.

Proces. Căutare formală.

Pornind de la ideea de a folosi robotul industrial cu o unealtă de desen pentru realizarea portretelor, s-au explorat mai multe strategii de abstractizare a fotografiilor. Având ca punct de plecare imagini alb-negru, a fost necesară dezvoltarea unui principiu de tratare diferențiată a zonelor de gri, în funcție de intensitate. Din fotografii se selectează puncte după diverse modele geometrice și se citește valoarea nivelului de gri în fiecare punct. Această valoare este utilizată pentru a reconstrui imaginea folosind mai multe modele geometrice.

Geometrie, model și subdivizare.

Au fost explorate mai multe principii de abstractizare a fotografiilor, ajungându-se la cinci variante testate pentru a o alege pe cea optimă.

Pentru prima variantă, s-a pornit de la o aplicație similară dezvoltată de Peter Vikar (Vikar 2012). A fost creat un script care transformă imaginea într-o serie de linii paralele, cu grosime variabilă, calculată în funcție de intensitatea nivelului de gri din punctele aflate pe aceste linii.

A doua variantă se folosește de un grid suprapus peste fotografie și citește valorile din punctele de pe această grid. Aceste valori sunt împărțite în trei intervale, pentru care se desenează trei semne, de la deschis la închis: pentru griurile deschise se trasează o linie la 45 de grade, cu lungimea de jumătate din unitatea gridului; pentru intervalul de griuri medii se trasează o linie la 45 de grade egală cu unitatea gridului, iar pentru intervalul cu griurile cele mai închise se trasează o linie la 45 de grade și o linie orizontală, ambele egale cu o unitate.

Următoarele trei variante trasează linii cu lungime variabilă, în funcție de intensitatea din punctul respectiv al fotografiei. Aceste valori sunt preluate individual și determină lungimea liniei trasate, rezultând linii cu lungimi variabile.

A treia variantă folosește tot un grid pătrat pentru a citi valorile din punctele de pe grid și trasează linii la unghi de 45 de grade, cu lungime variabilă.

A patra variantă folosește o colecție de puncte generate aleatoriu pentru a citi valorile și trasează linii de dimensiuni diferite și la unghiuri diferite, determinate tot în funcție de valorile citite.

A cincea variantă pornește tot de la o colecție de puncte dispuse aleatoriu, dar folosește o strategie de optimizare a poziționării punctelor. Printr-un script, punctele inițial alese aleatoriu își modifică poziția printr-un proces iterativ, ajungând în final să fie mai dese în zonele cele mai întunecate (Yazdani 2012). În aceste puncte se trasează linii cu lungime variabilă, rotite la unghiuri diferite, în funcție de valorile citite.

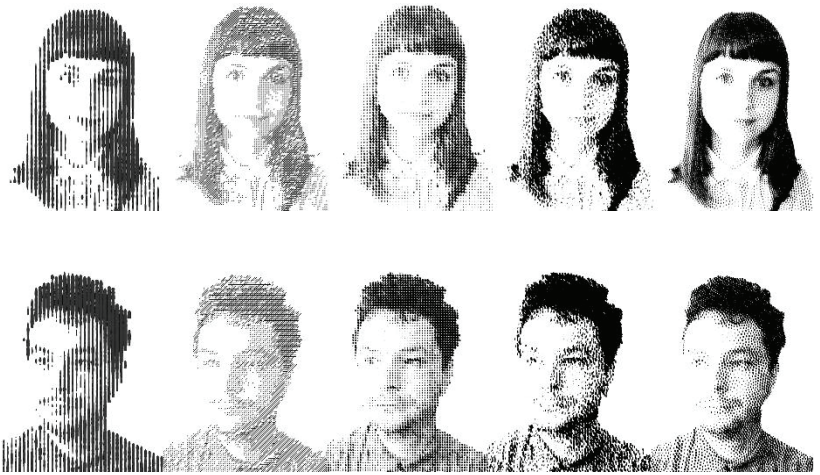


Figura 87. ROBO_CRAFT PAINT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, variante de abstractizare a fotografiilor de tip portret

S-a urmărit optimizarea procesului de lucru pentru a realiza cât mai multe portrete și pentru ca acestea să poată fi produse într-un timp rezonabil, astfel încât vizitatorii să nu-și piardă interesul. Au fost realizate numeroase teste, variind numărul de puncte și dimensiunea desenului, urmărindu-se ca timpul de execuție să fie sub 30 de minute, iar imaginea rezultată să fie recognoscibilă. Folosind o serie de imagini de bază, fluxul de lucru a fost perfecționat, iar în final au fost selectate două strategii, varianta numărul

trei și varianta numărul cinci, care au fost implementate într-un script folosit în ziua expoziției.

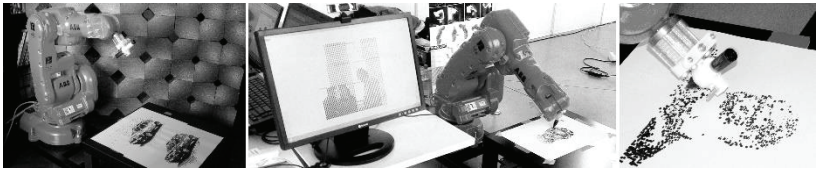


Figura 88. ROBO_CRAFT PAINT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, imagini de pe parcursul procesului de fabricație

Fabricație.

ROBO_CRAFT PAINT utilizează un o unealtă personalizată atașată robotului, o piesă printată 3D, care are rolul de a fixa un marker. Pentru a obține tușe de dimensiuni diferite, s-a folosit un marker cu vârful teșit. Robotul schimbă orientarea pentru a realiza linii cu dimensiuni și rotații diferite. Pentru eficiență, robotul trasează succesiv, în ordine crescătoare, liniile de aceeași dimensiune, evitând astfel rotațiile multiple pentru fiecare tușă, care ar consuma timp.

Aplicația ROBO_PAINT a fost testată în cadrul unei expoziții interactive, unde au fost realizate 20 de portrete diferite ale vizitatorilor, pe durata celor 7 ore ale evenimentului.

Capitol 6.

CONCLUZII

6. CONCLUZII

Tehnologiile digitale au influențat practica arhitecturală, nu ca o revoluție bruscă, așa cum se proclama în urmă cu câțiva ani, ci mai degrabă ca o evoluție firească și un proces gradual de apropriere. Fascinația inițială pentru noutatea, precizia și eficiența uneltelor digitale a lăsat loc unei abordări critice. Astăzi, provocarea constă în adaptarea și transformarea acestor tehnologii, inițial concepute pentru alte domenii, și integrarea lor creativă în arhitectură.

Calculatorul nu mai este doar un instrument de reprezentare, ci o unealtă generativă, parte integrantă a procesului de proiectare. Arhitectul nu mai are postura demiurgică de altădată, ci acționează ca mediator între concept și construcție, prin intermediul mediului digital. În acest context, fabricația a evoluat de la simplu mijloc de producție la element semnificativ în procesul de proiectare.

6.1. De la meșteșug la fabricația digitală

Cercetarea a evidențiat modul cum s-a transformat procesul de materializare de-a lungul timpului, ca rezultat al evoluției rolului celui care îl creează, a obiectului și a uneltelor, în relație cu dezvoltarea tehnologică.

Artefact

Caracteristicile obiectelor realizate de meșteșugarii tradiționali sunt unicitatea, raritatea și timpul investit în realizarea lor. Aceste trăsături se potrivesc lucrului de mână, prin care se obțin în mod inevitabil inevitabil obiecte diferite. Tocmai această inconsecvență a procesului de producție a generat nevoia de copie.

Realizarea de copii a pornit de la aspirația de a obține ceea ce mâna umană nu putea realiza constant, cu accent pe eficiență. Astfel, copiile au ajuns să fie produse în serie, într-un flux continuu, pentru a justifica costurile automatizării. Scara producției a crescut exponențial în numele eficienței, astfel în perioada industrială, creșterea a devenit o metodă de optimizare.

Obiectele concepute și fabricate digital combină trăsături ale meșteșugului tradițional cu caracteristici ale producției de serie. Astfel, variabilitatea devine parte a intenției de proiectare, poate fi programată, iar artefactul realizat digital poate integra variația și diferențierea în serie. Aceste obiecte au o trăsătură distinctivă: sunt diferite, dar similare.

În plus, datorită capacității de integrare a mediului digital, obiectul final nu mai reprezintă exclusiv impunerea viziunii autorului, ci devine un răspuns informat de multiple constrângeri și oportunități, rezultat al analizei și corelării unei mari cantități de parametri.

Unelte

Uneltele meșteșugarilor erau specifice fiecărei bresle, iar stăpânirea lor cu îndemânare făcea parte din procesul de ucenicie. În acest context, unealta devenea variabilă doar în mâinile meșterului, iar ceea ce diferența rezultatul era creativitatea și îndemânarea celui care o folosea. Evoluția tehnologică a transformat treptat uneltele meșteșugarilor, iar pe măsură ce munca manuală a fost înlocuită de mașini, sistemul de producție s-a complicat. În loc să devină mai simple, mașinile au evoluat către o complexitate mai mare pentru a obține procese complet automatizate. Astfel, mașinile de producție au fost articulate într-un sistem foarte rigid, incapabil de variație.

Uneltele digitale au avantajul de a fi precise, eficiente și capabile să gestioneze mari cantități de date. Totuși, această performanță tehnică nu este suficientă pentru a le justifica utilitatea în practica de arhitectură Prin explorarea posibilităților pe care le oferă, uneltele digitale pot influența proiectarea la nivel conceptual, având un potențial creativ semnificativ. Noile instrumente de proiectare și fabricație sunt flexibile și se pot adapta fiecărei situații specifice, devenind astfel parte integrantă din procesul de proiectare.

Creator

Artizanii tradiționali medievali erau, în același timp, atât cei care proiectau, cât și maeștri ai procesului de producție. Meșteșugul tradițional punea astfel împreună procesul de proiectare cu cel de materializare.

Odată cu automatizarea producției, oamenii au fost înlocuiți de mașini capabile să execute mai rapid și mai precis sarcini simple. Mașina a preluat rolul principal în producția propriu-zisă, în timp ce omul a fost repoziționat

ca forță de muncă abstractă, implicată în alte etape ale procesului. Mașina nu mai era o unealtă în mâinile meșteșugarului, ci principalul producător, supravegheat de oameni. Trecerea la producția în masă a dus la separarea rolurilor: mașinile se ocupau de materializare, iar proiectantul, adaptat formatului cerut de tehnologie, se concentra pe creație.

Tehnologia digitală oferă astăzi posibilitatea proiectantului de a se apropia din nou de procesul de materializare, asumând rolul unui „maestru de construcție digital". Mediul digital are avantajul de a pune la dispoziție unelte ce pot fi personalizate pentru fiecare proiect, iar mai important, îi permite proiectantului să își creeze propriile unelte, extinzând astfel domeniul creativ până la nivelul uneltelor în sine.

Transformarea procesului de proiectare

Tehnologia digitală le oferă arhitecților posibilitatea de a se implica direct în materializarea proiectului, putând concepe și adapta unelte extrem de flexibile la practica de arhitectură. Mediul digital devine astfel un spațiu comun în care creativitatea este pusă împreună cu uneltele conceptuale și cu cele de fabricație. Însă, pentru a valorifica pe deplin acest mediu, arhitecții trebuie să accepte un anumit grad de nedeterminare în procesul de generare a arhitecturii.

Accentul este pus pe orientarea către materializarea practicii arhitecturale, susținând integrarea metodelor de fabricație digitală încă din din primele etape ale procesului de proiectare. Uneltele digitale, fie ele de proiectare sau de fabricație, au evoluat de la simple instrumente de execuție la agenți generatori, capabili să influențeze conceptul. Prin implicarea acestor unelte în procesul creativ, se deschide un spațiu de explorare ce poate stimula imaginația și inovația.

Dacă, în primă fază, continuitatea dintre proiectarea digitală și uneltele de fabricație a fost exploatată mai ales pentru a realiza clădiri sculpturale cu formă o liberă, acum accentul se deplasează spre adaptarea acestor unelte la procesele creative. Așa cum, nu demult, produceam forme pe care nu știam cum să le construim, acum dispunem de tehnologii de fabricație pe care nu știm întotdeauna cum să le aplicăm. Deși performanța este mai ușor de obținut prin intermediul uneltelor digitale, miza nu ar trebui redusă la capacitatea lor de management și control. Provocarea este să conectăm proiectarea contemporană și tehnologiile de fabricație cu

tradiția constructivă a arhitecturii, fără a copia procesele industriale, ci adaptându-le și folosindu-le creativ.

Tehnologiile digitale pot adăuga precizie intenției proiectului și pot contribui la eliminarea elementelor lipsite de fundament sau substanță. Abstractizarea procesului de proiectare impune claritate în formularea conceptului, însă acest lucru nu presupune înlăturarea dimensiunii intuitive a proiectării. Arhitectura rămâne un proces complex, care poate să combine mai multe abordări, atât gândirea intuitivă cât și cea analitică și precisă. Astăzi, accentul nu mai este pus pe proiectarea formei finale, ci pe proiectarea procesului de producție în sine. Ideea și metoda de fabricație se definesc încă din etapa de concepție, iar construcția este înțeleasă ca parte integrată a proiectării, așa cum se întâmpla în perioada meșteșugărească. Integrarea programării în practica arhitecturală permite ca uneltele digitale să fie, la rândul lor, proiectate, orientând întregul proces către materializarea proiectului.

Tehnologiile digitale tind să readucă în practica de proiectare ideea de meșteșug, ca moment în care proiectarea era într-o relație mai strânsă cu materializarea. Totuși, meșteșugul digital nu reprezintă o întoarcere nostalgică la procesele tradiționale, în care uneltele de mână sunt înlocuite cu unele digitale. Nu este nici un proces determinat în întregime digital, fără input creativ. Utilizarea acestor unelte transformă atât procesul, cât și modul de abordare al proiectantului. Meșteșugul digital îmbină caracteristici ale producției automatizate cu cele ale meșteșugului tradițional, punând împreună precizia, consecvența, predeterminarea cu implicarea directă a proiectantului, subiectivitatea și creativitatea acestuia.

6.2. Explorări în domeniul fabricației digitale

Lucrarea explorează interacțiunea directă cu uneltele digitale de fabricație prin trei metode le lucru complementare, menite să investigheze potențialul lor creativ. Aceste direcții includ: workshop-uri ca dezvoltare a unei teme date, dar fără un rezultat prestabilit; obiecte de design realizate ca interpretări personale; și experimente de fabricație robotică, abordate ca cercetare exploratorie pentru aplicații viitoare.

Workshop-urile

Workshop-urile organizate au avut ca obiectiv oferirea profesioniștilor din domeniile creative a oportunității de a testa potențialul uneltelor digitale

în procesele de design și fabricație. Prin realizarea de obiecte fizice generate și fabricate digital, acestea au urmărit integrarea și împletirea dimensiunilor materiale cu cele digitale.

Elaborarea temei și desfășurarea procesului creativ în cadrul workshop-urilor au devenit o metodă de cercetare prin proiect, structurată și delimitată prin tema propusă. Aspectele organizatorice, precum timpul limitat de lucru, accesul restrâns la materiale și la tehnologiile de fabricație digitală, au impus constrângeri ce au fost abordate direct prin formularea temei. Această abordare reflectă practica arhitecturală, care combină logica obiectivă cu gândirea creativă. Stabilirea temei a presupus o etapă de documentare și de selecție atentă a metodei de fabricație, a materialului, a scării de producție, precum și a modului de corelare a acestora într-un subiect relevant pentru proiectare. În procesul de dezvoltare a temei, au fost previzionate etapele de lucru și anticipate dificultățile potențiale, astfel încât formularea finală să minimizeze o parte dintre posibilele probleme.

Workshop-urile se desfășoară în două etape distincte: o primă etapă de prezentare a uneltelor de lucru, în care participanții acumulează informații teoretice și practice, și o a doua etapă dedicată explorării și testării propriei viziuni. Având în vedere durata redusă a desfășurării și caracterul nou al informațiilor, participanții sunt ghidați de tutori pentru a ajunge la un rezultat posibil. Astfel, workshop-urile funcționează mai degrabă ca o introducere în subiect pentru participanți, care intră în contact cu uneltele digitale. Chiar dacă tema workshop-urilor este clar definită, acestea au un final deschis. După prezentarea uneltelor digitale, cursanții explorează activ posibilitățile acestora, combinându-le cu propria creativitate, sub îndrumarea tutorilor, într-un proces flexibil și experimental. Totuși, și rezultatul final are o importanță semnificativă, constituind un instrument de feedback pentru evaluarea relevanței subiectului propus prin temă, pentru analiza modului în care participanții interacționează cu noile unelte prezentate și pentru observarea adaptării procesului creativ la noile condiții de lucru impuse de acestea.

În conceperea programului de desfășurare, un aspect esențial îl reprezintă timpul necesar fabricării obiectelor. Deși percepute ca rapide, metodele de fabricație digitală implică timpi considerabili, atât pentru procesarea și execuția pieselor, cât și pentru asamblare. Când proiectul presupune numeroase componente distincte, procesul de montaj devine laborios, ceea ce impune integrarea în modelul digital a metodelor de articulare și

orientare a elementelor. Astfel, în pregătirea workshop-urilor sunt integrate aspecte legate de optimizare, previzionare și testare, prin care se realizează atât o cercetare a proceselor, cât și o explorare creativă, constituind o formă de cercetare prin proiect.

Prin interacțiunea participanților cu aspecte legate de materializare, aceștia realizează că mediul digital nu oferă unelte complet automate care să permită realizarea eficientă a oricărei forme. Întregul proces, de la concepere la fabricație, trebuie previzionat și abstractizat de către proiectant.

Workshop-ul, ca modalitate de lucru, se dovedește a fi un mijloc eficient de transfer de cunoștințe între cercetarea primară, realizată de tutori, și comunitatea practicii de arhitectură. În acest fel, se urmărește punerea la dispoziția comunității a unui set de metode de lucru dezvoltate și testate, care pot fi ulterior aplicate și adaptate în propriile practici. Scopul este de a demonstra că aceste noi unelte de lucru sunt accesibile, personalizabile și capabile să stimuleze dezvoltarea creativității și imaginației.

Design de obiect

Realizarea obiectelor de design prin mijloace digitale a urmărit stabilirea unei legături între proiectarea computațională, metodele de fabricație digitală și material. Domeniul designului de obiect, având constrângeri mai reduse decât proiectarea arhitecturală, permite o abordare orientată preponderent către explorarea creativă. În acest context, au fost implicate unelte digitale în cadrul practicii de design pentru a investiga modul în care acestea pot influența procesele de creație și fabricație.

Cercetarea a abordat două dimensiuni principale: una legată de metoda de lucru și cealaltă de analiza obiectului final. În primul rând, s-a urmărit documentarea procedeului de lucru ca formă de abstractizare a procesului de design și fabricație prin cod. În al doilea rând, analiza rezultatului material a fost folosită pentru a evalua influența procesului digital asupra obiectului final, oferind perspective asupra relației dintre mijloacele digitale și produsul creat.

Metoda de lucru se bazează pe un proces de feedback continuu între concept, metoda de fabricație și material. Obiectul rezultat este produsul unui proces evolutiv, care combină creativitatea cu atributele uneltelor digitale. În cadrul acestui schimb, capacitățile digitale sunt interpretate subiectiv, transformând procesul creativ, în timp ce cerințele conceptuale

sunt abstractizate și transpuse în cod. Scopul nu a fost obținerea unui proces complet digital, ci explorarea relației dintre metodele intuitive de proiectare și cele analitice computaționale, precum și între fabricația digitală și procesele tradiționale de materializare.

Fiecare proiect dezvoltă o strategie de lucru specifică, în funcție de scară, tip de obiect, material și metodă de fabricație. Totuși, toate proiectele ajung să reflecte într-o anumită măsură caracteristicile uneltelor digitale utilizate, fie în faza de concepție, fie în cea de fabricație. Forma obiectelor este adesea compusă din componente diferite, explorând modele geometrice complexe care evidențiază metode digitale de deformări topologice. Precizia în articularea pieselor distincte este un alt atribut definitoriu al mediului digital de proiectare și fabricație. În același timp, obiectele păstrează urmele procesului de fabricație: piesele din placaj tăiate cu laser pot avea canturile arse, iar obiectele printate 3D păstrează textura straturilor succesive. Toate aceste detalii devin parte integrantă a procesului de design, contribuind la expresivitatea și autenticitatea obiectului final.

Deși obiectele realizate au dimensiuni reduse, atât procesul de lucru, cât și metodele de fabricație pot fi extrapolate și aplicate la scară arhitecturală. Accentul este pus pe articularea componentelor, integrată în concept, pe interacțiunea cu mediul fizic și pe textură, aspecte caracteristice și pentru practica de arhitectură. În plus, uneltele de fabricație utilizate sunt în continuă dezvoltare și sunt concepute pentru a putea fi aplicate la scară mai mare, vizând realizarea componentelor arhitecturale.

Fabricație robotică

În cadrul cercetării, interesul s-a concentrat asupra uneltelor de fabricație extrem de versatile, respectiv roboții industriali. Obiectivul a fost dezvoltarea de aplicații ce pun accent pe gradul crescut de flexibilitate al acestor unelte de fabricație digitală.

Cercetarea are un caracter exploratoriu, în sensul de a identifica și testa noi procese de fabricație care să utilizeze roboții industriali. Deoarece implicarea acestora în domeniul creativ este relativ recentă, referințele la aplicații robotice rămân limitate, deși în creștere, datorită diversității potențialelor aplicații. Un obstacol în explorare îl reprezintă programarea roboților, care este de regulă realizată individual de fiecare utilizator, într-un mod foarte specific și adesea inaccesibil.

Pentru că roboții industriali sunt mașini cu mișcări complexe, de obicei pe șase axe, interacțiunea cu aceștia a fost până recent accesibilă doar utilizatorilor cu cunoștințe avansate de programare. În ultimii ani, însă, au început să apară unelte tot mai intuitive și vizuale, care facilitează medierea între spațiul tridimensional și codul necesar roboților. Chiar și așa, pentru a adapta roboții la diferite procese, este esențială cunoașterea modului lor de lucru, a caracteristicilor tehnice și a modului în care aceștia interpretează informația.

Prin urmare, potențialul acestor unelte nu poate fi valorificat fără o înțelegere aprofundată a modului lor de lucru. În contextul fabricației cu roboți industriali, proiectarea devine un proces complet, care integrează atât mișcările robotului, cât și definirea end-efectorului și geometria obiectului. Astfel, proiectarea end-efectorului devine un factor definitoriu care personalizează procesul de fabricație pentru fiecare aplicație.

Aplicațiile dezvoltate cu ajutorul roboților industriali constituie experimente ce explorează un domeniu cu numeroase posibilități de aplicare în practica arhitecturală. Caracterul lor versatil provoacă creativitatea proiectanților, stimulând modalități noi de integrare a acestor unelte în arhitectură.

6.3. Direcții viitoare de cercetare

În contextul actual, în care digitalul se infiltrează în toate domeniile, este important ca arhitecții să se implice în dezvoltarea uneltelor digitale adaptate practicii lor specifice. Lipsa acestei implicări poate conduce la utilizarea uneltelor create de specialiști din domenii tehnice, ce pun accent pe precizie, automatizare și control, aspecte mai puțin compatibile cu proiectarea de arhitectură.

Prin implicarea activă a arhitectului în proiectarea uneltelor pentru fiecare proiect, procesul de lucru poate fi transformat astfel încât să fie mai accesibil și mai relevant pentru practicile creative. Odată asumat principiul de funcționare al uneltelor digitale, este probabil ca, pe termen lung, interfețele de lucru să devină tot mai intuitive, reducând sau chiar eliminând necesitatea programării.

Recunoscând potențialul creativ al uneltelor de fabricație digitală și integrându-le încă din etapa conceptuală a proiectului, practica de arhitectură poate fi reorientată către materializare. În acest fel, arhitectul

dobândește oportunitatea de a proiecta nu doar obiecte și spații, ci și noi procese și materiale prin intermediul uneltelor digitale.

Obținerea unui proces de lucru complet digital, de la design la fabricație, reprezintă una dintre direcțiile de cercetare pentru viitor. În acest context, proiectanții trebuie să transforme procesele emergente în practici proprii arhitecturii. Chiar dacă proiectele de cercetare axate pe sisteme emergente de fabricație nu oferă o aplicabilitate imediată, ele investighează noi posibilități deschise de uneltele digitale, punând accent pe adaptarea acestora la nevoile specifice ale practicii arhitecturale.

Un alt obiectiv îl constituie dezvoltarea sistemelor de fabricație flexibile și adaptabile la scară arhitecturală, pentru construcții *in situ*. În acest sens, sistemele de fabricație multi-agent sunt explorate ca variante posibile să se adapteze la condițiile specifice fiecărui sit.

Dezvoltarea acestor sisteme emergente de asamblare favorizează comportamente care se adaptează natural la condițiile locale. Programarea unui proces bazat pe sistemul multi-agent mută accentul proiectării de la obiectul final către comportamentul acestora, iar obiectul realizat nu poate fi în întregime previzionat. Astfel, controlul asupra rezultatului final este limitat. În acest cadru, transpunerea în cod a aspectelor sensibile și mai puțin cuantificabile ale proiectării devine o provocare semnificativă, dar esențială pentru integrarea proceselor emergente în arhitectură.

TABEL DE FIGURI

Figura 1. (a) Unelte de tâmplărie, (Joseph Moxon 1703), (b) Maestru aurar la atelier împreună cu ucenicii săi (*Saint Eligius in his workshop* 1440). Imagini libere de drepturi..... 13

Figura 2. (a) Reprezentări ale ordinelor clasice (Meyer 1898). (b) Tiparul Gutenberg (Rolt-Wheeler 1920, 213). Imagini libere de drepturi..... 16

Figura 3. Războiul de țesut Jacquard, care a fost adaptat la producția în masă, prin acționarea cu motor cu abur. (a) (*Popular Science Monthly Volume 39* 1891), (b) (Kohl 1889). Imagini libere de drepturi..... 20

Figura 4. Mașina Diferențială nr. 2 a lui Babbage, ce a fost finalizată în 1991 de către Muzeul de Știință din Londra. Procesul de realizarea a durat 17 ani și a încercat să respecte toleranțele și tehnologia pe care a avut-o autorul atunci când a conceput-o. (a) (Babbage 1864, 34), (b) (Britannica 2025). Imagini libere de drepturi..... 22

Figura 5. Canard Digérateur este un automaton sub formă de rață, creat de Jacques de Vaucanson în 1739. Intenția acestuia era de a realiza un mecanism care mănâncă și digeră, dar mecanismul nu a avut capacitatea de a face acest lucru (Chapuis și Droz 1958). Imagini libere de drepturi. 24

Figura 6. (a) Producerea unui sunet într-un templu odată cu deschiderea ușii (b) Aeolipile, primul motor cu aburi (c) Pasăre care cântă printr-un sistem mecanic (Heron of Alexandria 1851). Imagini libere de drepturi. 25

Figura 7. Bandă de asamblare la o fabrică de conserve (Https://Www.Scientificamerican.Com/Issue/Supplements/1883/08-18/ 1883). Imagine liberă de drepturi. 28

Figura 8. Modelul de flintă 1835, fabricat până în anul 1830, ilustrând principiul pieselor interschimbabile, inventat de Eli Whitney, pentru a putea fi înlocuite rapid, dar și produse în serie. Precizia era foarte importantă și era realizată cu ajutorul mașinilor de frezare (a) (Jandot 1940), (b) mașină de frezare (*The History of the Drilling Machine* 1917, 11). Imagini libere de drepturi. 33

Figura 9. Producția în masă în domeniul automobilelor, mașinile Ford T produse într-o singură zi la fabrica Highland Park Plant, mulțumită eficienței primei bande de producție dinamice. (a) (U.S. Information Agency, f.a.), (b) (Henry Ford Museum 1913). Imagini libere de drepturi. 36

Figura 10. (a) ENIAC la Laboratorul de Cercetare Balistică din Philadelphia (*ENIAC* 2014). imagine liberă de drepturi. (b) Camera de control a sistemului SAGE, monitor interactiv (*SAGE* 1950). Ilustrație realizată de autor..... 44

Figura 11. (a) serie de elemente identice (b) serie cu o singură variabilă (c) serie cu trei variabile. Variație parametrică realizată de autor. 55

Figura 12. Tehnologiile digitale transformă modul de producție, prin trecerea de la industrial la personalizat. The Economist a realizat un raport, care abordează fabricația digitală din punct de vedere economic (Markillie 2012). Ilustrație realizată de autor. 56

Figura 13. Folosirea unui soft de proiectare parametric permite personalizarea corpului de iluminat Aggregate Cells pentru fiecare utilizator. Algoritmul transferă informațiile din modelul digital mașinilor cu comandă numerică pentru producerea fiecărei articulații diferite. Componentele sunt realizate prin printare 3d cu plastic ABS si mai departe asamblate manual folosind și țeavă și accesorii din alamă. AGG_CELLS, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2015. 58

Figura 14. În cazul obiectelor fabricate prin frezare la router, modul în care mașina controlată numeric se mișcă rămâne imprimată pe obiectul final. (nervous system 2010). Ilustrație realizată de autor. 61

Figura 15. Model BIM, idz arhitectură, 2012, (Anton și Tănase 2014, 25) 68

Figura 16. Model BIM, idz arhitectură, 2011 (Anton și Tănase 2014, 22-23) 70

Figura 17. Instalații cu suprafețe minimale. (a) Marsyas / Anish Kapoor (Kapoor 2003), (b) Green Void / LAVA (LAVA 2008), (c) pAlice (SOFTlab 2009) Ilustrații realizate de autor. 76

Figura 18. Prin folosirea unui algoritm genetic se caută suprafața care are valoarea de energie solară absorbită minimă, dar care realizează și o umbră maximă. S-a pornit de la o suprafață realizată din subdiviziuni triunghiulare, cu fiecare triunghi perforat în funcție de cantitatea de energie solară absorbită. Algoritm genetic, Daniela Anton și Ionut Anton, 2013. 83

Figura 19. Simularea mișcării roboților industriali pentru mai multe tipuri de fabricație: pick_and_place, tăiere cu fir încins, frezare, Daniela Anton și Ionut Anton, 2013. 84

Figura 20. Obiectul Maelstrom este un instalație de artă, care a pornit de la un tablou realizat de artista Oana Olăhuț. Ionuț Anton a transformat desenul bidimensional într-un obiect care poate fi fabricat digital, folosind proiectarea computațională. Un model tridimensional a fost realizat, de aici s-au extras desene cu fațetele cu perforațiile de prindere care au fost tăiate cu mașini cu comanda numerică din tabla, conectate cu corniere pliate la unghiuri variabile. Ionuț Anton, 2019..... 90

Figura 21. Artistul francez Villemard și-a imaginat anul 2000 într-o colecție de cărți poștale, datând din 1910. Retro-futurism: Șantier electric (Vilemard 1910). Imagine liberă de drepturi. 94

Figura 22. Modelul parametric al structurii de acoperire. Great Court British Museum, Foster+Partners Londra, 1994 - 2000 (Pottmann et al. 2007, 394-95). Ilustrație realizată de autor. 102

Figura 23. (a) Shabolovka / Vladimir Shukhov (Shukhov 1919), (b) Buckminster Fuller / US pavilion Expo'67 (Fuller 1967), (c)

Orvieto Hangars / Pier Luigi Nervi (Nervi 1935). Ilustrație realizată de autor. 108

Figura 24. ICD/ITKE Research Pavilion 2011, ICD/ITKE Achim Menges & Jan Knippers, 2011 (Menges și Knippers 2011). Ilustrație realizată de autor. 110

Figura 25. Centre Pompidou-Metz, Shigeru Ban & Jean de Gastines, consultant pentru fabricație designtoproduction, 2010, Metz, Franța (Scheurer 2010, 90). Ilustrație realizată de autor... 111

Figura 26. *Structural Steel*, Arup & CRDM/3D Systems, proiect de cercetare, 2014 (Arup 2014). Ilustrație realizată de autor. 122

Figura 27. *Degenerate Chair*, Daniel Widrig, expus în cadrul colecției permanente la FRAC Centre în Orléans, Franța, 2012 (Widrig 2012). Ilustrație realizată de autor. 123

Figura 28. *Saltygloo*, Emerging Objects, 2013 (Emerging Objects 2013). Ilustrație realizată de autor..... 123

Figura 29. *Poroso*, Emerging Objects, 2013 (Emerging Objects 2014). Ilustrație realizată de autor..... 124

Figura 30. *3D printind clay*, 2014 (ELstudio 2014). Ilustrație realizată de autor..... 124

Figura 31. *Solar Sinter*, Markus Kayser, 2011 (Kayser 2011). Ilustrație realizată de autor. 125

Figura 32. *Makerchairs*, proiect de cercetare, 2014 (Laarman 2014a). Ilustrație realizată de autor..... 125

Figura 33. *Flexible Textile Structures*, [trans]LAB, proiect de cercetare ([trans]LAB 2014) (b) Kinematics, nervous systems, colier, 2008 (nervous system 2013). Ilustrație realizată de autor. 126

Figura 34. *Biomimicry: 3D printed soft seat*, Lilian van Daal, proiect de cercetare și design de obiect, 2014 (van Daal 2014). Ilustrație realizată de autor. 126

Figura 35. *Filament Sculptures*, LIA, 2014 (LIA 2014). Ilustrație realizată de autor. 127

Figura 36. *Guggenheim Museum*, Frank Gehry, 1997, BIlbao, Spania, (Glymph 2005). Ilustrație realizată de autor. 130

Figura 37. *Villa NURBS*, CLoud 9, componente din corian pentru fațadă 2003-2011, Girona, Spania (Ruiz-Geli et al. 2011, 158, 160) Ilustrație realizată de autor..... 132

Figura 38. *Villa NURBS*, CLoud 9, elemente ceramice pentru fațadă, 2003-2011, Girona, Spania (Ruiz-Geli et al. 2011, 158, 160; Ruiz-Geli 2003)(Ruiz-Geli et al. 2011, 158, 160; Ruiz-Geli 2003). Ilustrație realizată de autor. 133

Figura 39. *Metropol Parasol* – acoperirea de la Plaza de la Encarnacion, Jürgen Mayer, 2011, Sevilia, Spania (Mayer 2011). Ilustrație realizată de autor. 134

Figura 40. *Metropol Parasol* - acoperirea de la Plaza de la Encarnacion, Jürgen Mayer, 2011, Sevilia, Spania (Mayer 2011). Ilustrație realizată de autor. 135

Figura 41. *Galaxy Soho*, ZHA, 2009-2012, Beijing, China (Zaha Hadid Architects 2012). Ilustrație realizată de autor..... 137

Figura 42. *Smithsonian Institute Courtyard Enclosure*, Foster + Partners, 2004-2007, Washington, S.U.A (Foster and Partners 2004). Ilustrație realizată de autor..... 139

Figura 43. Sistemul fațadei, structura clădirii, structura spațială și panourile hexagonale. *Museo Soumaya*, FR-EE, consultant pentru fabricație Gehry Technologies, 2009-2011, Mexic (Sidelko 2013). Ilustrație realizată de autor. 140

Figura 44. Familiile diferite de panouri hexagonale și principiul de prindere. *Museo Soumaya*, FR-EE, consultant pentru fabricație Gehry Technologies, 2009-2011, Mexic (FR-EE și Gehry Technologies, f.a.) Ilustrație realizată de autor..... 141

Figura 45. Toate tipurile de roboți industriali de la ABB și KUKA, preluați din softul de simulare HAL. Daniela Anton și Ionut Anton, 2013 147

Figura 46. *R-O-B Structural Oscillations*, Gramazio & Kohler, 2007-2008, instalație, Bienala de Arhitectură de la Veneția (Gramazio și Kohler 2007). Ilustrație realizată de autor. 152

Figura 47. *Robotic Clay Molding*, Gramazio & Kohler, 2012, workshop, Barcelona (Gramazio și Kohler 2012b). Ilustrație realizată de autor. 153

Figura 48. *Landesgartenschau Exhibition Hall*, ICD/ITKE/IIGS University Stuttgart, 2014, Schwäbisch Gmünd (ICD et al. 2014). Ilustrație realizată de autor. 154

Figura 49. *Auto-Eclipsis, SCI-ARC*, proiect la Solar Decatlon, 2010 (King și Grinham 2012). Ilustrație realizată de autor. 155

Figura 50. *ICD/ITKE Research Pavilion 2013-14*, 2014, Stuttgart (Menges și Knippers 2013). Ilustrație realizată de autor. 156

Figura 51. *Clouds of Venice*, Supermanoeuvre & Matter Design, 2012 instalație în cadrul Bienalei de Arhitectură de la Veneția (Supermanoeuvre și Matter Design, f.a.). Ilustrație realizată de autor. 157

Figura 52. *Periscope: Foam Tower*, Matter Design, instalație, 2010 (Matter Design 2010). Ilustrație realizată de autor. 158

Figura 53. Fabricarea fațadei Patimilor de la *Sagrada Familia*, Mark Burry, 2010 (Burry 2012, 48,53,54). Ilustrație realizată de autor. 159

Figura 54. *Freemolding*, Yaron Elyasi, design de obiect, 2013 (Yaron Elyasi 2013). Ilustrație realizată de autor. 160

Figura 55. *Endless*, Dirk Van der Kooij, design de obiect, 2010 (Kooij 2010). Ilustrație realizată de autor. 161

Figura 56. *MX3D-Metal Printing*, Joris Laarman, proiect de cercetare, 2014 (Laarman 2014b). Ilustrație realizată de autor. 162

Figura 57. *ARUM*, Zaha Hadid Architects, consultant pentru fabricație RoboFold, 2012, instalație în cadrul Bienalei de Arhitectură de la Veneția (Zaha Hadid Architects și RoboFold 2012). Ilustrație realizată de autor. 163

Figura 58. *Stratifications*, Gramazio & Kohler, 2011, instalație în cadrul FABRICATE 2011, Londra (Gramazio și Kohler 2011b). Ilustrație realizată de autor. 164

Figura 59. *Procedural Landscapes 2*, Gramazio & Kohler, 2011, curs opțional la ETZ Zurich (Gramazio și Kohler 2011a). Ilustrație realizată de autor. 165

Figura 60. Flight Assembled Architecture, Gramazio & Kohler și Raffaello D'Andrea, 2011-2012, instalație la FRAC Centre Orléans (Gramazio și Kohler 2012a). Ilustrație realizată de autor. . 166

Figura 61. COMPONENT_BUILD, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, geometria componentelor 170

Figura 62. COMPONENT_BUILD, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, dezvoltarea componentelor pe suprafață 172

Figura 63. COMPONENT_BUILD, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, dezvoltarea geometriei de fabricație 176

Figura 64. INformed geometries, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, geometria rezultată din corelarea criteriilor de performanță 179

Figura 65. INformed geometries, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, modele variate de subdivizare 181

Figura 66. INformed geometries Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, modele printate 3D 182

Figura 67. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, proces de generare formală..... 183

Figura 68. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, varierea formei 184

Figura 69. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, corpul de iluminat fabricat 185

Figura 70. QUAD_LIGHT, Daniela Anton și Ionuț Anton, 2013, variante diferite 186

Figura 71. SOFT_GEOMETRY, Daniela Anton, 2013, strategii de generare formală 189

Figura 72. SOFT_GEOMETRY, Daniela Anton, 2013, obiecte fabricate și asamblate 190

Figura 73. DIGITAL_SILVER, Daniela Anton, 2013, proces de generare a formei și obiecte printate 3d 192

Figura 74. DIGITAL_SILVER, Daniela Anton, 2013, obiectele din argint 193

Figura 75. CELL_AGGREGATION, Daniela Anton, 2014, procese de generare a formei..... 195

Figura 76. CELL_AGGREGATION, Daniela Anton, 2014, obiecte fabricate prin debitare cu laser și articulare. 197

Figura 77. CELL_AGGREGATION, Daniela Anton, 2014, obiecte printate 3D 197

Figura 78. ROBOTS IN ARCHITECTURE, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2012, simularea mișcării robotului pentru aplicația PICK_AND_PLACE 200

Figura 79. ROBOTS IN ARCHITECTURE, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2012, simularea mișcării robotului pentru aplicația REAL_TIME. 200

Figura 80. ROBOTS IN ARCHITECTURE, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2012, imagini cu expunere lungă din timpul aplicației REAL_TIME. 202

Figura 81. ROBO_CRAFT WALL, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2013, proces de generare a formei componentelor 203

Figura 82. ROBO_CRAFT WALL, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2013, simularea mișcării robotului pentru prelucrarea unui component. 205

Figura 83. ROBO_CRAFT WALL, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2013, imagini cu procesul de fabricație și peretele asamblat 207

Figura 84. ROBO_CRAFT LIGHT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, simularea mișcării robotului pentru una dintre geometriile generate 208

Figura 85. ROBO_CRAFT LIGHT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, simularea în mediul digital a dimensiunii și culorii geometriilor generate 209

Figura 86. ROBO_CRAFT LIGHT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, imagini cu expunere lungă a desenelor cu lumina 209

Figura 87. ROBO_CRAFT PAINT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, variante de abstractizare a fotografiilor de tip portret..... 212

Figura 88. ROBO_CRAFT PAINT, Ionuț Anton și Daniela Anton, 2014, imagini de pe parcursul procesului de fabricație 213

BIBLIOGRAFIE ȘI WEBOGRAFIE

BIBLIOGRAFIE

Aish, Robert. 2011. „Foreword". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Aish, Robert. 2013. „First Build Your Tools". În *Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design*, 1 edition, ediție de Brady Peters și Terri Peters. Wiley.

Anton, Ionuț. 2012. *Arhitectură și algoritmi*. Tracus Arte.

Anton, Ionuț, și Dana Tănase. 2014. „Building Information Modeling". *Arhitectura 1906*, nr. 1: 22-25.

Asimov, Isaac. 1950. *I, Robot*. Gnome Press.

Aspromourgos, Tony. 2012. „The Machine in Adam Smith's Economic and Wider Thought". *Journal of the History of Economic Thought* 34 (04): 475-90.

Ayres, Robert U., și Steven M. Miller. 1981. *The Impacts of Industrial Robots*. Dept. of Engineering and Public Policy and the Robotics Institute, Carnegie-Mellon University. http://www.ri.cmu.edu/pub_files/pub3/ayres_robert_1981_1/ayres_robert_1981_1.pdf.

Babbage, Benjamin Herschel. 1864. „Recreations of a Philosopher". *Harper's New Monthly Magazine, Nr. 175.*, 34-39.

Ball, Philip. 2001. The Self-Made Tapestry: Pattern Formation in Nature. Oxford University Press.

Balmond, Cecil, Jannuzzi Smith, și Christian Brensing. 2007. *Informal*. Prestel.

Barcow, Frank. 2010. „Fabricating Design a Revolutiopn of Choice". În *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies*, ediție de Rivka Oxman și Robert Oxman. Wiley ; John Wiley [distributor].

Baudrillard, Jean, și Jean Nouvel. 2005. *Obiectele singulare. Arhitectura si filosofie*. Paideia.

Bechthold, Martin, și Nathan King. 2012. „Design Robotics". În *Rob|Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 2013 edition, ediție de Sigrid Brell-Cokcan și Johannes Braumann. Springer.

Benjamin, Andrew. 1991. „Notes on the Surfacing of Walls : NOX, Kiesler, Semper". În *NOX: Machining Architecture*, ediție de Lars Spuybroek. Thames & Hudson.

Benjamin, Walter. 1936. „The Work of Art in the Age of Mechanical Reproduction". În *Illuminations: Essays and Reflections*. Knopf Doubleday Publishing Group.

Bernard Cache. 2004. „Towards an Associative Architecture". În *Digital Tectonics*, 1 ed., ediție de Neil Leach, David Turnbull, și Chris Williams. Wiley Academy.

Best, Rick, și Gerard de Valence. 2007. *Design and Construction*. Routledge.

Bodden, Valerie, și Frank O. Gehry. 2008. *Frank Gehry*. The Creative Company.

Bonwetsch, Tobias, Fabio Gramazio, și Matthias Kohler. 2012. „R-O-B Towards a Bespoke Building Process". În *Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture*, ediție de Bob Sheil. John Wiley and Sons Ltd.

Bossuet, Jacques Benigne. 1722. Introduction a la Philosophie, Ou de la Connoissance de Dieu Et de Soi Mesme. R-M d'Espilly.

Brell-Cokcan, Sigrid, și Johannes Braumann. 2012. „Introduction". În *Rob|Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 2013 edition. Springer.

Bru, Eduard, Jose Alfonso Ballesteros, Stan Allen, et al. 2003. Metapolis Dictionary of Advanced Architecture: City, Technology and Society in the Information Age. Actar.

Burry, Jane, și Mark Burry. 2010. *The New Mathematics of Architecture*. 1 edition. Thames & Hudson.

Burry, Mark. 2011. Scripting Cultures: Architectural Design and Programming. 1 edition. Wiley.

Burry, Mark. 2012. „Models, Prototypes and Archetypes". În *Manufacturing the Bespoke: Making and Prototyping Architecture*, ediție de Bob Sheil. John Wiley and Sons Ltd.

Butler, Samuel. 1872. *Erewhon: Or, Over the Range*. The Modern library.

Cache, Bernard. 1998. „Objectil: The Pursuit of Philosophy of Other Means". În *Hypersurface Architecture*, ediție de Stephen Perrella. John Wiley & Sons.

Caciuc, Cosmin. 2007. *Supra-teoretizarea arhitecturii*. Paideia.

Canguilhem, Georges. 1992. „Machine and Organism". În *Incorporations*, ediție de Jonathan Crary și Sanford Kwinter. Zone.

Carpo, Mario. 2004. „Ten Years of Folding". În *Folding in Architecture*. Wiley-Academy.

Carpo, Mario. 2011. *The Alphabet and the Algorithm*. 1 ed. The MIT Press.

Ceccato, Cristiano. 2011. „Galaxy Soho Large-Scale Cladding Construction in China". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Ceccato, Cristiano. 2012. „Computing and Cunstructing Continous Differentiation". În *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, ediție de Achim Menges. John Wiley & Sons.

Chandler, Alfred D. Jr. 1977. The Visible Hand: The Managerial Revolution in American Business. Belknap Press.

Chapuis, Alfred, și Edmond Droz. 1958. *Automata: A Historical and Technological Study*. Batsford; 1st edition. Traducere de Alec Reid. Editions du Griffon.

Choisy, Auguste. 1883. *L'art de bâtir chez les Byzantins*. A. Forni.

Chua, C. K., K. F. Leong, și C. S. Lim. 2010. *Rapid Prototyping: Principles and Applications*. 1ed 1998. 3rd 2010. World Scientific Publishing Company.

Craig, John J. 1986. *Introduction to Robotics: Mechanics and Control*. Pearson Education, Incorporated.

Davis, Stanley M. 1987. *Future Perfect*. Addison-Wesley.

DeLanda, Manuel. 1997. A thousand years of nonlinear history / Manuel De Landa. Swerve editions. Zone Books.

DeLanda, Manuel. 2009. „Material Evolvability and Variability". În *Research & Design: The Architecture of Variation*, ediție de Lars Spuybroek. Thames & Hudson.

designtoproduction. 2008. „The Whole and its Parts". În *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*, ediție de Michael Meredith, Tomoko Sakamoto, și Albert Ferre. Actar.

Drucker. 1990. *Emerging Theory of Manufacturing*. Harvard Business School Reprint.

Dutta, Arindam. 2007. The Bureaucracy of Beauty Design in the Age of Its Global Reproducibility. Routledge.

Engelberger, Joseph F. 1999. „Historical Perspective and Role in Automation". În *Handbook of Industrial Robotics*, ediție de Shimon Y. Nof. John Wiley & Sons, Inc. http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1002/9780470172506.ch1/summary.

FABLAB, Taubman College of Architecture. 2011. „Matter & Making". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Federico Augugliaro, Sergei Lupashin, Michael Hamer, et al. 2014. „The Flight Assembled Architecture Installation: Cooperative construction with flying machines". *IEEE Control Systems Magazine* 34 (4): 46-64.

Feenberg, Andrew. 1999. *Questioning Technology*. Routledge.

Frampton, Kenneth. 2001. Studies in Tectonic Culture. The Poetics of Construction in Nineteenth and Twentieth Century Architecture. Prima ediție 1995. Ediție de John Cava. The MIT Press.

Garcia, Mark. 2010. The Patterns of Architecture: Architectural Design. Wiley.

Giedion, Siegfried. 1948. Mechanization Takes Command: A Contribution to Anonymous History. Oxford University Press.

Glymph, Jim. 2005. „Evolution of the Digital Design Process". În *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New edition, ediție de Branko Kolarevic. Taylor & Francis.

Good, T. W. 1888. *The Science and Art of Geometry Section 1: Geometrical Drawing*. Third Edition edition. George Gill and Sons.

Goodman, Nelson. 1976. Languages of Art: An Approach to a Theory of Symbols. Hackett.

Gough, Maria. 2005. The Artist as Producer: Russian Constructivism in Revolution. University of California Press.

Gramazio, Fabio, și Matthias Kohler. 2008. „Digital Materiality in Architecture". În *Digital Materiality in Architecture*, 1 edition. Lars Muller.

Hägele, Martin, Klas Nilsson, și Norbrto Pires. 2008. „Industrial Robotics". În *Springer Handbook of Robotics*, ediție de Bruno Siciliano și Oussama Khatib. Springer Science & Business Media.

Heidegger, Martin. 1995. *Originea Operei de Arta*. Editia I. Humanitas. http://www.scribd.com/doc/9226001/Martin-Heidegger-Originea-Operei-de-Arta.

Hensel, Michael. 2013. Performance-Oriented Architecture: Rethinking Architectural Design and the Built Environment. 1 edition. Wiley.

Hensel, Michael, și Achim Menges. 2010. „Patterns in Performance-Oriented Design:An Approach towards Pattern Recognition, Generation and Instrumentalisation". În *The Patterns of Architecture: Architectural Design*. Wiley.

Heron of Alexandria. 1851. *The Pneumatics of Hero of Alexandria: From the Original Greek*. Taylor, Walton and Maberly. http://himedo.net/TheHopkinThomasProject/TimeLine/Wales/Steam/URochesterCollection/Hero/index-2.html.

Hight, Christopher. 2007. *Architectural Principles in the Age of Cybernetics*. New Ed edition. Routledge.

Hobsbawm, E. J. 1996. *The Age of Revolution 1789-1848*. Vintage Books.

„ISO Standars 8373". 2012. Robots and robotic devices -- Vocabulary. https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:8373:ed-2:v1:en.

James Emerson Tennent. 1841. A Treatise on the Copyright of Designs for Printed Fabrics. Smith Elder.

Joseph Moxon. 1703. Mechanick Exercises or the Doctrine of Handy-Works - Reprinted from the 1703 Edition. 3rd edition. The Astragal Press.

Kaijima, Sawako, și Michalatos Panagiotis. 2008. „Simplexity". În *From Control to Design: Parametric/Algorithmic Architecture*, ediție de Michael Meredith, Tomoko Sakamoto, și Albert Ferre. Actar.

Kestelier, Xavier De. 2011. „Design Potential for Large-Scale Additive Fabrocation. Free-Form Construction". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Kieran, Stephen, și James Timberlake. 2003. Refabricating Architecture: How Manufacturing Methodologies are Poised to Transform Building Construction. 1 ed. McGraw-Hill Professional.

King, Nathan, și Jonathan Grinham. 2012. „Automating Eclipsis". În *Rob|Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 2013 edition, ediție de Sigrid Brell-Cokcan și Johannes Braumann. Springer.

Kohler, Matthias, și Hanif Kara. 2011. „Q&A Matthias Kohler - Hanif Kara". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Kolarevic, Branko. 2005a. „Computing the Performative". În *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, ediție de Branko Kolarevic și Ali Malkawi. Routledge.

Kolarevic, Branko. 2005b. „Digital Morfogenesis". În *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New edition, ediție de Branko Kolarevic. Taylor & Francis.

Kolarevic, Branko. 2005c. „Digital Production". În *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New edition, ediție de Branko Kolarevic. Taylor & Francis.

Kolarevic, Branko. 2005d. „Introduction". În *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New edition, ediție de Branko Kolarevic. Taylor & Francis.

Kolarevic, Branko. 2005e. „Towards the Performative in Architecture". În *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, ediție de Branko Kolarevic și Ali Malkawi. Routledge.

Kubo, Michael, Farshid Moussavi, și J. Seth Hoffman. 2006. *The Function of Ornament*. Actar.

Landes, David S. 1972. The Unbound Prometheus: Technological Change and Industrial Development in Western Europe from 1750 to the Present. Cambridge University Press.

Lavin, Sylvia. 2011. „Performing the Contemporary, or: Towards an Even Newer Architecture". În *Performalism: Form and Performance in*

Digital Architecture, ediție de Yasha J. Grobman și Eran Neuman. Routledge.

Leach, Neil. 1997. *Rethinking Architecture: A Reader in Cultural Theory*. Edited by Neil Leach edition. Routledge.

Leach, Neil. 2004. „Swarm Tectonics". În *Digital Tectonics*, 1 ed., ediție de Neil Leach, David Turnbull, și Chris Williams. Wiley Academy.

Leatherbarrow, David. 2008. *Architecture Oriented Otherwise*. 1 edition. Princeton Architectural Press.

LeCuyer, Annette. 1997. „Building Bilbao". *Architectural Review* 102 (1210): 43-45.

Loos, Adolf. 1997. „Ornament and Crime". În *Ornament and Crime: Selected Essays.* Ariadne Pr.

Lynn, Greg. 1993. „Architectural Curvilinearity: The Folded, the Pliant and the Supple". În *Architectural Design: Folding in Architecture*. Wiley-Academy.

Lynn, Greg. 1999. *Animate Form*. 1 edition. Princeton Architectural Press.

Mace, Angela. 1986. The Royal Institute of British Architects: A Guide to Its Archive and History. Mansell Pub.

Male-Alemany, Marta, Jeroen Van Ameijde, și Victor Vina. 2011. „(FAB)BOTS Customised Robotic Devices for Design & Fabrication". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Malkawi, Ali. 2005. „Performance Simulation: Research and Tools". În *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, ediție de Branko Kolarevic și Ali Malkawi. Routledge.

Marcus, Solomon. 2011a. „Calculatorul". În *Paradigme Universale*. Paralela 45.

Marcus, Solomon. 2011b. „Ordine şi haos". În *Paradigme Universale*. Paralela 45. 115-122.

Marcus, Solomon. 2011c. „Paradigma formei (frumoase)". În *Paradigme Universale*. Paralela 45.

Markillie, Paul. 2012. „A third industrial revolution". *The Economist*, aprilie. http://www.economist.com/node/21552901.

Mathia, Karl. 2010. *Robotics for Electronics Manufacturing. Principles and Applications in Cleanroom Automation.* Cambridge University

Press.
http://assets.cambridge.org/97805218/76520/excerpt/9780521876520_excerpt.pdf.

McCullough, Malcolm. 1997. Abstracting Craft: The Practiced Digital Hand. The MIT Press.

McGee, Wes, Jelle Feringa, și Asbjørn Søndergaard. 2012. „Processes for an Architecture of Volume". În *Rob|Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 2013 edition, ediție de Sigrid Brell-Cokcan și Johannes Braumann. Springer.

McGuirk, Justin. 2011. „Villa Nurbs by Enric Ruiz-Geli". *Icon Magazine*, nr. 086.

Mechthold, Martin. 2010. „The Return of the Future". În *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies*, ediție de Rivka Oxman și Robert Oxman. Wiley ; John Wiley [distributor].

Menges, Achim. 2010. „Instrumental Geometry". În *Fabricating Architecture: Selected Readings in Digital Design and Manufacturing*, ediție de Robert Corser. Princeton Architectural Press.

Menges, Achim, și Tobias Schwinn. 2012. „Manufacturing Reciprocities". În *Material Computation: Higher Integration in Morphogenetic Design*, ediție de Achim Menges. Wiley ; John Wiley [distributor].

Meyer, Hermann Julius. 1898. *Meyers Kleines Konversations-Lexikon.* Bibliographisches Institut.

Mitchell, William J. 2001. „Roll Over Euclid: How Frank Gehry Designs and Builds". În *Frank Gehry, Architect*, ediție de Fiona Ragheb. The Solomon R. Guggenheim Foundation.

Mitchell, William J. 2009. „Foreword, Antitectonics: The Poetics of Virtuality". În *New Tectonics: Towards a New Theory of Digital Architecture : 7th Feidad Award*, ediție de Yu-Tung Liu, Chor-Kheng Lim, și Yudong Liu. Birkhäuser.

Moe, Kiel. 2010. „Automation Takes Command: The Nonstandard, Unautomatic History of Standardization and Automation of Fabrication in Architecture". În *Fabricating Architecture: Selected Readings in Digital Design and Manufacturing*, ediție de Robert Corser. Princeton Architectural Press.

Paul Aron. 1981. „Robots Revisited : One Year Later". În *Exploratory Workshop on the Social Impacts of Robotics : Summary and Issues, a Background Paper.* DIANE Publishing. https://www.princeton.edu/~ota/disk3/1982/8209/820909.PDF.

Perrella, Stephen. 2000. „Electronic Baroque". În *Hypersurface Architecture II*. John Wiley & Sons.

Philip K. Dick. 1955. „Autofac". *Galaxy Magazine vol. 11, no.2*, noiembrie, 70-95.

Piano, Renzo, și Richard Rogers. 2006. „Statement". În *Theories and Manifestoes of Contemporary Architecture*, ediție de Charles Jencks și Karl Kropf. Wiley-Academy.

Picon, Antoine. 2005. „Architecture and the Virtual Towards a new Materiality?" *Praxis* 6: 114-21.

Picon, Antoine. 2010. Digital Culture in Architecture: An Introduction for the Design Professions. Birkhäuser : [Springer Verlag].

Picon, Antoine. 2011. „Architecture and Mathematics: Between Hubris and Restraint". În *Mathematics of Space*, ediție de George Liaropoulos-Legendre. Wiley.

Picon, Antoine. 2013. Ornament: The Politics of Architecture and Subjectivity. Wiley.

Pigram, David, Iaim Maxwell, Wes Mcgee, Ben Hagenhofer-Daniell, și Lauren Vasey. 2012. „Protocols, Pathways and Production". În *Rob|Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, 2013 edition, ediție de Sigrid Brell-Cokcan și Johannes Braumann. Springer.

Pine II, B. Joseph. 1993. Mass Customization: The New Frontier in Business Competition. Harvard Business School Press.

Piore, Michael J, și Charles F Sabel. 1984. *The Second Industrial Divide: Possibilities for Prosperity*. Basic Books.

Pittman, Jon. 2005. „Bulding Information Modeling: Current Challanges and Future Directions". În *Architecture in the Digital Age: Design and Manufacturing*, New edition, ediție de Branko Kolarevic. Taylor & Francis.

Pottmann, Helmut, Andreas Asperl, Michael Hofer, și Axel Kilian. 2007. *Architectural Geometry*. 1st edition. Ediție de Daril Bentley. Bentley Institute Press.

Pye, David. 1968. *The Nature and Art of Workmanship*. Cambridge University Press.

Rahim, Ali. 2005. „Performativity: Beyond Efficeincy and Optimization in Architecture". În *Performative Architecture: Beyond Instrumentality*, ediție de Branko Kolarevic și Ali Malkawi. Routledge.

Reas, Casey, și Chandler McWilliams. 2010. *Form+Code in Design, Art, and Architecture*. 1st edition. Princeton Architectural Press.

Reintjes, J. Francis. 1991. *Numerical Control: Making a New Technology*. Oxford University Press.

Reiser, Jesse, și Nanako Umemoto. 2006. *Atlas of Novel Tectonics*. 1 ed. Princeton Architectural Press.

RIBA Enterprises Ltd. 2014. *NBS National BIM Report 2014*. http://www.thenbs.com/pdfs/NBS-National-BIM-Report-2014.pdf.

Rifkin, Jeremy. 2013. The Third Industrial Revolution: How Lateral Power Is Transforming Energy, the Economy, and the World. Palgrave Macmillan Trade.

Rolt-Wheeler, Francis. 1920. ... ... *The Boy with the U. S. Inventors*. Lothrop, Lee & Shepard Company.

Romero, Fernando, și Armando Ramos. 2013. „Bridging a Culture. The Design of Museo Soumaya." În *Computation Works: The Building of Algorithmic Thought AD*, 1 edition, ediție de Xavier De Kestelier. Wiley.

Ruiz-Geli, Enric, Frederic Amat, și Toni Cumelle. 2011. „Villa NURBS". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Ruairi Glynn și Bob Sheil. Riverside Architectural Press.

Rykwert, Joseph. 1981. On Adam's House in Paradise: The Idea of the Primitive Hut in Architectural History. 2nd edition. The MIT Press.

Saint, Andrew. 1983. „The Architect as Professional: Britain in the Nineteenth Century",. În *The Image of the Architect*. Yale University Press.

Schatzberg, Eric. 2006. „Technik Comes to America: Changing Meanings of Technology before 1930". *Technology and Culture* 47 (3): 486-512.

Scheurer, Fabian. 2010. „Materialising Complexity". În *The New Structuralism: Design, Engineering and Architectural Technologies*,

ediție de Rivka Oxman și Robert Oxman. Wiley ; John Wiley [distributor].

Scheurer, Fabian, și Hanno Stehling. 2011. „Lost in Parametric Space?" În *Mathematics of Space*, ediție de George Liaropoulos-Legendre. Wiley.

Schumacher, Patrik. 2010. „Patterning Parametrically". În *The Patterns of Architecture: Architectural Design*. Wiley.

Semper, Gottfried. 1951. *The four elements of architecture and other writings*. Cambridge University Press.

Sheil, Bob. 2008. „Between the Analogue and the Digital". În *Protoarchitecture: Analogue and Digital Hybrids*, ediție de Bob Sheil. John Wiley.

Sidelko, Jason. 2013. *Museo Soumaya: Facade Design to Fabrication*. Gehry Technologies.

Snobelen, Stephen. 2012. „The Myth of the Clockwork Universe. Newton, Newtonianism, and the Enlightenment." În *The persistence of the sacred in modern thought.*, ediție de Chris L. Firestone și Nathan Jacobs. University of Notre Dame Press.

Spuybroek. 2009. „Foreword: Research & Design". În *Research & Design: The Architecture of Variation*, ediție de Lars Spuybroek. Thames & Hudson.

Stephens, Suzanne. 1999. „The Bilbao Effect". *Architectural Review* 187 (5): 168-73.

Stratton, Julius Adams, și Loretta H. Mannix. 2005. *Mind and Hand: The Birth of MIT*. MIT Press.

Summerson, John. 1974. The London Building World of the Eighteen-Sixties. Thames & Hudson Ltd.

Tanijiri, Hideo, Bunya Ishiguro, Takashi Arai, et al. 1996. „Development of Automated Weather-Unaffected Building Construction System". *Autmation in Construction* 6: 215-27.

Taylor, Frederick Winslow. 1911. *The Principles of Scientific Management*. Dover Publications.

Tănase, Dana. 2011. „Fabricaţie digitală". *Arhitectura 1906*, nr. 3: 36-39.

Tănase, Dana, și Ionuț Anton. 2014. „Influența uneltelor digitale asupra arhitecturii". *Arhitectura 1906*, nr. 2: 76-81.

The Economist. 2011. „The printed world". februarie. http://www.economist.com/node/18114221?story_id=18114221.

The History of the Drilling Machine. 1917. mai 17, 10-11.

Toffler, Alvin. 1984. *The Third Wave*. Bantam.

Tolio, Tullio. 2008. Design of Flexible Production Systems: Methodologies and Tools. Springer Science & Business Media.

Turan, Belgin. 1998. „Architecture and Technê:The Impossible Project of Tendenza". *Architronic - The Electronic Journal of Architecture*.

U.S. Information Agency. f.a. *Photograph of Workers on the First Moving Assembly Line*. Records of the U.S. Information Agency. National Archives at College Park - Still Pictures (306-PSE-73-1534).

Virilio, Paul, și Jonathan Crary. 2009. *The Aesthetics of Disappearance*. Traducere de Phil Beitchman. Semiotext.

West, Mark, și Mark Burry. 2011. „Q&A Mark Burry - Mark West". În *Fabricate: Making Digital Architecture*, ediție de Bob Sheil și Ruairi Glynn. Riverside Architectural Press.

Whitehead, Hugh. 2013. „The Practice of Smartgeometry". În *Inside Smartgeometry: Expanding the Architectural Possibilities of Computational Design*, 1 edition, ediție de Brady Peters. Wiley.

Willmann, Jan, Fabio Gramazio, Matthias Kohler, și SIlke Langenberg. 2012. „Digital by Material". În *Rob|Arch 2012: Robotic Fabrication in Architecture, Art and Design*, ediție de Sigrid Brell-Cokcan și Johannes Braumann. Springer.

Zaera-Polo, Alejandro. 2010. „Patterns, Fabrics, Prototyps, Tesselations". În *The Patterns of Architecture: Architectural Design*. Wiley.

Zoran, Amit, și Leah Buechley. 2013. „Hybrid reAssemblage: An Exploration of Craft, Digital Fabrication and Artifact Uniqueness". *Leonardo Journal MIT Press* 46 (1): 5-10.

WEBOGRAFIE

Arup. 2014. „Construction steelwork makes its 3D printing premiere”. http://www.arup.com/News/2014_06_June/05_June_Construction_steelwork_makes_3D_printing_premiere.

Bowyer, Adrian. 2004. „RepRap”. http://www.reprap.org/.

Britannica. 2025. „Difference Engine Calculating Machine, Charles Babbage, 19th Century”. iunie 24. https://www.britannica.com/technology/Difference-Engine.

Center for Palladian Studies. 2009. „Palladio’s Literary Predecessors”. http://www.palladiancenter.org/predecessors.html.

Daal, Lilian van. 2014. „BIOMIMICRY: 3D printed soft seat”. http://lilianvandaal.com/?portfolio=3d-printed-softseating.

ELstudio. 2014. „3D printing clay”. http://www.elstudio.nl/?p=1356.

Emerging Objects. 2013. „Saltygloo”. http://www.emergingobjects.com/projects/saltygloo/.

Emerging Objects. 2014. „Poroso”. http://www.emergingobjects.com/projects/poroso/.

ENIAC. 2014. iulie 1. U.S. Army Photo. U.S. Army Photo. http://de.wikipedia.org/w/index.php?title=Computer&oldid=131348413.

Foster and Partners. 2004. „Smithsonian Institution”. http://www.fosterandpartners.com/projects/smithsonian-institution/.

FR-EE și Gehry Technologies. f.a. „Museo Soumaya”. Data accesării 30 august 2014. http://www.gehrytechnologies.com/en/projects/12/.

Fuller, Buckminster. 1967. „US pavilion Expo’67”. http://spaceframestructures.tumblr.com/post/89540555106/patrickschierer-geodesic-dome-montreal.

Gramazio, Fabio, și Matthias Kohler. 2007. „Structural Oscillations, Installation at the Venice Architectural Biennale 2008”. http://www.dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/142.html.

Gramazio, Fabio, și Matthias Kohler. 2011a. „Procedural Landscapes 2, Elective course, 2011". http://www.dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/211.html.

Gramazio, Fabio, și Matthias Kohler. 2011b. „Stratifications, Fabricate Conference, 2011". http://www.dfab.arch.ethz.ch/web/e/forschung/206.html.

Gramazio, Fabio, și Matthias Kohler. 2012a. „Flight Assembled Architecture". http://www.gramaziokohler.com/web/e/projekte/209.html.

Gramazio, Fabio, și Matthias Kohler. 2012b. „Robotic Clay Molding, 2012, Workshop at IAAC Barcelona, Barcelona, Spain". http://www.dfab.arch.ethz.ch/web/e/lehre/235.html.

Henry Ford Museum. 1913. *River Rouge Plant*. http://www.genesis2scale.com/__museum/_ford/_1910/_1914ford/1914fordmain.htm.

Https://Www.Scientificamerican.Com/Issue/Supplements/1883/08-18/. 1883. „Scientific American, Volume 16, Issue 398". Arhiva. august 18. https://www.ebay.com/itm/205333641812.

ICD, ITKE, și IIGS. 2014. „Landesgartenschau Exhibition Hall Schwäbisch Gmünd". http://upvisually.com/robotically-fabricated-lightweight-timber-shell-schwabisch-gmund/.

Jandot, André. 1940. *U.S. Model 1835 flintlock pistol*. http://www.nps.gov/history/history/online_books/paal/thunder-cannon/chap4.htm.

Kapoor, Anish. 2003. „Marsyas". http://db-artmag.com/cms/upload/52/feature/memory/45_anishkapoor07.jpg.

Kayser, Markus. 2011. „SolarSinter". http://www.markuskayser.com/work/solarsinter/.

Kohl, Armand. 1889. *Salle de peigneuses Heilmann pour la laine, de Barclay, Armand Kohl 1889/Hall for combing of wool*. Bibliothèque nationale et universitaire de Strasbourg (en ligne). https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Armand_Kohl48.jpg.

Kooij, Dirk Van der. 2010. „Endless furniture". http://www.dvdktest.nl/productdisplay/pulse-low-chair.

Laarman, Joris. 2014a. „Makerchairs". http://bitsandparts.org/#video.

Laarman, Joris. 2014b. „MX3D - Metal Printing”. http://www.jorislaarman.com/mx3d-metal.html#description.

LAVA. 2008. „Green Void”. http://www.shearyadi.com/myworld/wp-content/uploads/2009/01/22012009-green-void-01.jpg.

LIA. 2014. „Filament Sculptures”. http://www.liaworks.com/theprojects/filament-sculptures/.

Matter Design. 2010. „Periscope: Foam Tower”. http://www.matterdesignstudio.com/#/periscope/.

Mayer, Jürgen. 2011. „Metropol Parasol”. http://www.jmayerh.de/19-0-Metropol-Parasol.html.

Menges, Achim, și Jan Knippers. 2011. „ICD/ITKE Research Pavilion 2011”. http://icd.uni-stuttgart.de/?p=6553.

Menges, Achim, și Jan Knippers. 2013. „ICD/ITKE Research Pavilion 2013-2014”. http://icd.uni-stuttgart.de/?p=11187.

Nervi, Pier Luigi. 1935. „Orvieto Hangars”. http://www.archiportale.com/news/2011/07/eventi/a-lecce-una-mostra-monografica-su-pier-luigi-nervi_23522_32.html.

nervous system. 2010. „CNC routed reaction shelf”. http://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=992.

nervous system. 2013. „Kinematics”. http://n-e-r-v-o-u-s.com/blog/?p=4467.

Popular Science Monthly Volume 39. 1891. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:PSM_V39_D325_Carpet_loom_with_jacquard_attachment.jpg.

Ruiz-Geli, Enric. 2003. „Villa NURBS”. http://www.ruiz-geli.com/04_html/04_villanurbs.html.

SAGE. 1950. http://www-03.ibm.com/ibm/history/ibm100/us/en/icons/sage/transform/.

Saint Eligius in his workshop. 1440. Rijksmuseum Amsterdam. http://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=Orf%C3%A8vrerie&oldid=103611286.

Shukhov, Vladimir. 1919. „Shabolovka”. http://commons.wikimedia.org/wiki/File:Shukhov_Tower_030709e_photo_by_Arssenev.jpg.

SOFTlab. 2009. „pAlice”. http://db-artmag.com/cms/upload/52/feature/memory/45_anishkapoor07.jpg.

Supermanoeuvre și Matter Design. f.a. „Clouds of Venice, Installation at the Venice Architectural Biennale 2012”. Data accesării 28 iulie 2014. http://supermanoeuvre.com/fabricating_venice/.

[trans]LAB. 2014. „Flexible Textile Structures”. http://www.3ders.org/articles/20140128-3d-printed-flexible-textiles-a-stitch-toward-personalized-clothing.html.

Vikar, Peter. 2012. „Mis Portraits”. http://www.petervikar.com/moco/mismarilyn/.

Vilemard. 1910. *visions de l'an 2000*. http://expositions.bnf.fr/utopie/feuill/index.htm.

Widrig, Daniel. 2012. „Degenerate Chair”. http://www.dezeen.com/2014/01/13/daniel-widrig-uses-diy-3d-printing-process-to-produce/.

Yaron Elyasi. 2013. „Freemolding Technology”. http://www.yaronelyasi.com/default.asp?PageID=55.

Yazdani, Sahab. 2012. „Weighted Voronoi Stippling”. http://www.saliences.com/projects/npr/stippling/index.html.

Zaha Hadid Architects. 2012. „Galaxy Soho”. http://www.zaha-hadid.com/architecture/galaxy-soho/.

Zaha Hadid Architects și RoboFold. 2012. „ARUM”. http://www.robofold.com/make/consultancy/projects/arum-for-zaha-hadid-architects.