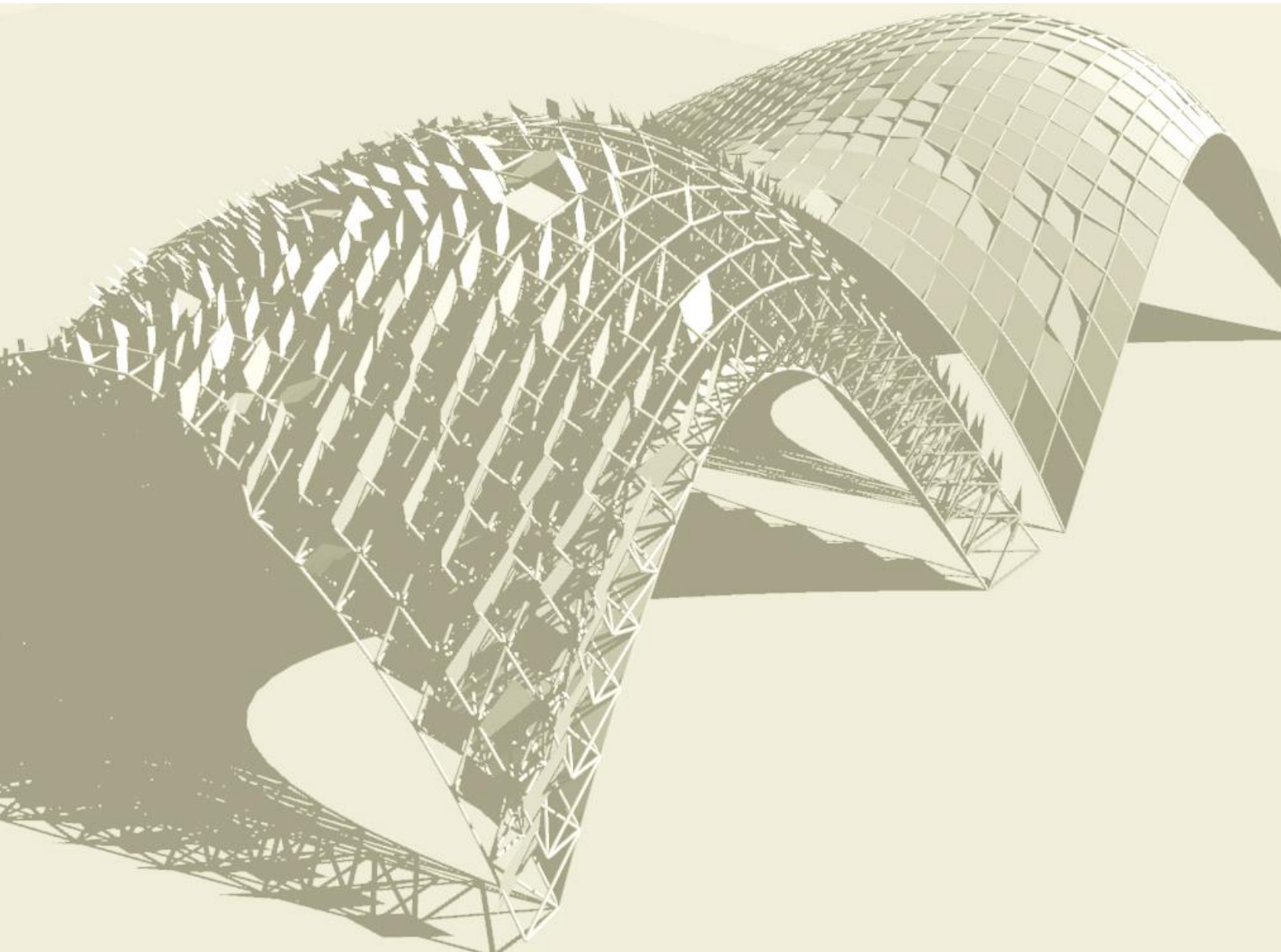


ELS SISTEMES CINÈTICS COM A EINA DE DISSENY EN ARQUITECTURA
ESTUDI DEL POTENCIAL FORMAL I DE CONTROL GEOMÈTRIC

Joaquim Moya Sala
Tesi doctoral



PROGRAMA DE DOCTORAT EN COMUNICACIÓ VISUAL EN ARQUITECTURA I DISSENY

PROGRAMA DE DOCTORAT EN COMUNICACIÓ VISUAL EN ARQUITECTURA I DISSENY

Departament d'Expressió Gràfica Arquitectònica I, Universitat Politècnica de Catalunya

Director de tesi: Javier Monedero Isorna

Doctorant: Joaquim Moya Sala

ELS SISTEMES CINÈTICS COM A EINA DE DISSENY EN ARQUITECTURA

ESTUDI DEL POTENCIAL FORMAL I DE CONTROL GEOMÈTRIC

Índex	1
1 Introducció	7
1.1 Conceptes previs	8
1.1.1 Comparació amb l'ús informàtic en disciplines similars.....	8
1.1.2 Necessitats específiques de l'arquitecte respecte d'altres professions.....	10
1.1.3 Els sistemes físics de simulació com a possible resposta.....	11
1.2 Objectius de la tesi.....	14
1.2.1 El control geomètric a través d'elements dinàmics.....	16
1.2.2 Processos d'optimització	18
1.2.3 Estudi dels models dinàmics	20
1.3 Metodologia general d'estudi de la tesi.....	21
1.3.1 Procés d'investigació.....	21
1.3.2 Anàlisi dels resultats.....	22
1.3.3 Del que és general al que és específic?	23
1.4 Programa de simulació dinàmica	24
1.4.1 Idees prèvies.....	27
1.4.2 Integració dels processos dinàmics en un CAD	30
1.4.3 Estratègia de càlcul i de modelatge	33
1.4.4 Introducció de dades	35
2 Estat actual de la qüestió	41
2.1 Fets rellevats en l'ús de mecanismes físics de disseny	41
2.1.1 El teorema de la catenària inversa	41
2.1.2 Aportacions del segle XIX i l'estàtica gràfica.....	43
2.1.3 Alguns arquitectes del segle XX que s'han basat en mecanismes físics	44
2.1.4 Conclusió	54
2.2 Exemples de programari arquitectònic basat en mecanismes físics.....	56
2.2.1 Kangaroo.....	57
2.2.2 CADenary Tools.....	60
2.2.3 Programes de force-density.....	64
2.2.4 Altres aportacions.....	67
2.2.5 Conclusions.....	69
2.3 Fets rellevats en la computació de fenòmens físics	70

2.3.1	Inicis de la simulació.....	71
2.3.2	Gràfics i animació.....	75
2.3.3	Estat actual	79
2.3.4	Classificació dels sistemes de simulació física	81
2.3.5	Càlcul per passos finits o diferencials	82
2.3.6	Càlcul directe	84
2.3.7	Càlcul d'elements finits	85
2.3.8	Càlcul de volums finits	88
2.3.9	Models de partícules	92
2.3.10	Simulacions de fluids amb partícules.....	99
2.3.11	Sistemes tàctils o hàptics	102
2.3.12	Conclusió	103
2.4	Exemples de mòduls d'animació actuals	104
2.4.1	Lagoa multiphysics	105
2.4.2	emFlock	107
2.4.3	PhysX	108
3	Programa d'aplicació dinàmica	113
3.1	El llenguatge de programació	113
3.2	Descripció dels elements bàsics de la simulació i funcionament intern	116
3.2.1	La partícula	116
3.2.2	La barra.....	124
3.2.3	Forces basades en el pla.....	130
3.2.4	Forces angulars.....	135
3.2.5	Longituds iguals entre rectes	139
3.2.6	Corbes NURBS	141
3.2.7	Superfícies NURBS	148
3.3	Eines i procediments bàsics de control dinàmic.....	153
3.3.1	Control de la intensitat de camp	155
3.3.2	Fixació dels punts.....	156
3.3.3	Afegir/eliminar elements d'un camp de força	156
3.3.4	Control de partícules	157
3.3.5	Control de les barres	161
3.3.6	Control de les forces del pla	163
3.3.7	Control de les forces angulars	166
3.3.8	Control de les forces d'atracció a NURBS	167
3.4	Descripció d'elements combinats.....	169
3.4.1	Superfícies mallades	170
3.4.2	Volums mallats.....	174
3.5	Procediments bàsics d'edició de malles.....	176
3.5.1	Vores.....	177

3.5.2	Forats.....	179
3.5.3	NURBS	180
3.6	Eines i procediments bàsics de modelatge convencional	181
3.6.1	Fusió de punts.....	182
3.6.2	Intersecció.....	182
3.6.3	Generació de malles quadrades de contorn lliure	183
3.6.4	Generació automàtica de plans	184
3.6.5	Extrusió.....	184
4	Estudi de disseny bàsic amb camps de força.....	187
4.1	Cables de catenària	188
4.1.1	Cables de corda rígida i de corda elàstica	189
4.1.2	Cables vinculats a NURBS	190
4.1.3	Cables amb comportaments heterogenis.....	191
4.1.4	Generació de cables combinats.....	192
4.1.5	Conclusions.....	192
4.2	Extrapolació a estructures de 3 dimensions	193
4.3	Malles compostes de partícules i cables.....	194
4.3.1	Malles de cordes rígides.....	197
4.3.2	Malles amb cordes tènsils	198
4.3.3	Malles de comportament tensional irregular	199
4.3.4	Cel·la quadrada.....	200
4.3.5	Cel·la hexagonal.....	202
4.3.6	Cel·les heterogènies.....	206
4.4	Malles amb sistemes de panells	210
4.4.1	Panells sobre malles quadrades.....	212
4.4.2	Panells sobre malles hexagonals	219
4.4.3	Panells sobre malles lliures	223
4.4.4	Panells amb angles fixats	225
4.4.5	Malla hexagonal amb angles fixats.....	229
4.4.6	Marges d'error en panells.....	232
4.4.7	Sistema per detectar i igualar panells segons els tipus.....	233
4.5	Taula resum de combinació de camps de força i geometria resultant	235
5	Estudi de disseny avançat amb camps de força	237
5.1	Introducció	237
5.1.1	Procediment general de modelatge	238
5.1.2	Efectes compositius.....	238
5.2	Malles i fluxos	239
5.2.1	Recorreguts rectes	239

5.2.2	Propietats de composició.....	244
5.2.3	Recorreguts amb corbes NURBS.....	245
5.2.4	Propietats de composició.....	247
5.3	Malles i partícules	249
5.3.1	Sistema per focus d'exclusió	250
5.3.2	Propietats de composició.....	252
5.3.3	Sistema per focus d'atracció.....	254
5.3.4	Propietats de composició.....	258
5.4	Malles i forces	259
5.4.1	El vent.....	259
5.4.2	Vent sobre voltes.....	261
5.4.3	Propietats Propietats de composició.....	263
5.4.4	Vent sobre elements volumètrics.....	265
5.4.5	Propietats de composició.....	269
6	Casos d'aplicació dels sistemes dinàmics.....	271
6.1	Disseny conceptual.....	272
6.1.1	Planejat de les cares	274
6.1.2	Estudi de peces similars.....	275
6.1.3	Model final.....	277
6.1.4	Anàlisi del resultat	278
6.2	Panel·lització.....	280
6.2.1	Panells rectangulars regulars	281
6.2.2	Panells hexagonals regulars.....	284
6.2.3	Anàlisi del resultat	287
6.3	Optimització de sistemes tèxtils i malles tènsils.....	288
6.3.1	Malles de barres rígides	289
6.3.2	Malles de superfície mínima	291
6.3.3	Anàlisi del resultat	292
6.4	Altres casos d'aplicació.....	294
6.4.1	Control d'un esquema estructural	294
6.4.2	Control de geometries planes.....	300
7	Conclusions	305
7.1	Dels objectius inicials de la tesi.....	306
7.1.1	Relació amb l'usuari	306
7.1.2	Capacitat de control de geometries complexes.....	307
7.1.3	Capacitat d'optimització de peces	309
7.1.4	Inclusió de la lògica constructiva	311
7.1.5	Capacitat per fer esbossos amb eines digitals.....	313

7.2	Altres observacions.....	315
7.2.1	Integració de la computació com a eina de CAD a partir de sistemes dinàmics	315
7.2.2	Similituds amb les formes i processos naturals.....	317
7.3	Futurs desenvolupaments.....	322
7.3.1	Millores en la interfície gràfica	322
7.3.2	Millores en les fórmules	323
7.3.3	Col·lisions.....	324
7.3.4	Desenvolupament dels sistemes de panel·lització	324
7.4	Conclusió	325
8	Referències.....	327
8.1	Paraules clau	327
8.2	Bibliografia	327

1 Introducció

Durant les últimes dues dècades tots hem experimentat el ràpid creixement dels sistemes digitals en el nostre entorn. En una fracció de temps que sembla ridícula històricament, aquests sistemes s'han fet completament imprescindibles per a la supervivència de la societat en sectors tan bàsics com els sistemes de transport, els sistemes de comunicació, el sistema bancari, els tràmits burocràtics i, fins i tot, els sistemes de producció de béns. El nivell de dependència que hem adquirit amb els sistemes digitals és tan gran que controlar-ne el funcionament comença a ser una necessitat essencial de cara a encaixar bé el futur de moltes professions. L'augment, tant en intensitat com en àmbits d'aplicació, sembla que no té fi, cada dia descobrim una nova possibilitat d'ús ja sigui pel que fa a computació o en combinació amb altres elements mecànics per millorar el rendiment o, directament, suplantar un humà en una tasca concreta. El gran avantatge que ofereixen aquests mecanismes es basa en la capacitat de transformar la informació i reproduir-la tants cops com faci falta. Generalment, qualsevol tasca mecànica senzilla en l'àmbit intel·lectual es pot delegar a un sistema digital sense la supervisió d'un humà. En aquest sentit, les capacitats dels sistemes digitals no depenen únicament de la tecnologia que s'apliqui al maquinari, sinó més aviat del programari que faci servir, de manera que crear un programa dóna a l'ordinador la capacitat de fer una nova tasca i som nosaltres els qui hem de crear els programes segons les nostres necessitats. Una pregunta que abans o després ens haurem de plantejar és "què pot fer la persona que no pugui fer un sistema digital?". Sobre aquest punt cal haver programat per tenir una perspectiva real de la qüestió i, en principi, la meua opinió és que qualsevol activitat mecànica que es mogui en un àmbit més o menys estable (que no es donin situacions inesperades, canvis sobtats, etc.) es pot automatitzar i, per tant, es pot delegar a un sistema digital, i això inclou gran part de les activitats quotidianes i professionals que avui dia encara fan les persones. Per tant, de cara al futur el que restarà per a l'àmbit de la persona seran les decisions i tots aquells aspectes de les activitats humanes que no tenen lloc en un àmbit estable o que no es poden traduir matemàticament i avaluar de manera lògica. Això inclou molts processos cognitius que encara no entenem, els processos artístics, o tots aquells fenòmens pels quals no hem trobat (o no tenen) una formulació matemàtica.

La millor manera, doncs, de no perdre la iniciativa i de recuperar el control de la situació en un món on cada cop més i més decisions es poden automatitzar és dominar la informàtica des de dins, l'eina bàsica amb la qual es generen els sistemes digitals i amb la qual programem els aparells que fem servir. Malauradament, la introducció ha estat tan ràpida que la capacitat de reacció de l'arquitecte que exerceix professionalment ha quedat desbordada i ha perdut gran part

del control que tenia sobre el procés de disseny.¹ Aspectes que van des de la definició tècnica fins al procés de disseny s'han vist alterats per aquest fenomen, que ha posat en crisi moltes estratègies de treball que semblaven indispensables. Segurament, malgrat l'opinió que cadascú pugui tenir, l'ofici s'haurà de reestructurar en funció de les noves eines que s'empren i, per tant, intentar compaginar correctament els sistemes digitals amb les activitats de l'arquitecte serà un dels reptes que hem d'afrontar amb més urgència al segle XXI si els arquitectes volen retenir el control del seu ofici. En cas contrari, l'arquitectura serà possiblement com un vaixell a la deriva que acabarà per naufragar sense remei. És fonamental, doncs, fer un ús òptim de l'eina digital tenint en compte quines tècniques i quins potencials ens ofereix per resoldre els nostres problemes i, a partir d'aquí, replantejar les nostres activitats en harmonia amb aquests sistemes. En aquest sentit s'ubica aquesta tesi, com un estudi i proposta d'ús d'una metodologia informàtica aplicada al camp de l'arquitectura de manera que es pugui fer servir en el procés de disseny amb eficàcia.

1.1 Conceptes previs

1.1.1 Comparació amb l'ús informàtic en disciplines similars

De cara a introduir adequadament la informàtica en el món de l'arquitectura, seria convenient estudiar com ha estat aquesta introducció en altres esferes professionals i, així, poder reflexionar des d'una perspectiva real sobre com podem aplicar aquests mateixos principis a l'àmbit arquitectònic. En molts casos, l'arquitectura comparteix finalitats i fins i tot mètodes amb altres oficis de manera que podem extrapolar fàcilment aquests recursos. Un dels primers camps que cal estudiar és el món de l'enginyeria, que per diverses raons té molta més recerca en aquest àmbit que no pas l'arquitectura. En general, els enginyers treballen amb sistemes paramètrics de modelatge en els quals el model tridimensional no és purament un model geomètric estàtic, sinó un mecanisme dinàmic controlat per paràmetres i que, per tant, es modifica seguint una lògica que no és exclusivament geomètrica. Es tracta de sistemes molt útils per comprovar el funcionament d'una peça, que combinen aspectes programàtics amb solucions geomètriques de manera que poden simular tota mena de moviments, col·lisions, fer servir llibreries predeterminades de peces i avaluar les propietats físiques del seu model. Però per fer tot això cal que les dades s'introdueixin d'una manera determinada, seguint un ordre precís i saber molt clarament què es vol obtenir. Aquests sistemes, doncs, necessiten que l'usuari tingui un

¹ Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier, p. 24.

coneixement previ detallat del model que vol construir per establir les relacions paramètriques adequades i, més tard, poder treballar amb comoditat sobre la peça. Però si per la raó que sigui l'estructura general del model canvia, llavors refer totes les relacions internes pot ser tan complex i llarg que molts cops serà preferible començar de nou. Aquest és un problema que els enginyers trobaran alguns cops, però que els arquitectes ens trobem sistemàticament a les fases inicials, cosa que les exclou de qualsevol procés d'amidaments, de manera que no podem passar per alt aquesta qüestió. Així doncs, són sistemes que es mostren terriblement rígids quan un arquitecte els ha de fer servir en el procés de concepció de la idea. En aquest sentit, necessitem més agilitat.

Els sistemes de fabricació, però, són un aspecte completament diferent del qual certament els arquitectes podrien beneficiar-se del món de l'enginyeria. De fet, hi ha força obres modernes que han usat sistemes de fabricació de la indústria aeronaval per construir part de les seves obres, com és el cas de Buckminster Fuller amb la Dymaxion House o de Frank Gehry amb el Guggenheim de Bilbao.² En aquest aspecte, els sistemes de CAD/CAM han demostrat que són eines capaces de construir tota mena de vehicles i de sistematitzar i simplificar la cadena de producció de vaixells, avions i cotxes i estalviar moltes hores de treball mecànic als operaris. Però això no es pot fer si no es disposa dels sistemes de disseny adequats que molts cops troben una vinculació més fàcil amb els models paramètrics que no pas amb els models estrictament geomètrics. En general, cal un cert grau d'estandardització formal per poder dur a terme un procés de construcció automàtica de les peces, controlar alguns aspectes geomètrics que no es poden construir i deixar els marges d'error necessaris perquè s'acoblin.

L'artefacte que més s'assembla en el seu procés de disseny i funcionament a l'edificació és el vaixell. En general, de la mateixa manera que les cases, acostumen a ser peces úniques que per les seves dimensions no es poden estandarditzar completament. A més, són elements que tenen grans espais buits en l'interior i que la major part del temps acullen activitats humanes d'una manera molt similar a com ho fa una casa, potser per això parlem d'arquitectura naval. Val a dir que la indústria naval s'ha automatitzat en gran mesura i que fa servir sistemes de CAD/CAM per fabricar vaixells, fins al punt de prescindir de gran part de la documentació gràfica. Per tant, si en el cas de la indústria naval l'automatització del procés de fabricació ha estat possible, per què no ho ha de ser en l'edificació? Hi ha moltes respostes a aquesta pregunta però no n'hi ha cap que ens porti a la conclusió que no sigui possible fer el mateix en el nostre àmbit. Certament la diferència més gran la trobaríem, per una banda, en els materials de fabricació, i, per l'altra, en el volum de demanda, que en el cas dels vaixells és molt inferior que en l'edificació i, per tant, són molt més cars.

² Kolarevic, B., *Architecture in the digital age · design and manufacturing* 2003, Taylor and Francis group, p. 8, "From ships to buildings".

1.1.2 Necessitats específiques de l'arquitecte respecte d'altres professions

Sovint l'enginyer es basa en els aspectes funcionals i en els elements prefabricats per generar un model, però aquesta aproximació no sempre és vàlida en el procés de disseny de l'arquitecte ja que els aspectes expressius i formals de vegades prenen un paper rellevant. Per altra banda, l'ús d'elements prefabricats no sempre s'adapta convenientment a les necessitats i particularitats de l'edificació. Per tant, la gran varietat de casos que es poden trobar en arquitectura fa que no sigui generalizable l'ús de sistemes paramètrics que, a més, compliquen els processos generatius³ quan necessitaríem una gran agilitat per modelar mentre, simultàniament, avaluem les característiques del resultat. Ajuntar aquestes dues propietats (la facilitat d'ús amb la capacitat d'avaluació tècnica) no és una tasca trivial pel que fa a la informàtica. De fet, representa un repte molt més complex que no pas l'ús de sistemes de comprovació paramètrics, ja que el procés d'introducció de dades té un paper fonamental en el disseny arquitectònic i ha de complir uns mínims de rapidesa, flexibilitat i/o simplicitat perquè pugui tenir lloc el que anomenem *arquitectura*, tant en l'aspecte expressiu com en el tècnic. És des d'aquesta perspectiva que plantejo aquest treball, buscant un sistema àgil i, al mateix temps, comprovable tècnicament, que permeti treballar amb criteris tècnics sense perjudici del disseny. Actualment hi ha un buit en aquest camp de l'arquitectura,⁴ fet que obliga molts arquitectes a buscar eines de representació polivalents i flexibles que després no es poden avaluar tècnicament, cosa que desvincula completament el disseny de la comprovació tècnica i obliga a fer servir múltiples models geomètrics d'un únic edifici per poder fer comprovacions tècniques. Per aquesta raó, una investigació detallada de les possibilitats de disseny que ofereixen les eines digitals (de cara a generar models indefinits que es puguin concretar gradualment, o de models paramètrics que es puguin replantejar amb molta facilitat) és essencial per mantenir el nivell de competència professional en un món que es dibuixa cada cop més digital. Des d'aquesta perspectiva, és clar que els arquitectes necessiten un sistema de modelatge progressiu en el qual el detall es concreti a poc a poc, i que permeti modificar el model de treball amb molta agilitat. Això és essencial en un procés de recerca formal que tingui lloc en un medi digital i, certament, el dinamisme o la capacitat de generar sistemes en moviment és molt més atractiu per solucionar aquests aspectes amb eficàcia que no pas la geometria estàtica convencional que fan servir actualment la major part dels programes dedicats al disseny. Només en l'àmbit de les animacions trobem la possibilitat de recrear moviments, però no són programes aptes per al disseny ja que

3 Woodbury, R., *Elements of parametric design*, 2010, Routledge, p. 24.

4 Mora, R., Bédard, C., Rivard, H., "A geometric modelling framework for conceptual structural design from early digital architectural models", April 2008, *Advanced Engineering Informatics*, Volume 22, Issue 2, p. 254-270.

els falten eines bàsiques. Per això plantejo en aquesta tesi l'ús de sistemes dinàmics en temps real com a motor de generació formal en arquitectura, cosa que ja s'ha fet anteriorment^{5,6} i que actualment s'està desenvolupant. Si mirem la pàgina web d'Aedas,⁷ a la branca de CDR (*Computational Design and Research*), a la introducció podem llegir el següent: "We have developed a unique brand of participatory design combining interactivity, real-time processes, portability and scientific rigour".⁸ Com veiem, el fet de crear interacció en temps real és un valor que es té en compte a l'hora de desenvolupar noves tècniques i que, per tant, en aquesta tesi es té en compte des del primer moment.

1.1.3 Els sistemes físics de simulació com a possible resposta

De les diferents estratègies que es poden aplicar per generar models dinàmics, la reproducció de fenòmens naturals ha suscitat un cert debat com una alternativa a la geometria convencional. Conceptes com la capacitat per autoorganitzar-se, per veure's afectat per l'entorn o el polimorfisme s'han esgrimit com algunes de les capacitats dels sistemes naturals que es podrien aplicar a l'arquitectura.⁹ Tots aquests processos es poden materialitzar a partir de processos dinàmics basats en les lleis de la física que afectin la geometria del model tal com veure'm a la tesi. Per altra banda, aquesta aproximació permet establir una relació intuïtiva amb l'usuari ja que estem acostumats a preveure el comportament dels elements dinàmics segons les lleis físiques que experimentem cada dia i, per tant, ens hi sentim més còmodes. En aquest sentit, podem llegir d'un article recentment publicat que "[...] The ability of this approach to parallel real world characteristics reduces the early needs for abstract procedural and hierarchical development [...]".¹⁰ Per tant, si per una banda els sistemes dinàmics són una estratègia recurrent en les investigacions sobre processos generatius arquitectònics en el medi digital, el fet de basar-los en

5 Arvin, S. A., *Physically based mechanical metaphors in architectural space planning*, 2005, Texas A&M University.

6 <http://generativedesign.wordpress.com/2011/12/12/cracking-the-layout-problem/>

7 <http://aedasresearch.com>

8 "Hem desenvolupat un sistema únic de disseny participatiu que combina interactivitat, processos en temps real, facilitat d'ús i rigor científic [...]"

9 Hensel, M., Menges, A., Weinstock, M., *Techniques and Technologies in Morphogenetic Design*, 2006, Architectural Design, Volume 76, Issue 2.

10 "[...] la capacitat d'aquesta aproximació per assemblar-se a la realitat redueix les necessitats inicials de l'usuari sobre coneixements de processos i jerarquia [...]". Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., "Physics based generative design", 2009, Publisher:

Les presses de l'université de montréal, CAAD Futures 2009, p. 231-244 - 3. Physics based Process.

les lleis de la física els fa més intuïtius de cara a l'usuari i facilita el procés de disseny. A més, l'arquitectura ja té una certa tradició en l'ús de maquetes físiques dedicades a trobar formes segons les tensions, per tant, aquesta línia d'estudi es pot emmarcar dins d'una branca arquitectònica que ha donat resultats excel·lents. Per altra banda, la simulació de fenòmens físics ha estat un clàssic de la computació des dels primers sistemes de càlcul mecànics fins a les últimes tècniques emprades en jocs d'ordinador. Per això mostren un gran atractiu de cara a realitzar comprovacions prèvies dels dissenys que ens permetin estalviar la fabricació de models físics costosos i laboriosos. També permeten la simulació realista de situacions reals que permeten investigar fenòmens que no es poden reproduir en el laboratori o que no es poden preparar per a situacions de risc sense córrer cap perill. Com veiem, permeten una major eficàcia, disminució de costos i augment de la seguretat en molts camps.

La generació de formes a la natura segueix processos de desgast i optimització dels elements. En el nostre univers tot està sotmès a una implacable llei del canvi segons la qual no hi ha res que no s'acabi transformant en un nou estat. Però aquests processos tenen ritmes molt diferents i si bé n'hi ha de ràpids, que tenen lloc en segons, n'hi ha d'altres que tarden dies, anys, mil·lennis o, fins i tot, milers de milions d'anys. En general, tots els processos de canvi tendeixen a estabilitzar una situació que no era estable i, per tant, a equilibrar els factors que actuen en una peça fins que aquests s'equilibren, per contraposició de forces o per desaparició d'aquestes forces. En aquest sentit, els fenòmens físics optimitzen el cosmos i donen equilibri a les formes i harmonia a les relacions. Es tracta, doncs, d'un sistema natural d'optimització universal. Aquests mecanismes es poden simular mitjançant la programació de les fórmules físiques que els descriuen, de manera que en podem reproduir el comportament i ho podem aplicar als nostres dissenys, amb un control total i plena capacitat d'extracció de dades. Però, a més, aquesta metodologia ens permet modificar aquests processos de cara a alterar-ne el comportament natural i reproduir fenòmens de comportament anàleg al comportament natural, però dedicats a resoldre problemes geomètrics que ens puguin interessar. Aquest aspecte és essencial per fer servir adequadament aquests mecanismes, ja que la reproducció literal de fenòmens no és el que pretén aquesta tesi, sinó l'ús dels principis subjacents.

La simulació d'aquests fenòmens s'aplicarà per "trobar" més que no pas per "buscar", ja que tenen la propietat de poder transformar un problema en una solució i, per tant, poden resoldre conflictes. Normalment, l'arquitecte busca una solució a molts problemes a partir d'un procés de prova i error, i en aquesta fase el més important és ser capaç de sintetitzar els problemes en elements únics, que en solucionar-se responguin a tot un seguit de necessitats diferents. En aquest procés, la manera de resoldre el disseny acostuma a ser un fet subjectiu ja que la imaginació de l'arquitecte és el que donarà lloc a la proposta i no sempre es podrà plantejar clarament un procés racional darrere de la seva elecció. Aquest fet és la conseqüència de resoldre problemes que no són lineals sinó multiobjectiu, perquè acostumem a tenir més

“incògnites que equacions” i, per tant, moltes possibles solucions per a un únic sistema. “Buscar” és, doncs, un fet inevitable llevat que fem servir algun sistema de recerca diferent a la imaginació. En aquest sentit, s’han desenvolupat sistemes de solució matemàtica per a problemes que no tenen solució lineal, com ara els sistemes genètics o els sistemes iteratius. Aquests són capaços de donar resposta a diferents conflictes al mateix temps, d’una manera similar a com ho fa l’arquitecte però que òbviament no el poden substituir perquè no tenen la capacitat de discernir amb prou sentit comú per afrontar situacions inesperades o que no han estat prèviament programades. Primer de tot, són sistemes molt oberts que s’han de “controlar” per donar solucions vàlides i això requereix la intervenció d’un usuari que, amb cadascun dels seus actes, alterarà el resultat final i, per tant, deixarà inevitablement la seva empremta; en segon lloc, no resolen el problema d’escollir la millor solució ja que serà l’usuari qui haurà de fer aquesta tasca. Però sí que permetran racionalitzar el mecanisme de recerca formal de manera que les formes es poden argumentar, no és una elecció subjectiva.

Els processos que permeten transformar directament un problema geomètric en una solució formal acostumen a ser processos iteratius de prova i error, aquesta és la base per als sistemes genètics que a partir de la creació de poblacions de variacions sobre un tema n’escullen les millors i les reproduïxen de nou amb noves variacions. Aquest mecanisme fa servir la potència computacional directament aplicada per provar i provar fins que aparegui, per casualitat, el resultat. Però hi ha altres plantejaments de recerca que no es basen en la força bruta de computació per resoldre un problema, sinó en un principi més senzill basat a establir un procés de transformació a partir d’unes normes fixades que permetin accedir a les solucions de manera molt més directa. Les forces naturals que governen el nostre univers són un dels exemples més evidents de recerca formal iterativa que tenim al nostre abast. No es generen formes a l’atzar com en els sistemes de recerca genètics sinó que se segueixen lleis fixades per produir-les, lleis que, a més, les perfeccionen en un sentit o un altre. Aquesta és la metodologia que va fascinar Frei Otto o Gaudí, exponents molt significatius d’aquest plantejament de “trobar” més que “buscar”, que sense deixar de fer una arquitectura pròpia han fet servir sistemes de solució formal autònoms com a eina fonamental del seu treball. Val a dir que la imaginació no deixa de tenir un paper significatiu en la recerca formal basada en la simulació física, ja que la intervenció de l’objecte es trasllada al procés de transformació d’aquest objecte. D’aquesta manera, controlem processos més que no pas formes tal com ja passa amb el disseny paramètric, en el qual l’edició de les relacions entre els elements és més important que l’edició directa del model.¹¹ Inevitablement, aquests mecanismes han permès obtenir formes pròximes a la natura ja que els processos que es fan servir acostumen a ser processos que també actuen en el món natural, que són capaços de resoldre amb senzillesa els problemes més complexos. Però ara tenim la

¹¹ Woodbury, R., *Elements of parametric design*, 2010, Routledge, p. 24.

capacitat no només de fer servir aquests processos amb molta més facilitat i control, sinó d'alterar-los i de jugar amb els mecanismes subjacents que fan servir per dedicar-los al propi disseny.

En el món de l'arquitectura ja s'havien fet servir sistemes d'optimització formal basats en el teorema de la catenària inversa, que permetien obtenir arcs i voltes òptims a partir d'un procés natural de deformació. Eren sistemes que molts cops requerien de la fabricació de models físics amb els quals poder "calcular" mecànicament la solució, un cop obtinguts els resultats s'haurien d'extreure les dades del model i aplicar-les a l'escala corresponent. Ara podem generar aquests models amb sistemes digitals i reproduir-hi tota mena de forces tants cops com faci falta fins a obtenir el resultat adequat. El control dels processos és més gran, els resultats es poden obtenir a l'escala que correspon i els objectes poden ser molt més complexos. Però el pas al món digital no és fàcil ja que encara hem de desenvolupar les eines adequades de treball i definir com serà el model que volem fer servir.

1.2 Objectius de la tesi

Si bé els sistemes digitals de simulació física han demostrat un gran potencial per simular les lleis de Newton, encara no han fet cap aportació significativa al món del disseny a l'arquitectura més enllà de casos puntuals. Segurament la manca de recerca per part dels arquitectes en l'àmbit del programari digital, activitat que han delegat excessivament en els enginyers, ha fet que manqui molta investigació sobre les possibilitats que tenen aquests sistemes a l'hora de millorar l'activitat professional de l'arquitecte. Per això, ens trobem en una situació on no disposem d'eines adequades per una de les tasques més importants de l'ofici, que és el procés de disseny¹² i, a més, hi ha mancances importants en el procés de definició tècnica de l'edifici on l'ús de les tècniques digitals es pot millorar. Això limita el potencial de l'arquitecte per proposar geometries complexes en no ser capaç d'aprofitar la capacitat de computació per complementar la seva capacitat de disseny; a més, es perd la possibilitat de fer una feina molt més eficient. Cal, doncs, investigar la capacitat d'aquests mecanismes per fer aportacions al món de l'arquitectura, ja que l'augment de capacitat de computació no reverteix en avantatges equivalents per als arquitectes, cosa que els deixa en un clar desavantatge davant d'altres oficis que han pogut integrar millor aquests sistemes en la seva tasca professional. Un exemple el trobem en els estats d'amidaments, que en molts casos encara es fan a mà. Una cosa similar podem dir del compliment tècnic dels projectes que difícilment s'arriba a assolir completament. En el millor dels casos, ens veiem obligats a crear diferents models d'un mateix edifici amb diversos programes

¹² Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier, p. 39.

per poder fer totes les comprovacions pertinents, amb els problemes de coherència que això comporta i, malgrat tot, encara hi ha molts aspectes que cal repassar a mà. Però resulta que l'ordinador és capaç de fer tots aquests càlculs milers de vegades per segon sense equivocar-se, fet que sembla que no inquieta suficientment els professionals. El cas és que aquest potencial no s'aprofita perquè no hi ha un programari que ho permeti. És essencial, doncs, aconseguir una eina que integri aquests aspectes des del primer moment per tal d'agilitar tot el procés de disseny. Però per fer-ho de la millor manera possible cal anar més enllà de la simple inclusió d'aquests aspectes en un únic programari que, de manera natural, l'únic que faria seria crear un programa desmesuradament complex. Si volem que aquests aspectes no impedeixin una expressió plena de l'arquitecte cal integrar-los dins la metodologia de treball en un únic model. No oblidem que aquestes comprovacions tècniques en realitat són el reflex de les necessitats de les nostres edificacions un cop construïdes i, per tant, hi haurem d'estar en harmonia a la força.

Fer servir sistemes dinàmics va en aquesta direcció, ja que els estats de tensions que normalment responen a l'estructura es tornen eines de disseny amb les quals podem plantejar tota mena de condicions geomètriques i tensionals, i integrar aquests aspectes de manera definitiva en el disseny de l'edifici. Si volem fer alguna cosa que escapi a aquestes condicions en serem plenament conscients i podrem comprovar-ho en tot moment, ja que transgredir aquestes normes amb coneixement no és el mateix que transgredir-les per accident. Per tant, s'integra un aspecte tècnic com a eina de treball que permet combinar la geometria i l'estructura. El fet, però, de treballar amb aquesta estratègia també planteja canvis conceptuals i tècnics que difereixen d'aquells que es plantejaven amb les eines de CAD tradicionals i que posa l'accent en aspectes diferents als quals feia el dibuix lineal. Conceptes com el de moviment, massa, força, equilibri i agrupació prenen el relleu a velles tècniques de dibuix geomètric on es feien servir estratègies elaborades de dibuix per obtenir la posició i característiques de cada element. No desapareix la geometria, però s'assoleix de manera diferent i això permet explorar mecanismes de treball que aborden qüestions que amb un sistema tradicional de dibuix no es poden ni plantejar. La solució geomètrica dels elements permetrà controlar dissenys de gran complexitat formal amb poc esforç, sempre que estiguin correctament plantejats, i modificar-los en temps real mentre l'usuari observa com es van transformant. Aquest procés de transformació iteratiu, visual, en el qual es pot intervenir, és fonamental per comprendre com serà la possible arquitectura a què doni lloc aquest sistema.

1.2.1 El control geomètric a través d'elements dinàmics

1.2.1.1 *Estudi de la relació amb l'usuari*

Fer servir sistemes de simulació física com a eina de modelatge ens obliga a controlar la forma de l'objecte a partir de camps de força, que en alguns casos resulta molt difícil. Tot i que els comportaments basats en simulacions físiques resulten molt intuïtius,^{13,14} no estem acostumats a fer-los servir de forma activa, sinó més aviat de forma passiva. Per obtenir un resultat precís ho tenim, doncs, una mica difícil, en canvi, obtenir un model aproximat és molt més senzill perquè podem preveure de manera aproximada com afectarà una força a un conjunt. En treballar amb elements dinàmics també correm el risc de perdre el control dels elements. L'inconvenient de la manca de control sobre el resultat, si bé es pot preveure, no sempre es pot controlar amb prou precisió. Per exemple ja a finals de la dècada de 1980 es va parlar d'aquesta temàtica, en un article de Demetri Terzopoulos es recull un comentari d'Alan Barr que, en aquest sentit, exposa el següent:

"It lets you control the physics and get what you want in a mathematically guarantee way. Whatever you don't say that you want, you're not guarantee to get. There might be a happy accident in which the physics might accidentally give you what you want, but it won't be guaranteed, unless you use a mathematically guaranteed method".¹⁵

Si alguna cosa no s'ha programat específicament per actuar d'una manera concreta, el sistema pot presentar una manca de control important sobre el resultat i els sistemes de simulació física genèrics, que són els que volem fer servir per al sistema de CAD, no estan específicament dissenyats per a una tasca concreta, per tant, semblaria que no poden donar resultats concrets. Però això es pot solucionar a partir de la generació d'eines que ens permetin controlar

13 Kagan, P., Fischer, A., Shpitalni M., "Intuitive physically based CAD system for designning os sculptured surfaces", 1996, *CIRP Annals - Manufacturing technology* volume 45, Issue 1, p. 121-124. **Introduction.**

14 Terzopoulos, D., Qin, H., "Dynamic NURBS with geometric constraints for interactive sculpting", 1994, *ACM Transactions on Graphics* Volume: 13, Issue: 2, Publisher: IK, DTU, p. 103-136.

15 "[...] et permet controlar la física i obtenir el que tu vols de manera matemàtica. Tot allò que no ha estat especificat no tens cap garantia d'obtenir-ho. Potser, de forma accidental, la simulació física farà el que tu volies, però no en tens cap garantia, tret que ho hagis especificat matemàticament". Terzopoulos, D., "Physically based modeling: past, present and future", 1989, *ACM SIGGRAPH Computer Graphics*, Volume: 23, Issue: 5, Publisher: ACM Press, p. 191-209, p. 201.

ràpidament aquestes simulacions, d'una manera prou senzilla perquè el sistema el pugui utilitzar per qualsevol usuari i suficientment precisa perquè el resultat ens pugui ser útil. Per altra banda, també és necessari comprovar el grau de precisió que podem obtenir amb aquest sistema i si ens servirà per fer un model que sigui prou precís. Així doncs, la tesi es proposa, en primer lloc, explorar aquesta possibilitat i establir les pautes necessàries per al control eficaç de les funcions dinàmiques.

1.2.1.2 *Capacitat per controlar elements complexos*

Gràcies a la capacitat del sistema per establir relacions dinàmiques entre elements en podem coordinar la modificació de manera que amb una sola acció aconseguim una modificació general del model. Un exemple molt clar el trobem en el cas de les malles definides per vèrtex, que com que és un element d'una certa complexitat geomètrica amb sistemes de modelatge convencionals ofereix una capacitat de control molt pobre. En aquest cas, ens caldria moure els vèrtexs de la malla un a un per aconseguir una modificació general, ja sigui un estirament, una deformació o un relleu diferent. En canvi, amb sistemes dinàmics podem millorar el control de la malla de manera que si només modifiquem els nodes de control la resta d'elements es modifiquen seguint els camps de força interns. D'aquesta manera, un canvi concret produeix la modificació de tot el model sense haver de passar per totes les parts.

La base del funcionament d'aquesta idea és aprofitar la capacitat dels camps de força per actuar sobre tots els elements a partir de regles senzilles i previsibles. Com que podem preveure més o menys quin serà el resultat de la seva acció quan modifiquem el model, podem utilitzar aquestes regles a favor nostre perquè ens ajudin en el modelatge. Lògicament, de moment només poden produir modificacions molt bàsiques, que no per això deixen de ser extremament útils, però és possible que en el futur es desenvolupin sistemes per modificar automàticament el model d'una manera molt més concreta i funcional, i així millori extraordinàriament la capacitat de control de l'usuari. Si tornem al procés esmentat, en modificar algun dels nodes de control aquest estirarà els elements als quals vagi connectat i, al seu torn, afectaran els següents, i així fins a produir un canvi global en el model sense necessitat d'intervenir-hi. Com que molts cops els canvis que necessitem produir són molt trivials aquest mecanisme es mostra molt útil. Per altra banda, els diferents camps de força que actuen sobre cada subelement també s'adaptaran a les noves condicions i produiran els canvis pertinents en la seva zona d'acció que, de manera molt més discreta, acabaran produint canvis globals. Per tant, el conjunt mantindrà la coherència geomètrica.

Aquesta propietat aparent dels sistemes dinàmics cal posar-la a prova per comprovar com, i en quins casos, el sistema permet controlar elements complexos, quina mena d'elements permet

modificar amb més facilitat i quines eines calen per fer-ho. Cal, doncs, experimentar amb una certa agilitat modificant models de diferents tipus per poder comprovar que, efectivament, és possible controlar grans quantitats d'elements. Per altra banda, si els elements complexos es poden controlar fàcilment, caldria establir quines conseqüències té aquesta capacitat sobre el procés de modelatge de manera que puguin sorgir noves tècniques.

1.2.2 Processos d'optimització

1.2.2.1 *Optimització de superfícies de panells*

Aquesta metodologia basada en el dinamisme de les peces també ofereix la possibilitat d'optimitzar la disposició dels elements d'un conjunt a partir de la modificació de les regles que en controlen el comportament global i oferir, així, la capacitat d'establir condicions geomètriques sobre el model que es compleixin automàticament sense la intervenció de l'usuari. Val a dir que ara tot just es comença a plantejar aquest recurs com una manera sistemàtica de solucionar problemes en el camp del disseny. Ho intentarem aplicar sobre el cas concret dels panells que, com veurem, aplicar-ho dóna lloc a solucions molt suggestives i variades. El cas dels panells ens permet deduir que en qualsevol àmbit en el qual s'apliqui aquest sistema pot ser una eina útil per investigar les possibles solucions als problemes plantejats d'una manera diferent a com ho hem fet fins ara i amb resultats que poden ser perfectament vàlids.

A diferència dels mètodes de resolució directes en els quals una fórmula matemàtica o un seguit de funcions donen un resultat exacte, en el cas dels sistemes dinàmics, quan es dóna un canvi en l'equilibri de tensions (per una modificació de la geometria o per un canvi dels paràmetres que controlen la força), el sistema comença a buscar iterativament un nou equilibri que normalment passa perquè la geometria es modifiqui de manera substancial. Com que el sistema no busca una solució directa i, per tant, encara que li proposem un problema impossible no busca un resultat exacte, sempre serà capaç d'aproximar la millor solució. La clau està en el procés que segueix per solucionar el problema, que intenta resoldre a poc a poc i no d'un sol cop. És capaç d'anar endavant i endarrere, d'oferir resultats completament inesperats i de funcionar en condicions adverses, sempre millorant i aproximant més i més el resultat. La tesi pretén, doncs, experimentar amb aquest potencial dels sistemes digitals per donar resultats inesperats¹⁶ i aplicar-lo a casos concrets que ens poden ser útils en el món de l'arquitectura.

¹⁶ Terzidis, K., *Algorithmic Architecture*, 2006, Elsevier, p. 21.

1.2.2.2 *Inclusió de la lògica constructiva*

Gràcies a la capacitat que el sistema té per regular la manera com es modifica el model, apareix un nou concepte de gran interès en el món de l'arquitectura, l'*Embedding Fabrication Logic*,¹⁷ que fa que la manera com el model es modifica es correspongui amb les restriccions constructives de la futura edificació. El nom d'*Embedding Fabrication Logic* es podria traduir per lògica constructiva integrada; segons aquest principi, s'aprofita la capacitat del model per modificar-se de manera intel·ligent segons una sèrie de regles imposades per l'usuari. Aquesta "forma intel·ligent" pot canviar la manera com es percep el model arquitectònic perquè en dissenyar un model amb sistemes dinàmics involuntàriament estem creant un mecanisme generador, i és a través d'aquest mecanisme que l'arquitecte mostrarà les seves habilitats. Així, doncs, el disseny no es manifesta exclusivament en la forma final del model, sinó en la lògica del comportament d'aquest quan es transforma. Per tant, és molt important el concepte de "forma intel·ligent" perquè serà on l'arquitecte podrà expressar la seva singularitat.

Generar un comportament implica preveure com volem que es modifiqui el model quan nosaltres hi exercim una acció. Controlar aquest procés pot ser essencial no només de cara a la creativitat formal sinó també en la integració de lògiques constructives en el resultat final. Així, l'usuari no ha de pensar més si el seu model és geomètricament viable o no, pot experimentar lliurement amb la forma i centrar els esforços en altres aspectes que consideri més importants mentre el propi sistema resol els conflictes constructius més importants de manera automàtica. Però també cal tenir present que això implica que algunes accions de l'usuari quedaran limitades o corregides a causa d'aquest procés d'autocorrecció, que segurament restringirà el camp d'exploració i, per tant, no serà possible fer qualsevol forma. Aquesta propietat permet que els dissenys adquireixin molta més complexitat sense que quedin fora de control ni necessitin una dedicació excessiva, que fa que nous tipus de plantejaments, que amb models estàtics no es podrien ni proposar, els pugui treballar eficientment una sola persona. És, doncs, essencial que es pugui dissenyar aquest comportament de manera relativament eficient i que, al mateix temps, sigui fàcil d'entendre com funciona. En això entren en joc aspectes que no tenen únicament a veure amb el model físic de simulació, sinó que també tenen a veure amb la interfície del programa; més endavant veurem com s'ha tractat aquest tema.

Recordem que els sistemes de simulació física, en treballar de manera discreta, poden aproximar solucions a problemes que no es poden resoldre de cap altra manera i ho poden fer en relativament poc temps. Cal, però, ser capaç de formular, en forma de forces, un problema

¹⁷ Attar, R., Aish, R., Stam, J., Brinsmed, D., Tessier, A., Glueck, M., Khan, A., "Physics based generative design", 2009, Publisher: *Les presses de l'université de montréal*, CAAD Futures 2009, p. 231-244.

perquè el pugui resoldre el sistema; llavors la solució sorgirà de manera espontània. No tots els problemes es poden plantejar d'aquesta manera. N'hi ha que requereixen de la generació o eliminació de dades i, en aquest cas, les simulacions físiques no poden generar o destruir l'objecte sobre el qual actuen. Però per a la resta de casos seria interessant experimentar amb la capacitat que puguin tenir per resoldre problemes aplicats a casos constructius reals.

1.2.3 Estudi dels models dinàmics

1.2.3.1 *Potencial de disseny*

Estudiar quins són els models que s'adeqüen millor als sistemes dinàmics és essencial de cara a preveure'n la possible aplicació. Ja podem intuir que les formes funiculars i tènscils seran molt adequades, però cal preguntar-se si hi ha altres geometries que també es poden tractar amb sistemes dinàmics, aspectes que fins ara no s'havien plantejat i que es poden incorporar al repertori formal dels arquitectes amb la introducció d'aquests mecanismes. Tenint en compte l'elevada capacitat d'aquests sistemes per combinar condicions geomètriques i donar una resposta vàlida, es pot intentar integrar casos molt més complexos que la simple volta funicular i veure quina mena de resposta dóna. Aquests resultats es poden comparar amb les solucions que tradicionalment s'ha donat a alguns d'aquests problemes i veure com el sistema dinàmic ha plantejat la solució.

En casos contemporanis pels quals no hi ha solució tradicional, el sistema ens pot donar pistes sobre quina estratègia formal pot ser la més adequada per solucionar un problema geomètric determinat i optimitzar, d'aquesta manera, el disseny en els estadis més primerencs. No oblidem que aquest model inicial ja està digitalitzat i, per tant, el pas de l'esbós al detall tècnic no suposa un salt tan brusc com quan fem servir esbossos fets a mà. Això no només implica més capacitat de disseny, sinó que, a més, els esbossos es poden integrar com a part del procés digital, i així deixa de ser un procés a part que cal fer a mà i que després cal digitalitzar amb tècniques que acaben distorsionant la idea original. Si això es pogués fer en el tractament digital del disseny podríem planificar els nostres projectes des del primer moment amb tots els avantatges de compatibilitat i tractament que ofereixen els sistemes digitals.

A tots aquests avantatges se suma un altre factor important, l'estil arquitectònic que imposen aquestes tècniques basades en sistemes dinàmics, ja que no podem oblidar que l'eina amb la qual modelem imposa uns condicionants a la forma que afecten directament el resultat i per això cal conèixer quina serà la tendència natural a l'hora de modelar amb aquest sistema. Com

veurem, les formes seguiran, en gran mesura, les estructures naturals, però això també es pot aplicar de maneres molt més variades a com s'ha fet servir fins ara. La solució no sempre es podrà relacionar amb una forma natural ja que es poden aplicar forces pseudofísiques que són similars però no iguals a les forces naturals i que, per tant, plantejaran solucions que ens poden resultar estranyes. En conjunt, podem guanyar un punt de vista nou sobre com es poden afrontar els problemes de disseny, que es podria considerar un estil tant en l'àmbit funcional, com en l'estructural i l'estètic.

Per tant, fer un estudi sobre les propietats que pot tenir l'ús d'aquesta metodologia de treball en l'àmbit artístic, o en el procés de treball, és important de cara a tenir una visió completa de les possibles aplicacions d'aquest sistema. A partir del CAD basat en sistemes dinàmics podem realitzar aquestes experiències amb les quals podem comprovar els efectes reals del sistema sobre el model, el procés de treball i la varietat formal de la qual disposa l'arquitecte.

1.3 Metodologia general d'estudi de la tesi

Des de fa uns quants anys, la programació m'ha permès investigar diferents tipus de fenòmens a partir de la simulació amb l'ordinador. En aquesta tesi intento aprofitar aquesta capacitat com a mètode d'investigació per aprofundir en el coneixement dels sistemes dinàmics com a eina de treball en arquitectura, per tant, faig servir la programació de forma sistemàtica en aquesta tesi. En iniciar la investigació apareixen moltes maneres de plantejar l'estudi a partir de la programació i cal que n'esculli una que sigui coherent amb les expectatives que ens plantejem.

1.3.1 Procés d'investigació

La metodologia general es basaria a fer servir algun tipus d'aplicació per introduir els conceptes que volem comprovar de manera que es puguin aplicar a algun cas concret. Fer-ho ens permet passar de la teoria a la pràctica amb certa agilitat, de manera que ràpidament pugui establir quines idees són vàlides i quines no són pràctiques. Així, doncs, de cara a fer l'estudi dels sistemes dinàmics programaré una aplicació CAD senzilla en la qual introduiré un sistema de dibuix geomètric complementat per funcions dinàmiques. En aquest programa prototip es podran comprovar les idees teòriques que s'exposen a la tesi de manera que se'n pugui fer un ús pràctic amb el qual poder corroborar les expectatives que teníem sobre aquest ús. Com a resultat d'anar provant diferents idees, aspectes i funcions, el programa anirà guanyant complexitat i es completarà amb l'avenç de la investigació. Cal afegir que de les proves sortiran models que es podran exportar a altres programes i que serviran d'exemple i demostració del treball realitzat.

Un altre aspecte que sorgeix en anar introduint diferents funcions a l'aplicació és que cal desenvolupar paral·lelament una estratègia de treball general. Aquest aspecte només es pot tractar quan tot es fa sobre un mateix programa i vincula totes les funcions entre si de manera que s'entengui que, més enllà del que serien els diferents casos particulars de simulació física, hi ha una lògica de conjunt que les uneix, que no és únicament un tema teòric sinó també funcional. A partir d'una sèrie d'exigències de versatilitat i percepció per part de l'usuari, cal tenir en compte una certa uniformitat en el plantejament del control de les funcions. Aquest aspecte és complex i implica la coordinació de molts factors de natura diferent, que no es poden tractar si es treballa amb diferents aplicacions aïllades ni tampoc des d'un punt de vista teòric; a més, és un aspecte fonamental que cal resoldre si volem fer una aplicació realment funcional més endavant. En el moment de comprovar un plantejament cal programar la base de dades, les forces i altres elements que involucrarà l'estudi de l'element. Això s'ha de fer mantenint la compatibilitat amb els mecanismes d'edició del programa i la resta d'elements prèviament treballats, cosa que obliga a buscar principis generals més que no pas solucions puntuals. Com a resultat obtenim una sèrie d'objectes i funcions genèrics amb els quals es resolen la major part de casos, de manera que cada nova comprovació amplia o poleix algun dels aspectes previs del programa. Un cop fet, es comprovarà el funcionament del sistema per veure que sigui correcte. Es pot donar el cas que la idea inicial necessiti una revisió total per tal de funcionar de la manera prevista, o que sigui molt o completament impossible de programar; llavors cal tornar al plantejament teòric i tornar-lo a formular. Si la comprovació ha estat possible s'estudiaran els resultats per detectar els possibles problemes, virtuts i necessitats que ha comportat, i per acumulació s'aniran afegint més i més elements al programa d'aplicació dinàmica de manera que la investigació anirà ampliant i completant el programa prototip. De l'estudi dels resultats podrem deduir els principis generals que poden afavorir o impedir l'ús dels sistemes dinàmics de disseny gràcies al fet que tot ho fem sobre un programa de modelatge. Aquest sistema també ens permet establir el comportament dels mecanismes dinàmics sobre casos concrets d'estudi, de manera que ja des del primer moment pugui tenir una aplicació funcional i pugui enfrontar-se a problemes reals dels quals es podran aprendre lliçons valuoses. En conjunt, és un sistema d'estudi en el qual la investigació i l'aplicació es basen mútuament en el desenvolupament de l'eina dinàmica de treball i que permet aprofitar la tesi des de diferents vessants.

1.3.2 Anàlisi dels resultats

Els resultats generats es poden exportar a un programa de CAD en el qual estudiarem el model en detall, veurem quines propietats geomètriques té i quin grau de precisió hem obtingut. D'aquesta manera, podem avaluar la capacitat del sistema dinàmic per generar models que ens

puguin ser útils per a la definició geomètrica de l'edifici. Per altra banda, també estudiarem quin és el ventall de morfologies que s'han obtingut amb aquest mètode i les classificarem de manera que puguem establir quins són els casos habituals que es poden treballar amb sistemes dinàmics de manera eficient. Per classificar els models farem servir un criteri basat en la tipologia arquitectònica que permet reproduir la temàtica constructiva, estructural o generativa que resolent ja siguin malles, arcs, elements volumètrics, pannel·lització, etc. Aquesta classificació permet començar a establir quines àrees del modelatge són més propenses a millorar amb l'ús de sistemes dinàmics i quines tipologies arquitectòniques responen millor al tractament amb aquests mecanismes. També serà necessari comprovar la dificultat que hem tingut per poder manipular els models fins a obtenir-ne el resultat desitjat i avaluar, així, el procés de treball i si és possible millorar-lo intentant afegir funcions que resolguin els problemes habituals que sorgeixen en l'ús d'aquests mecanismes. Finalment, ens cal analitzar els processos inesperats que tenen lloc en treballar amb models dinàmics i que poden ser molt interessants i intentar entendre per què tenen lloc i què aporten al conjunt de l'estudi.

D'aquest estudi de casos particulars en sorgiran uns casos d'aplicació principals sobre els quals els sistemes dinàmics mostren moltes possibilitats de tenir aplicació directa. També hi haurà uns casos d'aplicació secundaris en els quals, amb menys adaptacions, aquests sistemes mostren un gran potencial per optimitzar processos habituals en el camp del modelatge. Finalment, sorgiran unes conclusions de caire general sobre el funcionament dels sistemes dinàmics que donaran una idea àmplia sobre les implicacions que en comporta l'ús. Aquestes conclusions, a més, obriran noves vies d'investigació de cara al futur amb les quals es podrà ampliar el present estudi i aprofundir en els diferents aspectes que hagin sortit de la tesi.

1.3.3 Del que és general al que és específic?

En seguir aquesta metodologia el nostre punt de vista sobre els sistemes dinàmics es va transformant a mesura que s'introdueixen nous casos, de manera que millora el coneixement sobre les potencialitats del sistema. A mesura que es fan més proves, i es van ajustant les funcions, augmenta la capacitat de comprovar casos particulars gràcies a la inclusió d'eines i estratègies noves. Però com que partim d'un plantejament general en el qual s'intenta resoldre la major part dels casos amb el mínim de funcions, els models esquemàtics són fàcils de fer, però el tractament específic no sempre és possible perquè és molt difícil arribar al detall que el projecte requereix en la fase de projecte executiu (sense posar "pedaços" que alterin la lògica general del programa). Així doncs, encara que aquesta capacitat per anar del general a l'específic és fonamental en qualsevol sistema de CAD i, per tant, és imprescindible que els

sistemes dinàmics puguin preveure aquest aspecte, el procés progressiu de definició al qual hem pogut arribar només ens serveix per a les fases inicials. Això es deu al fet que quan treballem amb models tridimensionals en un sistema dinàmic, a la dificultat de modelar se li suma la de plantejar correctament els camps de força i això implica generar un mecanisme. Encara que aquest sistema sigui molt útil per al control general dels elements, quan hem de fer detalls ens trobem que cada nova forma és un nou mecanisme i en aquestes condicions és molt difícil de treballar de manera eficient. Per tant, de moment els sistemes dinàmics tenen una capacitat de detall limitada. Cal tenir en compte, però, que els sistemes dinàmics sí que poden arribar al nivell de detall necessari per fer comprovacions ambientals i estructurals i, de fet, són models molt més compatibles amb aquestes comprovacions que no pas els models geomètrics en CAD convencional. També és important el fet que permeten generar models globals que més endavant es poden exportar i fer servir per fer un model més detallat de la mateixa manera que els models estructurals mai no són completament detallats perquè no és necessari per al càlcul. Potser els sistemes digitals necessiten un procés de generació del projecte diferent al que hem seguit fins ara en el qual, com es feia antigament quan es construïen les façanes dels edificis en brut i més endavant es polien i completaven, caldria ara un procés equivalent en el camp digital, que primer s'ocupés de fer models generals de tipus esquemàtic sobre els quals es poden operar i comprovar els aspectes tècnics bàsics del projecte i, un cop n'hem validat el funcionament, es pot detallar el model d'una manera més exhaustiva. Seguint aquest procés el model inicial es pot generar sense dificultats amb sistemes dinàmics i després es pot fer servir algun altre programa per detallar-lo.

1.4 Programa de simulació dinàmica

A l'hora d'investigar la funcionalitat d'una metodologia de treball digital ens podem enfrontar a diverses estratègies de treball amb les quals es pot comprovar la viabilitat del sistema en diferents graus. Depenent dels coneixements d'informàtica que tingui l'investigador pot accedir a més o menys possibilitats d'exploració en l'àmbit digital. En general, però, tenim tres possibilitats molt clares a partir de les quals acarar la investigació:

- La primera és buscar programes que ja facin coses iguals o similars a les proposades i assumir les limitacions que aquests tenen a l'hora d'exposar els avantatges i desavantatges del sistema. L'estudi es limitarà a experimentar amb les eines que altres persones hagin programat i, per tant, comprovar idees noves serà, en molts casos, difícil o impossible.

- Una segona opció és fer servir un sistema de programació simplificat i que actui sobre algun altre programa que li faci de base de treball. Aquest mecanisme permet aprofitar la interfície, els sistemes de representació, i totes les eines de què ja disposa el programa de base sobre el qual es treballa per aplicar-les a les idees que un proposa. Això semblaria un gran avantatge, però en realitat no només heretarem els avantatges del programa inicial, sinó que també heretarem, encara que no ho vulguem, els desavantatges que pugui tenir en el seu plantejament, les seves estratègies i el seu àmbit d'aplicació. Per tant, també limitarem el que podem demostrar a aquells casos que es puguin fer sobre l'aplicació de base que fem servir. Tot i això, aquesta estratègia és molt millor que la primera ja que hi haurà moltes coses noves que podrem proposar, però dins d'un àmbit limitat.
- La tercera via és començar de zero. Si a un escriptor li fa por la pàgina en blanc, no cal dir quin ha de ser el sentiment d'un programador en trobar-se en la mateixa situació. La pregunta que en general tothom es planteja és "per on començo?". Resoldre-la no és tant important com la pregunta en sí, que és essencial perquè fa et qüestionar tot el que normalment donem per suposat quan treballem amb una aplicació. L'autor ha de preveure, programar i dissenyar detalls com el canvi de color quan el ratolí passa per sobre d'un botó fins a la manera com guardaràs les dades per poder-les modificar més endavant. Això dóna una gran llibertat i també una gran responsabilitat, i en la mesura que la por inicial queda enrere a poc a poc creix la capacitat per comprendre el que realment rem fins a l'última conseqüència. Entenem que aquesta és la millor manera d'investigar realment sobre una plataforma digital ja que un es deixa de veure limitat pels plantejaments que altres programes han pogut fer sobre el tema i comença a desenvolupar-se una manera de fer les coses que és fruit d'inquirir sistemàticament en tots els aspectes de la investigació. Una altra raó per la qual es programa des de zero és perquè volem tenir una idea global del funcionament d'aquest mecanisme en un entorn digital. Imaginem que decidim provar un sistema de simulació molt eficaç, que permet resoldre tota mena de casos sense dificultats però que no permet desar dades en un arxiu per alguna peculiaritat. En aquest cas, tot i que és molt funcional no és una opció útil perquè falla en un aspecte essencial. Precisament els sistemes dinàmics han tingut un problema similar perquè no és possible la modificació controlada del model sense programar el sistema i, per tant, cal abordar la investigació com un tot sencer per demostrar que l'estudi pot tenir alguna validesa funcional. Cal entendre que moltes de les capacitats dels sistemes digitals no es fan servir perquè no es poden plantejar de manera controlable o rendible, i les bases de dades que requereixen fallen en algun aspecte essencial. En concret, un dels problemes més grans dels sistemes dinàmics és la dificultat que tenen per treballar de manera precisa.

És en aquest context que intento desenvolupar un programari de demostració que m'encari de manera esquemàtica amb aspectes clau de l'ús de sistemes de modelatge dinàmic per comprovar com ha de ser una aplicació digital basada en aquest principi. No puc passar per alt elements que semblarien relativament trivials com la manera amb la qual s'accedeix a les propietats dels objectes, la manera com es fan servir els botons, les funcions de què es disposa en el moment de modelar, etc. Tot això s'ajusta al que seria treballar amb sistemes dinàmics en la mateixa mesura que la base teòrica que fem servir o les bases de dades de les quals ens valgum per representar el model. Per això, no poden quedar fora de l'estudi, encara que sigui en un segon terme, tots aquests aspectes ja que seran el que realment facilitarà o dificultarà l'ús d'aquesta eina. En aquest sentit, volem recalcar que un dels avenços més importants dels últims temps en modelatge digital té a veure amb el mètode de control en forma d'esquema que planteja Grasshopper¹⁸ de Rhino. Tot i que la idea no és nova, el fet de plantejar-la en el programa i el moment adequats han estat la clau de l'èxit. Això ens crida l'atenció per no descuidar aquests aspectes que tenen un paper molt més important del que sembla.

Un altre aspecte fonamental de programar directament és que et trobes amb els problemes reals que el teu plantejament implica en tota la seva complexitat tècnica i, per tant, els pots resoldre. Molts cops els plantejaments teòrics sobre sistemes digitals no tenen en compte aspectes funcionals i tècnics que són essencials per al futur de l'aplicació i que no tenir-los transforma l'estudi en una especulació sense fonament. Problemes que van des de la tasca trivial de seleccionar un element que, en ser dinàmic, costa de caçar amb el ratolí, fins al fet de treballar amb una base de dades que contínuament relaciona diferents elements i que en eliminar-ne un planteja gravíssims problemes de numeració perquè les llistes deixen de tenir correspondència entre elles. Totes aquestes qüestions s'han de tenir en compte i s'han d'exposar si es vol un estudi rigorós. Tot això apareix quan treballem a fons amb un programa; quan treballem en aquest àmbit és quan ens trobem amb la realitat del que el nostre plantejament proposa, amb problemes reals i concrets que no són fàcils de comprendre amb especulacions teòriques, tant pel funcionament com per la importància, i per als quals cal donar una solució al més senzilla possible. Si fem les coses així entendrem per què els programes treballen com treballen, per què hi ha coses que no es poden fer encara que semblin molt senzilles i per què coses molt difícils són, en realitat, grans trivialitats a l'hora de programar.

El programa amb què farem les comprovacions, i que es desenvoluparà a la tesi, ha de ser una eina de modelatge en CAD capaç de reproduir fenòmens dinàmics a partir de simulacions

¹⁸ <http://www.Grasshopper3d.com/>

físiques. Amb aquest mecanisme comprovaré la capacitat del sistema per resoldre problemes geomètrics complexos sotmesos a múltiples constriccions formals que, ara com ara, no hi ha cap sistema de càlcul directe que pugui resoldre. També experimentaré amb la possibilitat d'aplicar aquests mecanismes en diversos casos com, per exemple, comprovar la capacitat del sistema per resoldre problemes estructurals o constructius, veure quina capacitat té per fer d'enllaç entre els aspectes artístics i els aspectes tècnics del projecte (que permeti una comprovació aproximada en temps real del model) i molts altres aspectes que apareixeran sobre la marxa. Per poder abordar aquest tema ens cal integrar els sistemes de CAD i els sistemes dinàmics en una única eina capaç de donar resposta als problemes més bàsics o, com a mínim, demostrar el potencial per fer-ho. També serà necessari proposar una metodologia de treball nova, que permeti afrontar el control de les interaccions dinàmiques entre diferents elements.

1.4.1 Idees prèvies

1.4.1.1 La geometria des del punt de vista digital

Des del punt de vista del programador, el concepte de geometria és diferent del que es pugui tenir quan dibuixem sobre el paper perquè ja no es treballa amb la forma com a concepte sinó amb l'algorisme, la base de dades i el sistema de representació. Això es tradueix en concebre la geometria com un sistema generador de formes i de relacions des d'un punt de vista de la programació. Tot i que els algorismes permeten generar tota mena d'objectes, normalment tenen un àmbit d'acció limitat i, per tant, hi ha geometries que genera i modifica amb més facilitat que d'altres i també hi ha un àmbit al qual senzillament no hi pot arribar. Això afecta qui modela perquè el sistema, en facilitar-li la generació d'un cert tipus de formes i dificultar-li la generació d'altres, dóna peu a establir preferències basant-se en el sistema de representació i no en les possibilitats constructives i estructurals. Si no s'adverteix aquesta influència conscientment és possible que el disseny pateixi per culpa d'això sense que l'usuari ho pugui controlar. Cal, doncs, ser conscient del funcionament dels aparells amb els quals representem per fer-los servir apropiadament.

En treballar amb algorismes tenim la possibilitat de pensar amb un grau d'abstracció superior al que podíem tenir amb les formes clàssiques. Ara les formes pures són casos particulars de tipologies més generals que són els algorismes i, per tant, la lògica de la geometria s'ha alterat considerablement. Aquesta realitat, que no la podem representar amb un paper, ha aparegut únicament gràcies a l'ús de sistemes digitals, i ni tan sols en tots els casos aquests elements

tenen una expressió matemàtica, sinó únicament en forma d'algorismes desenvolupats sistemàticament per un sistema de computació. És molt important comprendre la vinculació que hi ha entre els algorismes, la forma i els resultats que s'estableix involuntàriament en el món de la informàtica, ja que sinó sense adonar-nos-en patim la subtil influència dels algorismes que fem servir, que a poc a poc van dirigint els nostres passos cap a l'ús d'un cert tipus de formes sense que ens adonem, i al cap dels anys ens acostumem a certes limitacions i acabem perdent la capacitat de donar respostes realment lliures. Aquest fet ens fa víctimes i no autors del sistema de treball. Si prenem consciència d'aquest fenomen i, a més, sabem mínimament com funciona la programació, podem escapar d'aquesta influència per descobrir una major llibertat. Tot i això, per experiència pròpia puc dir que tot sistema digital influencia la manera de pensar si no hi pensem prou atenció.

Si, per una banda, trobem aquests perills en l'ús de les tècniques digitals, per l'altra ens ofereixen una capacitat de generació formal molt més rica, que amplia l'espectre geomètric amb què juga l'arquitecte en el moment de prendre decisions i obre la possibilitat de resoldre problemes relativament difícils de geometria de manera automàtica mentre es dedica a altres aspectes de disseny i organització. En aquest sentit, han aparegut tècniques noves de treball que superen la concepció clàssica del dibuix i comencen a plantejar mètodes coherents amb les potencialitats reals dels sistemes digitals, que passen per treballar o bé amb bases de dades o bé amb sistemes de funcions fortament lligats al funcionament intern de les computadores.

1.4.1.2 *Simulacions dinàmiques, programació "tova" i sistemes BIM¹⁹*

En l'àmbit dels sistemes de modelatge en CAD hi ha una tendència creixent a fer servir elements predeterminats a l'hora de modelar. Això permet que el càlcul i tractament específic de cada element es pugui automatitzar en tenir-lo classificat com a objecte concret i desar-hi les instruccions necessàries per generar-lo. Si ens fixem en els sistemes de modelatge BIM, veurem que es parteix d'elements predeterminats relacionats amb la realitat constructiva arquitectònica, mentre que un sistema de CAD convencional ofereix elements bàsic de caire geomètric. Aquest és un dels avantatges principals dels sistemes BIM, que milloren substancialment el procés de modelatge i comprovació de les peces i el conjunt. Aquesta tendència per generar elements predeterminats, però, no s'ha observat únicament en els sistemes BIM, també en els sistemes de simulació física ha aparegut aquest recurs com una manera de facilitar el modelatge amb camps de força. Encara que el plantejament és completament diferent en tots dos casos, la idea bàsica

¹⁹ "Building Information Model" o model d'informació de la construcció.

de generar un bloc d'informació que es modifica d'una manera concreta, en comptes d'un element simple que es modifica de forma genèrica com és el cas dels CAD, hi és igualment present. El que permet treballar amb elements predeterminats és la capacitat de transformar la informació de manera coordinada i controlada i no basar-se únicament en la generació, modificació i eliminació de cada part. En un sistema de CAD convencional no es pot modificar coordinadament les diferents parts d'un element compost de moltes parts, en canvi, tant en els BIM com en els sistemes dinàmics sí que ho podem fer, per això tots dos sistemes tendeixen a generar elements predeterminats.

La diferència fonamental entre el BIM i el sistema de modelatge que plantejo és que mentre els sistemes BIM generalment treballen amb formes paramètriques específiques i sistemes de funcions únics per cada peça, el sistema dinàmic que volem programar partirà generalment d'elements geomètrics genèrics per crear models concrets i, sobretot, farà servir sistemes de modificació genèrics, que combinats donaran lloc a comportaments concrets. Això vol dir que permetran "construir" elements paramètrics. La dificultat que trobem en els sistemes dinàmics té a veure amb els mecanismes de control ja que mentre els sistemes BIM poden ser controlats amb mecanismes molt convencionals, en el cas dels sistemes dinàmics el control és molt complicat quan no es pot passar per la programació directa. En aquest sentit, el problema se suavitzava en entrar en escena el segon avenç que té lloc en els últims temps, els sistemes de programació tova per a la generació i control de les formes geomètriques. Aquestes són eines pensades per generar funcions que després es puguin fer servir durant el procés de modelatge, de tal manera que l'usuari no es veu limitat per les eines predeterminades del programa i pot explorar amb molta més llibertat les possibilitats que l'ús de la computació de l'ordinador li ofereix. Aquests mecanismes, que veurem molt per sobre en comentar el funcionament de l'ICE²⁰ (vegeu el capítol 2.4.1) amb Softimage, han obert la porta a la utilització de funcions molt més complexes que les que fèiem servir fins ara i han fet possible controlar sistemes que fins ara només es podien controlar a través de la programació. En el cas dels sistemes dinàmics, durant molt de temps han patit limitacions importants degudes a què per mantenir el control dels objectes quasi sempre calia programar i això impedia que se'n pogués generalitzar l'ús. Amb els sistemes de programació tova tenim l'oportunitat de fer-los servir sense grans coneixements de programació. Tot i això, la programació tova resol només alguns dels problemes que plantegen els sistemes dinàmics, encara falta generar una estratègia general de treball que en permeti l'ús extensiu i complet.

²⁰ "Interactive Creative Environment" o entorn interactiu creatiu.

1.4.2 Integració dels processos dinàmics en un CAD

Com que l'ús dels sistemes informàtics en arquitectura és molt recent se n'ha fet un ús molt bàsic, i s'han extrapolat directament les tècniques manuals de dibuix al sistema digital de manera que, tot i que canvia l'eina, l'estructura metodològica de treball continuava sent la mateixa. Ara, però, aquesta concepció es mostra com un arcaisme resultant d'una certa manca de comprensió del que realment ha implicat la introducció de les eines digitals en el món professional. En realitat, la virtut principal dels sistemes digitals rau en la capacitat per generar, transformar i destruir informació, i cal entendre que la millora en l'àmbit digital no es basa en aproximar-se més al dibuix (exceptuant programes exclusivament dedicats a fer-ho), sinó en aconseguir millores que ens permetin generar més informació, aprofitar millor la capacitat de computació i millorar la capacitat per depurar-la. En realitat, el que més s'hi assembla és la programació, però aquesta no té la capacitat de visualització ni l'agilitat visual i conceptual necessària per introduir projectes de manera rendible. De totes maneres, quan els arquitectes volen establir un ús més profund dels sistemes informàtics no tenen més remei que treballar amb un programador.

1.4.2.1 *Ús més integral dels sistemes digitals*

Tant en els sistemes de simulació física com en els programes paramètrics, descobrim que en realitat busquem maneres d'aprofitar la capacitat de computació de l'ordinador per facilitar, accelerar i optimitzar el procés de modelatge. Aquesta és una tendència general que es posa de manifest en els sistemes paramètrics de modelatge com REVIT, en els quals en treballar amb elements prèviament configurats podem automatitzar la definició geomètrica i estalviar temps de dibuix, problemes de coherència i emmagatzematge de dades concretes no relacionades amb la geometria. Tot això implica una profunda reestructuració del model digital. Aquesta tendència ha permès augmentar a poc a poc el rendiment dels sistemes de modelatge a mesura que anem superant la idea més clàssica del dibuix com un sistema de representació estrictament estàtic. Acceptem que hi ha maneres més dinàmiques d'entendre el model digital com una realitat que es transforma i comencem a buscar processos que ens puguin ser útils de cara al disseny i que es puguin manipular, entendre i modificar fàcilment per un usuari poc expert. Cal tenir en compte que el model ha de ser coherent amb el medi en què el fabriquem i el medi digital és, per natura, un espai dinàmic en el qual la informació es transforma amb una gran facilitat. Dibuixar en un ordinador ja és un procés de transformació de la informació que imita un procés mecànic, però la realitat que sustenta aquesta il·lusió és molt més rica que el procés al qual imita. En assumir aquesta integració dels processos de computació dins el procés de modelatge han aparegut moltes vies amb les quals es poden generar funcions útils:

- Els sistemes de programació tova basats en llenguatges de programació visuals, que pot assumir fàcilment un usuari poc expert. Amb aquests mecanismes es poden generar processos personalitzats que facin funcions relativament complexes de modelatge sobre elements geomètrics.
- Mecanismes de modelatge paramètrics en els quals el model es construeix a partir de peces conegudes per l'ordinador i que aquest pot associar a elements constructius de manera que el càlcul, l'amidament, la transformació i la classificació es poden automatitzar molt més del que ho han fet fins ara. Aquest mecanisme ha permès optimitzar molt el procés de definició de l'obra, però ha pecat d'un excés de rigidesa en la seva definició que el fa molt apte per definir objectes ja coneguts però menys eficaç a l'hora de treballar amb objectes que encara no estan definits. Com que els processos de transformació són específics per a cada peça, el sistema és eficient però rígid i això en llastra l'ús.
- Una tercera via és el plantejament de sistemes en els quals s'intenten generar processos de transformació genèrics que siguin útils per un ampli espectre de casos. En aquest camp trobem tant els sistemes de simulació física com els sistemes genètics d'optimització formal amb els quals es poden generar eines de modelatge.

En aquesta situació, hem optat per imitar els processos naturals de transformació perquè, com veurem, amb aquest sistema es poden generar funcions genèriques capaces de trobar formes òptimes més enllà del cas concret de la catenària i, per tant, es pot aplicar en un ampli espectre de casos que van de les necessitats constructives a les estètiques. Per altra banda, són mecanismes naturals als quals estem adaptats per respondre-hi positivament i que no costen d'integrar dins un procés de modelatge. Això permet que l'usuari no només entengui el model en l'àmbit espacial, sinó que pugui comprendre el procés de transformació que està patint el model; i això és fonamental de cara a tenir una comunicació fluida amb l'usuari, ja que en altres casos, com en els processos genètics o en els sistemes de programació tova, el comportament és molt difícil d'entendre visualment i cal recórrer a algun mètode alternatiu de representació o de codi per desxifrar-ne el funcionament. Aquestes lleis del moviment, en canvi, són extremament senzilles des del punt de vista visual i matemàtic, i es poden modificar per generar simulacions pseudofísiques, tal com fa Daniel Piker amb el mòdul Kangaroo, de manera que les podem adaptar a casos especials i, fins i tot, generar funcions genèriques programades per l'usuari que permetin accedir a una gran varietat de processos de transformació a partir d'un únic esquema.

1.4.2.2 *Compatibilitat amb altres eines CAD*

A diferència del que passa amb els sistemes BIM, en què el model pateix una transformació total en l'estructura interna de la informació que els fa completament incompatibles amb els models tradicionals de modelatge, els sistemes dinàmics, en canvi, mantenen una relació directa amb els sistemes convencionals de dibuix perquè, en realitat, es tracta d'una ampliació del mateix mecanisme i no d'una substitució. Això no implica canvis substancials en la base de dades en el sentit que si bé la geometria convencional fa servir unes posicions $X Y Z$ a l'espai, els sistemes dinàmics només hi afegixen un component de velocitat (V_x, V_y, V_z) i un component d'acceleració (A_x, A_y i A_z), de manera que són sistemes extremament compatibles. Serà, doncs, relativament senzill d'introduir els sistemes dinàmics dins dels sistemes de CAD amb els quals se'n pugui modificar la geometria. Els canvis més significatius els trobarem en les funcions que transformen aquests elements, però això no afecta la base de dades de manera que podem gaudir d'una compatibilitat total amb els models geomètrics.

El punt més conflictiu i on més problemes de compatibilitats trobarem és en l'estratègia de treball, ja que un cop introduïdes les dades dins del programa de dibuix cal integrar les funcions dinàmiques en l'estratègia general de modelatge de l'eina CAD per fer-ne un ús aplicat durant el procés de disseny. En aquest sentit, la manera com es presentin les funcions dinàmiques en el procés de modelatge té un paper central en els possibles usos que puguin tenir.

En la proposta que presento a continuació, el sistema dinàmic intenta estar vinculat a un objecte geomètric senzill de manera que visualment en compreguem el funcionament. En comportar-se d'una manera coherent amb la seva geometria, i seguint una lògica senzilla i visual que tothom podrà seguir, és possible comprendre'l. Els elements bàsics com els plans, les rectes i els nodes generaran forces que es correspondran amb la seva forma davant de les accions externes, de manera que construint un model geomètric també estarem construint un camp de forces. Aquesta vinculació visual i conceptual al mateix temps també permet entendre més ràpidament quin comportament podem esperar d'un disseny, de manera que no hem d'abstraure a esquemes poc intuïtius el nostre model per poder-lo dominar. Per altra banda, com que treballem amb elements equivalents als de molts sistemes CAD podem fer servir eines convencionals de modelatge per establir el control geomètric del model. Abans o després, però, haurem de fer servir algun sistema visual de control, que si bé no hem pogut desenvolupar en aquesta tesi és un recurs que facilita enormement la comprensió i modificació de les vinculacions entre els elements, que en el cas de sistemes dinàmics és essencial.

Per altra banda, un sistema dinàmic necessita elements estàtics per poder retenir el control mètric de certes propietats i, per tant, que ens reguli el moviment de les parts dinàmiques a uns

àmbit concrets. Però treballar amb dues classes de geometria pot ser confús, ja que si hem de crear una geometria base i després enganxar-hi una geometria dinàmica, és possible que aquesta duplicitat comporti complicacions perquè estem acostumats a treballar sempre amb el mateix tipus d'objectes. En aquest sentit, hem solucionat el problema en treballar amb elements que són igualment funcionals, tant geomètricament com dinàmicament, de manera que podem resoldre totes dues geometries amb el mateix tipus d'objectes. Tot i això, aquest punt es posa en dubte tal com veurem al sistema PhysX (vegeu el capítol 2.4.3), en el qual la introducció de diversos tipus de geometria i l'ús d'un sistema intermediari entre el model geomètric i el model dinàmic permet un funcionament molt més àgil del sistema, i potser en comptes de confondre ajudaria a modelar. Per aquesta primera provatura, però, hem preferit considerar l'ús d'un únic sistema geomètric.

1.4.3 Estratègia de càlcul i de modelatge

De cara a generar un motor de càlcul versàtil i eficaç, que pugui interactuar amb l'usuari en temps real i que, a més, sigui prou "resistent" per suportar tota mena de situacions imprevistes en les quals les accions tinguin un paper decisiu en el resultat, ens cal recórrer als sistemes iteratius. Aquests són els mecanismes més robustos dels quals disposem perquè com que no són sistemes lineals són capaços d'adaptar-se als canvis inesperats en els càlculs i integrar-ho tot en el resultat; gràcies a això permeten una certa capacitat d'exploració, cosa fonamental per a un arquitecte. Els sistemes iteratius aproximen el resultat pas a pas, de manera discreta, i en cadascun d'aquests passos l'usuari pot intervenir i alterar el procés. Com que les operacions es repeteixen 20 o 30 vegades per segon, l'usuari té la sensació de treballar de manera contínua sobre un model dinàmic. Com més temps passa des de l'última acció de l'usuari, més equilibrat i precís és el resultat obtingut perquè més cops ha anat aproximant la solució. Fins i tot quan els canvis deixen de ser perceptibles visualment, el sistema continua aproximant més i més la solució. Les alteracions únicament produeixen estats nous que tendeixen a un equilibri diferent, de manera que si podem predir com es comportarà el model hi podem actuar amb propietat. Tot i això, hi ha un fenomen en tot aquest plantejament que genera una certa incertesa, i és que malgrat que pots preveure el comportament general dels sistemes físics, en algunes ocasions és difícil predir exactament com serà aquest resultat. Si el que volem precisament és que el sistema ens resolgui un problema del qual no en coneixem la solució, o no la podem calcular, llavors aquest mecanisme funciona amb molta eficàcia. Però altres vegades ja sabem quina és la solució i volem col·locar un objecte en una posició exacta, i no ho podem fer perquè els camps de força tenen un marge d'incertesa que no ens deixa afinar el resultat. Per resoldre aquest problema hem elaborat tres estratègies bàsiques que ajuden a mantenir la geometria sota control:

- El primer consisteix a poder desactivar el comportament físic d'un objecte de manera que es comporti com una geometria estàtica i que actuï com un sistema CAD convencional. Amb aquesta simple decisió recupero la possibilitat de retenir un control plenament precís del model. Activant i desactivant el comportament dinàmic de diferents parts del model es pot combinar la precisió d'un sistema CAD amb el dinamisme d'un sistema de simulació física. Aquesta eina és fonamental per mantenir sota control un objecte dinàmic.
- Hi ha, però, una altra estratègia que la fem servir per aprofitar la capacitat resoltiva dels sistemes dinàmics sobre geometries relativament complexes sense perdre'n el control. Recordem que els sistemes dinàmics resolen els problemes geomètrics de manera genèrica, i això vol dir que poden oferir solucions en tota mena de situacions. Aquest mecanisme permet al sistema actuar en condicions de fortes constriccions geomètriques, ja que tot i que té la llibertat de moviments molt coartada poden continuar oferint solucions vàlides. Això és el que aprofito quan genero una geometria estàtica auxiliar, que serveixi de guia per a la geometria dinàmica i, per tant, en restringeix la llibertat de moviments a un àmbit concret. Aquesta aproximació permet trobar totes les solucions geomètriques per a un problema concret que es troben sobre aquella geometria auxiliar. Si per exemple generem una superfície d'una certa complexitat i volem resoldre problemes geomètrics sobre la superfície, si restringim la llibertat de moviments dels elements dinàmics a la superfície esmentada els podrem fer servir per resoldre'n tota mena de problemes geomètrics. Com que únicament es mouran sobre la superfície assignada, totes les solucions estaran, per defecte, a sobre. Val a dir que aquest mecanisme també és un sistema de control eficaç perquè és capaç de restringir, de manera molt concreta, el moviment dels elements i, per tant, ofereix la possibilitat d'eliminar l'àmbit de treball als plantejaments de l'usuari.
- Finalment, cal poder regular els camps de força de manera que equilibrant les seves accions puguem ajustar la geometria del model amb un cert grau de precisió. Aquest sistema és imprescindible en la fase de definició del model, però encara no hem estudiat la capacitat que té per donar solucions exactes.

Si hem establert una geometria de base ens cal generar les peces dinàmiques que s'hi moguin a sobre. Per això necessitem treballar a partir d'elements predeterminats, que ens permetin generar ràpidament estructures dinàmiques que es relacionin amb els elements estàtics. Un cop fet, estarem treballant amb elements compostos en els quals hi ha igualment elements estàtics i elements dinàmics. A partir de la combinació de diferents elements predeterminats es pot construir un element més gran que doni lloc a un model final de gran complexitat geomètrica,

compost de diferents elements dinàmics, cadascun amb un comportament determinat pel mateix usuari que es modificarà d'acord amb les exigències del projecte.

Arribats al punt on el procés bàsic de definició geomètrica ha quedat clarament definit podem donar el pas següent i configurar el que seran les propietats dels objectes que regularan tant aspectes geomètrics com de comportament dinàmic de les peces. Tant si es tracta de la massa, de la intensitat dels camps de força o de qualsevol altra propietat, ens cal poder-la regular amb la màxima facilitat per mantenir contínuament sota control el procés de transformació dinàmic i, així, poder modelar amb la màxima facilitat. Aquí caldrà oferir un quadre de propietats que sigui complet i amb una funcionalitat àgil. És molt habitual que es doni la situació en la qual vulguem tractar una o diverses propietats d'un o diversos elements de manera reiterada. Com que seleccionar més d'un cop els elements és molt molest i, a més, amb sistemes dinàmics té una dificultat afegida, hem plantejat un mecanisme en el qual les propietats dels elements es poden aïllar tant de manera individual com col·lectiva. Això fa que no calgui seleccionar els objectes cada cop que volem canviar-ne una propietat, sinó que n'hi ha prou a fer-ho un cop i aïllar la propietat. Per altra banda, aquesta estratègia permet que elements de geometria relativament complexa, com pot ser una façana de mur cortina, es puguin controlar a partir de pocs paràmetres simplificant enormement la tasca de modificar-los i adaptar-los a les diferents situacions d'un model en plena fase de concepció i modificació.

1.4.4 Introducció de dades

1.4.4.1 *EI GUI*²¹

En llenguatge informàtic GUI és l'acrònim de *Graphical User Interface* i significa tot allò que ens permet relacionar-nos amb un sistema digital a partir de la pantalla. Aquesta aproximació ha substituït els primers mecanismes de treball que es basaven en la introducció de comandes escrites a l'ordinador. Encara hi ha molts usuaris que fan servir les comandes perquè tenen alguns avantatges a l'hora de relacionar-se amb la màquina i són més directes. Fer sistemes gràfics en general no és únicament un problema de facilitat de relació, sinó que permet transmetre informació molt ràpidament fent més fluida la interacció general. Això permet que es realitzin tasques molt més complexes que amb comandes no serien possibles. Aquest és un aspecte important de l'estratègia d'un programa ja que condiona la metodologia general d'introducció de dades, el ritme de treball i la facilitat d'ús general.

²¹ "Graphical User Interface" o Interfície gràfica d'usuari

Introducció

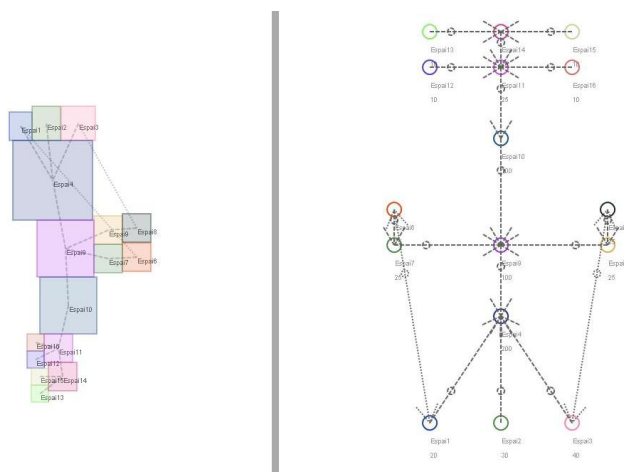


Fig. 1. Programa de relació entre espais a partir de grafs creat per una aplicació en la qual un esquema funcional es transformava en una distribució de forma directa.

Val a dir que un sistema mal plantejat en aquest sentit pot generar molta confusió en no tenir una metodologia homogènia de treball, i això dificulta que s'introdueixi i es modifiqui el model i que disminueixi la capacitat del sistema per plantejar propostes. També pot ser que dificulti l'ús d'algunes eines i en faciliti l'ús d'altres, cosa que indicaria un sistema mal equilibrat que condicionarà l'usuari en un sentit o un altre (per exemple, afavorir la línia recta enfront de la corba). En aquest sentit, la proposta es relaciona a partir de dos mecanismes convencionals però necessaris que són els quadres de propietats i les barres de menús. Però faltaria implementar el que seria un sistema visual de relació entre elements, similar al que fan servir Grasshopper o Softimage. Tot i això, anteriorment hem experimentat amb aquests mecanismes en altres aplicacions que també incloïen sistemes dinàmics i el resultat va ser molt bo.²²

En el cas mostrat a la figura 1, a partir d'un esquema de grafs es generaven una sèrie d'espais rectangulars o quadrats que sense tocar-se es posaven en contacte seguint l'esquema indicat. L'usuari podia estirar o modificar el resultat sense perdre l'esquema de relacions preestablert. Aquest mecanisme és clarament funcional i, a més, demostra la compatibilitat dels sistemes de relació gràfics amb els sistemes dinàmics de manera funcional. Aquest mecanisme també facilita enormement la tasca d'establir relacions entre objectes dinàmics, que és essencial de cara al seu control tècnic. Però potser el més important és que permet transformar esquemes funcionals en propostes de disseny formal, cosa que integraria còmodament la fase de disseny dins els sistemes digitals mantenint la vinculació directa amb el projecte definitiu; potser fins i tot seria possible que qualsevol canvi en el programa es traduís immediatament en un canvi volumètric coherent. En aquest sentit, les possibilitats són molt grans i cal una tasca d'investigació important que en aquesta tesi s'ha reduït a la capacitat dels sistemes dinàmics per generar formes. Tot i

²² Vegeu l'annex 2.

això, l'estudi dels sistemes GUI en els programes d'aplicació en arquitectura és un tema clau per al futur de l'arquitectura.

1.4.4.2 *Introducció de la geometria*

Tal com hem vist, el model geomètric estàtic serà més una guia que no pas un resultat, de manera que només tindrà un valor relatiu i partir d'unes dades inicials el conjunt es transformarà en un nou element que mantindrà les relacions amb l'esquema estàtic. Hem d'entendre aquesta estructura inicial com una base a la qual s'agafaran una sèrie d'objectes dinàmics que es mouran per mitjà de simulacions físiques; així, mentre la base ens interessa que sigui un element estàtic, molt més fàcil de controlar, els elements que s'hi agafen haurien de ser dinàmics encara que, pel plantejament del programa, en realitat siguin la mateixa mena d'objecte amb la propietat dinàmica activada o desactivada. Aquesta serà, doncs, una propietat definida per l'usuari de manera que treballarem amb un únic element, que pot tenir dos estats. La generació de la geometria base es farà a partir de nodes, rectes, plans, i superfícies NURBS (vegeu el capítol 3.2.7), amb les quals definirem els llocs geomètrics per on es mourà la forma dinàmica. D'aquesta manera restringirem el moviment de les peces per mitjà d'un model esquemàtic i obligarem el sistema a optimitzar les formes dins d'uns paràmetres concrets i visualment fàcils d'entendre. Per introduir, doncs, aquesta geometria estàtica farem servir mecanismes de dibuix 3D emprats generalment en el món del CAD, que permetin plantejar un model ràpid amb la màxima senzillesa.

Per introduir amb precisió dades geomètriques cal dominar 3 paràmetres essencials que defineixen una posició a l'espai: les coordenades, els angles i les longituds. Amb aquests tres elements controlats podem establir fàcilment les posicions relatives o absolutes de nodes en un espai tridimensional. En aquest sentit, els sistemes convencionals de modelatge en CAD han treballat profusament aquests aspectes, de manera que han plantejat sistemes extremament acurats, senzills i ordenats de situar, amb control i amb el mínim de dades necessàries, les coordenades dels nodes de manera escrita o visual. Tot i que el paper de les barres de comandes continua sent dubtós, hi ha molts usuaris, i certs aspectes del control geomètric, que requereixen l'ús d'aquesta mena d'aproximació tot i que en un primer moment, i per a un usuari poc expert amb una incidència tècnica poc important, els sistemes enterament visuals poden complir una gran part de la feina necessària per al modelatge. Per altra banda, les dades visuals ofereixen una agilitat que permet simplificar tasques que amb barra de comandes serien molt abstractes. Això obre les portes a un domini més directe del model que permet plantejar formes

més complexes. Per tant, en conjunt els sistemes visual i els sistemes de comandes es complementen entre si per donar un domini molt complet de l'aparell.

En aquesta proposta, la introducció de dades geomètriques es realitza a partir de la introducció de coordenades geomètriques a l'espai. El procés és basa en una estratègia visual i es poden introduir algunes dades escrites com la longitud. A partir d'aquí es va definint una estructura de filferro on s'estableixen relacions entre nodes que podran ser rectes, plans, corbes i superfícies NURBS (vegeu el capítol 3.2.7). Els elements dinàmics s'introdueixen com si fossin elements geomètrics; aquest és el cas dels plans i les rectes que es representen com elements purament geomètrics tot i que després produiran camps de força que intentaran precisament retenir la seva geometria. En el cas dels elements NURBS, passa una cosa similar tot i que la relació és una mica més complexa, ja que si bé les partícules tendeixen a adherir-se a la superfície corba, la superfície roman estàtica. Per tant, tenim un conjunt d'elements que són geometries i camps de força al mateix temps. Val a dir que no totes les forces es poden plantejar com un element geomètric; per exemple, les dinàmiques de grup, les forces que actuen sense límits definits, les forces que mantenen el paral·lelisme, l'equidistància o una relació angular, no es podran visualitzar d'una manera convencional. Representar, doncs, aquests elements sense trencar la lògica visual dels sistemes CAD és un repte al qual ens hem d'enfrontar en desenvolupar aquesta aplicació. Recordem que els aspectes visuals poden facilitar molt el treball i no s'han d'entendre com un simple "complement", sinó com una eina central. En aquest sentit, el problema de la representació de forces que no tenen una correspondència directa amb formes geomètriques conegudes és un punt complicat si no es fan servir sistemes de grafs.

1.4.4.3 *Introducció de camps de força*

A diferència de la introducció de dades geomètriques, controlar camps de força i interaccions físiques en arquitectura és un tema que no s'ha tractat en el modelatge més enllà dels plantejaments puntuals de comprovació que els programes d'estructures ofereixen des de fa dècades. Per això, necessitem reflexionar sobre les implicacions que comporta treballar en temps real amb interaccions que modifiquen automàticament el model i com mantenir-les sota el control de l'usuari de manera senzilla i amb el mínim de dades possible. Com a solució hem optat per un sistema convencional de quadres de propietats més o menys flexible amb el qual treballarem. Com que la introducció en el model de camps de força ha de ser al més intuïtiva possible, de manera que no calgui un alt grau d'abstracció per comprendre què s'està fent, hem intentant assimilar la geometria convencional i la dinàmica amb una única representació. Si no es fa així es pot caure en l'error de necessitar un esforç excessiu per poder generar elements molt bàsics. Perquè això no passi s'estableix una relació entre la geometria i el camp de força quan

tots dos aspectes es mostren compatibles entre si. En aquest tipus de plantejament trobaríem les partícules (que són assimilables a forces puntuals), les rectes (que serien assimilables a forces lineals com els *mass-spring*) i els plans (que es podrien assimilar a una força que manté tots els nodes sobre el mateix pla mitjà) com elements bàsics la representació i tractament dels quals seria igual pel que fa a la geometria i com a camp força. Tot i això, trobarem que les partícules són un cas lleugerament ambigu ja que tot i que es poden entendre com a forces puntuals també poden ser forces que actuïn en una direcció; llavors s'entenen molt millor si es representen com a vectors. Amb això es combina el modelatge geomètric amb la introducció de forces sense afegir cap complicació especial, de manera que modelar no només implica generar una forma sinó que també vol dir establir unes relacions sense dificultats afegides. En realitat aquest plantejament és molt més proper a nosaltres que no pas la generació d'elements abstractes i ens permet aprofitar moltes estratègies de CAD convencional per generar (però no controlar), de manera senzilla, els camps de força bàsics.

Les forces que no tenen una correspondència directa amb elements geomètrics no es poden representar gràficament de manera intuïtiva. En aquests casos, un sistema de control mitjançant relacions gràfiques, com el que s'ha mostrat en el cas dels grafs, seria molt adequat ja que no poden ser entesos com un element sinó com una relació. La manera de seleccionar i modificar aquests elements ha quedat com a tema pendent en el desenvolupament de l'aplicació i, per tant, hem pogut experimentar amb l'ús des d'aquesta aproximació. Així, aquests elements queden representats esquemàticament en el programa per poder-ne visualitzar i seleccionar les propietats encara que no sigui la millor solució.

