

Fu dopo la seconda guerra mondiale, quando numerose fabbriche d'armi statunitensi cercavano di convertire la loro produzione, che Fuller progettò una casa circolare per la Beech Aircraft Company di Wichita, nel Kansas, formata da 200 componenti in alluminio, acciaio e vetro acrilico, venduti per 6.500 dollari e che, almeno teoricamente, avrebbero potuto essere assemblati da un'unica persona.

Il progetto tuttavia non ebbe successo, anche a causa della forte opposizione dei sindacati dell'edilizia, per cui ne furono costruiti solamente due prototipi<sup>24</sup>(fig. 152).



Fig. 152 – RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Casa circolare per la Beech Aircraft Company*.

---

RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Nine chains to the Moon*, New York, Doubleday 1971, p. 41.

<sup>24</sup> PETER GÖSSEL, GABRIELE LEUTHÄUSER, *Architettura del XX secolo*, Roma, Gruppo Editoriale L'Espresso 2006, vol. 2, pp. 363-366.

Fuller continuò comunque a studiare il sistema per ottimizzare questo tipo di struttura e arrivò a progettare le sue cupole partendo da un icosaedro, in cui le facce pentagonali venivano suddivise in triangoli, con i punti di congiunzione collocati su una superficie sferica.

Egli è conosciuto come l'inventore della cupole geodetiche<sup>25</sup>, anche se in realtà le sviluppò e brevettò quasi trent'anni dopo la realizzazione, da parte dell'ingegner Walter Bauersfeld<sup>26</sup>, di una struttura simile per la sottile cupola a guscio d'uovo dello *Zeiss Planetarium* a Jena<sup>27</sup> (1924-1925). Fuller fu tuttavia il primo ad elaborare una grammatica completa delle costruzioni geodetiche e a renderle visibili. Per lui la forma sferica era applicabile ai planetari, non solo perché rappresentava la soluzione ottimale per il rapporto tra volume e superficie della copertura, ma anche per la resistenza dell'involucro che rendeva superflui gli elementi di irrigamento, soprattutto se come rivestimento esterno veniva utilizzata una pellicola di materiale plastico<sup>28</sup>.

Esempi della sua sperimentazione sono il *Repair Shop*<sup>29</sup> della Union Tank Car Company a Baton Rouge (Louisiana, 1956-1957), una cupola con un diametro di 125 metri che, al momento dell'inaugurazione, veniva considerato l'edificio circolare più grande al mondo con un'altezza pari ad un palazzo di dieci piani. La costruzione era composta da una serie di ottaedri e tetraedri di metallo e plastica, che permettevano all'edificio di contenere spazi molto grandi a costi ridotti, ottenendo il miglior rapporto tra volume coperto e superficie dell'involucro che lo

<sup>25</sup> RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Your Private Sky. The Art of Design Science* Baden (Switzerland), Lars Müller Publishers 1999, p. 15.

<sup>26</sup> Ingegnere tedesco, impiegato presso la Zeiss Corporation.

<sup>27</sup> Ivi, p. 16.

<sup>28</sup> PETER GÖSSEL, GABRIELE LEUTHÄUSER, *Architettura del XX secolo*, Roma, Gruppo Editoriale L'Espresso 2006, vol. 2, pp. 363-366.

<sup>29</sup> RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Your Private Sky. The Art of Design Science*, Baden (Switzerland), Lars Müller Publishers 1999, p. 386.

racchiudeva. Fuller aveva cercato per anni una struttura che potesse consentire una simile realizzazione: leggera, semplice da costruire e da mantenere.

L'esempio più elegante di questo sistema costruttivo è rappresentato dal padiglione degli Stati Uniti<sup>30</sup> progettato da Fuller per l'Expo '67 a Montreal in Canada, una grande cupola geodetica formata da elementi in acciaio triangolari ed esagonali, originariamente rivestita da una membrana in materiale plastico, distrutta da un incendio nel 1976 (fig. 153).



Fig. 153 – RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Expo '67*, Montreal 1967.

Le sue architetture lo resero famoso a tal punto che molti scienziati cominciarono a notare organizzazioni simili in alcuni microrganismi e a confrontarsi con le sue scoperte<sup>31</sup>.

---

<sup>30</sup> RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Your Private Sky. The Art of Design Science*, Baden (Switzerland), Lars Müller Publishers 1999, pp. 422-431.

<sup>31</sup> Ivi, p. 442.

Da allora sono state costruite numerose cupole di questo tipo, sebbene il sogno di Fuller di realizzarne una capace di inglobare addirittura parte di Manhattan non fu mai preso in considerazione.

Un insieme di più serre sferiche, *l'Eden Project*, è stato invece completato nel 2011 da Nicholas Grimshaw a Saint Austell in Cornovaglia, per ospitare una complessa "biosfera" capace di ricreare le condizioni ambientali in grado di contenere la flora e la fauna dei più importanti microclimi presenti sul pianeta<sup>32</sup> (fig. 154).



Fig. 154 – NICHOLAS GRIMSHAW, *Eden Project*, Saint Austell (Cornovaglia) 2011.

---

<sup>32</sup> CARLO PAGANELLI, *Paradiso sotto vetro*, «l'Arca Plus», n. 49, 2004, pp. 34-41.

JONATHAN GLANCEY, *Il Secolo dell'architettura*, Modena, Logos 2001, p. 376.

## 7.3

### Superfici a doppia curvatura e superfici rigate

*«Mental endeavor is the preparation for theology. For those features which to the uninitiated in the truth of divine matters seem difficult to grasp and lofty are by mathematical reasoning shown to be trustworthy, manifest and uncontroversial, by means of certain images. For they show proof of the supernatural properties in numbers; and they make clear the power of the intelligible forms in reasoning».*

«Lo sforzo mentale è la preparazione alla teologia. Ciò che ai profani sembra astruso e da afferrare, circa la verità delle questioni divine, con il ragionamento matematico si dimostra certo, evidente e incontrovertibile attraverso le immagini, perché esse mostrano le proprietà soprannaturali dei numeri e chiariscono la potenza delle forme intelligibili nel ragionamento».

ERIC J. AITON, ALISTAIR MATHESON DUNCAN, JUDITH VERONICA FIELD (tradotto da), *The Harmony of the World by Johannes Kepler*, Philadelphia, The American Philosophical Society 1997, p. 127.

I *pattern* in architettura risultano preziosi anche per quanto riguarda la gestione di superfici complesse, che possono essere controllate dal punto di vista costruttivo, solamente se discretizzabili in elementi più piccoli di forma regolare. Se questa prerogativa era importante in passato, si pensi all'*Opera House* di Sydney (Jørn Utzon, 1957-1973), non di meno lo è attualmente.

Nel caso dell'*Opera House*, la geniale intuizione di Utzon si scontrò con notevoli problemi, che ne consentirono la realizzazione in forma modificata solo dopo le dimissioni del progettista (fig. 155). L'idea base della costruzione era richiamare con gusci bianchi le vele delle barche e le forme arcuate del vicino *Harbour Bridge*.

L'architetto danese, per concretizzare il suo progetto dovette modificare la forma dei gusci, facendoli derivare da un unico volume: una sfera virtuale con un diametro

di circa 75 metri<sup>1</sup> (fig. 156). Solo tale accortezza gli consentì di costruirli con i ridotti mezzi a disposizione, dal momento che a quel tempo l'informatica non aveva ancora fatto il suo ingresso in campo architettonico. Per il rivestimento si fece poi ricorso ad un *pattern* isoedrale quadrato, ottenuto affiancando più di un milione di piastrelle bianche svedesi (fig. 157).



Fig. 155 – JØRN UTZON, *Sydney Opera House*, Sydney 1957-1973.

<http://www.iwebie.com/wp-content/uploads/2008/12/sydney-opera-house.jpg> (consultato 16-10-2011).

---

<sup>1</sup> ANNE JEANETTE WATSON, *Building a masterpiece. The Sydney Opera House*, Sydney, Powerhouse Publishing 2006.

PETER MURRAY, *The saga of Sydney Opera House*, Oxon (U.K.), Taylor & Francis 2004.

WILLIAM J. R. CURTIS, *L'architettura del Novecento*, Milano, Bruno Mondadori 2002<sup>2</sup>, pp. 467-469.

FRANÇOISE FROMONOT, *Jørn Utzon. The Sydney Opera House*, Berkeley (U.S.A.), Gingko 1998.

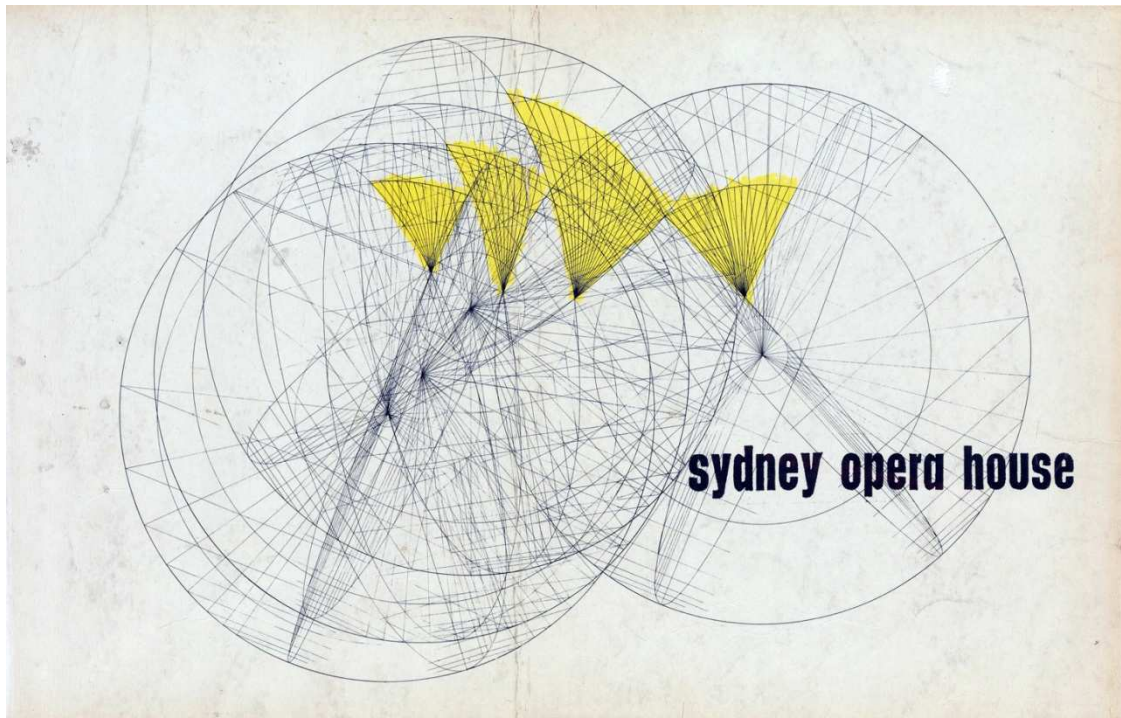


Fig. 156 – Progetto per la *Sydney Opera House*.

<http://gallery.records.nsw.gov.au/index.php/galleries/sydney-opera-house/sydney-opera-house-the-yellow-book/> (consultato 16-10-2011).

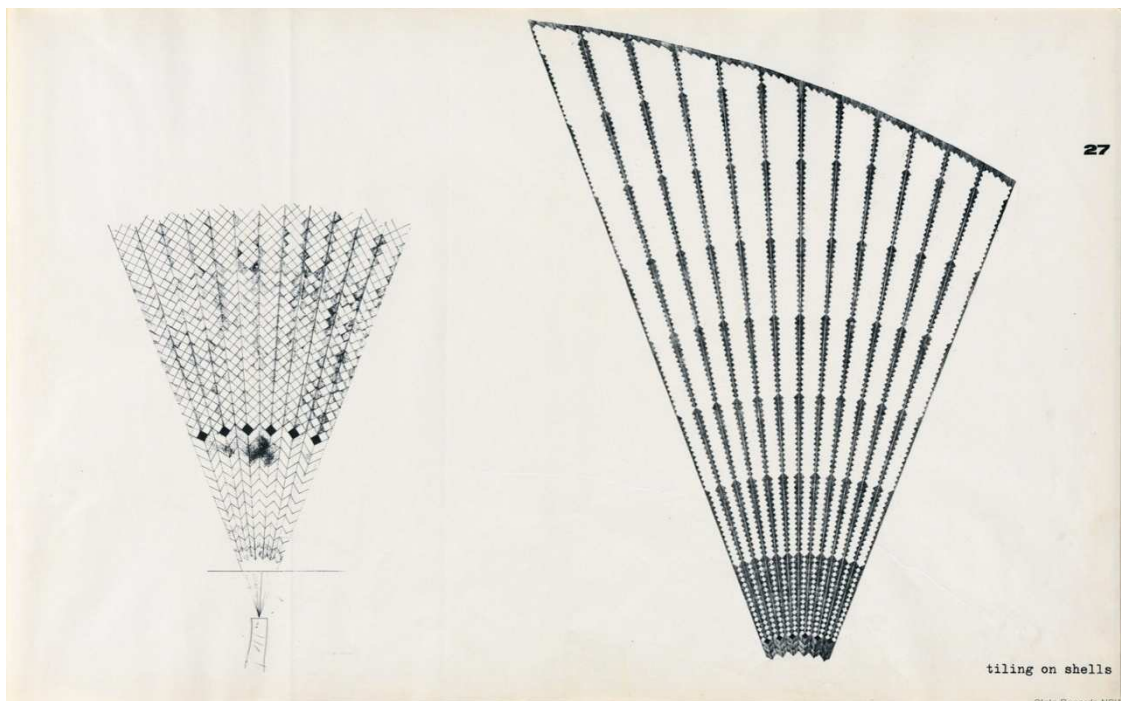


Fig. 157 – Progetto relativo alle vele della *Sydney Opera House*.

[http://gallery.records.nsw.gov.au/wp-content/gallery/sydney-opera-house-the-yellow-book/12708\\_00029.jpg](http://gallery.records.nsw.gov.au/wp-content/gallery/sydney-opera-house-the-yellow-book/12708_00029.jpg) (consultato 16-10-2011).

Oggi con il progredire della tecnologia, la diffusione dei programmi di modellazione parametrica e l'introduzione di macchinari a controllo numerico sono stati superati molti dei pesanti vincoli incontrati da Utzon; resta il fatto che suddividere una superficie complessa attraverso un *pattern* rimane il modo migliore per poterla gestire dal punto di vista produttivo ed economico.

Contestualmente allo sviluppo di nuovi software adatti a gestire superfici complesse come le *NURBS*<sup>2</sup>, sorse il problema di come poterle tassellare. La ricerca di una soluzione costituì un'ulteriore opportunità per trovare tassellazioni eleganti e, allo stesso tempo, tecnicamente fattibili per superfici a doppia curvatura: tutti ambiti di sperimentazione che hanno fornito un contributo notevole allo sviluppo della modellazione parametrica e dello *scripting*<sup>3</sup>.

In base alla scelta dei materiali e della tecnologia si devono imporre dei limiti alla geometria dei tasselli<sup>4</sup>: le superfici piane sono sempre le più semplici ed economiche, mentre gli elementi curvi in vetro è preferibile che siano ad una sola curvatura, perché più facili da gestire e produrre, eccezion fatta per le superfici rigate di cui si parlerà in seguito. Alcuni studi hanno poi sviluppato software in grado di ottimizzare la soluzione dei problemi di pannellizzazione<sup>5</sup>.

---

<sup>2</sup> *Non Uniform Rational B-Splines*: costituiscono una classe di curve geometriche utilizzate in computer grafica per rappresentare curve e superfici.

<sup>3</sup> In informatica è un linguaggio destinato a compiti di automazione, con il quale il programmatore non è più costretto ad occuparsi delle risorse di sistema, ma demanda tutto al sistema stesso. Si ottiene in tal modo una semplificazione rispetto alla programmazione tradizionale, spesso soggetta ad errori non facilmente individuabili. L'utilizzo di un linguaggio di *scripting* permette quindi a chi lo gestisce di concentrarsi direttamente sulla soluzione del problema che si è preposto.

<sup>4</sup> HELMUT POTTMANN, *Geometry and New and Future Spatial Patterns*, «AD», n. 6, vol. 79, 2009, p. 61.

<sup>5</sup> <http://www.designtoproduction.com> (consultato 30-10-2010).

<http://www.evolute.at> (consultato 30-10-2010).

<http://www.gehrytechnologies.com> (consultato 30-10-2010).



Nel caso di superfici più complesse, il modo più diffuso per modellarne la forma è la suddivisione basata sul successivo raffinamento di una *mesh*, che può essere composta da triangoli, quadrilateri o esagoni piani<sup>6</sup>.

Attualmente alcune aziende<sup>7</sup> hanno messo a punto software di modellazione parametrica che permettono di convertire superfici complesse in elementi semplici, pronti per la produzione in serie. Automatizzare il processo è diventato di primaria importanza per la fattibilità dei progetti e il contenimento dei costi, tanto che le ditte capaci di sviluppare i software migliori hanno finito col monopolizzare il settore.



Fig. 158 – GEHRY PARTNERS LLP, *Deutsche Genossenschaftsbank*, Berlino, 1995-2000.

<sup>6</sup> HELMUT POTTMANN, *Geometry and New and Future Spatial Patterns*, «AD», n. 6, vol. 79, 2009, pp. 63-65.

<sup>7</sup> <http://www.mero.de/index.php?id=home&L=1> (consultato 16-10-2011).



Fig. 159 – MASSIMILIANO FUKSAS, *Polo fieristico di Rho-Però*, Milano, 2002-2005.

<http://www.darc.beniculturali.it/fuksas/img/Fiera@archivio-fuksas.jpg> (consultato 03-12-2011).

Senza l'apporto delle nuove tecnologie informatiche le superfici a doppia curvatura, come le coperture vetrate della *Deutsche Genossenschaftsbank*<sup>8</sup> di Berlino (Gehry Partners LLP, 1995-2000) o del *Polo fieristico di Rho-Però*<sup>9</sup> (Massimiliano Fuksas, 2002-2005), non si sarebbero potute realizzare a costi sostenibili e in tempi accettabili (figg. 158 e 159).

---

<sup>8</sup> NICOLETTA TRASI, *Entomologia dell'inconscio. DG Bank, Berlin (1999)*, «l'Arcaplus», n. 48, 2006, pp. 74-85.

PETER GÖSSEL, GABRIELE LEUTHÄUSER, *Architettura del XX secolo*, Köln, Tashen 2005, p. 389.

<sup>9</sup> MASSIMILIANO FUKSAS, *Una vita per la qualità dell'architettura*, in: ANNA MAROTTA (a cura di) *Qualità dell'architettura qualità della vita*, Torino, Celid 2008, pp. 34-36.

LUCA MOLINARI, *Massimiliano Fuksas. Opere e progetti 1970-2005*, Milano, Skira 2005, pp. 206-229.

*Massimiliano Fuksas. Fiera di Milano*, «Area», n. 77, 2004, pp. 42-51.

Restando sempre nell'ambito della ricerca formale i *pattern*<sup>10</sup>, intesi come unità che si ripetono con una determinata frequenza, un sistema o un processo composto da elementi identici o simili<sup>11</sup>, trovano un'applicazione interessante anche nelle cassetture del calcestruzzo. L'impiego di casseri con particolari finiture superficiali e la "disposizione" degli elementi per il contenimento del getto, possono produrre impressioni regolari come è riscontrabile nell'opera di Tadao Ando<sup>12</sup> o forme particolari come le "superfici rigate". Queste ultime furono osservate già nel 1669 da Sir Christopher Wren, il progettista della *St. Paul's Cathedral*, che annotò come una straordinaria scoperta il fatto che l'iperboloide fosse ciò che oggi definiamo una superficie rigata<sup>13</sup>.

In geometria tali superfici vengono generate dal movimento di una retta nello spazio secondo una determinata legge di moto. Le linee che individuano la superficie si dicono "generatrici" mentre si definisce "direttrice" una qualsiasi curva appartenente alla superficie che abbia in comune un solo punto con ciascuna generatrice: gli esempi più comuni sono il piano, il cilindro e il cono. Esse vengono raggruppate in sviluppabili e non, dove le prime, avendo due generatrici consecutive complanari e quindi incidenti, possono essere "distese" su un piano mentre per le altre ciò non sarà possibile, dal momento che le due direttrici sono sghembe.

Una superficie si definisce "doppiamente rigata" se per ognuno dei suoi punti esistono due rette distinte che giacciono su di essa, come si verifica per il paraboloido

---

<sup>10</sup> Paragrafo 1.

<sup>11</sup> MARK GARCIA, *Prologue for a History, Theory and Future of Patterns of Architecture and Spatial Design*, «AD», n. 6, vol. 79, 2009, p. 8.

<sup>12</sup> MASAO FURUYAMA, *Tadao Ando, 1941. The Geometry of Human Space*, Köln, Taschen 2006.

PHILIP JODIDIO, *Ando. Complete Works*, Köln, London, Tashen 2004.

RICHARD PARE, *Tadao Ando. The Colours of Light*, London, Phaidon 2000.

<sup>13</sup> MARTIN GARDNER, *Penrose Tiles to Trapdoor Ciphers ... and the return of Dr. Matrix*, Washington, The Mathematical Association of America 1989, p. 213.

iperbolico e l'iperboloide. L'unica superficie che ammette tre rette distinte per ciascuno dei suoi punti è il piano.

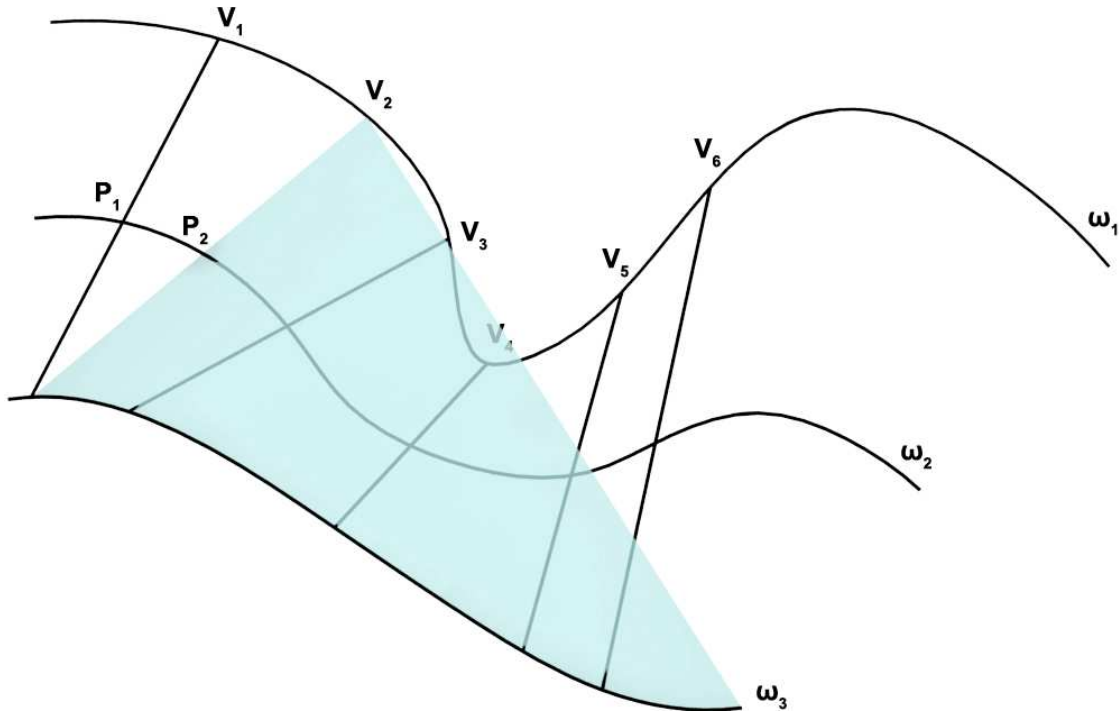


Fig. 160 – Cono quadratico, cilindro, iperboloide rotondo e paraboloido iperbolico; in nero sono evidenziate direttrici e generatrice.

Individuate nello spazio tre curve sghembe  $\omega_1$ ,  $\omega_2$  e  $\omega_3$  quali direttrici, si definisce rigata generica la superficie generata dal moto di una retta lungo le tre direttrici. Per ottenere una generatrice della rigata generica, che abbia come direttrici le tre curve assegnate, occorre prendere un punto  $V_1$  su  $\omega_1$  e costruire la superficie conica avente come vertice  $V_1$  e come direttrice  $\omega_3$ . La generatrice della rigata è la retta passante per  $V_1$  e per il punto  $P_1$ , intersezione della superficie conica con la direttrice  $\omega_2$  (fig. 160); in modo analogo è possibile ottenere altre generatrici. Le superfici coniche sono pertanto sempre sviluppabili.

Superfici rigate particolari sono:

- il cono quadratico, dalla cui intersezione con piani di sezione si ottengono ellissi, parabole e iperboli;

- il cilindro, che può essere ellittico, circolare, parabolico o iperbolico, a seconda della curva direttrice;
- l'iperboloide rotondo, che ha come direttrici tre rette sghembe non parallele ad uno stesso piano; può essere costruito anche come superficie di rivoluzione generata dalla rotazione di una retta  $g$  intorno ad un asse che non sia né parallelo né incidente ad essa;
- il paraboloido iperbolico, che si ottiene a partire da due direttrici rettilinee,  $a$  e  $c$ , e due generatrici,  $b$  e  $d$ , anch'esse rettilinee, tali che le intersezioni siano i vertici del quadrilatero sghembo  $ACBD$ <sup>14</sup> (fig. 161).

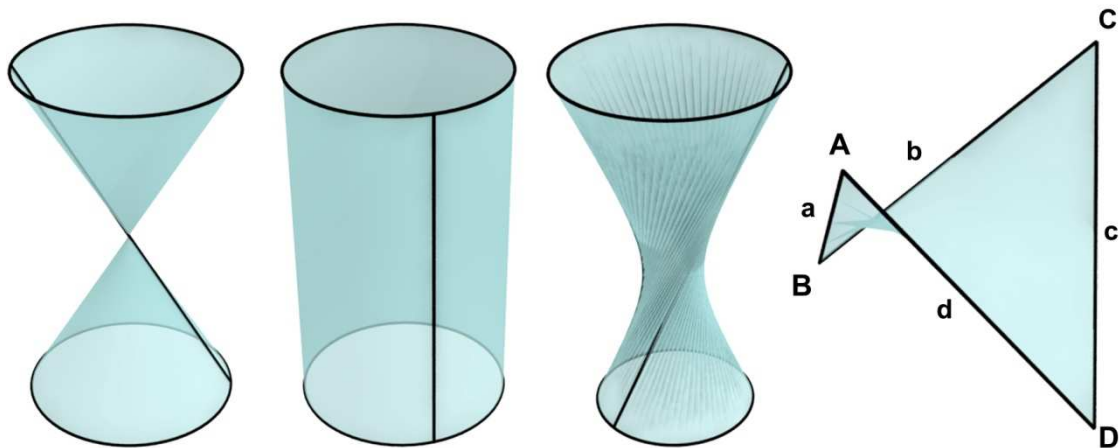


Fig. 161 – Cono quadratico, cilindro, iperboloide rotondo e paraboloido iperbolico, in nero sono evidenziate direttrici e generatrice.

Le superfici rigate possono essere forme complesse ricavate utilizzando geometrie relativamente semplici; si tratta di un aspetto che favorisce il loro impiego nell'industria delle costruzioni, dal momento che si riescono ad ottenere forme estremamente interessanti attraverso cassature rettilinee opportunamente disposte. Un caso notevole è il "nastro di Möbius"<sup>15</sup>, esempio di superficie rigata non

<sup>14</sup> W. L. EDGE, *The Theory of Ruled Surfaces*, Cambridge, Cambridge University Press 2011, pp. 1-21.

ERWIN KREYSZIG, *Differential Geometry*, New York, Dover Publications 1991, pp. 179-185.

<sup>15</sup> Dal nome del matematico tedesco August Ferdinand Möbius.

orientabile, per la quale non si è in grado di definire un senso “positivo” per i vettori ad essa perpendicolari.

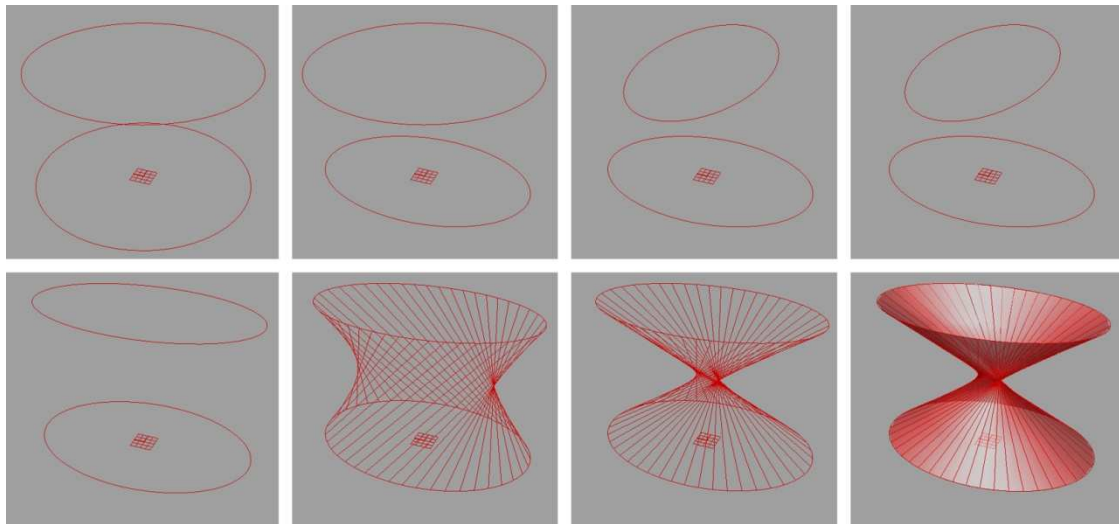
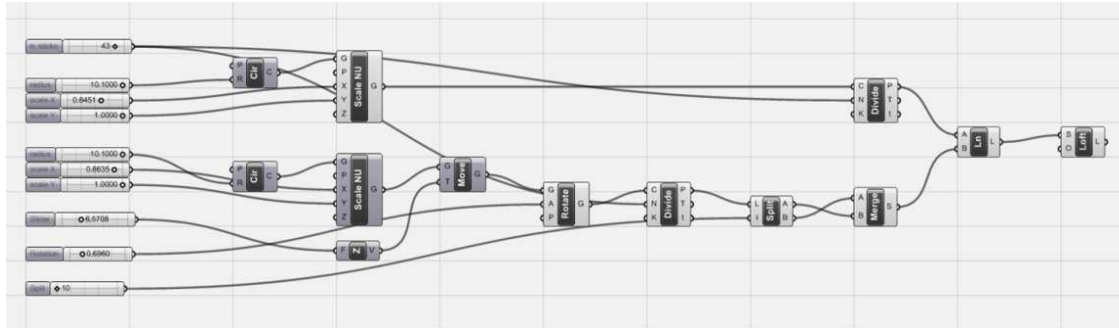


Fig. 162 – Modello parametrico del generico iperboloide.

Un modello parametrico generico di iperboloide è abbastanza rapido da costruire (figg. 162 e 163). Occorre innanzitutto definire due ellissi che possano liberamente variare nelle dimensioni e nella posizione reciproca, pur mantenendo l’allineamento lungo l’asse centrale. Il modo più semplice di procedere prevede che vengano poi disegnate due circonferenze indipendenti e quindi permetterle, mediante l’introduzione di due variabili, la riduzione in scala non uniforme rispetto agli assi  $x$  e  $y$ , che diventeranno così gli assi principali delle due ellissi. Il modello necessita di altre quattro variabili per essere completo: la prima per decidere il valore numerico della traslazione lungo l’asse  $z$  di una curva rispetto all’altra, la seconda per stimare l’angolo piano di rotazione tra le curve, le restanti

per decidere il numero di segmenti da individuare tra le curve stesse e i punti da cui partire per tracciarli (fig. 163).

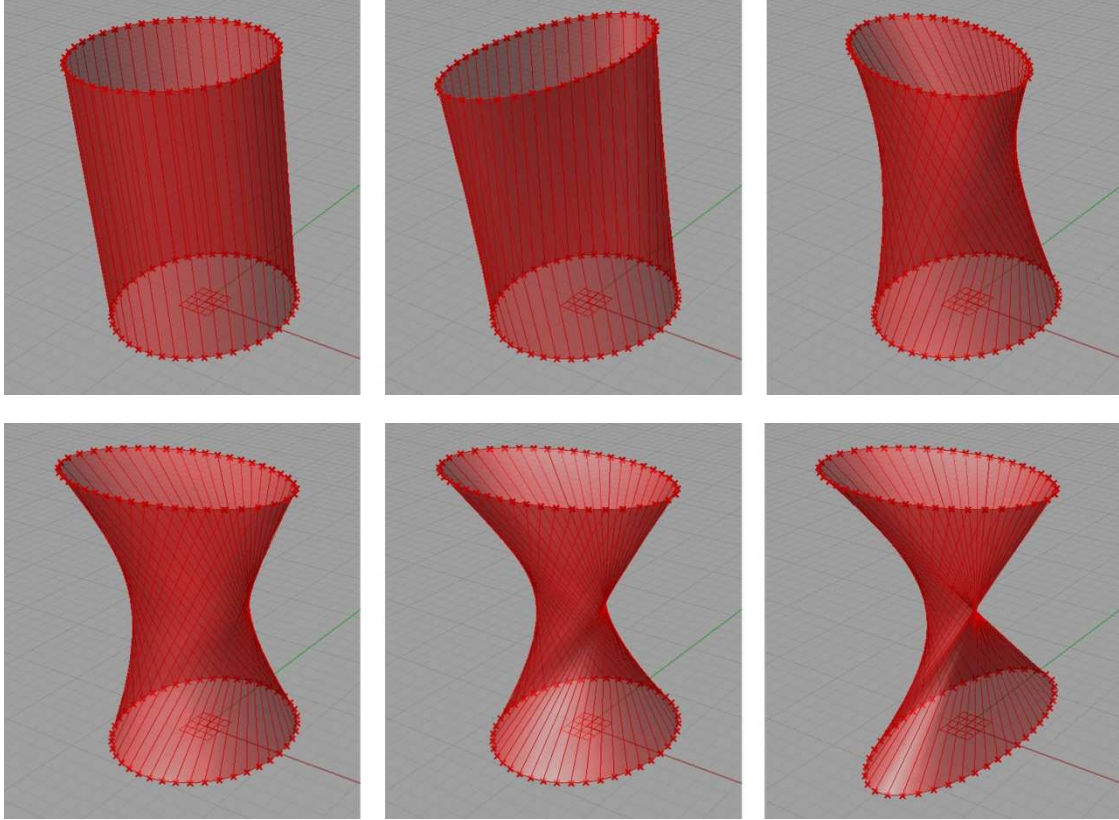


Fig. 163 – Alcuni iperboloidi ottenuti attraverso il modello parametrico.

Pilastrì conformati ad iperboloide ellittico sono stati adottati da Adalberto Libera nel *Palazzo della Regione* a Trento (1953-1963)<sup>16</sup>. Gli elementi in calcestruzzo dell'edificio furono gettati in particolari cassetture lignee, realizzate con l'impiego di listelli rettilinei disposti secondo le generatrici geometriche della superficie (fig. 164).

<sup>16</sup> L'attuale palazzo della Regione Autonoma Trentino-Alto Adige sorge in luogo dell'ottocentesca sede della Banca d'Italia distrutta dai bombardamenti della Seconda Guerra Mondiale. Poiché nel dopoguerra gli uffici dell'Amministrazione Regionale erano stati dislocati in sette diversi edifici, nel 1953 la giunta bandì un concorso per la progettazione di una nuova sede che li unificasse. L'anno successivo, espletati i due gradi di selezione, Adalberto Libera fu dichiarato vincitore.

FRANCESCO GAROFALO, LUCA VERESANI, *Adalberto Libera*, New York, Princeton Architectural Press 2002, pp. 162-166.

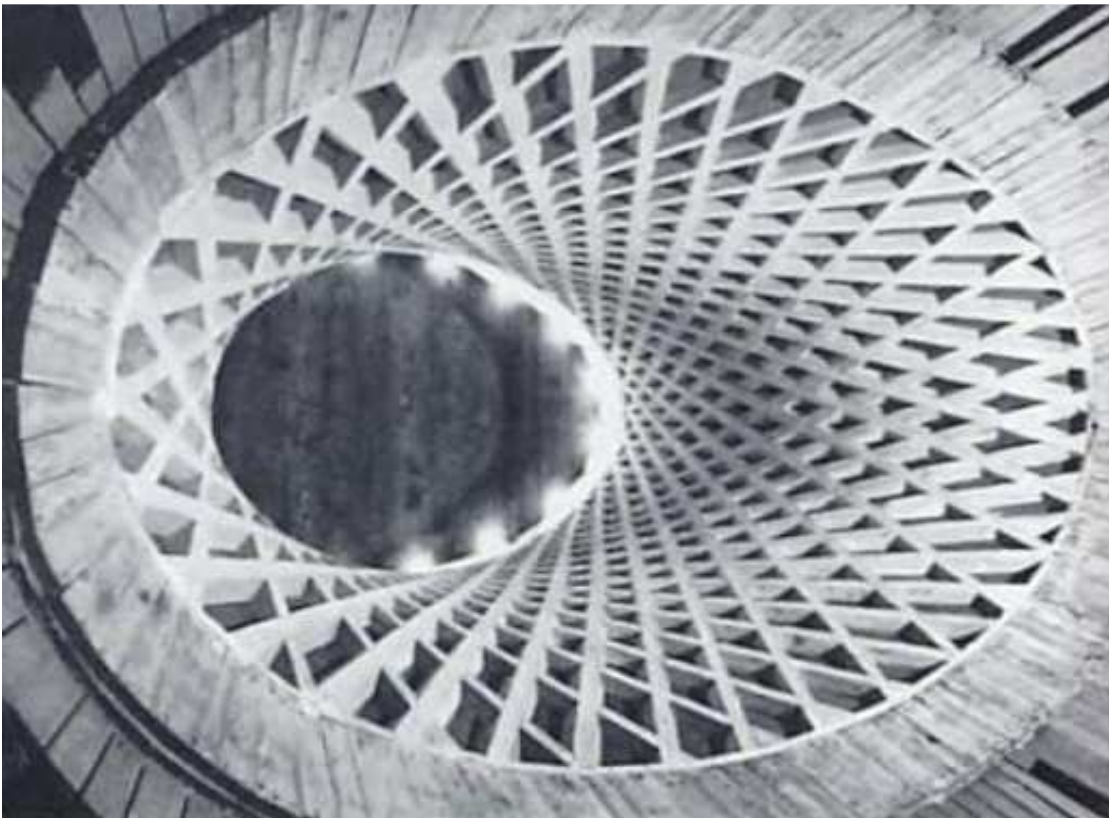


Fig. 164 – Dettaglio del cassero per il contenimento del getto e una delle colonne realizzate nel Palazzo della Regione a Trento.

FRANCESCO GAROFALO, LUCA VERESANI, *Adalberto Libera*, New York, Princeton Architectural Press 2002, p. 165



Anche Pier Luigi Nervi fece ricorso alle superfici rigate per molti suoi progetti, come nel caso della proposta per il *Ponte sullo Stretto di Messina*<sup>17</sup> (1969), in cui era previsto che l'impalcato fosse sostenuto da quattro colossali pilastri a forma di iperboloide rotondo, e per la cattedrale *St. Mary of the Assumption* a San Francisco<sup>18</sup> (1966-1971), con una copertura realizzata mediante otto paraboloidi iperbolici.

La stessa forma venne utilizzata da numerosi altri architetti: Gaudí, che ne dava un'interpretazione divina<sup>19</sup>, Eugène Freyssinet la fece sua nell'hangar per dirigibili a Orly (1916-1921), Robert Maillart se ne servì nel progettare il padiglione dell'esposizione nazionale di Zurigo (1939), Eduardo Torroja nella tribuna dell'*Ippodromo di La Zarzuela* (1935), Giorgio Baroni per il teatro della fonderia Vanzetti di Milano (1937), Jearo De Castro Mello per la prima piscina coperta di San Paolo (1953), Le Corbusier nel *Philips Pavilion* all'esposizione di Bruxelles (1958), Kenzo Tange nella *Cattedrale di St. Mary* a Tokyo (1963) e Carlo Mollino per la copertura del *Teatro Regio* di Torino (1965-1973).

---

<sup>17</sup> Nel 1969 venne bandito un concorso internazionale per la realizzazione del Ponte sullo Stretto di Messina; a quel tempo era già stata completata l'Autostrada del Sole tra Milano e Napoli ed era in costruzione il suo proseguimento, la Salerno-Reggio Calabria. Al concorso parteciparono centinaia di professionisti da tutto il mondo, proponendo molteplici soluzioni (tunnel, gallerie subacquee, dighe, ponti sospesi o a più appoggi). Nervi progettò un ponte sospeso con una luce libera lunga più di tre chilometri, sorretto da quattro colossali pilastri alti 392 metri da cui si dipartivano cavi d'acciaio disposti su piani inclinati che diventavano tangenti a metà dell'impalcato a sezione trapezoidale e formato da travi reticolari.

TULLIA IORI, *Pier Luigi Nervi*, Roma, Gruppo editoriale L'Espresso 2009, pp. 84-85.

<sup>18</sup> CARLO OLMO, CRISTIANA CHIORINO, *Pier Luigi Nervi. Architettura come Sfida*, Milano, Silvana Editoriale 2010, pp. 186-191.

MARK ALLEN TORGERSON, *An architecture of immanence: architecture for worship and ministry today*, Wm. Grand Rapids (U.S.A.), B. Eerdmans Publishing 2007, pp. 124-125.

<sup>19</sup> Per l'architetto catalano il paraboloide era «"il simbolo perfetto della Trinità", dal momento che "una retta infinita rappresenta il Padre, l'altra il Figlio, la terza lo Spirito Santo, che relaziona amorosamente le altre due persone"»

SILVIA BENVENUTI, *Insalate di matematica. Sette variazioni su arte, design e architettura*, Milano, Sironi Editore 2010, vol. 3, p. 106.

L'iperboloide rotondo è la forma comunemente utilizzata per le torri di raffreddamento, in muratura o costituite da sottili gusci di calcestruzzo, soprattutto in ragione delle sue prestazioni statiche. Questo tipo di superficie è stata spesso usata anche nelle costruzioni in carpenteria metallica, come le varie infrastrutture realizzate da Vladimir Shukhov<sup>20</sup>: esempi in proposito sono costituiti dai serbatoi per l'acqua dell'*Esposizione Panrusa* di Nizhny Novgorod (1896) e di Sagiri (Transcaucaso, 1912), dal *Faro di Adziogol* presso Chersson (Ucraina, 1911) o dalla *Shukhov Radio Tower* a Mosca (1920-1922).

Dai casi citati si evince come, per lungo tempo, si sia cercato di produrre superfici complesse attraverso l'uso di *pattern* il più possibile omogenei. Un analogo indirizzo ha rappresentato il fondamento della modellazione parametrica, in cui le potenzialità di calcolo sono finalizzate a "razionalizzare" la superficie in elementi semplici, possibilmente uguali tra loro: un modo di procedere denominato "*parametric pattern*" (figg. 165 e 166).

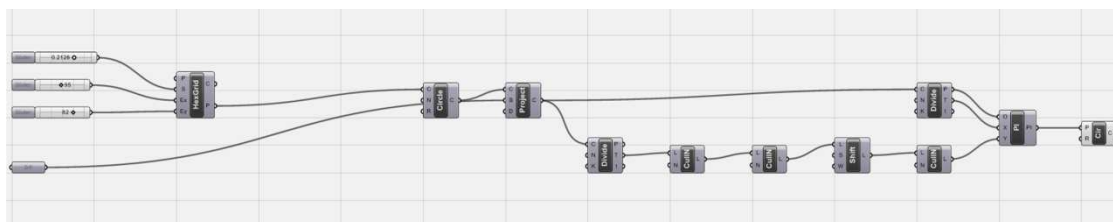


Fig. 165 – Il modello parametrico è un esempio di "*parametric pattern*" in quanto, adattandosi alla curvatura di una superficie, traccia delle circonferenze aventi la medesima dimensione su maglia esagonale.

<sup>20</sup> Nel 1896, in occasione della XVI Esposizione panrusa dell'artigianato e dell'industria, Schuchov aveva costruito una torre per l'acqua con uno scheletro portante snello a forma di iperboloide, realizzato con sottili barre di ferro. La torre non aveva soltanto un'utilità pratica, ma rappresentava l'apporto espositivo della società Bari, per cui all'epoca Schuchov lavorava e presso la quale realizzò numerosi progetti. Queste strutture reticolari e i profilati sottili assicuravano la stabilità con un peso minimo; il vantaggio economico era dovuto alla geometria dell'iperboloide che, essendo una superficie rigata, poteva essere costruito usando comuni barre metalliche.

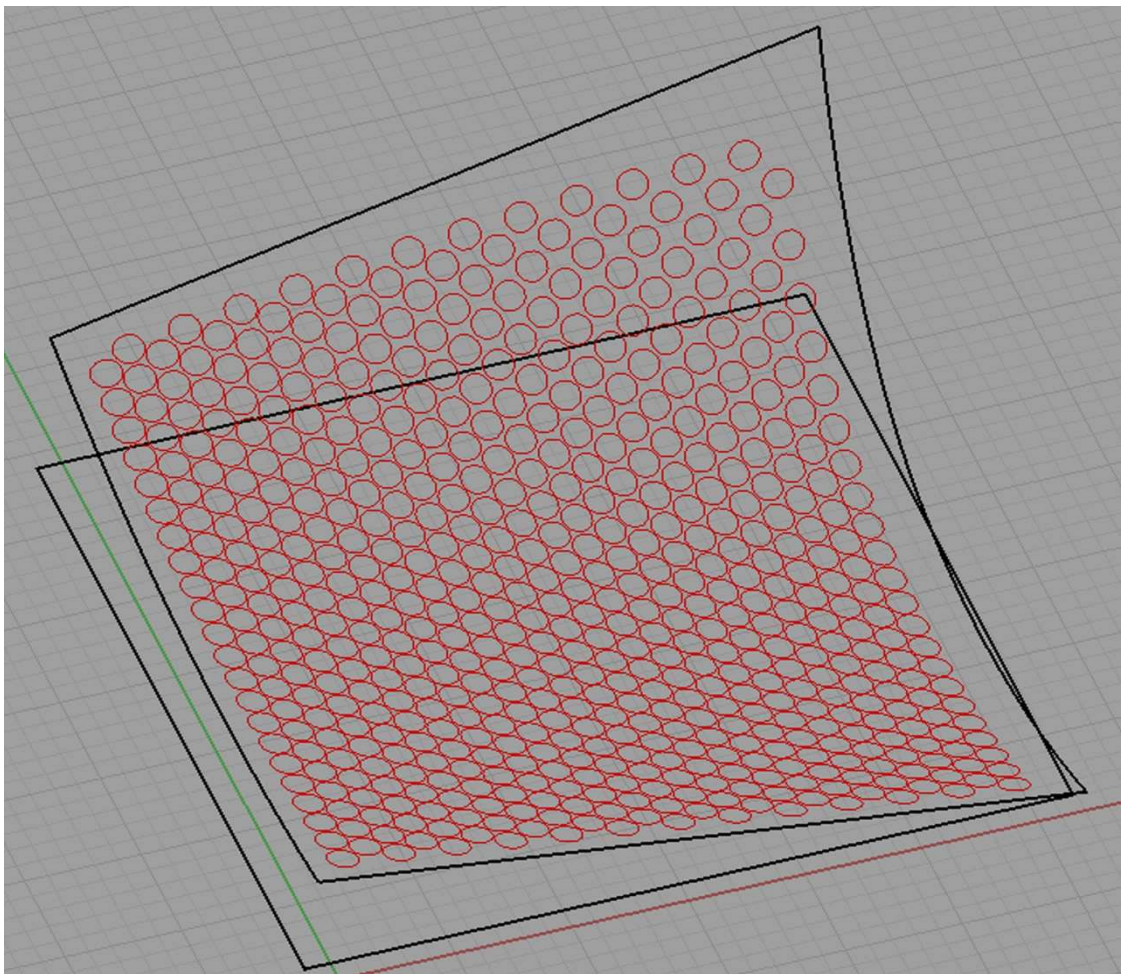
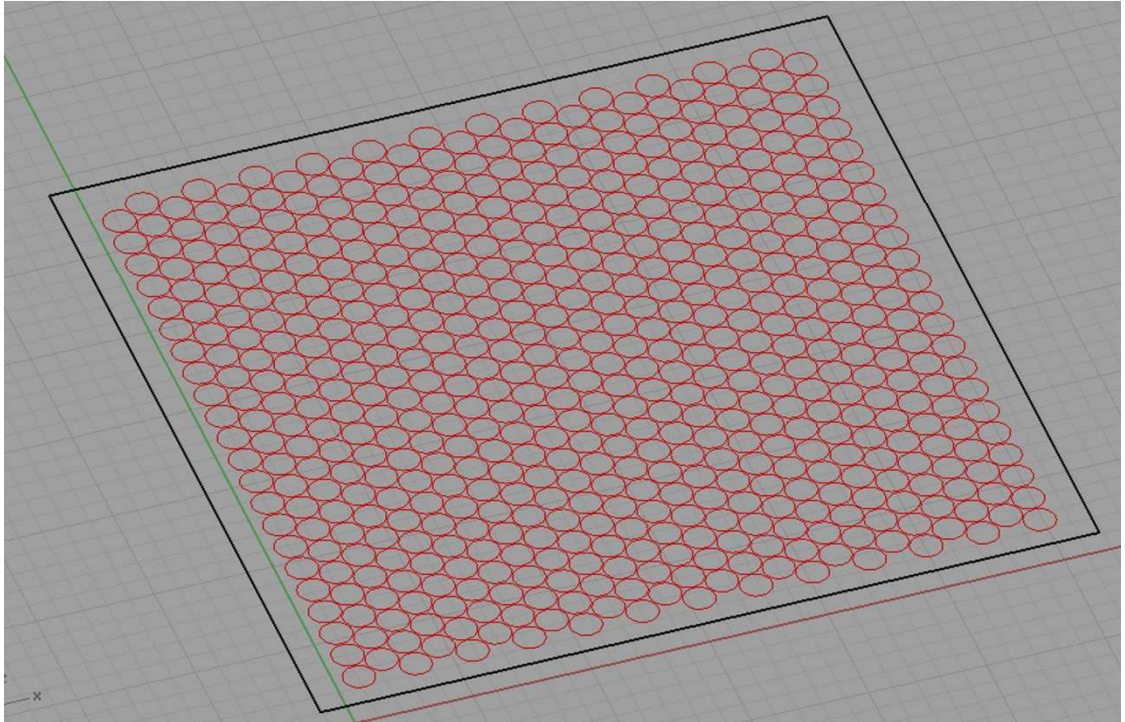


Fig. 166 – Due esempi dei risultati che si possono ottenere con il modello parametrico.

In seguito, con l'affinamento della tecnica e la diffusione delle macchine a controllo numerico, si inaugurò la stagione del “*parametricist patterning*”, che anziché compensare le diversificazioni tra gli elementi del *pattern* cerca di amplificarle, sottolineando in tal modo uno dei tratti riconoscitivi del parametricismo (figg. 167, 168 e 169). La differenziazione viene spesso introdotta volontariamente, applicando sulla superficie un'immagine o una mappa (*mapping*) che, consentendo di controllare la trasformazione delle componenti, andrà ad influenzare il *pattern*<sup>21</sup>. La superficie può così essere composta per rispondere ad esigenze locali come quelle legate all'orientazione solare, affinché il graduale variare dell'intensità della radiazione su una superficie curva si traduca in un gradiente di trasformazione dei componenti.

Nel parametricismo un'esigenza funzionale diventa valore artistico, consentendo di materializzare una necessità di prestazioni a discapito del semplice mero formalismo.

Il radicale cambiamento, rappresentato da questo filone della modellazione parametrica, sta nel fatto di considerare l'architettura come un processo di formazione dove, prima che un *concept* diventi forma, vengono coinvolti necessità e vincoli differenti tra cui le proprietà dei materiali utilizzati<sup>22</sup>.

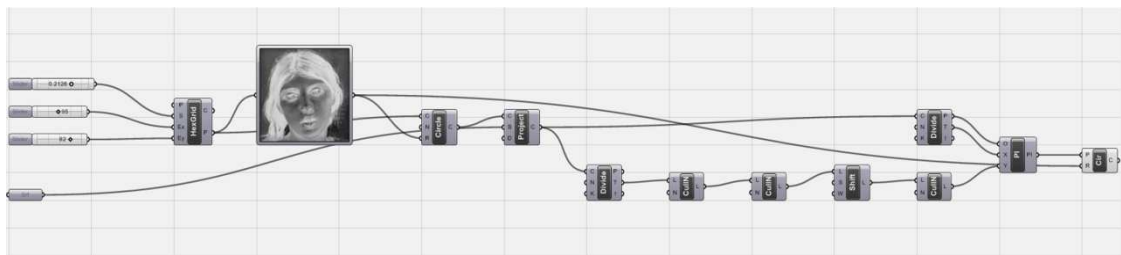


Fig. 167 – Il modello parametrico mostra ciò che è possibile ottenere con il “*parametricist patterning*”, introducendo volontariamente una variabile che permetta di rendere mutabili gli elementi della tassellazione.

<sup>21</sup> PATRICK SCHUMACHER, *Parametric Patterns*, «AD», n. 6, vol. 79, 2009, p. 34.

<sup>22</sup> BENJAMIN ARADA, CHRIS LASCH, *Tooling*, «Pamphlet Architecture», vol. 27, New York, Princeton Architecture Press 2006.

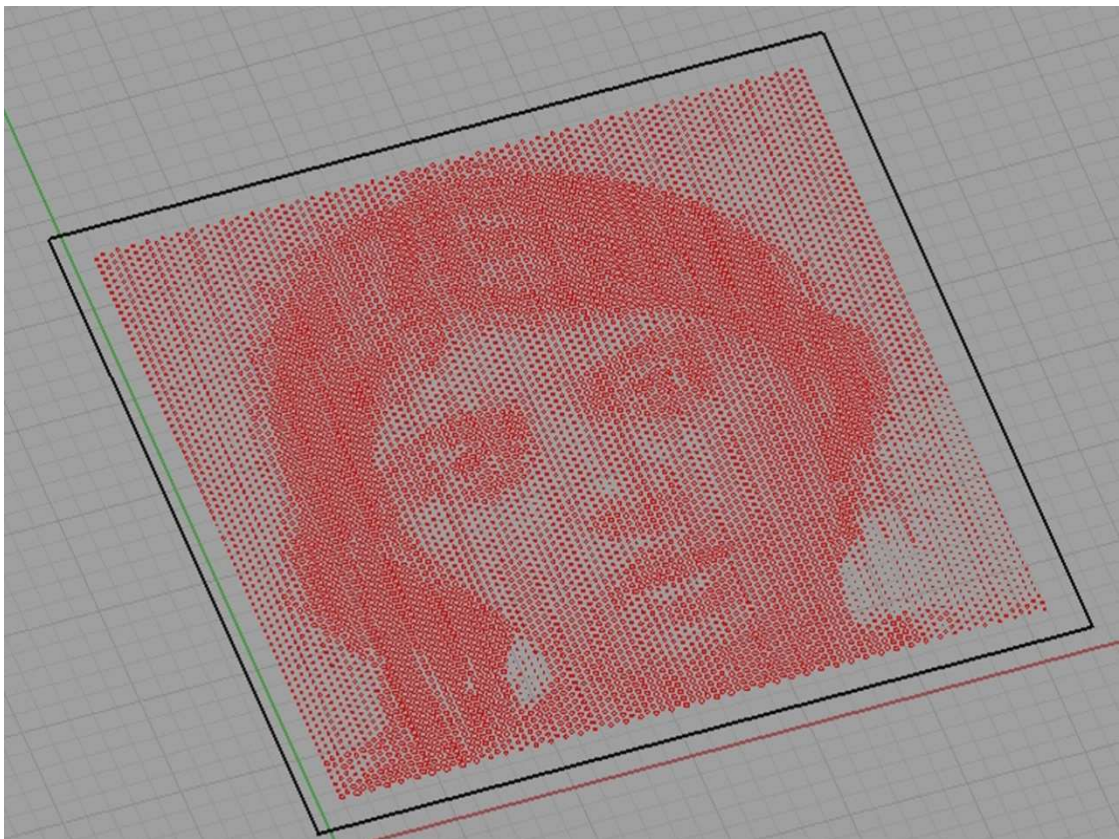
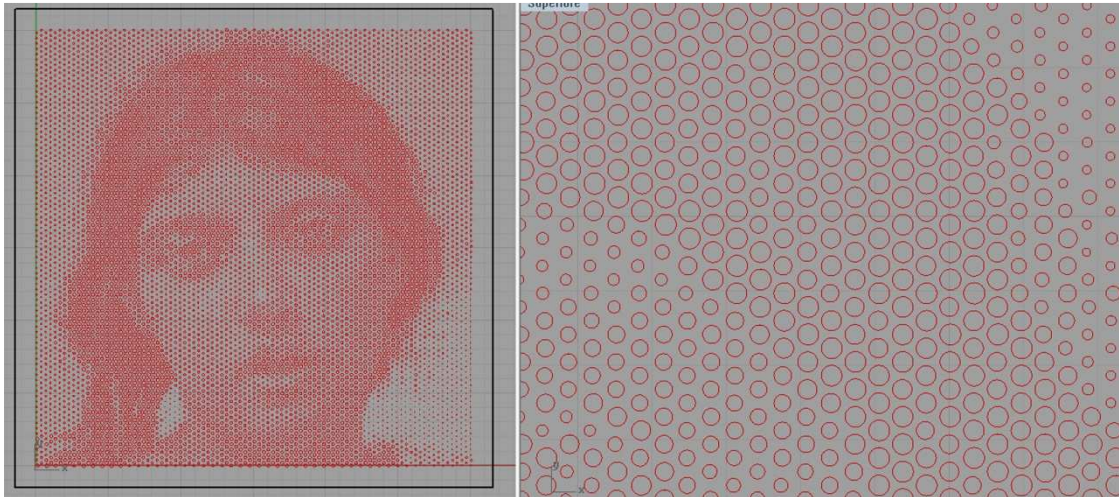


Fig. 168 – Visualizzazione dei risultati conseguiti al variare della superficie: in questo caso si è utilizzato un disegno di Vincenzo Gemito, ma si sarebbe ugualmente potuto fare ricorso ad una mappa con l'intensità della radiazione solare sulla superficie.

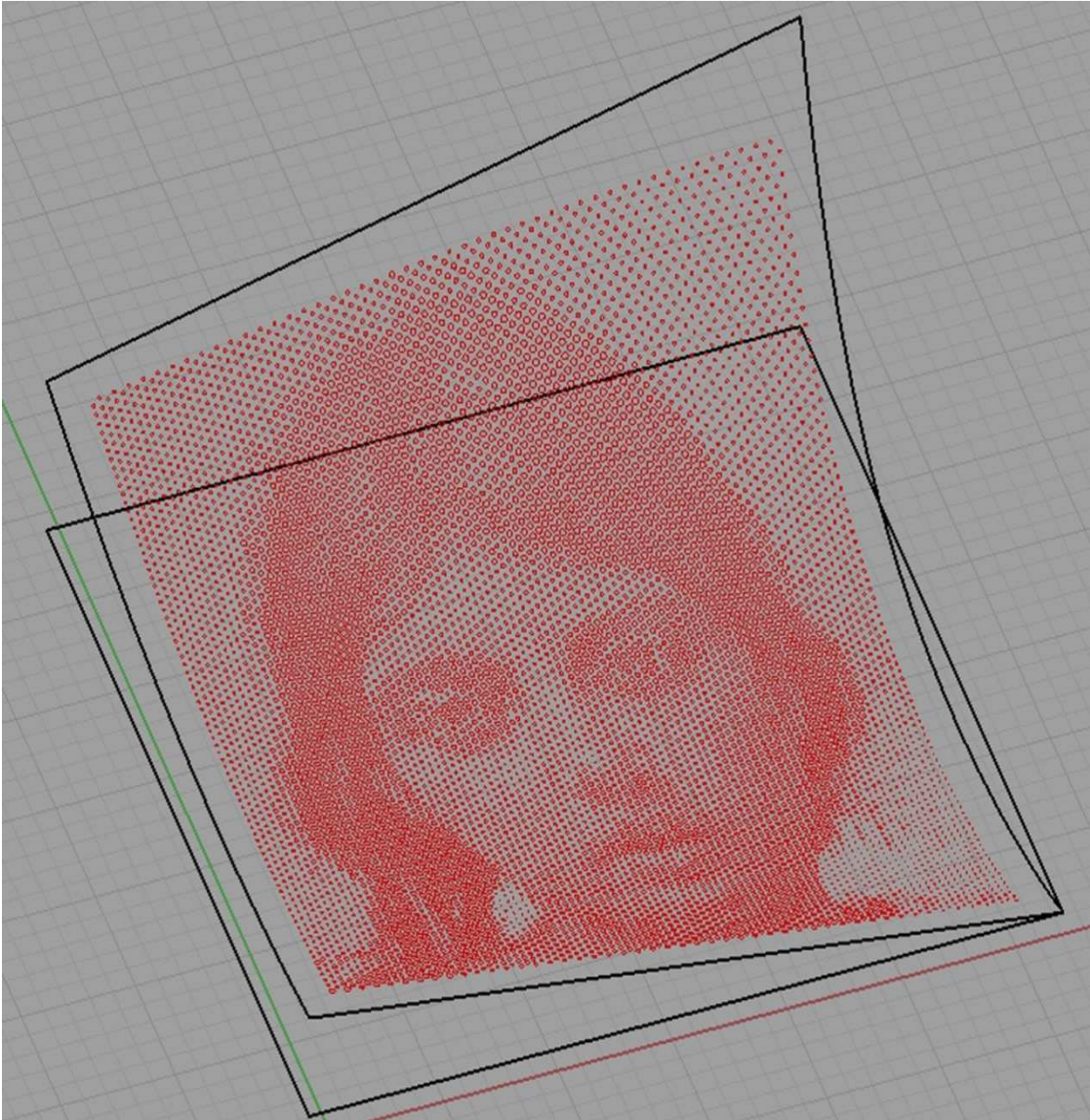


Fig. 169 – Visualizzazione dei risultati conseguiti al variare della superficie.

## 7.4

### **Pattern architettonici dinamici**

*«L'architecture vivante est celle qui exprime fidèlement son époque. On en cherchera des exemples dans tous les domaines de la construction. On choisira les oeuvres qui, strictement subordonnées à leur usage, réalisées par l'emploi judicieux de la matière, atteindront à la beauté par les dispositions et les matières harmonieuses des éléments nécessaires qui les composent».*

AUGUSTE PERRET, *L'architecture vivante*, «L'architecture vivante», n. 1, 1923.

«Architettura vivente è quella che fedelmente esprime il proprio tempo. La cercheremo in tutti gli ambiti della costruzione. Sceglieremo opere che, strettamente subordinate alla loro funzione e realizzate con giudizioso impiego del materiale, raggiungono la bellezza attraverso l'ordine e le armoniose proporzioni degli indispensabili elementi di cui si compongono».

AUGUSTE PERRET, in: WILLIAM J. R. CURTIS, *L'architettura del Novecento*, Milano, Bruno Mondadori 2002<sup>2</sup>, p. 73.

Fino ad ora, anche quando si è applicata la modellazione parametrica, sono stati presi in considerazione tassellazioni e *pattern* "statici", per cui il risultato che ne consegue, una volta calato nella realtà, diventa fisso, immutabile.

Nel caso delle tassellazioni bidimensionali solamente la serie "*Metamorphosis*" di Escher sembra avere un aspetto dinamico, sebbene questo obiettivo non possa essere realmente raggiunto attraverso il disegno. Relativamente ai *pattern* tridimensionali è invece possibile immaginare strutture in trasformazione, capaci di modificare la propria geometria, dove per cambiare la disposizione degli elementi sia sufficiente un input. Risulta così evidente come ciò possa avere importanti ricadute nei campi dell'architettura e non solo.

Dal momento che le tassellazioni spaziali sono composte da solidi, la possibilità di mutare un solido in un altro permetterebbe di produrre tassellazioni variabili nel

tempo. A tale proposito una delle scoperte più interessanti, dovuta a Richard Buckminster Fuller, riguarda i solidi platonici e le loro relazioni. Per comprenderne i risultati è però necessario un riferimento al problema dell'impacchettamento di sfere<sup>1</sup> (*sphere packing*).

Nel 1987 Keith Critchlow<sup>2</sup> analizzò la gerarchia dei concetti geometrici di punto, linea, piano e spazio tridimensionale. Questi elementi possono diventare tangibili se si rappresenta il punto con la sfera che lo circonda, la linea retta come il segmento che unisce i centri di due sfere identiche tangenti esternamente, il piano mediante la regione compresa all'interno del triangolo che collega i centri di tre sfere uguali, a due a due tangenti esternamente, e lo spazio tridimensionale come il tetraedro che ne collega i centri di quattro<sup>3</sup> (fig. 170).

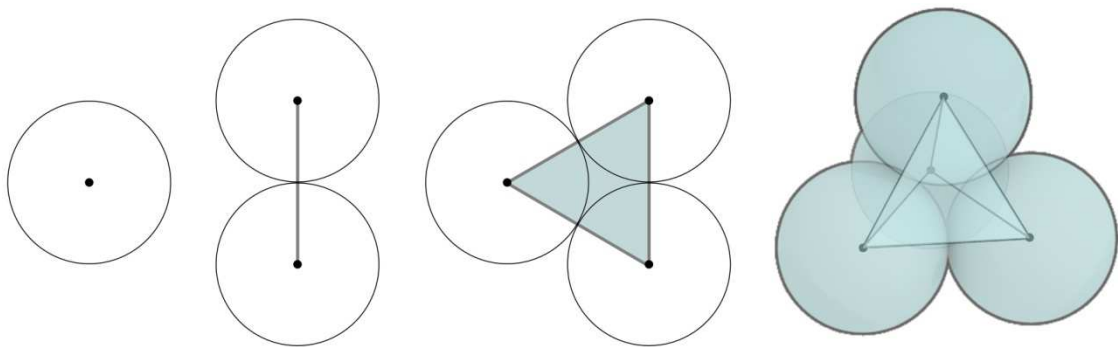


Fig. 170 – Conversione di punti, linee, figure e solidi in sfere secondo la concezione di Keith Critchlow.

Poiché un tetraedro si forma collocando una sfera sopra tre sfere disposte a triangolo, qualora ne vengano sistemate altre quattro negli interstizi tra le prime si avrà un modello di doppio tetraedro. Si genera invece un ottaedro posizionando una

<sup>1</sup> Riguarda le disposizioni che sfere identiche possono assumere per riempire uno spazio senza sovrapposizioni. Normalmente si fa riferimento allo spazio euclideo tridimensionale, ma è possibile estendere questi concetti allo spazio bidimensionale, dove le sfere saranno cerchi, o allo spazio  $n$ -dimensionale, in cui si parlerà di ipersfere, o ancora agli spazi non euclidei come quello iperbolico.

<sup>2</sup> KEITH CRITCHLOW, *Order in Space*, London, Thames & Hudson 1987.

<sup>3</sup> JAY KAPPRAFF, *Connections. The geometric bridge between art and science*, London, World Scientific Publishing 2001<sup>2</sup>, pp. 317-318.



sfera sopra e una sotto ad una disposizione piana di quattro sfere, in modo tale che ognuna sia tangente alle altre quattro; introducendo una seconda serie di elementi negli interstizi si otterrà un cubo<sup>4</sup> (fig. 171).

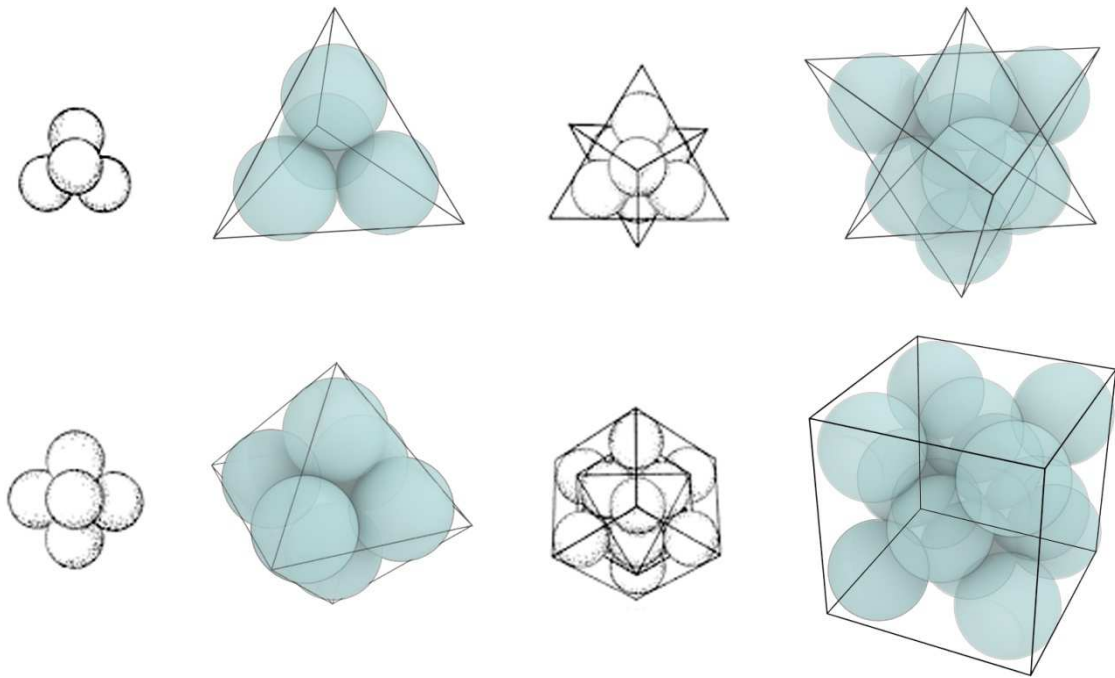


Fig. 171 – Tetraedro, doppio tetraedro, ottaedro e cubo ottenuti mediante l'impacchettamento di sfere.

Come dimostrato da Gauss, nello spazio euclideo tridimensionale la disposizione più densa di sfere è quella in cui ognuna è circondata da altre dodici: sei sullo stesso piano, a cui ne vengono aggiunte tre ad un livello superiore ed altrettante ad uno inferiore. Nel caso in cui le tre sfere disposte al livello superiore siano orientate in modo inverso rispetto alle tre che si trovano su quello inferiore, congiungendo i centri di tutte le dodici sfere che circondano il nucleo si otterrà un cubottaedro<sup>5</sup>.

<sup>4</sup> JAY KAPPRAFF, *Connections. The geometric bridge between art and science*, London, World Scientific Publishing 2001<sup>2</sup>, pp. 317-318.

<sup>5</sup> Uno dei tredici poliedri archimedei: presenta 14 facce (6 quadrate e 8 triangolari) disposte in modo tale che ognuno dei suoi 24 spigoli separi una faccia quadrata da una triangolare e in ciascuno dei suoi 12 vertici concorrano 2 facce quadrate e 2 triangolari. Può essere ottenuto troncando le 8 cuspidi di un cubo oppure le 6 di un ottaedro regolare.

Quando invece le loro proiezioni sul piano orizzontale coincidono si avrà una bicupola triangolare<sup>6</sup> (fig. 172).

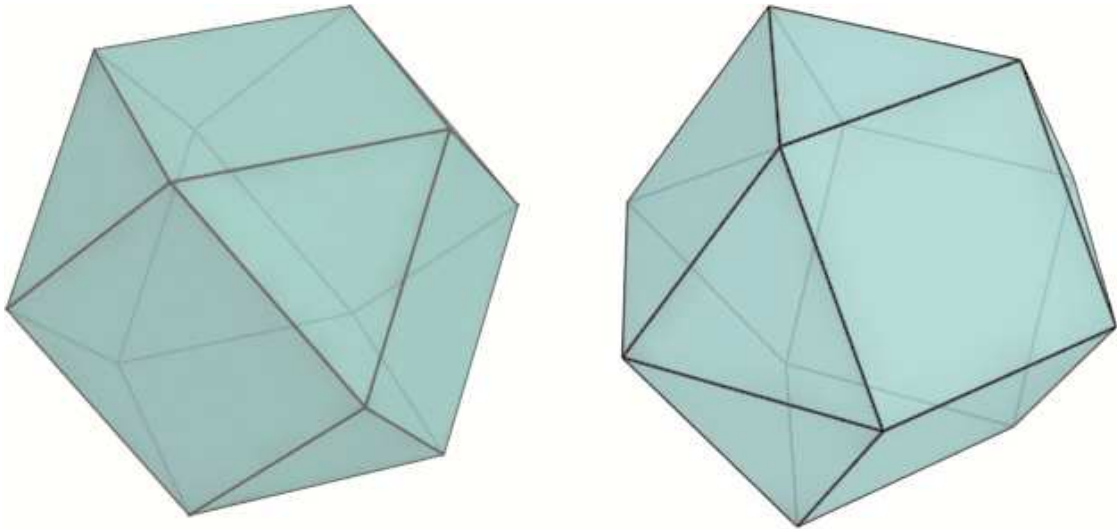


Fig. 172 – Cubottaedro e bicupola triangolare.

Rimuovendo la sfera centrale il cubottaedro collassa in un icosaedro, dove ogni sfera risulta tangente ad altre cinque (fig. 173). La trasformazione dei poliedri platonici valutata attraverso l'impacchettamento di sfere rivela una gerarchia tra tetraedro, ottaedro e icosaedro<sup>7</sup>. La più importante scoperta di Fuller, la "*Jitterbug Transformation*"<sup>8</sup>, riguarda proprio la possibilità di trasformare un cubottaedro, che in prima battuta diventa un icosaedro, poi un ottaedro e infine un tetraedro<sup>9</sup> (fig. 174).

Questo risultato, che per decenni non si ebbe modo di applicare, rappresentò una rivoluzione nello studio dei solidi platonici, non più considerati solo staticamente l'uno vicino all'altro, ma strettamente correlati nella struttura, tanto da poter essere

<sup>6</sup> Solido di Johnson: è un poliedro convesso le cui facce sono costituite da poligoni regolari; non rientra tra i solidi platonici e archimedeei e non è neanche un prisma o un antiprisma; come il cubottaedro ha 14 facce (6 quadrate e 8 triangolari) ma le coppie di facce della medesima forma hanno un lato in comune.

<sup>7</sup> JAY KAPPRAFF, *Connections. The geometric bridge between art and science*, London, World Scientific Publishing 2001<sup>2</sup>, pp. 319-320.

<sup>8</sup> Fuller stesso coniò il nome mutuandolo da un ballo molto diffuso negli anni '40.

<sup>9</sup> AMY C. EDMONDSON, *A Fuller Explanation*, Pueblo (U.S.A.), EmergentWorld LLC 2007, pp. 179-195.

pensati come transizioni di fase di un *loop*, ossia un periodico oscillare tra due punti<sup>10</sup>.

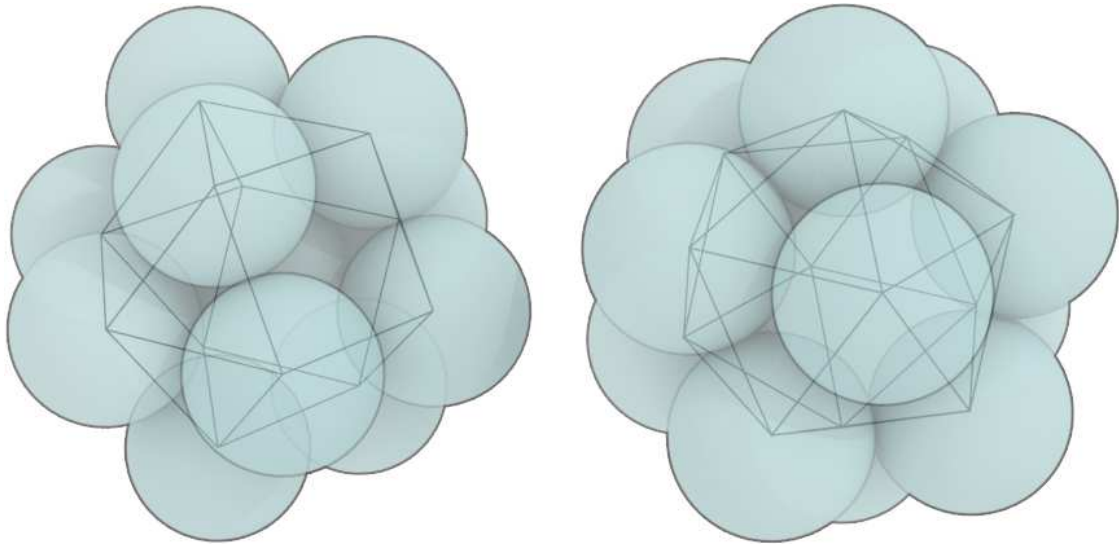


Fig. 173 – Cubottaedro che, rimuovendo la sfera centrale, collassa in un icosaedro.

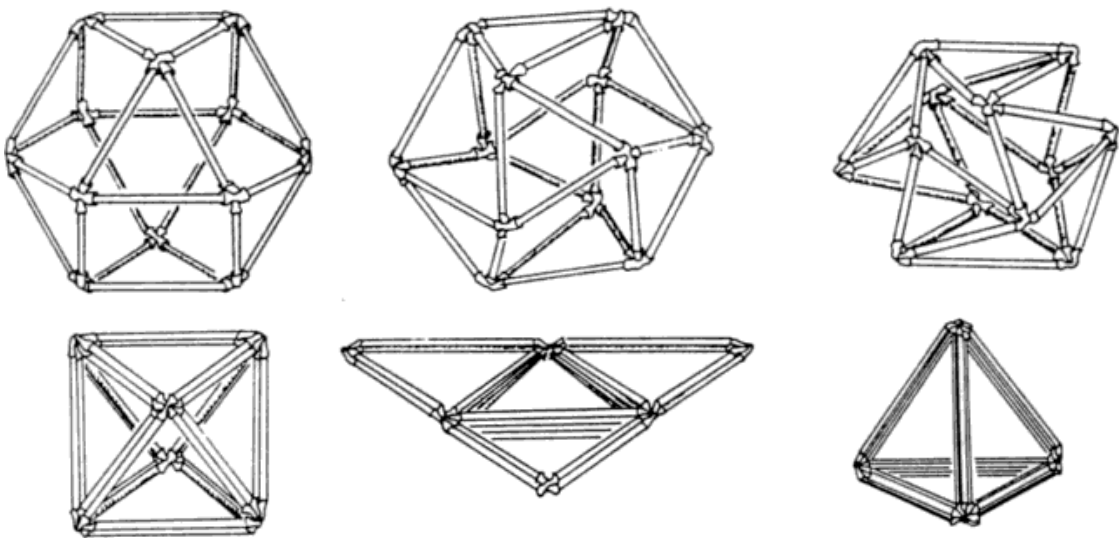


Fig. 174 – Jitterbug Transformation.

<http://www.rwgrayprojects.com/synergetics/s04/figs/f6008.gif> (consultato 27-12-2011).

<sup>10</sup> SCOTT EASTHAM, *American Dreamer. Bucky Fuller & the Sacred Geometry of Nature*, Cambridge, James Clarke & Co. 2007, pp. 77-78.

RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Your Private Sky. The Art of Design Science*, Baden (Germany), Lars Müller Publishers 1999, p. 16.

Solo dopo la morte di Fuller la scoperta venne utilizzata in campo scientifico nella cristallografia e nei superconduttori<sup>11</sup>; ulteriori impieghi sarebbero tuttavia possibili in architettura per produrre tassellazioni spaziali in grado di mutare forma a seconda delle necessità. In attesa degli sviluppi futuri occorre rilevare che sperimentazioni in tal senso sono già state avviate e hanno portato ad interessanti applicazioni, sebbene l'avvento di *pattern* strutturali dinamici sembri ancora lontano dal proporsi.

Il tema delle strutture estensibili, che necessariamente implicano una tassellazione del piano e dello spazio, interessò Santiago Calatrava, il quale ne fece oggetto della propria tesi di dottorato, analizzando la piegabilità delle strutture<sup>12</sup> per ottenere forme piane e spaziali. Egli utilizzò i suoi studi, sebbene con qualche semplificazione, nella *Fabbrica Ernsting's* a Coesfeld in Germania (1983-1985) e nel progetto per il *Ristorante Bauschänzli* di Zurigo (1988), che però non venne costruito.

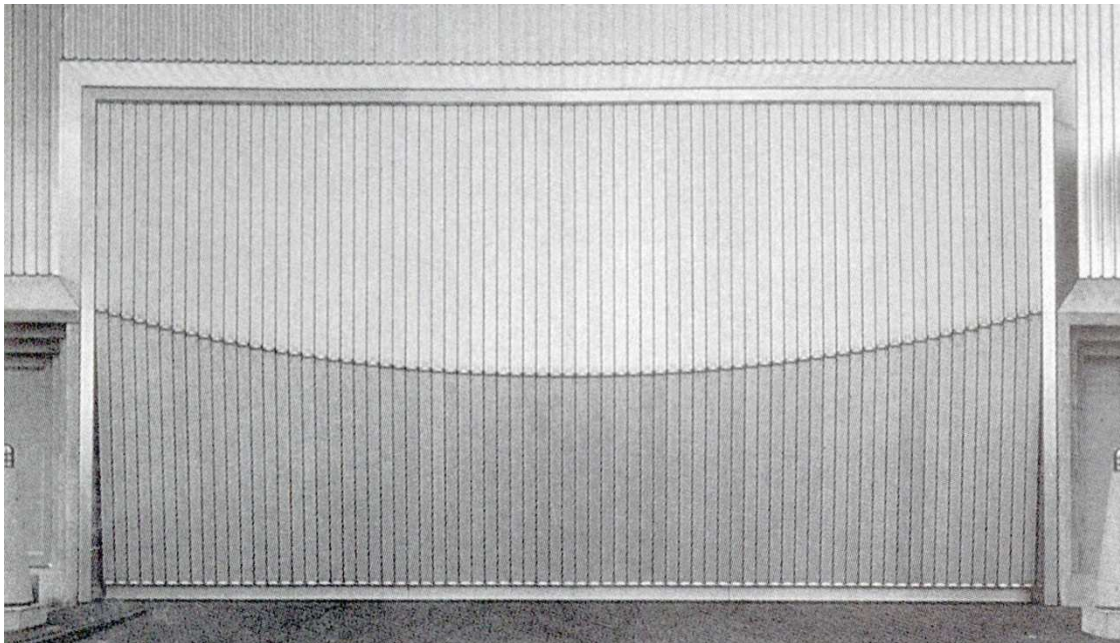


Fig. 175 – Santiago Calatrava, Portale della fabbrica Ernsting's, Westfalia (Germania), 1983-1985.

SERGIO POLANO, *Santiago Calatrava. Opera completa*, Milano, Electa 2002<sup>6</sup>, p. 43.

---

<sup>11</sup> Ivi.

<sup>12</sup> SANTIAGO CALATRAVA, *Zur Faltbarkeit von Fachwerken*, Eidgenoessischen Technischen Hochschule Zuerich, Doktors der Technischen Wissenschaften 1981.

Al di fuori dei due esempi citati, Calatrava ha ideato e realizzato altre architetture con elementi mobili, ma possono essere definiti “*pattern*” solo con qualche forzatura.

In Westfalia, a Coesfeld, ebbe occasione di confrontarsi con il ridisegno delle facciate di un edificio industriale avendo vinto, in collaborazione con Bruno Reichlin e Fabio Reinhard, il concorso indetto dal proprietario dell’azienda tessile Ernsting’s.

Ai fini della presente ricerca mi interessano i tre portali (13x5 metri), la cui movimentazione, attuata mediante un architrave orizzontale arcuato, genera tre pensiline a protezione dell’area di carico e scarico<sup>13</sup> (fig.175). La costruzione di un modello parametrico, relativo a queste parti, è utile per visualizzare i cambiamenti di aspetto e la funzionalità dell’automatismo in base al mutare della geometria degli elementi (fig. 176). Per raggiungere l’obiettivo occorre innanzitutto determinare la lunghezza di una linea che rappresenta l’architrave dell’apertura, la quale dovrà essere suddivisa in un numero di segmenti, tra loro uguali, in base ad un parametro che servirà anche a definire la larghezza degli elementi che compongono il portale.

Gli estremi dei segmenti diventeranno i centri di circonferenze tracciate, secondo raggi stabiliti, su piani perpendicolari alla linea stessa. Proprio la definizione di tale lunghezza, variabile per ogni elemento, rappresenta la parte fondamentale del modello. Questi valori si possono ottenere da una funzione matematica o con input manuali. Nel nostro caso si è preferito farli derivare dall’andamento di una curva che può essere modificata operando sui suoi punti di controllo. La distanza di questa linea dall’asse delle ascisse ( $x$ ) determinerà il valore numerico dei raggi per cui, agendo su di essa, si opera sulla lunghezza assoluta dei vari elementi e, contemporaneamente, sul posizionamento delle cerniere che consentono loro di piegarsi.

Un nuovo parametro consentirà di stabilire l’altezza dell’apertura e di tracciare la linea della soglia, che dovrà essere suddivisa nello stesso numero di segmenti dell’architrave: i punti così individuati diventano i centri di circonferenze tangenti a

---

<sup>13</sup> SERGIO POLANO, *Santiago Calatrava. Opera completa*, Milano, Electa 2002<sup>6</sup>, pp. 40-43.

PETER GÖSSEL, GABRIELE LEUTHÄUSER, *Architettura del XX secolo*, Köln, Tashen 2005, p. 336.

quelle tracciate precedentemente. Esse serviranno per simulare il comportamento dei giunti durante l'apertura e l'escursione massima del portale rispetto all'altezza dell'architrave.

Il secondo gruppo di circonferenze potrà traslare lungo l'asse verticale (z), finché tutte le curve resteranno tangenti alle precedenti almeno in un punto; la traslazione lungo quest'asse sarà quindi definita da un parametro, compreso tra 0 e 1, dove 0 individua la situazione di chiusura mentre 1 indica la massima apertura. Le intersezioni tra i due gruppi di circonferenze identificano le diverse posizioni delle cerniere nei vari momenti di utilizzo: occorre però avere l'accortezza di selezionare solamente i punti di intersezione più avanzati dell'architrave. Per tracciare gli elementi dei portali tutti i centri delle circonferenze dovranno essere congiunti con i rispettivi punti di intersezione; queste linee saranno poi estruse lungo l'asse x (fig. 177). La struttura completa può essere successivamente replicata per visualizzarne il comportamento in serie e ottenere il medesimo effetto di *pattern* in movimento voluto da Santiago Calatrava (fig. 178).

Per il *Ristorante Bauschänzli* di Zurigo, Calatrava concepì invece un sistema di nove "alberi" in metallo e vetro alti 12 metri capaci di aprirsi e chiudersi a seconda delle necessità<sup>14</sup>.

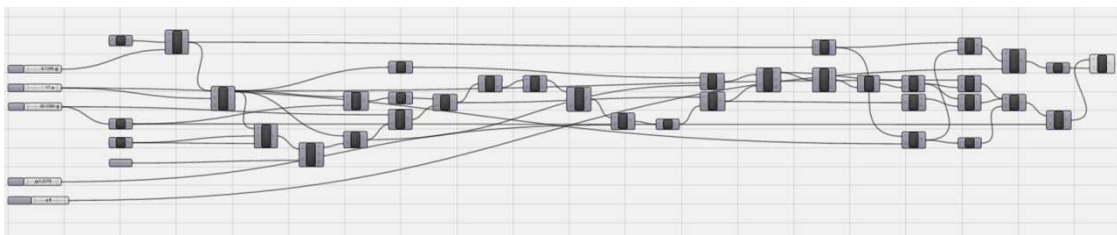


Fig. 176 – Modello parametrico dei portali.

<sup>14</sup> SERGIO POLANO, *Santiago Calatrava. Opera completa*, Milano, Electa 2002<sup>6</sup>, pp. 130-133.

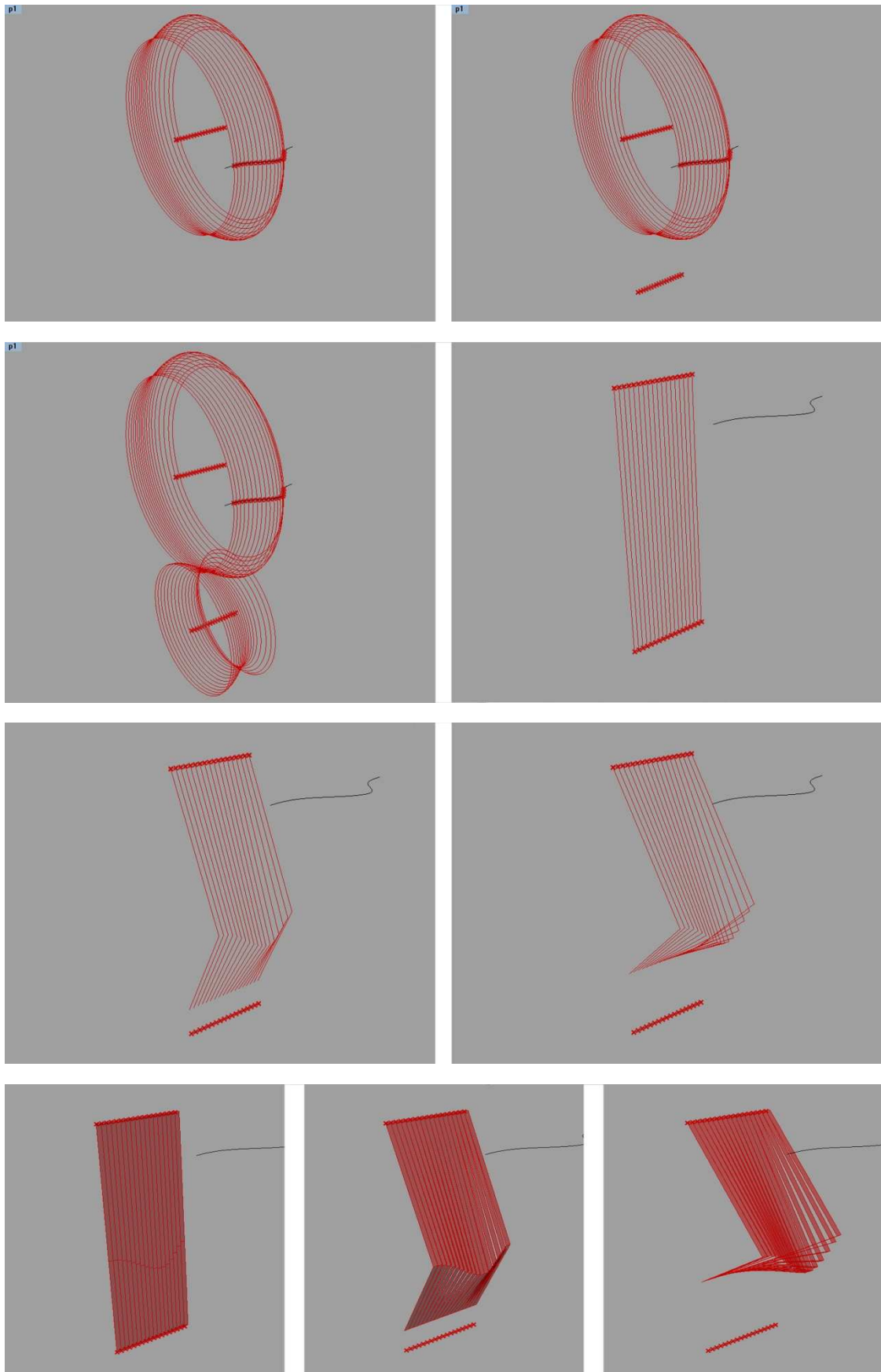


Fig. 177 – Fasi successive nella costruzione del modello.

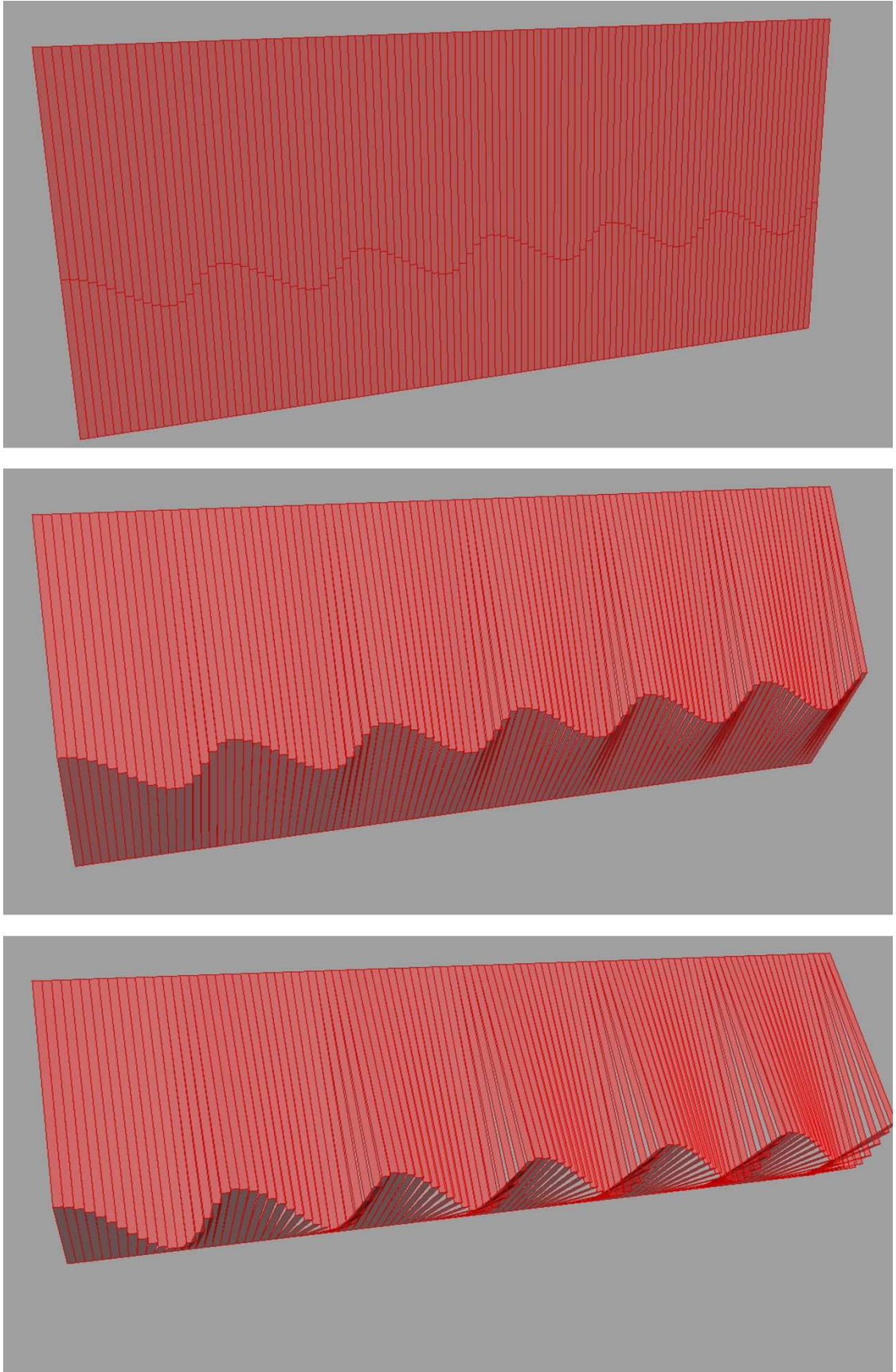


Fig. 178 – Fasi successive nella costruzione del modello.