



Università degli Studi di Parma

Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

**Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura**

XXIII Ciclo

(ICAR 08 - ICAR 09 - ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 – ICAR 20)

Valentina Beatini

**Cinemorfismi.**

**Meccanismi che definiscono lo spazio architettonico.**

**Kinematic shaping.**

**Mechanisms that determine architecture of space.**



Tutore: Gianni Royer Carfagni

Coordinatore del Dottorato: Prof. Aldo De Poli

“La forma deriva spontaneamente dalle necessità di questo spazio, che si costruisce la sua dimora come l’animale che sceglie la sua conchiglia. Come quell’animale, sono anch’io un architetto del vuoto.”

*Eduardo Chillida*



Università degli Studi di Parma  
Dipartimento di Ingegneria Civile, dell'Ambiente, del Territorio e Architettura

**Dottorato di Ricerca in Forme e Strutture dell'Architettura**

(ICAR 08 - ICAR 09 – ICAR 10 - ICAR 14 - ICAR17 - ICAR 18 - ICAR 19 – ICAR 20)

XXIII Ciclo

Coordinatore: prof. Aldo De Poli

Collegio docenti:

prof. Bruno Adorni

prof. Carlo Blasi

prof. Eva Coisson

prof. Paolo Giandebiaggi

prof. Agnese Ghini

prof. Maria Evelina Melley

prof. Ivo Iori

prof. Gianni Royer Carfagni

prof. Michela Rossi

prof. Chiara Vernizzi

prof. Michele Zazzi

prof. Andrea Zerbi.

Dottorando:

Valentina Beatini

Titolo della tesi:

*Cinemorfismi.*

*Meccanismi che definiscono lo spazio architettonico.*

*Kinematic shaping.*

*Mechanisms that determine architecture of space.*

Tutore:

Gianni Royer Carfagni



A Emilio, Maurizio e Carlotta.

Ringrazio tutti i professori e tutti i colleghi coi quali ho potuto confrontarmi nel corso di questi anni, e in modo particolare il prof. Gianni Royer per gli interessanti confronti ed il prof. Aldo De Poli per i frequenti incoraggiamenti. Ringrazio anche tutti gli amici per la pazienza che sempre sanno dimostrare verso la mia mancanza di costanza. Ringrazio tutti coloro che mi vogliono bene e quanti mi conoscono meglio in particolare.



# Indice

<i>Prefazione</i>	<i>i</i>
<b>0. Introduzione.</b>	<b>1</b>
<b>Cap. 0.1. Nota metodologica.</b>	<b>3</b>
0.1.1. Ambito di ricerca.	3
0.1.2. Orizzonte temporale	4
<b>Cap. 0.2. Obiettivi programmatici.</b>	<b>9</b>
0.2.1. La progettazione di architetture con forme cinetiche integrate.	9
0.2.2. Esplorazione di nuove opportunità.	12
<b>Cap. 0.3. Struttura della tesi.</b>	<b>14</b>
<b>Parte Prima. Architetture cinetiche.</b>	<b>17</b>
<b>Cap. 1.1. Caratteristiche e prestazioni.</b>	<b>19</b>
1.1.1. Una descrizione in parallelo: architetture trasportabili e trasformabili.	19
1.1.2. Un percorso prestazionale: architetture cinetiche, architetture intelligenti.	23
<b>Cap. 1.2. Realizzazioni.</b>	<b>29</b>
1.2.1. Criteri di classificazione	29
1.2.2. L'architettura cinetica dal 1990 al 2010, tavola sinottica.	33
<b>Cap. 1.3. Conclusioni.</b>	<b>64</b>

## **Parte Seconda. Strutture movimentabili.**

<b>Cap. 2.1. Strutture cinematiche.</b>	<b>67</b>
2.1.1. Cinematica: i concetti base.	69
2.1.2. Catene cinematiche per l'architettura.	74
2.1.3. Strutture articolate pure.	78
<b>Cap. 2.2. Strutture per punti, tamponamenti morbidi.</b>	<b>81</b>
2.2.1. Introduzione: morfologia e cinematica.	82
2.2.2. Ombrello.	85
2.2.3. Strutture collassabili.	86
2.2.4. Griglie collassabili a giunti separabili.	87
2.2.5. Tensegrity.	90
2.2.6. Strutture scorrevoli.	99
2.2.7. Reciprocal frame.	101
2.2.8. Strutture estensibili.	103
2.2.9. Strutture a forbice bidimensionali.	104
2.2.10. Strutture a forbice tridimensionali.	107
2.2.11. Strutture a forbice autobloccanti.	112
2.2.12. Strutture estensibili tipo Bennet.	115
2.2.13. Strutture a rotazione radiale.	117
2.2.14. Strutture bi stabili.	123
<b>Cap. 2.3. Strutture per punti, tamponamenti rigidi.</b>	<b>126</b>
2.3.1. Introduzione: morfologia e cinematica.	127
2.3.2. Strutture estensibili.	128
2.3.3. Strutture pieghevoli a sollevazione.	130
2.3.4. Strutture a rotazione radiale.	133
2.3.5. Strutture composte.	134
<b>Cap. 2.4. Strutture per piani.</b>	<b>137</b>
2.4.1. Introduzione: morfologia e cinematica.	138

2.4.2. Strutture a concertina.	139
2.4.3. Strutture telescopiche.	140
2.4.4. Pannelli a scorrimento.	142
2.4.5. Sistemi a diaframma.	145
2.4.6. Strutture a rotazione radiale.	148
2.4.7. Strutture incernierate.	150
2.4.8. Nuove possibilità: origami.	151
<b>Cap. 2.5. Conclusioni.</b>	<b>154</b>

## **Parte Terza. Metodi di progetto di strutture per piani.**

**157**

### **Cap. 3.1. Origami.**

**159**

3.1.1. Il quadro d'indagine.	159
3.1.2. Terminologia.	161
3.1.3. Morfologia.	163
3.1.4. Rapporto con le strutture per punti.	165
3.1.5. Origami piani.	168
3.1.6. Origami rigidi.	174
3.1.7. Gradi di libertà.	177

### **Cap. 3.2. Generazione di una forma data.**

**181**

3.2.1. Introduzione: le facce degli origami.	181
3.2.2. Tree method.	184
3.2.3. Box pleating.	195

### **Cap. 3.3. Generazione di una forma trasformabile.**

**205**

3.3.1. Introduzione: l'approccio fold and cut.	205
3.3.2. Straight skeleton.	206
3.3.3. Disk Packing.	211

**Cap. 3.4. Studio di moduli suscettibili di agire in sequenza. 213**

3.4.1. Composizione di moduli base: le tassellazioni origami. 213

3.4.2. Le tassellazioni estensibili. 216

3.4.3. Le tassellazioni di rotazione. 223

3.4.4. Considerazioni sulla scelta delle simmetrie. 227

**Cap. 3.5. Controllo del movimento. 230**

3.5.1. Sistemi di supporto a barre, molle, cavi. 230

**Parte Quarta. Applicazione a strutture reali:  
l'involucro attivo. 233****Cap. 4.1. Combinazione di sistemi dati. 235**

4.1.1. Proposta di un sistema estensibile tassellato. 235

4.1.2. Attivazione e controllo del meccanismo. 239

4.1.3. Verifica delle potenzialità performative ed espressive. 244

**Cap. 4.2. Altri scenari possibili: le facciate performative. 248**

4.2.1. Sistemi a rotazione. 248

4.2.2. Sistemi concavo convesso. 260

**Cap. 4.3. La forma degli involucri contemporanei. 269****Parte Quinta. Conclusioni. 271****Cap. 5.1. Conclusioni. 273****Cap. 5.2. Questioni aperte. 275****APPARATI 279****A.1 BIBLIOGRAFIA. 281**

## **Prefazione.**

Oggetto della ricerca è investigare le possibilità di introdurre meccanismi mobili nello spazio architettonico.

I meccanismi sono qui intesi come elementi mobili suscettibili di agire secondo sequenze e con esiti prestabiliti, riletti e approfonditi dal punto di vista architettonico, perché gli edifici possano concretamente essere considerati come sistemi dinamici all'interno del contesto ambientale e culturale in cambiamento

Sottofondo di questa ricerca è lo spazio che, come afferma Zevi in *Saper vedere l'architettura*, "non può essere rappresentato compiutamente in nessuna forma, che non può essere appreso e vissuto se non per esperienza diretta, (che) è il protagonista del fatto architettonico" [ZE48].

Le strutture in grado di cambiare la propria forma sono ad un tempo strutture e meccanismi, perché trasferiscono autonomamente tra i loro elementi le forze ma anche il movimento.

I principi che permettono di rapportare struttura e meccanismo, rigidità e movimento sono matematici. Come sottolinea Hoberman, "l'eleganza e l'essenzialità esibite dall'architettura cinetica derivano da questa base matematica e geometrica. L'essenza di qualsiasi sistema strutturale pieghevole è racchiusa in un numero limitato di elementi rappresentativi connessi tra loro. [...]. Le strutture pieghevoli sono composte da parti connesse con semplicità" [HO93].

Dal punto di vista cinematico – ingegneristico, il progetto si traduce nella ricerca di una configurazione che data un'azione iniziale, produca il movimento desiderato.

Dal punto di vista architettonico il progetto si traduce nell'uso delle tecnologie oggi disponibili per realizzare un'architettura internamente coerente e capace di rispondere alle necessità espresse e latenti.

“Le implicazioni dell'architettura cinetica (infatti) riguardano tanto le performance degli edifici quanto la fenomenologia estetica” [FO09],

#### Note:

[ZE48] BRUNO ZEVI, *Saper Vedere l'Architettura*, Torino, Einaudi, 1948, pg.22.

[HO93] CHUCK HOBERMAN, “*Unfolding architecture*”, in *Architectural design*, vol. 63, n.3-4, pp. 56-59, 1993.

[FO09] MICHAEL FOX, MILES KEMP, *Interactive Architecture*, New York, Princeton Architectural Press, 2009, pg.30.

## **0. INTRODUZIONE.**

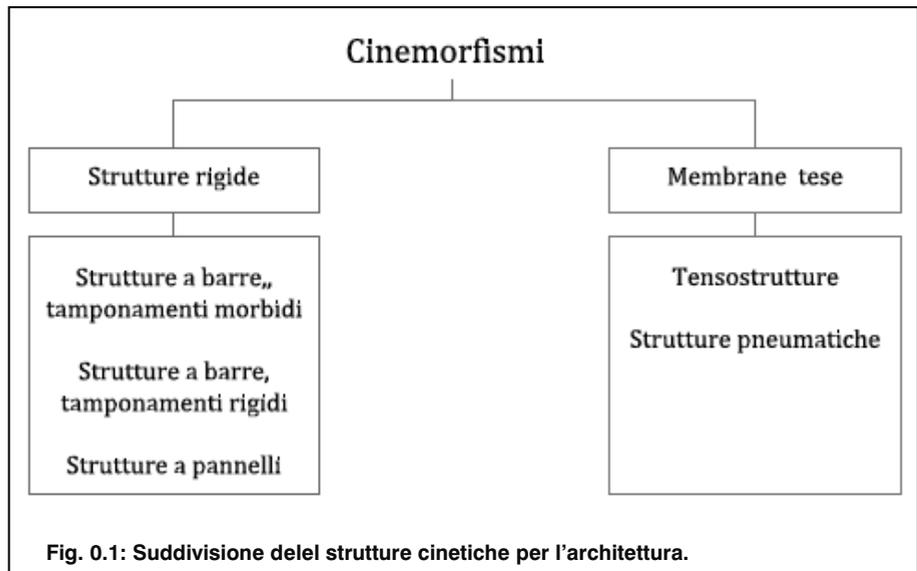


## Cap. 0.1. Nota metodologica.

### 0.1.1. Ambito di ricerca.

Gli edifici cinetici trasformabili si basano su due tipi di movimento.

Il primo è la modifica spaziale di materiali morbidi che è il risultato delle caratteristiche intrinseche del materiale usato, tipico delle membrane tese. Il secondo tipo si basa sullo scorrimento, la piegatura o la rotazione di materiali rigidi connessi tra loro.



Le membrane tese, tensostrutture o strutture pneumatiche, sono leggere e permettono ampia varietà di configurazione perché il materiale si modifica nel suo insieme. Esse però non permettono una totale chiusura o isolamento dello spazio che racchiudono, tendono a deteriorarsi e mal sopportano carichi esterni, come la neve. Per queste ragioni sono tendenzialmente usate per architetture temporanee, come dimostrano esemplarmente dalle realizzazioni di Otto e Rash.

A differenza delle prime, le strutture rigide sono sistemi "dotati di connessioni cinematiche che permettono notevoli rotazioni e/o movimenti

relativi tra le parti, subendo solo deformazioni elastiche di piccola entità” [Y086]. Il movimento, inoltre, avviene per parti: quando una parte si muove, le altre si muovono in conseguenza. Esse possono permettere la completa chiusura o isolamento dello spazio, hanno buona resistenza ai carichi esterni e, nel caso una parte si deteriori, può essere sostituita puntualmente.

Poiché oggetto d’indagine è qui la possibilità di integrare sistemi cinetici nell’architettura e quindi realizzare architetture trasformabili, ci si concentra su questo secondo tipo di strutture. Assunto come campo di ricerca le strutture cinetiche rigide, organizzate le strutture rigide possono essere classificate in base alla suddivisione tra elementi portati e portanti in strutture per punti a tamponamenti morbidi, strutture per punti a tamponamenti rigidi e strutture a pannelli. Le strutture a pannelli sono sistemi dove tamponamento e struttura coincidono. Esse permettono che la funzione portante ed il movimento, ma anche il soddisfacimento dei requisiti di isolamento e chiusura siano affidate ad un unico elemento architettonico. Di recente sperimentazione, possono avere interessanti sviluppi per l’uso in architettura perciò ad esse questo testo guarda con particolare attenzione.

### **0.1.1. Orizzonte temporale**

Il cinematismo è un tema che percorre in parallelo la storia dell’architettura.

Quanti si sono spinti con maggiore audacia nell’uso delle tecnologie via via in sviluppo hanno spesso, almeno in modo episodico, realizzato architetture con componenti cinetiche. Buckminster Fuller nelle Dymaxion Units [MC94], Jean Prouvé nella Maison du Peuple [AA06], 1935-38; Angelo Invernizzi nella Villa Girasole, 1929-35 [FR06]. La clientela primaria sono stati i militari, le persone in situazione di emergenza, abbienti proprietari privati, tipicamente in quest’ordine. In tutti i casi i sistemi sono stati apprezzati dagli immediati

fruitori e non solo, ma non hanno inciso fortemente all'interno della storia architettonica.

Le costruzioni trasformabili, trasportabili, mobili in generale sono state studiate e sviluppate con continuità in contesti a forte specializzazione ove le condizioni particolarmente ristrette e stimolanti hanno spinto a mettere in gioco conoscenze che vanno oltre le frontiere usuali, che si avvicinano alla precarietà delle invenzioni.

Le ricerche sulla prefabbricazione, sui nuovi materiali e sui sistemi di propagazione e controllo del meccanismo sono andate di pari passo con le realizzazioni di Frei Otto negli anni '70 [NE05], le sperimentazioni di Emilio Pérez Piñero [CA93], ma anche le creazioni di Chuck Hoberman [HO92].

Se si volesse tracciare una storia dell'architettura cinetica si dovrebbe parlarla in parallelo con altre discipline, l'ingegneria meccanica prima, poi l'ingegneria aerospaziale e l'industria dell'intrattenimento, infine l'ingegneria elettronica.

Agli inizi degli anni '80 del secolo scorso, l'implementazione degli strumenti di calcolo e i risultati dell'opera dei pochi ma illustri predecessori spingono architetti e ingegneri a collaborare con i ricercatori per realizzare strutture cinetiche, stadi, strutture trasportabili o temporanee dove il progetto era subordinato al sistema mobile (molte coperture retrattili) o vi si identificava (ombrelloni per la Moschea di Medina).

Attorno agli anni '90 compaiono diverse strutture dove il movimento è introdotto come elemento funzionale al progetto nel suo insieme.

L'Institut du Monde Arabe di Jean Nouvel è esemplare. Il meccanismo usato è un semplice sistema iris come quelli delle macchine fotografiche, riprodotto più e più volte in moduli ognuno azionato indipendente. Esso non trasforma l'edificio in una macchina, ma lo arricchisce funzionalmente e esteticamente [NO90]. Per la prima volta i cinematismi sono usati in un

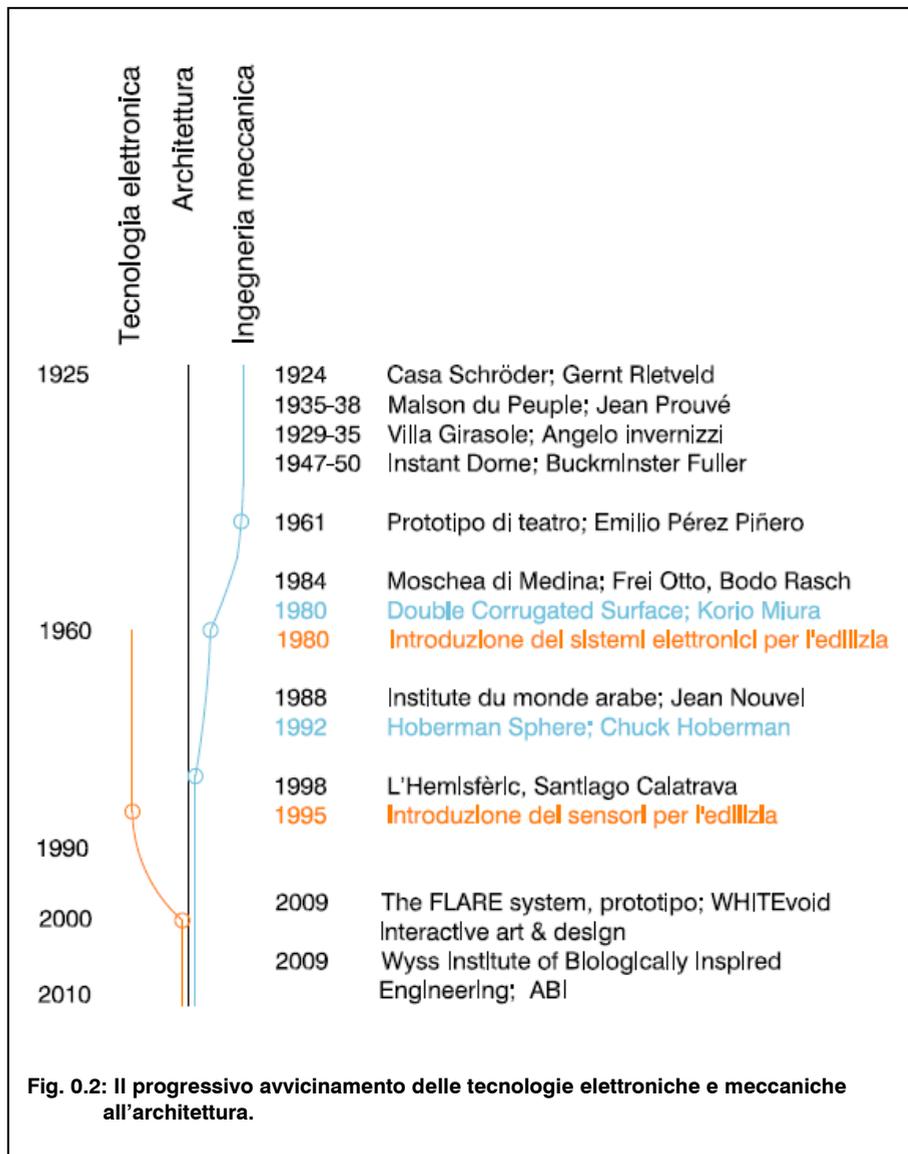
importante edificio pubblico senza sostituirsi alla sua autonomia architettonica anzi esaltandone l'identità. Da qui parte la presente ricerca, quest'opera terminata nel 1988, apre la strada a una nuova esplorazione delle architetture trasformabili.

Come detto, però, le architetture cinetiche sono strettamente legate ai progressi di altre discipline.

Negli ultimi 10 anni si stanno diffondendo le tecnologie led e elettroniche in genere [HA03]. I costi di produzione dei sistemi motorizzati sono scesi in modo significativo e la standardizzazione industriale ha contribuito a migliorare l'affidabilità dei sistemi. La tecnologia elettronica realizza microprocessori più evoluti, più piccoli e energeticamente più efficienti. L'utilizzo di sensori e attuatori permette di generare con i supporti elettronici degli ambienti in grado di adattarsi nel tempo a più variabili. L'architettura acquisisce una nuova forma di mobilità, superficiale, che rende l'involucro una fonte di comunicazione ed informazione.

L'architettura subisce il fascino del progresso della biologia, della chimica e dell'elettronica. Si chiede ironicamente Dery "quando si apriranno alla luce i fiori metallici di Gehry?" [DE99], riferendosi al Museo di Bilbao.

Anche le architetture oggettivamente mobili sono rilette in funzione delle nuove tecnologie. Questi nuovi percorsi di investigazione sono tutt'ora in atto e nuove possibilità si stanno formulando [SA10], i prototipi ritenuti più significativi sono proposti nella presente ricerca.



## Note:

- [YO86] WAN S. YOO, EDWARD J. HAUG, Dynamics of articulated structures, part I: theory, in *Journal of Structural Mechanics*, n. 14, 1986, pp. 105-126.
- [NO90] JEAN NOUVEL, Institut Du Monde Arabe, Princeton Architectural Press, 1990
- [HO92] CHUCK HOBERMAN. "The art and science of folding structures: New geometries of continuous multidimensional transformations", in *Sites* n.24, 1992. pp.31-53.
- [CA93] SANTIAGO CALATRAVA FELIX CANDELA, FELIX ESCRIG, EMILIO PÉREZ PINERO, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCE, *Arquitectura Transformable. Textos de arquitectura*, Siviglia, E, Publication de la Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Sevilla, 1993.
- [TO93] ELENA TOMEI., "Una struttura expandibile. The Iris Dome". in *L'Arca* n.73, 1993, pp.54-57
- [MC94] JOHN MCHALE, *R. Buckminster Fuller*, New York,US-NY, 1962 ( trad. it. E., BATTISTI, (a cura di) *R. Buckminster Fuller*, Milano, Il saggiatore, 1964.
- [AA94] Jean Nouvel. 1987-1994, *El Croquis*, n. 65/66, 1994
- [DE99] MARK DERY, *The Persistence of Industrial Memory* in AMERIGO MARRAS ( a cura di), *Eco-Tec: Architecture of the In-Between*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 1999.
- [HA03] FUMIO HARA, ROLF PFEIFER, *Morpho-functional machines. The new species. Designing embodies intelligence*,Tokyo - Berlin, JP - DE, Springer-Verlag, 2003
- [NE05] WINFRIED NERDINGER (a cura di) *Frei Otto. Complete Works*, Basel, DE, Birkhäuser Architecture, 2005.
- [AA06] AA.VV., *Jean Prouvé. La poetica dell'oggetto tecnico*, Milano, IT, Skira, 2006.
- [FR06] KENNETH FRAMPTON, AURELIO GALLETI, *Invernizzi. Villa Girasole, the revolving house.*, Mendrisio, Accademia di Architettura di Mendrisio, 2006.
- [FO09] MICHAEL FOX, MILES KEMP, *Interactive Architecture*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 2009, pg.30.
- [SA10] CHRIS SALTER, PETER SELLARS, *Entangled. Technology and the Transformation of Performance*, Cambridge, US-MA, MIT Press, 2010.

## Cap. 0.2. Obiettivi programmatici.

### 0.2.1. La progettazione di architetture con forme cinetiche integrate.

Gli edifici sono stati tradizionalmente concepiti come degli oggetti statici all'interno di un ambiente dinamico.

L'architettura tradizionale non solo ha interpretato l'ambiente in cui si inseriva, ma è risultata efficiente, ha usato le risorse a disposizione, materiali e tecniche, per concepire degli edifici che ben si adattassero al contesto ambientale e culturale. Nell'architettura tradizionale il contesto culturale ha trovato un'espressione efficiente nell'uso delle risorse a disposizione, materiali e tecniche, per concepire degli edifici che ben si adattassero all'ambiente.

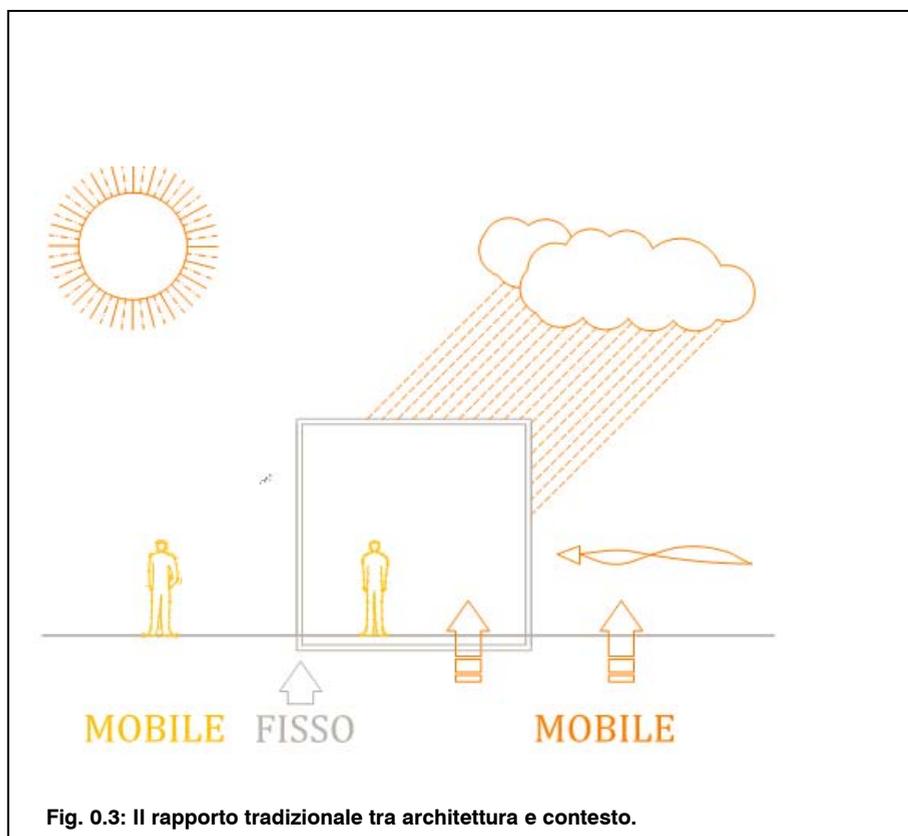
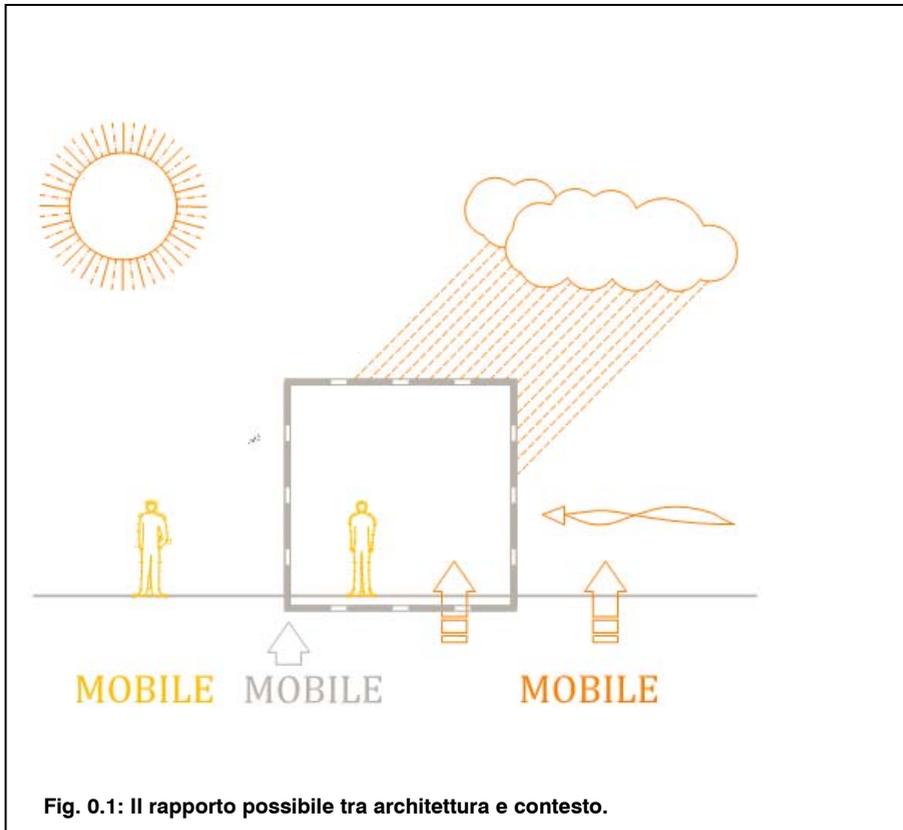


Fig. 0.3: Il rapporto tradizionale tra architettura e contesto.

Ancora oggi, in una complessità di esigenze prima impensabili, si mira ad ottenere il miglior compromesso tra le variabili in gioco, si cerca di realizzare edifici adatti al proprio tempo. Le schermature solari mobili, ad esempio, disegnano le facciate con il loro ritmo e il gioco delle loro forme mentre permettono di controllare l'illuminazione e la radiazione solare: esse assorbono o respingono l'energia solare, riducendo il ricorso a mezzi di riscaldamento e raffrescamento dell'aria, sfruttano la luce solare per diminuire il bisogno di illuminazione artificiale. Ciononostante, tecnologie di questo tipo non sono usate al pieno delle loro potenzialità e fattori come il vento, l'acqua, e il calore trasmesso per conduzione possono essere presi decisamente in maggiore considerazione.

Quando queste considerazioni trovano applicazione non come componenti.



aggiunti e giustapposti al sistema edilizio, ma integrati in esso, si può parlare di architetture intelligenti. Quando queste componenti sono dinamiche, si può parlare di architetture cinetiche. Oggi non conta solo la facilità con la quale i meccanismi possono essere azionati e interagire con i fruitori ma la valenza estetica con la quale si realizzano. Non solo il poter apprestare risposte rapide problemi contingenti o il godere della bellezza del movimento, non una tecnologia da ammirare o sfruttare al momento, ma la tecnologia responsabile oltre il caso specifico. Ciò apre a una lettura civile che amplia il senso ed il valore delle costruzioni cinetiche all'interno del panorama architettonico.

Perché i cinematismi possano entrare appieno nella pratica architettonica, però, è necessario che si superi un nodo interno alla loro progettazione.

Molti prototipi di superfici cinetiche sono stati proposti negli ultimi anni. Si è spinta al limite la possibilità di usare materiali più leggeri e performanti così da mettere in luce il fascino connaturato al movimento stesso. Ma, ricorda Brand, l'architettura non è solo arte. Anzi l'arte da sola è impraticabile in architettura a causa della sua natura sperimentale, della mancanza di utilità pratica e dei fallimenti che la sperimentazione comporta [BR94]. Le architetture cinetiche, come hanno saputo superare le manifestazioni più strettamente meccanicistiche, dovranno dimostrare di poter generare trasformazioni che non siano solo illusioni superficiali.

## Note

[ZU70] WILLIAM ZUK, ROGER H. CLARK, *Kinetic Architecture*, New York, US-NY, Van Nostrand Reinhold, 1970.

[BR94] STEWART BRAND, *How Buildings Learn. What Happens After They're Built*, New York, US-NY, Viking, 1994.

[HO08] CHUCK HOBERMAN, CRAIG SCHWITTER, *Adaptive Structures. Building for Performance and Sustainability*, in *DesignIntelligence*, n.4, 2008.

(<<http://www.di.net/articles/archive/2881/>>)

### **0.2.2. Esplorazione di nuove opportunità.**

La tesi mira a due ordini di obiettivi. Da un lato, si vogliono presentare le ricerche compiute nel campo delle strutture cinetiche, relegate a un ruolo marginale nella storiografia e nel dibattito sull'architettura, ma sempre presenti nelle pratiche più innovative. Dall'altro si vuole contribuire al dibattito in corso sull'architettura adattabile mostrando gli arricchimenti che potrebbero venire dallo studio di una maggior integrazione di sistemi cinetici, e in particolare dall'applicazione di sistemi mobili che lavorano per piani, cioè sistemi a pannelli.

Si ritiene che molte pratiche costruttive un tempo effettivamente oggetto di incertezza sotto molti aspetti e perciò portate avanti da quanti volevano e potevano svilupparle con le dovute cautele affrontare una progettazione e ancor più una realizzazione molto impegnative, siano oggi tecnicamente perseguibili su larga scala e disponibili a costi relativamente contenuti. L'adattabilità perseguita dai pionieri dell'architettura cinetica non è oggi un'idea utopica ma un problema concreto da affrontare. Sistemi meccanici noti da tempo, e la cui affidabilità è stata provata, possono dare interessanti soluzioni a problemi di adattabilità dell'architettura (alle condizioni climatico ambientali e alle esigenze d'uso) più performanti di quelli ottenibili con sistemi fissi.

Molti sistemi mobili a piccola scala usati in architettura sono sistemi a pannelli. Essi ad un tempo permettono di attuare il movimento e costituiscono un oggetto edilizio (porte, divisori, frangisole). A questa peculiarità si è ormai abituati. Non si è abituati, invece, a pensare che dei pannelli rigidi, siano essi in vetro o in materiale opaco, isolanti o meno, di superficie piana o sagomata, possano assumere forme complesse e mutarle in funzione di particolari esigenze. Eppure da tempo antichissimo esistono delle tecniche che ricordano questa possibilità. Esistono gli

origami, e molte ricerche dimostrano che essi sono molto di più di una forma d'intrattenimento, perché, sotto le dovute condizioni, i principi alla base degli origami possono essere traslati nella realizzazione di strutture mobili che lavorino per piani. La tesi vuole tracciare una linea di sviluppo possibile per lo studio di questi sistemi in architettura. Si vuole mostrare che la loro grande ricchezza espressiva è utilizzabile per le esigenze del progetto, che anzi la scelta di soluzioni di questo tipo può essere consigliabile e soprattutto tecnicamente perseguibile. Si propongono perciò dei semplici sistemi a dimostrare quanto assunto.

### **Cap. 0.3. Struttura della tesi.**

Oggetto della ricerca è investigare le possibilità di introdurre strutture mobili nello spazio architettonico. Il discorso si articola in cinque parti secondo la logica di seguito esposta.

#### Parte I. Architetture cinetiche.

Si definisce l'architettura cinetica come una forma tridimensionale, uno spazio, in grado di rispondere a due stati di tensione, quello metaforico prestazionale e quello strutturale, imposto dal movimento. La validità degli esiti dipende dall'attitudine della forma a mantenersi in equilibrio senza snaturarsi, vitale in rapporto all'insieme mutevole delle tensioni e dei bisogni cui è sottoposta nel corso del tempo. Si ricerca nella disanima delle realizzazioni degli ultimi 20 anni quanto è stato possibile il rapporto di questa con la tecnologia, permettendo una panoramica in base a una classificazione iniziale di quanto con le attuali tecnologie è stato fatto

#### Parte II. Strutture movimentabili.

Si espongono i principi cinematici che permettono il controllo del rapporto tra forma e movimento. Le strutture sono suddivise in tre campi: sistemi per punti a tamponamenti morbidi, sistemi per punti a tamponamenti rigidi e sistemi per piani. La suddivisione si rispecchia nelle diverse attitudini applicative che le strutture dimostrano: come le prime, leggere e variamente movimentabili, si confanno particolarmente alla trasportabilità, alla temporaneità, così le ultime, dotate di resistenza lungo tutta la superficie e capacità di chiusura continua, possono rispondere a esigenze di controllo energetico ed essere integrate in involucri edilizi stabili.

### Parte III. Metodi di progetto di strutture per piani.

Si espongono le possibilità di realizzare strutture cinematiche costituite da pannelli rigidi incernierati, assimilabili ad origami. Se ne delineano le caratteristiche cinematiche e morfologiche e, sotto il metro della applicabilità architettonica, si presentano studi provenienti da settori disciplinari eterogenei. In particolare si sottopongono gli origami ad un esame che riguarda la possibilità di realizzare una determinata forma di progetto, la possibilità di realizzare una forma di progetto dotata di cinematiso ed infine le condizioni per realizzare strutture cinematiche estensibili.

### Parte IV. Applicazione a strutture reali: l'involucro attivo.

Si propone un sistema estensibile formato da moduli poligonali. Se ne analizzano le caratteristiche cinematiche e le possibilità di variazione morfologiche, illustrando alcune variazioni e combinazioni possibili. Se ne sviluppano le capacità performative ed espressive. per l'involucro edilizio.

Si introducono altri possibili sistemi che possano interpretare le attuali esigenze di adattabilità in modi consoni alle effettive possibilità di realizzazione pratica e sviluppati a partire delle interpretazioni degli assunti precedenti cercando di valorizzarne la capacità di agire spazialmente.

### Parte V. Conclusioni.

Si traggono le conclusioni del lavoro svolto. Si evidenziano i vantaggi e i punti deboli dei cinematismi; in particolare ciò che ancora è poco noto nel mondo dell'architettura su queste strutture andrebbe con forza ricercato altrove, come è tipico di questa disciplina che tiene traccia concreta dello sviluppo dell'ambiente umano sotto tutti i suoi aspetti. Si sostiene, infine,

che la ricerca della funzionalità e della facilità di realizzazione debbano rafforzare e non svilire il connubio tra arte e scienza alla base dell'architettura .

**PARTE PRIMA.**

**ARCHITETTURE CINETICHE.**



## **Cap. 1.1. Caratteristiche e prestazioni.**

### **1.1.1. Una descrizione in parallelo: architetture trasportabili e trasformabili.**

“L’architettura cinetica viene definita in genere come l’insieme di quegli edifici o/o parti di edificio con mobilità, localizzazione e/o geometria variabili” [FO02]. All’interno di questa definizione, nella letteratura sul tema si è andata affermando una distinzione tra le architetture cinetiche trasportabili e quelle trasformabili.

Le architetture trasportabili sono caratterizzate dalla possibilità di variare la propria localizzazione o mobilità, esse sono progettate per essere spostate [ZA03]. Kronenburg ne propone una suddivisione interna in sub categorie sulla base soprattutto della velocità con la quale possono essere messe in opera [KR95]. Nello specifico l’autore distingue le architetture trasportabili in mobili, itineranti e smontabili. Le architetture mobili si muovono globalmente e non subiscono modifiche strutturali o formali; esse non necessitano di alcun intervento preliminare perché siano utilizzabili nella nuova localizzazione e spesso incorporano il mezzo di trasporto. Le architetture itineranti sono trasportate in parti ma sono suscettibili di essere assemblate in sito in tempi estremamente rapidi, incorporando talvolta il mezzo di trasporto. Ultima categoria sono le architetture smontabili; esse sono trasportate racchiuse in un ingombro compatto, necessitano sempre di un mezzo di trasporto esterno e devono essere assemblate con un certo impiego di tempo, ma pagano questi maggiori limiti con la possibilità di realizzare varie configurazioni formali.

La seconda grande categoria riguarda le architetture trasformabili, ovvero

gli edifici ad assetto variabile. Caratterizzate dalla possibilità di variare la propria geometria o il proprio ingombro, in accordo con Fox possono essere a loro volta distinte in architetture integralmente cinetiche ed in architetture a cinematismo integrato. Le prime occupano dinamicamente un predefinito spazio fisico, e il loro movimento coinvolge l'edificio nella sua interezza; le seconde appartengono a un'area o a un sistema dell'edificio e solo limitatamente ad esso possono generare configurazioni spaziali adattabili [FO09].

Ai fini della presente ricerca è interessante rilevare il diverso rapporto tra movimento e forma che la suddivisione proposta esprime.

Tra forma e cinematismo nelle architetture trasportabili s'instaura un rapporto di alterità univocamente delineato: poiché gli edifici mobili sono soggetti a una continua ridefinizione della loro entità nei luoghi nei quali si pongono, la forma si ricostituisce in ogni nuovo luogo dopo che il movimento si è concluso.

Forma e cinematismo, viceversa, instaurano un rapporto di compresenza nelle architetture trasportabili: poiché il movimento si attua dopo che l'edificio è stato realizzato, quando è in uso, si ha una continua e fluida ridefinizione dei termini che non permette una piena distinzione tra forma e cinematismo, tanto che possono considerarsi un tutt'uno.

In ambedue i casi, tuttavia, la descrizione del rapporto tra forma e movimento passa necessariamente attraverso la variabile temporale. L'idea di una forma relativa, che consideri il tempo quale sua variabile, è stata presentata da D'Arcy W. Thompson. Nel celebre *On Growth and Form*, il matematico e biologo scozzese descrive la forma di un oggetto come "un diagramma di forza, almeno nel senso che da essa noi possiamo giudicare o dedurre quali forze agiscano o abbiano agito su di essa" [TH17]. Pur riferendosi alle leggi che presiedono il processo di formazione e crescita evolutiva di una forma, per la prima volta in quest'opera la generazione e il

mutamento di una forma sono messe in relazione con le forze esterne che agiscono nel tempo. A questo punto è necessaria una precisazione. L'introduzione di nuove tecnologie in architettura ha permesso successivamente di rileggere i testi di Thompson realizzando quelle che Lynn chiama forme animate, configurazioni spesso molto complesse che preservano la storia della loro formazione. Ma animato è un termine diverso da mobile, precisa lo stesso Lynn, "mentre mobile implica movimento e azione, animato implica l'evoluzione di una forma e le forze che la hanno generata; (animato) richiama i termini animalismo animismo, crescita, attuazione" [LY99].

L'architettura cinetica, viceversa, non raggiunge mai la cristallizzazione di un ipotetico processo di sviluppo. Essa sfrutta le tecnologie disponibili per manifestare concretamente il processo di mutazione mentre questo avviene, mai fermato in un (im-) possibile termine del processo evolutivo.

Prescindendo dai risvolti metaforici, si possono ora introdurre le particolari implicazioni che la presenza del movimento introduce nella definizione della forma e della struttura delle architetture cinetiche. La forma non solo non è una forma stratificata, ma è una forma che agisce nello spazio, è tridimensionale, ovvero è uno spazio. Il fatto che essa esista nell'azione, inoltre, implica che la struttura che la sostiene le è connaturata. Nelle architetture cinetiche la struttura difficilmente può essere occultata e mai contraddetta: può solo essere mostrata con autenticità.

Perez Pinero così descrive una sua copertura mobile: "Le barre agiscono come un sistema muscolare che avvolge e sostiene lo scheletro. Un qualsiasi carico esterno, mentre modifica leggermente la forma adattandosi alla migliore posizione di lavoro, spinge determinate barre a lavorare a trazione. Avviene esattamente come quando si carica la schiena di un gatto [...] è semplicemente una struttura viva." [SA79].

Otto, nell'introduzione a *Finding Form*, l'opera nella quale descrive i principi

strutturali della sua architettura, esprime la possibilità di usare i nuovi strumenti di calcolo per arrivare a “una nuova comprensione della natura”, che generi “forme altamente performanti, ovvero forme classiche, che uniscano gli aspetti estetici ed etici. (...) L’architettura di domani sarà di nuovo un’architettura minimale, un’architettura di processi che si auto educano e si auto ottimizzano sotto la guida dell’uomo” [OT95].

Saranno proprio autori come Pinero e Otto fra i primi a mostrare che il cinematismo può essere una chiave di svolta per permettere a strutture correttamente progettate di soddisfare realmente “il bisogno di edifici sicuri e sani, ma più mobili e più adattabili” [OT95].

Nel rapporto tra stabilità e sicurezza da un lato e movimento e adattabilità dall’altro risiede forse la caratteristica più interessante dell’architettura cinetica, e in particolare dell’architettura trasformabile.

L’architettura cinetica può allora essere definita come una forma tridimensionale, uno spazio, in grado di rispondere a due stati di tensione, quello metaforico prestazionale e quello strutturale, imposto dal movimento.

#### Note:

- [OT95] FREI OTTO, BODO RASCH, *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, München, Axel Menges, 1995.
- [SA79] FRANCISCO ALEMÁN SAINZ, *Emilio Pérez Piñero o las formas que vuelan*, in *Revista Murgetana*, n 56, 1979.
- [TH17] D’ARCY W. THOMPSON, *On Growth and Form*, Cambridge, University Press, 1917. (Trad. It. *Crescita e forma*, Torino, Bollati-Boringhieri, 1992)
- [FO09] MICHAEL FOX, MILES KEMP, *Interactive Architecture*, New York, Princeton Architectural Press, 2009.
- [KR95] ROBERT KRONENBURG, *Houses in Motion*, Wiley-Academy, Wiley-Academy, 1995 (2002).
- [FO02] MICHAEL FOX, *Beyond Kinetic*, Spon Press, London, 2002, pg. 27.
- [ZA03] ALESSANDRA ZANELLI, *Trasportabile / Trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Milano, Libreria Clup, 2003
- [ZU70] WILLIAM ZUK, ROGER H. CLARK, *Kinetic Architecture*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1970, pp. 9-11.
- [LY99] GREG LYNN, *Animate Form*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 1999.

### 1.1.2. Un percorso prestazionale: architetture cinetiche, architetture intelligenti.

Si è definita l'architettura cinetica come una forma tridimensionale, uno spazio, mutevole, in grado di rispondere a due stati di tensione, quello metaforico prestazionale e quello strutturale, imposto dal movimento.

Ad essa appartiene quindi un particolare ma delimitato quadro di indagine della critica architettonica. Per verificare l'esistenza di un terreno di ricerca autonomo anche nella pratica architettonica, il passo successivo è esplorare gli obiettivi in funzione dei quali le architetture cinetiche possono acquistare legittimazione operativa, e verificare inoltre se esiste un quadro esigenziale che questo tipo di architetture meglio di altre possano soddisfare. Nel 1970 in *Kinetic Architecture*, la prima opera dedicata esclusivamente a questo tipo di architetture, Zuk e Clark sostennero che "gli edifici che non possono adattarsi ai cambiamenti delle condizioni, in un'ottica di sviluppo, non hanno più possibilità d'esistere" [ZU70],

Già Fuller, però, nelle lezioni che tenne al MIT agli inizi degli anni '50 trattava della "*comprehensive anticipatory design science*", una scienza che fosse in grado di riconoscere in anticipo i problemi dell'umanità e risolverli con la migliore tecnologia a disposizione, così da ottenere "più e più vita con meno e meno risorse" [ED92].

Quando Fuller propose le sue rivoluzionarie realizzazioni, tuttavia, trovò ascolto nell'industria militare molto più che nell'architettura civile. Viceversa, tra gli anni '50-'70 del secolo scorso si è visto un rifiorire dell'interesse verso le abitazioni cinetiche, interpretate come una risposta al rinnovato gusto del nomadismo e del contatto diretto con la natura [AM78]. Se nel periodo tra gli anni '70 e '80 le sperimentazioni rallentarono, dati anche alcuni gravi fallimenti in architetture assai impegnative [ZA03], la ricerca continuò in ambito aerospaziale, dove maggiori erano gli investimenti. Dagli anni '80 molti governi nazionali finanziano diversi studi sulle architetture

d'emergenza per limitare i danni dovuti ai disastri naturali [DSA03]. Nel corso del tempo si è andato sommando un variegato terreno d'indagine. Ed è così ancora oggi. In un'ottica di risparmio delle risorse ambientali [HO08] e di uso ottimizzato degli spazi [FO09] si sta ponendo una rinnovata attenzione alle architetture trasformabili, nello specifico a quelle dotate di cinematismi integrati.

Nel 2006 sono raccolte sotto la categoria delle architetture o delle strutture dinamiche quelle che hanno la capacità di adattarsi alle varie esigenze dei loro fruitori, ai cambiamenti delle condizioni ambientali o ai desideri e agli obiettivi dei progettisti [EDL06].

Già Alexander, però, notava che le esigenze hanno svariate sfaccettature e possono essere anche in contraddizione tra loro [AL77].

Gli edifici rotanti che Randl descrive nella sua opera erano considerati dall'establishment architettonico poco più che giochi, ma allo stesso tempo molti li consideravano ineluttabilmente i progetti del futuro.

Le case trasportabili instaurano un sistema di connessioni con il proprio intorno non realmente mutevole ma superficiale, fine a se stesso e alla singola costruzione cui appartengono. Non inserendosi nel discorso del contesto, il loro stesso movimento diviene in molti casi un ballo: un movimento senza motivazione, ed infine una fuga dal sistema architettonico. In modo simile il pubblico ammirava le innovative forniture mobili esposte alle fiere e alle mostre campionarie degli anni '70, ma pochi volevano comprarle [RA08]. Per questo William Mitchell, preside della MIT School of Architecture, definisce ancora l'opera di Hoberman come uno straordinario dramma scultoreo, una stravaganza che sconcerta, eccita alcuni e lascia senza fiato altri"[SCA01]. Nella definizione c'è la magia solitaria e il limite dell'architettura cinetica.

Patrik Schumacher sostiene allora che la "delimitazione dello spazio attraverso il movimento diviene il piano solipsistico di una graziosa

soggettività. Per definizione, quindi, tale architettura d'evasione deve rimanere eccezionale. La libertà e la soggettività possono essere misurate e pensate solo in opposizione a un'architettura istituzionalizzata [SCH96].

Se molti fra quanti seguiranno questi concetti, Eisenman, Tschumi approderanno infine verso un approccio più tecnologico, l'architettura oggettivamente cinetica trova una valvola di sfogo nelle aree di nuova ricchezza ed espansione, Dubai in primis. Essa è però ancora legata all'idea di un movimento rotatorio dell'intero corpo di fabbrica attorno a un asse centrale, con l'intento di affascinare quanti si possono permettere di ammirare ogni ora uno squarcio di cielo diverso, e, tra qualche anno, un angolo di palazzo diverso. Kronenburg, che pur ricorda spesso nei suoi testi il fascino dell'architettura cinetica, nella sua ultima pubblicazione prende atto del fatto che i progetti non sono realizzati grazie a coloro che hanno i maggiori bisogni, ma da chi ha il potere economico di realizzarli; quale diretta conseguenza, si concretizzano solo quei progetti che appaiono dei buoni investimenti [KR07].

Dunque, se l'architettura è chiamata a mediare tra bisogni temporanei e contraddittori, qualsiasi forma che si compia in una risposta definitiva è per forza di cose destinata a divenire presto obsoleta.

Oggi non è importante perciò evidenziare se in una architettura cinetica il movimento sia stato concepito per rispondere a un'esigenza piuttosto che a un'altra. Dai divisori mobili, ai sistemi di oscuramento fino alle architetture interamente cinetiche appare forse più importante capire a che livello è insita nell'edificio questa capacità di trasformarsi.

L'uomo cerca di rispondere ai bisogni del futuro con i mezzi del presente. Negli stessi anni nei quali Zuk e Calrk ipotizzavano le esigenze attese e sostenevano la necessità di un'architettura che fosse in grado di adattarsi a cambiamenti continui e sempre più rapidi [ZU70] al MIT il gruppo di ricerca The Architecture Machine Group lavorava sui nuovi orizzonti aperti

dall'avanzare dell'elettronica. All'interno del gruppo di ricerca si proponeva per il futuro un edificio che "inizia a conoscere gli abitanti ed è in grado di rispondere all'ambiente" [NE70] e Negroponte, fondatore del gruppo, conìò il termine "*responsive*" per descrivere l'architettura che sarebbe stata realizzabile grazie alle tecnologie informatiche.

Le ambizioni di quei primi studi sono le stesse di oggi [ST05], si parla di edifici performativi [KO05] [AA06], intelligenti [SA10] e persino smart, ma molti edifici presentati come pienamente adattabili sono ancora lontani dall'esprimere concretamente le definizioni teoriche di "intelligenti" [WI02].

I gruppi di ricerca Kinematics Design Group del MIT guidato da Fox [LE07] e Adaptive Building Systems della Delft University of Technology [FO02] hanno individuato i termini di sviluppo dell'architettura cinetica in rapporto alle possibilità tecniche di adattabilità.

Con riferimento alle linee di sviluppo da loro individuate, si possono distinguere:

- cinematismi interni: sono cinematismi insiti nelle caratteristiche costruttive del sistema mobile, come le cerniere degli infissi. L'uomo, o più in generale una opportuna forma di energia, attiva il meccanismo agendo direttamente su di esso. Le tecniche richieste sono esclusivamente meccaniche e sono usate comunemente.

- cinematismi indiretti: sono cinematismi nei quali al meccanismo si raccorda una fonte di energia. Richiedendo energia, per lo più elettrica, sono stati introdotti negli edifici a partire dal 1900 circa.

- cinematismi indiretti dinamici: sono cinematismi nei quali al meccanismo si unisce un sistema di elaborazione dati elettronico e una fonte di energia elettrica. L'attivazione avviene dando un certo impulso elettrico come nel caso precedente, ma la presenza del sistema elettronico fa sì che il meccanismo reagisca in modi diversificati a partire da un solo tipo di input. La tecnologia è stata reintrodotta nella architettura diffusa a partire dal 1980 circa.

- cinematismi interattivi: nascono dall'introduzione di sensori che siano in grado di elaborare impulsi diversificati. Presenti a partire dal 1995 circa, permettono di collegare il meccanismo a input ed output diversificati.
- cinematismi intelligenti: nascono dall'implementazione dei precedenti, dall'uso di sensori di feedback e dalla gestione delle informazioni attraverso algoritmi che permettono al sistema di autoregolarsi.
- sistemi smart: sono sistemi capaci di autoregolarsi e autogestirsi, capaci di collaborare con l'uomo ma anche con sistemi basati sulle stesse tecnologie. Un'intelligenza ambientale" ad oggi inesistente.

Come nota Zellner, "l'architettura sta ridefinendo se stessa, sta divenendo in parte un'investigazione sperimentale sulle geometrie topologiche in parte un'orchestrazione computazionale sulla produzione robotizzata di materiali e in parte una scultura generativa e cinematica dello spazio" [ZE99]. La tecnica imposta dal progettista e i comportamenti dei fruitori emergono dinamicamente attraverso il modo in cui le persone concepiscono e usano lo spazio. Kolarevic esprime la difficoltà di realizzare un'architettura di questo tipo, che sia in grado di esplorare le potenzialità dello spazio di dispiegarsi "in modi non determinati, in contrapposizione con la fissità delle azioni, degli eventi e degli effetti predeterminati" [KO05]

Tra costruzione e scenografia, quello che è chiaramente richiesto all'architettura d'oggi è creare "impalcature stabili per scenari mutevoli" [FA00]

Dunque, qualsiasi tecnologia si possa o si ritenga opportuno usare, la forma dovrebbe mantenersi in equilibrio senza snaturarsi, rimanendo vitale in rapporto all'insieme mutevole delle tensioni e dei bisogni cui è sottoposta nel corso del tempo.

## Note:

- [ZU70] WILLIAM ZUK, ROGER H. CLARK, *Kinetic Architecture*, New York, Van Nostrand Reinhold, 1970, pp.9-11.
- [NE70] Nicholas Negroponte, *The Architecture Machine*, Cambridge, MIT Press, 1970
- [AL77] CHRISTOPHER ALEXANDER, *Pattern Language. Towns, Buildings, Construction*, Center for Environmental Structure Series, Oxford, Oxford University Press, 1977.
- [AM78] ISABELLA AMIRANTE, ROSALBA LA CRETA, *Cupole per abitare*, Napoli, Litografia AGEA, 1978.
- [SCH96] PATRIK SCHUMACHER, "The architectre of Movement", in *Arch+*, n. 134/135, 1996.
- [ZE99] PETER ZELLNER, *Hybrid Space. New Forms in Digital*, London, Thames & Hudson, 1999.
- [FA00] CARMINE C. FALASCA, *Architetture ad assetto variabile*, Alinea, Firenze, 2000.
- [SCA01] JESSIE SCANLON, "Suspended Animation", in *Wired*, n. 9, 2001
- [FO02] MICHAEL FOX, *Beyond Kinetic*, Spon Press, London, 2002, pg. 27.
- [WI02] MICHAEL WIGGINTON, JUDE HARRIS, *Intelligent skins*, in Architectural Press, 2002, pg.20
- [ZA03] ALESSANDRA ZANELLI, *Trasportabile / Trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Milano, Libreria Clup, 2003
- [SH04] KHALED SHERBINI, ROBERT KRAWCZY, *Overview of Intelligent Architecture*, in *Proceedings of the First ASCAAD International Conference, e-Design in Architecture*, King Fahad University of Petroleum & Minerals, Dhahran, 2004, Dhahran, KFUPM, 2004.
- [KO05] BRANKO KOLAREVIC, ALI MALKAWI, *Performative Architecture. Beyond Instrumentality*, London, Routledge, 2005, pg. 205.
- [ST05] TRISTAN D'ESTRÉE STERK, *Building Upon Negroponte: A Hybridized Model of Control for Responsive Architecture*, in *Automation in Construction*, Vol.14, n. 2, 2005, pp 225-232
- [BE06] PHILIP BEESLEY, et al., *Responsive architectures, subtle technologies*, Toronto, Riverside Architectural Press, 2006.
- [LE07] CHARLOTTE LELIEVELD, LIEK VOORBIJ, WIM POELMAN, *Adaptable Architecture*, in YOSHINORI KITSUTAKA (a cura di), *Proceedings of Building Stock Activation, Tokyo, 2007, International Conference of 21st Century*, COE Program of Tokyo Metropolitan University, Tokyo, 2007.
- [KR07] ROBERT KRONENBURG, *Flexible. Architecture that responds to change*, London, Laurence King Publishers, 2007.
- [RA08] CHAD RANDL *Revolving architecture. A history of buildings that rotate, swivel, and pivot*, New York, Princeton Architectural Press, 2008.
- [SA10] CHRIS SALTER, PETER SELLARS, *Entangled. Technology and the Transformation of Performance*, Cambridge, MIT Press, 2010

## **Cap. 1.2. Realizzazioni.**

### **1.2.1. Criteri di classificazione.**

Definite nei precedenti paragrafi caratteristiche e prestazioni dell'architettura cinetica, si ritiene opportuno riportare i casi realizzati.

Come già ricordato, la ricerca tratta delle opere poste dagli anni 90 ai giorni nostri, perché esse appartengono ad uno stesso contesto culturale e tecnologico, un contesto ancora attuale.

Queste opere sono sviluppate da progettisti di provenienza diversificata, possono sfruttare dispositivi meccanici ormai noti e confrontarsi con l'avanzare delle tecnologie elettroniche.

Nell'articolare i criteri di esposizione delle realizzazioni proposte, si tralascia la pur interessante distinzione sull'obiettivo perseguito, adattabilità stagionale, quotidiana, facilità d'uso e così via. Meriterebbe un discorso a sé, infatti, trattare delle intenzioni riposte in ogni singola opera dai progettisti, su quelle effettivamente realizzati e su quelle percepite dai fruitori.

Dati gli obiettivi pratici del presente testo, si preferisce iniziare considerando il modo attraverso il quale si attua il moto. I movimenti della struttura, sia la traslazione che la rotazione, possono avvenire rispetto a un punto come è nelle strutture ad aste o cavi, o rispetto a un piano, come avviene nelle strutture a pannelli. Ciò ha notevoli conseguenze sulla generazione della forma architettonica.

La forma può segnare i punti notevoli attraverso i quali si snoda il

movimento, e distaccarsene in parte nel resto della superficie; può segnare i punti notevoli ed anche le direzioni del movimento, aderendo quindi maggiormente alla struttura; può infine coincidere con la struttura stessa. Si individuano strutture per punti a tamponamenti morbidi, strutture per punti a tamponamenti rigidi, strutture per piani. La ripartizione, già presente in [K004], risponde all'obiettivo della presente ricerca di evidenziare le possibilità di realizzazione dell'architettura cinetica trasformabile, nei suoi aspetti morfologici e strutturali.

Le strutture per punti a tamponamenti morbidi sono costituite da aste, eventuali cavi, e materiali morbidi di chiusura. Il ruolo strutturale è affidato unicamente a aste e eventuali cavi. I tamponamenti svolgono il compito di rivestire l'area offrendo una chiusura spesso discontinua, leggera, solo limitatamente capace di ottenere performance ambientali. Il tamponamento è fissato alla struttura in alcuni punti notevoli, scelti in modo tale da non ostruire il movimento, e se ne distacca per il resto della superficie, la quale può assumere dunque una forma in parte svincolata e libera rispetto al meccanismo.

Le strutture per punti a tamponamenti rigidi permettono un controllo del movimento più preciso nonché la chiusura completa dell'area in oggetto. Quando gli ingombri della struttura in fase di movimento lo permettono, il tamponamento è fissato alla struttura lungo le aste. Quando ciò non è possibile, si rende spesso necessario frazionare il tamponamento in un maggior numero di elementi, così che per peso e dimensioni possano essere fissati per punti. La progettazione e la fabbricazione possono essere quindi piuttosto complesse, ma sono ripagate dalle performance energetiche che questi sistemi possono raggiungere, e che sono invece precluse alle strutture con tamponamenti morbidi.

Le strutture per piani, infine, sono costituite da pannelli. Esse condividono i vantaggi offerti dalle strutture a tamponamenti rigidi ma qui si ha una vera e

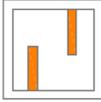
propria unione di forma e struttura. Il sistema architettonico interessato, sia esso facciata, copertura o altro, si può aprire e chiudere in modo più netto e evidente rispetto a quando molti elementi sussidiari e strati funzionali in materiali diversi, rimangono fissi.

Parlando di strutture, non si può prescindere dalla scala dell'intervento: come ricorda Galileo [GA38], ciò che è in una corretta proporzione ad una determinata scala, ad esempio una semplice bucatina, non è detto lo sia altrettanto a scala maggiore, nel caso in oggetto una facciata intera.

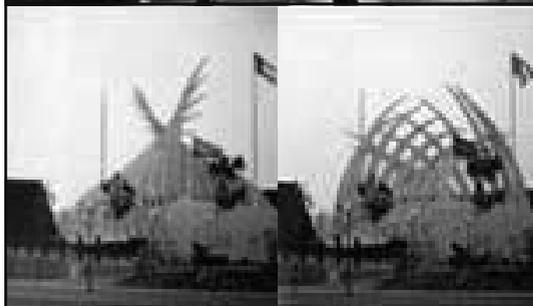
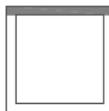
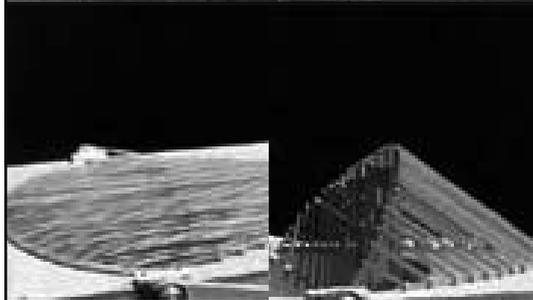
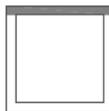
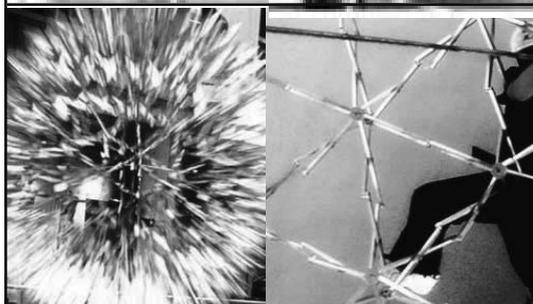
Infine, come già introdotto nella differenziazione tra strutture per piani e per punti, i meccanismi hanno caratteristiche tali per cui alcuni occupano semplicemente uno spazio, separandolo dall'intorno, così è per le installazioni o per i divisori interni, altri possono dividere due ambienti di forma generica, come alcune soluzioni per facciata doppia pelle, per le quali si può parlare di meccanismi che avvolgono la forma; altri ancora avvolgono un ambiente proteggendolo, ovvero creando una separazione senza soluzione di continuità rispetto al resto, come le coperture, le facciate, i solai. Alcuni, infine, sono caratterizzati dalla capacità non solo di proteggere e coprire, ma anche di sostenere carichi di notevole entità, ed anzi risultano progettati a questo scopo, come le strutture utilizzate nelle architetture interamente mobili. La figura della pagina a fianco riassume i criteri di classificazione sopra esposti ed è usata come legenda nella tavola sinottica di seguito riportata.

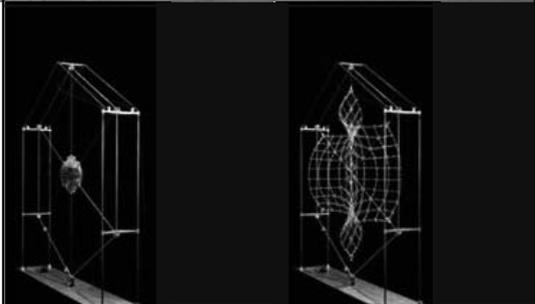
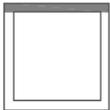
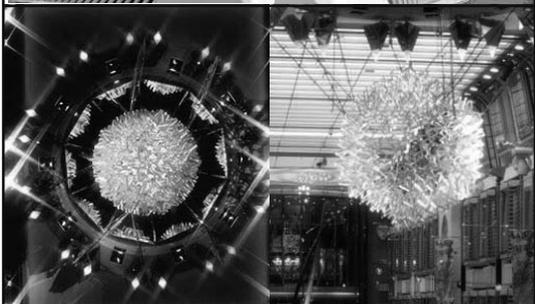
#### Note:

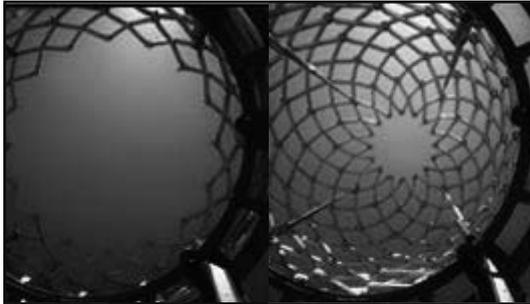
[GA38] GALILEO GALILEI, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze*, 1638.

<p>SEPARARE: installazioni, divisori.</p>	
<p>AVVOLGERE: facciata doppia pelle.</p>	
<p>PROTEGGERE: facciate, coperture, solai.</p>	
<p>SOSTENERE: architetture - strutture, architetture interamente mobili.</p>	
<p><b>Fig. 1.1:        Legenda impiegata nella tavola sinottica.</b></p>	

1.2.2. L'architettura cinetica dal 1990 al 2010, tavola sinottica.

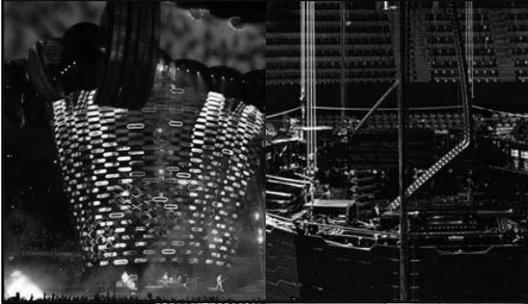
	<p>Museo de las Ciencias Príncipe Felipe, Santiago Calatrava, Valencia, E, 1991.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Kuwait Pavilion, Expo' 92. Santiago Calatrava, Seville, E, 1992</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Lotja de Sant Jordi, Santiago Calatrava, Alcoy, E, 1992 -95.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Hoberman Sphere, Liberty Science Center, Hoberman Associates, Jersey City, NJ, 1992.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: edificio.</i></p> 

	<p>Piazza Schouwburgplein, West 8, Rotterdam, NL, 1992-97.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Expanding Hypar, installazione, California Science Center, Hoberman Associates, Los Angeles, CA, 1998</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Kantonele Notrufzentrale, Centro per i servizi di emergenza, Santiago Calatrava, St. Gallen, CH, 1988-98</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Expanding Icosahedra series, The Explorer of the Seas, Hoberman Associ- ates, Royal Caribbean cruise line, 2002, 2003.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Riiso Pfalz Keller Center, Santiago Calatrava, Saint Gallen, CH, 1998-1999.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: edificio.</i></p> 



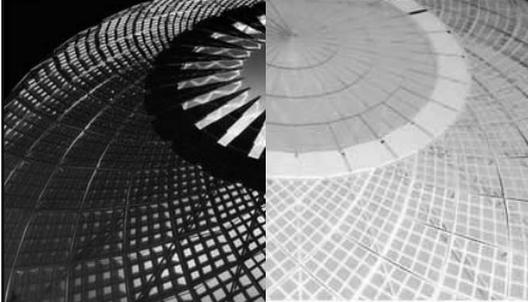
Iris Dome, German Pavilion, Expo 2000, Hoberman Associates, Hannover, DE, 2000.

*Struttura per punti,  
nessun tamponamento.  
Scala: edificio.*



Expanding Video Screen, U2 360<sup>o</sup> tour, Hoberman Associates, Innovative Designs, Barco, -, 2009.

*Struttura per punti,  
nessun tamponamento.  
Scala: componenti.*



Iris Technology, Abu Dhabi's international airport, Kohn Pedersen Fox Associates, ABI, Abu Dhabi, UAE, 2006

*Struttura per punti,  
nessun tamponamento.  
Scala: edificio.*



Wind Foot Bridge, Michael Jantzen, concept, Gorman, US-CA, 2007.

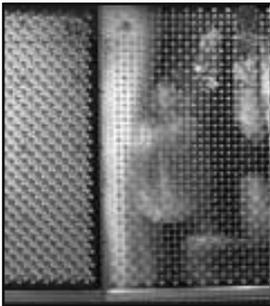
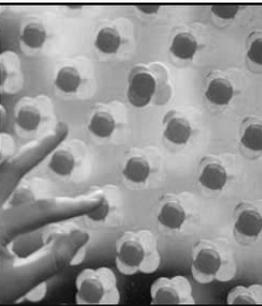
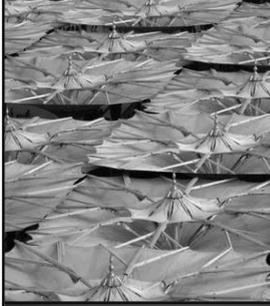
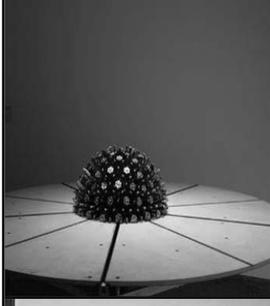
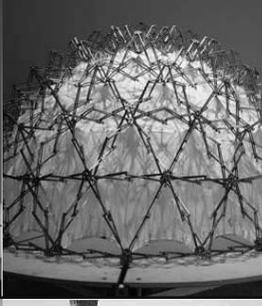
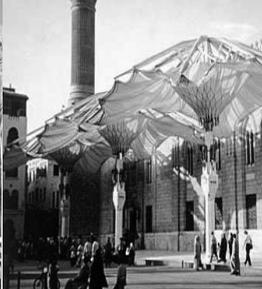
*Struttura per punti,  
nessun tamponamento.  
Scala: componenti.*



Expanding Helicoid, Center of Discovery World, Hoberman Associates, Milwaukee, US-WI, 2006.

*Struttura per punti,  
nessun tamponamento.  
Scala: componenti.*



		<p>Adaptive Fritting, dynamic installation for Harvard Graduate School of Design, ABI, Cambridge, UK, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, nessun tamponamento. Scala: componenti.</i></p> 
		<p>17x18m Umbrella for the Court of the Prophet's Holy Mosque, BODO RASCH, BURO HAPPOLD, Madinah, KSA, 1992.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
		<p>25x25m Umbrellas for the Piazza of the Prophet's Holy Mosque, SI-Rasch, Madinah, KSA, 1987-1992.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
		<p>Expanding Fabric Dome, Centre Georges Pompidou, Hoberman Associates, Paris, FR, 1997.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: componenti.</i></p> 
		<p>23x23m Umbrellas for Sayyidna Al-Hussayn Mosque, SI-Rasch, Cairo, Egypt, 2000.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 



Water Villa, Herman Hertzberger,  
Middelburg, NL, 1998-2002.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.*  
Scala: edificio.



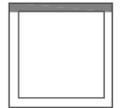
Rod Laver Arena, National Tennis  
Centre at Flinders Park, Cox Architects,  
Peddle Thorp Learmonth, Melbourne,  
AUS, 1988-2000.

*Struttura per punti,  
tamponamenti morbidi.*  
Scala: grandi opere.



Stadium Safeco Field, NBBJ, Seattle,  
Washington, 1999.

*Struttura per punti,  
tamponamenti morbidi.*  
Scala: grandi opere.



Venezuela Pavillion, Expo Hannove,  
Fruto Vivas, SI-Rasch, Hannover, DE,  
2000.

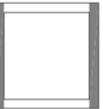
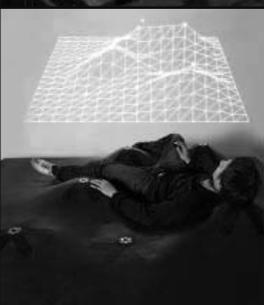
*Struttura per punti,  
tamponamenti morbidi.*  
Scala: grandi opere.

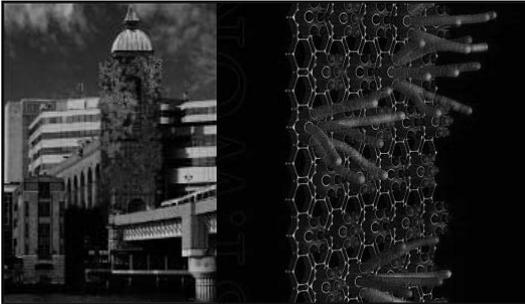


Docklands Stadium, rinnovo Etihad  
Stadium, Daryl Jackson Architects, Hok  
Sport Architecture, Melbourne, AUS,  
2000.

*Struttura per punti,  
tamponamenti morbidi.*  
Scala: grandi opere.



		<p>Toyota Stadium, Kisho Kurokawa Architect &amp; Associates, Toyota City, JP, 2001.</p>	<p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p>	
		<p>Trans-ports network, Biennale di Venezia ed. 2000, Kas Oosterhuis, Venezia, IT, 2001.</p>	<p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p>	
		<p>Super Cilia Skin, Interactive Membrane prototype, Hayes Raffle - MIT Media Lab, Mitchell W. Joachim, James Tichenor, Cambridge, US-MA, 2002.</p>	<p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> <i>Scala: componenti.</i></p>	
		<p>Reliant Stadium, Populous, Walter P Moore Engineers and Consultants, Houston, US-TX, 2002.</p>	<p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p>	
		<p>Dynamic Terrain, flexible morphing surface, Janis Pönisch Inventions, Amsterdam, NL, 2005.</p>	<p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> <i>Scala: componenti.</i></p>	



Daist World, ecosistema artificiale,  
 Cannon Street Station Tower,  
 installazione, AAA.Nicolai, London, UK,  
 2008.

*Struttura per punti,  
 tamponamenti morbidi.  
 Scala: componenti.*



Commerzbank-Arena, FIFA World Cup  
 Stadium, Gerkan, Marg & Partner, Max  
 Bögl, Frankfurt, DE, 2005.

*Struttura per punti,  
 tamponamenti morbidi.  
 Scala: grandi opere.*



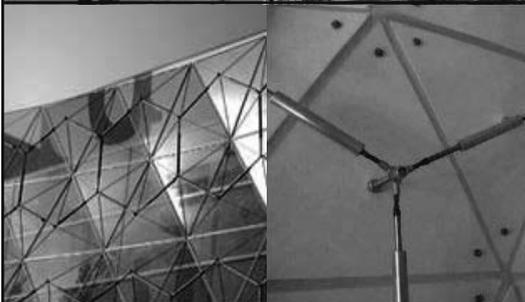
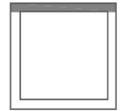
Dune 4.2, interactive landscape River  
 Maas, Studio Roosegaarde, Rotterdam,  
 NL, 2006.

*Struttura per punti,  
 tamponamenti morbidi.  
 Scala: componenti.*



University of Phoenix Stadium, Peter  
 Eisenman, Populous, Glendale, US-  
 AZ, 2006.

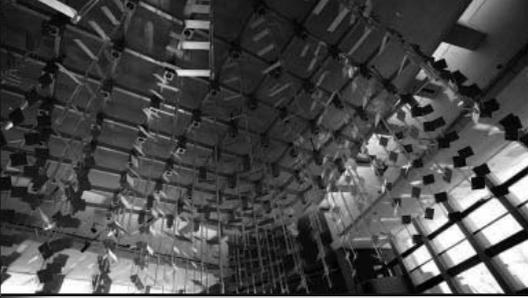
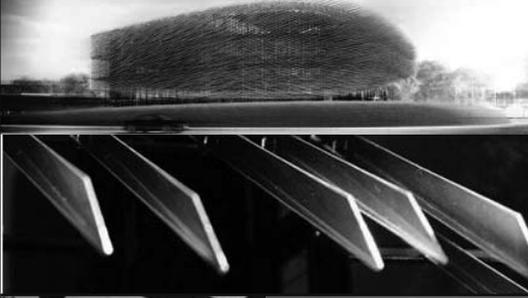
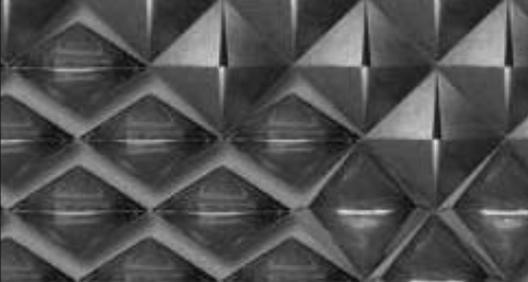
*Struttura per punti,  
 tamponamenti morbidi.  
 Scala: grandi opere.*

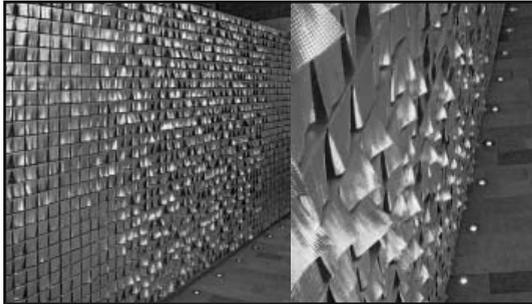
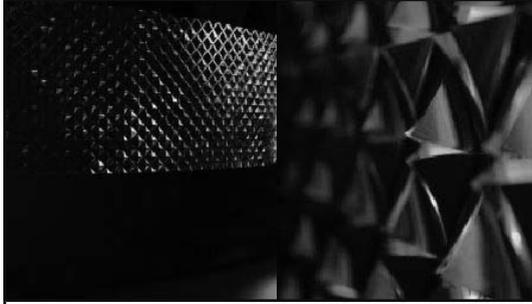
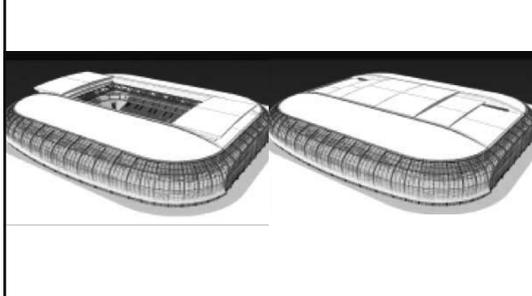


Robotic Membrane, prototipo,  
 Orangevoid Advanced Surfaces  
 Arrchitectures, London, UK, 2006.

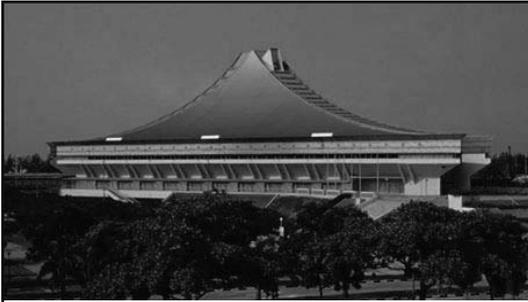
*Struttura per punti,  
 tamponamenti morbidi.  
 Scala: edificio.*



	<p>Rapidly Deployable Shelters (RDS), Johnson Outdoors, Hoberman Associates, varie, 2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> Scala: edificio.</p> 
	<p>Cloud kinetic sculpture, Ontario Science Centre, David Rokeby, Toronto, CDN, 2007.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> Scala: componenti.</p> 
	<p>163 PRS / Olivers Place, Moxon architects, London, UK, 2008.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> Scala: componenti.</p> 
	<p>Thermal Responsive Kinetic Facade, SOM, Sci-Arc, concept, Los Angeles, US-CA, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> Scala: edificio.</p> 
	<p>Sonomorph, Natasa Slijivancanin, Cornell University, Ithaca, US-NY, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> Scala: componenti.</p> 

	<p>Chain of Ether, ResMed Corporation, Ned Kahn, San Diego, US-CA, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Cowboys Stadium, Architect HKS Inc., Walter P Moore Engineers and Consultants, Arlington, US-TX, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Rinnovo Centre Court, Wimbledon, Aeltec, London, UK, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Lotus 7.0, installazione, Studio Roosegaarde, Le Cube, Paris, FR, 2010.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Grand Stade Lille Métropole, Pierre Ferret, Villeneuve d'Ascq, FR, 2009-2012.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 

	<p>Miami Ballpark, Populous, Bliss and Nyitray, Inc., Walter P Moore, Miami, US-FL, 2009-2012.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Türk Telekom Arena, asp architekten Stuttgartar, Istanbul, Turkey, 2011</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Stadio World Memorial Hall, Mitsumne, Mamoru Kawaguchi, Kobe, JP, 1984.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>World Memorial Hall, Mamoru Kawaguchi, Kobe, JP, 1984.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Domespace, Patrick Marsilli, Bretagne, e altri, FR, e altri, 1988 (1' realizzazione).</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 



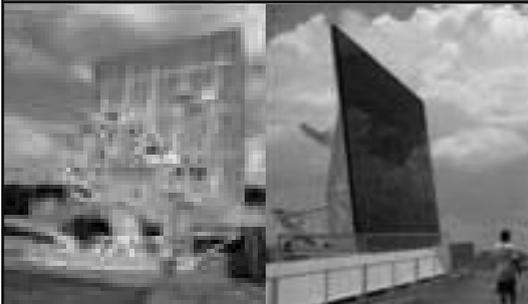
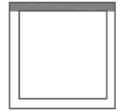
National Indoor Stadium, Kenzo Tange, Mamoru Kawaguchi, Singapore, SGP, 1989.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



Sant Jordi Sports Palace, Arata Isozaki, Mamoru Kawaguchi, Barcelona, E, 1990.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



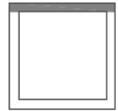
Space Mirror Memorial, John F. Kennedy Space Center Visitor Complex, Alan C. Helman, Holt, Hinshaw & Pfau, Merritt Island, US-FL, 1991.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



Sliding domes dor the Prophet's Holy Mosque, SL-Rasch GMBH, Madinah, KSA, 1990-92.

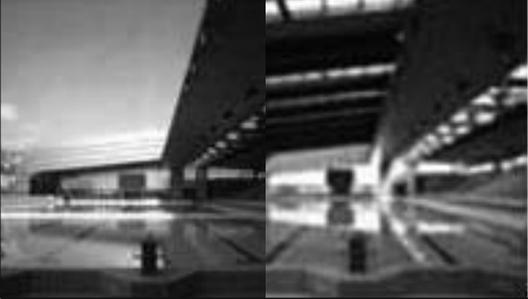
*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*

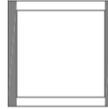
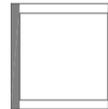


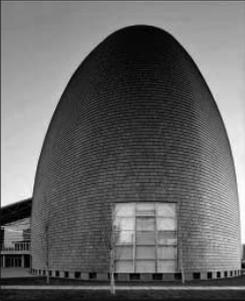
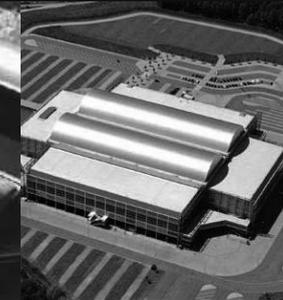
Torre de Collserola, torre delle telecomunicazioni, Foster Associates, MC-2 Julio Martinez Calzon, Valencia, E, 1992.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



	<p>Ocean Dome, Mitsubishi Heavy Industries Ltd., Miyazaki City, JP, 1993.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti morbidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Rotatable solar house Heliotrop, Rolf Disch SolarArchitektur, Freiburg, DE, 1994.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Centro sportivo della Sciorba, Studio Zoppini Associati, Genova, IT, 1994.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Amsterdam Arena, Rob Schuurman, Sjoerd Soeters, Amsterdam, NL, 1996.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Sundome Fukui event hall, Architectual Design Management Association, Shigeyuki Okazaki, Mamoru Kawaguchi, Fukui, JP, 1995.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p> 

 	<p>Ariake Coliseum, Kenchiku Mode Kenkyujyo, Tokyo, JP, 1995.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Namihaya Dome Sports Center, Mamoru Kawaguchi, Osaka, JP, 1996.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Namihaya Dome Sports Center, Mamoru Kawaguchi, Osaka, JP, 1996.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
 	<p>L'Hemisfèric (Planetarium), Santiago Calatrava, Valencia, E, 1998.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>L'Hemisfèric (Planetarium), Santiago Calatrava, Valencia, E, 1998.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 

		<p>Nara Convention Hall, multi-purpose hall, Arata Isozaki &amp; Associates, Kawaguchi &amp; Engineers, Nara, JP, 1998.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
		<p>Stadion Gelredome, Alynia Architecten, Arnhem, NL, 1998.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
		<p>L'Hemisfèric (Planetarium), Santiago Calatrava, Valencia, E, 1998.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
		<p>Millennium Stadium, Populous, WS Atkins, Cardiff, GB, 1999.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Aegis Hyposurface, dECOi, Billings Design Associates, Biennale di Venezia ed. 2000, Venezia, IT, 1999.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 	



Minute Maid Park , HOK Sports Facilities Group, Houston, US-TX, 2000.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



Slauerhoffbrug bridge, Van Driel Mechatronica, Leeuwarden, NL, 2000.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



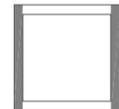
Nisseki Mitsubishi Kudamatsu Coal Storage Dome, Takenaka Corporation, Mitsui Construction, Takenaka Civil Engineering & Construction Co. Ltd., Kudamatsu City, JP, 2001.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



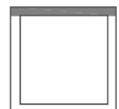
Wind Veil - Gateway Village, Ned Kahn, Charlotte, US-NC, 2000.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



Veltins-Arena (Arena AufSchalke), Hentrich, Petschnigg und Partner, Gelsenkirchen, DE, 2001.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*





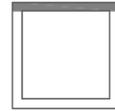
Gemini Haus, styrian country exhibition,  
Roland Mösl, Weiz, AT, 2001.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



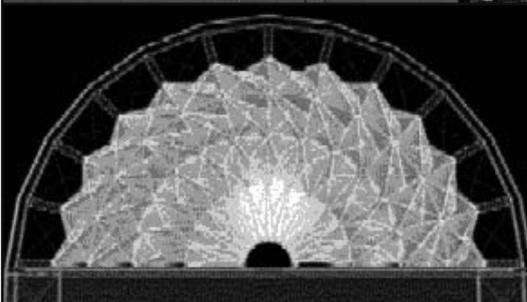
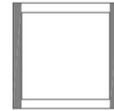
Milwaukee Art Museum addition, the  
Quadracci Pavilion, Santiago Calatrava,  
Graef, Milwaukee, US-WI, 2001.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



Technorama Facade - Technorama, Ned  
Kahn, Winterthur, CH, 2002.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



Hoberman Arch, Olympic Medals Plaza.  
Hoberman Associates, Buro Happold,  
Salt Lake City, US-UT, 2002.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



Coventry Wall of Light, Baynes & Co,  
Graeme Crowley & Paul Hudson, Cov-  
entry, UK, 2002.

“

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*





Restauro e riuso a suite dell'Harbour Crane, SMST / Franeker, Harlingen, NL, 2003

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



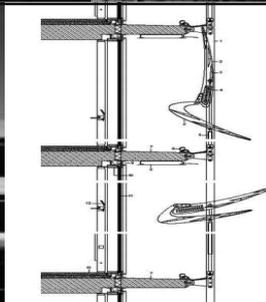
Wind Portal - San Francisco International Airport BART Station, Ned Kahn, San Francisco, US-CA, 2003.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



Articulated Cloud - Pittsburgh Children's Museum, Ned Kahn, Pittsburgh, US-PA, 2004.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



Extension to the head office of SOKA-BAU, Herzog + Partner, Wiesbaden, DE, 2004.

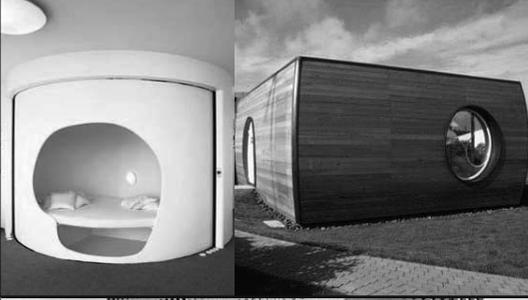
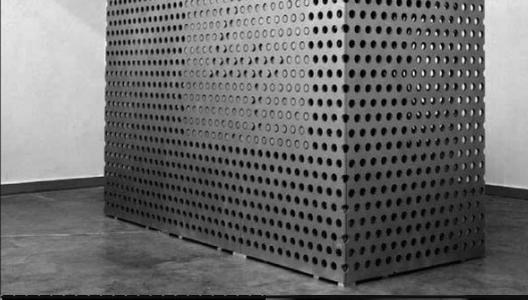
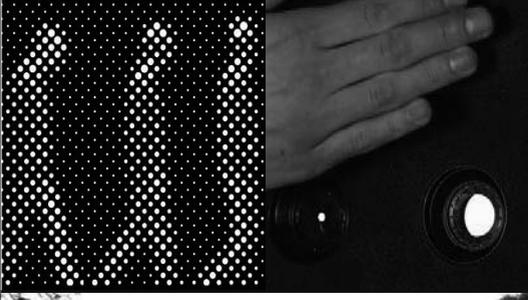
*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



Suite Vollard, Bruno de Franco - Moro Construções Civis LTDA, Curitiba, BR, 2004.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



	<p>Esprit Arena, LTU Arena, JSK Architekten, Düsseldorf, DE, 2002-2004.</p> <p>“</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i></p> <p><i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>18mq Rotor house, Luigi Colani, Hanse Haus, - , 2004.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: edificio.</i></p> 
	<p>4D-Pixel, installazione, Studio Roosegaarde, Rotterdam, NL, 2004-2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Aperture, mini iris surface, prototipo, Frédéric Eyl, Gunnar Green, Berlino, DE, 2004-2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Everingham Rotating House, Al and Janet Johnstone, Wingham NSW e altre, AUS, 2006 -&gt; .</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i></p> <p><i>Scala: edificio.</i></p> 



Hotel Marmara Antalya, YEG Mimarlik, Sadi Kan, Antalya, TR, 2005.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



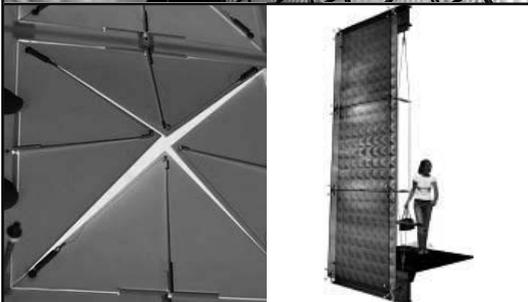
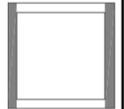
Turnable roofs, Hans-Herbert Röh, Sündreyer GmbH, 2005. Treia, DE.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



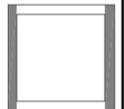
Fragmented Dunes - Mesa Art Center, Ned Kahn, Mesa, US-AZ. 2005.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



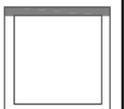
PixelSkin02, prototipo, Orangevoid Advanced Surfaces Arrchitectures, London, UK, 2006.

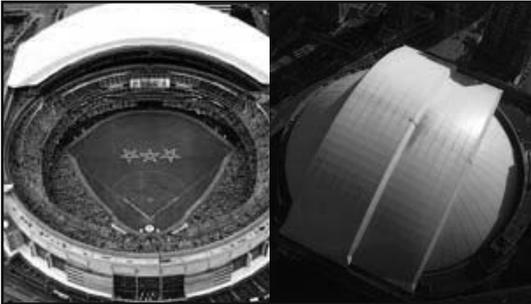
*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*

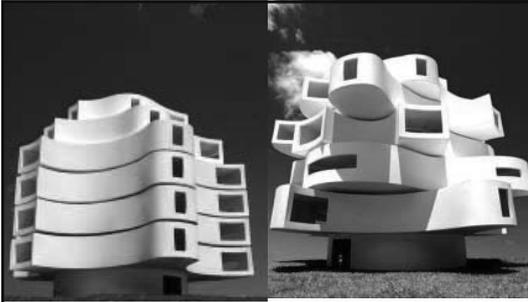


Rinnovo Chase Field, (Bank One Ballpark), Ellerbe Becket, Bill Johnson, Phoenix, US-AZ, 2005.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



	<p>Rogers Centre, SkyDome, Rod Robbie, Toronto, , CA, 1989–2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Fragmented Sea - Mesa Art Center, Ned Kahn, Mesa, US-AZ. 2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Wind Silos - International Trade Center, Ned Kahn, Charlotte, US-NC, 2006.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>EWE Arena, asp architekten, Oldenburg, DE, 2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>EWE Arena, asp architekten, Oldenburg, DE, 2005.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 



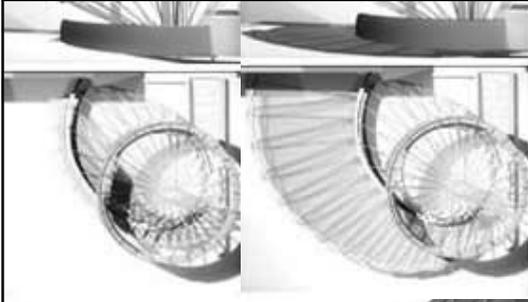
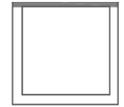
Wind Shaped Pavilion, Koen Olthuis - Waterstudio.NL, Dutch Docklands, concept, 2006.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



Wembley Stadium, Foster + Partners, Populous, HOK S+V+E, London, UK, 1996-2007.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



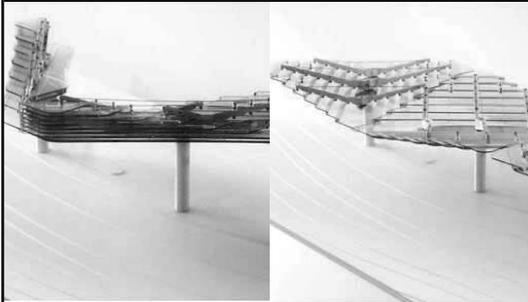
Transformable Canopy, concept, SHoP, Hoberman Associates, New York City, NY, 2007,

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



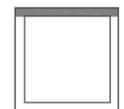
“Grand Union Canal Pedestrian Bridge, Heatherwick studio, SKM Anthony Hunts, London, UK, 2005.  
“

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*

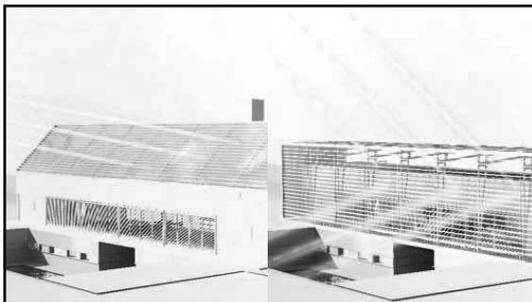


Linear Structure , Adaptive Shading Esplanade. Building Centre Trust, ABI, London, UK, 2006.  
“

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



	<p>Linear Structure , Adaptive Shading Esplanade. Building Centre Trust, ABI, London, UK, 2006.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: componenti.</i></p> 
	<p>casa rotante e sollevabile sul lago Cees Tadema, Friesland Leeuwarden, Noordwolde, NL, 2007.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Rotating Tower, David Fisher, Dubai, UAE, 2007-.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Twist Library, concept, Dror Benshetrit, -, 2007.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Colt Girasol, self sun-tracking device, Colt International Ltd, Havant, UK, 2007.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi.</i> <i>Scala: componenti.</i></p> 



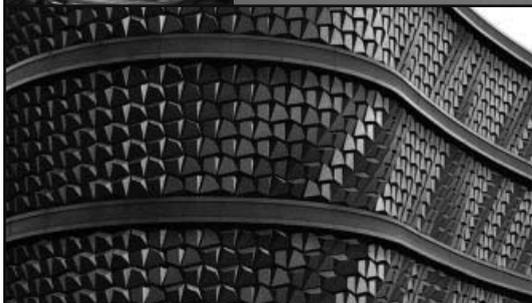
Eco House, in progress, Dror Benshetrit, New York, NY, 2007.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*



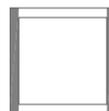
Appartamenti 55° Time, Glenn Howells Architects, Dubai, UAE, 2007-.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*



The FLARE system, prototipo, WHITEvoid interactive art & design, Staab Architects, Berlin, DE, 2008.

*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: componenti.*



55° Dubai – Time Residences, Glenn Howell, Dubai, UAE, 2008-.

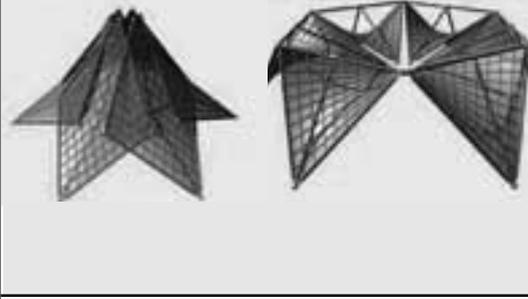
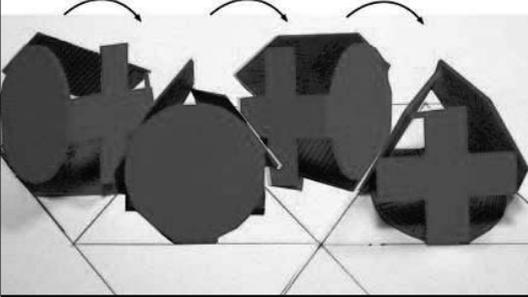
*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: grandi opere.*

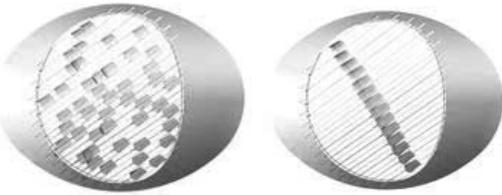
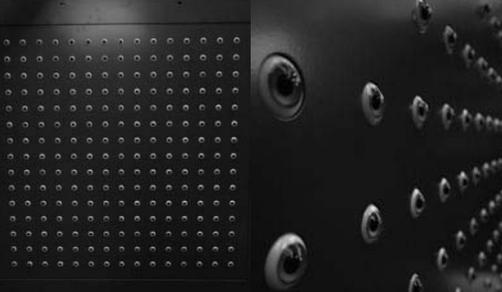
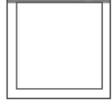


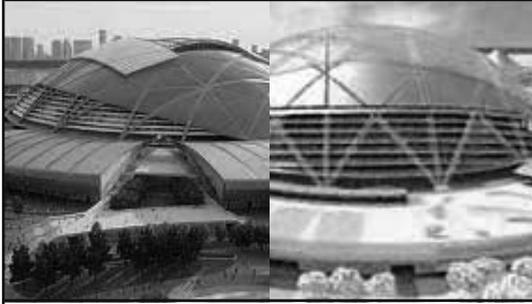
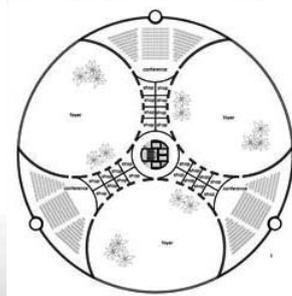
Hasselt Traffic Circle, John Körmeling, Tilburg, NL, 2008.

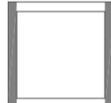
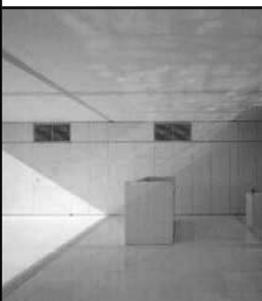
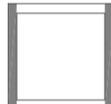
*Struttura per punti,  
tamponamenti rigidi.  
Scala: edificio.*

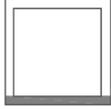
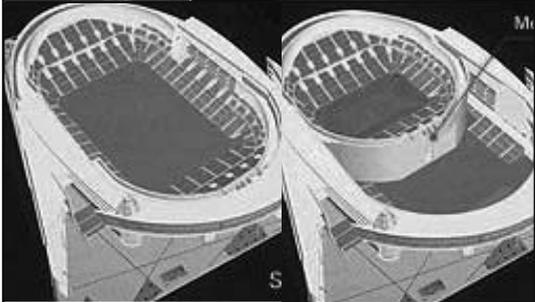
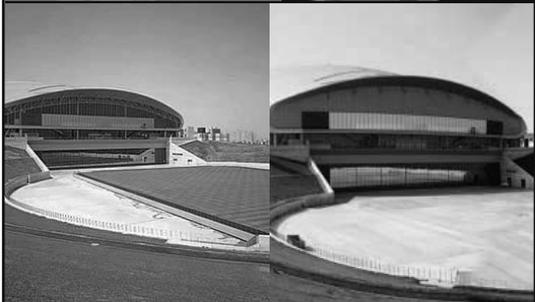


	<p>Vertical Canal - Rijkswaterstaat, Ned Kahn, Utrecht, NL, 2008.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Lucas Oil Stadium, HKS, Inc., Indianapolis, US-IN, 2008.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Everingham Rotating House, Al and Janet Johnstone, Wingham NSW e altre, AUS, 2006 -&gt;.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Folded Bamboo Houses, San Francisco's Urban Re:Vision, Ming Tang, concept, US-CA, 2008.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Prada Transformer pavilion, OMA-AMO, Seoul, ROK, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 

	<p>Chongqing Pavillion Shelter, Kohn Pederson Fox Architects, Hoberman Associates, Chongqing, CN, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Wall of Eyes, Kinetica Art Fair 2009, installazione, Adrian Baynes, London, UK, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Astana Arena, Tabanlıoglu Architects, Buro Happold, Astana, KZ, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Interactive Space Time Transformation Footbridge, Michael Jantzen, concept,concept, Gorman, US-CA, 2009.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>High Court of Justice and Supreme Court, ABI, Madrid, E, 2006-11</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: edificio.</i></p> 

	<p>Abu Dhabi's historic Central Market, Foster + Partners, ABI, Abu Dhabi, UAE, 2011.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Swedbank Arena, Berg Arkitektkontor AB, Arkitekterna Krook &amp; Tjäder, Arkitektfirmaet C. F. Møller, HOK Sport, Solna, S, 2006-2012.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Stockholmsarenan, White Arkitekter, Stockholm, SE, 2010-2012.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Singapore Sports Hub, DP Architects, Arup Sport, Kallang, SGP, 2010 -2014.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 
 	<p>Floating and rotating hotel tower, Koen Olthuis - Waterstudio.NL, Dutch Docklands, Dubai, UAE, -.</p> <p><i>Struttura per punti, tamponamenti rigidi. Scala: grandi opere.</i></p> 

		<p>Void/Space Hinged Space Housing, Steven Holl Architects, Fukuoka, JP, 1991</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: edificio.</i></p> 
		<p>Restauero British Council, Jestico and Whiles, Madrid, E, 1993.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
		<p>Fukuoka Yahoo! Japan Dome, Takenaka Corporation, Maeda Corporation, Fukuoka City, JP, 1993.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
		<p>Square Grid House, Shigeru Ban, Kanagawa, JP, 1997.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
		<p>The Gluckhupf, Hans Peter Wornl, Beim Gluckhupfberg, Mondsee, A, 1993.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: edificio.</i></p> 

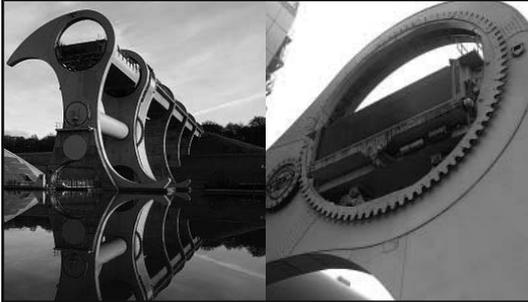
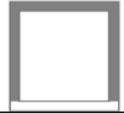
	<p>Maison a Bordeaux, Rem Koolhaas, Bordeaux, FR, 1998</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Saitama Super Arena, arena polifunzionale, Ellerbe Becket, Nikken Sekkei/MAS 2000 Design Team, Flack+Kurtz Consulting Engineers, Saitama, JP, 2000.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: componenti.</i></p> 
	<p>Sapporo Dome, Hiroshi Hara, Sapporo, JP, 2001.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Gateshead Millennium Bridge, Wilkinson Eyre Architects, Gifford, UK, 2001.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: grandi opere.</i></p> 
	<p>Miller Park (Milwaukee), HKS, Inc., NBBJ, Eppstein Uhen Architects, Milwaukee, US-WI, 2001.</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: grandi opere.</i></p> 



Suitcase House Hotel, Great Wall, Gary Chang - Edge Design Institute Ltd. Beijing, CN, 2002.

*Struttura a pannelli.*

*Scala: edificio.*



Elevatore per imbarcazioni ruotante Falkirk Wheel, Tony Gee and Partners, Bennett Associates, arch. RMJM Scotland Ltd., Falkirk, UK, 2002.

*Struttura a pannelli.*

*Scala: grandi opere.*



M-House, Michael Jantzen, Gorman, US-CA, 2003.

*Struttura a pannelli.*

*Scala: edificio.*



"M-velopes, Contemplation Transformation Spaces, Michael Jantzen, Gorman, US-CA, 2003.

*Struttura a pannelli.*

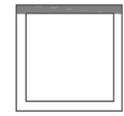
*Scala: edificio.*



Starlight Theatre, Rock Valley College, Studio Gang Architects, Rockford, US-IL, 2003.

*Struttura a pannelli.*

*Scala: grandi opere.*





Quick House / Illy Cafe, Adam Kalkin,  
52° Biennale di Venezia, Venezia, IT;  
2007.

*Struttura a pannelli.*

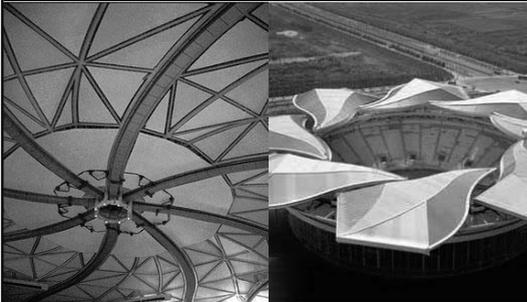
*Scala: edificio.*



FLATTS - FLAT Transportable  
Structures, Deployable Structures  
International, vari, 2005.

*Struttura a pannelli.*

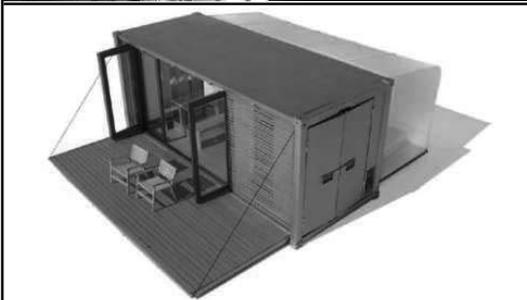
*Scala: edificio.*



Magnolia Stadium Qi Zhong, Mitsuru  
Senda, Shanghai, CN, 2005.

*Struttura a pannelli.*

*Scala: grandi opere.*



All Terrain Cabin, ATC, Bark Studio  
Architecture, Queensland, AUS, 2006.

*Struttura a pannelli.*

*Scala: edificio.*



Showroom Kiefer technic, Ernst  
Giselbrecht + partner, Fertigstellung,  
DE, 2007.

*Struttura a pannelli.*

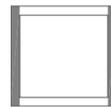
*Scala: componenti.*





Turning The Place Over, installazione, Richard Wilson, Liverpool, UK, 2008.

*Struttura a pannelli.*



*Scala: componenti.*

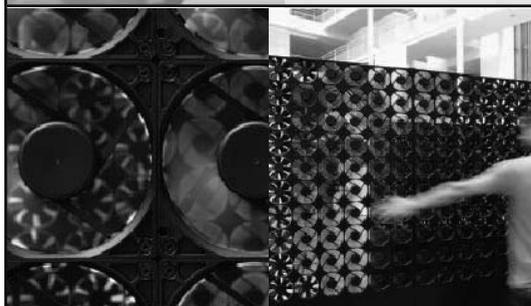


Bloomframe, prototipo, Hofman Dujardin, Amsterdam, NL, 2008.

*Struttura a pannelli.*



*Scala: edificio.*



Flow 5.0, Studio Roosegaarde, Rotterdam, NL, 2007-2009.

*Struttura a pannelli.*

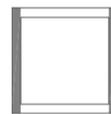


*Scala: componenti.*



Cargoshell, container collassabile, Rotterdam Cruise Terminal, René Giesbers, Rotterdam, NL, 2009.

*Struttura a pannelli.*



*Scala: edificio.*



Sliding House, dRMM, Suffolk, UK, 2009

*Struttura a pannelli.*



*Scala: edificio.*

	<p>“Pola Ginza Building Façade, Nikken Sekkei + Yasuda Atelier, ABI, Tokyo, JP, 2009.</p> <p>“</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: edificio.</i></p> 
	<p>Te Wero Bridge, Denton Corker Marshall, Hyder Consulting, Kenneth Grubb Associates, Auckland, NZ, 2009</p> <p>“</p> <p><i>Struttura a pannelli.</i></p> <p><i>Scala: grandi opere.</i></p> 

### Cap. 1.3. Conclusioni.

Partendo dalle definizioni attraverso le quali si sono nel corso del tempo focalizzate le caratteristiche dell'architettura cinetica, si è messo in luce come ogni sua definizione sia tesa ora a coglierne gli aspetti strutturali ora quelli formali ed infine come gli uni non possano prescindere dagli altri, tanto che caratteristica essenziale che accomuna le architetture cinetiche è proprio l'equilibrio dinamico tra forma e struttura.

L'architettura cinetica certo può offrire soluzioni dagli esiti a volte incerti, comunque non usuali, e si è verificato come questo sia un campo ristretto del costruito, legato a forti esigenze di adattabilità. Essa, però, si fonda sull'idea che l'architettura possa e debba cogliere nei luoghi ove avviene il progresso tecnologico l'opportunità di migliorare l'ambiente dell'uomo. È sempre stata presente nella storia dell'architettura.

Negli ultimi venti anni si è stabilizzato un ampio patrimonio di conoscenze meccaniche e si elabora il paradigma elettronico. Le architetture sviluppate in questo periodo evidenziano come l'interesse si stia spostando da architetture completamente cinetiche, trasportabili o rotanti, verso l'integrazione delle componenti cinetiche nell'architettura stabile, verso la creazione, cioè, di architetture trasformabili. Gli esempi a scala maggiore sono le grandi coperture degli stadi, dove è la potenza strutturale ad avere la meglio. In interventi a piccola scala, quasi sempre con la sola funzione di separazione, però, designer e artisti soprattutto mostrano come l'integrazione possa essere un notevole arricchimento delle qualità di uno spazio, senza necessariamente costringere il progetto stesso in forme e strutture dettate dalle esigenze del cinematismo.

Il passo successivo spetta propriamente all'architettura. Essa può cogliere gli insegnamenti che vengono dall'ambito strutturale e, forte delle suggestioni provenienti dall'arte, trasformare le strutture cinetiche in sistemi efficienti nell'assolvere le esigenze del progetto.



**PARTE SECONDA.**

**STRUTTURE MOVIMENTABILI.**

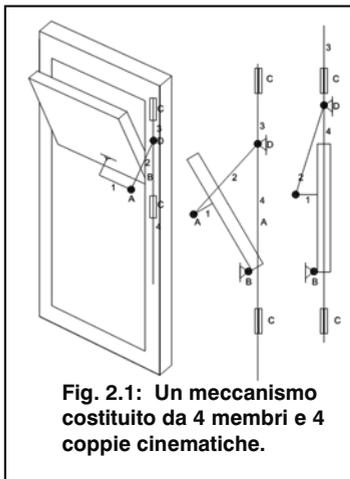


## Cap.2.1. Strutture cinematiche.

### 2.1.1. Cinematica: i concetti base.

Si è mostrato nel precedente capitolo lo stretto rapporto che lega struttura e meccanismo. Con strutture cinematiche s'intendono strutture formate da membri connessi alle estremità tramite superfici sagomate in modo tale da consentirne il dispiegamento. Nel caso delle strutture cinematiche, i componenti della rete strutturale si muovono mentre trasferiscono le forze che sostengono, generano configurazioni spaziali variabili mentre delimitano la forma architettonica. Per verificare quali possibilità esse offrano nella generazione dello spazio architettonico, nel presente capitolo si approfondisce l'interazione tra la loro geometria ed il movimento.

Si riportano di seguito alcune definizioni utili all'analisi di questo speciale tipo di strutture.



**Fig. 2.1: Un meccanismo costituito da 4 membri e 4 coppie cinematiche.**

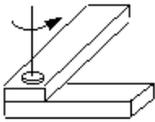
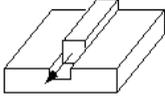
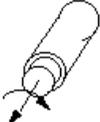
I componenti delle strutture cinematiche sono detti membri. Ogni membro libero gode di 3 gradi di libertà nel piano, 6 nello spazio un telaio è un elemento fisso che non ha gradi di libertà..

L'accoppiamento fra superfici di contatto tra le quali esiste moto relativo, dette superfici coniugate, è detto coppia. Nell'esempio si riconoscono quattro membri e quattro coppie cinematiche.

Le coppie sono suddivise in coppie inferiori e superiori in base al tipo di contatto che creano tra i membri. Le coppie inferiori sono coppie rigide (che non sono soggette a cedimenti, elastici o non), indipendenti (dove è la

forma stessa delle superfici coniugate ad assicurare un solo grado di libertà nel moto relativo), e combacianti con contatto di superficie (dove il contatto coi membri interessa una superficie); tutte le altre sono dette coppie superiori. Le coppie inferiori sono reciproche, godono cioè della particolarità di poter scambiare la funzione dei due membri costituenti.

Le coppie che sono utilizzate nella presente trattazione appartengono alle seguenti categorie:

Coppia	Rotoidale – cerniera	Prismatica – carrello	Cilindrica	Sferica
Tipo	Inferiore	Inferiore	inferiore	superiore
Simbolo	R	P	C	G
G.d.L.	1	1	2	3
Moto relativo	Circolare	rettilineo	cilindrico	sferico
Schema				
<b>Fig. 2.2: Le coppie più comuni.</b>				

Si definisce classe della coppia cinematica il numero di gradi di libertà tra i due corpi vincolati che la coppia permette. Quando la coppia lascia a ciascun membro un solo grado di libertà è detta coppia cinematica. Un sistema di membri collegati tra loro da coppie costituisce una catena, se le coppie sono coppie cinematiche, il sistema ha un solo grado di libertà ed è detto catena cinematica. Una catena cinematica è aperta se l'ultimo membro non è collegato al primo, viceversa è detta chiusa.

Una catena cinematica chiusa dove uno dei membri è fisso costituisce un meccanismo.

Perché si verifichi il movimento è necessario siano rispettate una serie di condizioni riguardanti il numero e la posizione dei giunti e dei membri. Si definiscono gradi di libertà il numero di coordinate indipendenti necessarie a definire la configurazione di un meccanismo.

1° condizione di movimento:  $F > 0$

Ponendo

$F$  = gradi di libertà del sistema

$L$  = numero di membri, incluso il telaio

$j_n$  = numero delle coppie cinematiche di classe "n" presenti nel meccanismo, ovvero numero di coppie cinematiche che permettono al sistema n gradi di libertà.

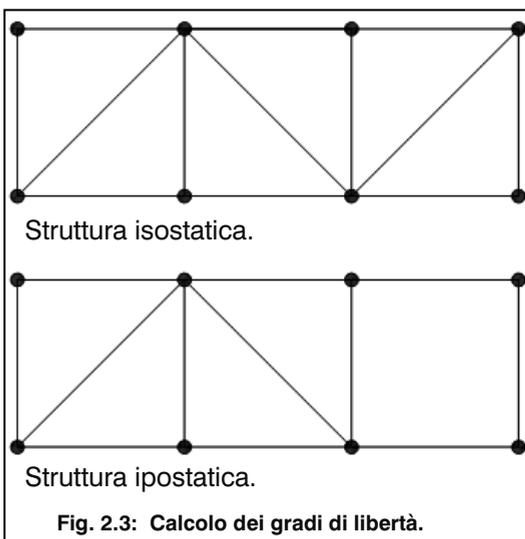
Nello spazio tridimensionale si ha: [SH95]

$$F = 6(L-1) - 5j_1 - 4j_2 - 3j_3 - 2j_4 - j_5 \quad \text{(Equazione di struttura)}$$

Nel piano si ha:

$$F = 3 \times (L-1) - 2j_1 - j_2 \quad \text{(Criterio di Kutzbach)}$$

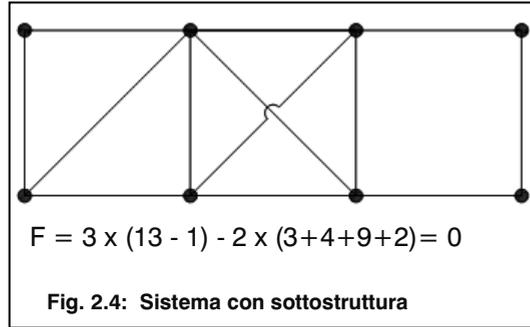
Se  $F \leq 0$  la struttura, a meno di situazioni particolari, è isostatica o iperstatica e non ha movimento. Se  $F > 0$  la struttura può essere mobile.



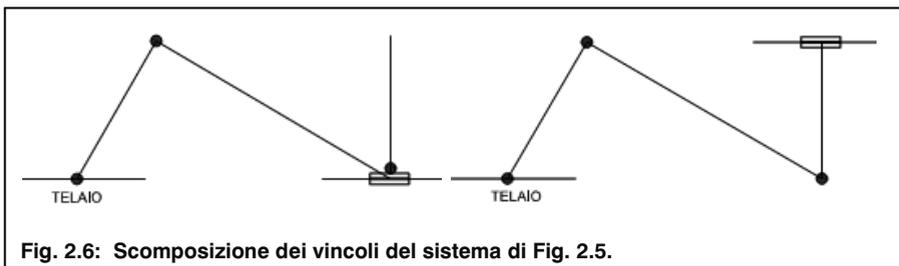
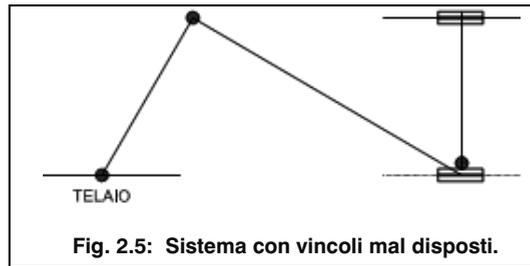
Quando in una coppia cinematica concorrono due soli membri, essa costituisce una coppia con priorità semplice, quando vi concorrono più membri è una coppia con priorità composta. La coppia agisce su tutti i membri che vi concorrono.

2° condizione di movimento: il meccanismo non contiene sottostrutture iperstatiche o vincoli sovrabbondanti.

Il sistema della figura a lato è labile nonostante sia rispettato il criterio di Kutzbach. Il meccanismo, infatti, contiene una sottostruttura iperstatica.



Similmente, il sistema della Fig. 2.5 è instabile perché i vincoli, pur essendo in grado sufficiente, sono mal disposti. Il cinematismo è scomposto nella Fig. 2.6.



Un caso particolare riguarda l'analisi delle catene cinematiche chiuse. Nello spazio tridimensionale ogni membro ha 6 gradi di libertà. Quando si collegano due membri, senza considerare i gradi di libertà sottratti dal tipo di vincolo, si impongono 5 parametri, ovvero le tre coordinate del vertice in comune e i due coseni direttori del giunto. Se si collegano in successione L membri a formare una catena chiusa, si impongono  $5 \times L$  parametri perciò i gradi di libertà restanti possono essere calcolati come:

$$F = 3 \times \sum_{i=1}^L j_i - L - 6$$

dove:

F = gradi di libertà del sistema

L = numero di membri, incluso il telaio

$j_i$  = numero delle coppie cinematiche di priorità "1" presenti nel meccanismo, ovvero numero di coppie cinematiche che collegano (L-1) membri.

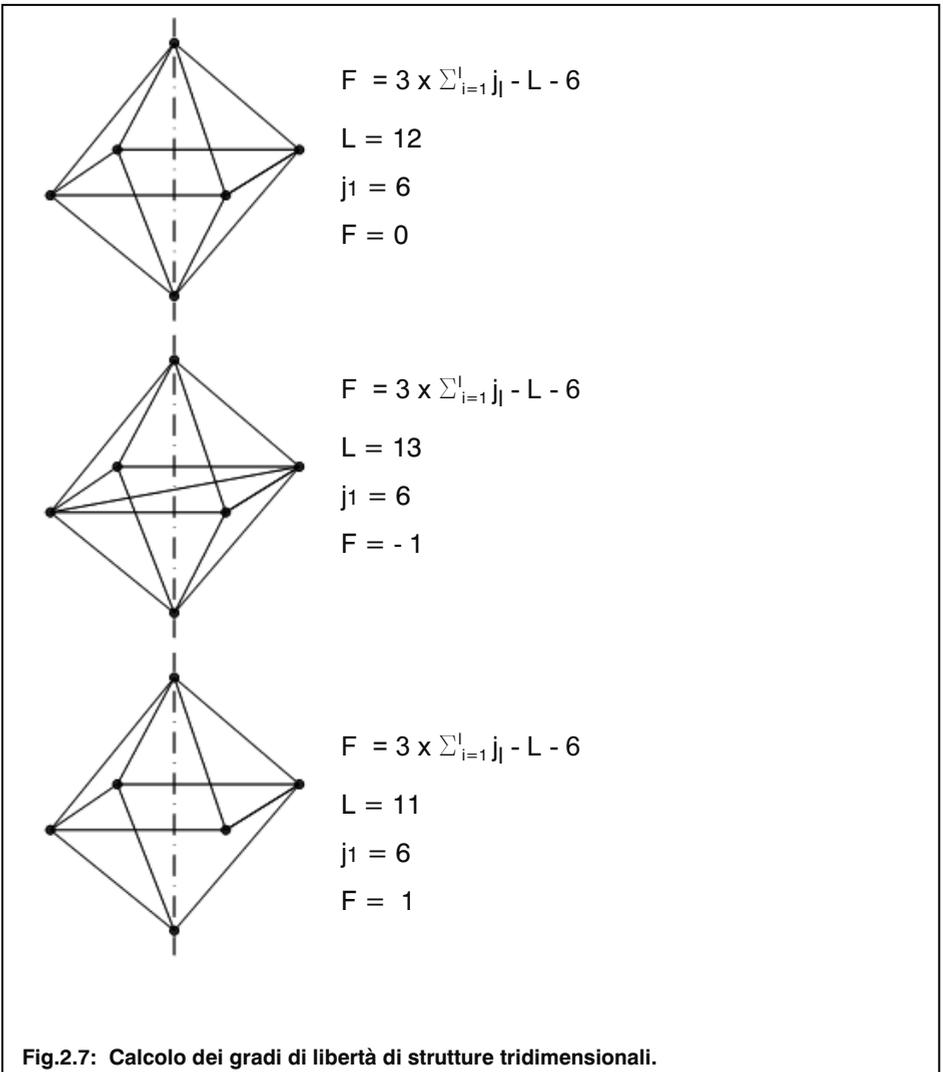


Fig.2.7: Calcolo dei gradi di libertà di strutture tridimensionali.

**Note:**

[SH95] Shigley, J. E., Uicker, Jr., J. J.; *THEORY OF MACHINES AND MECHANISMS*, 2ND EDITION, MCGRAW-HILL, NEW YORK, NY-US, 1995.

**2.1.2. Catene cinematiche per l'architettura.**

Le catene cinematiche possono essere variamente assemblate a seconda delle intenzioni di progetto.

Se obiettivo è ottenere una grande varietà di movimenti, si utilizzano catene cinematiche disposte in serie ognuna delle quali rende possibili specifici movimenti, ciascuno controllabile indipendentemente dagli altri. Le braccia dei robot devono raggiungere punti specifici nel piano o nello spazio, spesso devono avere ingombri limitati perché il loro movimento è vincolato dalla presenza di rigorose condizioni al contorno, ostacoli, e sono perciò realizzate tendenzialmente in questo modo.

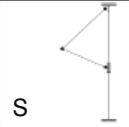
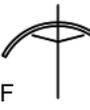
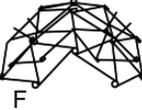
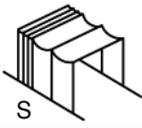
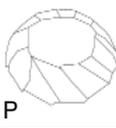
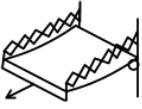
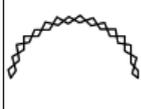
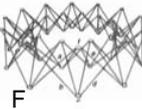
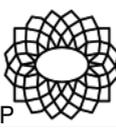
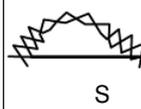
Un altro approccio consiste nell'utilizzare un solo tipo o pochi tipi di catene, ripetute nel piano o nello spazio secondo simmetria a coprire una determinata superficie. In questo modo, si ottengono strutture capaci di coprire contestualmente ampie superfici senza aumentare il numero di gradi di libertà; più consoni agli obiettivi specifici, è questo secondo approccio che ha trovato applicazioni architettoniche. Nei successivi capitoli si mostrano dunque le caratteristiche cinematiche e morfologiche di queste strutture. Esse sono indagate dal punto di vista cinematico e morfologico. La figura seguente rielabora e estende gli studi di [HA09] e [IN71] alla luce delle applicazioni in architetture movimentabili. Sia le strutture per punti a tamponamenti morbidi che quelle a tamponamenti rigidi che infine le strutture per piani permettono svariati esiti formali. Orientatisi in base a quanto già esposto verso uno dei tre tipi di struttura, l'analisi estrapola dalle

caratteristiche cinematiche il tipo e la direzione di movimento, e li mette in relazione con la morfologia in configurazione chiusa.

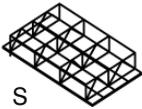
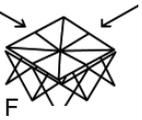
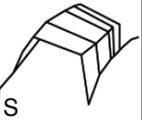
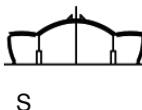
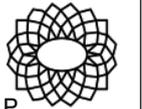
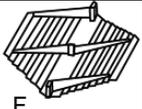
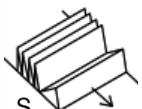
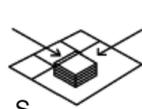
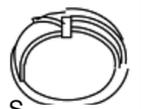
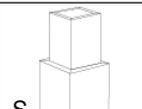
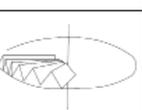
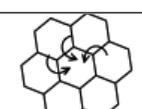
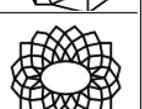
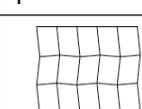
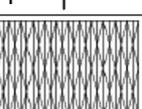
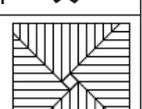
**Note:**

- [IN71] INSTITUT FOR LEIGHTWEIGHT STRUCTURES, UNIVERSITY OF STUTTGART, IL5 Convertible Roofs, 1971, pg.45
- [HA09] ARIEL HANAOR, Some Structural Morphological Aspects of Deployable Structures for Space Enclosures, in RENÉ MOTRO, An Anthology of Structural Morphology, Singapore, SNG, World Scientific, 2009, pg 83-100.

**Fig.2.8: Schema riassuntivo delle strutture movimentabili realizzate per l'architettura.**

Strutture		Cinematismo	parallelo	centrale	circolare	periferico
Strutture articolate pure		piegatura				
Strutture per punti, tamponamenti morbidi	Ombrello	piegatura				
	Strutture collassabili.	piegatura				
	Tensegrity.	piegatura				
	Strutture scorrevoli	scorrimento				
	Reciprocal frame	scorrimento				
	Strutture a forbice bidimensionali	piegatura				
	Strutture a forbice tridimensionali	piegatura				
	Strutture estensibili tipo Bennet	piegatura				
	Strutture a rotazione radiale	rotazione				
	Strutture bi stabili	piegatura				

Strutture movimentabili.

Strutture per punti, tamponamenti rigidi	Strutture estensibili.	piegatura				
	Strutture pieghevoli a sollevazione	piegatura				
	Strutture a rotazione radiale	rotazione				
	Strutture composte.	rotazione				
Strutture per piani	Strutture a concertina	piegatura				
	Pannelli a scorrimento	scorrimento				
	Strutture telescopiche	scorrimento				
	Sistemi a diaframma	scorrimento e rotazione				
	Strutture incernierate	piegatura				
	Strutture a rotazione	rotazione				
	Origami	piegatura				
<p><b>Morfologia di chiusura, legenda: F fascio P piano S sezione</b></p>						

### **2.1.3. Strutture articolate pure.**

Le catene cinematiche possono trovare diretto impiego in architettura, utilizzate singolarmente o accostate per semplice giustapposizione. Quando più membri rigidi di una struttura sono connessi da giunti che ne attuano il movimento, indipendentemente dalle caratteristiche di elasticità dei materiali, si ha una struttura articolata. Se i membri, grazie alla loro superficie, assolvono anche la funzione di oscurare l'area senza soluzioni di continuità, la struttura non richiede un rivestimento ausiliario: essa può essere definita come struttura articolata pura.

Calatrava utilizza la soluzione chiusa a tre membri mobili e telaio fisso nei portoni della Fabbrica Ernsting. Ciascun ingresso è formato dalla ripetizione per semplice giustapposizione di una catene cinematica chiusa a 4 membri. Le catene non si intersecano tra loro poiché agiscono tutte su piani paralleli. Gli assi di rotazione delle 4 cerniere sono paralleli gli uni agli altri, perpendicolari al piano delle aste e del giunto a scorrimento, in questo modo è garantito lo sviluppo in piano del movimento.

Il calcolo dei gradi di libertà da:

$$F = 3 \times 3 - 2 \times 2 - 1 \times 1 - 1 \times 3 = 1$$

Per il funzionamento cinematico, le cerniere intermedie possono dividere le aste a qualsiasi altezza. Per ottenere una buona apertura del portone è comunque necessario esse si trovino grossomodo ad una quota centrale. Calatrava dispone ogni cerniera in una posizione diversa, disegnando nel complesso una forma arcuata.

Questo semplice accorgimento gli permette di generare una struttura dal movimento particolarmente affascinante, a partire da un meccanismo piuttosto semplice.

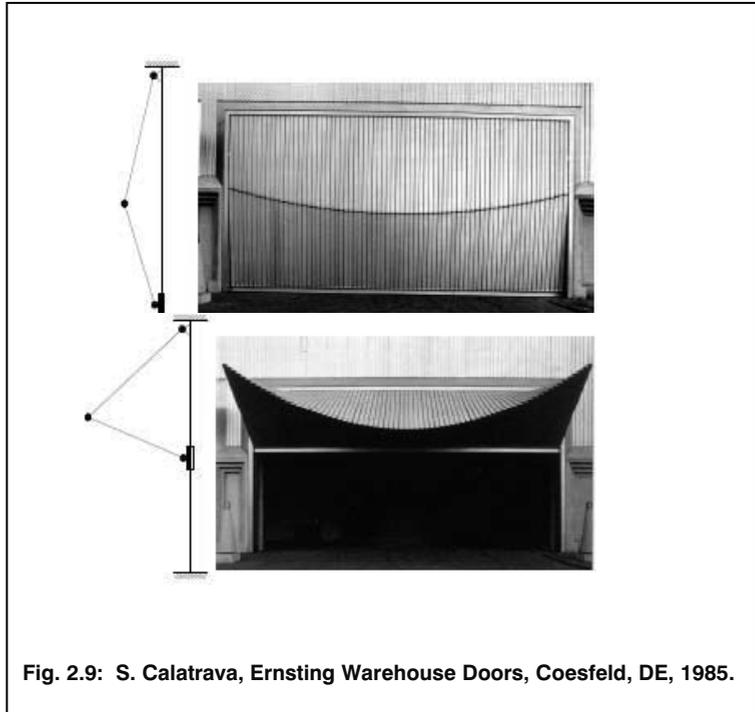


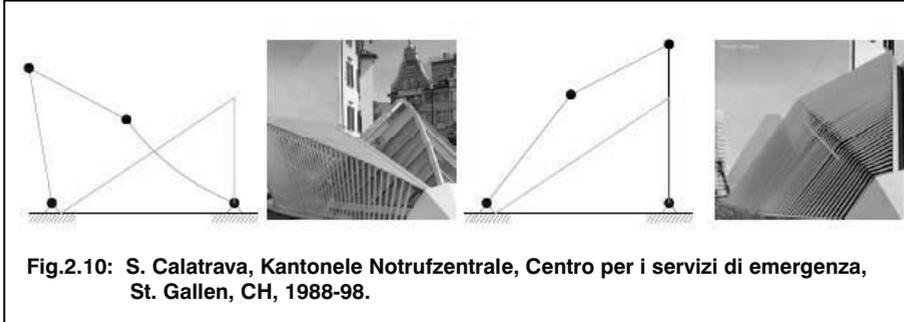
Fig. 2.9: S. Calatrava, Ernsting Warehouse Doors, Coesfeld, DE, 1985.

Calatrava ricorre spesso nelle sue opere a strutture mobili e nello specifico a strutture articolate pure formate da catene chiuse di quattro membri.

Nel meccanismo della Kantonele Notrufzentrale il calcolo dei gradi di libertà da:

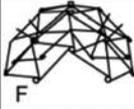
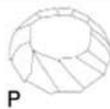
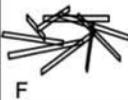
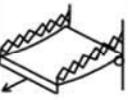
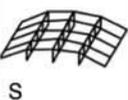
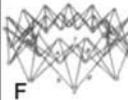
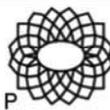
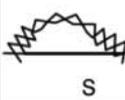
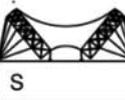
$$F = 3 \times 4 - 4 \times 2 - 3 = 1$$

Di fatto, tutte le catene cinematiche chiuse formate da quattro membri incernierati hanno sempre un solo grado di libertà. Ai fini pratici, ciò significa che ogni catena cinematica può essere movimentata azionando un solo giunto da un solo punto di controllo. Calatrava collega la cerniere superiori di tutte le catene tra loro lungo un arco. In questo modo trasferisce il punto di controllo di ogni catena nella cerniera posta alla base dell'arco fissato al suolo: è sufficiente applicare la rotazione alla cerniera per generare il moto simultaneo di tutte le catene cinematiche.





## Cinemorfismi. Meccanismi che definiscono lo spazio architettonico.

Strutture		Cinematismo	parallelo	centrale	circolare	periferico
Strutture per punti, tamponamenti morbidi	Ombrello	piegatura				
	Strutture collassabili.	piegatura				
	Tensegrity.	piegatura				
	Strutture scorrevoli	scorrimento				
	Reciprocal frame	scorrimento				
	Strutture a forbice bidimensionali	piegatura				
	Strutture a forbice tridimensionali	piegatura				
	Strutture estensibili tipo Bennet	piegatura				
	Strutture a rotazione radiale	rotazione				
	Strutture bi stabili	piegatura				
	Altre strutture a aste e cavi	piegatura				
<b>Morfologia di chiusura, legenda: F fascio P piano S sezione</b>						

## Cap.2.2. Strutture per punti, tamponamenti morbidi.

### 2.2.1. Introduzione: morfologia e cinematica.

La maggior parte delle applicazioni di strutture movimentabili prevede rivestimenti in materiale morbido, (membrane), che possano essere posati una volta aperta la struttura o essere fissati permanentemente nella stessa. A livello cinematico, i rivestimenti morbidi hanno infiniti gradi di libertà e perciò si possono adattare a qualsiasi struttura. A livello strutturale il loro peso tendenzialmente contenuto non è di aggravio per la struttura.

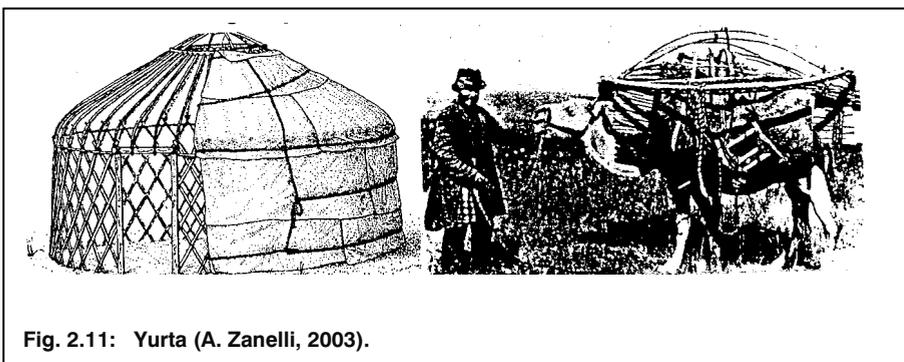


Fig. 2.11: Yurta (A. Zanelli, 2003).

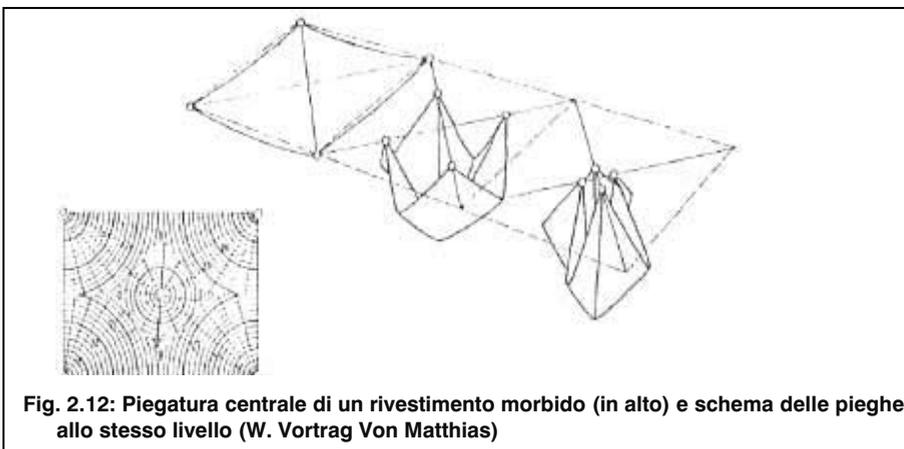
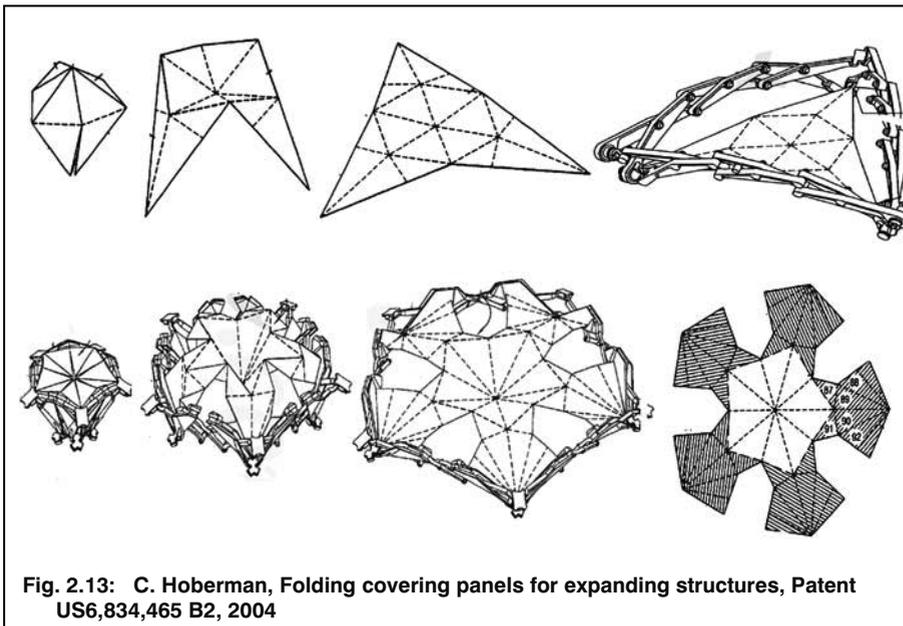


Fig. 2.12: Piegatura centrale di un rivestimento morbido (in alto) e schema delle pieghe allo stesso livello (W. Vortrag Von Matthias)

Nel progetto del rivestimento deve essere posta particolare attenzione al processo di piegatura del rivestimento, per evitare che si deteriori o si leda entrando in contatto con il meccanismo. In alcuni casi la membrana assume anche una funzione attiva, quando il suo tensionamento è preventivamente studiato, può contribuire a stabilizzare il meccanismo in posizione aperta e quindi favorire la stabilità della struttura [ZA03].

Hoberman nel 2004 brevetta un sistema per rivestire alcune forme a sfera da lui realizzate [HO04]. Il sistema, come noto, può essere realizzato anche con pannelli rigidi incardinati, e si basa sulla piegatura di unità poligonali base secondo un assemblaggio che deriva direttamente dagli origami.



Note:

[HO04] CHUCK HOBERMAN CHARLES, *Folding covering panels for expanding structures*, Patent US6,834,465 B2, NY-USA, 2004.

[ZA03] ALESSANDRA ZANELLI, *Trasportabile trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Milano, IT, CLUP, 2003.

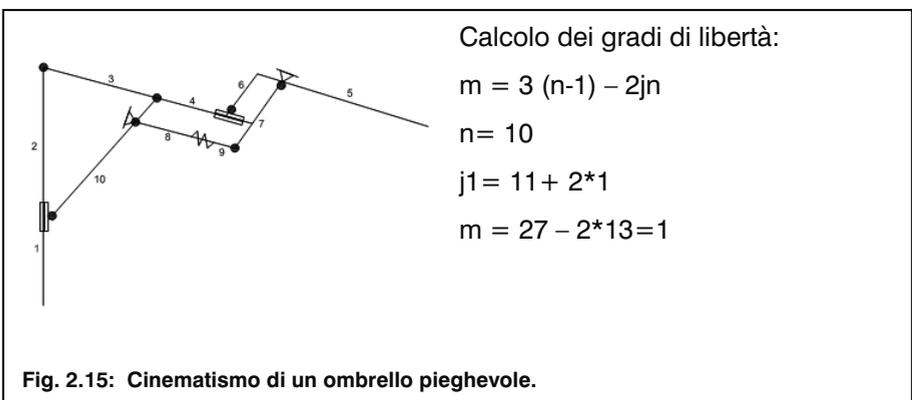
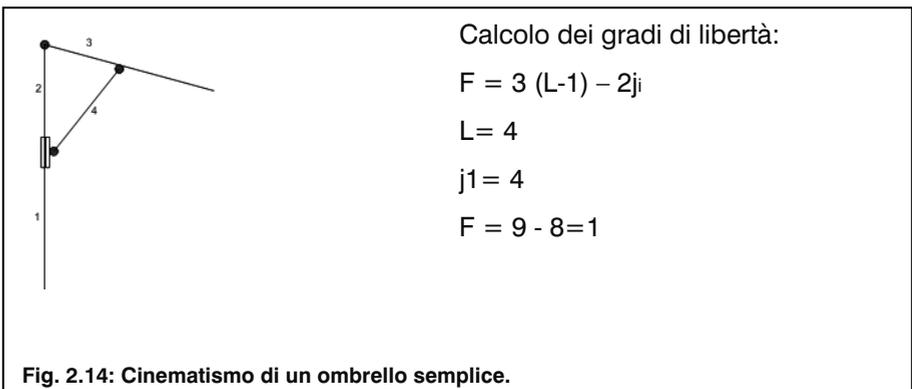
VO06] WALTER VORTRAG VON MATTHIAS, *Convertible Roofs*, Technische Universität München. Course document, Munich, DE, 2006.

### 2.2.2. Ombrello.

L'ombrello, la cui invenzione si pensa risalga all'antico Egitto è forse la struttura pieghevole più conosciuta..

Il meccanismo è formato dall'unione simmetrica di un numero di connessioni tutte uguali, raccolte attorno all'albero centrale. Il movimento è reso possibile grazie allo scorrimento della struttura lungo un supporto rettilineo o a una guida attraverso uno o più giunti sferici o cilindrici.

L'ombrello, nella sua forma base e nella versione pieghevole, ha sempre un grado di libertà, come mostrato nelle figure seguenti.





**Fig. 2.16: B. Rasch, Ombrelli per la piazza della Moschea del Profeta, Medina, 1992.**

### **2.2.3. Strutture collassabili**

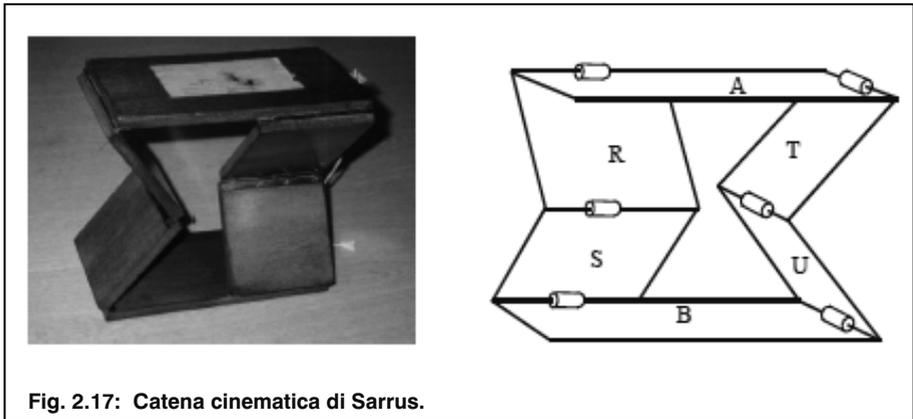
Una catena cinematica è detta collassabile se, tra le infinite posizioni che può assumere, ce n'è una nella quale tutti i membri giacciono sul piano.

La connessione di Sarrus è un tipico esempio di struttura collassabile minima, formata da 4 membri incernierati.

Gli assi di rotazione sono perpendicolari ai membri, ovvero la lunghezza dei membri rappresenta la distanza minima tra gli assi di rotazione. Questa caratteristica accomuna tutte le connessioni che, come questa, appartengono alle catene cinematiche di Bennet; questa catena è particolarmente nota perché, documentata nel 1853, è uno dei primi meccanismi che permettono di tracciare un movimento lungo una linea

retta.

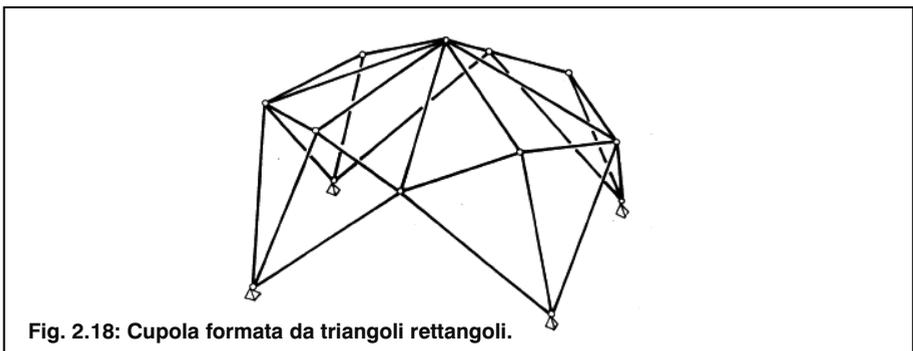
Il meccanismo è detto doppiamente collassabile se esistono due diversi insiemi di posizioni reciproche che le barre possono assumere sul piano.



#### 2.2.4. Griglie collassabili a giunti separabili.

Calatrava nella tesi di dottorato sviluppa dei meccanismi formati dall'unione di due catene cinematiche chiuse parzialmente coincidenti in grado di sviluppare griglie modulari piane e a cupola [CA81].

Di seguito s'illustra il processo compositivo di una cupola con moduli costituiti da triangoli rettangoli.



L'articolazione è formata da quattro parti uguali tra loro disposte simmetricamente attorno al vertice della cupola. Come in tutte le strutture simmetriche, lo studio del sistema può essere ricondotto allo studio di una sola parte, qui costituita da quattro triangoli collegati lungo i loro cateti.

Nella predisposizione del meccanismo, l'assemblaggio dei quattro triangoli è caratterizzato dal fatto che al centro si hanno due vertici collegati da un giunto a scorrimento. Con riferimento alla figura seguente, il vertice A è collegato tramite barre incernierate ai vertici E mentre C- è collegato con un pendolo al giunto F, coincidente in figura.

Il vertice F, oltre che col vertice A, è collegato tramite barre incernierate ai vertici B e D.

I triangoli sono tutti uguali tra loro per costruzione, ponendo:

$$BA = n_3$$

$$AE = n_2$$

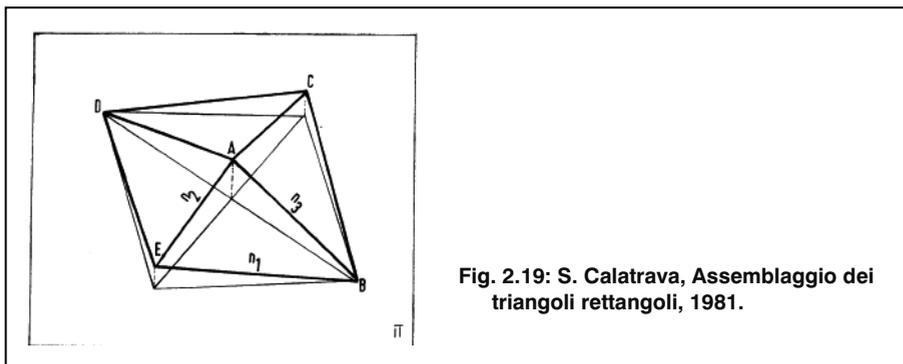
$$EB = n_1$$

Perché il triangoli EAB possa giacere su un piano, il rapporto tra la lunghezza dei cateti deve essere tale che:

$$n_3 < n_1$$

$$n_2 < n_3$$

La prima equazione permette che il vertice A, connesso ai vertici C e E,



**Fig. 2.19: S. Calatrava, Assemblaggio dei triangoli rettangoli, 1981.**

possa giacere sul piano  $\pi$ . La seconda equazione permette che il vertice F, connesso coi vertici B e D, possa giacere sul piano  $\pi$ .

Il movimento dei vertici d'estremità può avvenire entro certi limiti senza implicare il distacco del vertice A dal vertice F.

A dimostrazione di questa possibilità, si possono calcolare i gradi di libertà del sistema nelle due situazioni rispettivamente  $A \equiv F$  e  $A \neq F$ . Con l'ipotesi che A e F rimangano coincidenti si ottiene:

$$L = 28$$

$$J = 13$$

$$F = 3J - L - 6 = 5$$

Se si calcolano i gradi di libertà con l'ipotesi che A e F possano traslare lungo la verticale uno rispetto all'altro si ha:

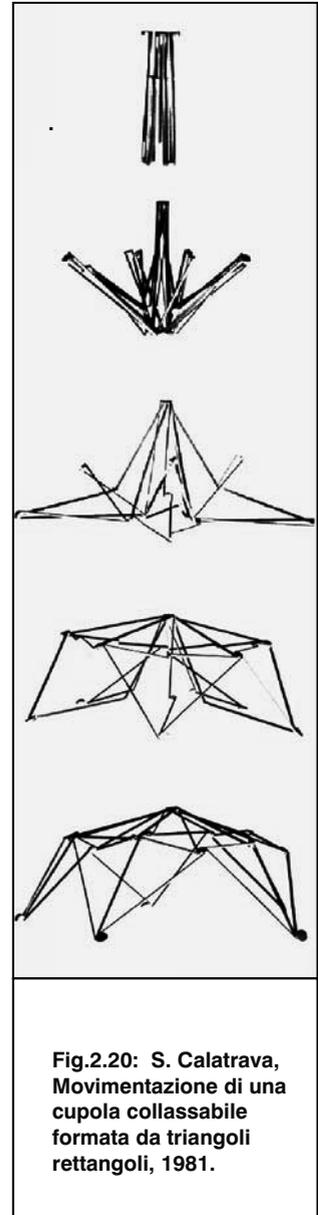
$$L = 28$$

$$J = 17$$

$$F = 3J - L - 6 = 17$$

In entrambi i casi il sistema è mobile, ma fintantoché A e F sono coincidenti si hanno solo 5 gradi di libertà. In particolare, dalla iniziale posizione chiusa dove le barre sono raccolte in un fascio, i 5 gradi di libertà permettono al vertice  $A \equiv F$  di spostarsi lungo la verticale

e ai 4 vertici d'estremità d'espandere fuori dal fascio e raggiungere il piano ad esso perpendicolare. Il moto può proseguire separando A e F. I dodici gradi di libertà acquisiti permettono alle barre di separarsi le une dalle altre. La sequenza di sviluppo, piuttosto particolare, è illustrata nella figura a lato.



Note:

[CA81] SANTIAGO CALATRAVA, *To the foldingness of specialized works*, Ph. D. Thesis, Swiss Federal Technical University, Zurich, 1981.

### 2.2.5. Tensegrity.

Le strutture tensegrity sono definite da Füller, che fu il primo a studiarle, come un assemblaggio di membri tesi e compressi disposti in un sistema discontinuo compresso [BU62]. La definizione raccoglie anche le tensegrity pieghevoli, che sono quindi prive di giunti articolati.

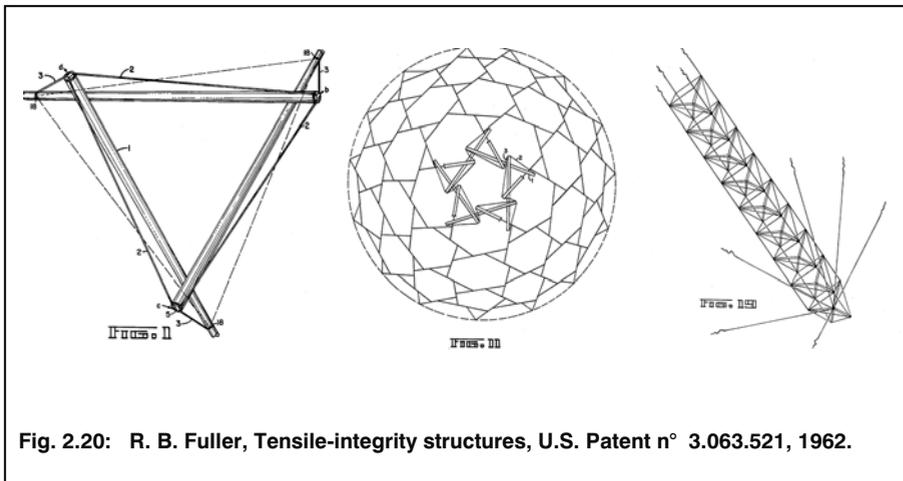


Fig. 2.20: R. B. Fuller, Tensile-integrity structures, U.S. Patent n° 3.063.521, 1962.

Pugh spiega il funzionamento delle tensegrity paragonandole ad un pallone: se l'aria racchiusa è a pressione maggiore dell'aria esterna, essa tende la superficie interna del pallone; se la pressione dell'aria interna aumenta ancora il pallone deformerà. In una struttura tensegrity le barre si comportano come l'aria e i cavi come la superficie del pallone. Aumentare le forze nei membri della tensegrity ne aumenta la resistenza e la capacità

di carico [PU76].

Queste strutture sono auto tese grazie al rapporto nel caso di 3 barre regolari

$$r=s/c$$

con

s = lunghezza delle barre,

c = lunghezza dei cavi.

Ciò può avvenire introducendo dei meccanismi che diminuiscano il rapporto  $r=s/c$ , allungando i cavi, accorciando le barre o agendo in entrambi i modi.

Per realizzare un meccanismo che comporti l'accorciamento delle barre si introducono barre telescopiche [HA93] azionate meccanicamente o idraulicamente. Il movimento avviene in modo analogo a quanto già visto per soluzioni con cavi, ma le condizioni sono diverse: accorciare le barre permette un'ulteriore riduzione del volume complessivo, ma necessita di più punti di attivazione e controllo risultando ai fini pratici una soluzione piuttosto complessa.

Skelton e Sultan nel 1997 notano come l'applicazione di materiali smart nelle strutture tensegrity sia particolarmente efficace perché in esse questi materiali permettono dei cambiamenti di forma notevoli. Si introduce la possibilità di attivare i cavi attraverso dei piccoli motori inseriti nelle barre o realizzando cavi in nichel – titanium (NiTi) che permetta il cambiamento di lunghezza in risposta all'aumento di temperatura provocato, ad esempio, da una determinata tensione elettrica. Queste soluzioni però hanno notevoli difficoltà pratiche, dimensionali, tecnologiche ed economiche, specie se pensate per opere civili [SU03] .

Di seguito due sequenze di sviluppo di sistemi tensegrity.

A sinistra un sistema costituito da due gruppi di tre barre ciascuna disposte

su triangoli paralleli e collegati da 18 cavi; a destra un sistema a torre

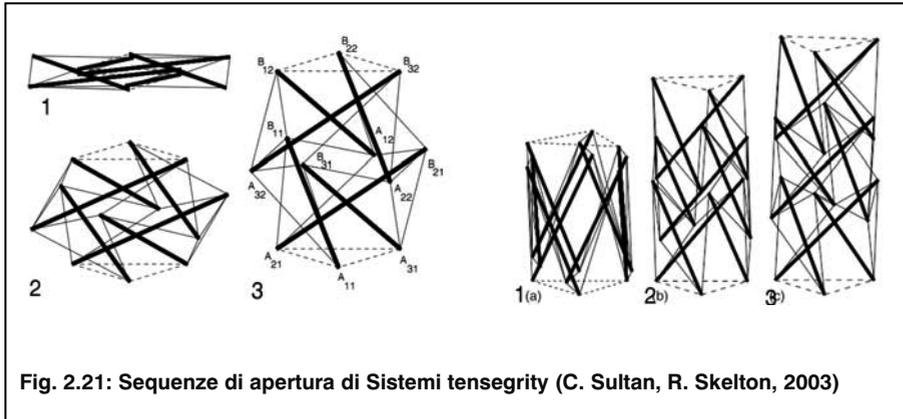


Fig. 2.21: Sequenze di apertura di Sistemi tensegrity (C. Sultan, R. Skelton, 2003)

Questo tipo di strutture pieghevoli risultano particolarmente interessanti per le applicazioni aerospaziali, perché non hanno un asse privilegiato (sono stabili in ogni posizione) e non necessitano di punti di ancoraggio. Per una trattazione esaustiva delle soluzioni che nel tempo sono state individuate si rimanda alla bibliografia ed in particolare a [SK09] e [T102]. Si riporta di seguito a titolo esemplificativo un'antenna spaziale a apertura centrale brevettata da Stern nel 2003 [ST03].

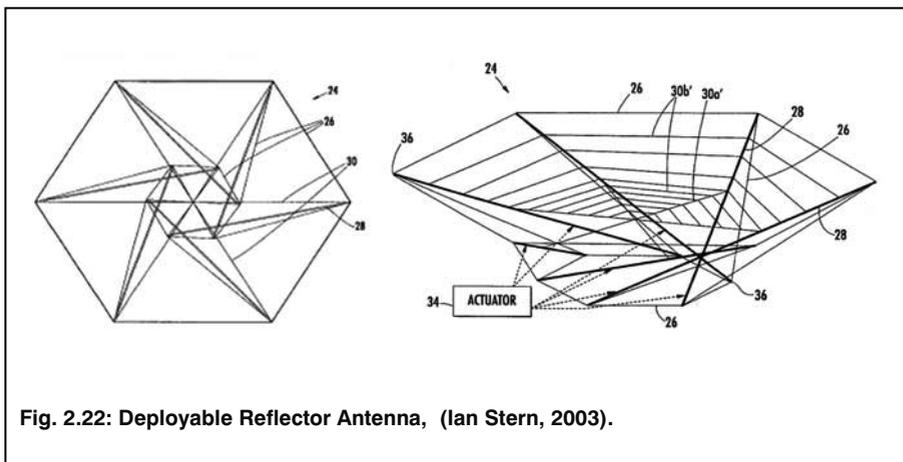
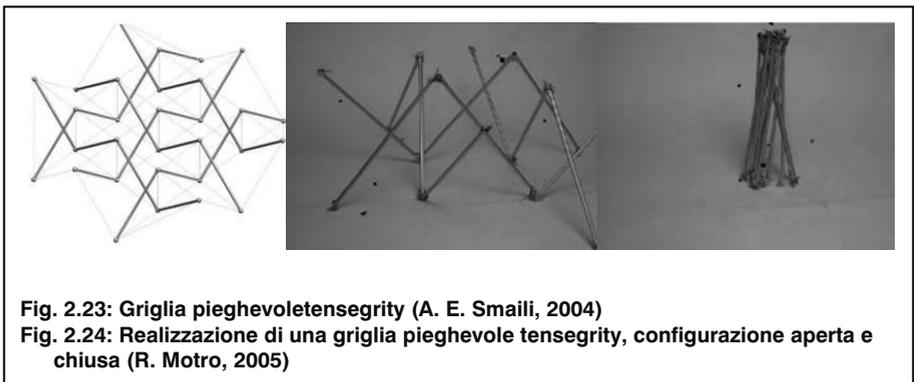


Fig. 2.22: Deployable Reflector Antenna, (Ian Stern, 2003).

Gli esempi sopra esposti sono realizzati secondo l'assemblaggio

tradizionale comune fin dai primi esempi di sistemi tensegrity, ovvero in modo tale che ad ogni barra siano collegati 3 cavi ma nessun'altra barra. Questa configurazione è divenuta classica, ma nel 1999 il gruppo di ricerca facente capo a Renè Motro mostra come si possano ottenere sistemi tensegrity (perlomeno in un'accezione estesa del termine che consideri il comportamento strutturale) anche unendo a due a due le barre. Con questa configurazione si possono ottenere griglie tensegrity pieghevoli. A causa della maggior lunghezza dei singoli elementi ottenibile e del minor numero di raccordi le realizzazioni pratiche con questo sistema sono più leggere delle configurazioni simili a barre separate [SA99] [MO01].

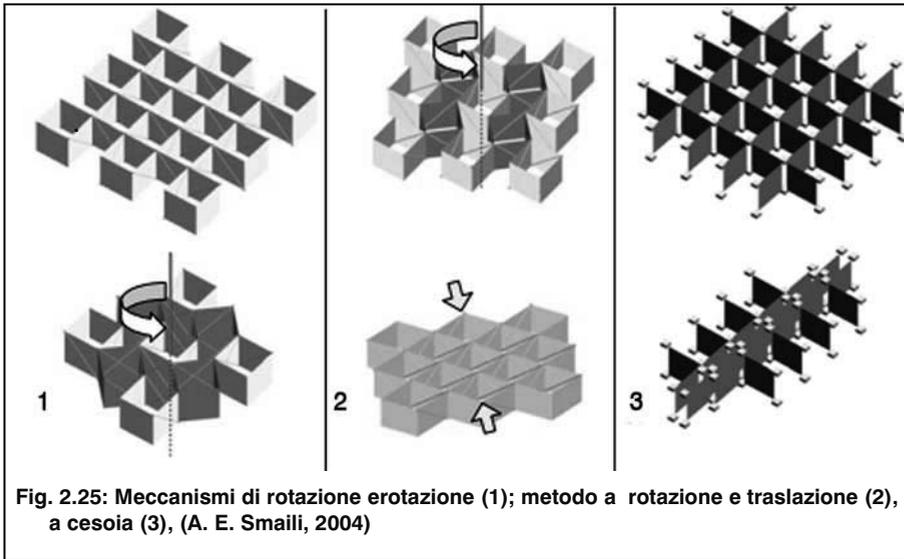
Prendendo come punto di riferimento la superficie piana in figura, l'introduzione di un meccanismo che alteri la configurazione della struttura, permettendole di muoversi da una configurazione internamente tesa iniziale ad un'altra, avviene nel momento in cui si introduce un meccanismo.



El Smaili mostra come sia possibile applicare dei meccanismi pur mantenendo la tensione interna, anche se questo tipo di movimenti avviene solo per specifiche configurazioni geometrica e d'assemblaggio [SM04b] .

Le soluzioni più generali consistono nell'eliminare temporaneamente la tensione interna tra gli elementi del sistema, così da rendere possibile il movimento senza sforzi..

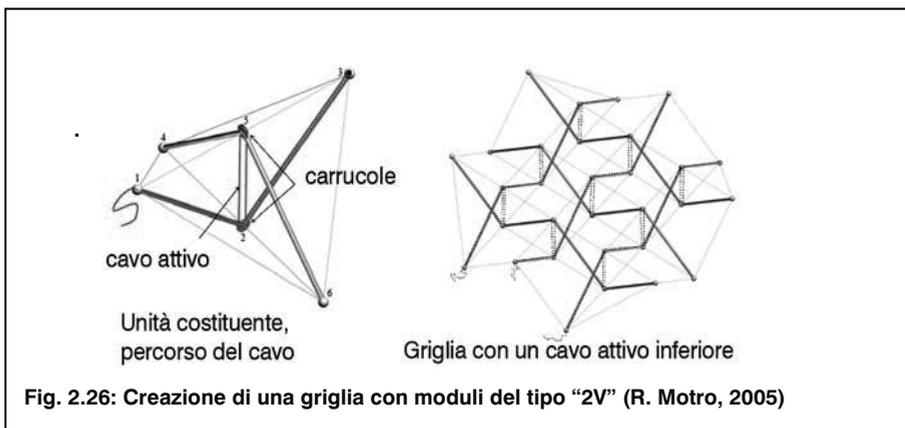
Ciò può avvenire introducendo dei meccanismi che diminuiscano il rapporto  $r=s/c$ , allungando i cavi, accorciando le barre o agendo in entrambi i modi.



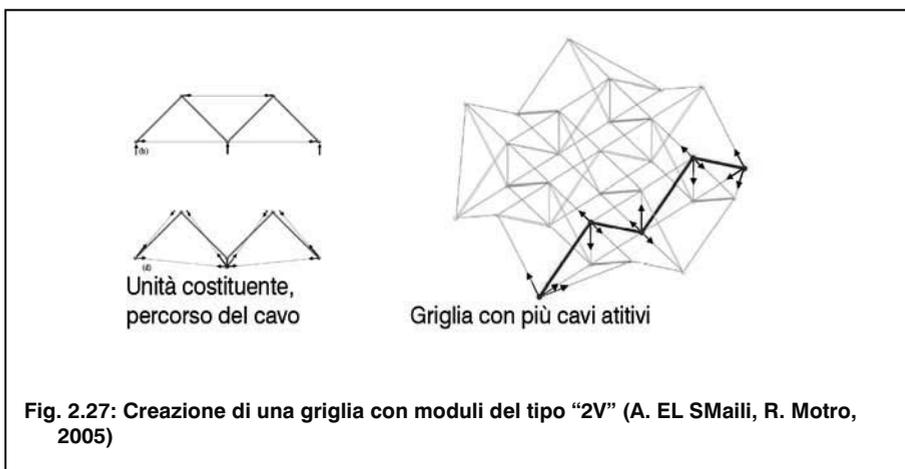
Per realizzare un meccanismo che comporti l'allungamento dei cavi, Motro [MO05] confronta due soluzioni.

La prima consiste nello scomporre la griglia in unità minime, dette moduli 2V, dove un cavo verticale collegane le barre viene sostituito con un doppio cavo passante per due carrucole poste sui nodi; il cavo correndo dentro le barre esce con entrambe le estremità dal modulo (vedi figura). Questi moduli vengono quindi assemblati secondo due direzioni ortogonali a formare una griglia piana. In essa tutti i cavi verticali sono sostituiti da un unico cavo che percorre le carrucole come faceva il cavo sdoppiato del singolo modulo. La presenza di un solo cavo attivo, regolabile autonomamente, garantisce al sistema di avere un unico punto di controllo. Il movimento avviene secondo le seguenti fasi: viene rilasciato il cavo attivo, il cavo permette l'allungamento simultaneo degli altri cavi, i cavi tendono a aprire la struttura. Le

carrucole poste in corrispondenza dei nodi permettono di stabilizzare la struttura. Similmente la ritrazione del cavo attivo chiude la struttura.

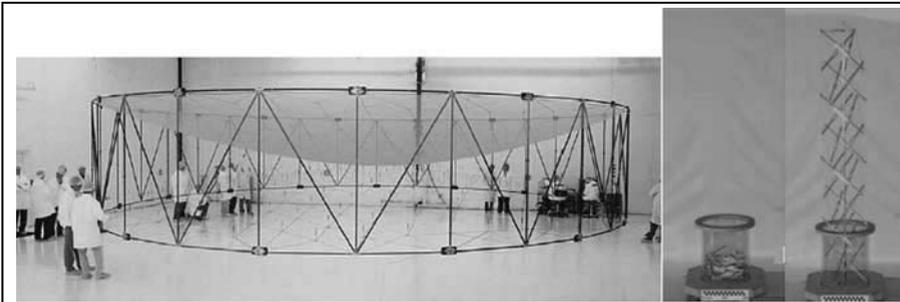


Altra possibilità è suddividere il sistema in due gruppi di fasci perpendicolari tra loro e al piano su cui poggia la struttura in modo tale che ciascun fascio contenga una fila di barre disconnesse. In ogni fascio si eliminano i cavi nel piano verticale e si introduce un cavo attivo che scorre con un andamento a zig-zag sopra e sotto le barre. Rilasciando il cavo le barre tendono a chiudersi.



Purtroppo queste strutture non hanno un'alta capacità di carico e sono

molto sensibili a carichi asimmetrici o a piccole variazioni nella loro configurazione, cosa che rende necessari studi piuttosto approfonditi per impieghi architettonici. Ad oggi, oltreché come strutture stabili, strutture tensegrity sono state usate nelle costruzioni per l'emergenza, con il rivestimento a membrana collaborante.



**Fig. 2.28: Astromesh (G. Tibert, S. Pellegrino, 2003)**

**Fig. 2.29: Deployable tensegrity mast G. Tibert, S. Pellegrino, 2003)**



**Fig. 2.30: Clownland Enterprises, Inc. and Camp Elsewhere, Ltd., un riparo costituito da una unità tensegrity minima.**

**Fig. 2.31: Geotensic tent, Schelter System.**

Chen e Kawaguchi hanno proposto di combinare le tensegrity con il sistema pantadome a generare quello che definiscono il “Panta tensegrity system”. In esso le parti nelle quali è divisa la cupola del pantadome sono realizzate come cupole tensegrity rinforzate da travi anch’esse tensegrity,

realizzate con moduli prismatici e tre o quattro barre. Le tensegrity renderebbero la struttura particolarmente leggera e il meccanismo del pantadome (la suddivisione della cupola in anelli incernierati tra loro e il successivo sollevamento della stessa) potrebbe essere sfruttato per messe in tensione i cavi.

Tristan d'Estrée Sterk [DES03] studia strutture miste tensegrity, come il padiglione proposto nel 2005 dove un sistema di attuatori e i cambiamenti di pressione dell'aria posta tra due pelli permettono di modificare la posizione delle barre interne e così la forma delle pelli stesse.

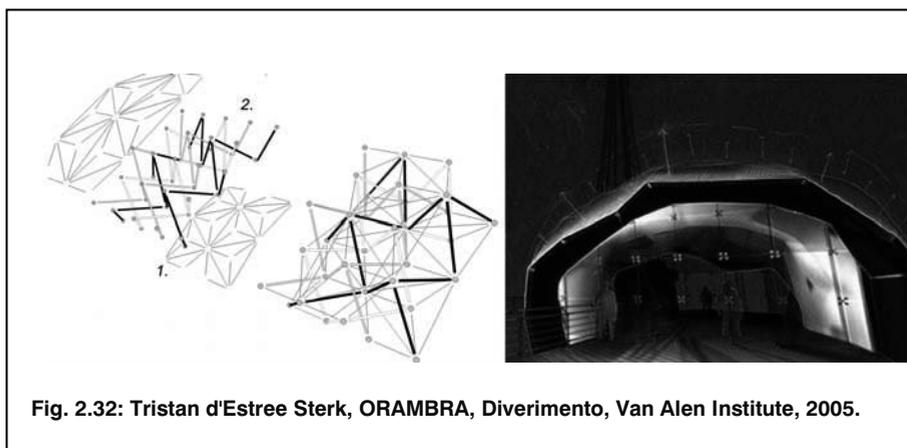


Fig. 2.32: Tristan d'Estree Sterk, ORAMBRA, Diverimento, Van Alen Institute, 2005.

## Note:

- [BU62] RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Tensile-integrity structures*, U.S. Patent n° 3.063.521, 1962.
- [MO01] RENÉ MOTRO, "Foldable tensegrity", in SERGIO PELLEGRINO ( a cura di), *Deployable structures*, Berlin, DE, Springer, 2001, pg. 199-238.
- [PU78] ANTHONY PUGH, *An introduction to tensegrity*. University of California Press, Berkeley, US- CA, 1976.
- [HA93] ARIEL HANAOR, "Double-layer tensegrity grids as deployable structures", in *International Journal of Space Structures*, Vol. 8, n., 1&2, 1993, 135–143.
- [SA99] CÉDRIC LE SAUX, MOURAD BOUDERBALA, CEVAER FRANCK, RENÉ MOTRO, "Strut-Strut contact on numerical modelling of tensegrity systems folding", in *40th Anniversary Congress of IASS. Shell and spatial structures from recent past to the next millennium*, Madrid E, 1999, pp.1-10.
- [TI02] GUNNAR TIBERT, *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*, Royal Institute of Technology, Ph.D. Thesis, Stockholm, DE, 2002.
- [TI03] GUNNAR TIBERT, SERGIO PELLEGRINO, "Deployable Tensegrity Masts", in *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*, Norfolk, USA, 2003.
- [SU03] CORNEL SULTAN, ROBERT SKELTON, "Deployment of tensegrity structures", in *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pg. 4637–4657.
- [ST03] IAN STERN, *Deployable Reflector Antenna*, U.S. Patent n 6,542,132 B2, 2003.
- [DES03] TRISTAN D'ESTRÉE STERK, "Using actuated tensegrity structures to produce a responsive architecture", in *ACADIA22 conference, 2003*, Ball State University, Muncie, US-ID, Kevin R. Klinger, 2003.
- [MO03] RENÉ MOTRO, *Tensegrity. Structural systems for the future*, Hermes Science Publishing, UK. 2003, pg. 147-187
- [SM04a] ALI EL SMAILI, *Pliage/dépliage de systèmes de Tenségrité*, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, didactic document, Université Montpellier II, 2004.  
(<http://www.lirmm.fr/doctiss04/art/M02.pdf>)
- [SM04b] ALI EL SMAILI, RENÉ MOTRO, VINICIUS RADUCANU, "New concepts for deployable tensegrity systems", in *IASS Symposium: Shell and Spatial Structures from models to realization*, 20-24 Septembre 2004, Montpellier, FR, 2004.
- [SM05] ALI EL SMAILI, RENÉ MOTRO, "Folding/unfolding of tensegrity systems by removal of self-stress", in *Proceedings the International symposium on shell and spatial structures : theory, technique, valuation, maintenance*, Bucarest, IASS, 2005,
- [CH93] ZHIHUA CHEN, MAMORU KAWAGUCHI, *Tensegrity System by Pantadome and Its Units*
- [SK09] ROBERT E. SKELTON, MAURICIO C. DE OLIVEIRA, *Tensegrity systems*, Heidelberg, DE, Springer, 2009, pp. 135-143.
- [sh@] SHELTER SYSTEMS, San Mateo, US-CA, < <http://www.shelter-systems.com/>>

### 2.2.6. Strutture scorrevoli.

Le strutture scorrevoli sono meccanismi che si basano sulla ripetizione di moduli uguali disposti in serie. Nella maggior parte dei casi, il movimento ha direzione lineare, e i vari moduli in configurazione chiusa si raccolgono su piani paralleli ravvicinati. Una realizzazione più complessa è data da strutture scorrevoli a movimentazione periferica. Qui le barre formano una catena chiusa circolare e realizzano un meccanismo che, in configurazione chiusa, lascia completamente libera l'area centrale. Il fatto che la catena cinematica sia chiusa è causa della maggior complessità del sistema e, rispetto alle catene aperte, pone di fatto notevoli limiti alle alternative d'assemblaggio tra le barre.

Il primo esempio di strutture che si aprano con movimento perimetrale si deve a Emilio Perez Pinero; egli nel 1961 brevetta una struttura a cupola costituita da barre curve. In configurazione aperta la struttura è piana con le barre poste all'estremità [AL79] [BE96] [ES92]. Durante il movimento le barre scorrono l'una rispetto all'altra. Il movimento è esteticamente simile a quello dei diaframmi delle macchine fotografiche, ma il principio su cui si basa è piuttosto quello delle sedie hunter, in questo caso un assemblaggio di più meccanismi base.

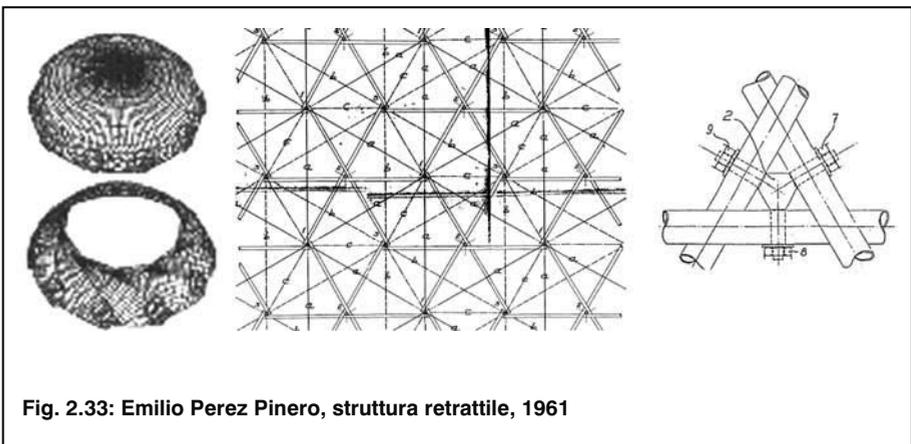


Fig. 2.33: Emilio Perez Pinero, struttura retrattile, 1961

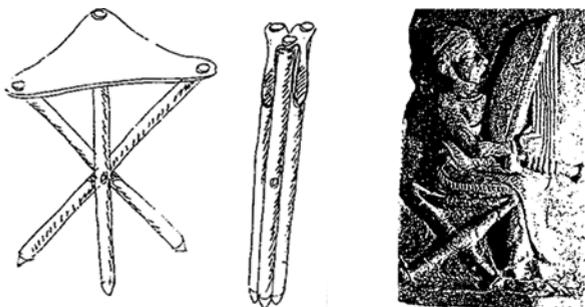


Fig. 2.34: Hunter Chair, Terracotta Babilonese del 2000 a.C

Note:

- [AL79] FRANCISCO ALEMÁN SAINZ, "Emilio Pérez Piñero o las formas que vuelan", in *Revista Murgetana*, n 56, 1979.
- [ES92] FELIX ESCRIG, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCEL, "La obra arquitectónica de Emilio Pérez Piñero", in *Boletín Académico*. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña, Universidade da Coruña, E, n.16, 1992, pg 3-12.
- [BE96] E.P. BELDA, "Constructive problems in the deployable structures of Emilio Perez Pinero", in CARLOS. A. Brebbis, FELIX ESCRIG,(a cura di), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, Computational Mechanics Pub, Southampton, Uk, Boston, USA, 1996.

### 2.2.7. Reciprocal frame

Le “reciprocal frame” o “reciprocal grid” sono strutture a cupola fatte da travi che si sorreggono vicendevolmente. Usate specie per strutture temporanee o fisse, se le barre sono disposte in modo tale da formare dei quadrangoli, anziché i più usuali triangoli, possono dare luogo a strutture pieghevoli con apertura perimetrale [SA99].

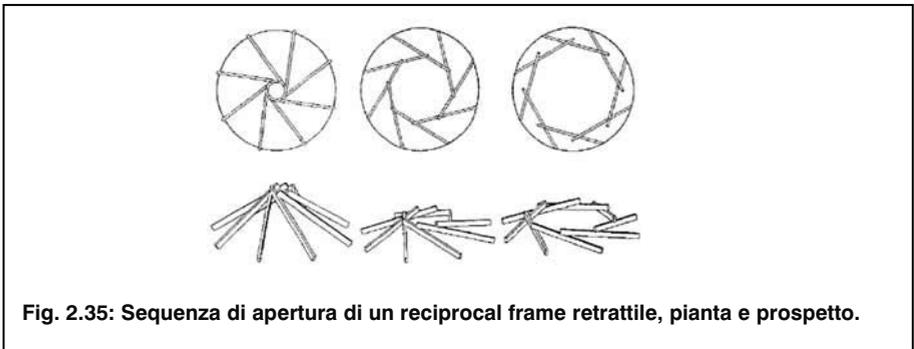


Fig. 2.35: Sequenza di apertura di un reciprocal frame retrattile, pianta e prospetto.

Il loro cinematiso è individuato sulla proiezione orizzontale dalla variazione del punto d'intersezione B tra due travi adiacenti rispetto all'angolo  $\alpha$  tra le travi.

In particolare, nel caso più semplice di un poligono regolare, la variazione dell'angolo della trave 2 rispetto all'asse x è dato da

$$\alpha_2 = \alpha_1 + 360/n$$

dove

$\alpha_1$  = l'angolo che la trave 1 forma con l'asse x

$$\alpha = s / [(\cos \alpha_1 \operatorname{sen} \alpha_2 / \sin \alpha_1) - \cos \alpha_2]$$

$\alpha_x$  rimane costante durante il movimento.

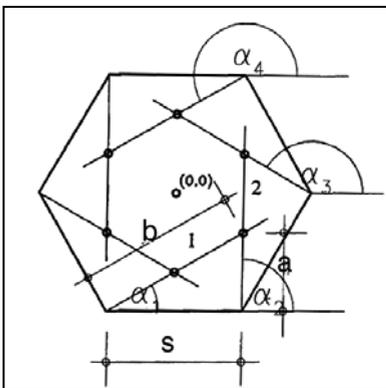


Fig. 2.36: Rapporto tra le dimensioni e direzioni delle aste (J. Chilton et al., 1995).

Noto l'angolo  $\alpha$  tra le travi in proiezione orizzontale, la distanza  $s$  tra i supporti perimetrali e il numero di barre  $n$ , si ottiene:

$$b = \alpha \sin \alpha_2 / \sin \alpha_1$$

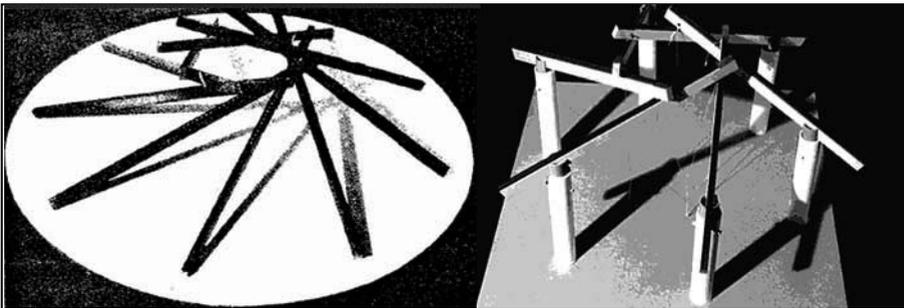
A seconda delle condizioni al contorno si possono ottenere due strutture diverse [PO96]:

Travi sostenute sull'estremità esterna:

Il vincolo esterno permette la rotazione sul piano orizzontale e verticale, impedendo le traslazioni, tuttavia all'interno le barre devono muoversi simultaneamente con una traslazione e due rotazioni.

Travi sostenute in un punto intermedio:

Il vincolo intermedio permette lo scorrimento verso l'esterno e due rotazioni; all'interno si ha lo scorrimento in una direzione nel punto di intersezione, E una soluzione più semplice costruttivamente.



**Fig. 2.37: A sinistra, Reciprocal frame retrattile con travi vincolate all'esterno; a destra, con travi vincolate in un giunto intermedio (J. Chilton et al., 1995).**

Entrambe le soluzioni, però, hanno dei problemi che ne hanno limitato fin ora le applicazioni pratiche, tra i quali soprattutto la scarsa efficienza strutturale dovuta all'alta inflessione delle travi e la necessità di studiare un sistema di rivestimento che possa seguire il movimento della struttura.

**Note:**

- [PO96] OLGA POPOVIC, *Reciprocal frame structures*, PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 1996,
- [CH95] JOHN CHILTON, BAN SENG CHOO, OLGA POPOVIC, "Reciprocal Frame Retractable Roofs", in G.C. Giuliani (a cura di), *Spatial Structures. Heritage, present and future*, Proceedings of the International Symposium, Milano, S. G. Editoriali, Padova, 1995, pg. 467-474 ,
- [SA99] MASSEOUD SAIDANI, OLIVIER BAVEREL, "Retractable multi-reciprocal grid structure", in *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 39, n. 2, 1998, pp. 141–146.

**2.2.8. Strutture estensibili.**

Le strutture estensibili possono essere definite come strutture che passano da una configurazione chiusa e compatta a una predeterminata forma estesa, nella quale sono stabili e in grado di sostenere carichi. In base a questa definizione, una struttura estensibile dovrebbe avere una forma geometrica estesa e una ritratta predefinite [ZU70]. Molte catene cinematiche mostrano una buona differenza tra la superficie occupata in configurazione aperta e chiusa, sia che la trasformazione avvenga attraverso un movimento di scorrimento, di rotazione, di piegatura o attraverso le loro combinazioni.

Quando si parla di strutture estensibili per l'architettura, caratteristiche quali la semplicità di realizzazione e la stabilità su ampie dimensioni relative sono requisiti importanti, Ad esempio, quando la superficie interessata è ampia, è necessario per evidenti questioni d'ingombri, ma anche di costo e sicurezza operativa, realizzare strutture estensibili composte da più moduli base. L'assemblaggio di molte catene cinematiche tra loro può essere difficile, specie se queste non hanno una forma iscrivibile in un parallelogramma e in generale se non sono simmetriche. Per queste ragioni, le strutture

estensibili decisamente più diffuse, semplici e studiate in applicazioni architettoniche sono le strutture a forbice e su di esse necessariamente il discorso si concentra.

#### Note:

[ZU70] WILLIAM ZUK, ROGER H. CLARK, *Kinetic Architecture*, New York, US-NY, Van Nostrand Reinhold, 1970, pp. 9-11.

### 2.2.9. Strutture a forbice bidimensionali.

Le strutture a forbice si basano sulla ripetizione di un elemento bidimensionale formato da due barre con cardini agli estremi, connesse tra loro in un punto intermedio attraverso una cerniera che ne permette la rotazione relativa impedendo qualsiasi altro movimento tra le barre.

Collegando tra loro più forbici si possono ottenere strutture modulari ad un solo grado di libertà, l'angolo di rotazione attorno alla cerniera intermedia.

Escrig descrive queste strutture come "l'assemblaggio di unità ciascuna delle quali composta da coppie di barre connesse da un giunto che ne permette una configurazione compatta e una aperta [GA01].

Più strutture a forbice disposte in sequenza possono formare strutture piane estensibili di qualsiasi forma, purché si rispettino delle compatibilità tra le barre:

perché la struttura sia piana deve essere:  $c/a = d/b$

perché sia pieghevole deve essere:  $c + d = e + e = 2e$

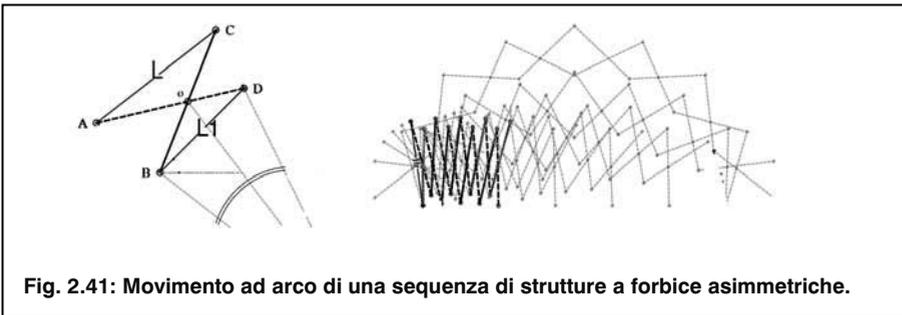
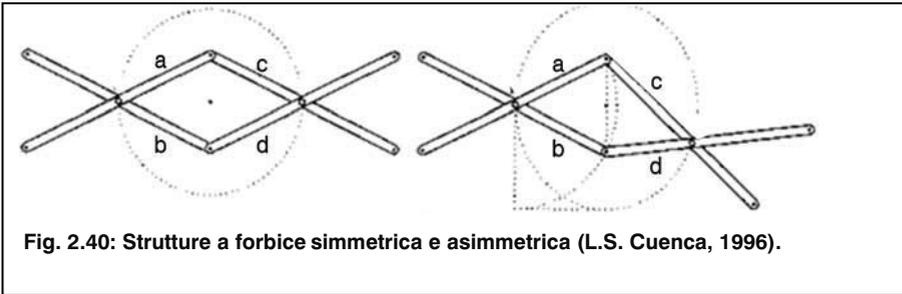
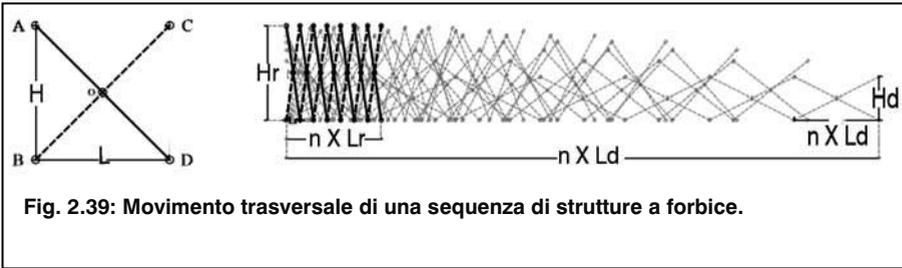
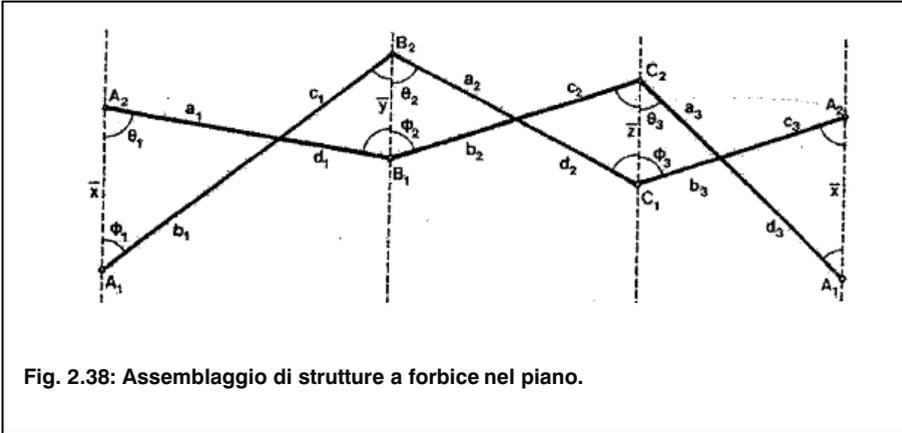
Le strutture a forbice così assemblate si estendono in sequenza lungo la direzione di sviluppo.

Spostando la cerniera da O verso le estremità si creano delle strutture

asimmetriche che possono essere usate per generare forme arcuate.

Note:

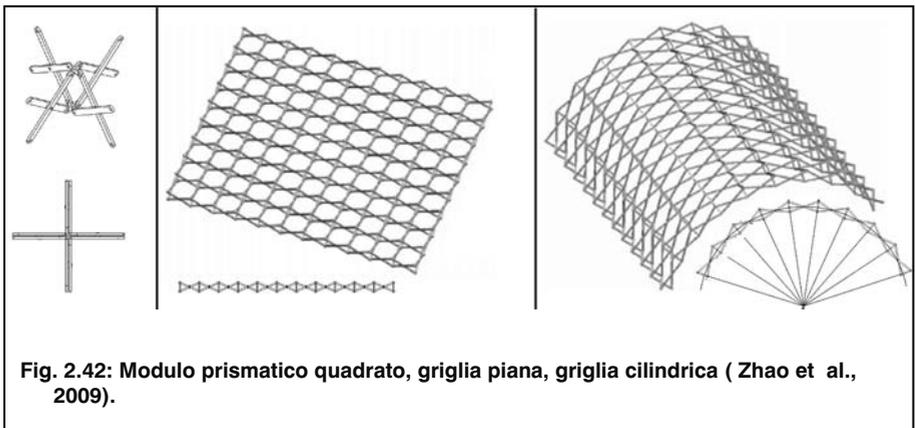
- [GA01] CHARS J. GANTES, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, U.K. WIT Press, 2001.
- [SA96] LUIS SANCHEZ-CUENCA, "Geometric models for expandable structures" In: F. ESCRIG, C.A. BREBBIA, *Editors, Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, Computer Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996, pp. 93.



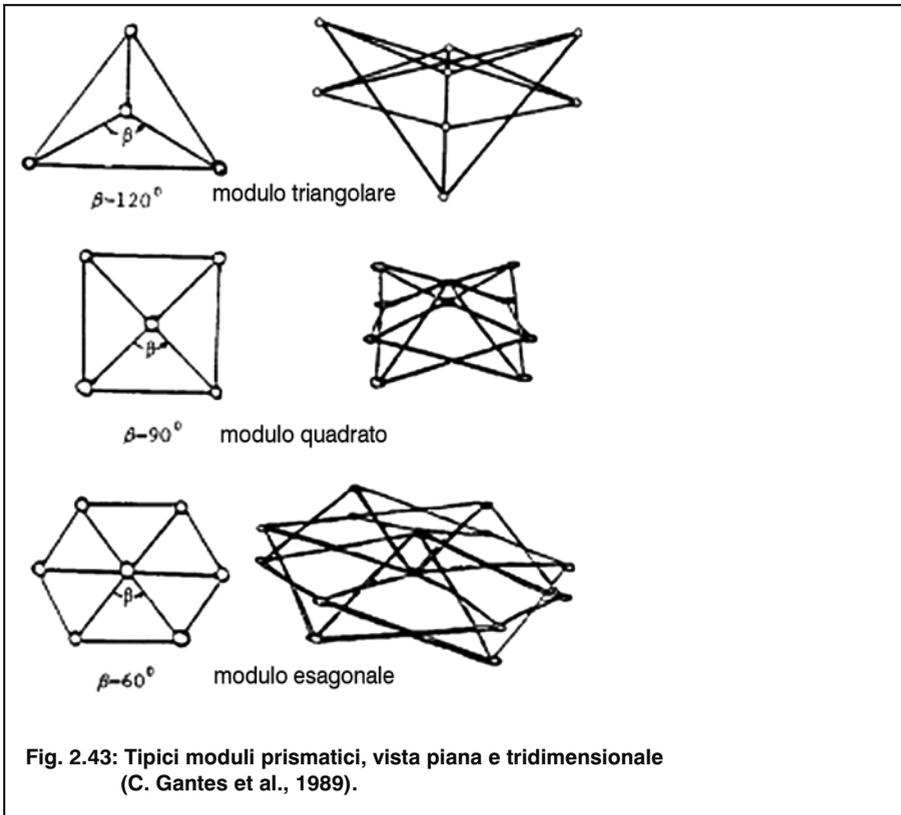
### 2.2.10. Strutture a forbice tridimensionali.

Le strutture a forbice sono usate anche per strutture 3D, piane o curve, ottenute da moduli prismatici formati da più forbici; i moduli base sono poi assemblati a creare delle tassellazioni del piano, coi vertici dei moduli a forbice disposti su due piani paralleli. Per creare maglie 3D piane si sviluppa una fascia di strutture a forbice con barre uguali, incernierate al centro e tutte uguali tra di loro. Le sequenze così formate di strutture parallele sono raccordate da delle fasce uguali disposte in direzione ad essi perpendicolare.

Per creare maglie 3D cilindriche si sviluppa una fascia di moduli a forbice uguali tra loro, ma dove la cerniera intermedia non è più al centro del modulo. Le sequenze così formate di strutture a forbice parallele sono raccordate da delle fasce di moduli a forbice tutti uguali e con cerniera centrale, in direzione perpendicolare alle prime.



Nel corso del tempo sono stati proposti vari moduli prismatici per realizzare meccanismi a forbice 3D.



Qualsiasi tipo di modulo si utilizzi, le strutture 3D mantengono sempre un grado di libertà, tuttavia strutture che formano griglie non triangolari (quadrati, ottaedri, ecc) sono instabili nel piano e perciò necessitano di elementi ausiliari di bloccaggio in configurazione aperta.

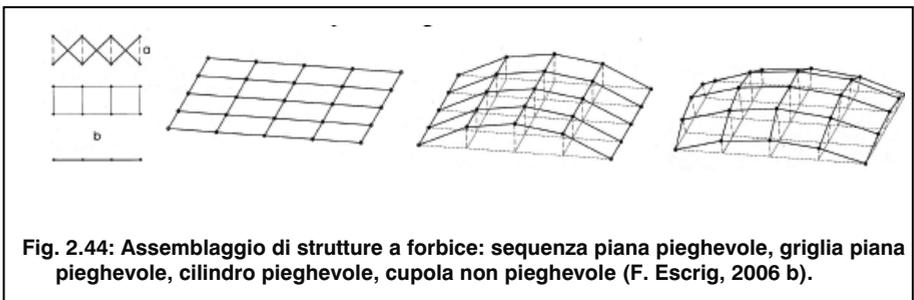
Viceversa, griglie a doppio strato triangolare sono geometricamente rigide e strutturalmente scariche in configurazione aperta e chiusa, ma le loro barre in fase di sviluppo subiscono un'inflessione che le indebolisce. Questa inflessione può essere un limite piuttosto importante perché la struttura a forbice di per sé non ha consistenza strutturale a parte lo spessore delle singole barre: il fatto che nelle strutture tridimensionali sia usato a realizzare delle griglie che si intersecano è una questione puramente geometrica che non influenza il comportamento strutturale.

Il primo a studiare le strutture a forbice a fini strutturali fu Emilio Perez Pinero che dal 1961 per un decennio lavorò a cupole e griglie piane per teatri mobili o padiglioni temporanei [CH00].

Le strutture proposte da Pinero sono sistemi estensibili a tamponamenti morbidi, e sono rivestite con membrane poste in opera a struttura aperta. Il rivestimento aiuta a sopperire la limitata resistenza a flessione del sistema a cerniere.

La struttura inoltre è a stabilizzazione manuale: circa il 25% delle barre sono rimosse prima di estendere la struttura, per poi essere reinserte o aggiungere dei cavi a struttura aperta. In questo modo l'estensione avviene senza sollecitazioni ed il sistema è scarico non solo nelle configurazione aperta e chiusa ma anche durante il movimento.

Rispetto alle griglie piane o cilindriche, le cupole sono più difficili da realizzare perché è necessario vagliare attentamente il modo attraverso il quale disporre i moduli. Procedendo per successivi assemblaggi di singoli moduli si può formare una trave, e così si possono intersecare più travi a formare una griglia cilindrica sviluppabile. La forma cilindrica non è però ulteriormente modificabile o assemblabile per realizzare una cupola pieghevole. Nella figura seguente, la cupola a destra non è pieghevole.

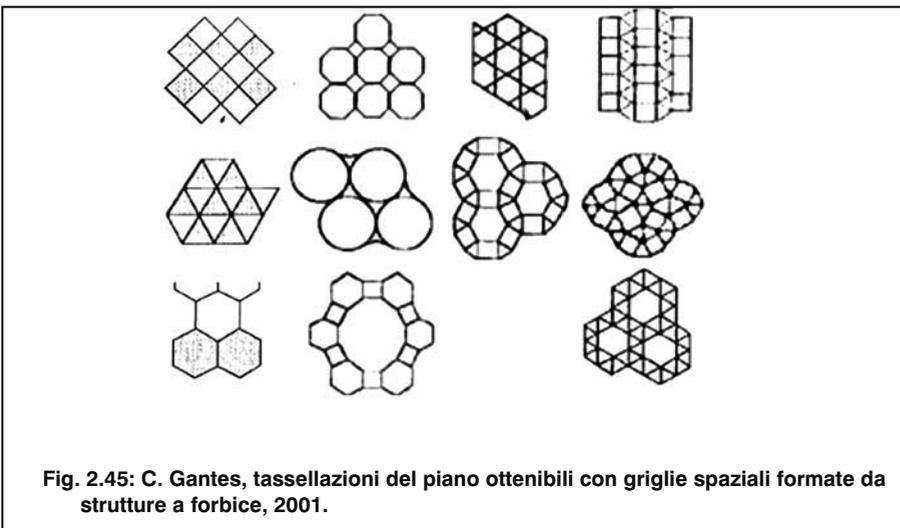


Nel corso del tempo sono state proposte diverse soluzioni per tracciare sulla sfera le generatrici dei fasci delle strutture a forbice, griglie di moduli tutti uguali, le più semplici e diffuse, strutture dove i moduli hanno

disposizione geodesica, griglie a meridiani e paralleli, griglie con generatrici disposte secondo le circonferenze massime [ES06b].

Gli studi successivi si sono rivolti da una parte a investigare le caratteristiche strutturali e i metodi di analisi cinematico strutturale dei sistemi di strutture a forbice, dall'altro a evidenziarne le possibilità creative.

Gantes ha approfondito sia dal punto di vista cinematico che strutturale lo studio di moduli prismatici triangolari che si adattino a superfici con più di una curvatura, e ha individuando le tassellazioni sia regolari sia irregolari che si possono realizzare [GA01].



Altra linea di ricerca è la possibilità di ottenere superfici con curvature varie o con più di una curvatura. Sanchez Cuenca propone un'analisi delle griglie 3D che mette in luce la varietà di curvature ottenibili purché si rispettino delle compatibilità geometriche e cinematiche, i piani che racchiudono i moduli possono essere generati da rette ma anche da rette segmentate [CU96].

Escrig presenta nel 1997 il modello di una struttura formata da due calotte sferiche e una superficie centrale cilindrica.

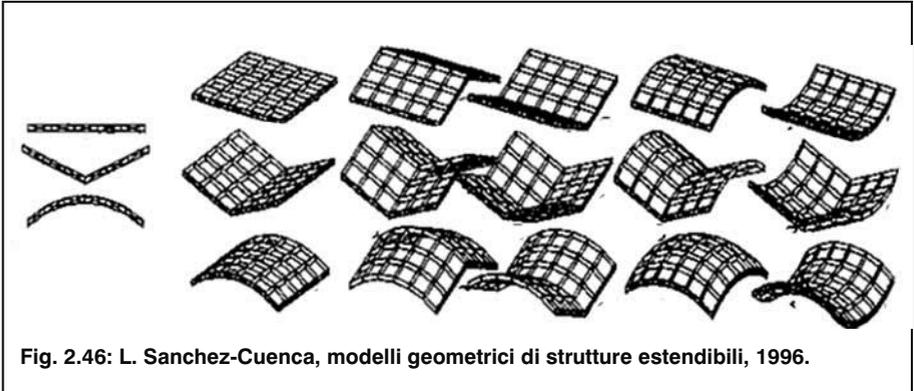


Fig. 2.46: L. Sanchez-Cuenca, modelli geometrici di strutture estensibili, 1996.



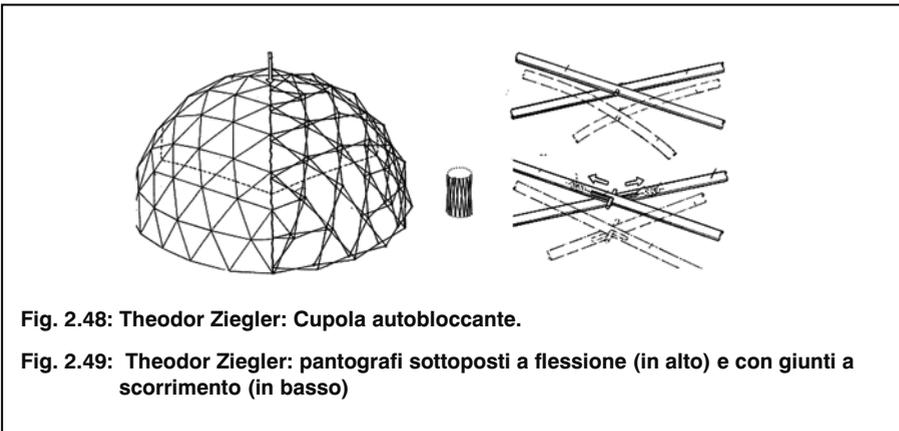
Fig. 2.47: Felix Escrig, Juan B. Pérez Valcárce, José Sánchez, modello di struttura estensibile a curvatura mista, 1997.

#### Note:

- [ES06b] FELIX ESCRIG, JOSÉ SÁNCHEZ, “New designs and geometries of deployable scissor structures”, in *Adaptables 2006, TU/e, International Conference On Adaptable Building Structures*, Eindhoven, NL, 2006.
- [CH00] JOHN C. CHILTON, *Space grid structures*, Architectural Press, Oxford, UK, Butterwoth Heinemann, 2000, pp. 131-156.
- [ZH09] JING-SHAN ZHAO FULEI CHU, ZHI-JING FENG, “The mechanism theory and application of deployable structures based on SLE”, in *Mechanism and Machine Theory*, n.44, 2009, pp. 324–335.
- [GA89] Chars J. Gantes, Jerome J. Connor, Robert D. Logcher, Yechiel Rosenfeld, “Structural Analysis and design of deployable structures”, in *Computers & Structures*, Vol.32, n. 3-4, 1989, pp.661-669.
- [GA01] CHARS J. GANTES, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, U.K. WIT Press, 2001.
- [SA96] LUIS SANCHEZ-CUENCA, “Geometric models for expandable structures” In: F. ESCRIG, C.A. BREBBIA, *Editors, Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, Computer Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996, pp. 93.
- [ES97] FELIX ESCRIG, JOSÉ SÁNCHEZ, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCE, “A new geometry for Cylindrical Deployable X-frames”, in *International Colloquium. Structural morphology*, Nottingham. 1997.

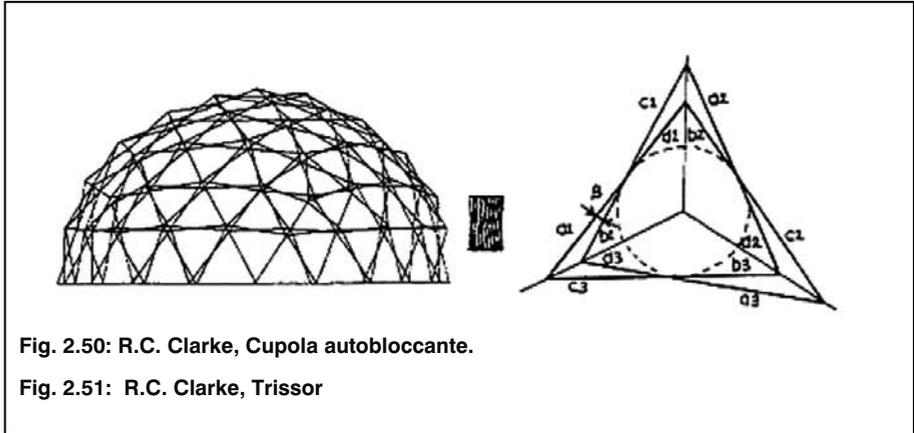
### 2.2.11. Strutture a forbice autobloccanti.

Zeigler nel 1976 brevetta la "*Collapsible Self Supporting Structure*" [ZE76], una struttura simile a quelli di Pinero [ES96], priva di alcune barre, ma autobloccante. Il bloccaggio è ottenuto inserendo delle barre di lunghezza maggiore del dovuto, così che s'infiatano in fase di sviluppo e tornino scariche, bloccando il sistema, in configurazione aperta. La struttura può essere richiusa applicando opportunamente una forza che produca un effetto a scatto come nel processo di apertura.



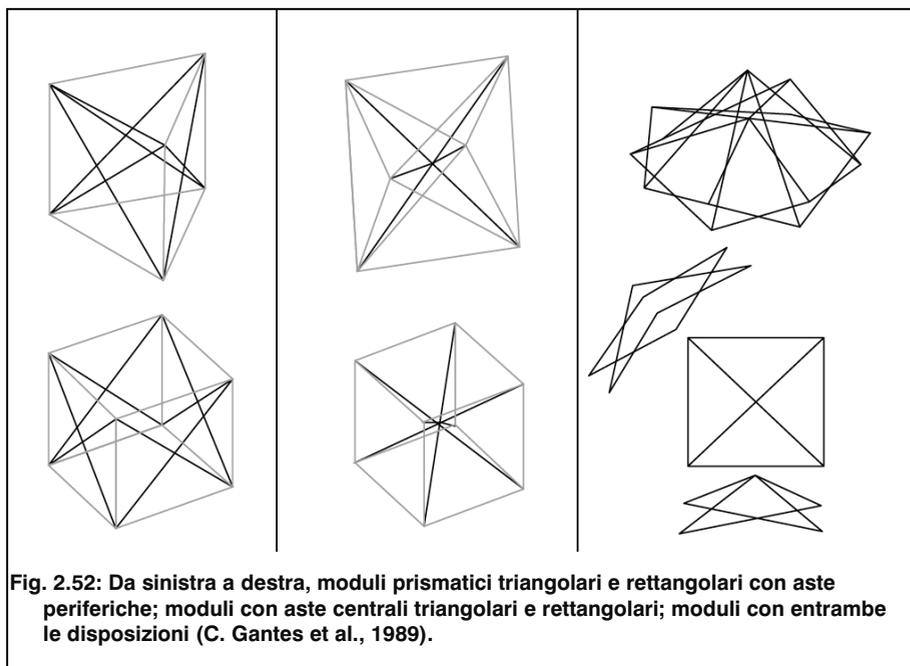
Nel 1984 Clarke presenta un prototipo di cupola che approfondisce e ottimizza il sistema a inflessione controllata [CL84]. Egli utilizza come moduli base dei "trissor", prismi triangolari formati da tre strutture a forbice.

Ancora Zeigler, per aumentare la resistenza della struttura, propone poi di sostituire alle barre sovradimensionate delle barre dotate di un sotto meccanismo a scorrimento o di clip [ZE77] [ZE84],



I prismi modulari finora visti sono costituiti da strutture a forbice poste lungo le diagonali dei prismi stessi, intersecanti nella cerniera centrale.

Le barre possono anche intersecarsi sul perimetro, risultando più dense ma generando strutture più resistenti. Krishnapillai nel 1992 propone un modulo prismatico dove le strutture a forbice sono disposte sia lungo le diagonali del prisma sia sulle facce del prisma [KR92]. Mentre i moduli laterali sono simmetrici al loro interno, quelli radiali sono asimmetrici e la loro conformazione permette di ottenere il bloccaggio in configurazione aperta. Da allora sono stati sviluppati vari moduli di questo tipo, nonostante l'elevato numero di aste che queste strutture comportano.



#### Note:

- [ES96] FELIX ESCRIG, "General Survey of Deployability in Architecture", in Proceedings of the MARAS 96 International Conference on Rapidly Assembled Structures II, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996
- [ZE76] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures*, US Patent n. 3,968,808, 1976.
- [ZE84] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures and panels and hub therefore*, US Patent n. 4,437,275, 1984.
- [CL84] R. C. CLARKE, "The kinematics of a novel deployable space truss structure system", in HOSHYAR NOOSHIN (a cura di) *Proceedings of the third International Conference on Space Structures*, Guildford, (1984), Elsevier, UK, 1984, pp 820-822.
- [KR92] ANANDAVISAM KRISHNAPILLAI, *Deployable Structures*, US Patent n. 5,167,100, 1992.
- [ZE77] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures*, US Patent n. 4,026,313, 1977.
- [ZE81] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures and panels and hub therefore*, US Patent n. 4,290,244, 1981.

### 2.2.12. Strutture estensibili tipo Bennett.

Queste strutture realizzano sistemi a sviluppo cilindrico o piano formati dalla ripetizione per giustapposizione di moduli uguali tra loro. Prendono il nome dall'unità minima costituente, una catena cinematica di quattro barre incernierate nota come connessione di Bennett [BE03].

In essa gli assi di rotazione sono perpendicolari ai membri, in altri termini la lunghezza dei membri rappresenta la distanza minima tra gli assi di rotazione. Descritta nel 1903, da allora sono state sviluppate diverse configurazioni per ottenere specifici movimenti, ma i primi a studiare strutture estensibili frutto della combinazione di unità minime furono Chen e You [CH08] [CH03] [CH05].

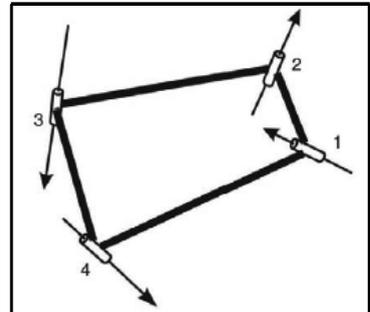


Fig. 2.47: Connessione di Bennett (Z. You, 2007).

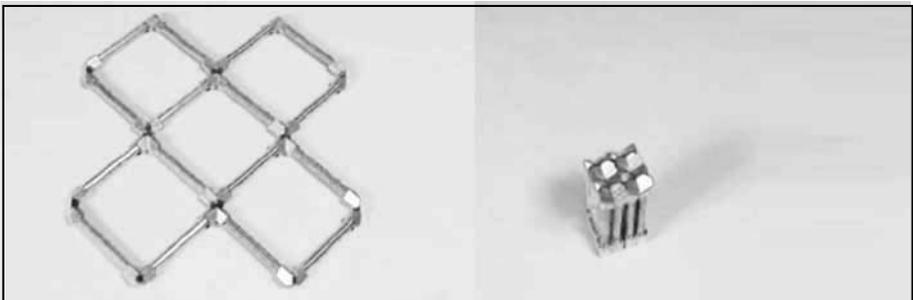
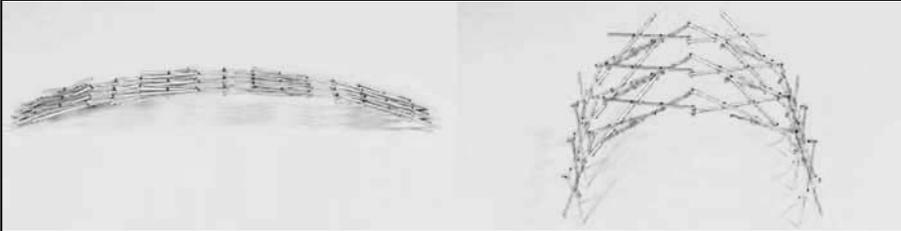


Fig. 2.54: Y. Chen, Struttura estensibile piana tipo Bennett, 2003.



**Fig. 2.55: Y. Chen, Struttura estensibile cilindrica tipo Bennet, 2003.**

A livello cinematico si possono ottenere strutture a sviluppo cilindrico o piano a seconda della lunghezza delle barre.

In particolare le strutture piane in configurazione chiusa sono raccolte in un fascio compatto e in configurazione aperta formano una tassellazione rombica. Le strutture cilindriche in configurazione aperta possono sottendere un arco di qualsiasi tipo in funzione della dimensione reciproca delle barre, ma risultano poco compatte in configurazione chiusa.

A livello strutturale le strutture estensibili tipo Bennet sono piuttosto resistenti nel piano per la presenza di vincoli sovrabbondanti, ma non sopportano bene i carichi fuori piano.

Le applicazioni architettoniche presentano alcune difficoltà: se l'uso di giunti a cerniera ne facilita la realizzazione, le problematiche strutturali sono un limite importante. Nei sistemi a estensione cilindrica, inoltre, un eventuale rivestimento dovrebbe essere necessariamente un rivestimento morbido applicato all'intradosso.

#### Note:

[BE03] GEOFFREY T. BENNETT, *A new mechanism*, in "Engineering", n. 76, 1903, pp. 777-778.

[CH03] YAN CHEN, *Design of Structural Mechanisms*, Ph.D. Thesis, University of Oxford, 2003

[CH05] YAN CHEN ZHONG YOU, *Mobile assemblies based on the Bennett linkage*, In *Proceedings of the Royal Society, Ser. A*, Vol. 461, 2005, pp. 1229-1245,

[CH08] YAN CHEN ZHONG YOU, *On Mobile Assemblies of Bennett Linkages*. In *Proceedings of the Royal Society, Ser. A*, Vol. 464, 2008, pp. 1275-1283,

[YO07] ZHONG YOU, *Motion Structures extend their reach*, in "Materials Today", Vol. 10, n. 12, 2007, pp.52-57.

### 2.2.13. Strutture a rotazione radiale.

Chuck Hoberman nel 1990 presenta una struttura a barre in grado di aprirsi lasciando completamente libera l'area centrale, l'Iris Dome [HO90].

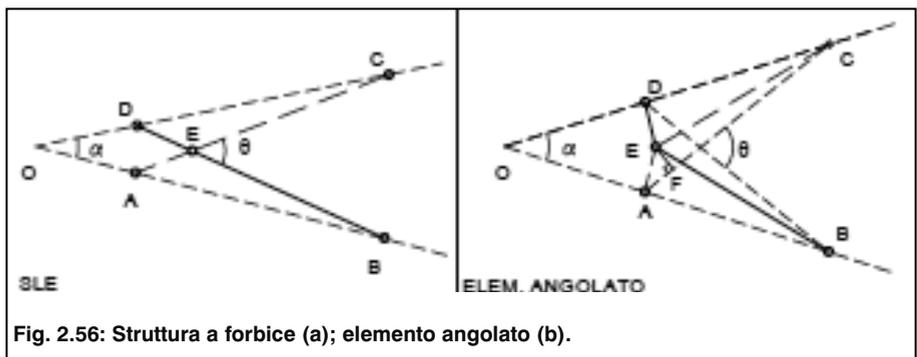
Se si connettono assieme sul piano diverse unità a forbice così da formare un cerchio, queste normalmente non possono muoversi perché procedendo verso il centro le barre tenderebbero a inflettersi e sovrapporsi. Gli angoli sottesi da barre piane a forbice disposte in una sequenza circolare sono tra loro legati dalla relazione:

$$\tan \alpha/2 = [(CF - AF) / AC] \tan \theta/2$$

Nelle barre usate da Hoberman, dette barre angolate, l'angolo  $\alpha$  si trova su un piano parallelo all'angolo  $\theta$  ed è legato all'angolo  $\theta$  dalla relazione

$$\tan \alpha/2 = [(CF - AF) / AC] \tan \theta/2 + 2 EF/AC$$

ponendo  $AF = CF$ ,  $\alpha$  rimane costante al variare di  $\theta$ . Si ottiene dunque un movimento perfettamente radiale.



Zong You e Sergio Pellegrino in studi più sistematici condotti successivamente notano come la soluzione proposta da Hoberman è un caso speciale che appartiene ad un tempo a due soluzioni generali, che chiamano GAE1 e GAE2 (*Generalized Angulated Elements 1-2*) [PE93] [PE97].

Un elemento angolato generalizzato (GAE) è un insieme di aste angolate interconnesse a formare una catena di un numero qualsiasi di parallelogrammi e triangoli isosceli (GAE tipo1) o triangoli simili (GAE tipo

2). In entrambi i tipi l'angolo  $\alpha$  è costante sia nella configurazione chiusa che in quella aperta

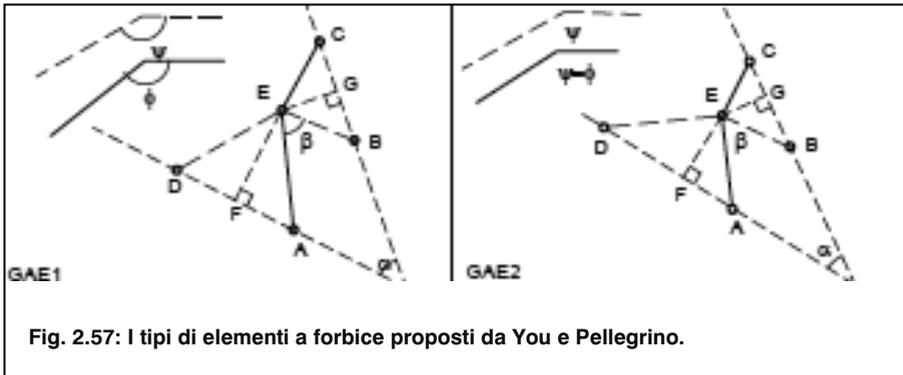


Fig. 2.57: I tipi di elementi a forbice proposti da You e Pellegrino.

In figura, nel tipo GAE1 i triangoli DEB e AEG sono simili, essendo  $DE:EB = AE : EC$ ; per costruzione geometrica necessariamente  $\alpha = 3 \times 180 - (SY+SF)/2 = \text{costante}$ .

Nel tipo GAE2 I triangoli DEB e AEG sono uguali ed isosceli, essendo  $CE = EB$ ,  $AE = ED$ , mentre  $Y \neq F$  per costruzione geometrica necessariamente  $\alpha = 180 - (Y+F)/2 = \text{costante}$

La proposta originaria di Hoberman appartiene ad un tempo a entrambe le soluzioni perché in essa l'elemento a forbice ha aste di lunghezza uguale, che formano anche due triangoli isosceli. In realizzazioni successive ha utilizzato elementi angolati non simmetrici, dove cioè  $AF \neq CF$  ma identici l'un l'altro, dove quindi  $AF = DE$ ,  $CE = BF$ , così da formare due triangoli isosceli DCE, ABF.

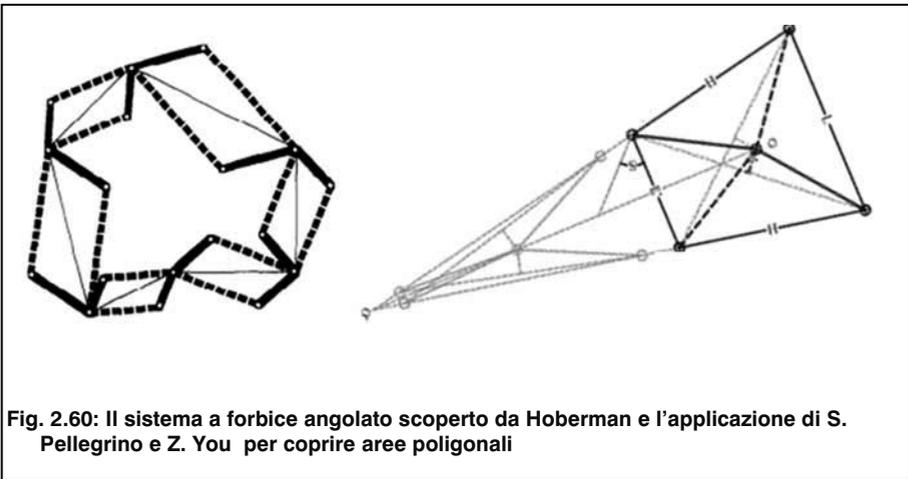
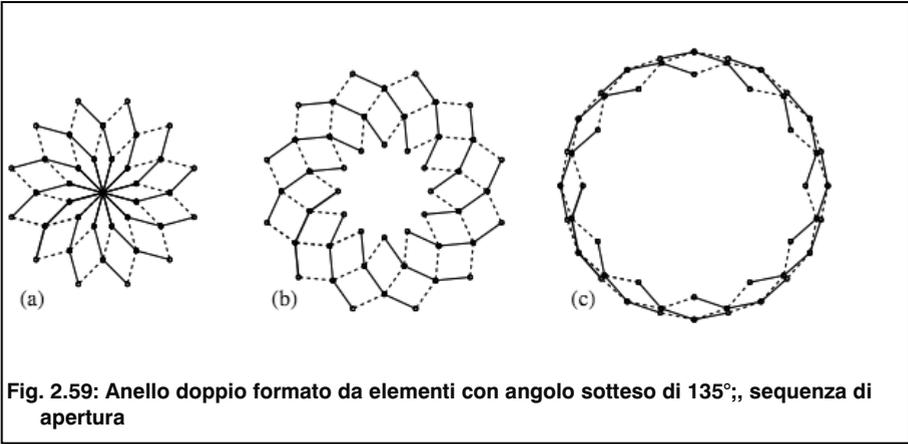
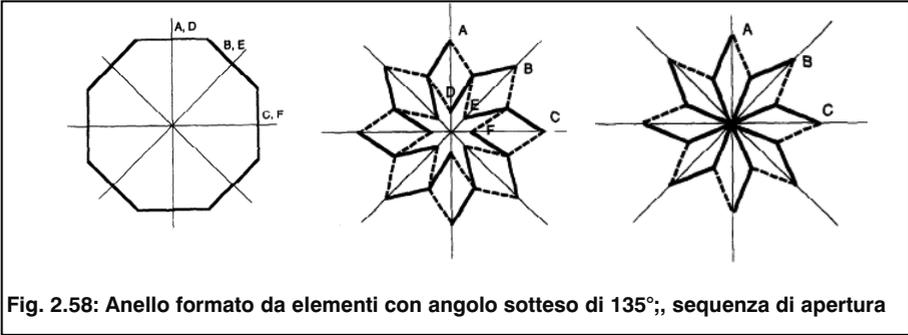
In ambedue i casi, ancora, si nota che la posizione reciproca tra barre appartenenti ad anelli diversi ma poste lungo uno stesso raggio rimane invariata. Le barre possono essere allora sostituite con un unico elemento costituito da aste connesse rigidamente secondo l'angolo che avrebbero le barre stesse: in questo modo si riduce sensibilmente il numero di

connessioni necessarie. L'insieme di barre vincolate tra loro rigidamente così individuate forma un elemento multi-angolato. Nonostante esistano altri meccanismi, come i diaframmi, che permettono una movimentazione radiale periferica, questo ha il vantaggio della semplicità, (le connessioni a 4 aste hanno gli stessi giunti delle strutture a forbice, che, si ricorda, sono costituite da due barre collegate da un giunto cilindrico, a cardine, che permette la sola rotazione relativa delle barre attorno al proprio asse, impedendo altre rotazioni e le traslazioni) e di aprire a una varietà di realizzazioni.

In tutti i casi, infatti, la forma più semplice da realizzare è una forma circolare, perché le barre si muovono radialmente dal perimetro verso il centro della superficie.

Per aperture piuttosto ampie o per particolari esigenze estetiche è possibile realizzare due anelli concentrici.

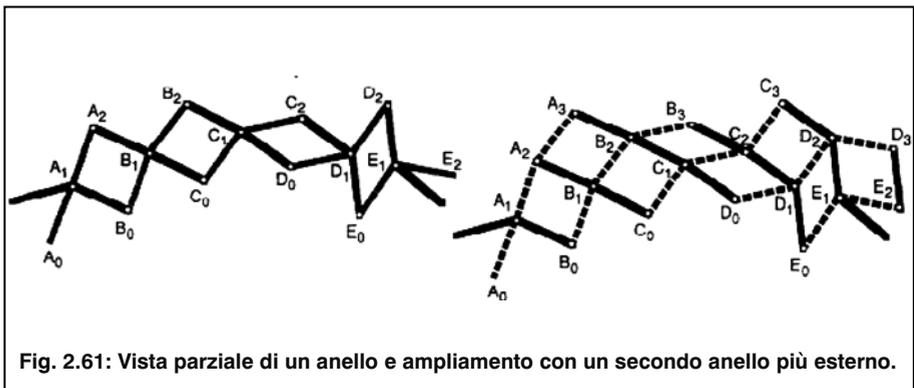
E' inoltre piuttosto probabile che la superficie che si vuole chiudere non sia circolare, ma sia una generica area racchiusa in un poligono. In questo caso, pur non esistendo una procedura standardizzata, Pellegrino e You suggeriscono di porre in corrispondenza di ogni vertice un elemento a forbice con lunghezza delle mezze aste pari alla metà del lato corrispondente del poligono considerato. Ogni elemento a forbice è del tipo GAE2, è cioè formato da triangoli simili con uguale angolo al vertice. Per costruzione, l'angolo al vertice è uguale all'angolo interno sotteso dal lato del poligono. In generale si ottengono in questo modo elementi angolati non simmetrici, e durante il movimento la struttura non si muove in modo uniforme in ogni punto, tuttavia, poiché i triangoli formati dalle barre sono simili, ogni anello complessivamente si muove uniformemente rispetto agli altri.



Nel caso in cui un solo anello non sia sufficiente a coprire la superficie desiderata, si aggiungono altri anelli, disponendo le nuove barre in modo tale da garantire che l'angolo al vertice  $\alpha$  rimanga costante.

Nella figura seguente, si mostra un estratto di un anello base e il successivo ampliamento realizzato aggiungendo una coppia di barre ad ogni elemento angolato  $A_0A_1A_2$ ,  $B_0B_1B_2$ , ecc..

La struttura è pieghevole perché tutte le barre possono ruotare rispetto al centro della superficie, ma le barre poste su uno stesso anello sottendono tutte il medesimo angolo  $\psi$ .



La presenza di eventuali assi di simmetria rende la realizzazione più facile perché deve essere posta minore attenzione nell'evitare interferenze di movimento tra coppie di barre di uno stesso anello. In questo caso, infatti, non è necessario che si utilizzino univocamente barre del tipo GAE2, purché si rispetti comunque il requisiti essenziali: angolo al vertice delle coppie angolate costante e uguale all'angolo interno sotteso dal lato del poligono, gli elementi angolati formano una catena di rombi simili le cui diagonali sono proporzionalmente ridotte passando da un anello interno ad un anello più esterno.

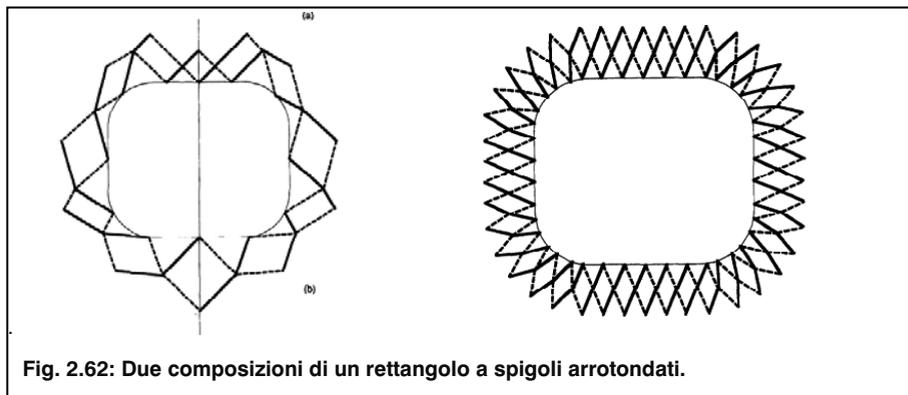


Fig. 2.62: Due composizioni di un rettangolo a spigoli arrotondati.

Su questa linea di ricerca Rodriguez sta portando avanti delle applicazioni architettoniche che mirano a rendere simultaneo il meccanismo e ad implementarne le applicazioni architettoniche [RO00] [RO03] .

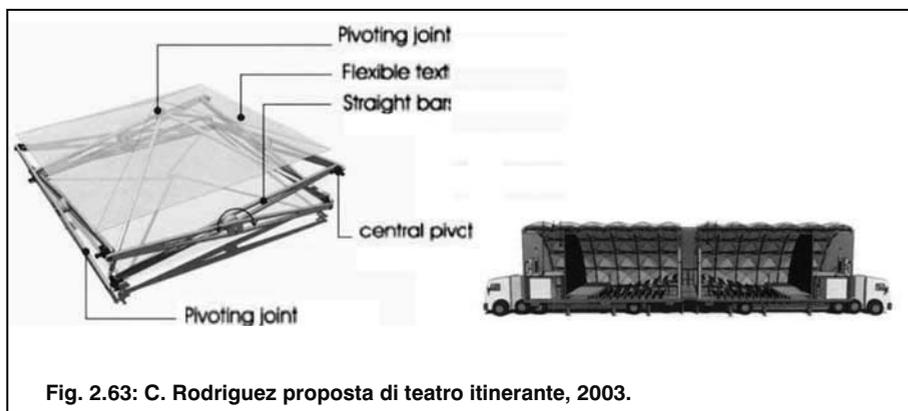


Fig. 2.63: C. Rodriguez proposta di teatro itinerante, 2003.

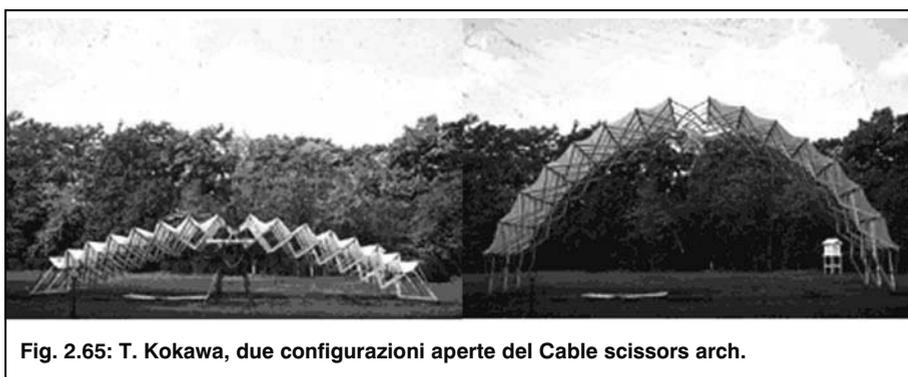
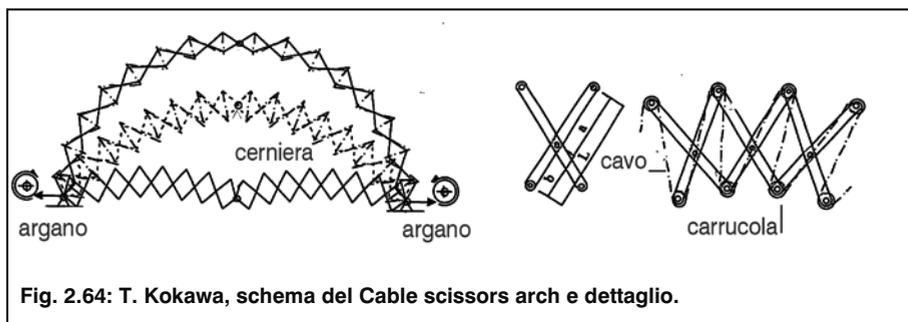
Note:

- [PE97] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, FOLDABLE BAR STRUCTURES, IN INTERNATIONAL JOURNAL OF SOLIDS AND STRUCTURES, N. 34, 1997, PG. 1825-1847.
- [PE93] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, FOLDABLE RING STRUCTURES, IN SPACE STRUCTURES 4, G. A. R. PARKE, C. M. HOWARD, (A CURA DI), THOMAS TELFORD, 783-792, 1993
- [RO00] CAROLINA RODRIGUEZ, ARQUITECTURA METAMÓRFICA. ICFES, COLOMBIAN INSTITUTE FOR THE SUPERIOR EDUCATION, BOGOTÁ, CO, 2000.
- [RO03] CAROLINA RODRIGUEZ, JOHN C. CHILTON, SWIVEL DIAPHRAGM. A NEW ALTERNATIVE FOR RETRACTABLE RING STRUCTURES, IN INTERNATIONAL JOURNAL OF SPACE STRUCTURES, VOL. 44, N. 143, 2003, PP 181-188
- [HO90] CHARLES CHUCK HOBERMAN, Reversibly Expandable Doubly-curved Truss Structures., US Patent 4,942,700, 1990.

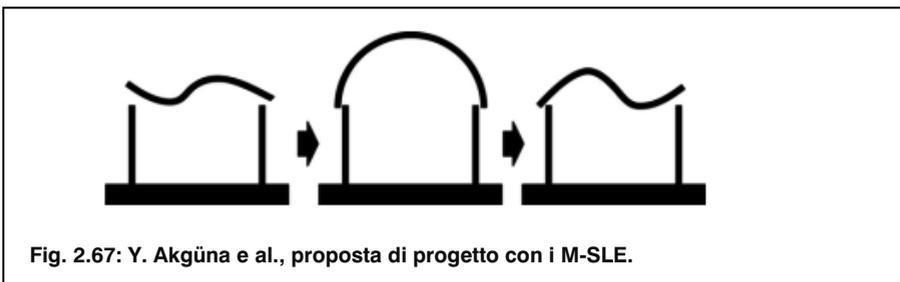
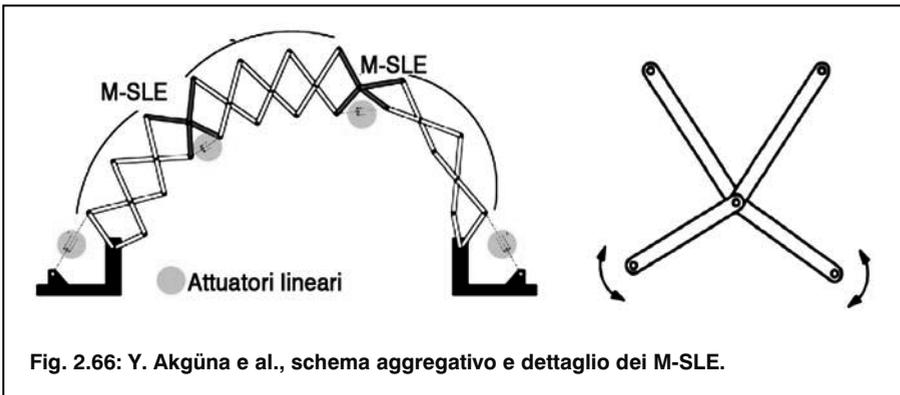
### 2.2.14. Strutture bi stabili.

La cinematica delle strutture a forbice è stata molto approfondita dalla comunità scientifica, ma gli studi su questi sistemi sono ad oggi lontani dall'essere considerati conclusi, essendo diretti su una linea di investigazione nuova: la possibilità di ottenere strutture bi – stabili, dove sia possibile avere due configurazioni stabili aperte.

Nel 1997 Kokawa presenta il *Cable scissors arch*, o *marionettic structure*, un arco estensibile a forbice dove il modulo centrale è formato da quattro barre incernierate e dove un cavo attraversa con un percorso a zig-zag la struttura [KO97]. Il cavo, mosso da due argani posti nei punti di appoggio dell'arco, a livello cinematico avvia e controlla il movimento, a livello strutturale garantisce una buona stabilità in ogni posizione, offrendo lo stato di tensione di volta in volta opportuno.



Passare da un arco simmetrico a curvatura variabile come nell'esempio sopra a una sequenza di archi a curvatura variabile: questo è quanto si propone di realizzare un gruppo di lavoro dell'ILEK di Stoccarda- insieme a Gantes [AK10]. Il gruppo propone nel 2007 i *Modified Scissor-Like Elements* M-SLE, strutture a forbice dove le due barre incernierate assieme in un punto intermedio sono state sostituite da quattro barre incernierate insieme ad un'estremità comune [AK07]. Ogni barra del modulo è quindi libera di ruotare nel piano indipendentemente dalle altre. Porre questi elementi in una sequenza di strutture a forbice standard permette di avere delle soluzioni di continuità nella curvatura della struttura. In configurazione aperta, la combinazione dei cinematismi interni con la distanza fissa tra le barre eterne fa sì che una modifica in un tratto della sequenza, il passaggio da concava a convessa ad esempio, produca effetti anche nelle sequenze successive, controllati da degli attuatori posti nelle strutture a forbice modificate.



## Note:

- [KO97] TUTOMU KOKAWA, “Cable scissors arch-marionettic structure. Structural morphology, towards the new millennium”, in *Proceeding of international conference of IASS*, Venezia, IT, 1997, pp. 107-114.
- [AK07] YENAL AKGÜNA, WALTER HAASE, WERNER SOBEK, “Proposal for a new scissor-hinge structure to create transformable and adaptive roofs”, in *Proceeding of international association of spatial structures symposium*, Venezia, IT, 2007.
- [AK10] YENAL AKGÜNA, CHARIS J. GANTES, KONSTANTINOS E. KALOCHAIRETIS, GÖKHAN KIPER, “A novel concept of convertible roofs with high transformability consisting of planar scissor-hinge structures”, in *Engineering Structures*, n. 32, 2010, pp. 2873-2883.

### Cap.2.3. Strutture per punti, tamponamenti rigidi.

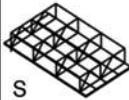
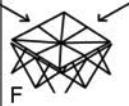
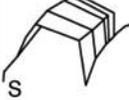
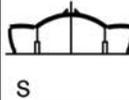
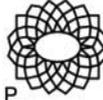
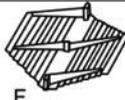
Strutture		Cinematismo	parallelo	centrale	circolare	periferico
Strutture per punti, tamponamenti rigidi	Strutture estensibili.	piegatura				
	Strutture pieghevoli a sollevazione	piegatura				
	Strutture a rotazione radiale	rotazione				
	Strutture composte.	rotazione				
Morfologia di chiusura, legenda: F fascio P piano S sezione						

Fig. 2.68: Strutture per punti a taponamenti rigidi.

### **2.3.1. Introduzione: morfologia e cinematica.**

Le strutture per punti a tamponamenti rigidi sono dotate, a livello strutturale, di una capacità di carico lungo tutta la loro superficie dovuta al materiale di tamponamento. Presentano in linea generale maggior resistenza rispetto ai tamponamenti morbidi tanto che possono trovare impiego in ruoli funzionali precluse ai tipi di struttura precedentemente esaminati: possono così realizzarsi solai, facciate, ed anche le coperture possono affrontare condizioni meteorologiche avverse (neve in primis).

A livello cinematico, queste strutture hanno in linea di principio il medesimo comportamento delle strutture a tamponamenti morbidi. L'associazione con elementi rigidi, però, ne può restringere notevolmente le possibilità cinetiche. Il tamponamento deve essere progettato in modo tale che il suo movimento si calibri su quello della struttura, rispetto alla quale è però molto più ingombrante. Accade spesso, ad esempio, che il tamponamento sia suddiviso in superfici relativamente piccole, così che esse siano meglio adattabili alla sottostruttura. In altri casi un cinematismo di per sé idoneo allo scopo è modificato e adattato agli ingombri imposti dal compromesso tra le dimensioni della struttura e quelle del tamponamento.

Gli studi per ottenere una medesima configurazione aperta e chiusa possono portare a soluzioni diverse a tal punto che anche sotto questo profilo meritano una trattazione a parte.

Benché le possibilità formali di configurazione aperta e chiusa siano più limitate, gli esiti di questo doppio movimento possono essere esteticamente molto interessanti. Uno dei primi esempi di struttura a barre con tamponamento rigido è la serie di modelli realizzati da Piñero [CH00] per una scultura pieghevole in vetro commissionatagli da Salvador Dalí.

La struttura, semplicemente appesa, era costituita da quadrati in vetro inseriti in una maglia cubica di barre [SA79] [ES92].

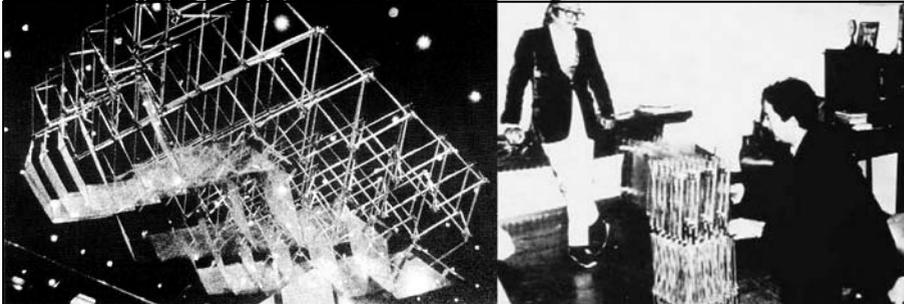


Fig. 2.69: E.P. Piñero modello per struttura pieghevole con tamponamento rigido, configurazione aperta e chiusa.

#### Note:

- [CH00] JOHN C. CHILTON, *Space grid structures*, Architectural Press, Oxford, UK, Butterworth Heinemann, 2000, pg 131-156.
- [SA79] FRANCISCO ALEMÁN SAINZ, *Emilio Pérez Piñero o las formas que vuelan*, in *Revista Murgetana*, n 56, 1979.
- [ES92] FELIX ESCRIG, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCCEL, *La obra arquitectónica de Emilio Pérez Piñero*, in *Boletín Académico*. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña, Universidade da Coruña, E, n.16, 1992, pg 3-12.

### 2.3.2 Strutture estensibili.

Il gruppo di ricerca facente capo alla Universidad de La Coruña, già molto attivo nello studio dei sistemi a pantografo e delle loro potenzialità architettoniche, propone nel 1993 due tipi di tamponamento rigido per strutture a pantografo, griglie piane o cilindriche [VA93]. In entrambi si ipotizza un poligono la cui area copra in posizione aperta la superficie superiore di un modulo a pantografo; il poligono così disegnato viene suddiviso in triangoli i lati dei quali sono bisettori degli angoli del poligono stesso. Tra i vertici dei triangoli così creati, quelli esterni, corrispondenti agli spigoli del poligono iniziale, sono incernierati alle estremità superiori dei

pantografi mentre i restanti vertici, posti sull'interno, rimangono liberi.

I pannelli proposti sono ideati per poligoni a base romboidale e triangolare, anche se in quest'ultima soluzione la struttura non può essere aperta completamente.

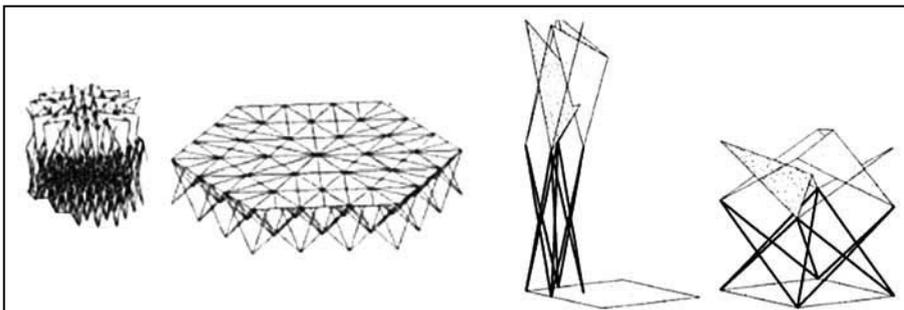


Fig. 2.70: J. B.P. Valcárcel, F.Escrig, E.M. Gutierrez, Pannelli per moduli a pantografo con base romboidale, 1993.

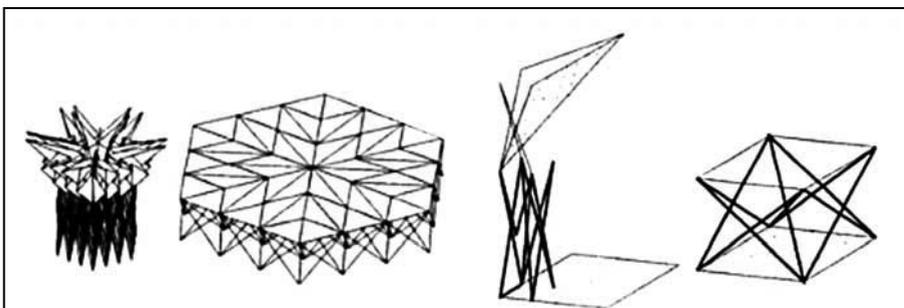


Fig. 2.71: J. B.P. Valcárcel, F.Escrig, E.M. Gutierrez, Pannelli per moduli a pantografo con base triangolare, 1993.

Note:

[VA93] JUAN B. PÉREZ VALCÁRCCEL, FÉLIX ESCRIG PALLARÉS, EMILIO MARTÍN GUTIERREZ, *Expandable domes with incorporated roofing elements*, in PARKE G. A. R., HOWARD C. M. (a cura di), *Space structures 4. International conference on space structures*, 1993, London, Thomas Telford, 1993, pg. 803-814.

### **2.3.3. Strutture pieghevoli a sollevazione.**

Le strutture a sollevazione permettono la realizzazione di grandi strutture in tempi molto rapidi con notevoli risparmi economici, di tempo e di sicurezza in costruzione. Le strutture, infatti, sono assemblandole a terra, poi elevate rapidamente alla quota voluta ed infine bloccate con un sistema di fissaggio [ES96].

Esse sono ampie coperture di forma piana o curva: un primo esempio di notevoli dimensioni si ha già nel 1970, con la Grand Roof progettata da Kenzo Tange per l'Expo di Osaka del 1970. Il meccanismo, sviluppato da Candela e Mamoru Kawaguchi utilizzava dei martinetti pneumatici per sollevare l'enorme copertura in acciaio (100 x 300 x 7,6m). Si tratta però di una struttura piana, che comporta un meccanismo più semplice delle strutture a cupola.

Buckminster Fuller aveva già cercato la possibilità di assemblare a terra ampie strutture curve: ad Honolulu, nel 1957, costruì una torre temporanea che doveva sollevare tramite dei cavi la copertura; due anni dopo presso il Wood River, conformò parte della copertura come un sistema a pallone.

Tra le soluzioni di seguito riportate c'è il Pantadome, un sistema ideato da Kawaguchi stesso. Il sistema è oggi il più diffuso e apprezzato per realizzare coperture di questo genere perché gode del vantaggio, rispetto a soluzioni alternative, di avere un meccanismo ad un grado di libertà, ed è quindi facilmente controllabile.

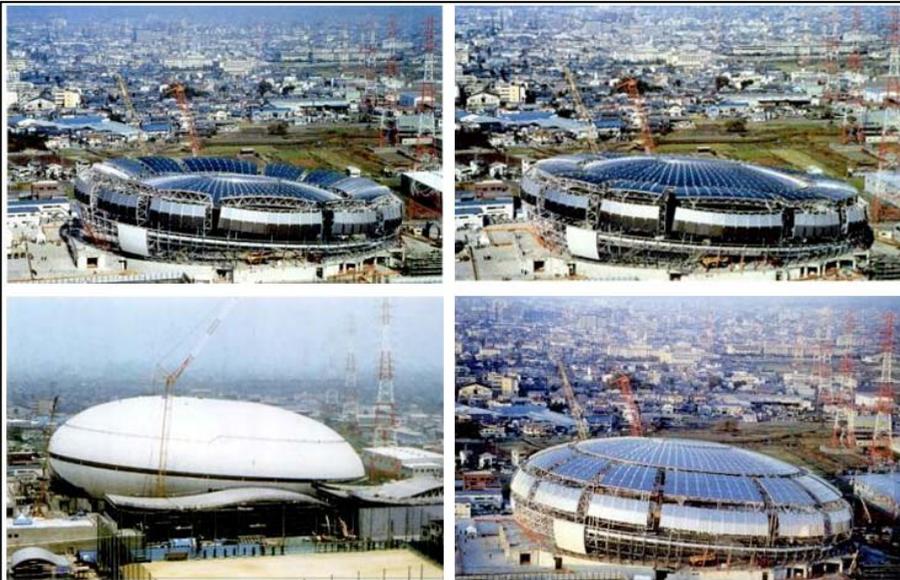
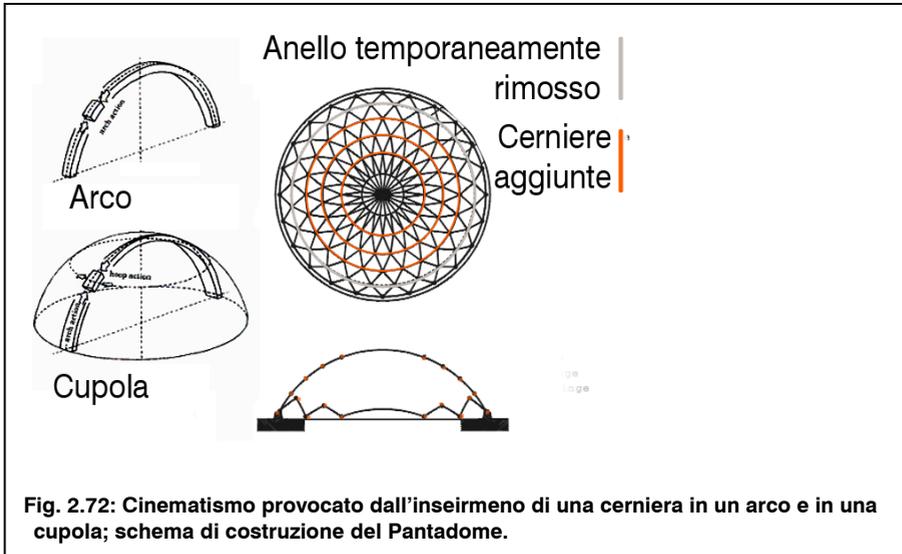
L'ing. Mamoru Kawaguchi, che ha brevettato la struttura, scelse il nome "Pantadome" perché inserì nel sistema un meccanismo a cerniera, come nelle strutture a forbice [AB02].

L'idea è quella di realizzare la struttura a cupola eliminando uno o più anelli circolari, inserendo delle cerniere, in modo tale da renderla labile. Poiché si tratta di una struttura 3D, si ottiene un cinematismo ad un grado di libertà e

la struttura è stabile alle spinte laterali, come il vento. La realizzazione ha inizio con il fissare nei punti stabiliti le piattaforme di sollevamento provvisorie, montando sopra di esse la struttura d'acciaio; successivamente, si installano gli impianti (elettrici, meccanici, antincendio ecc) della copertura; a questo punto può iniziare il movimento: si avviano i martinetti idraulici, 4 per ogni nodo stabilito, il processo di sollevamento prevede soste intermedie perché si controlli l'orizzontalità delle parti. Raggiunta la posizione voluta, si fissa la parte di struttura mancante, mantenendo alcune cerniere in modo da favorire la risposta della copertura alle sollecitazioni in fase di esercizio; si rimuovono infine i sistemi di sostegno. In alternativa ai martinetti idraulici si possono usare sistemi pneumatici [CH00] [PA02]. Introdotto nella World Memorial Hall, a Kobe nel 1984, il sistema è stato usato anche per coperture molto ampie, come la Coal Storage, L 251m, H 30m (2001), e con tecniche speciali, come la direzione di elevazione inclinata della Namihaya Dome, sollevata in appena 8h30' (1997) [KA08].

#### Note:

- [ES96] FELIX ESCRIG, General survey of deployability in architecture, in CARLOS A. BREBBIA, FELIX ESCRIG (a cura di), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, conference proceedings, Seville, Wessex Institute of Technology, UK, University of Seville, E, 1996.
- [AB02] MASARU ABE, MAMORU KAWAGUCHI, *On Some Characteristics of Pantadome System*, in *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Proceedings of the International Symposium, Warsaw, Micro Publisher Jan B. Obrebski, 2002, pg. 50-57.
- [KA08] MAMORU KAWAGUCHI, *The design of structures, from hard to soft*, in GUY NORDENSON, FÉLIX CANDELA, *Seven structural engineers: the Felix Candela lectures*, The Museum of Modern Art, New York, US-NY, 2008, pg 103-111
- [CH00] JOHN C. CHILTON, *Space grid structures*, Architectural Press, Oxford, UK, Butterwoth Heinemann, 2000, pg 139-151.
- [PA02] GERARD A R PARKE, PETER DISNEY (a cura di), *Space structures 5*. Proceedings of the fifth international conference on space structures, Guilford, London, UK, Thomas Telford, 2002, pg 139-151

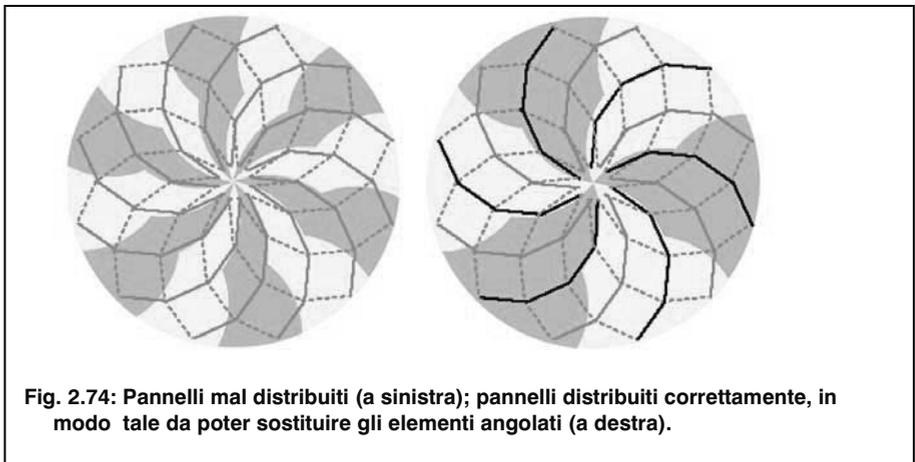


### 2.3.4. Strutture a rotazione radiale.

Si è visto nel precedente capitolo che è possibile sostituire a una sequenza di barre del tipo GAE1 o GAE2 un unico elemento detto elemento multi angolato [PE93]. L'utilità della sostituzione risiede nel diminuire il numero di barre ma anche nel facilitare e rendere più evidente i modi attraverso quali coprire un'apertura di questo tipo con pannelli rigidi. La loro forma è sostanzialmente triangolare e si ottiene suddividendo la superficie in spicchi uguali tra loro, ciascuno dei quali ha un lato ad arco di cerchio, con raggio uguale a quello del cerchio da coprire e lunghezza pari al segmento di circonferenza corrispondente. Il fissaggio avviene collegando ogni pannello ad un elemento angolato o ad un insieme di barre corrispondenti [PE97] [PE01].

La forma degli spicchi di copertura può essere ottimizzata così da tenere conto della dimensione dei giunti e così da minimizzare, in posizione chiusa, le aree di sovrapposizione tra spicchi adiacenti [LU07].

In figura, se un pannello da solo non copre l'intero elemento angolato si aumenta la dimensione del pannello, diminuendone il numero complessivo, così che ogni pannello segua il movimento di un elemento angolato e possa andare a sostituirlo.



**Note:**

- [PE97] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, Foldable bar structures, in *International Journal of Solids and Structures*, n. 34, 1997, pp. 1825-1847.
- [PE93] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, *Foldable Ring Structures*, in *Space Structures 4*, G. A. R. Parke, C. M. Howard, (a cura di), Thomas Telford, 783-792, 1993
- [PE01] SERGIO PELLEGRINO, *Deployable structures*, Berlino, DE, Springer, 2001.
- [LU07] YAOZHI LUOA, DECAN MAOA, ZHONG YOU, *On a type of radially retractable plate structures*, in *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, n. 10, 2007, pp 3452-3467.

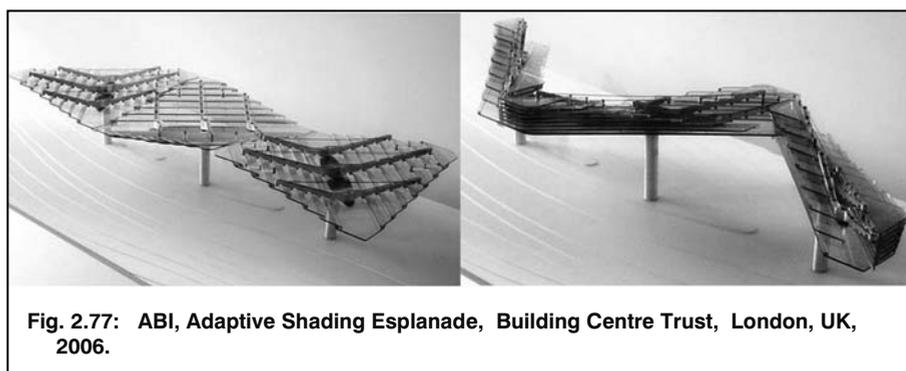
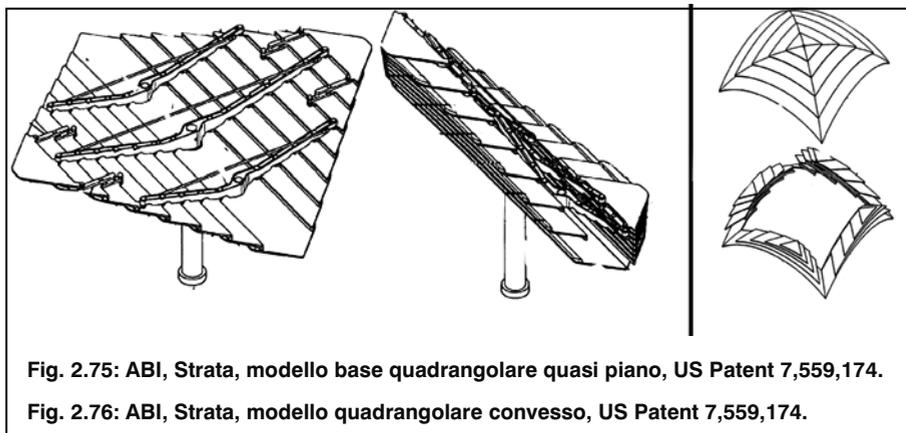
**2.3.5. Strutture composte.**

Possono essere definite strutture composte quelle costituite da barre portanti e rivestimento collaborante.

Tra queste, Hoberman con Happold hanno proposto una serie di sistemi di oscuramento genericamente adattabili a facciate o coperture intelaiate. In uno dei più versatili, dei pannelli di forma oblunga occupano l'area da oscurare, disposti paralleli tra loro e traslati uno rispetto al successivo nel piano perpendicolare alla superficie. I pannelli sono incernierati a due o più aste di forma scanalata [HO09].

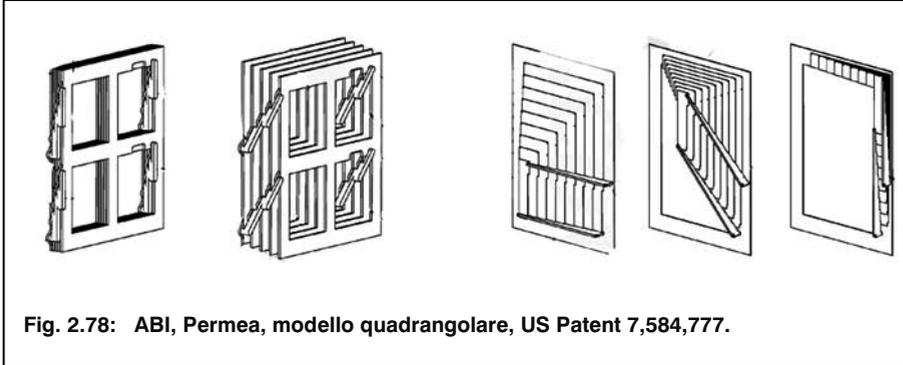
Ruotando un'asta, l'altra o le altre nonché tutti i pannelli ruotano con essa. Grazie al movimento, il sistema passa da una posizione chiusa nella quale tutti i pannelli sono sovrapposti a una posizione aperta nella quale i pannelli sono affiancati a oscurare un'area di forma genericamente poligonale.

Data la forma scanalata delle aste, utilizzando pannelli con un profilo esterno convesso o concavo si può ottenere una superficie esternamente curva. Il sistema, chiamato "Permea", nel 2006 è stato proposto per Il Building Center Trust.



Su principi analoghi Hoberman e Happold hanno proposto nello stesso periodo il sistema “Permea” [H009], utilizzato da Foster per la copertura dell’Aldar Central Market ad Abu Dhabi. Anche in questo caso dei pannelli sono disposti paralleli tra loro, traslati sul piano perpendicolare alla superficie e incernierati a delle aste libere di ruotare.

Grazie alla rotazione delle aste, il sistema passa da una posizione chiusa nella quale tutti i pannelli sono sovrapposti a una posizione aperta nella quale i pannelli sono affiancati a oscurare un’area di forma genericamente poligonale. In questa soluzione, però, i pannelli possono assumere forme più complesse. Il moto degli uni rispetto agli altri, infatti, può avvenire senza intralci se s’impone una rotazione delle aste di non oltre 90°.

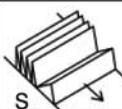
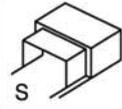
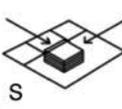
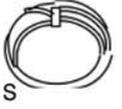
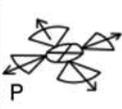
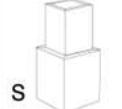
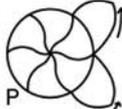
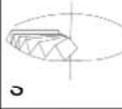
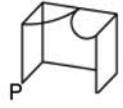
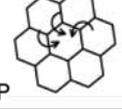
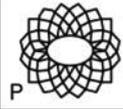
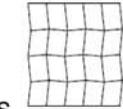
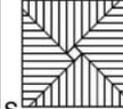
**Note:**

[HO09] CHARLES CHUK HOBERMAN, MATTHEW DAVIS, Strata, US Patent 7,559,174, 14-Jul.-2009.

[HO209] CHARLES CHUK HOBERMAN, MATTHEW DAVIS, Permea, US Patent 7,584,777, 08- Sept.-2009.

[HO@] ADAPTIVE BUILDING INITIATIVE – ABI, New York,US- NY ([www.adaptivebuildings.com/](http://www.adaptivebuildings.com/)),

### Cap.2.4. Strutture per piani.

Strutture		Cinematismo	parallelo	centrale	circolare	periferico
Strutture per piani	Strutture a concertina	piegatura				
	Pannelli a scorrimento	scorrimento				
	Strutture telescopiche	scorrimento				
	Sistemi a diaframma	scorrimento e rotazione				
	Strutture incernierate	piegatura				
	Strutture a rotazione	rotazione				
	Origami	piegatura				
<b>Morfologia di chiusura, legenda: F fascio P piano S sezione</b>						
Fig. 2.80: Strutture per punti a tamponamenti rigidi.						

### **2.4.1. Introduzione: morfologia e cinematica.**

In questo capitolo sono trattate le strutture che lavorano per piani, ovvero che sono costituite da superfici bidimensionali rigide (pannelli). Esse presentano una caratteristica fondamentale che le distingue dai sistemi precedentemente analizzati: in essi la struttura e il rivestimento coincidono.

Come i sistemi a tamponamenti rigidi, queste strutture hanno migliore capacità portante dei sistemi a rivestimento morbidi e il movimento può essere regolato con più precisione; rispetto ai sistemi a rivestimento rigido i pannelli possono avere minori ingombri anche se, proprio perché rivestimento e struttura coincidono, i pannelli non possono essere montati solo in configurazione aperta e quindi in fase di movimento si devono evitare sovrapposizioni tra le parti e si deve gestire accuratamente la distribuzione dei carichi.

Essi, nei sistemi più semplici, possono essere pannelli rettangolari collegati da cardini: funzionano con un meccanismo “a concertina” con un solo grado di libertà. Di semplicissima realizzazione, sono usati nell’oggettistica, nell’architettura d’interni (separé, pannelli divisorii, ecc.) e anch’essi quali sistemi estensibili per antenne spaziali. Altre applicazioni usate in architettura sono i pannelli a scorrimento, sfruttati per la realizzazione di ampie coperture, e, in applicazioni speciali, le strutture telescopiche. Dagli studi sull’ingegneria aerospaziale e dell’intrattenimento derivano le strutture a movimentazione radiale, in precedenza studiate con struttura e rivestimento separati.

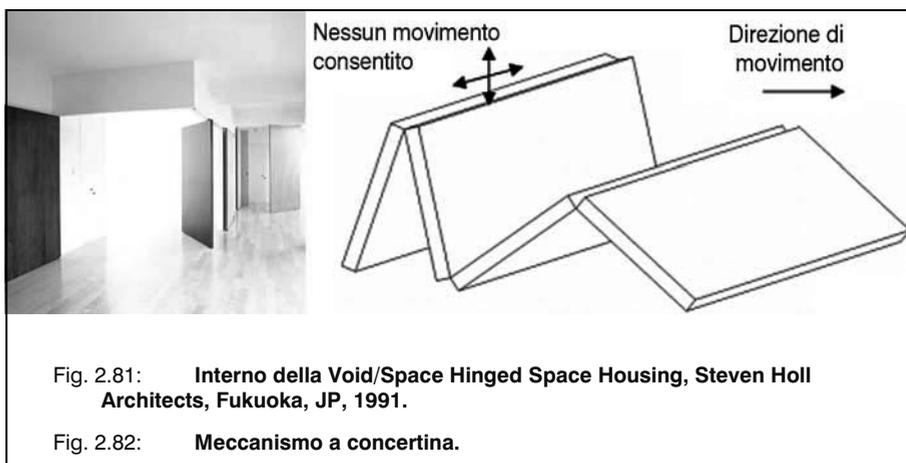
Nuove possibilità offre l’origami, la disciplina che tradizionalmente tratta della piegatura di superfici piane; essa è stata recentemente riscoperta in ambito scientifico e, per la ricchezza di spunti che offre, sarà approfondita nei capitoli successivi.

### 2.4.2 Strutture a concertina.

Il sistema a concertina è formato da una serie di pannelli retrattili connessi attraverso giunti cilindrici lungo gli spigoli. Nella configurazione chiusa i pannelli sono raccolti uno sull'altro lungo la struttura di supporto; nella configurazione aperta essi formano una'unica struttura piana che si estende lungo una linea retta [PE01].

Il meccanismo è ad un grado di libertà e si attua in sequenza, dal pannello più esterno rispetto alla struttura di supporto a quelli più interni; perciò, per propagare il movimento, è necessario inserire un sistema di controllo

La struttura in configurazione aperta può essere resa solidale e chiusa ermeticamente predisponendo i giunti con una copertina isolante metallica, parallela al pannello.



Note:

[PE01] SERGIO PELLEGRINO, *Deployable structures*, Berlin, DE, Springer, 2001, pg 26.

### **2.4.3. Strutture telescopiche.**

Le strutture telescopiche sono strutture basate su elementi tubolari che possono entrare uno nell'altro muovendosi con direzione lineare tramite giunti prismatici [ES96]. Il meccanismo consente di ridurre o aumentare la lunghezza del sistema, senza interferire molto con le parti perpendicolari all'asse di movimento; il movimento può avvenire in modo molto preciso e fluido. Gli esempi classici sono gli ascensori, interni alle abitazioni o quelli urbani panoramici, e ad essi rinvia la *Maison à Bordeaux* di Rem Koolhaas [R199]. Altre applicazioni architettoniche sono limitate dalla difficoltà di realizzare una perfetta continuità di superficie tra le parti mobili nella configurazione aperta. Esistono tuttavia delle particolari applicazioni per usi molto diversificati.

La struttura può essere usata a scala piccolissima con funzione di separazione / installazione. Sono telescopici i piccoli sostegni posti singolarmente dietro ogni pannello mobile della *Aegis Hyposurface*, un prototipo di superficie schermante progettato dal gruppo dECOi nel 1999 [HY@]; in essa 30 attuatori pneumatici ogni mq di superficie si muovono con una frequenza massima di 3Hz, permettendo ai moduli prismatici di facciata di avere uno spostamento di 50 cm alla velocità massima di 60km/h [BR06]. Il movimento fluido e rapido del meccanismo è integrato da un software di gestione che è in grado di elaborare informazioni disparate provenienti da sensori opportunamente dislocati nell'ambiente circostante. I progettisti hanno scelto questa tecnologia con l'obiettivo di realizzare un sistema facciata immediatamente sensibile e reattivo agli impulsi esterni, al suono e al movimento, che ispirato al "clavicembalo che produce suoni e colore", una macchina vivente, immaginato da Arcimboldi.

Alla grande scala, il meccanismo telescopico è stato sfruttato nel 1992 per

la fase di costruzione della Torre de Collserola, la torre delle comunicazioni di Valencia progettata da Norman Foster, ed è ancora sfruttabile per eventuali manutenzioni e rinnovi dell'impianto [MAR02]. Questa struttura è alta 288m complessivi ed ha un diametro variabile da 4,5 a 0,75 m.. È costituita da tre parti poste una sull'altra: un pilone cavo in c.a., un traliccio in acciaio e una torretta; lo stretto diametro e la notevole altezza avrebbero reso estremamente costosa e lunga la costruzione con tecniche tradizionali: da qui la necessità di trovare soluzioni alternative. Mentre si realizzava il pilone, di diametro 4,5 m., veniva predisposto a terra il traliccio d'acciaio, alto 30 m. e pesante quasi 3000 ton.. Quest'ultimo è stato poi innalzato con un meccanismo telescopico fino all'altezza di 84m, e similmente la torretta, di 45 m., è stata fatta passare nel foro centrale. È stata inoltre predisposta per la fase di esercizio una piccola gru posta in cima al traliccio, così da rendere possibili eventuali ammodernamenti del sistema di telecomunicazione.

#### Note:

- [ES96] FELIX ESCRIG, "General survey of deployability in architecture", in CARLOS A. BREBBIA, FELIX ESCRIG (a cura di), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II, conference proceedings*, Seville, Wessex Institute of Technology, UK, University of Seville, E, 1996.
- [MA02] IVAN MARGOLIUS, *Architects + Engineers = Structures*, New York, NY-US, Wiley Academy, 2002, pp. 83-84.
- [HY@] HYPOSURFACE CORP., <<http://hyposurface.org/>>
- [BR06] BLAINE ERICKSON BROWNELL, *Transmaterial. A catalog of materials that redefine our physical environment, Vol. 1*, New York, NY-US, Princeton Architectural Press, 2006, pg. 50.
- [RI99] TERENCE RILEY, *The un-private house*, New York, NY-US, Museum of Modern Art, 1999, pp. 93-95.



Fig. 2.83: **Architettura e sistemi ascensore: dai Future Systems, (concept, 1986) a Renzo Piano (Genova, 1992), Rem Koolhaas, (Bordeaux, 1998), e Norman Foster (Valencia, 1992).**

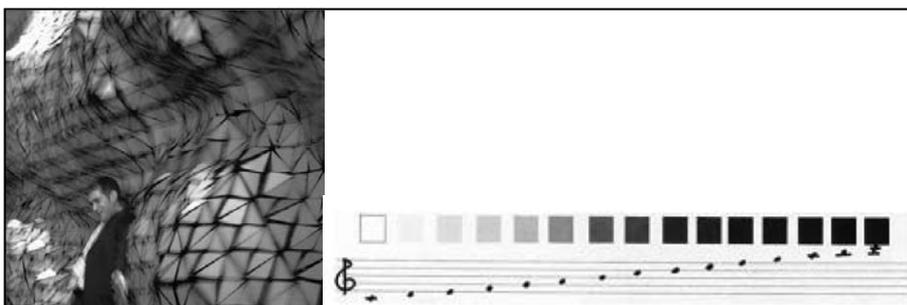


Fig. 2.84: **dECOi, Ove Arup, Aegis Hyposurface, Birmingham, 1999.**

Fig. 2.85: **Giuseppe Arcimboldo, studio per un clavicembalo che produca suoni e colore, XVI sec.**

### 2.4.3. Pannelli a scorrimento.

Nei sistemi a scorrimento i pannelli si muovono uno dopo l'altro con direzione lineare o circolare lungo uno o più binari paralleli e si impacchettano in configurazione chiusa uno sull'altro [GA01]. Con riferimento alla superficie sulla quale avviene il moto, la configurazione chiusa ha quindi dimensioni minime pari alla dimensione del pannello maggiore e spessore pari alla somma degli spessori dei pannelli coinvolti.

Il movimento è avviato da dei trattori meccanici ai quali i pannelli sono raccordati per lo più con cilindri telescopici, sfere telescopiche, ventagli telescopici o sistemi misti.

La prima ampia copertura retrattile (200m di diametro) fu il Roger Centre (Toronto SkyDome) del 1989 [KA00]; le realizzazioni successive hanno teso a sviluppare la potenza e la grandiosità dei sistemi meccanici coinvolti, come per la Fukuoka Dome (1993), caratterizzata da una cupola retrattile con diametro 220 m. dove due ali di 4.000 e 4.200 ton. scorrono circolarmente fino a sovrapporsi a un'ala più ampia ad un'altezza massima di 84m [PA02].

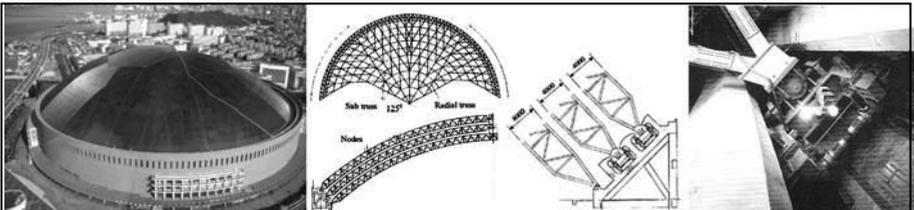


Fig. 2.86: **Vista dall'alto, schema parziale della struttura di copertura, dettagli delle guide e dei carrelli della Fukuoka Yahoo! Japan Dome, Takenaka Corporation, Maeda Corporation, Fukuoka City, JP, 1993.**

Le attuali tendenze per ampie strutture a pannelli spingono verso inclinazioni minori e ottimizzazione energetica del sistema di scorrimento, come nel Phoenix University Stadium [KI08].

Stesso obiettivo, unito a una forte ricerca estetica, si realizza nei sistemi di oscuramento. Nel progetto curato da ABI- Advanced Building Iniziative, dei pannelli intelaiati costituiti da un disegno a trafori sono disposti uno parallelo all'altro in una serie di specchiature. I pannelli sono esattamente uguali tra loro ma, quando sono fatti scorrere, le maglie prima allineate creano un motivo geometrico più ricco e aumentano la percentuale di oscuramento. Il motivo richiama direttamente le yali, i sistemi di oscuramento a trafori in pietra tipici dell'area araba..



Fig. 2.87: **Perkins Eastman, ABI, Simons center for geometry & physics, New York, 2010.**

Fig. 2.88: **Una yali, El Cairo.**

#### Note:

- [GA01] CHARS J.GANTES, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, U.K. WIT Press, 2001, pg. 54-55.
- [KA00] KAZUO ISHII, *Structural design of retractable roof structures*, Southampton, UK, WIT Press, 2000.
- [PA02] PARKE G A R, DISNEY P (a cura di), *Space structures 5. Proceedings of the fifth international conference on space structures*, Guilford, UK, 2002, London, Thomas Telford, 2002
- [KI08] CHRISTINE KILLORY, RENÉ DAVIDS, *Detail in process*, Princeton Architectural Press, New York, US-NY, 2008, pg..50-60.

#### **2.4.4. Sistemi a diaframma.**

I sistemi a diaframma permettono di chiudere un'area di forma circolare grazie al movimento di pannelli dal perimetro verso il centro dell'area. In configurazione aperta i pannelli si trovano disposti radialmente attorno all'apertura, ruotati.

Benché il tipo di movimento sia simile ai sistemi GAE già visti, il movimento non si trasmette qui direttamente da pannello a pannello ma sfrutta elementi di supporto, e necessita di giunti più complessi.

Al perimetro, infatti, si hanno due anelli concentrici di raggio diverso liberi di ruotare uno rispetto all'altro. Ogni pannello è incernierato all'anello inferiore e collegato con un giunto a scorrimento con l'anello superiore. A partire dalla configurazione chiusa, il movimento avviene ruotando l'anello superiore, costringendo in questo modo i pannelli a traslare verso il perimetro esterno e ruotare. La rotazione dell'anello superiore nella direzione opposta inverte il movimento.

Come nei sistemi GAE, la forma dei pannelli tende a un triangolo arcuato, la forma può però essere ottimizzata in modo tale da garantire la completa chiusura dell'area e da evitare superfici sovrapposte in configurazione chiusa oppure per ricercare articolari effetti geometrici, ad esempio è possibile realizzare spicchi formati da moduli ripetibili anche nel resto della superficie di facciata.

Il sistema è stato usato da Jean Nouvel nell'Institut Du Monde Arabe. Il meccanismo, ripetuto più e più volte a scala diversa, svolge due funzioni. Da un lato permette di controllare l'esposizione solare e generare particolari effetti di luce e ombra, dall'altro, in combinazione con le strutture di sostegno quadrate, disegna sulla facciata un motivo geometrico d'ispirazione araba.

Dopo Nouvel, anche Frédéric Eyl e Gunnar Green, all'interno della University of the Arts di Berlino, hanno proposto di usare dei diaframmi in

architettura, realizzando il prototipo di parete Aperture. Qui moltissimi piccoli iris tutti uguali tra loro sono usati in combinazione con le tecnologie elettroniche per esplorare l'idea di un'architettura naturale, "viva", in grado di riportare una traccia temporanea del movimento attorno ad essa.

I diaframmi, infatti, sono piuttosto piccoli e posti a distanza ravvicinata, in modo tale che le parti aperte possano essere lette tutte assieme dall'occhio umano come punti di un unico disegno. Il movimento avviene in risposta a input provenienti da dei sensori posti all'esterno della parete. I sensori elaborano informazioni circa l'intensità della luce, cogliendo quindi l'ombra generata dal passaggio di cose o persone.

In ambedue i casi esposti si hanno molti diaframmi azionati ciascuno indipendentemente, con un aggravio degli elementi accessori necessari. Si può pensare, però, di usare degli ingranaggi- che colleghino gli anelli tra loro. È possibile anche realizzare sistemi di dimensioni maggiori: in questo caso, poiché gli anelli esterni sostengono tutto il peso dei pannelli e attuano il movimento, essi devono essere di dimensioni e resistenza idonei, necessariamente visibili e caratterizzanti la facciata.

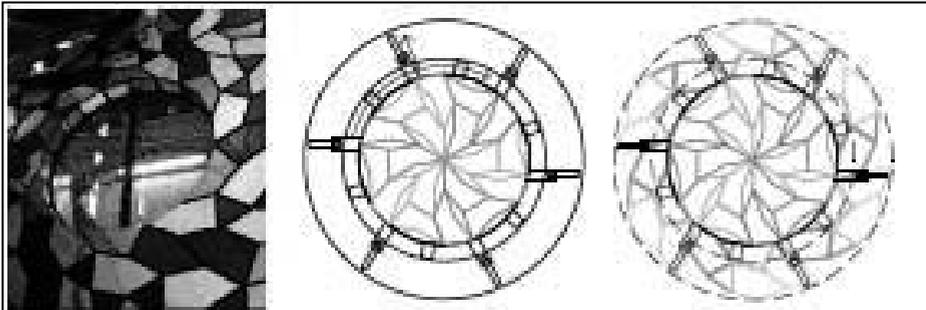


Fig. 2.89: Particolare della facciata della Ravensbourne School con rivestimento geometrico (tassellazione Hirschhorn medallion ) e possibile combinazione con bucatore apribili a disframma.

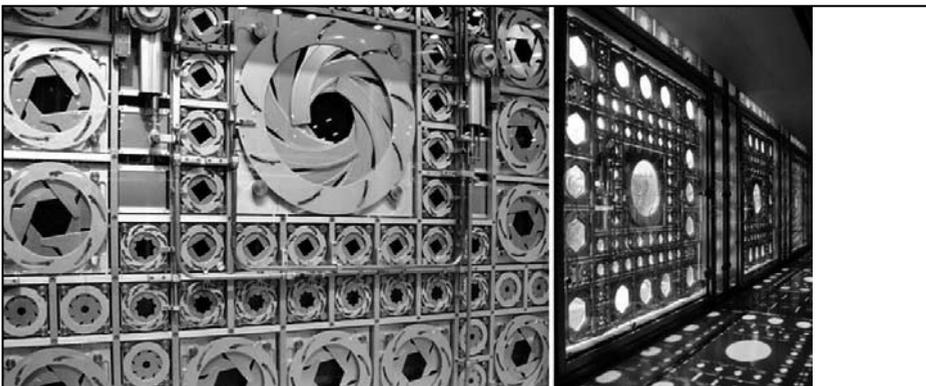


Fig. 2.90: Institute du monde arabe, Atelier Jean Nouvel - Philippe Ruault, Paris, FR, 1987-88.

Fig. 2.91: Institute du monde arabe, Atelier Jean Nouvel - Philippe Ruault, Paris, FR, 1987-88.

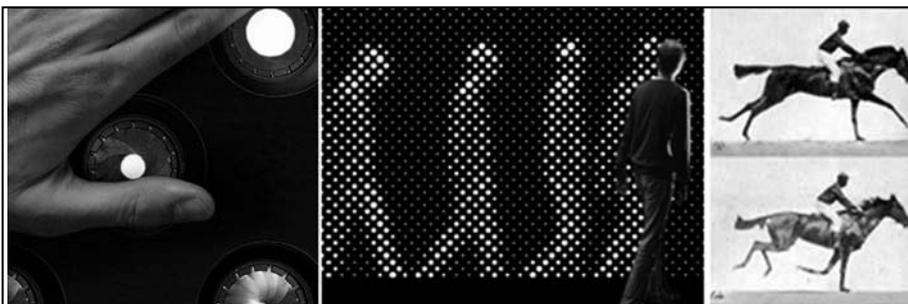


Fig. 2.92: Aperture, mini iris surface, prototipo, Frédéric Eyl, Gunnar Green, Berlin,, DE, 2004-2005.

Fig. 2.93: Aperture, mini iris surface, prototipo, Frédéric Eyl, Gunnar Green, Berlin,, DE, 2004-2005.

Fig. 2.94: Edward Muybridge, fotografie di movimenti congelati ,1825.

### 2.4.5. Strutture a rotazione radiale.

Nelle strutture pieghevoli del tipo GAE1-2 trattate precedentemente (§ 2.3.4; § 2.3.13 ) gli elementi di copertura sia flessibili che rigidi devono poter coprire interamente la superficie in posizione aperta.

Se si rispettano particolari condizioni di non sovrapposizione, si possono eliminare le barre e realizzare così una struttura costituita da soli pannelli rigidi collegati da giunti cilindrici [PE93] [ZH00]. Su questi principi, Hoberman sviluppa autonomamente il gioco Flight Ring [YA07].



Fig. 2.94: C. Hoberman, Flight Ring.

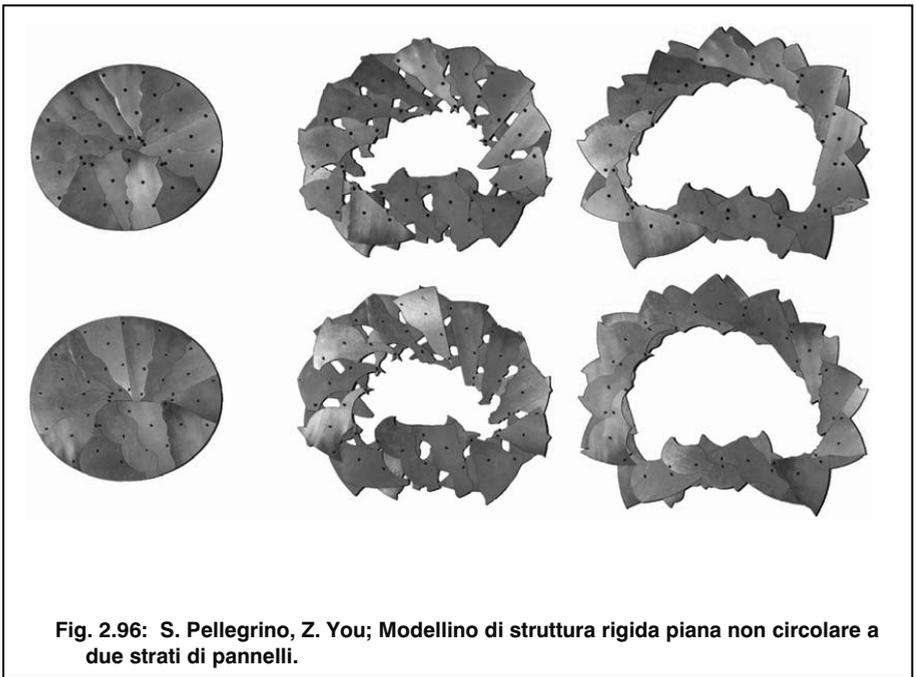
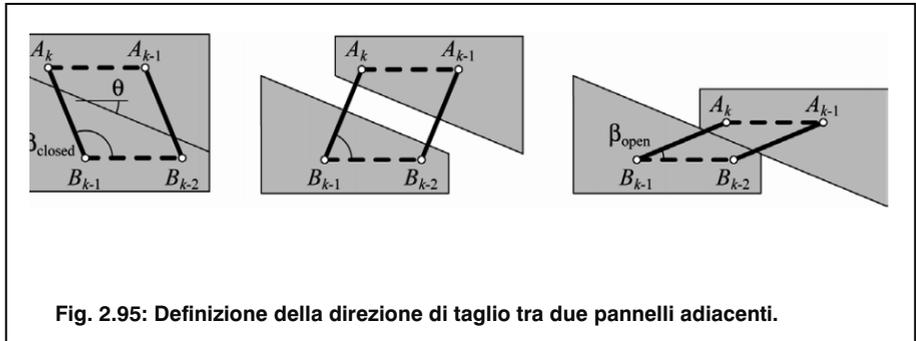
Con riferimento alla figura 2.97, la direzione di taglio di due pannelli contigui deve essere disposta lungo l'angolo  $\theta$  tale che:

$$\theta = [ (\pi - \beta_{\text{chiuso}}) - \beta_{\text{aperto}} ] / 2$$

dove:

$\theta$  = angolo formato dalla linea di taglio con il lato del pannello passante per il centro della struttura

$\beta$  = angolo formato da un tratto dell'elemento angolato e la sua congiungente con il tratto dell'elemento angolato corrispondente nel pannello adiacente.



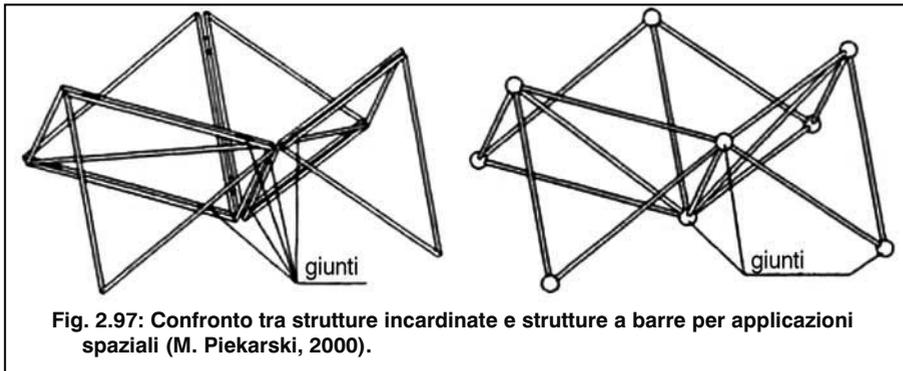
Note:

- [PE93] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, "Foldable Ring Structures", in G. A. R. PARKE, C. M. HOWARD, (a cura di), *Space Structures 4*, Thomas Telford, 783-792, 1993
- [YA07] YAOZHI LUOA, DECAN MAOA, ZHONG YOU, "On a type of radially retractable plate structures", in *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, n. 10, 2007, pg 3452-3467
- [ZH00] ZHONG YOU, "A New approach to Design of Retractable Roofs", SERGIO PELLEGRINO, SIMON D. GUEST (a cura di), *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures. Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, DE, 2000, pp 477-483.

### 2.4.6. Strutture incernierate.

Le strutture incernierate sfruttano la rotazione dei pannelli attorno a un asse. I sistemi richiamano le soluzioni viste nei precedenti capitoli, e come queste possono offrire grande libertà di configurazione.

Quando si definisce nei dettagli il cinematismo, tuttavia, lo spessore dei pannelli può imporre di traslare la posizione dei giunti rispetto all'asse mediano e può obbligare a sagomare i bordi in modo diversificato a seconda del movimento che il singolo pannello compie rispetto agli altri [PI00].

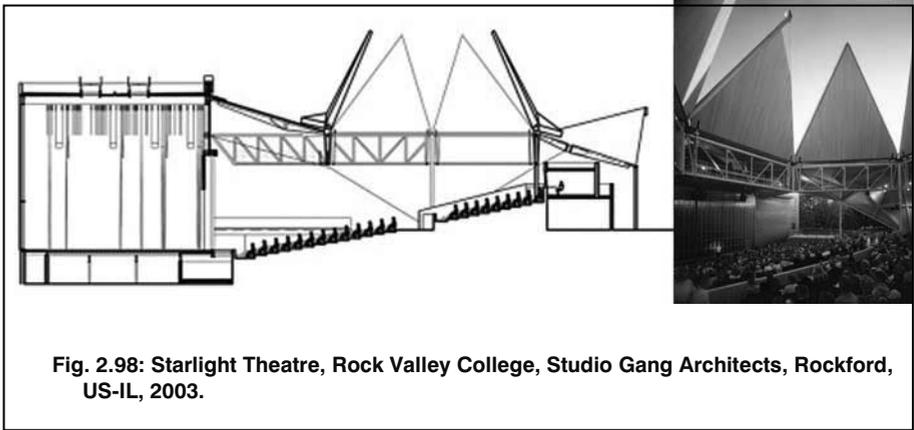


La maggior parte delle soluzioni architettoniche incernierate ricerca l'effetto estetico dovuto all'ariosità del movimento di rotazione, ma funziona di fatto come una serie di unità autonome semplicemente giustapposte [O'D07]. I pannelli, infatti, si muovono ognuno in modo indipendente, tendenzialmente senza sovrapporsi. Per questi motivi non si genera autonomamente un movimento sequenziale né si ottengono configurazioni chiuse compatte.

Note:

[PI00] M. Piekarski, *Constructional Solutions for Two-Way-Fold-Deployable. Space Trusses*, in Sergio Pellegrino, Simon D. Guest (a cura di), *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures. Theory and Applications*, Cambridge, UK, 1998, Springer, 2000, pp. 302-321

[O'D07] Kathleem O'Donnell, Starlight Theatre, in *Ottagono*, n. 205, 2007, pp.177-181



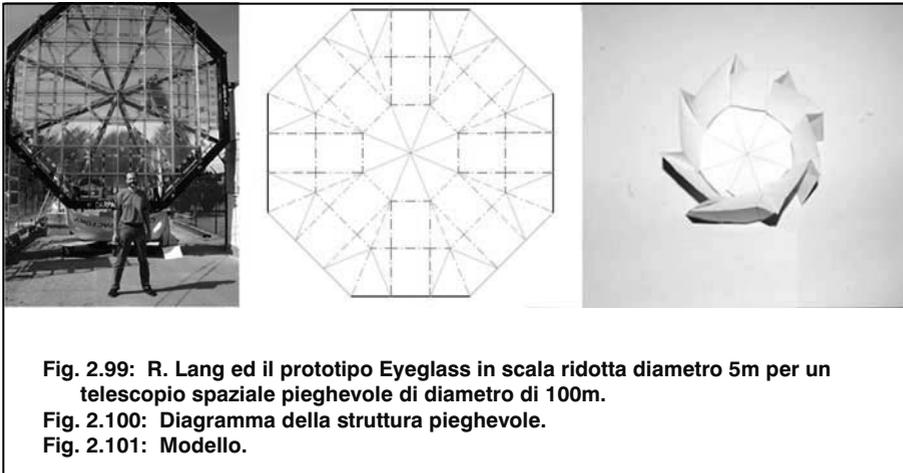
#### **2.4.7. Nuove possibilità: origami.**

Quando i pannelli incernierati si combinano lungo più direzioni, piegandosi assieme con continuità a partire da un'unica superficie, essi possono assumere forme più complesse, diverse tra loro e con varie configurazioni d'assemblaggio, essi si trasformano come degli origami, e proprio a partire dallo studio degli origami possono essere affrontati.

Gli origami sono formati da aree poligonali piane, dette facce, e dei vertici di collegamento. Se si immagina di realizzare degli origami con dei pannelli rigidi giuntati, ciascuna faccia costituisce un pannello e i vertici divengono dei cardini che permettono il movimento reciproco dei pannelli.

La maggior parte degli origami tradizionali è realizzata sfruttando la possibilità della carta di inflettersi. Viceversa gli origami che potrebbero essere realizzati con materiali rigidi sono una branca molto ristretta, relativamente nuova, ma di grande interesse applicativo. Si possono ottenere ampie possibilità formali dall'approfondimento delle loro caratteristiche intrinseche. Esempio è Eyeglass [HY02] [LA@] [HE03], un prototipo per un

telescopio spaziale sviluppato dal Lawrence Livermore National Laboratory in collaborazione con Robert Lang, uno dei più noti origamisti. Similmente deriva da ricerche in campo aerospaziale la Miiura Map di Korio Miura [M189], una superficie estensibile rigida a un grado di libertà. La struttura, meglio approfondita in § 3.3.3, è stata già usata in architettura, come copertura della Meguro Persimmon Hall's, dove se ne sono apprezzate le proprietà acustiche mentre non ci si è spinti nell'ingegnerizzazione del movimento.



I sistemi usati in campo aerospaziale tipicamente si espandono con un movimento radiale e, raggiunta la massima apertura, non possono essere fissati manualmente né possono sfruttare telai perimetrali di bloccaggio. Cinematicamente le strutture devono avere un grado di libertà e il movimento non può essere regolato da particolari condizioni al contorno. A livello strutturale non devono sopportare carichi, come nel caso delle antenne aerospaziali, che non sono soggette alla gravità.

Queste strutture rispondono quindi a obiettivi diversi da quelli delle costruzioni edili; le soluzioni sperimentate solo in parte possono essere trasferite in ambito architettonico. Viceversa, i metodi sviluppati per realizzarle e più in generale per indagare le caratteristiche degli origami possono aprire a ampie possibilità per l'architettura.



**Fig. 2.102: Meguro Persimmon Hall's, Nihon Sekkei, Tokyo, JP, 2002 (Foto: Nagata Acoustics) .**

**Note:**

[LA@] ROBERT LANG, LANG ORIGAMI, <[HTTP://WWW.LANGORIGAMI.COM/](http://www.langorigami.com/)>

[HE03] ARNIE HELLER, A GIANT LEAP FOR SPACE TELESCOPES, IN SCIENCE & TECHNOLOGY REVIEW, LAWRENCE LIVERMORE NATIONAL LABORATOR, MARZO 2003.

[HY02] RODERICK A HYDE, ET AL, *Eyeglass. A very large aperture diffractive space telescope*, in Howard A. MacEwen (a cura di), *Highly innovative space telescope concepts*, Proceedings of the SPIE, Vol. 4849, 2002, pp. 28-39.

[MI89] KORYO MIURA, FOLD - ITS PHYSICAL AND MATHEMATICAL PRINCIPLES, ORIGAMI SCIENCE AND ART, K. MIURA ED., OTSU, JAPAN (1997), 41-50.

## Cap. 2.5 Conclusioni.

Nei precedenti capitoli sono state trattate le strutture dotate di meccanismi che hanno trovato applicazione architettonica. Alcune di esse sono state progettate ad hoc in risposta a specifiche condizioni di progetto, altre sono prototipi sviluppati in ambito di ricerca; la maggior parte, però, ha trovato più di un'applicazione pratica.

In particolare, le strutture per punti sono da sempre alla base dell'architettura trasportabile ed hanno permesso la realizzazione di diverse opere dell'industria dell'intrattenimento. Esse realizzano meccanismi dotati di movimenti i più diversificati e possono offrire soluzioni formali molto varie. Tuttavia, se se ne considera l'applicazione in architetture stabili, esse devono essere fissate opportunamente alla struttura principale di sostegno, e sopra deve essere apposto il rivestimento.

Il loro uso nelle forme più complesse diviene ancora più difficoltoso quando le si integri con tamponamenti rigidi. Questi ultimi, dotati di libertà di movimento limitata rispetto a un materiale morbido, circoscrivono fortemente la varietà di strutture per punti ad essi associabile. Entrambi i tipi pongono delle difficoltà da superare in termini di costi, di ingombri, di manutenzione.

Nelle strutture per piani il meccanismo assolve anche la funzione di tamponamento. Molti meccanismi semplici che sono di uso corrente in edilizia (porte, divisori, frangisole) appartengono proprio a questo tipo di strutture. I meccanismi per piani ad oggi sviluppati, però, sono decisamente limitati. Le ragioni sono probabilmente da ricercare nel fatto che esse non sono particolarmente idonee ai settori nei quali lo sviluppo di meccanismi per punti ha trovato il maggior fervore. Nelle realizzazioni meccaniche industriali queste strutture non sono necessarie, non è richiesto tamponamento alcuno ed anzi l'ottimizzazione dei meccanismi tende a

limitare gli ingombri. Similmente possono essere più pesanti di strutture per punti e solo con lo sviluppo di idonei materiali stanno divenendo oggetto d'interesse per l'ingegneria aerospaziale. La lacuna di conoscenze al loro riguardo, quindi, non è dovuta a una effettiva carenza di possibilità ma al fatto che rispondono al meglio ad esigenze diverse rispetto alle strutture precedenti. Esse sono idonee all'uso in architettura. Specificatamente, esse possono contribuire a realizzare architetture trasformabili.



**PARTE TERZA.**

**METODI DI PROGETTO DI STRUTTURE PER PIANI.**



## Cap.3.1. Origami

### 3.1.1 Il quadro d'indagine.

L'origami (da ori, piegata e kami, carta) è la tradizionale arte di piegare la carta sviluppata in Giappone. Di origine antichissima, si è diffusa in Spagna tramite gli arabi attorno all'VIII sec D.C. e da lì nei quattro secoli successivi in tutta Europa, arrivando in America sul finire del 1600 [SM97]. Nel 1954 viene fondato l'Origami Centre a New York, poi Origami USA, e sulla scia del suo successo altre organizzazioni nazionali hanno rinnovato l'interesse verso questa pratica [DE07]. L'80% circa degli origami sono stati disegnati negli ultimi 30 anni, durante i quali un approccio più scientifico ha spinto a sviluppare forme meno legate all'immaginario tradizionale giapponese [LA93].

Il primo importante contributo all'analisi matematica degli origami risale al 1936, quando Margherita Piazzolla Beloch [PI36], ne studiò la costruzione geometrica in termini scientifici. Il suo così come i lavori successivi di Huzita, Jun Maekawa, Toshikazu Kawasaki e Jacques Justin si concentrano sull'esplicitazione dei teoremi che regolano la piegatura locale attorno a un singolo e continuo foglio piegato. Gli anni '90 sono caratterizzati da nuovi slanci creativi ad opera in particolare di Thomas Hull, che tratta origami a superficie curva, e di Robert Lang, che sviluppa una procedura generalizzata per costruire origami complessi di forme prestabilite. Il loro lavoro, tra arte e scienza, è stato raccolto e portato avanti da matematici puri. Eric Demaine in particolare riconosce nell'arte dell'origami la base per di una nuova disciplina, quella dell'origami computazionale, definita come una branca dell'informatica che ha come obiettivo risolvere problemi legati alla piegatura di superfici assimilabili alla carta attraverso una successione

ottimizzata di algoritmi [DE00].

Sotto la prospettiva dell'ingegnerizzazione dei risultati, si ricordano tra gli altri i contributi di quanti studiano l'ottimizzazione dei giunti (Tomiro Tachi, Hani Buri con Yves Weinand) o propongono innovativi sistemi di controllo e propagazione del movimento (MIT, Department of Mechanical Engineering con il Department of Electrical Engineering and Computer Science).

È significativo il lavoro di ingegneri già attivi sul tema delle strutture pieghevoli, come Charis Gantes e Zhong You, i quali stanno approfondendo lo studio dello stato di tensione del materiale.

Ad oggi le più valide occasioni di confronto sono fornite dalle conferenze interne all'OSME, Origami in Science, Mathematics and Education, sempre accompagnanti da workshop paralleli sull'arte del piegare la carta, giunte alla 5ª edizione e organizzate primariamente da Origami USA. In esse si confrontano matematici, tecnologi, insegnanti di matematica e geometria, e naturalmente origamisti, a dimostrazione della varietà di approcci con i quali si sta definendo il campo d'indagine della nascente disciplina. I vari spunti di ricerca che in esse si intrecciano sono poi sviluppati più o meno autonomamente sulle riviste specialistiche dei rispettivi ambiti scientifici.

In maniera piuttosto episodica, il tema inizia ad apparire anche in alcune recentissime ricerche all'interno di master e percorsi post universitari d'architettura.

Per un quadro più dettagliato dei principali contributi all'analisi degli origami sotto il punto di vista geometrico, ingegneristico e computazionale, nonché ai temi di ricerca affiorati in campo architettonico, si rimanda alla bibliografia.

Questa parte del testo rende ragione degli studi in atto nei vari settori ritenuti significativi per l'architettura, cercando da questo punto di vista di tracciarne una prospettiva di sviluppo.

**Note:**

- [PI36] MARGHERITA PIAZZOLLA BELOCH, *Sulla risoluzione dei problemi di terzo e quarto grado col metodo del ripiegamento della carta*. Scritti Matematici Offerti a Luigi Berzolari, Pavia, pp. 93–96, 1936.
- [SM97] JOHN S. SMITH, *Notes on the history of origami*, in “Booklet”, the British Origami Society, n. 1, 1972.  
Disponibile on line: < <http://www.mvg-ori.nl/ori-l/lists/history.htm> >.
- [DE00] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, JOSEPH S. B. MITCHELL, *Folding Flat Silhouettes and Wrapping Polyhedral Packages, New Results in Computational Origami*, in “*Computational Geometry. Theory and Applications*”, vol. 16, n.1, 2000, pp. 3–21.

**3.1.2. Terminologia.**

S'introducono alcune definizioni utili per i prossimi capitoli. Poiché l'origami è un'arte antica, a lungo non codificata, su alcuni termini, sulla rappresentazione grafica delle informazioni utili allo sviluppo dell'origami e soprattutto sui nomi di alcuni processi di piegatura si possono riscontrare differenze da un testo all'altro; le definizioni qui riportate sono comunque genericamente accettate e fanno riferimento al frutto del processo di standardizzazione dei termini attuato da Origami Usa [OR@], ampliato ove ritenuto opportuno con informazioni tratte dalle opere di quanti si occupano di origami computazionale [DE07].

L'origami propriamente è la carta in configurazione chiusa, ovvero piegata. Il foglio di carta, a sua volta, è una superficie di dimensioni finite e senza fori, non estensibile, deformabile senza strappi.

Si definisce diagramma dell'origami la divisione di un foglio di carta di dimensioni unitarie tramite un insieme finito di segmenti di retta. I segmenti sono detti pieghe e costituiscono il luogo dei punti che sono piegati per permettere la trasformazione del diagramma in origami.

Ogni poligono formato da una combinazione di pieghe e /o dai limiti della superficie è detto faccia.

Tradizionalmente le pieghe sono qualificate con un indice positivo o negativo in base alla curvatura che hanno in direzione dell'osservatore; si distinguono: monti, che sono pieghe convesse, indice positivo, disegnate per lo più con linee continue, e valli, che sono concave, indice negativo, disegnate con linee tratteggiate. Non viene considerato il contorno della carta, ovvero il limite della superficie.

Prende il nome di piegatura dell'origami il processo di trasformazione di un diagramma in origami, senza che si generino strappi o allungamenti, attraverso l'utilizzo di tutte le pieghe del diagramma e solo quelle.

Si definisce diagramma orientato, o assegnazione monti valli, un diagramma nel quale sono noti gli indici di tutte le pieghe.

Tra ogni punto di un diagramma orientato e il corrisponde punto dell'origami esiste una relazione biunivoca, ad un diagramma orientato corrisponde un solo origami.

Un origami dunque è definito univocamente quando è noto il diagramma orientato. Noto il diagramma, tuttavia, non è facile ottenere la forma voluta se non si conosce la successione attraverso la quale attuare le pieghe. Si definisce design dell'origami o *origami sekkei* (letteralmente piega tecnica della carta) il processo di disegno delle pieghe di un diagramma che permetta di ottenere l'origami voluto.

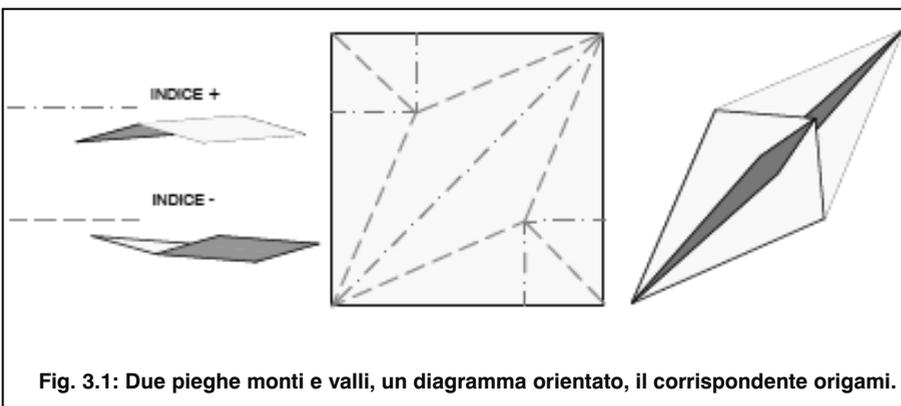


Fig. 3.1: Due pieghe monti e valli, un diagramma orientato, il corrispondente origami.

**Note:**

[DE07] Erik D. Demaine, Joseph O'Rourke, *GEOMETRIC FOLDING ALGORITHMS. LINKAGES, ORIGAMI, POLYHEDRA*. CAMBRIDGE, CUP, 2007.

[OR@] Origami- USA (WEB <[HTTP://WWW.ORIGAMI-USA.ORG/GLOSSARY](http://www.origami-usa.org/glossary)>).

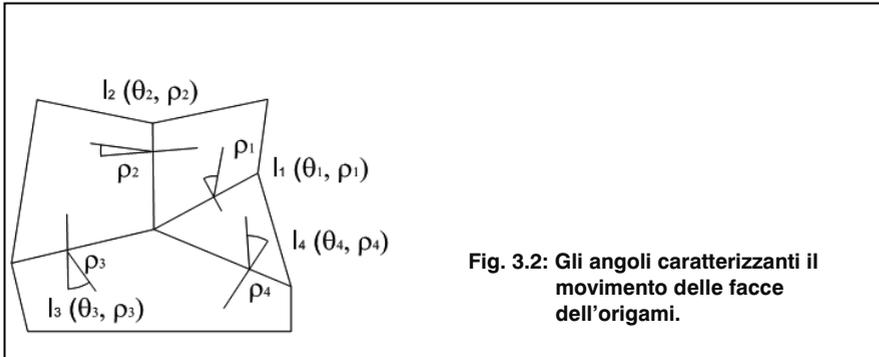
**3.1.3. Morfologia.**

Il movimento tra due facce aventi una piega in comune è descritto dal valore di due angoli. Il primo, visibile in configurazione aperta sul diagramma, è l'angolo  $\theta$  sul piano orizzontale; il secondo è l'angolo diedro  $\rho$  che due facce separate dalla piega sottendono in configurazione chiusa, cioè nell'origami realizzato.

Qualsiasi punto su una superficie continua è descrivibile attraverso una caratteristica intrinseca, che non muta qualora la superficie sia sottoposta a deformazioni che non implicino modifiche, essa è la curvatura gaussiana. Poiché nel passaggio da una configurazione all'altra l'origami non deve subire tagli o inflessioni allora il concetto di curvatura gaussiana è qui particolarmente utile.

In particolare, la curvatura gaussiana di una superficie in un punto P è il prodotto  $k_1 k_2$  delle curvature principali. Le curvature principali a loro volta sono definite ciascuna dalla normale alla superficie in P: poiché la normale opposta dà curvature con segni opposti, il loro prodotto è costante. Nel caso degli origami, il diagramma di partenza è piano, dunque la curvatura gaussiana è nulla e dovrà rimanere tale durante la piegatura e quando le facce avranno subito la piegatura imposta dall'angolo diedro  $\rho$ .

La curvatura gaussiana può essere misurata attraverso una rappresentazione grafica. Si considerano i vettori unitari normali a dei punti P, Q, R, S ciascuno



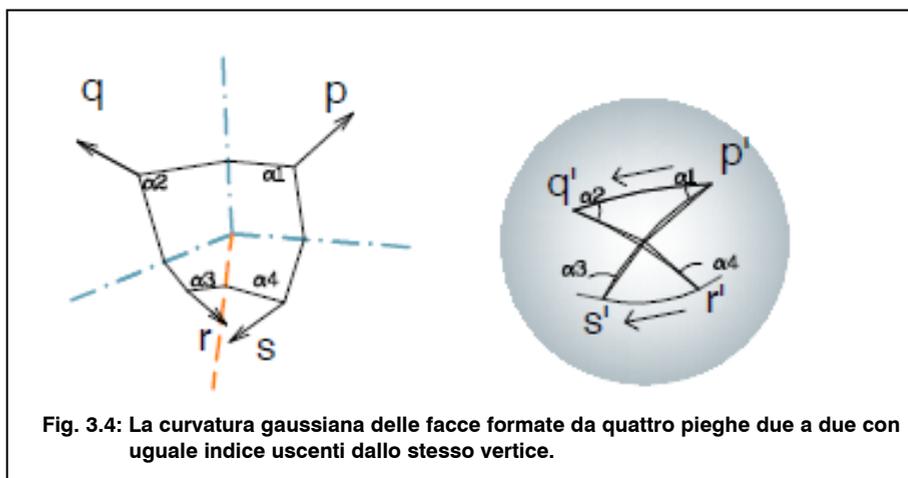
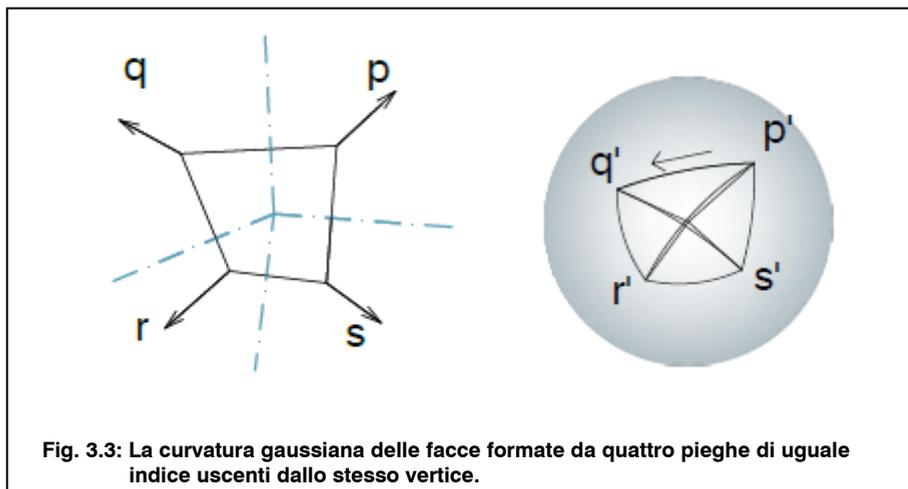
**Fig. 3.2: Gli angoli caratterizzanti il movimento delle facce dell'origami.**

appartenente a una delle facce racchiuse dalle pieghe uscenti da un medesimo vertice. Si trasformano i vettori nei raggi di una sfera, detta appunto sfera gaussiana, lasciandone immutata direzione e verso. Si collegano tra loro i punti nei quali i raggi intersecano la superficie della sfera. L'area racchiusa dagli archi di cerchio così ottenuti rappresenta la curvatura gaussiana attorno al vertice considerato.

Si consideri a titolo esemplificativo il caso di quattro pieghe che condividono un vertice.

Si disegnano i vettori normali alla superficie  $r, p, q, s$  e i corrispondenti raggi unitari  $r', q', p', s'$  nella rappresentazione sferica. Congiungendo con archi di cerchio i punti della sfera si possono ottenere tre diversi risultati a seconda del verso dei vettori. Se i vettori hanno tutti uguale verso, cioè le pieghe hanno tutte lo stesso indice, si ottiene un quadrangolo sferico di area non nulla.

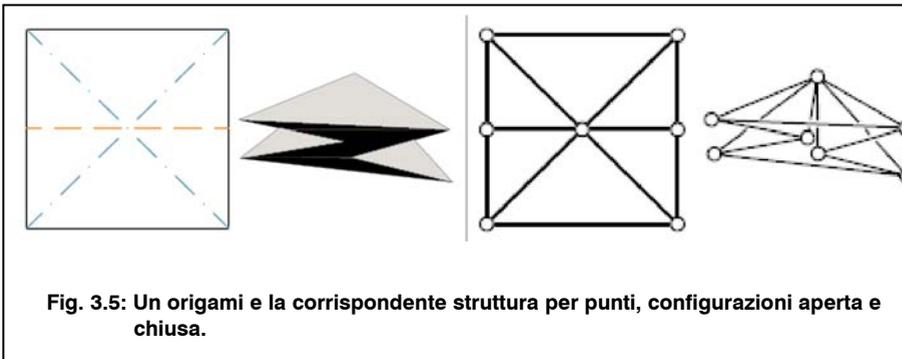
Se tre pieghe hanno un indice e una ha indice opposto, il disegno dei raggi da due triangoli sferici uguali tra loro ma di direzione opposta. Si ottiene dunque  $K=0$ . È quindi sempre possibile piegare da un unico vertice una superficie secondo quattro segmenti uscenti da un vertice comune, in modo tale che tre abbiano direzione positiva e una negativa (o viceversa).



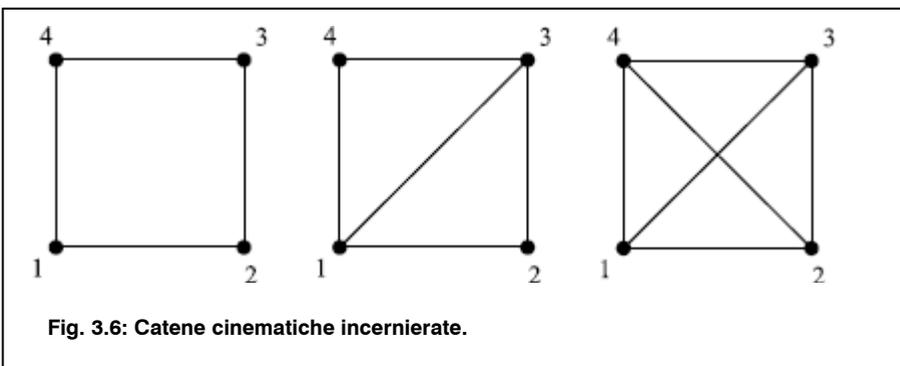
### 3.1.4. Rapporto con le strutture per punti.

Strutturalmente, gli origami possono essere assimilati a pannelli rigidi incardinati. Nel capitolo pretendete si sono incontrate molte strutture incernierate, e di esse si è messa in luce la libertà formale e la relativa semplicità di realizzazione, dovuta al fatto che i giunti sono sostanzialmente tutti uguali.

La figura seguente mostra il diagramma di una forma tipica dell'origami, nota tradizionalmente come *waterbomb base*. Essa è direttamente realizzabile anche con un sistema a barre e cerniere. Poiché ogni faccia è triangolare, le facce sono indeformabili, e la lunghezza relativa delle barre impedisce che ci siano intersezioni tra le facce.



In linea generale, però, non è possibile sostituire direttamente a una struttura bidimensionale incernierata un origami senza verificare una serie di condizioni. Se si analizzano le strutture della figura seguente, e si immagina di inserire nelle aree racchiuse dalle barre le facce degli origami, si verifica facilmente quanto segue.



Nel primo caso la faccia non è rigidamente fissata, e può mutare forma. Gli origami si muovono solo in uno spazio tridimensionale, perciò anche nel secondo caso, nonostante si tratti di due facce triangolari, la struttura può

deformarsi fuori dal piano. Solo nell'ultimo esempio le barre creano effettivamente quattro facce rigide.

Dunque una prima condizione per realizzare con sistemi per piani incardinati le medesime strutture realizzate con sistemi a barre connesse da cerniere è la possibilità dei pannelli di trasformarsi da una configurazione chiusa (l'origami corrispondente alla struttura a barre piegata) a una configurazione aperta (il diagramma corrispondente alla massima estensione della struttura a barre) senza subire deformazioni. Nello specifico del rapporto con le strutture a aste bidimensionali, ciò significa che l'origami, che si sviluppa per piani e quindi nello spazio tridimensionale, sia pieghevole in modo tale che i pannelli giacciono tutti su piani paralleli, cioè, che l'origami sia "piano".

Anche qualora si considerino strutture ad aste tridimensionali, l'equivalenza non è immediata. Quando le catene cinematiche formano delle connessioni chiuse, una qualsiasi barra ha la possibilità di attraversare l'area racchiusa da altre aste senza intaccare il meccanismo; negli origami questa medesima area è una faccia piena e bisogna perciò imporre che le pieghe possano essere tangenti, mai intersecanti le une con le altre. La seconda condizione limitativa dei sistemi tipo origami è perciò la necessità di non intersezione tra i pannelli.

Dunque, se si prescinde dai molti problemi imposti dal tamponamento, gli origami hanno meno libertà di movimento rispetto alle strutture per punti. La grande varietà formale che nondimeno dimostrano è dovuta principalmente a due fattori.

In primo luogo l'attento studio delle direzioni imposte a ciascuna piega permette di sfruttare particolari condizioni di simmetria tra le facce che aumentano la possibilità di movimento.

In secondo luogo la necessità di considerare contestualmente struttura e tamponamento ottimizza il disegno del sistema finale.

### 3.1.5. Origami piani.

Perché un origami sia pieghevole, esso deve permettere la trasformazione da una configurazione aperta piana 2D (il diagramma coincidente con la superficie del foglio di carta) a una configurazione chiusa 3D (l'origami vero e proprio) senza subire tagli o deformazioni.

Un origami è detto piano quando tutte le facce giacciono su piani paralleli o coincidenti. Se si trascura lo spessore della carta, considerandola come bidimensionale, allora un origami piano è un origami nel quale tutte le facce giacciono su un piano.

Il concetto di piegatura di un origami fa riferimento all'idea che due facce separate da una piega nel diagramma possano nell'origami sovrapporsi.

Certo è possibile piegare la carta in modo tale che acquisisca un volume tridimensionale (Cap.3.2.3), tuttavia, le possibilità di piegatura di più facce che non possano sovrapporsi sono limitate. A maggior ragione se si vuole ottenere una configurazione chiusa compatta, diviene necessario poter sfruttare la possibilità di ricondurre più vertici su uno stesso piano. Dunque i teoremi di seguito esposti sono alla base della piegatura di un qualsiasi origami, indipendentemente dalla forma voluta.

Le condizioni di piegatura locale.

La piegatura locale dei singoli vertici è garantita dal rispetto delle seguenti condizioni.

#### 1) Teorema di Kawasaki

In ogni vertice interno di un diagramma di un origami piatto, la somma degli angoli alterni deve essere  $180^\circ$ .

$$\sum \alpha_{2n} = \sum \alpha_{2n+1} = 180$$

[KA87] [JU94]

Questa condizione permette di mantenere costante la curvatura gaussiana e quindi di non avere soluzioni di continuità nella superficie.

## 2) Teorema di Maekawa-Justin

Attorno a ogni vertice interno di un diagramma di un origami piatto deve essere:

$$M - V = |2|$$

[KA89] [JU89]

dove

M è il numero di pieghe convesse, monti

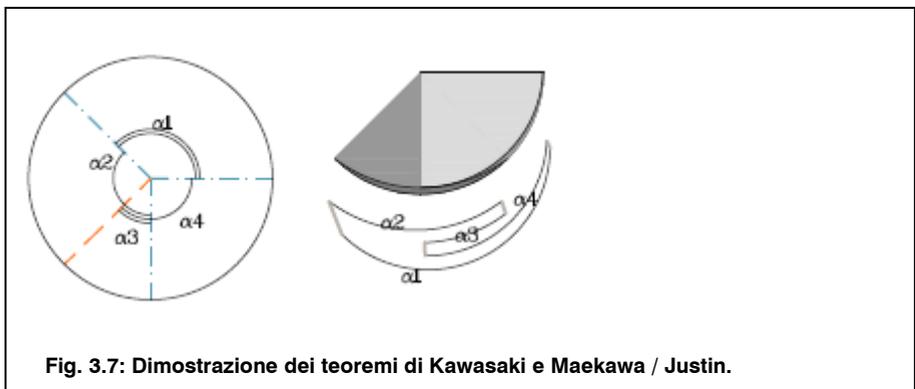
V è il numero di pieghe concave, valli

Corollario

Il numero di pieghe convergenti in un vertice interno al diagramma di un origami piatto è pari.

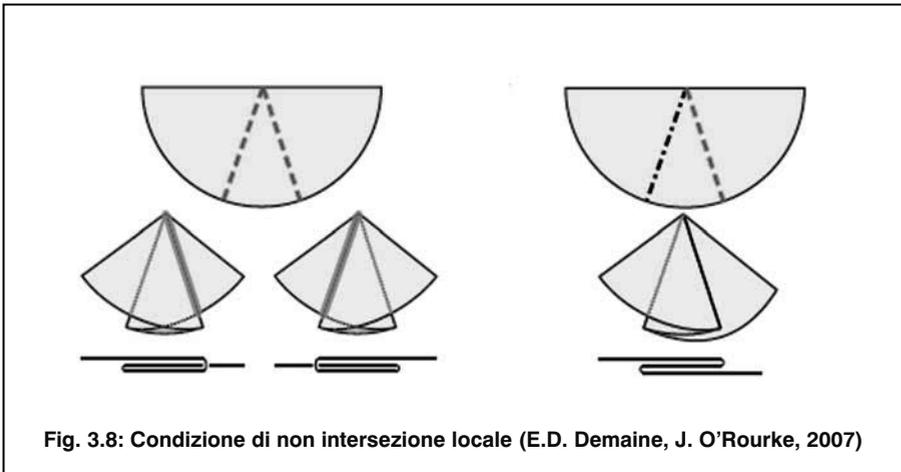
I teoremi sopra esposti possono essere verificati in modo intuitivo prendendo ad esempio un intorno circolare del vertice.

Se l'origami è piano e può essere piegato senza subire tagli o deformazioni permanenti, allora immaginando di percorrere la circonferenza partendo da una piega qualsiasi, dopo aver fatto completato il giro si deve tornare al punto di partenza: gli angoli alternativamente formati dalle pieghe si equivalgono e, poiché a ogni piega varia la direzione di partenza, la differenza tra il numero di pieghe a monte e a valle deve essere pari a due.



Considerando ancora un intorno circolare del vertice, si ricavano alcune informazioni in più circa l'indice delle pieghe. Se un angolo è il minore tra gli

angoli formati dalle pieghe uscenti da un vertice, cioè è il minore localmente, allora le due pieghe che lo sottendono devono avere direzione opposta, altrimenti le facce tenderebbero ad intersecarsi [KA89] [JU94].



Dei casi particolari si verificano quando si hanno due o più angoli minori, uguali tra loro [HU03] [DE07].

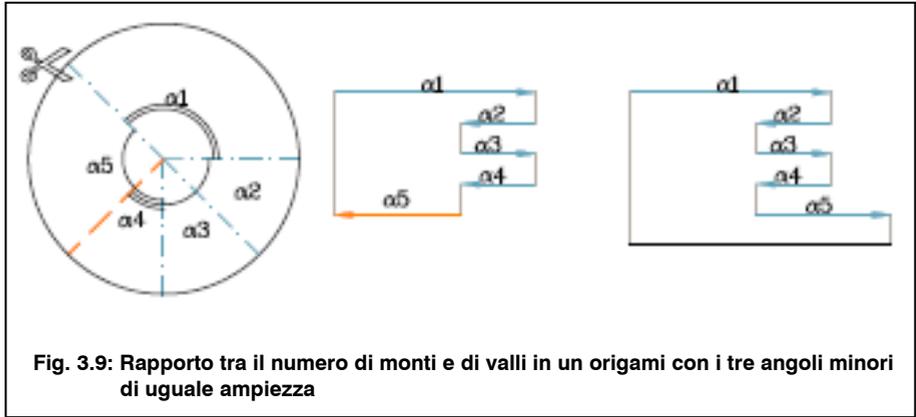
Se ci sono  $k$  angoli uguali minori di altri angoli, allora

$$|M - V| = 0 \text{ con } k = 2m$$

$$|M - V| = 1 \text{ con } k = 2m + 1$$

Considerando un intorno circolare attorno ad un vertice del diagramma, Demaine e O'Rourke hanno spiegato questi casi particolari immaginando di fare un taglio lungo una piega, così da poter piegare la superficie a concertina [DE07].

Poiché in un origami, procedendo per pieghe successive comunque i punti di partenza e di arrivo devono coincidere, allora se non fossero rispettati i rapporti sopra esposti sarebbe necessario aggiungere o eliminare una piega per tornare al punto iniziale. In caso contrario, infatti, l'origami s'infilterebbe o si aprirebbe.



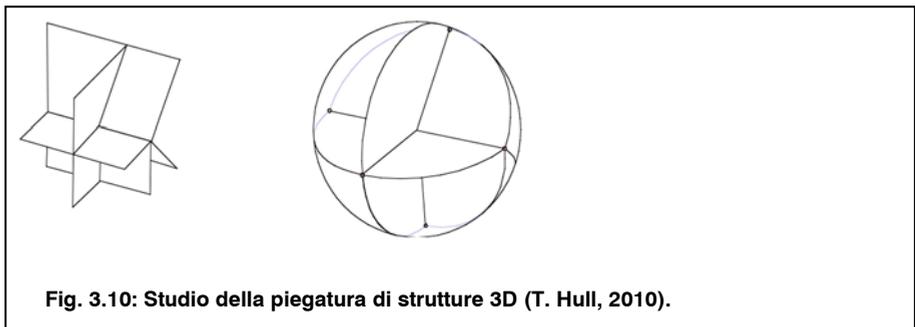
A partire dai teoremi che regolano la piegatura locale attorno a un vertice di un origami, Belcastro e Hull stanno sviluppando lo studio delle condizioni che regolano la piegatura locale di strutture non piane [BE02a] [BE02b]

In questo caso, le pieghe del diagramma sono sostituite da regioni di superfici e permetterne la piegatura significa permetterne la riflessione nello spazio. Il diagramma si ottiene dalle linee di contatto tra le regioni e una sfera di raggio unitario che si ponga attorno al vertice. In questo caso la curvatura gaussiana non è nulla, quindi:

$$S\alpha_{2n} = S\alpha_{2n+1} \neq 0$$

Per garantire la piegatura deve essere:

- 1)  $V+M = 0$
- 2) L'angolo localmente minore deve essere posto tra due regioni con direzione opposta



Le condizioni di piegatura del diagramma.

Esistono diversi studi in atto per la verifica della sviluppabilità di un origami, ed il problema è tuttora aperto [HU10]. Le tecniche di sviluppo di origami di forme prestabile, studiate dalla metà circa degli anni '80 sottopongono il diagramma completo a una successiva verifica della corretta assegnazione dei versi, attuata con tecniche ricorsive. Esistono poi degli origami creati tramite aggregazione di moduli base, chiamati in gergo "molecole", dei quali si è verificata la possibilità di piegatura piana e rigida. Nel processo di assemblaggio, tuttavia, le molecole subiscono rotazioni, riflessioni e in alcuni casi dilatazioni e distorsioni: anche se formato da molecole intrinsecamente rigide, il diagramma risultante può facilmente non essere rigido e neppure piano. La piegatura piana risulta allora particolarmente complessa: una volta assemblate le molecole nel diagramma, è necessario verificare gli indici di tutte le pieghe, ma la modifica dell'indice di una piega ha ripercussioni in ambo i vertici che collega: si genera così un effetto catena che si propaga di vertice in vertice fino ai limiti della superficie, ovvero ai bordi del foglio.

I teoremi esposti all'inizio del capitolo possono essere estesi al caso di più vertici. In particolare, dalla formulazione di Justin del 2° teorema si ricava che, dato un origami piano, considerata una curva chiusa semplice non passante per i vertici che attraversi le pieghe  $I_1, I_2, I_3, \dots, I_n$ , e noti gli angoli  $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_n$ , allora il numero di pieghe con indice positivo  $M$ , monti, e il numero di pieghe con indice negativo  $V$ , valli, è tale che:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = \frac{1}{2} (M - V) \pi \quad k \in 2\pi$$

dove  $k \in \mathbb{Z}$

Con riferimento alla figura seguente, si ottiene:

$$\sum_{i=1}^n \alpha_i = \frac{1}{2} (M - V) \pi \quad k \in 2\pi$$

$$180 = \frac{1}{2} (8 - 6) \pi \quad k \in 2\pi$$

$$180 = \pi, k=0$$

Anche in questo caso la spiegazione può essere intuitiva: se s'immagina di tagliare l'origami lungo la curva così disegnata, e se ne segue il percorso, si incorre nella seguente situazione: poiché la superficie è continua e originariamente piana, dovunque si parta si devono compiere  $k$  giri completi per poi tornare infine al punto di partenza; poiché la curva è chiusa, si deve compiere almeno un giro completo e quindi sottendere un angolo almeno di  $2\pi$ : il percorso totale è allora  $k 2\pi$ .

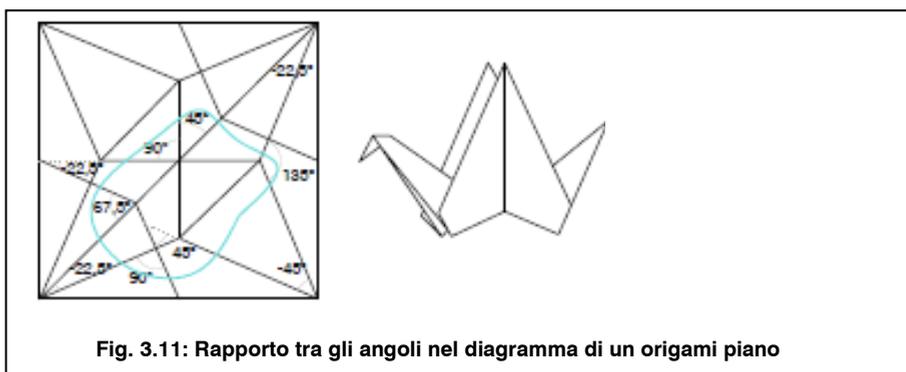


Fig. 3.11: Rapporto tra gli angoli nel diagramma di un origami piano

#### Note:

- [KA89] TOSHIKAZU KAWASAKI, On the relation between mountain-creases and valley-creases of a flat origami. in H. HUZITA, ( a cura di), Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology, Ferrara, IT, 1989, pp 229-237.
- [JU89a] JACQUES JUSTIN. Aspects mathématiques du pliage de papier (Mathematical aspects of paper folding). in H. HUZITA, ( a cura di), Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology, Ferrara, IT, 1989, pp 263-277.
- [JU89b] JACQUES JUSTIN. Resolution par le pliage de l'équation du troisième degré et applications géométriques in H. HUZITA, ( a cura di), Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology, Ferrara, IT, 1989, pp 251-261.
- [JU94] JACQUES JUSTIN. Towards a mathematical theory of origami. In Kōriō Miura (a cura di) Proceedings of the 2nd International Meeting Origami Scientific, Otsu, JP, 1994, Scientific Origami, 1994, pp. 15-29.
- [KA87] KUNIHICO KASAHARA, TOSHIE TAKAHAMA. *Origami for the Connoisseur*. Japan Publications Inc., 1987.

- [BE02a] SARAH-MARIE BELCASTRO, THOMAS C. HULL, A mathematical model for non-flat origami. In *Origami3: Proc. 3rd Int. Meeting Origami Sci., Math, Educ.* Wellesley, US-MA, 2001, A K Peters, 2002, pp 39–51,
- [BE02b] SARAH-MARIE BELCASTRO, THOMAS C. HULL., Modelling the folding of paper into three dimensions using affine transformations. *Linear Algebra and its Applications*, vol. 348, n.1, 2002, pp. 273-282.
- [DE07] ERIK D. DEMAINE, JOSEPH O'ROURKE, Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra, Cambridge University Press, July 2007.
- [HU10] THOMAS C. HULL, Maekawa and Kawasaki Revisited and Extended, lecture at the Massachusetts Institute of Technology, 2010 (disponibile on-line, <[http://courses.csail.mit.edu/6.849/fall10/lectures/L20\\_images.pdf](http://courses.csail.mit.edu/6.849/fall10/lectures/L20_images.pdf)>).

### 3.1.6. Origami rigidi.

Le condizioni di piegatura sopra esposte fanno riferimento solo allo stato iniziale e finale, e non allo stato intermedio. Ciò significa che nel movimento il materiale può subire deformazioni.

Se s'immagina di sostituire al foglio di carta un foglio metallico, e alle pieghe dei cardini, s'intuisce facilmente che sarà necessario garantire che il movimento sia rigido.

Il diagramma di un origami rigido risponde alle seguenti caratteristiche [HU06]:

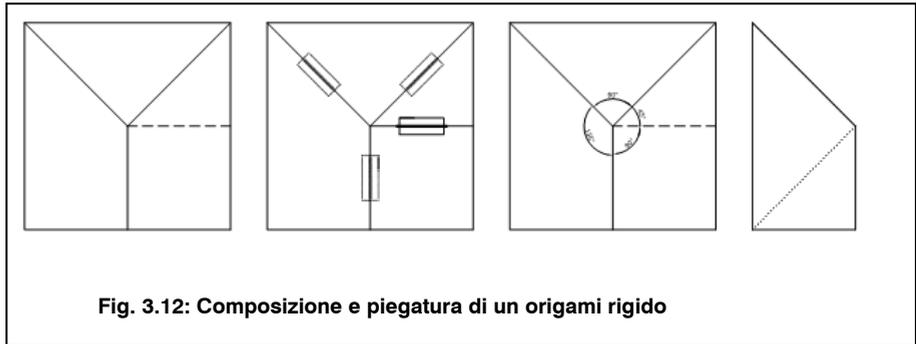
- il materiale non è sottoposto a flessione o torsione
- le facce del foglio una volta piegate sono piane, non presentano incurvature
- il foglio è continuo, senza tagli o fori
- il foglio non si auto interseca

In termini matematici [BE02b]:

- il movimento è rigido
- la relazione tra la configurazione iniziale e finale è affine
- la funzione è continua

- il foglio non si auto interseca

L'origami rigido è quindi un origami dove si può passare in modo continuo da uno stato iniziale a uno stato finale, e viceversa.



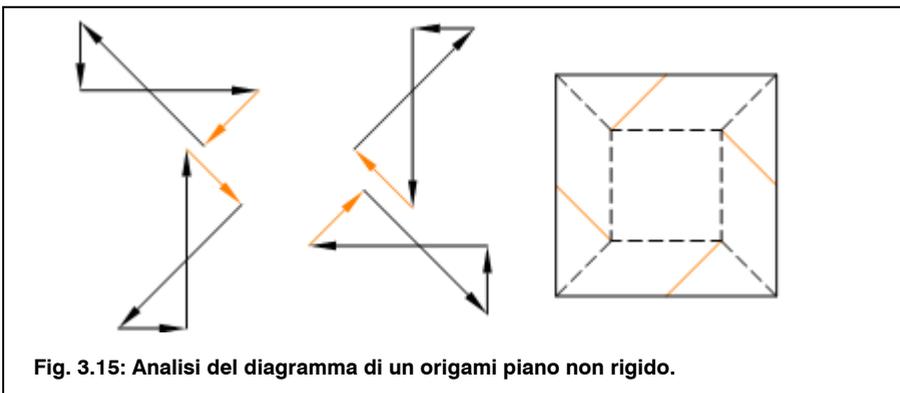
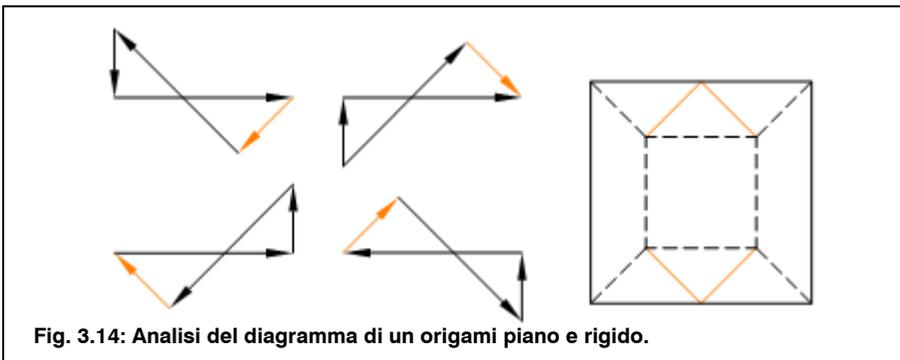
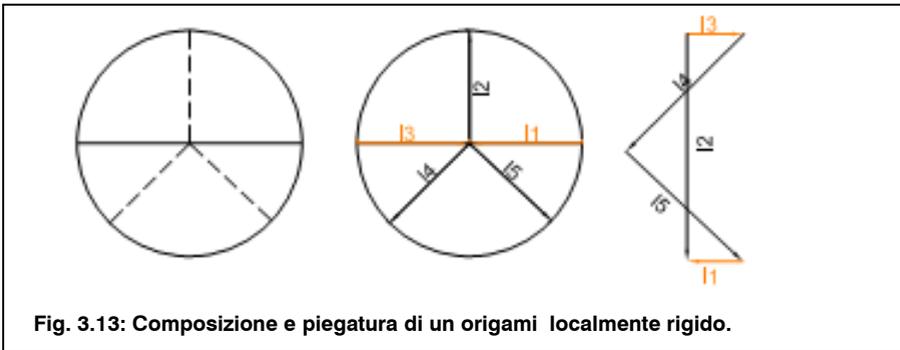
Tra le varie tecniche in studio, si propone il metodo del diagramma, proposto da Watanabe [WA09].

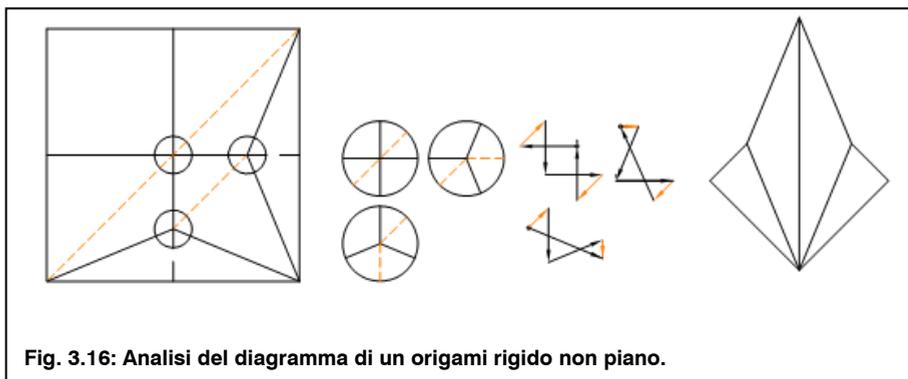
Dato un diagramma, si considera l'intorno unitario di un vertice interno, ovvero di un vertice non posto sul limite della superficie. Si sostituiscono le pieghe uscenti dal vertice con dei vettori aventi direzione rispettivamente uscente dal vertice o verso il vertice secondo che corrispondano a pieghe concave o convesse (valli o monti). A parte, si costruisce un poligono connettendo ogni vettore con il seguente, procedendo in senso antiorario e regolando la lunghezza dei vettori stessi in modo tale, se possibile, da formare una catena chiusa. Solo se è possibile realizzare una catena chiusa di area nulla si ha un origami localmente rigido, pieghevole e piano.

Si può supporre che se la catena chiusa ha un'area diversa da zero essa risponda al caso di una superficie con curvatura gaussiana non nulla, ovvero che la superficie non sia piana.

Similmente, se non è possibile realizzare una catena chiusa si può supporre che l'origami non sia rigido e che le sue parti siano sottoposte a flessione nel piegarsi.

Ultimo passo è considerare l'insieme di tutti i vertici del diagramma. La lunghezza dei vettori calcolati precedentemente per ogni vertice deve essere compatibile, ovvero i vettori che rappresentano la stessa piega devono avere la medesima lunghezza, se così non avviene l'origami si inflette. Sulle medesime basi il problema può essere affrontato anche in modo numerico mettendo a sistema le matrici di rotazione dei vettori.





**Fig. 3.16: Analisi del diagramma di un origami rigido non piano.**

Note:

[WA09] NAOHIKO WATANABE, KEN-ICHI KAWAGUCHI, The method for Judging rigid foldability, in ROBERT J. LANG ( a cura di), Origami 4, A K Peters Ltd, 2009

[HU06]: THOMAS HULL. Project Origami: Activities for Exploring Mathematics. A K Peters, Wellesley, US-MA, 2006.

### 3.1.6. Gradi di libertà.

Secondo quanto già esposto in §2.1.1, i gradi di libertà possono essere calcolati con il criterio di Kutzbach. Per ogni vertice interno al diagramma è:

$$F = L_{\text{int}} - 3J_{\text{int}}$$

dove

$J_{\text{int}}$  = numero di vertici interni al diagramma

$L$  = numero di pieghe interne al diagramma

se  $F > 0$ , il sistema è mobile.

se  $F < 0$ , il sistema è iperstatico, ovvero anche se nella pratica l'origami si piega, esso sfrutta l'elasticità del materiale.

Le facce formate da quattro pieghe o più possono però essere triangolate; similmente a quanto già visto nelle catene cinematiche chiuse, se si

aggiunge una piega al diagramma, collegandola ai vertici esistenti, essa apporta un unico grado di libertà.

Il processo può essere portato avanti fino a trovarsi nella condizione in cui ogni faccia è triangolata.

Per un origami composto da soli triangoli, si ha:

$$F = L_{\text{est}} - 3 = J_{\text{int}} - 3J_{\text{int}} \quad \text{dove}$$

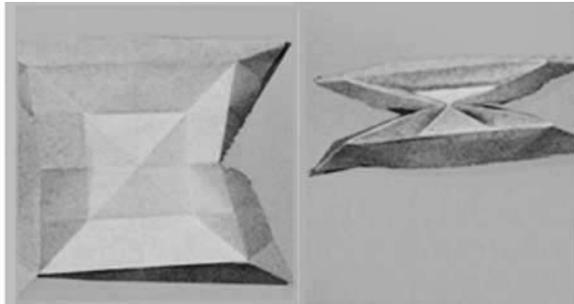
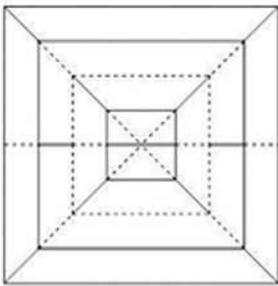
$J_{\text{int}}$  = numero di vertici interni

$L_{\text{int}}$  = numero di pieghe interni

$L_{\text{est}}$  = numero di pieghe che costituiscono il perimetro esterno del diagramma.

$$F = L_{\text{int}} - 3J_{\text{int}}$$

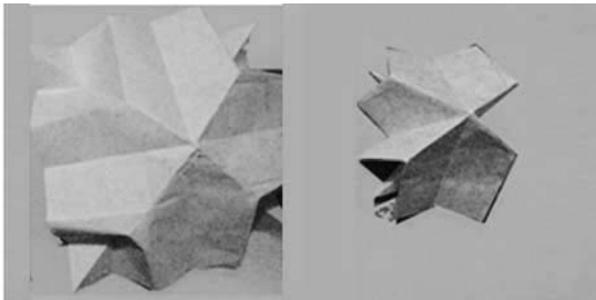
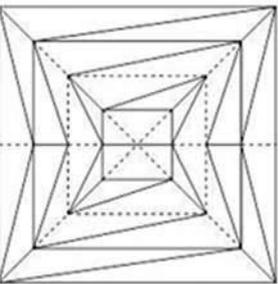
$$L_{\text{int}} = 42 \quad J_{\text{int}} = 19 \quad F = -21 < 0$$



**Fig. 3.17: Calcolo dei gradi di libertà.**

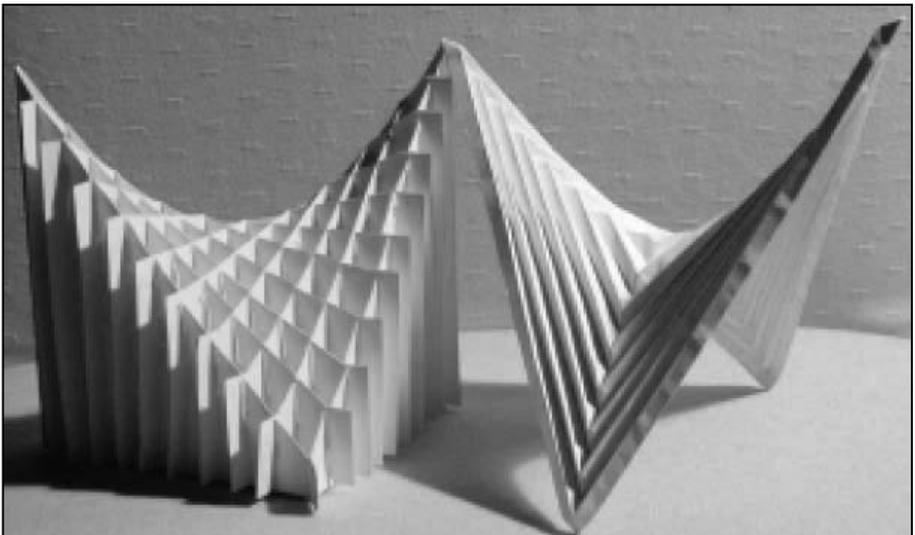
$$F = L_{\text{int}} - 3J_{\text{int}} = L_{\text{est}} - 3$$

$$J_{\text{int}} = 19 \quad L_{\text{int}} = 60 \quad L_{\text{est}} = 6 \quad F = 3$$

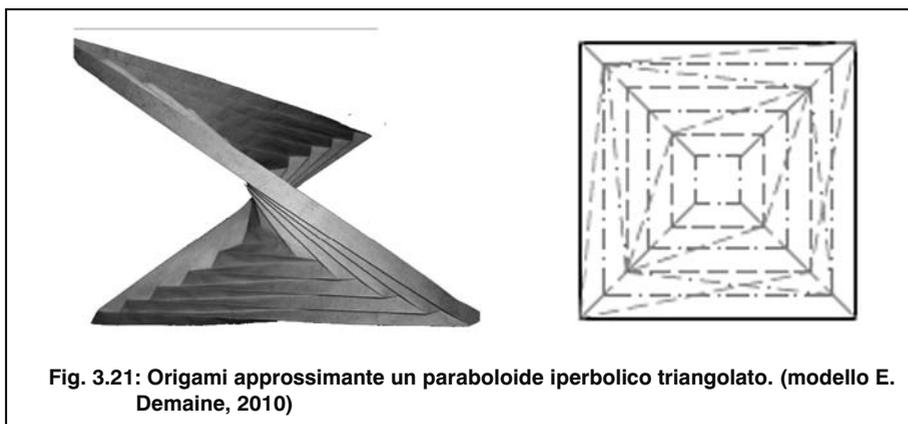
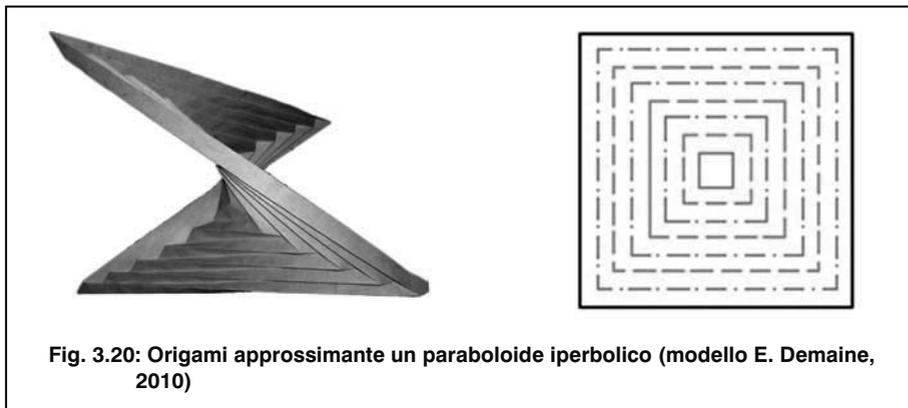


**Fig. 3.18: Calcolo dei gradi di libertà di un origami completamente triangolato.**

È opportuno introdurre ora alcune osservazioni che saranno riprese successivamente. Come nei meccanismi per punti, la sola verifica del criterio di Kutzbach non è sufficiente a dimostrare la dispiegabilità dell'origami secondo i gradi di libertà imposti. Nel caso degli origami, specificatamente, quando per ottenere un determinato movimento si vogliono aggiungere delle pieghe, il disporle in modo opportuno significa disporle in modo da assecondare la naturale inflessione del materiale, localizzando le pieghe esattamente dove sono le deformazioni: così facendo, se la struttura è realizzata con pannelli e cardini, il movimento coinvolge per quanto possibile solo i giunti e non provoca deformazioni sulla superficie. Un esempio interessante è il parabolide iperbolico. La figura è generata dalla traslazione di una parabola lungo un'altra con curvatura principale di segno opposto (è una superficie anticlastica), ha perciò una curvatura gaussiana negativa e variabile da punto a punto. Per ottenere un origami non deformato, Demaine lo triangola. Anche in questo caso, però, non ottiene una superficie rigida se non in alcuni rapporti tra il numero di pieghe e l'angolo che sottendono.



**Fig. 3.19: Approssimazioni di un parabolide iperbolico costruite attraverso l'incrocio di sezioni paraboliche e con un origami (J. P. Hernandez, 2002),**



**Note:**

- [HE02] JESUS DE LA PEÑA HERNÁNDEZ, *Papiroflexia abstracta*, in “*Anales de mecánica y electricidad*”. n. 24 , 2002, pp 24-28.
- [DE07] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, VI HART, GREGORY N. PRICE, TOMOHIRO TACHI, (Non)existence of pleated folds: how paper folds between creases, in Proceedings of the 7th Japan Conference on Computational Geometry and Graphs , JCCGG 2009, Kanazawa, JP, 2009.

## Cap. 3.2. Generazione di una forma data.

### 3.2.1. Introduzione: le facce degli origami.

Nella pratica tradizionale dell'origami le figure di progetto non sono create ogni volta dal principio, ma si impostano su alcune pieghe di partenza, note appunto come "basi", che descrivono delle aree nelle quali le pieghe successive tendono ad essere racchiuse. Ovviamente più l'origami è complesso meno questa struttura è visibile, ed anzi per alcuni tratti esse possono risultare non piegate nella forma finale, ma in linea generale si può dire che esse tendano a separare le aree del diagramma destinate alle varie diramazioni dell'origami, ovvero alle appendici delle quali è composto. In particolare, esistono diversi riferimenti nei testi per origamisti alla possibilità di pre-assegnare una determinata area del diagramma a ciascuna diramazione riportando sul diagramma degli archi di cerchio, che saranno poi racchiusi da queste pieghe di riferimento. Le tecniche moderne espone nei prossimi paragrafi utilizzano in vario modo concetti simili.

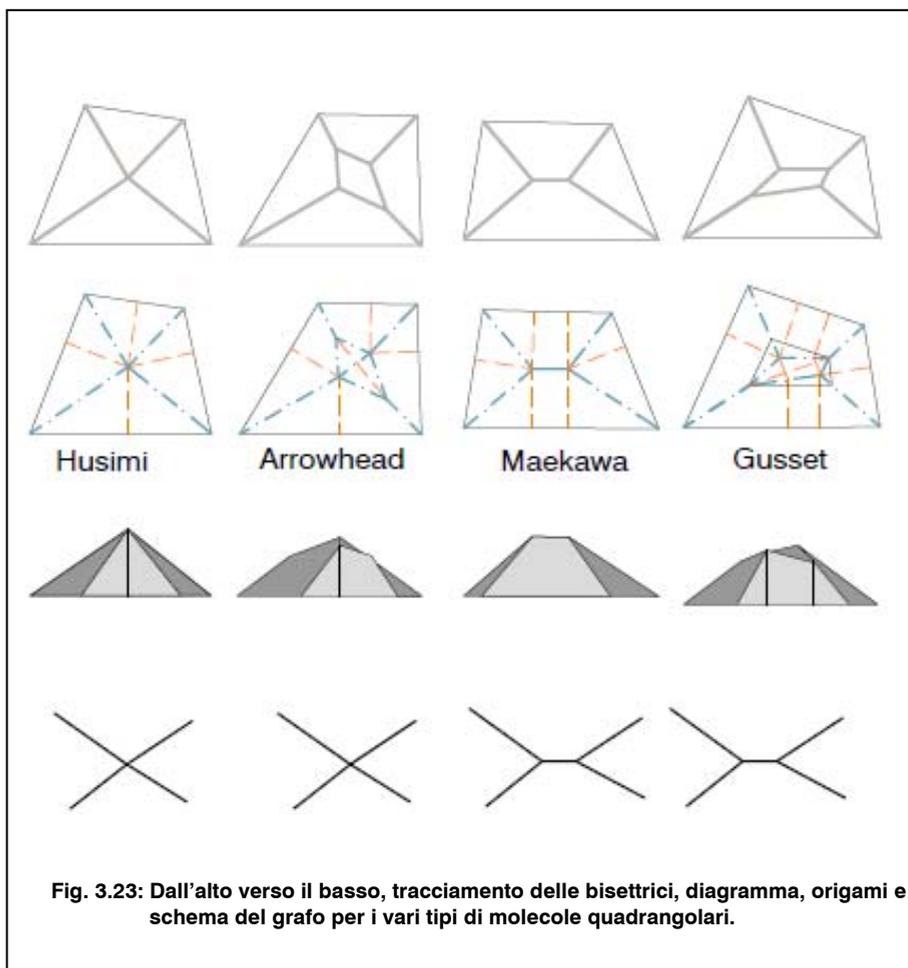
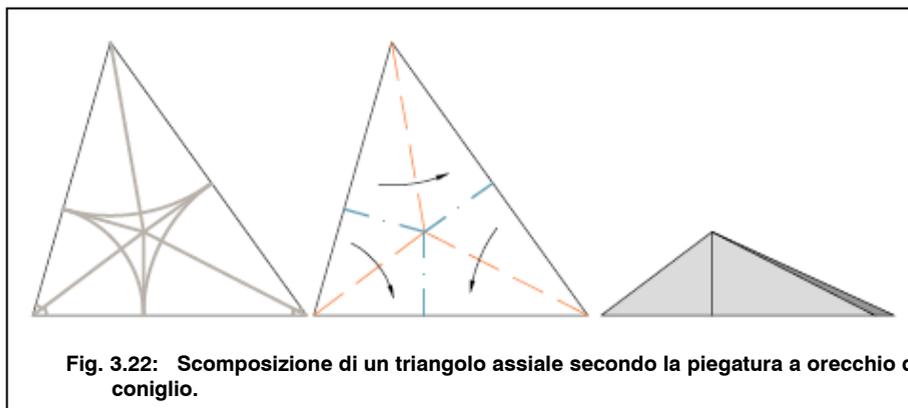
Nello sviluppo della forma definitiva, ancora, si sono diffuse delle tecniche per fare in modo che una qualsiasi faccia poligonale di tre o quattro lati possa essere scomposta in modo tale che le pieghe del suo perimetro giacciono in configurazione chiusa lungo una medesima linea. Meguro [ME92] ha definito molecole (bun-shi) le facce scomposte in questo modo. Tutte le molecole prevedono che s'inseriscano all'interno della faccia delle pieghe ottenute dalle bisettrici degli angoli interni e che si traccino dai nuovi vertici delle perpendicolari agli spigoli del poligono. Poiché risultano molto pratiche e sono utili a comprendere come affrontare un problema di piegatura locale, di seguito si mostrano le varie possibilità.

Nei poligoni di tre lati si ricorre alla tradizionale piegatura “a orecchio di coniglio”. Si tracciano le bisettrici degli angoli fino a quando si incontrano in un punto. Da questo punto si tracciano le perpendicolari al poligono. Le bisettrici degli angoli assumono una piega a monte e le perpendicolari a valle.

Nei poligoni di quattro lati si ha uno dei seguenti quattro casi noti. Se tutte le pieghe di pendenza si incontrano in un punto, si utilizza una molecola Husimi. Se le pieghe di pendenza adiacenti si incontrano a due a due in un punto, ci si avvale della molecola Maekawa. Se si ottiene un triangolo, si scompone internamente il triangolo come una molecola a orecchio di coniglio. Ultima possibilità, se si ottiene un quadrilatero generico, si utilizza una molecola Gusset.

Note:

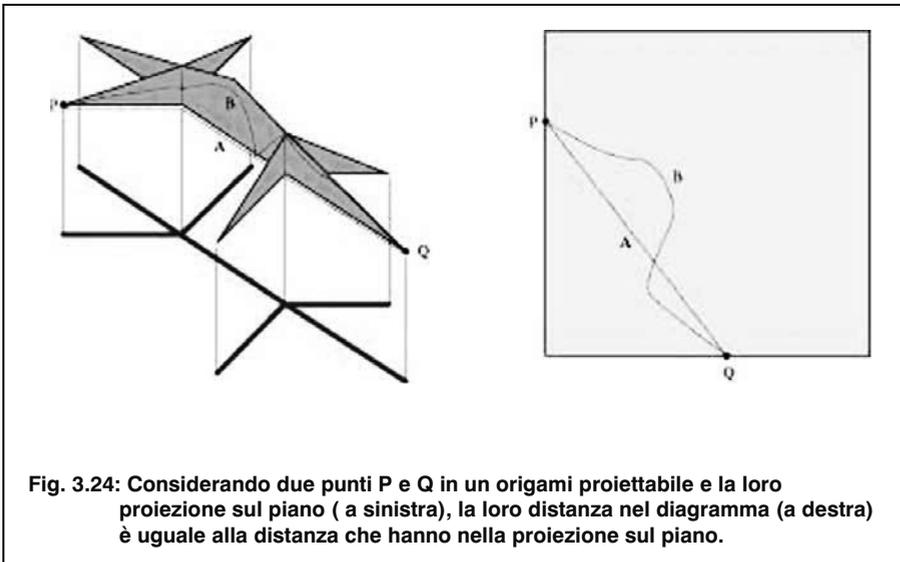
[ME92] Toshiyuki Meguro, “*JITSUYOU OORIGAMI SEKKEIHOU*” (PRACTICAL METHODS OF ORIGAMI DESIGNS), IN *ORIGAMI TANTEIDAN SHIMBUN*, N. 7-14, 1991-1992.



### 3.2.1 Tree method.

La generazione di una forma data può essere ricercata attraverso metodi matematici e grafici.

In particolare, si propone parte del lavoro condotto da Robert Lang, il quale propone una tecnica che media tra l'approccio più grafico e immediato, ma un poco limitante, di Kawahata e Maekawa (tecnica String of beads, [KA97] [KA95], [MA94]) e altri lavori condotti nel campo degli origami computazionali [DE@]. La tecnica da lui sviluppata, detta "*tree method*", è ristretta agli origami proiettabili, agli origami, cioè, che possono essere disposti nello spazio in modo tale che tutte le facce siano perpendicolari ad un piano detto piano di proiezione.



Gli origami proiettabili disegnano sul piano di proiezione un percorso assimilabile ad un grafo ad albero. Il metodo sfrutta questa caratteristica, da cui il nome *tree method*, e, attraverso l'analisi del grafo, permette di isolare le caratteristiche essenziali dell'origami di progetto (numero, dimensione e disposizione reciproca delle diramazioni). Come esposto successivamente,

la creazione del grafo, soprattutto, è essenziale per verificare in maniera rapida se una determinata forma è realizzabile a partire dalla superficie del diagramma e, in caso contrario, poter decidere tra le modifiche possibili, quelle più idonee.

Dato un origami proiettabile  $P$ , un diagramma  $S$  e un grafo  $T$ , si tratta dunque la serie di algoritmi che permette la trasformazione  $P (F (T)) \rightarrow S$ .

Analisi della forma di progetto.

Progettata la forma desiderata per l'origami proiettabile, se ne costruisce la proiezione sul piano di riferimento. Così facendo si possono analizzare le diramazioni di lunghezza  $l_i$ . Le diramazioni in prima approssimazione sono le estremità dalle quali è composto l'origami; specificatamente sono gli insiemi di facce che proiettano sul piano lungo un medesimo segmento di retta. Ogni insieme di facce appartenenti a una specifica diramazione disegna sul piano perpendicolare al piano di proiezione il perimetro della diramazione e sul piano di proiezione un corrispondente segmento. La figura precedente, ad esempio, è composta da cinque diramazioni. Per ognuna di esse s'individuano:

i vertici d'estremità  $J_i$ , ovvero i vertici che sono posti alla minor distanza dal piano di proiezione;

la lunghezza  $l_i$ , ovvero la lunghezza misurata lungo la linea di sviluppo della diramazione sul piano perpendicolare al piano di proiezione.

Impostazione del grafo.

Il grafo corrispondente all'origami di progetto è dato da dei lati d'estremità corrispondenti alle diramazioni e dei lati interni corrispondenti al "corpo" dell'origami, dal quale le diramazioni dipartono. Di ogni lato sono noti la

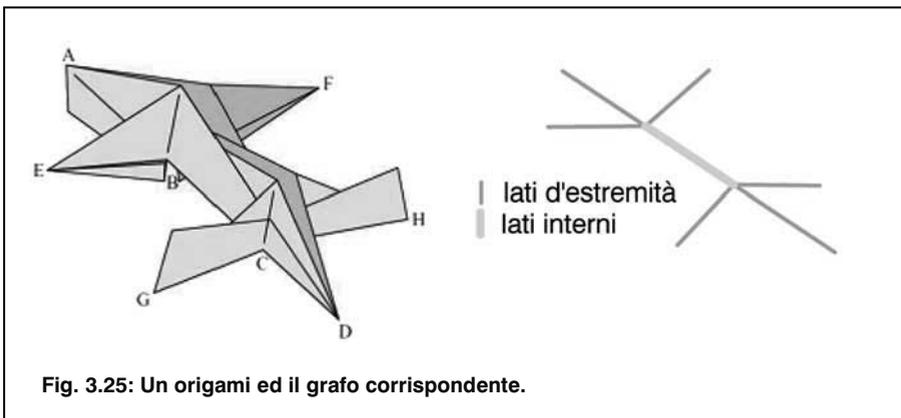
lunghezza  $l_i$  e l'esistenza o meno di un collegamento diretto con gli altri lati. Ad esempio, se due o più diramazioni dell'origami sono collegate tra loro in un vertice comune, allora anche i segmenti del grafo sono collegati tra loro. In particolare, la relazione tra i vertici del diagramma e i nodi del grafo è tale che:

ad ogni punto del diagramma corrisponde un solo punto del grafo;

ad ogni punto interno del grafo corrispondono uno o più punti del diagramma;

ad ogni punto estremo del grafo corrisponde un solo punto del diagramma.

L'inclinazione reciproca dei segmenti nel grafo è invece casuale, dettata dalla chiarezza visiva e non vincolata alla posizione reciproca delle pieghe dell'origami, potendo queste ultime anche essere sovrapposte.



**Fig. 3.25: Un origami ed il grafo corrispondente.**

Dimensionamento della pianta.

Per ogni coppia di vertici dell'origami, e di conseguenza del diagramma, la sommatoria delle lunghezze delle pieghe  $\sum l_i$  colleganti i vertici è maggiore o uguale della lunghezza dei lati  $L$  del grafo colleganti i nodi corrispondenti. Si ha:

$\sum L_i = \sum l_i \cos \alpha_i$       dove:

$\sum L_i$  = sommatoria degli  $L$  lati del grafo con lunghezza  $i$

$\alpha_i$  = angolo formato dalla piega  $l_i$  dell'origami con il piano di proiezione.

$\sum l_i$  = sommatoria delle  $l$  pieghe del diagramma di lunghezza  $i$

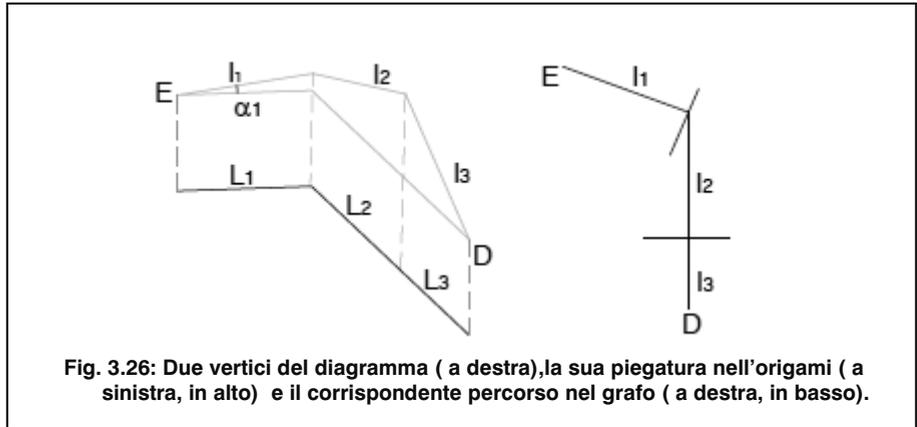


Fig. 3.26: Due vertici del diagramma ( a destra),la sua piegatura nell'origami ( a sinistra, in alto) e il corrispondente percorso nel grafo ( a destra, in basso).

I lati del grafo che collegano i nodi d'estremità formano i cosiddetti "percorsi attivi" del grafo  $T$ ; ogni percorso attivo del grafo è costituito dai nodi corrispondenti ai vertici d'estremità dell'origami e da dei lati di lunghezza pari alla distanza di progetto tra i vertici dell'origami. Se è possibile trasportare nel diagramma i nodi d'estremità ponendoli alla distanza di progetto, allora è anche possibile realizzare il diagramma. Le pieghe che collegano i vertici d'estremità alle distanze volute nel diagramma giaceranno nell'origami sul piano di proiezione e sono in relazione bi univoca con i lati d'estremità del grafo. Esse realizzano il caso particolare nel quale  $\sum L_i = \sum l_i$ .

Si può dimostrare [DE07] che se un percorso attivo del grafo contiene un lato corrispondente ad un tratto dei limiti della superficie del diagramma, allora il percorso attivo è formato nella sua interezza dai limiti della superficie nel diagramma. Se un tratto di un percorso attivo del grafo contiene una piega del diagramma, allora il percorso attivo è formato nella sua interezza da pieghe del diagramma.

Sviluppo del diagramma.

Il disegno del diagramma inizia con la trasformazione dei nodi d'estremità del grafo nei corrispondenti vertici del diagramma. Poiché ogni lato d'estremità del grafo corrisponde a una diramazione del diagramma, esso chiude il grafo in una direzione: è opportuno che i vertici siano posti in zone periferiche del diagramma. I vertici, inoltre, devono essere posti alla distanza imposta dal grafo. Li si collega quindi con delle pieghe, dette pieghe assiali, corrispondenti ai percorsi attivi del grafo. Il diagramma così ottenuto è formato da un certo numero di poligoni che Lang chiama poligoni attivi.

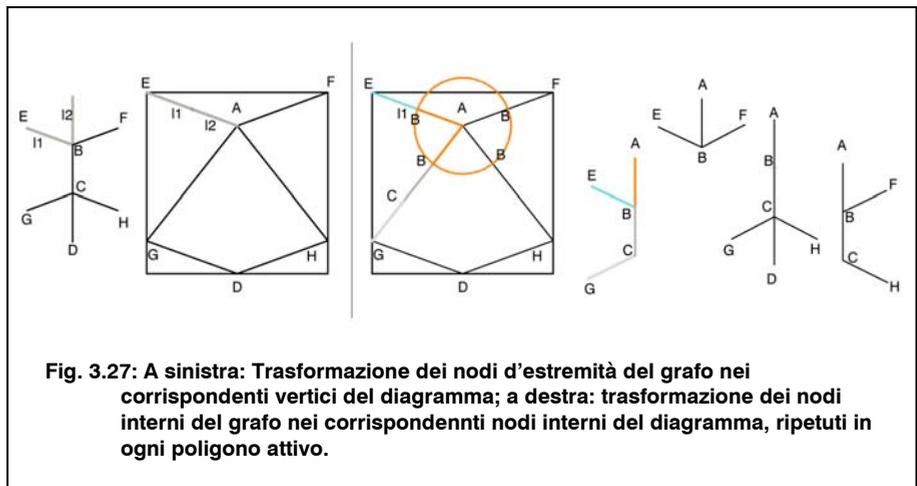
Successivamente, si posizionano i vertici interni. In questo caso, a un nodo interno del grafo corrispondono uno o più vertici interni del diagramma. In particolare, se nel grafo un nodo A è collegato a distanza  $l_1$  ad un nodo B, allora nel diagramma il vertice B si trova lungo un arco di cerchio di raggio  $l_1$  uscente da A. Ancora, se il nodo B collega A con F, E, C, allora nel diagramma si hanno tre vertici B', B'', B''', posti nei punti di intersezione dei rispettivi poligoni assiali con l'arco di cerchio uscente da A (vedi figura). In generale, dunque, se nel grafo un nodo interno B appartiene a i percorsi attivi, allora i vertici interni corrispondenti nel diagramma appartengono ai poligoni attivi i e sono posti lungo i lati dei poligoni ad una distanza dai vertici d'estremità corrispondente alla somma delle lunghezze dei lati del grafo che separano il nodo B dai vertici d'estremità via via considerati.

I poligoni e i percorsi individuati sono qualificati da Lang come attivi perché essi hanno una particolare importanza nella costruzione del diagramma. Se si considera un poligono attivo, poiché collega i vertici d'estremità dell'origami secondo il percorso minore possibile, esso corrisponde ad una diramazione dell'origami. Poiché tra i poligoni attivi e i percorsi attivi esiste una corrispondenza biunivoca, anche ciascun percorso attivo corrisponde ad una specifica diramazione dell'origami. Inoltre, l'area racchiusa da un

poligono attivo può essere destinata solo a un'unica diramazione dell'origami, non potendo contribuire ovviamente a formarne altre. Dunque, i poligoni attivi sono delimitati solo da vertici d'estremità e non possono contenere al loro interno altri vertici d'estremità. Similmente, anche il percorso attivo corrispondente nel grafo non può intersecarsi con altri percorsi attivi. Da quanto esposto deriva che i poligoni attivi possono essere studiati ciascuno indipendentemente dagli altri.

Può essere facilmente dimostrato che le aree esterne ai poligoni attivi del diagramma subiscono un processo di piegatura tale da renderle invisibili nell'origami: esse sono poste sotto altre pieghe e rimangono inutilizzate [LA03].

I poligoni attivi costituiscono la parte dell'origami che giace sul piano di proiezione. Il resto dell'origami si trova a quota maggiore e può ora essere disegnato.

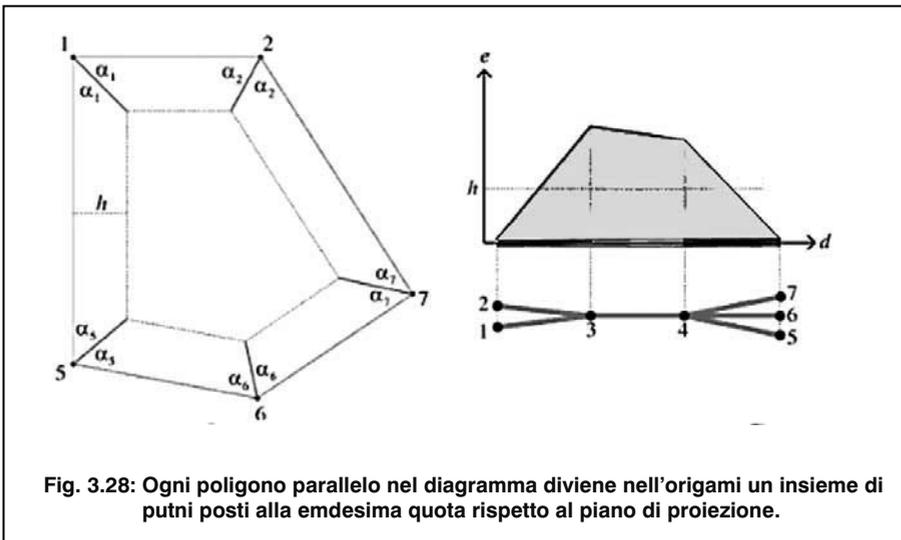


Dimensionamento della parte in elevazione.

L'area interna a ciascun poligono attivo deve giacere su un piano perpendicolare al piano di proiezione, tangente il piano col perimetro del

poligono stesso. L'obiettivo può essere raggiunto scomponendo ogni poligono con le molecole già descritte all'inizio di questo capitolo, ma esiste anche un approccio più generale, che prevede quanto segue.

Si tracciano delle parallele interne al perimetro del poligono, incrementando volta a volta la distanza  $h$  tra il poligono e le parallele.



Come il poligono attivo è formato da vertici che giacciono sul piano di proiezione, così ciascuna parallela è formata da vertici che si trovano su piani paralleli al piano di proiezione. Se si collegano i vertici corrispondenti del poligono attivo e dei poligoni paralleli, si realizzano delle pieghe che corrispondono nell'origami alle "linee di pendenza". Ciascuna di esse giace su un piano perpendicolare al piano di proiezione e separa due facce contigue lungo la linea di massima pendenza.

Durante il processo, si incorre in uno o in entrambi i seguenti casi notevoli.

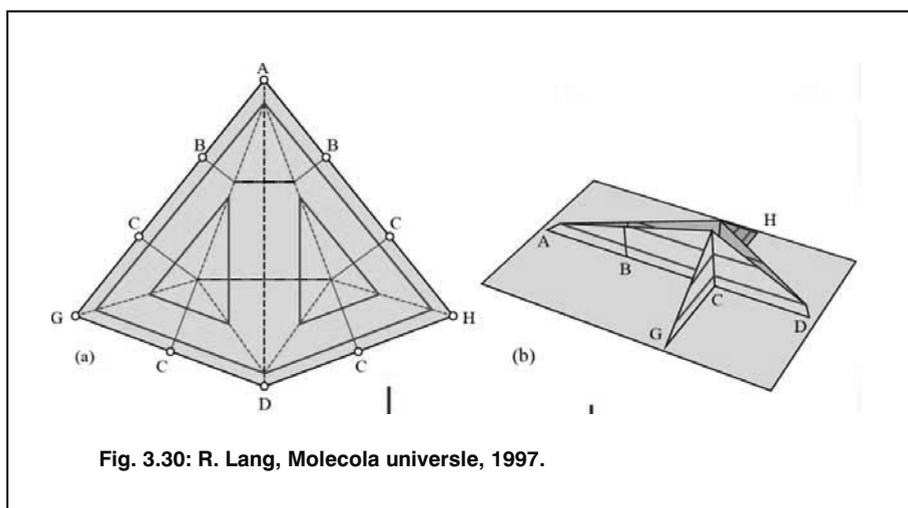
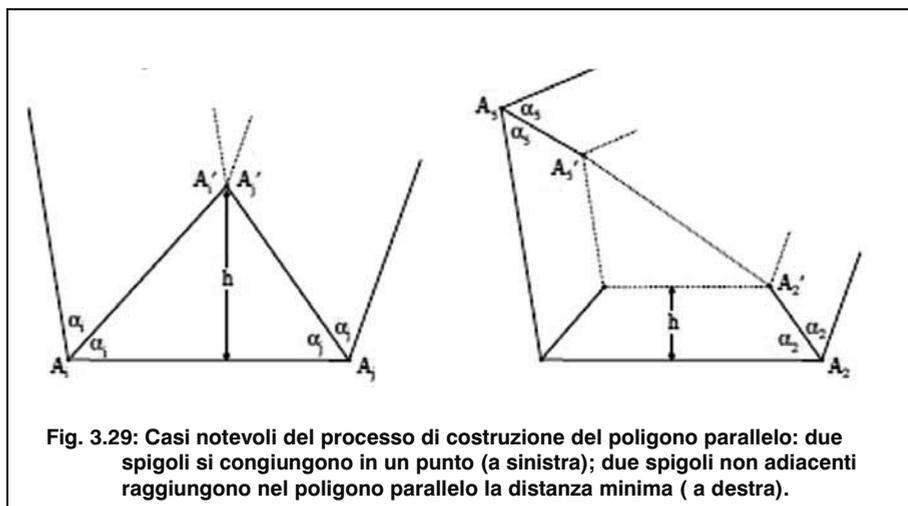
La distanza tra i vertici  $A_1'A_2'$  corrispondenti ai vertici  $A_1A_2$  si riduce a un punto: in questo caso si considera il punto nel poligono parallelo, che ha quindi un numero di lati inferiore rispetto al poligono originario.

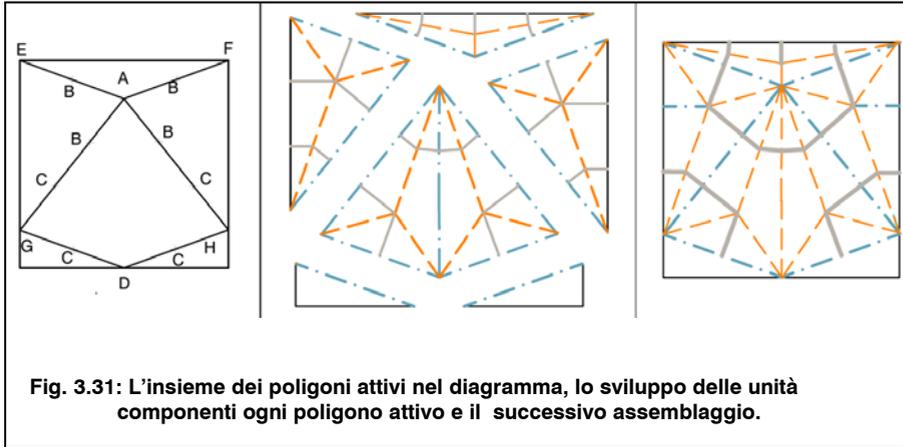
La distanza tra i vertici  $A_1A_2$  non adiacenti si trasforma nella distanza minima

tra tra i vertici  $A_1'A_2'$ : il segmento congiungente i due punti diviene un lato del poligono attivo ridotto, e anche in questo caso si ottiene un poligono parallelo con un numero di lati inferiore rispetto al poligono originario.

Il processo continua fino a che, a una determinata distanza  $h'$  dal poligono attivo, si ottengono uno o più poligoni paralleli costituiti da soli tre o quattro lati.

Lang chiama il frutto di questa scomposizione una “molecola universale” [LA03].

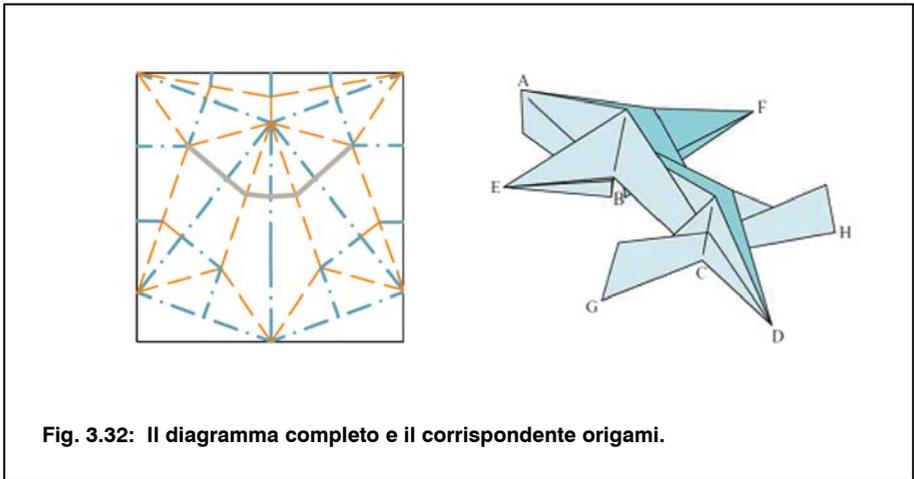




Combinazione delle unità componenti.

L'assegnazione dei versi monti – valli nel diagramma può essere piuttosto laboriosa a causa delle molte pieghe da considerare assieme. Demaine e Lang [DE06] hanno messo a punto un algoritmo che permette ricorsivamente di risolvere il problema. La tecnica utilizza un grafo orientato detto grafo delle sovrapposizioni, dove i nodi del grado rappresentano le facce del diagramma e gli spigoli direzionati rappresentano l'ordine di sovrapposizione delle facce.

Ai fini pratici, è forse più agevole sfruttare i dati già noti, i versi delle pieghe interne alle molecole, integrandoli con alcune ipotesi, da andare a modificare puntualmente nel caso in cui non si rispettino le condizioni per la piegatura piana. In particolare, la pratica mostra che tendenzialmente le pieghe di pendenza sono valli mentre le pieghe assiali sono monti. Una volta assegnati i versi in questo modo, nei punti dove non si soddisfano le condizioni per la piegatura piana, si può invertire il verso di due pieghe assiali o invertire il verso di una e lasciare non piegata l'altra.



Condizioni di esistenza del diagramma ed eventuali modifiche di progetto.

Come anticipato all'inizio di questo paragrafo, tramite il grafo è possibile verificare rapidamente se sussistono le condizioni per soddisfare la trasformazione  $P (F (T)) \rightarrow S$ . Ai fini della presente ricerca, nel caso in cui la trasformazione non sia verificata, si può capire in base alle proprie esigenze come modificare la forma di progetto  $P$  o la superficie da piegare  $S$ .

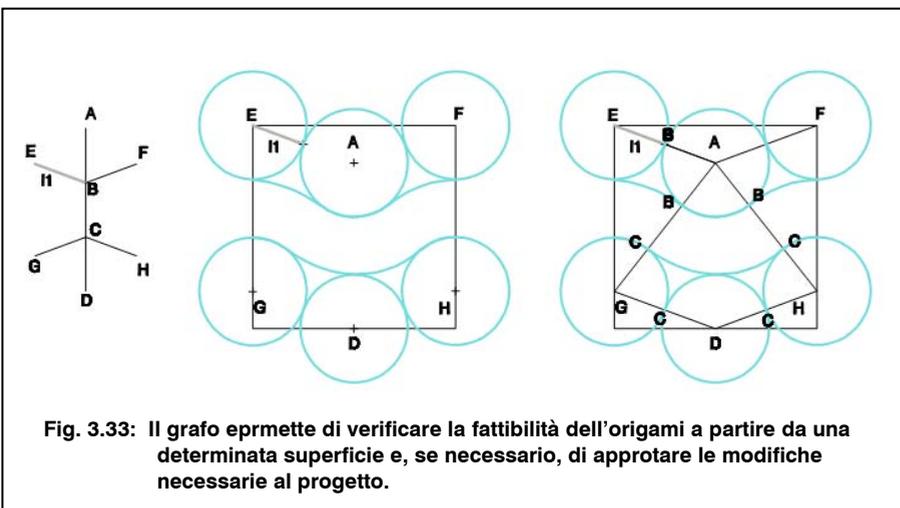
Ad ogni diramazione dell'origami, e solo ad esse, corrispondono univocamente un'area del diagramma e un lato del grafo. Le diramazioni sono perciò le parti di  $P$  che impongono le condizioni più stringenti: non è possibile che più diramazioni dell'origami siano realizzate tramite una stessa area del diagramma, né è possibile che due diramazioni del tutto separate nell'origami siano realizzate con parti di diagramma in contatto.

Con riferimento alla figura seguente, dato un grafo  $T$ , se si trasforma il nodo d'estremità  $A$  appartenente al lato di lunghezza  $L_i$  nel vertice  $A$  del diagramma, attorno ad esso si può isolare un arco di cerchio di raggio  $L_i$  uscente da  $A$  che sottende un'area destinata univocamente a realizzare il lato d'estremità del grafo. Gli archi di cerchio così tracciati non possono dunque mai sovrapporsi.

Ancora, con riferimento al grafo, se più nodi d'estremità sono separati da un

lato interno di lunghezza  $lx$ , allora nel diagramma un'area di lunghezza costante  $lx$  deve separare con continuità gli archi di cerchio corrispondenti a quei lati d'estremità.

Quando queste condizioni non sono verificate, è necessario rivedere nel grafo la lunghezza dei lati o i loro reciproci collegamenti così da poter posizionare cerchi e aree interne nel diagramma di partenza.



#### Note:

- [MA94] Jun Maekawa, "EVOLUTION OF ORIGAMI ORGANISMS", IN *SYMMETRY, CULTURE AND SCIENCE*, VOL.5, N.2, 1994, PP. 167-177.
- [KA95] Humiaki Kawahata, *FANTASY ORIGAMI*, TOKYO, GALLERY ORIGAMI HOUSE, 1995, PP. 174-179.
- [KA97] Humiaki Kawahata, *THE TECHNIQUE TO FOLD FREE FLAPS OF FORMATIVE ART ORIGAMI* IN Koryo Miura (A CURA DI), *ORIGAMI SCIENCE AND ART. PROCEEDING OF THE 2<sup>ND</sup> INTERNATIONAL MEETING OF ORIGAMI SCIENCE AND SCIENTIFIC ORIGAMI*, OTSU, 1994, SEIAN UNIVERSITY OF ART AND DESIGN, JP, 1997, PP. 63-71.
- [LA97] Robert J. Lang, *A COMPUTATIONAL ALGORITHM FOR ORIGAMI DESIGN*, IN Koryo Miura (A CURA DI), *ORIGAMI SCIENCE AND ART. PROCEEDING OF THE 2<sup>ND</sup> INTERNATIONAL MEETING OF ORIGAMI SCIENCE AND SCIENTIFIC ORIGAMI*, OTSU, 1994, SEIAN UNIVERSITY OF ART AND DESIGN, JP, 1997, PP. 98-105.
- [LA03] Robert J. Lang, *ORIGAMI DESIGN SECRETS. MATHEMATICAL METHODS FOR AN ANCIENT ART*, NATICK, US-MA, A K PETERS LTD., 2003.
- [DE06] Erik D. Demaine, Robert J. Lang, *FACET ORDERING AND CREASE ASSIGNMENT IN UNIAXIAL BASES*, IN Robert J. Lang (A CURA DI) *ORIGAMI 4, PROCEEDINGS OF THE FOURTH*

INTERNATIONAL MEETING OF ORIGAMI SCIENCE, MATHEMATICS, AND EDUCATION, NATICK, US-MA, A K PETERS LTD., 2006, PG. 189-207.

[DE07] Erik D. Demaine, Joseph O'Rourke, *GEOMETRIC FOLDING ALGORITHMS. LINKAGES, ORIGAMI, POLYHEDRA*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2007, PP. 244-246.

[DE@] Erik D. Demaine, < [HTTP://ERIKDEMAINE.ORG/](http://erikdemaine.org/) >

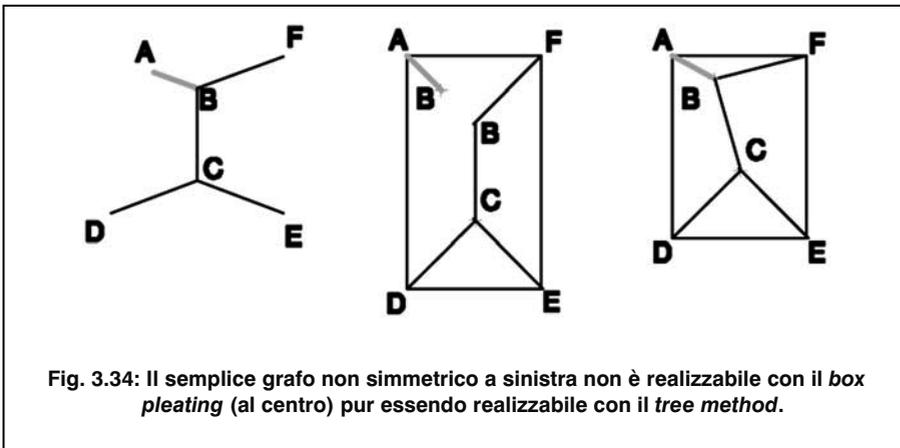
### 3.2.1 Box pleating.

A partire dagli anni '60 del secolo scorso si è andato diffondendo una tecnica che permettesse di generare forme piane, ma che fosse altresì idonea allo sviluppo di forme tridimensionali ortogonali, detta perciò *box pleating*.

Caratteristica della tecnica è la restrizione imposta all'inclinazione delle pieghe, le quali possono essere disposte solo secondo angoli multipli di  $45^\circ$  rispetto al perimetro di un foglio quadrato, ovvero rispetto al sistema cartesiano di riferimento. Lo sviluppo di origami di forme prestabilite è simile alla serie di algoritmi già visti per il *tree method*, e quindi prevede la creazione di un grafo corrispondente all'origami, la trascrizione nel diagramma dei nodi e dei lati del grafo, la scomposizione delle molecole risultanti e l'assegnazione dei versi [LA03].

Il *box pleating* non permette sempre di tradurre in diagrammi tutti i grafi possibili con il *tree method*, ad esempio permette diagrammi di strutture simmetriche molto regolari, ma può non essere realizzabile appena si introduce una variazione anche piccola nella simmetria del disegno. Ancora, a volte necessita di un diagramma di area maggiore per realizzare una medesima forma. Esso, però, gode di alcuni vantaggi. Innanzitutto, le distanze tra le pieghe sono combinazioni lineari le une delle altre, tanto che si può sovrapporre il diagramma a una griglia data; l'ortogonalità delle pieghe ne rende inoltre più facile la gestione, nello specifico è possibile

separare le varie diramazioni nel diagramma con poligoni più regolari, tanto che, mentre alcuni di essi possono essere sviluppati fino ad essere resi piani, altri possono essere mantenuti tridimensionali, cioè le molecole corrispondenti possono in tutto o in parte non essere scomposte, senza che ciò comprometta lo sviluppo in piano del resto del diagramma.



Impostazione del grafo.

Il grafo corrispondente all'origami di progetto è dato da dei lati d'estremità corrispondenti alle diramazioni e dei lati interni corrispondenti al "corpo" dell'origami, dal quale le diramazioni dipartono. Di ogni lato sono noti la lunghezza  $L_i$  e l'esistenza o meno di un collegamento diretto con gli altri lati.

Poiché il disegno del grafo si basa solo sulla estrapolazione delle caratteristiche dell'origami di progetto, è il medesimo già visto nel *tree method*, e a quello ci si riferisce per una spiegazione dettagliata (§ 3.2.2).

Dimensionamento della pianta.

Per ogni coppia di vertici dell'origami, e di conseguenza del diagramma, la sommatoria delle lunghezze delle pieghe  $\sum l_i$  colleganti i vertici è maggiore o uguale della lunghezza dei lati  $L$  del grafo colleganti i nodi corrispondenti. Si ha:

$\sum L_i = \sum l_i \cos \alpha_i$       dove:

$\sum L_i$  = sommatoria degli L lati del grafo con lunghezza  $l_i$

$\alpha_i$  = angolo formato dalla piega  $l_i$  dell'origami con il piano di proiezione.

$\sum l_i$  = sommatoria delle l pieghe del diagramma di lunghezza  $l_i$

Caratteristica del metodo è che le pieghe siano inclinate tra loro solo secondo multipli di  $45^\circ$ , anche la distanza di due vertici nel diagramma, quindi, non è il segmento di retta più corto che collega i due punti, bensì la lunghezza complessiva di un percorso dal primo al secondo punto formato da pieghe inclinate secondo multipli di  $45^\circ$ .

Sviluppo del diagramma.

S'impostano nel diagramma i vertici d'estremità posti alla distanza di progetto e li si collega tra loro. L'insieme dei vertici e delle pieghe così ottenute costituiscono i cosiddetti poligoni attivi del diagramma. In particolare, ogni poligono attivo è formato da delle pieghe interne al diagramma e eventualmente da segmenti appartenenti ai limiti della superficie del diagramma.

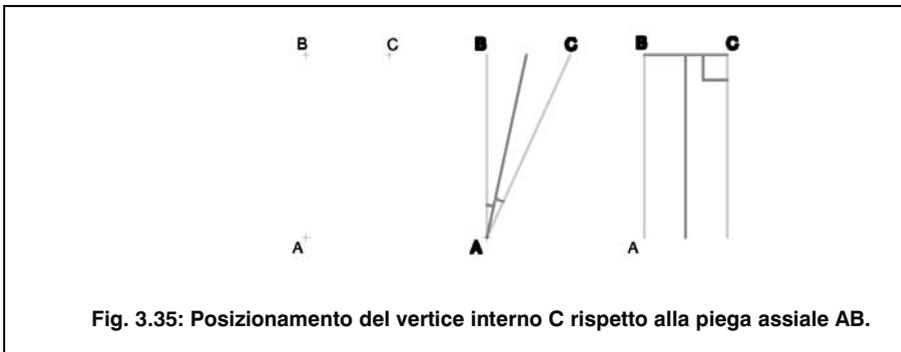
Si riportano poi sui poligoni attivi i vertici corrispondenti ai nodi interni del diagramma. Poiché ogni poligono attivo corrisponde a un percorso attivo del grafo, ovvero a un percorso collegante due nodi d'estremità del grafo, allora se un nodo interno è presente in  $n$  percorsi attivi, esso sarà riportato alla distanza opportuna negli  $n$  poligoni attivi.

Si vuole ora mettere in luce una differenza operativa rispetto a quanto visto per la tecnica del *tree method*. Come espresso nel paragrafo precedente, l'area posta all'interno di ciascun poligono attivo si trasforma, una volta piegata, nella parte in elevazione della diramazione corrispondente. Perché l'origami sia piano, essa deve poter essere piegata in modo tale da giacere nell'origami in un piano perpendicolare al piano di proiezione. Si osserva

qui una grossa differenza. Nella pratica, se il vertice interno C deve essere piegato fino a trovarsi sul piano contenente AB, a distanza  $l_{AC}$  da A e  $l_{BC}$  da B, il punto si trovava nell'intersezione di due archi di cerchio rispettivamente con raggio  $L_{AC}$  centrato in A e raggio BC centrato in B. Inserendo una piega bisettrice dell'angolo BAC, il punto C sarebbe finito sul piano contenente AB.

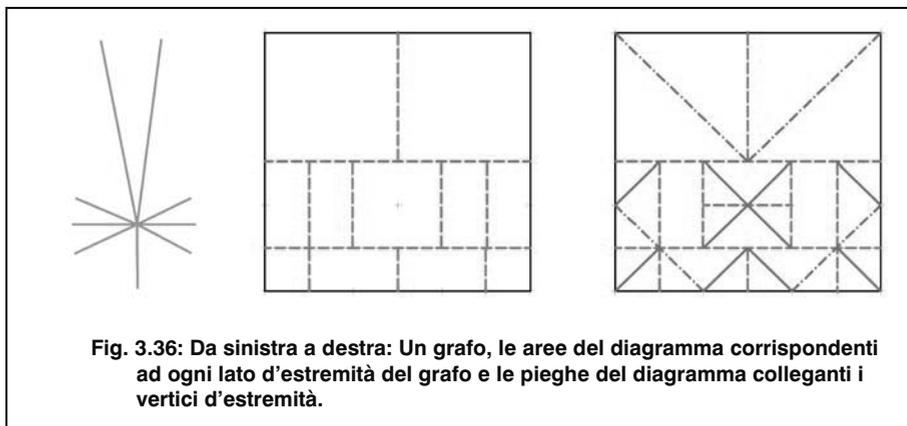
Ora è necessario procedere per segmenti inclinati reciprocamente secondo multipli di  $45^\circ$ , nel caso in figura tramite segmenti orizzontali e verticali. La bisettrice diviene perciò una retta mediana tra il segmento AB e il segmento parallelo passante per C.

Dunque, la distanza di progetto  $\Sigma_{AB} L_i$  deve essere uguale alla  $\Sigma_{AB} l_i$  espressa come differenza assoluta tra i valori delle coordinate orizzontali e verticali dei due vertici.



Le pieghe insieme ai segmenti limite della superficie che formano i poligoni attivi costituiscono l'insieme di tutti i punti che giacciono sul piano di proiezione.

Poiché ogni poligono attivo corrisponde a una specifica diramazione dell'origami, come meglio precisato a riguardo del tree method, ciascun poligono attivo può essere trattato indipendentemente.

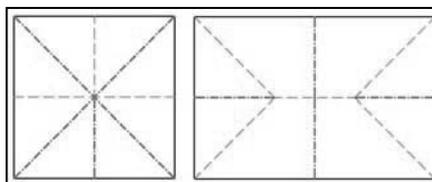


Dimensionamento della parte in elevazione.

Come nel *tree method*, la parte in elevazione può essere sviluppata tracciando delle parallele interne al perimetro del poligono, incrementando volta a volta la distanza  $h$  tra il poligono e le parallele. In questo modo, ogni parallela si trasforma nell'origami nell'insieme di punti posti a quota  $h$  sul piano di proiezione. Si procede così fino a raggiungere dei casi notevoli, già trattati nel paragrafo precedente, che si trasformano nei punti di quota maggiore di ogni diramazione dell'origami.

Questa operazione, tuttavia, non è sempre conveniente nel *box pleating*, perché genera un elevato numero di pieghe.

È preferibile in questo caso riferirsi a dei casi noti. Poiché le molecole sono tutte di forma quadrata o rettangolare, è sufficiente utilizzare due sole molecole, che nell'origami tradizionale sono note come "*waterbomb base*" e "*sawhorse base*", di seguito illustrate.



**Fig. 3.37:** Scomposizione dei poligoni attivi in "*waterbomb base*", a sinistra, e "*sawhorse base*", a destra.

Combinazione delle unità componenti.

Una volta scomposte le molecole rettangolari e quadrate, è possibile che gli indici delle pieghe attorno a dei punti non siano corretti o che manchino determinate pieghe, cosicché di fatto il diagramma non è trasformabile.

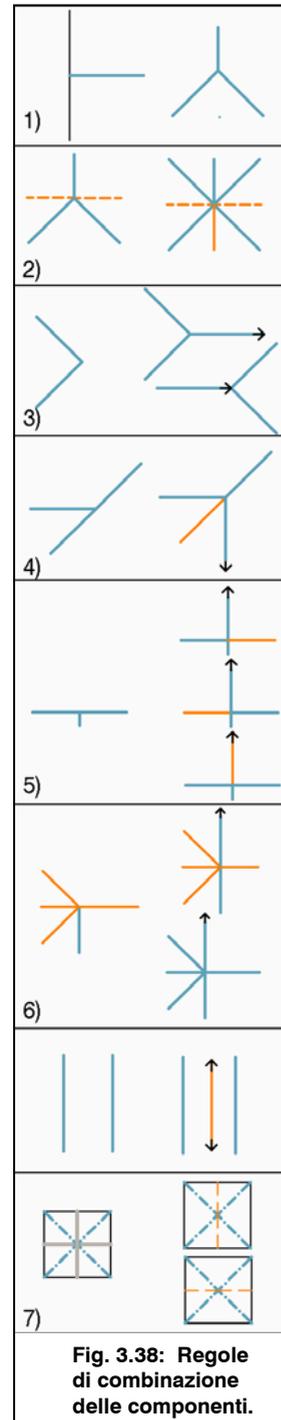
Lang elabora una serie di “buone pratiche” da mettere in atto per garantire che il diagramma sia completo, pieghevole e piano.

1) una piega percorre un tracciato rettilineo e / o con successive specchiature e termina quando incontra due pieghe che si incontrano a  $90^\circ$  su di essa o il margine del diagramma;

2) due pieghe che si incontrano a  $45^\circ$  si dirama una nuova piega bisettrice dell'angolo ottuso con direzione uscente dal punto di intersezione. Similmente una piega può terminare con l'intersezione di due pieghe che si incontrano a  $45^\circ$  con direzione entrante nel punto terminale della piega originale;

3) una piega che incontra un'altra inclinata secondo un angolo di  $45^\circ$  continua specchiata dalla parte opposta e con indice opposto;

4) una piega che incontra un'altra con un'inclinazione multipla di  $90^\circ$  procede al di là del punto di intersezione cambiando il proprio indice o quello della piega che ha intersecato;



**Fig. 3.38: Regole di combinazione delle componenti.**

5) una piega che incontra un vertice a  $\Psi$  continua il proprio tracciato rettilineo e mantiene il proprio indice, ma inverte l'indice delle pieghe incontrate da un lato o dall'altro del punto di intersezione;

6) due pieghe parallele di uguale indice generano una piega intermedia e parallela ad esse, con indice opposto;

7) le pieghe che circondano le molecole possono avere indice  $0^\circ$ , ovvero non subire un processo effettivo di piegatura.

Trovare una regola universale che permetta l'assegnazione contestuale dei versi delle pieghe è un problema aperto; in campo puramente matematico Demaine, pur limitando l'indagine al caso di coppie di pieghe parallele, elabora anch'egli un metodo ricorsivo: attraverso delle verifiche progressive della congruità delle pieghe attorno a vertici via via incontrati si verifica infine l'intero diagramma [DE07].

Ad ogni modo, il problema può essere distinto in due fasi. Da un lato è necessario garantire la piegatura. Dall'altro la piegatura piana.

Il caso in cui l'origami non sia piano si verifica quando non si rispetta il teorema  $V-M = |2I|$ , per cui si hanno due alternative.

Si possono rivedere gli indici delle pieghe uscenti dal vertice: la scelta è preferibile nel caso di strutture simmetriche

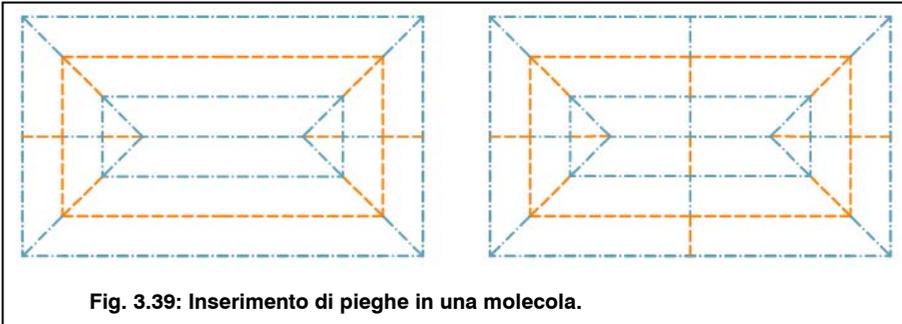
Si può inserire una nuova piega: la scelta può essere conveniente quando la struttura non è simmetrica ed il vertice si trova vicino al limite della superficie.

Il caso in cui l'origami non sia pieghevole si verifica quando alcune pieghe rimangono isolate nel diagramma: è necessario che ogni monte o valle creata s'inserisca in una sequenza di pieghe o si porti sul limite della superficie. A questo si riferisce la prima regola posta da Lang.

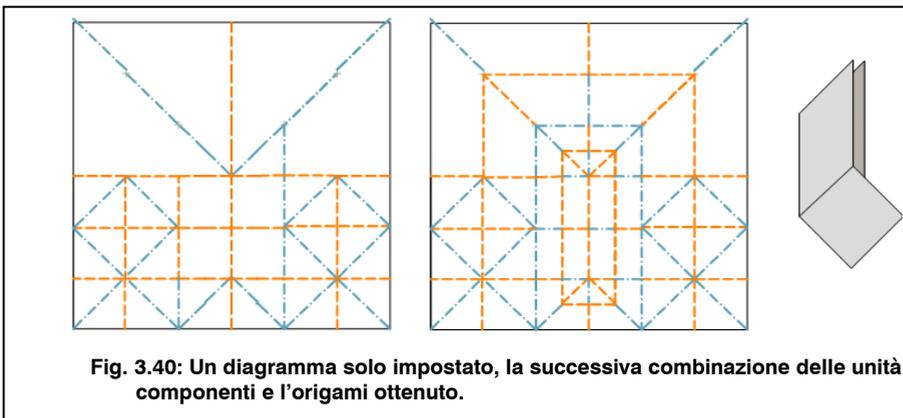
Le pieghe inclinate di  $45^\circ$  rispetto alle pieghe assiali, ovvero le pieghe di pendenza, sono tendenzialmente valli, le pieghe che costituiscono il

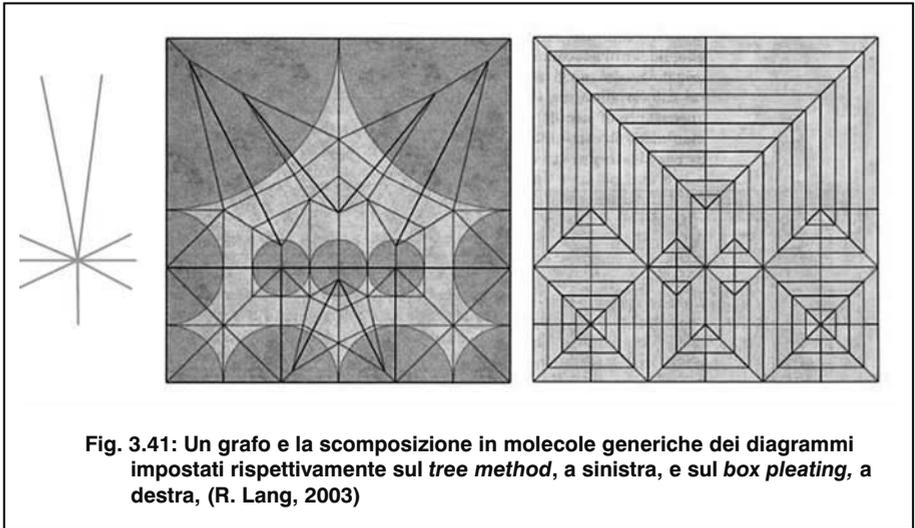
perimetro delle molecole possono essere piane.

Inoltre, nell'inserire le pieghe mancanti, è opportuno che se si varia nell'intorno di un punto P l'indice di una piega di pendenza, esso vari anche in tutti i punti posti alla stessa quota di P, per non deformare l'origami, e che anzi la variazione sia seguita dalla variazione di una piega di uguale lunghezza e indice contrario, come mostrato in figura.



Poiché il *box pleating* è una tecnica molto sensibile alla simmetria insita nella struttura, in generale tutte le modifiche fatte devono essere condotte sulla base di principi di simmetria. Ciò ha però dei vantaggi: le tecniche alla base del *box pleating* permettono, con gli opportuni accorgimenti, di creare origami non solo della forma voluta, ma anche trasformabili rigidamente, come approfondito nei prossimi paragrafi.



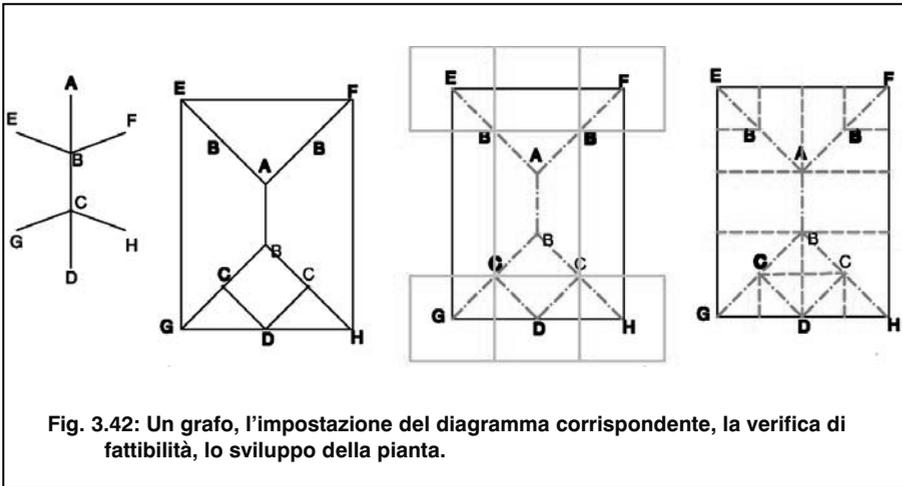


Condizioni di esistenza del diagramma ed eventuali modifiche di progetto.

Con riferimento alla figura seguente, dato un grafo  $T$ , se si trasforma il nodo d'estremità  $A$  appartenente al lato di lunghezza  $l_i$  nel vertice  $A$  del diagramma, attorno ad esso si può isolare un quadrato con lato  $l_i/2$  centrato in  $A$ . Il quadrato può anche non giacere completamente nel diagramma, senza che ciò modifichi in alcun modo la forma finale, purché contenga il centro e almeno un tratto del perimetro. L'area così delimitata è destinata univocamente a realizzare il lato d'estremità del grafo, dunque le aree così tracciate non possono dunque mai sovrapporsi.

Ancora, con riferimento al grafo, se più nodi d'estremità sono separati da un lato interno di lunghezza  $l_x$ , allora nel diagramma un'area di larghezza costante  $l_x$  deve separare con continuità i quadrati corrispondenti a quei lati d'estremità.

Quando queste condizioni non sono verificate, è necessario rivedere nel grafo la lunghezza dei lati o i loro reciproci collegamenti così da poter posizionare i quadrati nel diagramma di partenza.



## Note:

- [DE07] Erik D. Demaine, Joseph O'Rourke, *GEOMETRIC FOLDING ALGORITHMS. LINKAGES, ORIGAMI, POLYHEDRA*, CAMBRIDGE UNIVERSITY PRESS, 2007, pp. 240-253.
- [LA03] Robert J. Lang, *ORIGAMI DESIGN SECRETS. MATHEMATICAL METHODS FOR AN ANCIENT ART*, NATICK, US-MA, A K PETERS LTD., 2003.

## Cap. 3.3. Generazione di una forma trasformabile.

### 3.3.1. Introduzione: l'approccio fold and cut.

Obiettivo è studiare l'assemblaggio di più forme poligonali varie che in configurazione chiusa occupino un volume regolare e in configurazione aperta creino delle sequenze di poligoni di forma secondo progetto.

In questo capitolo, dunque, la trasformazione del diagramma in origami deve poter avvenire attraverso una sequenza di piegatura deve prevedere solo movimenti di rotazione e traslazione, in modo tale da poter essere attuato con mezzi di controllo e di propagazione del movimento non complessi e idonei nello specifico alle applicazioni architettoniche.

Per ottenere l'obiettivo, sono idonee le tecniche sviluppate per risolvere il problema del "fold and cut". Il nome deriva dal fatto che il problema fu posto allo scopo di studiare la piegatura di un foglio di carta generico, in modo tale che, tagliando l'origami con un taglio retto, si ottenga esattamente la figura poligonale voluta. Il primissimo esempio di utilizzo di questo metodo si trova in un libro di giochi di carta giapponese, il Wakoku Chiyekurabe scritto da Kan Chu Sen nel 1721; molto tempo dopo, nel 1922, ne diede un esempio Harry Houdini in Paper Magic e sulla sua scia altri illusionisti e appassionati; il primo approccio matematico al problema fu posto da Martin Gardner nel 1995.

Esistono in realtà due tecniche di approccio: lo Straight Skeleton e il Disk Packing. Il metodo dello Straight Skeleton può essere usato per realizzare forme poligonali concave o convesse, si adatta particolarmente bene per figure dotate di simmetrie, nel complesso è una tecnica piuttosto intuitiva. Il

metodo del Disk Packing permette di giungere alla soluzione realizzando un minor numero di pieghe rispetto allo Straight Skeleton, ma ha un approccio un po' più complesso.

Note:

[DE04] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, "*Fold-and-Cut Magic*", in BARRY CIPRA e al. (a cura di). *Tribute to a Mathemagician*, Natick, US-MA, A K Peters. 2004, pp. 23–30.

### 3.3.2. Straight Skeleton.

A partire dalla forma desiderata in configurazione aperta, lo Straight Skeleton è definito dalla traiettoria dei vertici quale si ottiene procedendo attraverso un simultaneo restringimento di tutti gli spigoli attuato in sequenze successive sempre con la medesima progressione, a distanza costante.

Durante il restringimento si possono verificare due situazioni:

Può verificarsi che due spigoli della figura poligonale iniziale possono ridursi a un punto, e il punto diviene un vertice dello Straight Skeleton;

Può verificarsi che almeno tre spigoli formano un'area chiusa, e quest'area viene trattata ancora attraverso successivi restringimenti fino a che non si riduca ad uno o più punti; i punti divengono vertici dello Straight Skeleton.

Lo Straight Skeleton è dato dall'unione dei vertici e dei segmenti così ottenuti. In particolare, esso pone una corrispondenza biunivoca tra le regioni nelle quali divide il diagramma e gli spigoli della figura poligonale voluta.

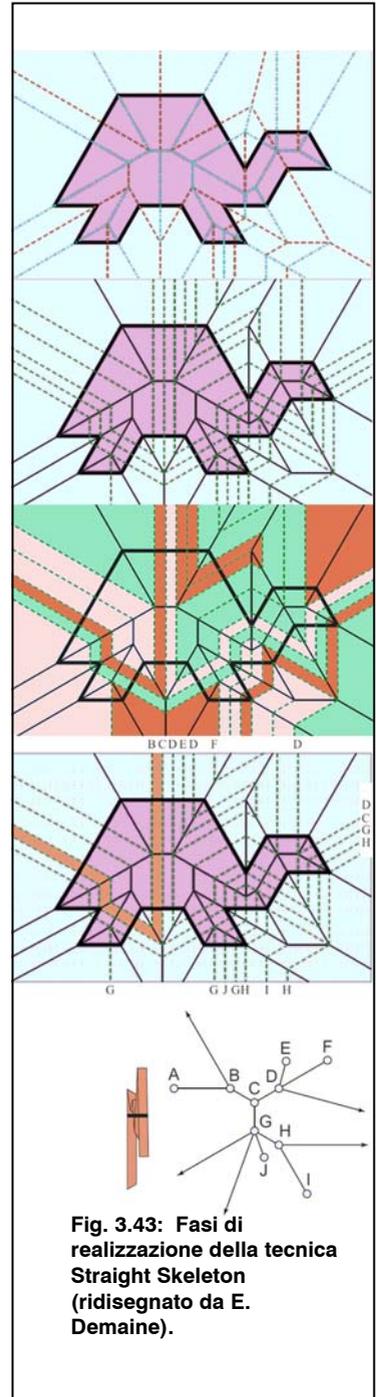
La figura ottenuta è data da vertici di vario grado (dove il grado di un vertice indica il numero di spigoli che vi si incontrano) mentre perché le pieghe attorno ad un vertice diano luogo a una figura piana esse devono rispettare i criteri già visti (cfr. § 3.1.4.).

Il passo successivo consiste quindi nell'aggiungere delle pieghe nel diagramma. Le pieghe sono tracciate a partire da ogni vertice dello Straight Skeleton in direzione perpendicolare allo spigolo corrispondente della figura poligonale. Se la piega incontra un altro spigolo dello Straight Skeleton essa lo attraversa riflettendosi su di esso. Si definiscono perpendicolari reali quelle che sono incidenti un vertice dello Straight Skeleton, e che saranno effettivamente piegate in configurazione chiusa; si definiscono perpendicolari immaginarie tutte le altre, che non è necessario piegare perché l'origami sia piano.

Si ottengono così delle aree di spessore costante racchiuse da una o due linee segmentate parallele tra loro e formanti ad ogni cambio di direzione degli angoli retti. Queste aree del diagramma e le linee segmentate che le racchiudono, dette corridoi, possono essere di due tipi: lineari, se hanno un inizio e una fine, e circolari, se si chiudono su se stesse.

La fase successiva è decidere l'assegnazione dei versi. Gli spigoli dello Straight Skeleton sono Monti se bisettori di angoli convessi, Valli se bisettori di angoli

concavi; gli spigoli della figura poligonale iniziale sono valli;



**Fig. 3.43: Fasi di realizzazione della tecnica Straight Skeleton (ridisegnato da E. Demaine).**

le aree sottese dagli spigoli dello Straight Skeleton possono essere piegate singolarmente a concertina sfruttando i tracciati delle perpendicolari: si indicano le perpendicolari in successione come Valli e Monti a partire da un punto di incontro con uno spigolo dello Straight Skeleton.

In particolare, gli spigoli dello Straight Skeleton che sono posti sopra la linea di taglio sono Monti se bisettori di angoli convessi, Valli se bisettori di angoli concavi; gli spigoli dello Straight Skeleton che sono posti sotto la linea di taglio sono Valli se bisettori di angoli convessi, Monti se bisettori di angoli concavi; gli spigoli della figura poligonale sono Valli se posti tra aree dello Straight Skeleton sopra la regione di taglio; Monti se posti tra aree sotto la regione di taglio; non piegati se posti tra un'area inferiore e un'area superiore.

I corridoi si piegano a concertina, ma può essere difficile a volte tenere conto del loro sviluppo più o meno articolato. Il loro sviluppo può però essere assimilato a un grado ad albero in modo tale che la lunghezza di ogni segmento del grafo corrisponda alla lunghezza di un'area racchiusa dallo Straight Skeleton e ogni vertice a un lato dei corridoi. Sul diagramma si verifica il verso della piega corrispondente al vertice di origine del grafo e successivamente sul grafo si assegna ai vertici seguenti alternativamente un valore convenzionale indicante Monti o Valli.

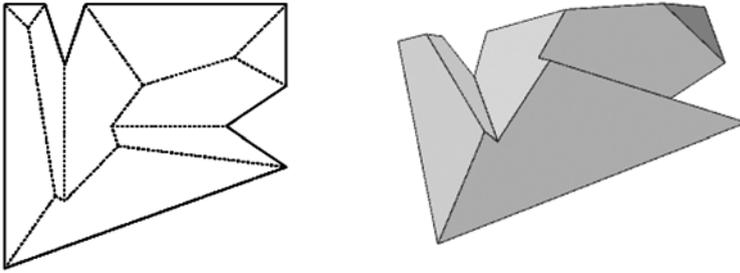
Il metodo dello Straight Skeleton ha già trovato applicazione architettonica. Aichholzer e Aurenhammer per primi lo hanno proposto per creare delle coperture di pianta qualsiasi in modo tale che non si abbiano impluvi e che la suddivisione sia più omogenea e meno frazionata, specie per coperture complesse, rispetto al metodo tradizionale.

E' altresì possibile stabilire prima la quota che una o più falde devono raggiungere, nel quale caso gli spigoli di gronda delle falde interessate sono progressivamente ristrette seguendo una opportuna inclinazione, con

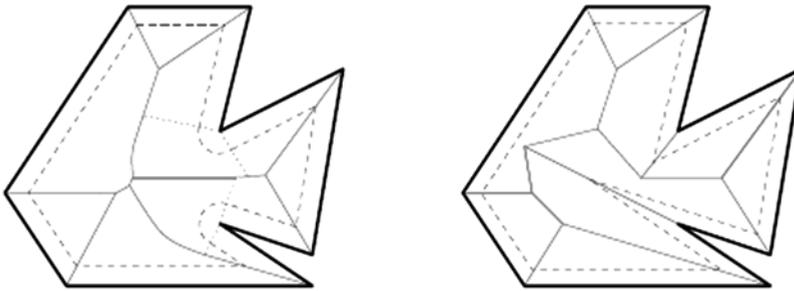
la condizione che ogni punto del diagramma sia raggiunto da non più di una parallela alla volta.

Note:

- [DE04] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, “*Fold-and-Cut Magic*”, in BARRY CIPRA et al. (a cura di). *Tribute to a Mathematician*, Natick, US-MA, A K Peters. 2004, pp. 23–30.
- [LU98] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, ANNA LUBIW. “*Folding and one straight cut suffice*”, in *Technical Report CS-98-18*, University of Waterloo, Waterloo, CDN, 1998.
- [DE98] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, ANNA LUBIW. “*Folding and cutting paper*” in J. AKIYAMA, M. KANO, M. URABE (a cura di), *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1763, Proceedings of the Japan Conference on Discrete and Computational Geometry, Tokyo, JP, 1998, pg. 104-117.
- [DE99] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, ANNA LUBIW. “*Folding and one straight cut suffice*”, in *Proceedings of the 10th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, pp. 891-892, Baltimore, US-MD, 1999.
- [AI95] OSWIN AICHHOLZER, FRANZ AURENHAMMER, DAVID ALBERTS, BERND GÄRTNER, “*A novel type of skeleton for polygons*”, in *Journal of Universal Computer Science*, Vol.1, n.12, 1995, pg. 752–761.
- [AI96] OSWIN AICHHOLZER, FRANZ AURENHAMMER, “*Straight skeletons for general polygonal figures in the plane*”, in *Proceedings of the 2nd Annual. International Conference Computing and Combinatorics - COCOON '96*, Lecture Notes in Computer Science, n. 1090, Springer-Verlag, 1996, pp. 117–126.
- [EP99] DAVID EPPSTEIN, “*Raising roofs, crashing cycles, and playing pool*” in *Discrete & Computational Geometry, Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on Computational Geometry*, 1998, Vol. 22, n. 4, 1999, pp. 569-592.



**Fig. 3.44:** Schema di copertura realizzata con il metodo dello Straight Skeleton e vista tridimensionale (O.Aichholzer, F. Aurenhammer, 1996).



**Fig. 3.45:** A sinistra, schema di copertura tracciato con il metodo tradizionale) e a destra con il metodo dello Straight Skeleton ( D.Epstein, 1998).

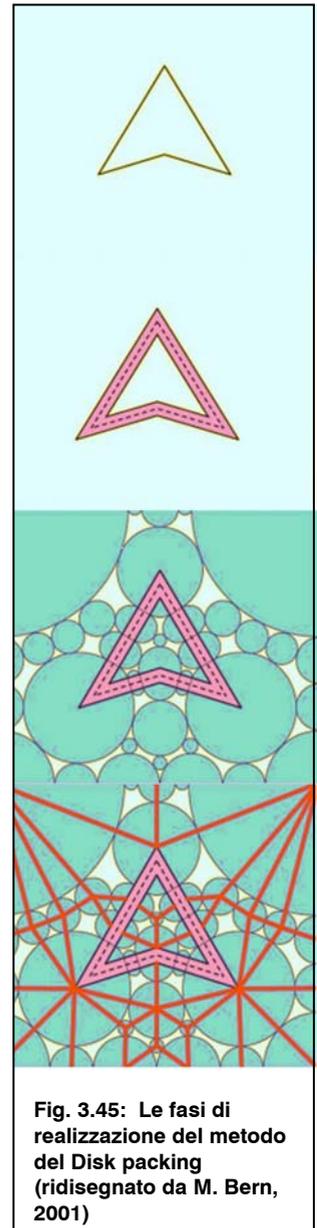
### 3.3.3. Disk packing.

Il metodo del Disk Packing si realizza a partire dalla configurazione aperta nel modo seguente.

Gli spigoli della figura voluta sono ampliati tracciando da ambo i lati delle parallele a una distanza sufficientemente piccola.

Con centro in ogni vertice della figura poligonale e del foglio si inserisce una combinazione di cerchi senza sovrapposizioni di raggio pari alla metà della distanza tra il vertice e il più vicino spigolo della figura poligonale o del bordo del foglio. Si inseriscono dei cerchi aggiuntivi nei tratti rimasti liberi degli spigoli del foglio e della figura poligonale in modo tale che tutti gli spigoli siano composti da raggi di cerchio. Si inseriscono delle ulteriori circonferenze nelle aree racchiuse da più di 4 circonferenze in modo tale che ogni spazio libero tra i cerchi abbia solo 3 o 4 lati. Tutti i cerchi possono tra loro essere tangenti ma non devono sovrapporsi.

Si collegano il centro di ogni cerchio coi centri dei cerchi tangenti, ottenendo un insieme di poligoni di 3 o 4 lati. I poligoni vengono trattati come le molecole tradizionali dell'origami, già viste nel paragrafo XXX, in modo tale che esse, considerate singolarmente, siano piegabili piane e i loro spigoli in configurazione chiusa siano allineati.



**Fig. 3.45: Le fasi di realizzazione del metodo del Disk packing (ridisegnato da M. Bern, 2001)**

Per l'assegnazione dei versi si procede come segue. Gli spigoli della figura poligonale non sono piegati; le pieghe poste sulle bisettrici degli angoli interni alla figura poligonale, sono monti e quelle poste sugli angoli esterni sono valli; le pieghe tangenti alle circonferenze e quelle che chiudono le molecole sono definite in prima approssimazione come valli se poste all'interno della figura poligonale, monti se poste all'esterno.

La configurazione ottenuta non tiene però conto dei criteri per la piegatura piana.

Per rendere la configurazione chiusa piana è necessario aggiungere altre pieghe, in particolare si aggiunge una piega monte ai vertici interni alla figura poligonale e si aggiunge una piega a valle per i vertici esterni, non considerando i vertici sulla figura poligonale. Per approcciare globalmente il problema, in [BE01] si propone di utilizzare un grafo che comprenda tutti gli spigoli interni alle molecole poste tra la figura poligonale e il bordo della carta. composto in modo tale da permettere l'assegnazione sequenziale dei versi monti – valli. Il risultato finale è dato da due insiemi di pieghe, una per l'area interna alla forma poligonale e una per l'area esterna, connesse lungo i segmenti della figura poligonale, ciascuno dei due insiemi dato da pieghe disposte una via l'altra in modo simile alle pagine di un libro.

#### Note:

- [BE99] MARSHALL BERN, ERIK DEMAINE, DAVID EPPSTEIN, BARRY HAYES, "A *Disk-Packing Algorithm for an Origami Magic Trick*", in ELENA LODI, LINDA PAGLI, NICOLA SANTORO (a cura di), *Fun with Algorithms*, Carleton Scientific, 1999, pp. 32-42,
- [BE01] MARSHALL BERN, ERIK DEMAINE, DAVID EPPSTEIN, BARRY HAYES, "A *Disk-Packing Algorithm for an Origami Magic Trick*", in *Origami3: Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education – OSME*, Monterey, 2001, Natick, US-MA, A K Peters, 2001, pp. 17-28.

## Cap. 3.4. Studio di moduli suscettibili di agire in sequenza.

### 3.4.1. Composizione di moduli base: le tassellazioni origami.

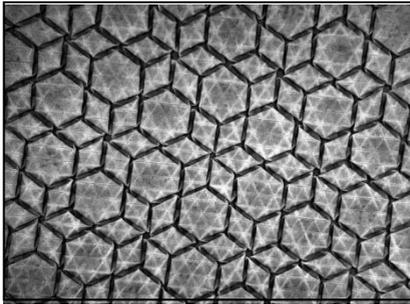
Per tassellazione si intende la divisione regolare del piano realizzata da forme chiuse che lo ricoprono completamente, senza sovrapporsi e senza lasciare spazi vuoti. Le tassellazioni del piano coincidono con le simmetrie di figure piane. Si distinguono diciassette gruppi cristallografici piani (wallpaper group), cioè sono possibili diciassette combinazioni diverse di moduli elementari piani attraverso trasformazioni di traslazione, rotazione, traslazione e rotazione, riflessione (le trasformazioni isometriche).

Un origami tassellato è un origami piano frutto della trasformazione di un diagramma che coincide con una tassellazione del piano [GR87]. Precisamente, un origami tassellato simmetrico è una piegatura piana del piano dove si hanno delle simmetrie appartenenti a uno dei 17 gruppi cristallografici [KA88].

Kawasaki dimostra come si possano realizzare tutti i diciassette gruppi cristallografici piani con origami tassellati [KA88]. Egli però non dà alcuna informazione sulla possibilità di piegatura delle tassellazioni origami. Alcuni dei diagrammi che propone a titolo esemplificativo non sono facilmente dispiegabili: in molti casi i processi di chiusura e di apertura devono essere avviati da più punti della figura e prevedono il movimento contestuale di tutte le pieghe contemporaneamente, seguito da successivi aggiustaggi, in altri casi la superficie è sottoposta a tensione durante il movimento.

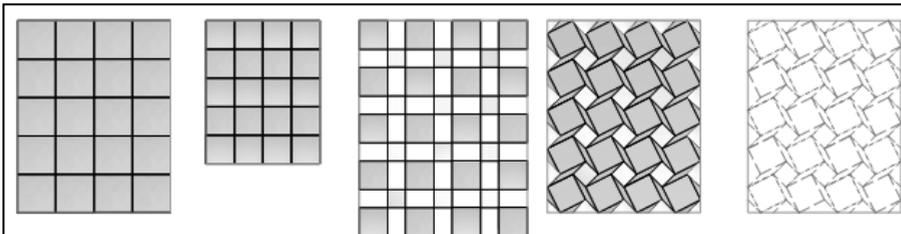
Ancora tra i lavori riguardanti la ricerca delle possibili tassellazioni origami, si distinguono gli studi di Bateman, sfociati nella realizzazione del software Tess [BA01]. Esso in linea di principio permette di generare tassellazioni di

forme poligonali convesse. I risultati sono molto gradevoli, ancor più se, come fa Bateman, si usano materiali semitrasparenti che permettano una lettura in filigrana delle pieghe sovrapposte.



**Fig. 3.46: Origami generato con il software Tess, (Bateman)**

Il software si basa sui seguenti algoritmi. Data una tassellazione di partenza, si riduce la dimensione delle singole tessere, si traslano le tessere una rispetto all'altra fino a poter inserire, collegate ai vertici, delle tessere minori uguali tra loro. Successivamente si fanno ruotare. Gli spazi liberi sono occupati da facce secondarie di forma romboidale.. L'origami è piano, le tessere di partenza e le tessere secondarie giacciono sul fronte, le tessere generate dalla rotazione giacciono sul retro (o viceversa) L'assegnazione dei versi è relativamente semplice: le tessere originarie sono formate ciascuna da pieghe tutte monti o tutte valli, in modo alternato procedendo da una tessera a quella adiacente.

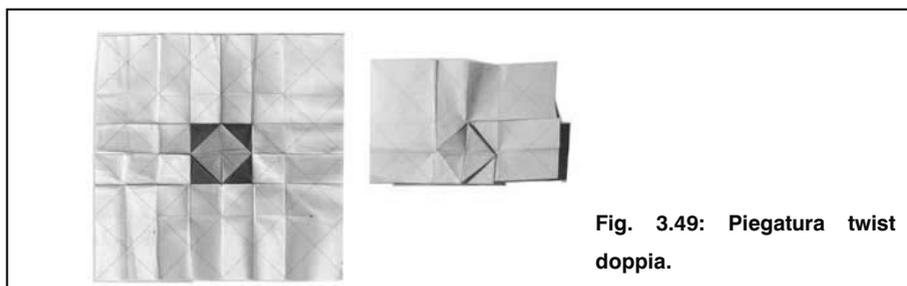
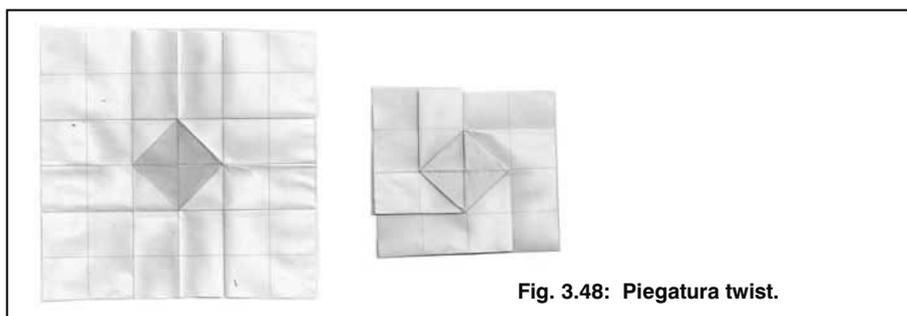


**Fig. 3.47: Fasi di creazione di una tassellazione.**

Ai fini architettonici, si pongono delle difficoltà. Le tassellazioni basate su questi principi hanno tendenzialmente una scarsa efficienza di

impacchettamento. Altro importante problema riguarda il modo attraverso il quale è ottenuta questa sorta di effetto altorilievo. Le figure seguenti mostrano un diagramma con una faccia poligonale in posizione centrale e il corrispondente origami ove la faccia è posta su un piano parallelo e superiore rispetto alle facce adiacenti. Per ottenere questa trasformazione, detta *twist*, la faccia centrale è racchiusa tra pieghe consecutive di uguale verso: la faccia ruotando porta con sé le pieghe adiacenti, bloccandole infine con un effetto nodo sotto di sé. In alcuni casi, come nella coppia di immagini a destra, una volta ottenuto il primo *twist* tutte le facce che giacciono in corrispondenza della faccia centrale subiscono nuovamente uno o più processi di rotazione: aumenta l'effetto altorilievo ed aumentano le deformazioni del materiale.

In generale dunque le tassellazioni sopra esposte riguardano quello che a inizio capitolo si è detto essere il design dell'origami, ovvero pongono come obiettivo ottenere una determinata forma e, lontane da obiettivi applicativi, prescindono da considerazioni circa la facilità di piegatura o l'efficienza di impacchettamento.



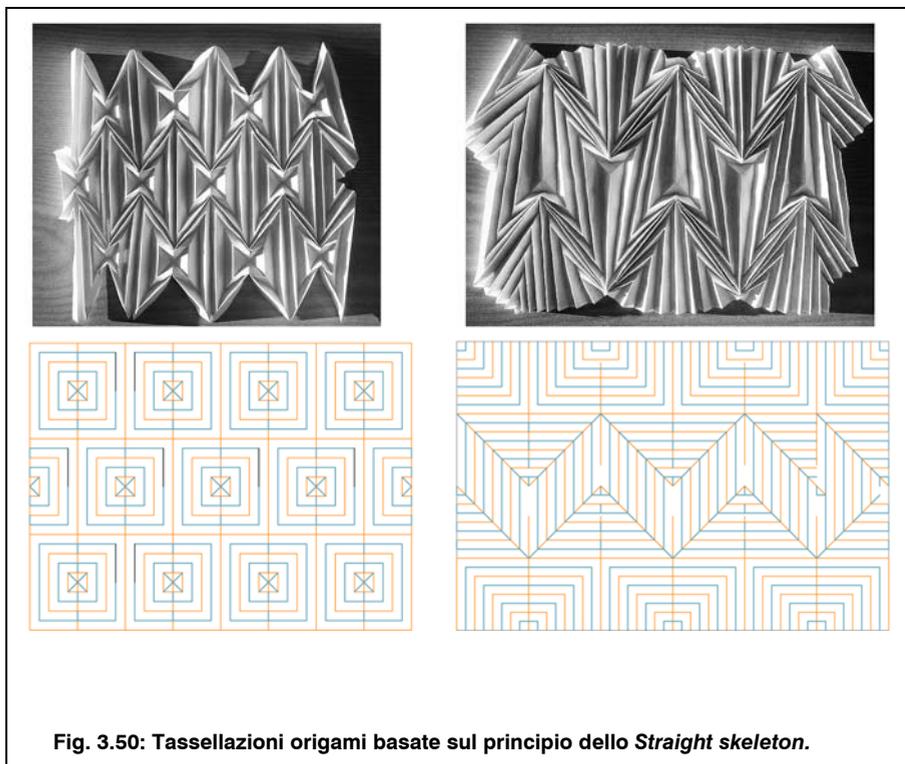
**Note:**

- [GR87] BRANKO GRÜNBAUM, GEOFFREY C. SHEPHARD, *Tilings and Patterns*, New York, W.H. Freeman & Co Ltd, 1987.
- [BA01] ALEX BATEMAN. *Computational tools for origami tessellations*. In *Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education*, Monterey, California, March 2001
- [KA88] TOSHIKAZU KAWASAKI, MASAOKI YOSHIDA, *Crystallographic flat origamis*, in *Memoirs of the Faculty of Science, Kyushu University. Series A, Mathematics*, Vol. 42, n. 2 pg. 153-157, Fukuoka, JP, 1988.

**3.4.2. Le tassellazioni estensibili.**

Come appreso dalla tecnica dello *Straight skeleton* (§3.3.2,) presa un'area poligonale convessa che si vuole rendere pieghevole sul piano, si possono tracciare internamente delle parallele al suo perimetro, e ricavare così la posizione dei vertici delle pieghe necessarie a garantire che l'origami sia piano. Le parallele tracciate in fase di costruzione rappresentano dei punti che, una volta realizzato il diagramma, si trovano alla stessa quota rispetto al piano di riferimento su cui giace il perimetro e, a loro volta, sono pieghevoli sul piano. Se si immagina di costruire un diagramma dato dalla forma poligonale iniziale, dalle pieghe inserite per renderla piana ed anche dalle sequenze di pieghe parallele al perimetri, si ottiene per costruzione un diagramma che origina un origami piano. Poiché procedendo dal perimetro verso il centro della superficie le pieghe sono sempre parallele al perimetro stesso, con direzione di piegatura costante, esse generano nel complesso non solo un origami piano, ma un origami estensibile linearmente. Tralasciando per ora lo spessore dei pannelli, la distanza relativa delle pieghe rispetto all'area iniziale determina il livello di compattezza che la forma realizza in configurazione chiusa.

Questo origami può a sua volta essere usato come tassello e combinato con origami uguali. La superficie risultante è ancora estensibile linearmente



nel rispetto delle seguenti condizioni: l'area iniziale deve poter tassellare il piano; gli indici delle pieghe poste in diretta continuità da un origami al successivo devono essere alternati.

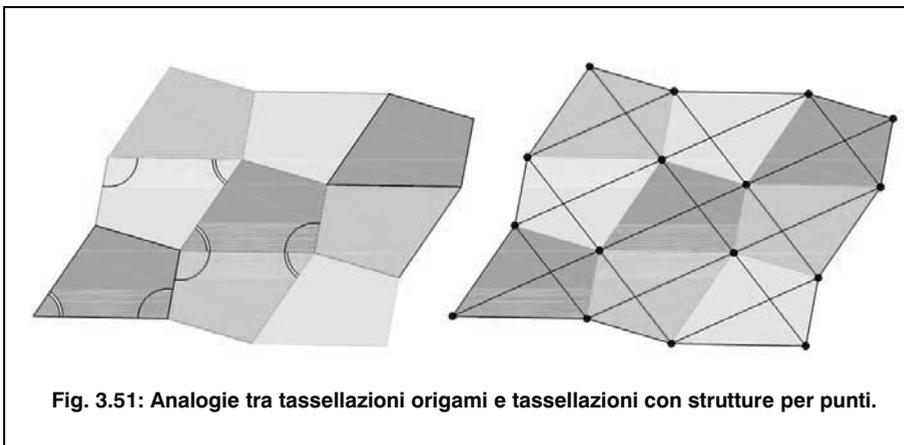
Dunque, data una forma poligonale convessa, è sempre possibile generare una tassellazione - origami estensibile linearmente.

A livello cinematico, in linea generale è possibile avviare il processo di chiusura o apertura da ogni lato del perimetro, ma la presenza di più gradi di libertà obbliga a impostare più punti di controllo così da evitare la concentrazione di sforzi sugli spigoli.

A livello puramente estetico, gli esiti della tassellazione possono essere piuttosto gradevoli, come mostrato nella figura seguente, tanto più se le pieghe sono relativamente fitte e generano particolari effetti di luce e ombra.

A livello architettonico, però, se obiettivo è realizzare una tassellazione a pannelli, lo spessore degli stessi può divenire un grosso limite. La posizione dei giunti perpendicolari al piano della superficie, e quindi tutti in vista, è un altro fattore degradante da tenere in debita considerazione.

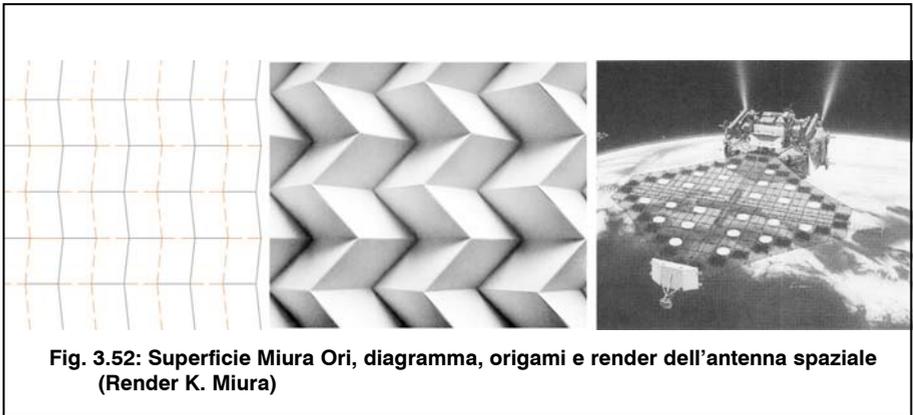
Per ottenere tassellazioni con un solo grado di libertà, ci si rifà a quanto avviene nelle strutture bidimensionali per punti composte da barre incernierate. È possibile generare una qualsiasi tassellazione estensibile con continuità nel momento in cui ogni faccia è generata da una rotazione attorno ad un vertice  $O$  di  $360^\circ / n$ , con  $n$  numero intero positivo, e successiva riflessione rispetto ad una piega passante per  $O$ . I risultati finali possono essere analoghi alle griglie realizzate con strutture per punti. Le singole pieghe condividono, seppur ruotate, le medesime diagonali, che corrispondono alle barre delle strutture monodimensionali.



**Fig. 3.51: Analogie tra tassellazioni origami e tassellazioni con strutture per punti.**

Un ulteriore fattore discriminante nella generazione di tassellature origami a scopi architettonici è la facilità di piegatura e apertura: è opportuno che tutti i pannelli si accordino al movimento in modo fluido, così da minimizzare eventuali sforzi indesiderati e garantire al sistema una buona durabilità e un limitato impiego di energia in fase di esercizio.

Agli inizi degli anni '80 del secolo scorso Korio Miura della University of Tokio propose di realizzare un'antenna spaziale pieghevole utilizzando un diagramma noto nel mondo degli origami, ma del quale non si erano prima evidenziate delle notevoli particolarità applicative. Il diagramma, detto mappa Miura – Ori dal suo re -inventore, permette di realizzare una tassellatura estensibile nei due sensi, con un solo grado di libertà, e dal movimento particolarmente fluido [MI89].



Il diagramma (fig. 3.52) è dato da tasselli isometrici specchiati lungo gli spigoli in comune e ruotati. Le particolarità della superficie possono essere mostrate attraverso la sua rappresentazione gaussiana. Essa è data da due triangoli sferici uno positivo e uno negativo uguali tra loro.

Se si confronta la rappresentazione sferica delle pieghe uscenti da un vertice del diagramma Miura-Map ( a sinistra in figura 3.51) con quella di un vertice da quale fuoriescono pieghe tutte perpendicolari tra loro, si possono evidenziare alcune differenze hce influiscono sulla possibilità di piegare facilmente l'origami. In ambedue i casi, i triangoli sferici hanno nel complesso area nulla, ma nel secondo esempio gli archi costituenti sono posti in diretta continuità. Ciò comporta nella pratica la necessità di attuare e le piegature per fasi nettamente distinte: la piegatura di una parte inizia solo dopo che è terminata la piegatura dell'altra, come nel caso in cui si

provi a realizzare una scatola.

Questo non avviene per la mappa Muira Ori, per la quale si osserva inoltre la particolare ampiezza dell'angolo  $\theta$ . L'angolo  $\theta$  è un fattore che da informazioni circa la dispiegabilità dell'origami una volta raggiunta la configurazione chiusa. Più gli angoli diedri generano nella rappresentazione sferica un angolo elevato, tanto più l'origami si dispiega con facilità.

L'eccesso sferico  $E$  del triangolo formato dai piani contenenti gli angoli diedri rispetto a un triangolo nel piano, è dato dalla seguente relazione.

$$E = \alpha + \beta + \theta - \pi$$

dove  $\rho$  = raggio della sfera, unitario per costruzione

$\alpha$  e  $\beta$  sono gli angoli diedri delle facce,

$\theta$  è l'angolo al vertice leggibile nella rappresentazione sferica.

Se si dispiega l'origami fino a farlo coincidere con il suo diagramma, l'area dei triangoli sferici diminuisce via via, fino a divenire nulla, mentre  $\theta$  tende a crescere.

In questo caso, non solo la somma dei due triangoli sferici ha area nulla, e quindi l'origami è piano, ma  $\theta$  è maggiore di  $\alpha + \beta$ , garantendo che anche la piegatura può avvenire con continuità.

Si può ora verificare quali elementi possono essere variati.

L'immagine a sinistra della fig.3.53 rompe i rapporti di simmetria tra le facce, e non genera perciò tassellazioni utili. L'immagine a destra apporta solo una variazione di scala uniforme in facce contigue. Poiché la rappresentazione sferica non dipende dalla dimensione delle facce, essa è perciò realizzabile, come mostrato nella figura sottostante.

Nell'immagine a destra, infine, le pieghe che prima erano poste lungo una medesima retta sono state inclinate, ma la simmetria tra le parti è conservata. Anche in questo caso, noto come Kao Map, è possibile realizzare tassellazioni dispiegabili, anche con variazione di scala tra le

facce, come mostrato in figura.

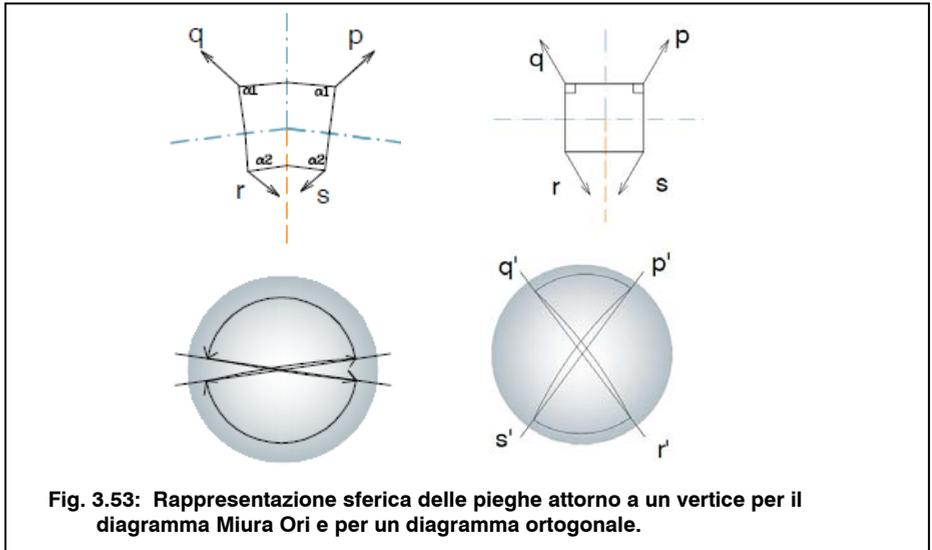


Fig. 3.53: Rappresentazioni sferiche delle pieghe attorno a un vertice per il diagramma Miura Ori e per un diagramma ortogonale.

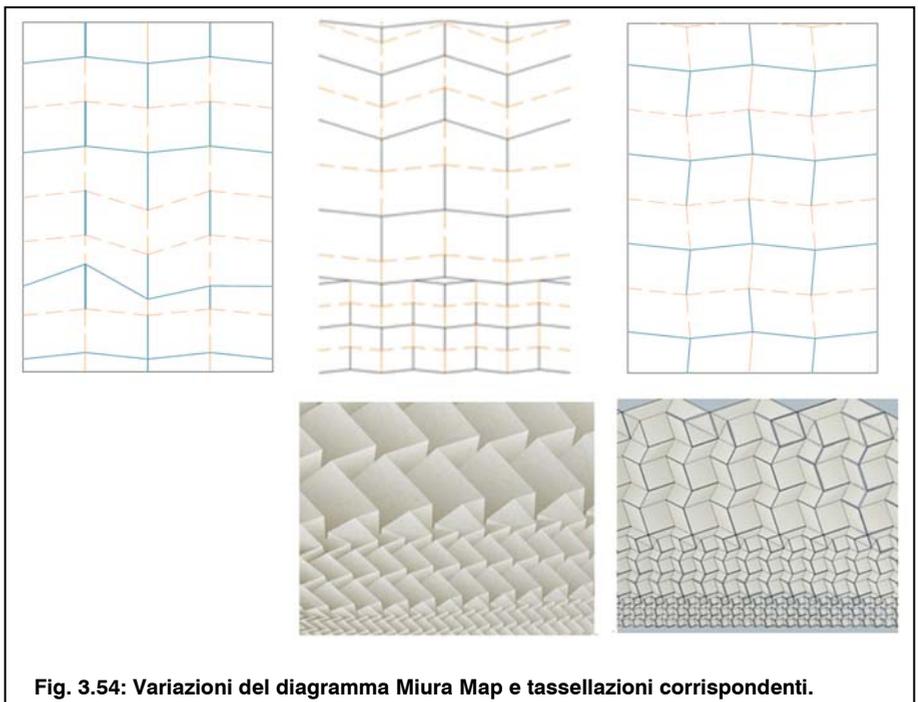
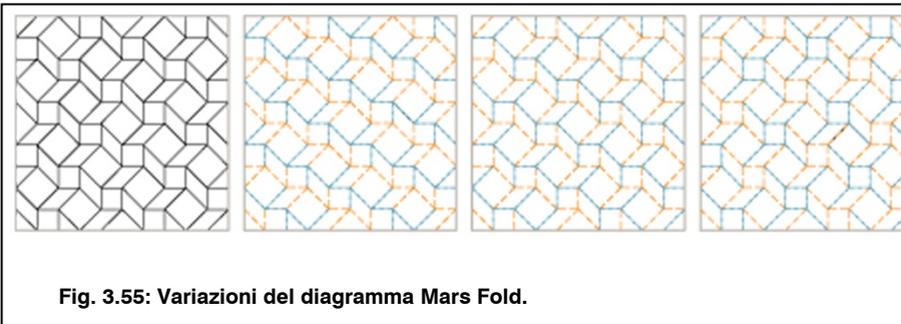


Fig. 3.54: Variazioni del diagramma Miura Map e tassellazioni corrispondenti.

Un lavoro simile sulle possibilità di variazione delle tassellazioni è stato compiuto da K. Giesecke, il quale prende ad esempio il diagramma noto come *Mars Fold* [TA94] ed evidenzia come esistano diverse possibilità di assegnazione dei versi per le pieghe, con la condizione che gli angoli ottusi siano racchiusi da pieghe dello stesso verso. Individua perciò quattro possibilità, illustrate nella figura seguente [GI04] .



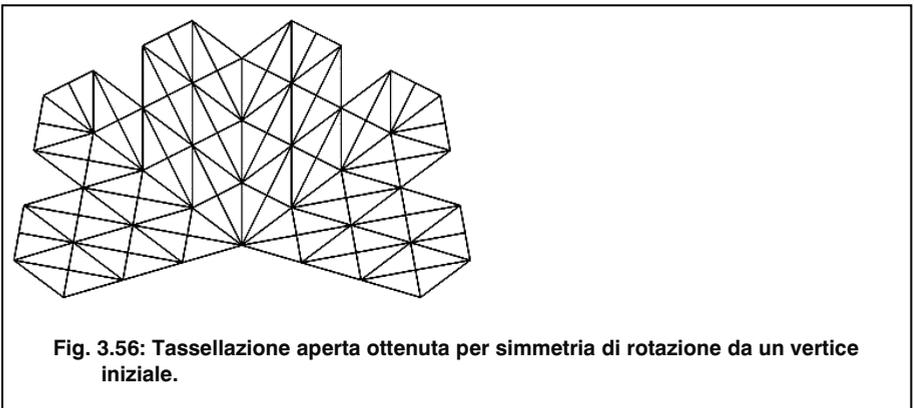
**Fig. 3.55: Variazioni del diagramma Mars Fold.**

#### Note:

- [GI04] Ken Giesecke, Deployable structures inspired by the origami art M.Arch. Thesis.,Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2004.
- [TA94] Paulo Taborda Barreto. Lines meeting on a surface. The Mars paperfolding. in Koryo Miura, (a cura di),Proceedings of the 2nd International Meeting of Origami Science and Scientific Origami, Otsu, JP, 1994, pp. 323 – 331.
- [MI89] KORYO MIURA, A note on intrinsic geometry of origami, Proceedings of the First International Meeting of Origami Science and Technology, H. Huzita ed. (1989), 239-249.

### 3.4.3. Le tassellazioni di rotazione.

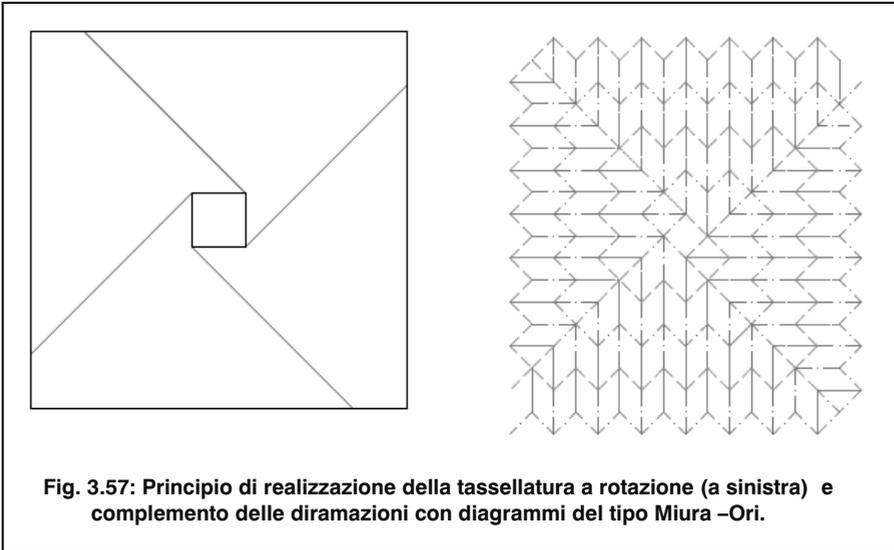
Considerato un diagramma centrale, ovvero con facce che si diramano in progressione a partire da un solo vertice, generare un diagramma centrale che realizzi un origami estensibile è concettualmente simile all'idea di generare sistemi a rotazione radiali visti nelle strutture a barre. Nel caso degli origami, però, l'indeformabilità dei pannelli impedisce di generare diagrammi chiusi così composti.



**Fig. 3.56: Tassellazione aperta ottenuta per simmetria di rotazione da un vertice iniziale.**

È invece molto più semplice realizzare tassellazioni origami con cinematismo a rotazione ma direzione periferica.

Questo tipo di tassellazioni è presente in un grande numero di varianti, e tutte si basano sempre su un medesimo principio: considerata una faccia di riferimento di  $n$  lati posta in posizione centrale, dai suoi spigoli si propagano  $n$  diramazioni che dividono il diagramma in  $n$  poligoni. All'interno di questi poligoni si creano delle tassellature estensibili secondarie, in modo tale da renderli singolarmente piani. Le tassellature interne ad un poligono sono le stesse che, attraverso un processo di simmetria inversa, si trovano nel poligono adiacente, in modo tale che ogni poligono sia piegabile all'unisono con gli altri.



Come mostrato in figura 3.59, le linee sulle quali si dispongono le pieghe che generano le diramazioni possono non essere rette lungo tutto il loro percorso, e queste variazioni influiscono notevolmente sulla morfologia della superficie in configurazione chiusa. Al di là della varietà di forme ottenibile, però, la difficoltà principale in questo tipo di realizzazioni è verificare che il movimento produca un origami piano e non implichi deformazioni delle facce. Per ottenere questo obiettivo è necessario imporre innanzitutto la condizione di piegatura piana locale per tutti i vertici della faccia centrale. Tuttavia questo può non essere sufficiente e globalmente il diagramma può non risultare piano. Hernandez [HE00] nota che è possibile predire il comportamento del diagramma sotto questo aspetto mettendo in relazione l'angolo formato sul piano dalle diramazioni e la somma degli angoli interni del poligono centrale. In particolare, dato un poligono di  $n$  lati, i cui angoli interni misurano complessivamente  $\sum_{i=1}^n \gamma_i$ ,

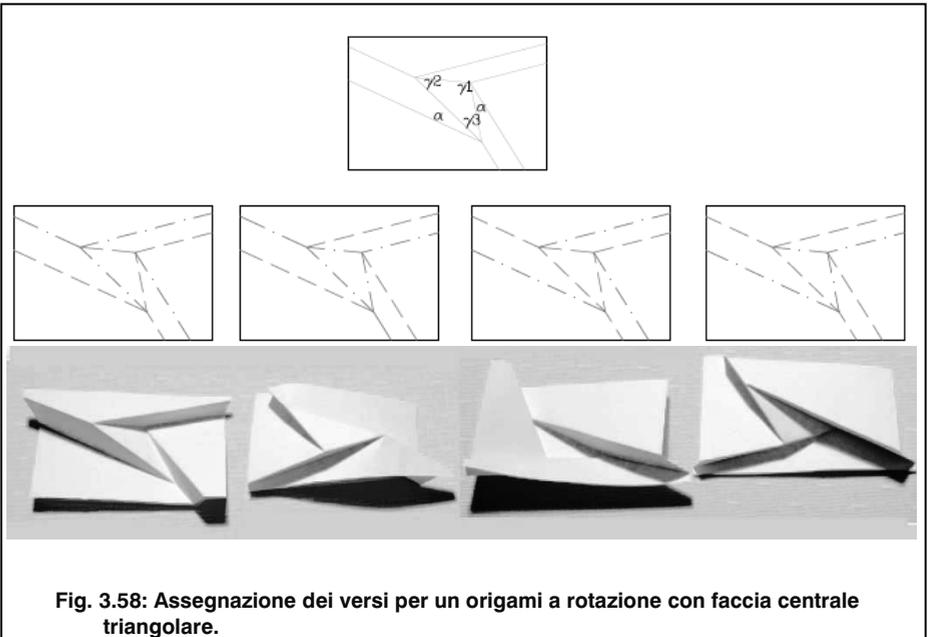
se  $\alpha \leq \sum_{i=1}^n \gamma_i / (n \times 2)$  allora l'origami si piega docilmente qualunque sia l'assegnazione degli indici,

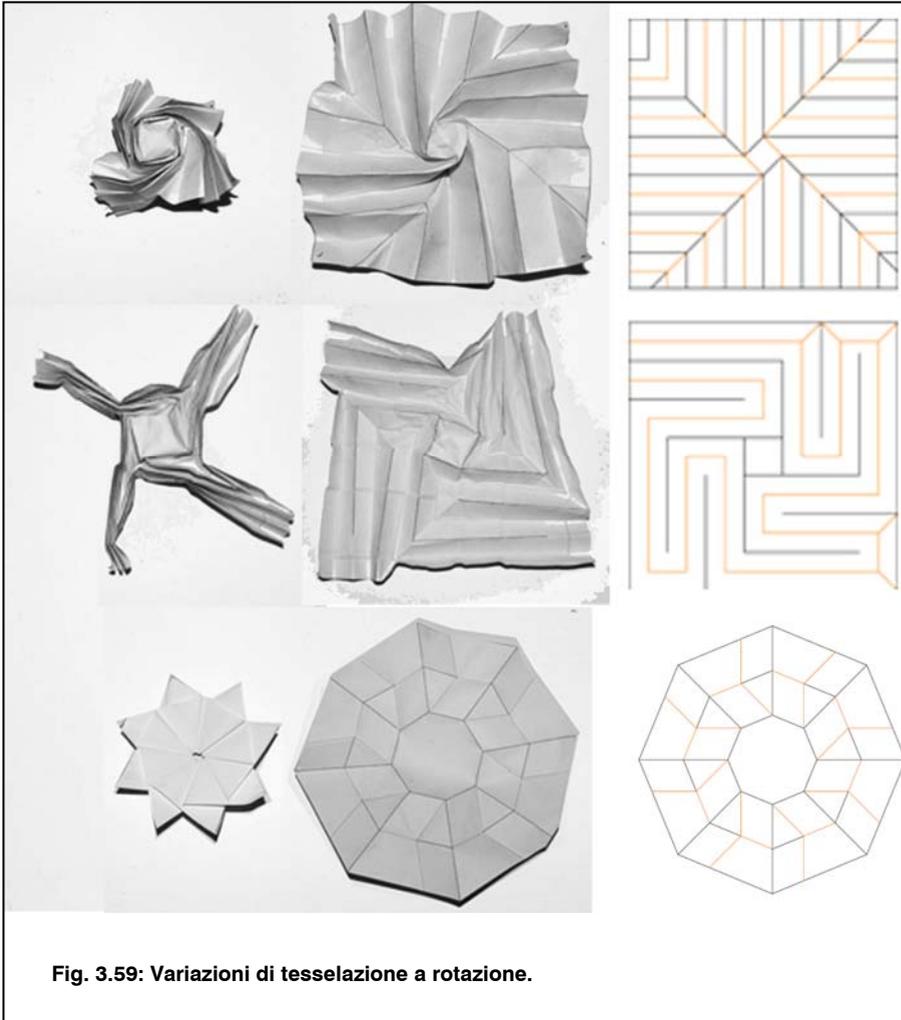
se  $\sum_{i=1}^n \gamma_i / (n \times 2) < \alpha \leq \sum_{i=1}^n \gamma_i / n$ , è necessario verificare le condizioni

di piegatura piana dei vertici, se  $\alpha > \sum_{i=1}^n \gamma_i$ , la piegatura piana non è possibile, né la movimentazione della superficie.

In figura, ad esempio,  $\sum_{i=1}^n \gamma_i = 180^\circ$ .  $\alpha = 20^\circ$  e tutti gli origami sono piani.

Purtroppo non sono invece ancora state formulate delle ipotesi di partenza che possano predire la fluidità del movimento, caratteristica che dipende non solo dalla piega attorno al pannello centrale, ma anche e soprattutto dall'andamento delle diramazioni. In ogni caso, una volta impostati gli indici delle pieghe del poligono centrale e delle pieghe poste sulle diramazioni direttamente in contatto con il poligono, i versi delle pieghe collegate agli altri vertici si determinano automaticamente per le condizioni di alternanza tra gli indici.





Note:

[HE00] JESÚS DE LA PEÑA HERNÁNDEZ, Mathematics and origami, Asociación Española de Papiroflexia. Madrid, 2000, pp. 159.

### 3.4.3. Considerazioni sulla scelta delle simmetrie.

Finora si sono considerate tassellazioni costituite ciascuna da un diagramma formato dalla ripetizione di unità minime, una o due facce. In realtà, se più pieghe assieme sono considerate a loro volta come moduli base, esse possono subire a loro volta delle trasformazioni isometriche e ancora si ottiene un origami piano. Il diagramma seguente è costruito da quattro diagrammi interni del tipo *Mars Fold* già visti in 3.4.2, ottenuti uno dall'altro per rotazione e riflessione; l'origami risultante ha un solo grado di libertà. La disposizione concentrica delle quattro diramazioni genera una parziale sovrapposizione tra le pieghe, particolarmente visibile durante il movimento, quando il diagramma assume una particolare configurazione a volta, visibile in figura.

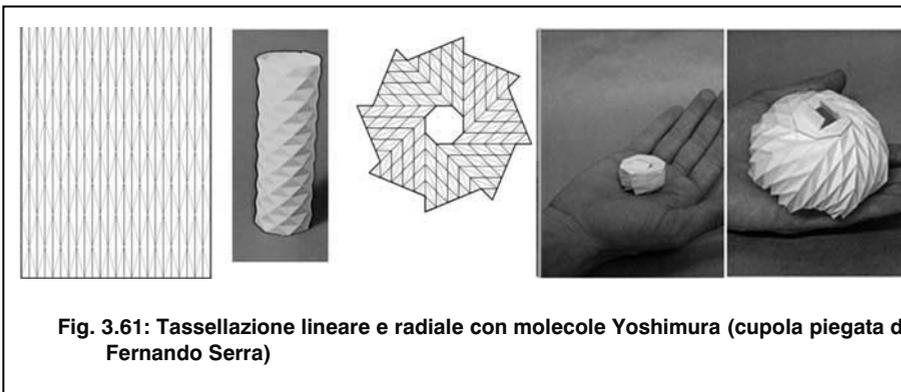


Altra considerazione riguarda le caratteristiche strutturali dell'origami.

In una simmetria base non solo si possono apportare modifiche omogenee alle dimensioni o alla forma delle facce, ma la si può anche arricchire inserendo nuove pieghe. Poiché ogni piega apporta un grado di libertà, è possibile inserire una piega per risolvere un problema di piegatura locale, come già mostrato in §3.2., è possibile anche inserire una sequenza di pieghe, ma esse devono disporsi nel diagramma rispettando distanze omogenee dalle sequenze di pieghe adiacenti così da potersi combinare

senza aumentare i gradi di libertà totali.

In caso contrario, l'origami può assumere una grande varietà di forme, prive d'interesse strutturale. Nella figura seguente, si mostra la tassellazione risultante dalla ripetizione per semplice traslazione (a sinistra) o rotazione (a destra) della molecola detta Yoshimura. Gli origami risultanti sono instabili.



Il caso estremo è una struttura costituita completamente da triangoli isosceli rettangoli, come nella figura della pagina seguente.

Individuata una molecola ritenuta morfologicamente idonea a realizzare la forma voluta, essa deve essere quindi combinabile in modo tale da limitare il numero di gradi di libertà della struttura.

**Fig. 3.62: Tassellazione di soli triangoli rettangoli isosceli.**



## **Cap. 3.5. Controllo del movimento.**

### **3.5.1. Sistemi di supporto a barre, molle, cavi..**

Nei sistemi per piani si è più volte fatto notare che i pannelli ad un tempo coprono la superficie interessata dal movimento e assolvono anche funzione strutturale.

Per attivare e controllare strutture mobili a pannelli di una certa entità, e più in generale per trasferire i carichi dalla struttura ai sostegni esterni, sono utilizzabili sistemi a barre, come quelli visti nella seconda parte di questo testo. Le barre ed i pannelli nei sistemi a piani, dunque, hanno ruoli invertiti: i pannelli costituiscono il meccanismo, le barre sono ad essi subordinate. Poiché i sistemi a barre godono in linea generale di maggiori possibilità di movimento, le condizioni al loro movimento difficilmente possono portare a riconsiderare l'intero cinematismo dei pannelli, come invece può avvenire nei sistemi per punti a tamponamenti rigidi. Oltre alla funzione di collegamento, le barre possono anche fissare i pannelli nelle configurazioni aperte e chiuse, come esemplificato nel capitolo 4.2.

Quando i pannelli sono piccoli o leggeri, come è il caso delle soluzioni pensate per l'ambito aerospaziale, in assenza di gravità, il modo più diffuso per azionare questi meccanismi è ricorrere a molle a torsione da inserirsi lungo gli spigoli, dove si trovano i cardini. Il sistema permette un'apertura automatica dei vari pannelli ma non è reversibile in modo automatico.

Una valida alternativa per attivare il meccanismo è affidare questo compito a dei cavi indipendenti, uno per l'apertura e uno per la chiusura, rendendo perfettamente simmetrico ( e reversibile) il meccanismo di chiusura e di apertura. A seconda delle esigenze del singolo progetto, molte soluzioni di

questo tipo sono state studiate in ambito aerospaziale [VU07] , dove ovviamente si ha necessità di gestire il cinematismo da un solo punto di controllo. Se ne presenta di seguito una, la rara solar array Rigid Panel, testata nel 1986 dalla European Retrievable Carrier – Eureka, che si ritiene particolarmente significativa per la possibilità che offre di controllare un sistema a pannelli con più gradi di libertà [GA01] .

La struttura si muove in modo sincronizzato ed il movimento è reversibile. Consiste di due cavi uguali e indipendenti, usati uno per l'apertura e uno per la chiusura. A partire ciascuno da una propria puleggia si raccordano coi cardini di tutte le pannellature. La puleggia ruota di un angolo  $\Delta\phi$  che costringe il cavo a arrotolarvisi attorno, accorciandosi e subendo quindi uno spostamento orizzontale lungo il sistema. Il movimento del cavo spinge i cardini del pannello a ruotare in modo tale che

$$\Delta\phi = \Delta\phi_1 + \Delta\phi_2 + \Delta\phi_3$$

Per controllare il meccanismo, poiché ogni pannello ha tre gradi di libertà ( $\Delta\phi_1$ ,  $\Delta\phi_2$ ,  $\Delta\phi_3$ ) sono usati dei cavi aggiuntivi fissati a coppia uno attorno ad ogni pannello così da rendere il sistema un meccanismo vero e proprio, con un solo grado di libertà. I cavi a coppia ruotano attorno a delle pulegge che sono fisse rispetto ai pannelli contigui, costituendo nei loro confronti dei limiti, ma lasciano il pannello in oggetto libero di ruotare. La posizione dei cavi a coppia permette quindi ai pannelli di rimanere paralleli durante il movimento.

In ambito architettonico, la Passerella di Kiel utilizza un sistema di controllo del movimento simile.

Note:

[VU07] KHAC KIEN VU, *Deployable tension-strut structures. Concept, structural behavior and implementation*, Ph.D: Thesis, National University of Singapore, 2007.

[GA01] CHARS J. GANTES, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, U.K. WIT Press, 2001.

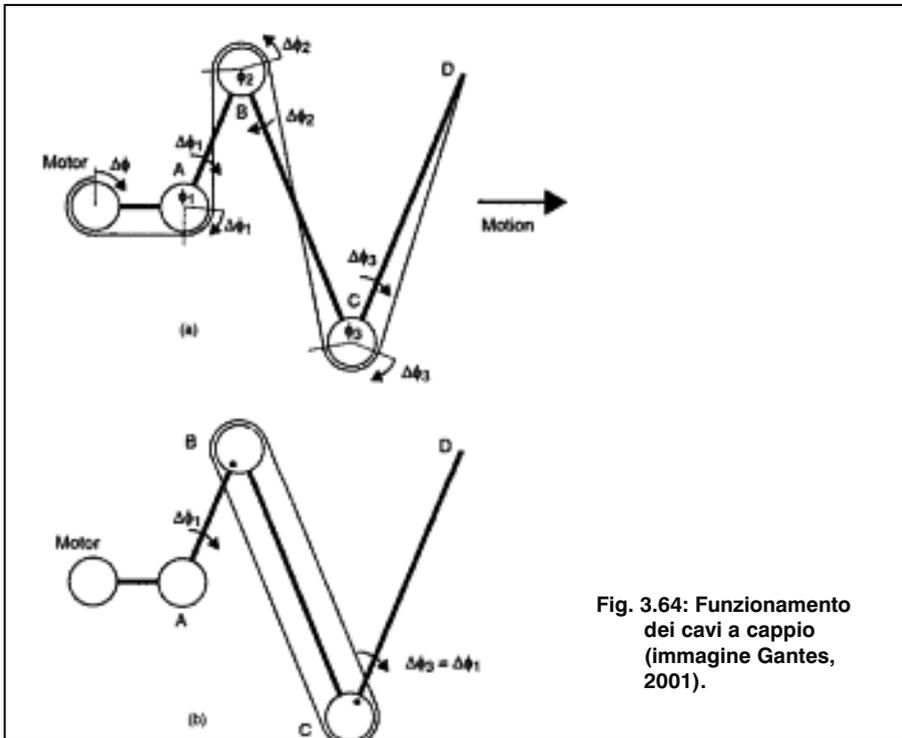
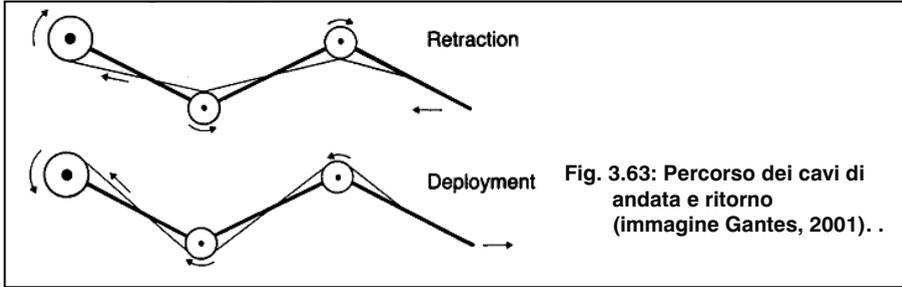


Fig. 3.65: Passerella di Kiel, arch. Volkwin Marg, ing. Jörg Schlaich, Schleswig-Holstein, Allemagne, 1997.

**PARTE QUARTA.**

**APPLICAZIONE A STRUTTURE REALI:  
L'INVOLUCRO ATTIVO.**



## Cap. 4.1. Combinazione di sistemi dati.

### 4.1.1. Proposta di un sistema estensibile tassellato.

Nel presente capitolo si discute della possibilità di attuare un meccanismo che coinvolga più elementi base, in modo tale da ottenere una superficie tassellata modificabile con continuità. Si ricorda la condizione secondo la quale, considerando le pieghe come elementi rigidi, deve essere mantenuta l'isometria tra le pieghe poste in successione. Si considerano inizialmente elementi rigidi uguali tra loro.

Si propone di realizzare una tassellazione origami, che combini i vantaggi offerti dalle tassellazioni esemplificate da sistemi che sfruttino facce tutte ugualied organizzate simmetricamente, come la tassellazione Miura Ori o i modelli proposti da Bateman nei quali parte della superficie rimane parallela al piano di sviluppo anche in configurazione chiusa.

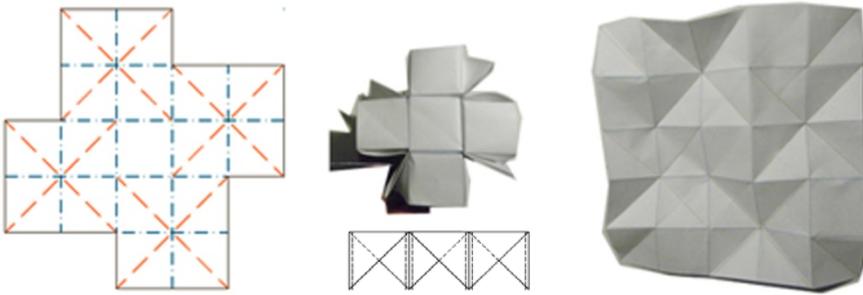
Partendo per semplicità da una forma quadrata base, per ampliare lo spazio tra le pieghe a vista si dispongono attorno ad essa insiemidi pieghe ciascuno dei quali sia di per sé un origami piano.

Le possibilità offerte sono dunque le pieghe “ molecole” usate da Lang, ed in particolare il modo più semplice è utilizzare il diagramma della *waterbomb base*. Questa è formata, infatti, da un quadrato diviso dalle diagonali, che in configurazione chiusa assume la forma di un triangolo.

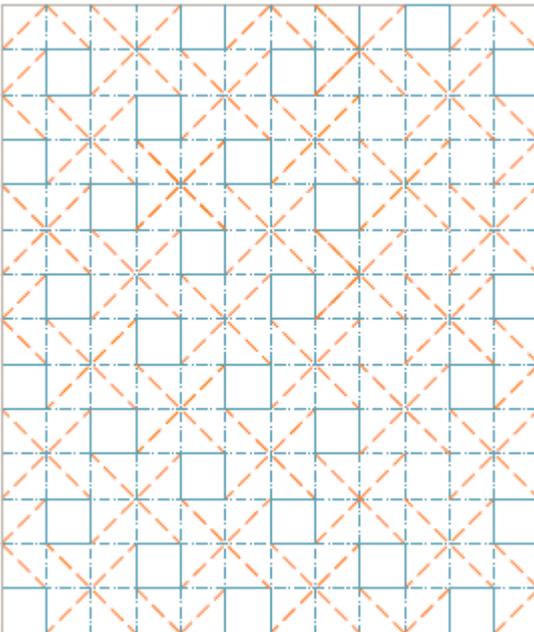
Il passo successivo consiste nell'aggregazione delle pieghe, che deve da un lato riempire il piano del diagramma, dall'altro permetterne la piegatura e la dispiegatura con un movimento continuo.

In questo caso, pur essendo presenti numerose facce triangolari, il sistema

non ha un eccesso di gradi di libertà perché ad esse si frappongono le facce quadrate costruite con pieghe tutte dello stesso indice. Come già visto, nelle tassellazioni origamisi possono rompere alcune simmetrie interne al diagramma senza che ciò comprometta il movimento. In particolare, si propone di inserire forme rettangolari, più semplici e usuali

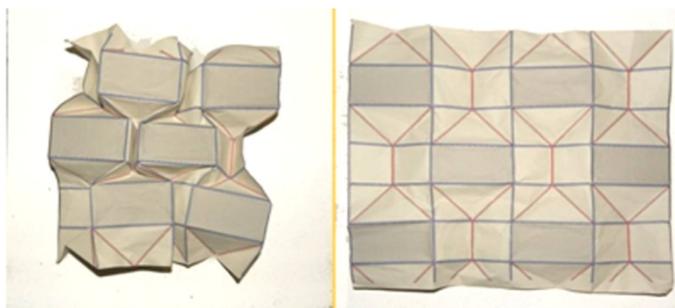


**Fig. 4.1:** Una faccia quadrata circondata da quattro "waterbomb base".



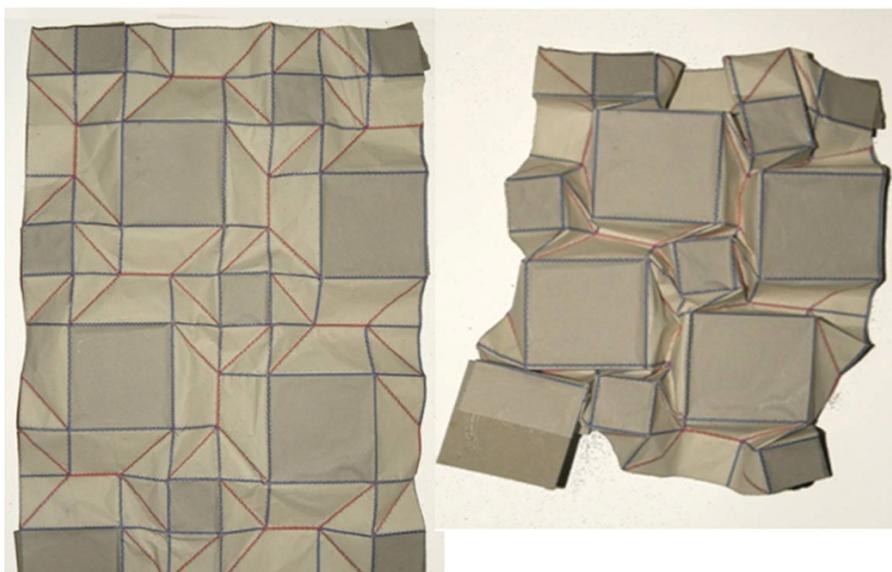
**Fig. 4.2:** Il diagramma frutto della combinazione degli elementi di Fig.4.1..

per i rivestimenti architettonici.. In questo caso, è necessario modificare la molecola inserendo un elemento centrale che tenga conto della maggior lunghezza della faccia rettangolare.

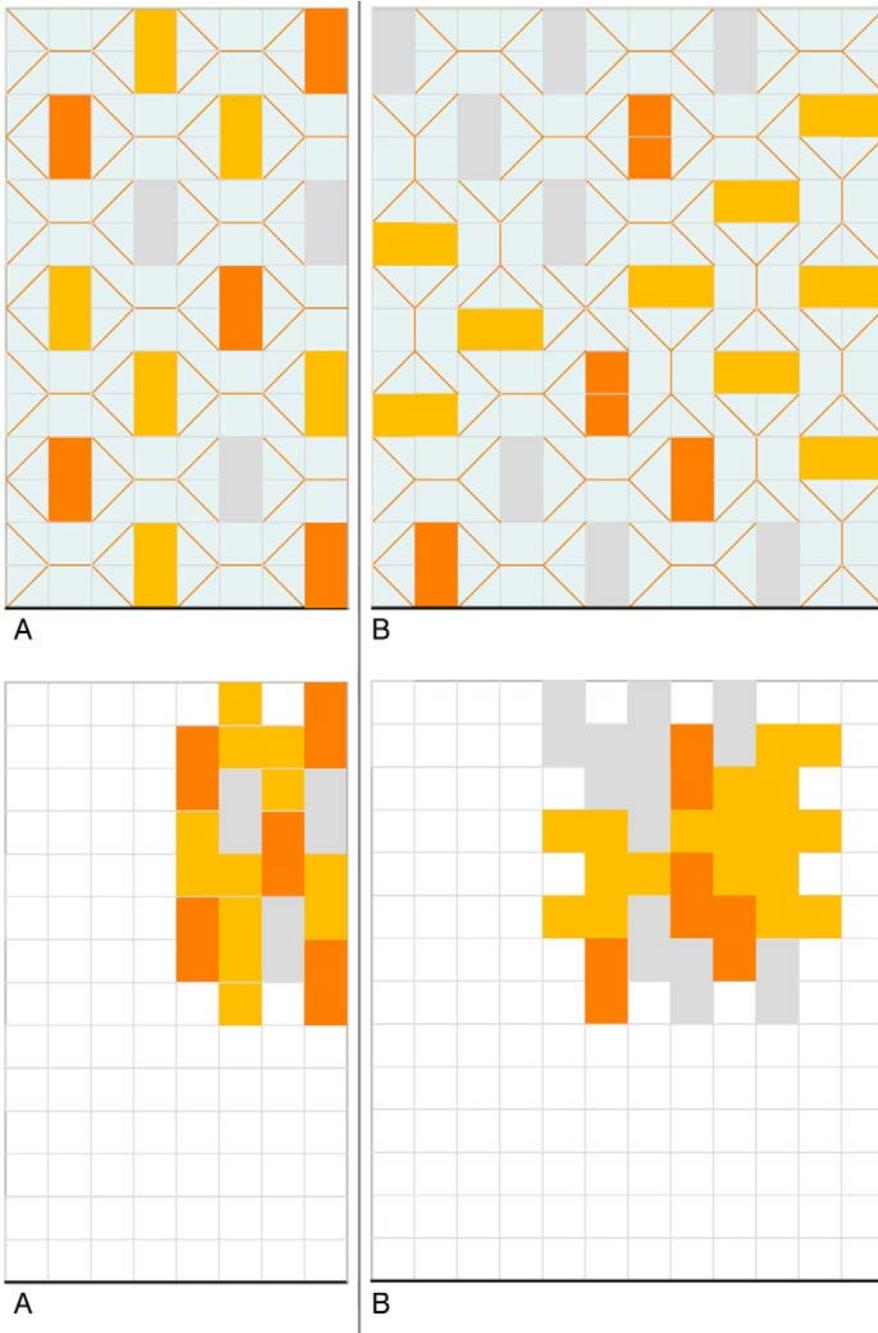


**Fig. 4.3: Combinazione di moduli rettangolari, configurazione aperta e chiusa.**

Continuando nella verifica delle possibili variazioni, si decide di agire su alcune delle facce che rimangono a vista in configurazione sia aperta sia chiusa ruotandole o variandone la scala.



**Fig. 4.4: Combinazione di moduli di dimensione diversa, configurazione aperta e chiusa.**



**Fig. 4.5: Combinazione di moduli rettangolari con lo stesso orientamento (A) e con orientamento perpendicolare (B), configurazione aperta e chiusa.**

#### 4.1.2. Attivazione e controllo del meccanismo.

In tutti i casi il sistema occupa  $\frac{1}{4}$  della superficie iniziale e dimostra perciò un buon grado d'impacchettamento in configurazione chiusa.

Si ritiene opportuno ora accennare un aspetto dell'ingegnerizzazione, ovvero l'ingombro dovuto allo spessore dei pannelli. Si è più volte ribadito che uno dei motivi d'interesse di queste strutture risiede nel fatto che tutti gli elementi che compongono il cinematismo possono essere trattati come tamponamenti architettonici, impiegando quindi i pannelli di caso in caso ritenuti più idonei. In tutti i tipi di tassellatura ora proposti, in configurazione chiusa ciascun pannello parallelo al piano nasconde sotto ogni suo spigolo un pannello perpendicolare. Se si aumentasse il numero di molecole inserite tra un pannello a vista e l'altro, necessariamente si perderebbe questo equilibrio e in configurazione chiusa tra i pannelli a vista emergerebbe lo spessore dei pannelli piegati. Il rapporto di  $\frac{1}{4}$  tra superficie in configurazione chiusa e aperta è quindi da considerarsi ottimale.

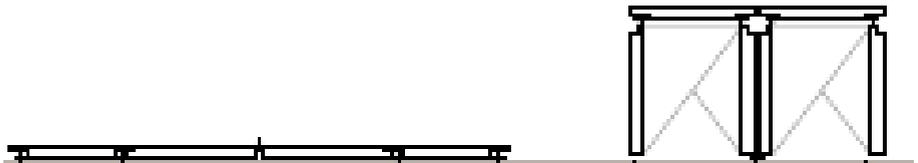


Fig. 4.6: Disposizione dei pannelli in configurazione aperta e chiusa, vista in sezione.

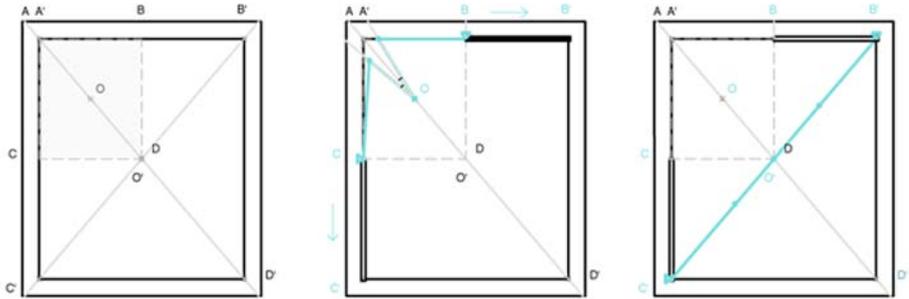
Mentre le proporzioni sono fisse, la tassellatura potenzialmente può essere ampia a piacimento, tanto in configurazione chiusa che in configurazione aperta può assumere forma rettangolare o la forma di un poligono generico.



**Fig. 4.7: Tassellatura di forma rettangolare in configurazione sia aperta sia chiusa.**

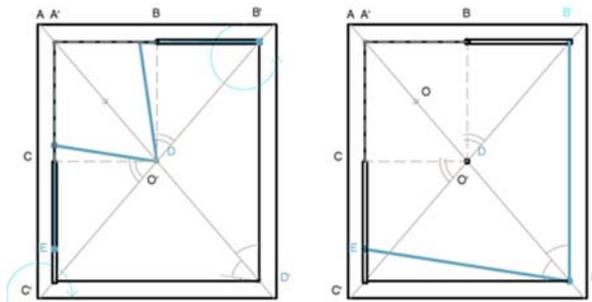
Si verifica ora il sistema di attivazione e controllo del movimento. Lo studio prende ad esempio il sistema di fig. 4.6, rettangolare e costituito da moduli diversi, utile perciò a sviluppare una tecnica generale. La movimentazione dell'insieme dei pannelli può avvenire con un sistema di attuatori. Con riferimento alla figura seguente, si decide di fare in modo che la struttura di supporto risulti in posizione chiusa completamente nascosta dai pannelli, e che quindi occupi solo l'area grigia nella figura 4.6. Con riferimento alla sezione del modulo base (fig.4.1), la maggior parte dei pannelli in posizione chiusa si trova perpendicolare al piano, e si dispiega progressivamente in fase di apertura: i supporti devono necessariamente essere puntuali, posizionati ove sono i pannelli sempre paralleli al piano e sul perimetro. La struttura si dispiega in diagonale, perché il movimento sia continuo e uniforme è opportuno che esso sia avviato e guidato da ambo i lati della diagonale BC. Si considerano quali punti di sostegno, disposti simmetricamente nella struttura, i punti A, B, C, D; O. Imposte le condizioni sopra esposte, si decide di utilizzare due carrelli che permettano rispettivamente il passaggio dal punto B in B' e da D in D'. A questi carrelli è connessa una struttura incernierata che, nel rispetto delle eguaglianze tra gli angoli d'inclinazione delle barre così come sviluppato dal capitolo due,

permetta di spostarsi dal punto O in O'.



**Fig. 4.8: Schema per struttura di supporto con carrelli..**

Per spostare infine il punto C in C', si potrebbe ancora sfruttare la presenza dei carrelli, ma ciò costringerebbe a una struttura più complessa pena, in configurazione chiusa, l'uscita dall'area d'ingombro del sistema tassellato. Si decide perciò di realizzare una struttura costituita da quattro barre incerniate tra loro e collegare al telaio su perni posti nei punti D e F, come sotto mostrata.



**Fig. 4.9: Struttura incerniata con perni sul perimetro del sistema a pannelli.**

Il risultato finale è mostrato nella figura seguente.

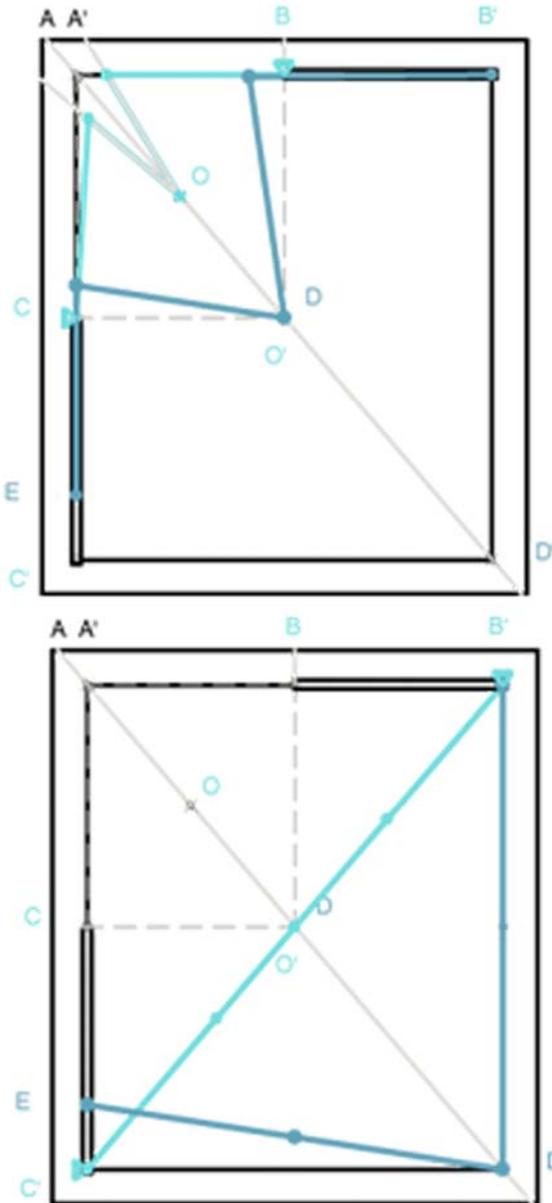


Fig. 4.10: Struttura di sostegno e movimentazione del sistema a pannelli.

La figura seguente mostra dei cavi passanti utili per stabilizzare il sistema nelle posizioni aperte e chiuse. I cavi collegano i due sistemi ad aste tra le cerniere O e D e sfruttano la rotazione dei perni per tendersi tra i punti D e O, D' e O'.

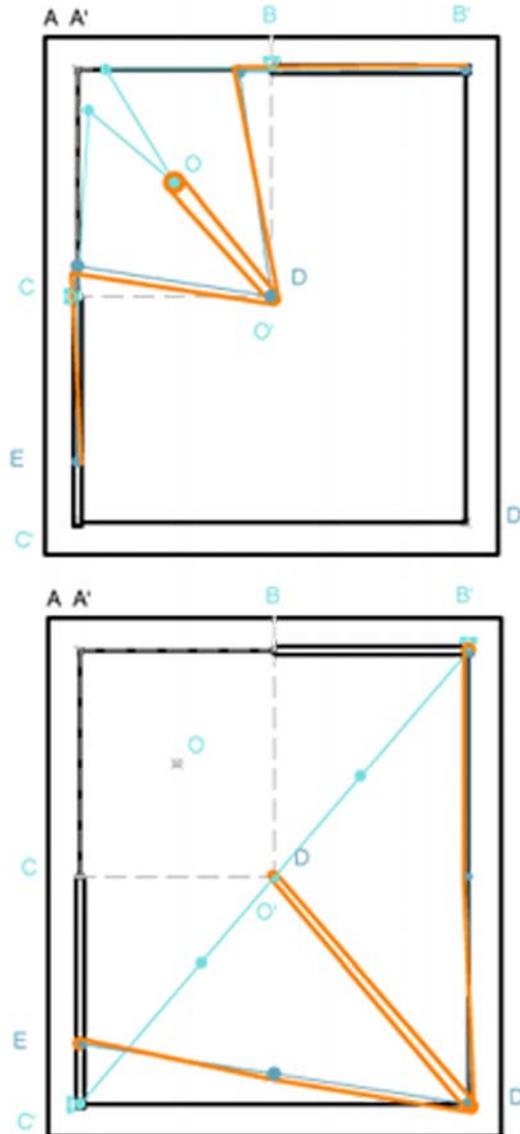


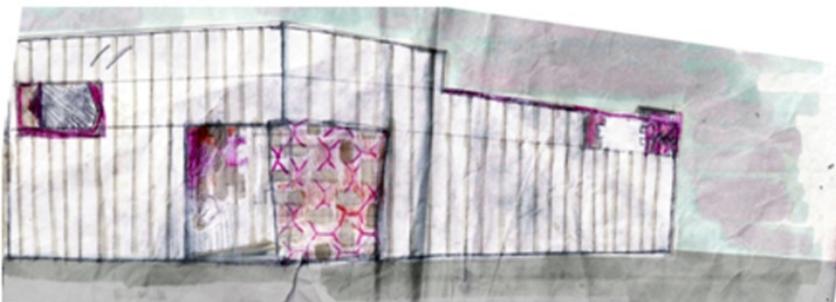
Fig. 4.11: Struttura di sostegno e movimentazione, cavi di stabilizzazione del sistema a pannelli.

#### **4.1.3. Verifica delle potenzialità performative ed espressive.**

In molte architetture contemporanee si sta riproponendo il gusto per le superfici tassellate. Nella Federation Square dello studio Lab Architecture, o nella ricerca dei Foreign Office Architect's (Ravensbourne School, London Spanish Pavilion Expo 2005) esse permettono di rivestire ampi volumi semplici con diversi vantaggi, in primis l'uso di un'unica tecnologia e un unico schema progettuale per tutte le superfici, senza effetti di monotonia. Grazie alla valutazione combinata in fase di progettazione di distanza dei punti di vista e dimensione delle tessere, l'edificio realizzato è percepito ora come un insieme di grandi macchie di colore, ora come decorazione, e architettura, a scala umana.

Una tassellatura che sia anche mobile può offrire diversi spunti architettonici.

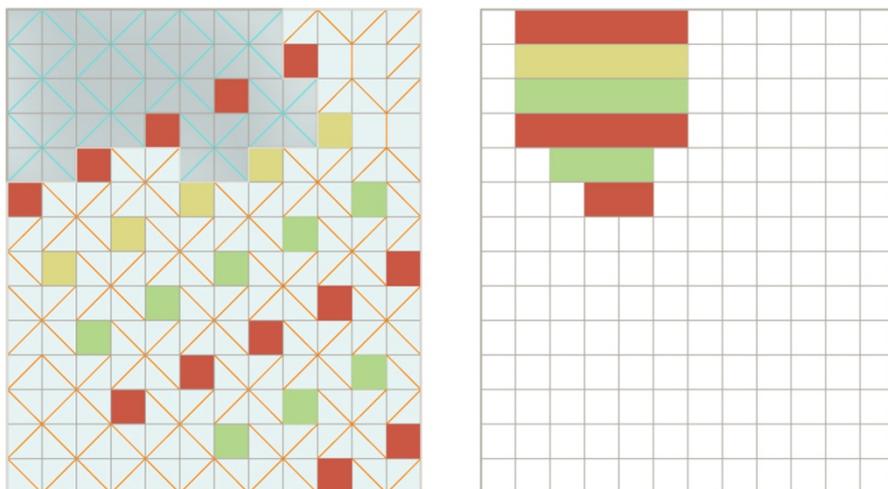
Essa offre la possibilità di chiudere temporaneamente degli spazi potendo personalizzare il progetto e l'immagine dell'elemento di chiusura, ma anche ricorrere a materiali resistenti all'usura e performanti dal punto di vista energetico.



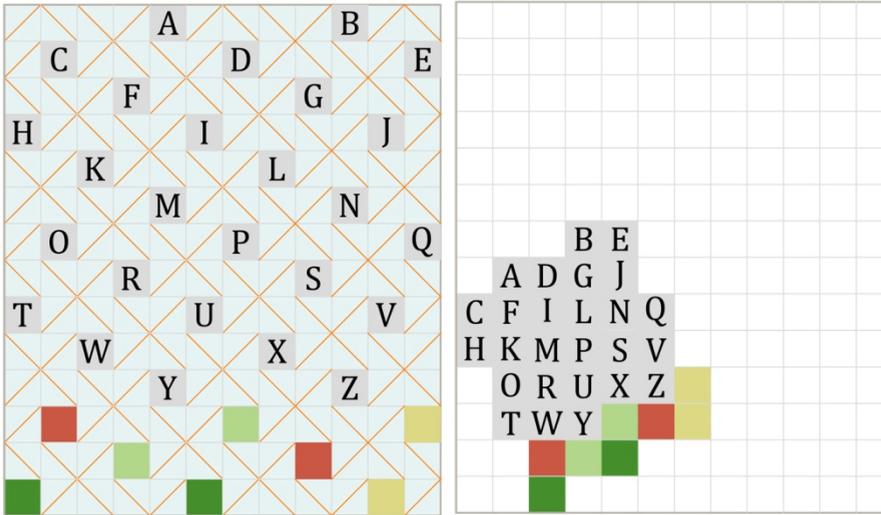
**Fig. 4.12: Schizzo delle possibili applicazioni.**

Sotto l'aspetto energetico, usando il vetro si può controllare l'illuminazione di spazi retrostanti, mentre i pannelli opachi possono avere le caratteristiche d'isolamento ritenute più idonee.

Sotto l'aspetto comunicativo, accoppiare vetro e materiali colorati e / o specchi genera in fase di movimento un effetto caleidoscopio. Poiché alcuni elementi rimangono sempre paralleli al piano, possono essere utilizzati come mezzo comunicativo. Ad esempio, possono contenere delle lettere o immagini che acquisiscano significato solo quando i pannelli si trovano in configurazione aperta.



**Fig. 4.13: Moduli uguali tra loro, uso di pannelli trasparenti e opachi, configurazione aperta e chiusa.**



**Fig. 4.14: Moduli uguali tra loro, uso di pannelli con testo e colore diversificato, configurazione aperta e chiusa.**

Il fatto che i pannelli si trovino in configurazione aperta e chiusa a distanze diverse dall'utente, infine, può essere sfruttato nella gestione dell'involucro edilizio, facilitando la gestione di soluzioni interessanti ma difficilmente perseguibili con sistemi di facciata tradizionali, come l'integrazione di elementi vegetali, e in generale di tutte quelle parti che richiedono un frequente controllo ma che in condizioni consuete non sono accessibili con facilità.

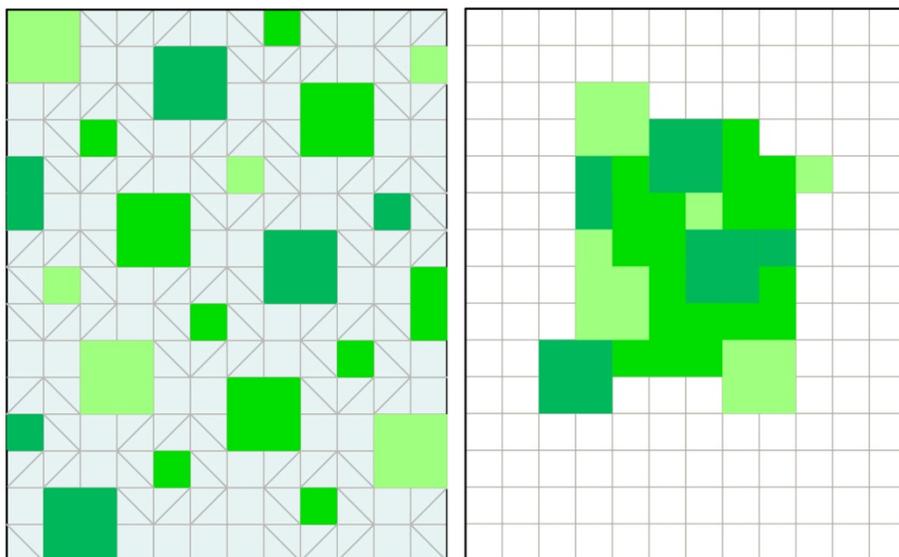


Fig. 4.15: Combinazione di moduli di dimensione diversa, configurazione aperta e chiusa.

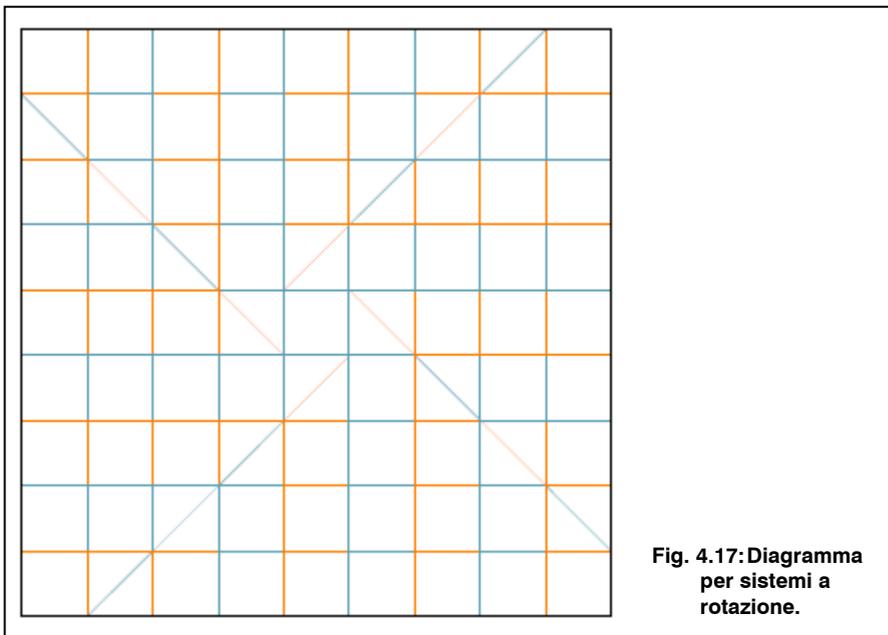


Fig. 4.16: F. Bardell, B.Howe, *Live within Skin*, Santa Monica, CA, 2006-2008

## Cap.4.2. Altri scenari possibili: le facciate performative.

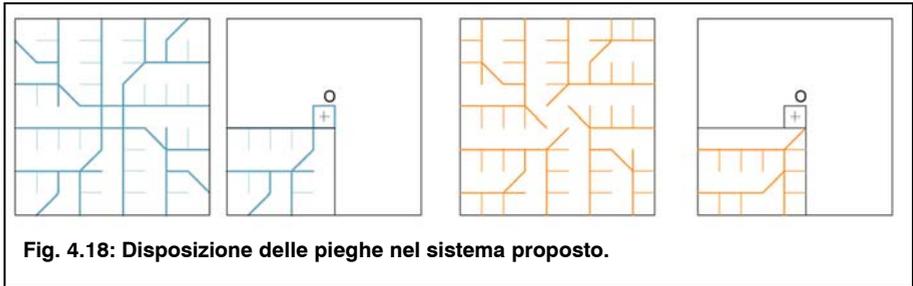
### 4.2.1. Sistema a rotazione.

Le tassellazioni a rotazione viste nel § 3.4.3. offrono diversi elementi utili per l'architettura.



Si considera tra i vari sistemi possibili il diagramma della figura precedente, Il sistema si caratterizza rispetto a sistemi simili per la posizione dell'elemento centrale parallela ai lati della superficie e soprattutto per il particolare andamento delle pieghe all'interno di ogni diramazione. Come mostrato in figura, esse si diramano in modo simile alle vene di una foglia e specificatamente le pieghe minori (in tratto leggero in figura) sono disposte alternativamente in orizzontale e verticale. Questo particolare disegno permette un'ottima possibilità di piegatura sia in fase di chiusura che di apertura.

Strutturalmente il sistema proposto può essere ampliato a piacimento, è necessario solo tener conto delle normali condizioni limite per l'inflessione a sforzi normali.



**Fig. 4.18: Disposizione delle pieghe nel sistema proposto.**

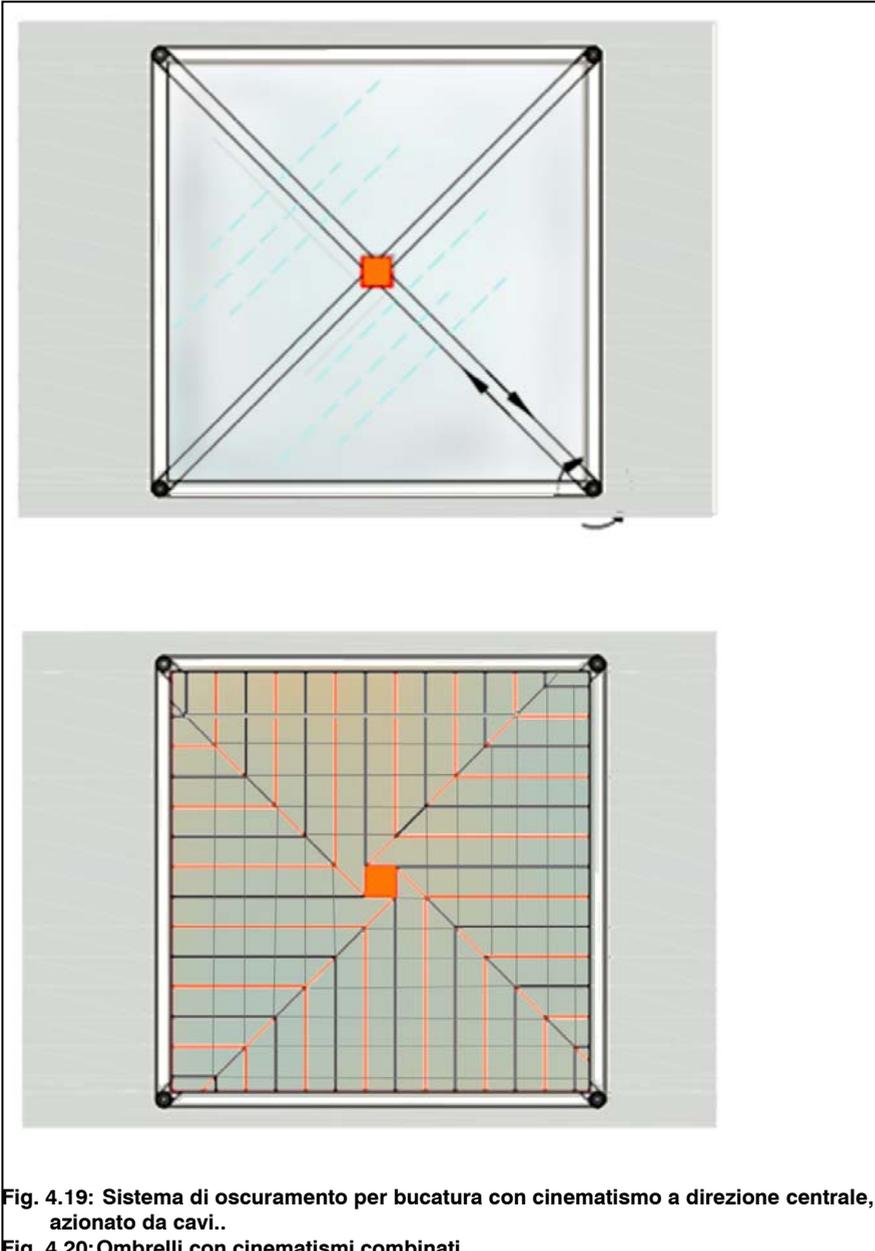
Sistema di oscuramento a rotazione.

Già le caratteristiche sopra esposte lo rendono idoneo all'utilizzo come sistema di oscuramento senza particolari modifiche: il movimento con direzione periferica è piuttosto particolare, ma il cinematismo può essere avviato e controllato con facilità. Come di seguito mostrato, è sufficiente realizzare un telaio perimetrale a delimitazione della superficie interessata e impostare un sistema di cavi traenti e retrattili. In particolare, si pongono sugli estremi di una diagonale un cavo in andata e uno in ritorno, collegati a un cavo perimetrale. Dal punto di vista cinematico la presenza di doppi cavi è sovrabbondante, ma la si ritiene comunque utile per stabilizzare la struttura al vento e più in generale a condizioni esterne non ottimali.

Il diagramma rispetta le condizioni di piegatura rigida e piana di vertici con angoli minori uguali fra loro (cfr. § 3.1.5. e 3.1.6.). Sul modello di prima approssimazione non presenta deformazioni apparenti neppure nel pannello centrale, nel quale con le piegature a rotazione centrale tendono a concentrarsi le deformazioni. Salvo verifiche degli sforzi locali più approfondite, si può ritenere che il diagramma effettivamente si trasformi in un origami attraverso piegatura rigida.

Per il tipo di utilizzo proposto, comunque, il sistema potrebbe essere

realizzato con una membrana rinforzata nelle pieghe. Il disegno del diagramma usato nel progetto esecutivo dovrebbe tener conto dello spessore della membrana, così come già studiato per un caso simile da S. Pellegrino, al quale si rimanda [PE01b].



Sistema di copertura pieghevole con apertura integrata.

Un aspetto veramente interessante del diagramma a rotazione proposto è la varietà di combinazioni morfologiche che può offrire.

Si ipotizzi di voler realizzare una copertura pieghevole. In questo caso le dimensioni minime sarebbero tali da consigliare di utilizzare più centri di rotazione, disposti in modo simmetrico rispetto alla superficie da coprire.

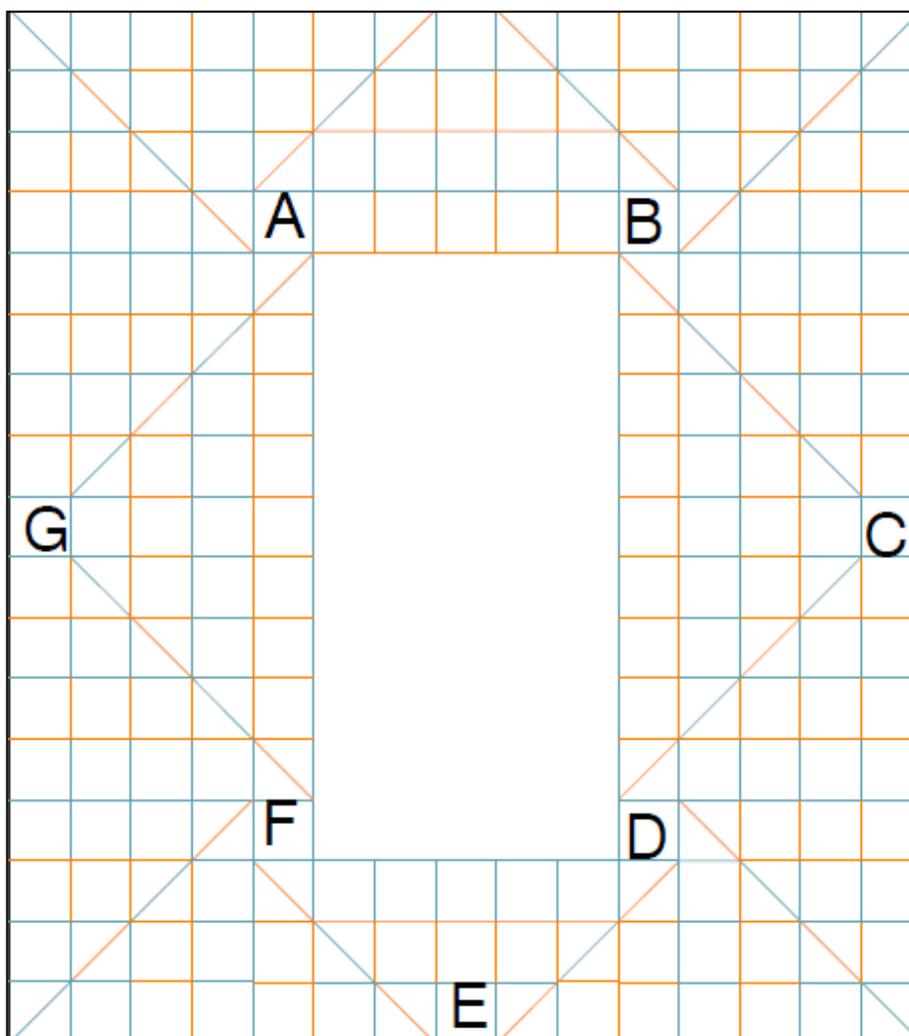
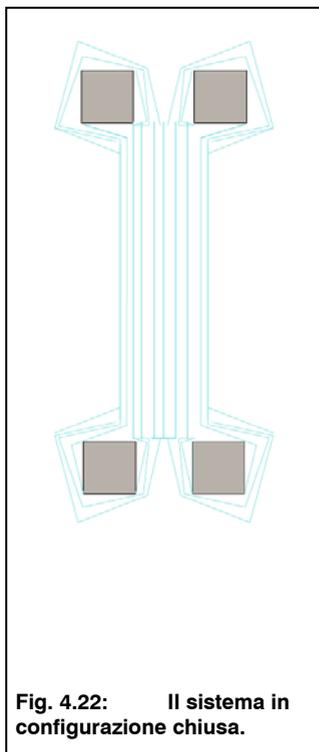


Fig. 4.21: Diagramma per copertura pieghevole, le lettere indicano i centri di rotazione.

Nell'esempio sopra riportato, si realizza una configurazione a telaio. Nella configurazione chiusa la distanza tra due centri di rotazione è quella della piega di maggior lunghezza tra quelle che li collegano, ad esempio nel caso illustrato la distanza tra A e F rimane invariata, la distanza tra F e G diviene pari alla lunghezza di un modulo quadrato. Sicuramente un'interessante linea di approfondimento, qui non affrontata, è verificare la posizione reciproca dei centri di rotazione in modo tale da rendere più regolare il sistema in configurazione chiusa, facilitandone così anche l'ingegnerizzazione.



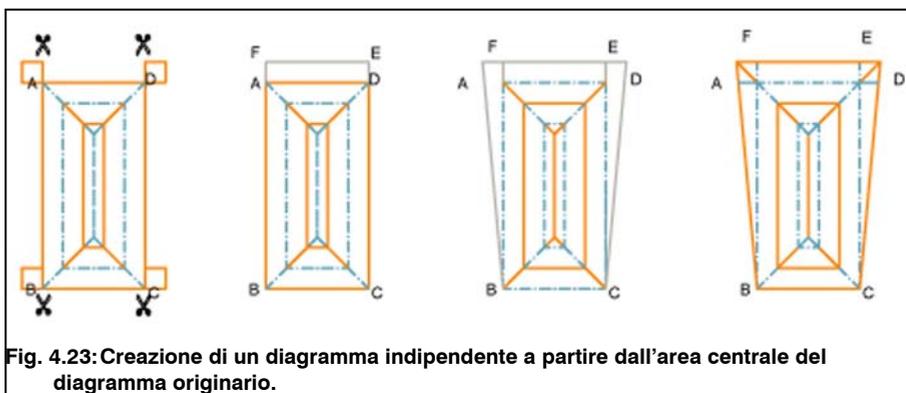
**Fig. 4.22: Il sistema in configurazione chiusa.**

Considerando ancora il diagramma a telaio, l'area centrale assomiglia a quelli che nel cap. 3.3 sono stati definiti poligoni attivi. Ricordando brevemente, i poligoni attivi sono costituiti da insiemi di pieghe perimetrali tutte dello stesso indice; ciascuno di essi circonda un'area indipendente del diagramma, un'area, cioè, caratterizzata da pieghe in numero, direzione e indice propri. Se l'area può essere trattata indipendentemente, allora può accogliere un sub sistema a se stante. Ad esempio, se la superficie è una copertura pieghevole, l'area centrale può divenire un sistema di areazione naturale.

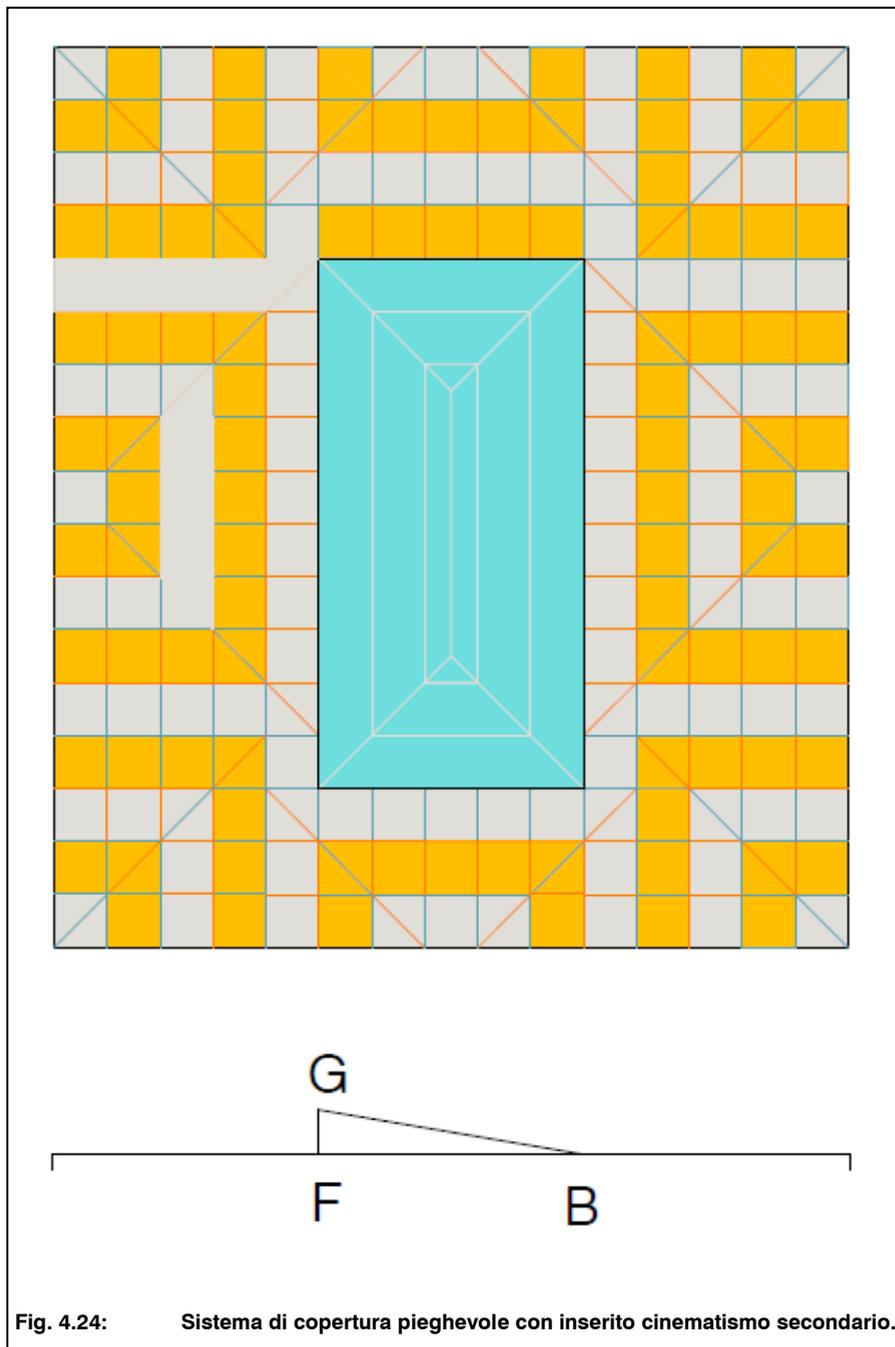
A differenza dei poligoni attivi, però, in questo diagramma una piega ha indice discorde, e il problema non è eliminabile. Anche in questo caso la limitazione favorisce in realtà gli obiettivi di progetto: si immagini di tagliare la superficie centrale (pratica lontana dalle tecniche tradizionali dell'origami

ma assai utile ai nostri obiettivi): essa non è più solo un'area indipendente ma un vero e proprio diagramma a sé da inserire successivamente. Essa allora può avere anche una dimensione maggiore, purché in configurazione chiusa si pieghi rigidamente e sia raccogliibile nella superficie libera del diagramma originario. La figura 4.22 mostra le fasi di realizzazione del nuovo diagramma.

Il diagramma deve ora essere inserito nell'area centrale del disegno originario. È evidente che nel fare questo in configurazione aperta l'origami non può essere dispiegato completamente, esso rimane tridimensionale. In particolare, l'area AFDE è perpendicolare al piano dell'origami e può essere resa apribile.



La figura seguente mostra prospetto e sezione dell'origami risultante.



Ombrelli con cinematismi combinati.

Dalla conoscenza dei vari aspetti del diagramma è possibile realizzare molte altre possibilità, ad esempio una serie di ombrelli di forma varia suscettibili di aprirsi in sequenza a partire da punti di attivazione del cinematismo diversificati.

Si consideri nuovamente il diagramma. Esso divide la superficie in quattro aree attraverso delle pieghe principali parallele al perimetro e direttamente in contatto con il pannello centrale. Oltre ad esse, si ha una serie di facce poste tra pieghe d'indice alterno; ciascuna coppia di facce racchiusa da una sequenza valle - monte - valle piegate l'una verso l'altra si propaga lungo la diramazione di appartenenza e, mano a mano che la superficie si piega, costituisce una fascia che si avvolge progressivamente attorno al pannello centrale.

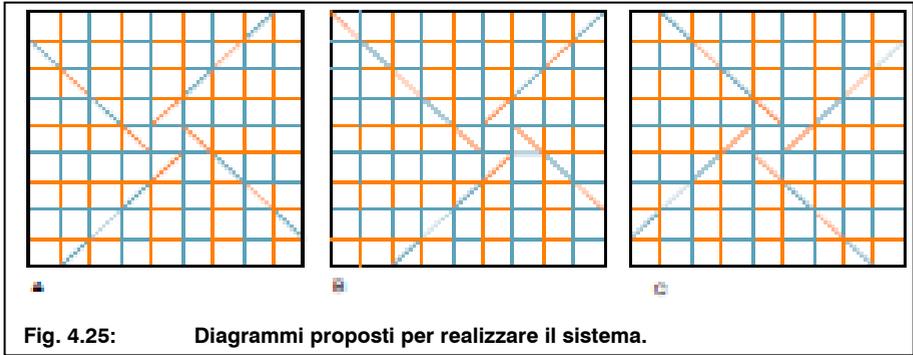
Il numero di queste fasce determina l'angolo di rotazione complessivo del pannello centrale: ogni fascia genera un incremento di  $90^\circ$  dell'ampiezza dell'angolo. Nel caso già proposto in fig. 4.17 si hanno tre fasce in ogni diramazione, quindi il pannello centrale ruota di  $270^\circ$  tra la configurazione aperta e chiusa.

Si propone di sfruttare questa peculiarità per combinare più diagrammi, disposti lungo una linea qualunque. Poiché obiettivo non è tassellare il piano, non è ora necessario che i diagrammi siano uguali e disposti secondo simmetria.

Essi soddisfano invece le seguenti condizioni:

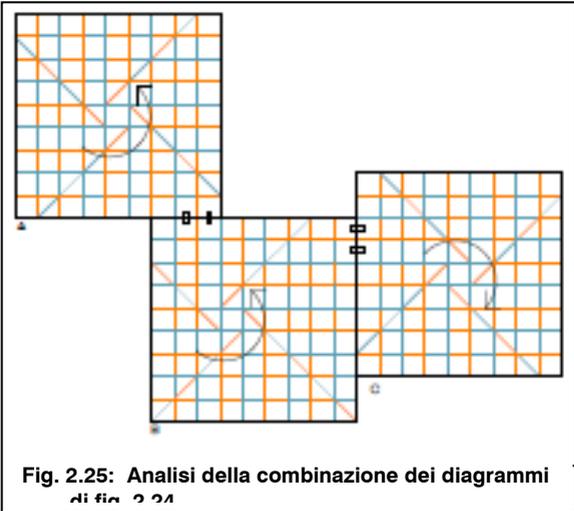
i diagrammi devono avere lo stesso indice nei punti di contatto e lo stesso passo, cioè la medesima distanza tra le pieghe, o un passo multiplo uno dell'altro; ciascun origami deve avere lo spazio per potersi aprire; ciascun diagramma deve poter piegare rispettando il verso di rotazione dei pannelli centrali dei diagrammi contigui.

La figura seguente mostra i diagrammi utilizzati: il diagramma A è lo stesso già visto in fig. 4.17, il diagramma B ha una superficie di dimensione diversa, ma ha le facce racchiuse da pieghe dei medesimi indici, il diagramma C è il riflesso del diagramma A ed ha perciò le facce racchiuse da pieghe di indici invertiti.



La prima condizione permette la continuità tra le fasce, così che le facce appartenenti a una medesima fascia in fase di piegatura possano via via sovrapporsi una sull'altra. La seconda condizione è evidente e indica che i pannelli non devono intersecarsi.

Per comprendere il senso dell'altra condizione si consideri il diagramma combinato illustrato nella figura seguente.



I diagrammi sono combinati in modo tale da rispettare la prima condizione, ovvero hanno lo stesso indice nei punti di contatto e lo stesso passo. Disposti alla minima distanza, gli origami possono aprirsi e chiudersi fintantoché il movimento

non interessa l'origami limitrofo, ad esempio nell'origami A il pannello centrale ruota di  $180^\circ$ , perché una delle quattro fasce è bloccata dalla presenza dell'altro origami. Riguardo alla condizione che i pannelli ruotino tutti con lo stesso verso, nel diagramma B le fasce si aprono e chiudono con verso concorde a quelle del diagramma A e discorde da quello del diagramma C. Ciò impedisce alle fasce del diagramma A di ruotare. Due diagrammi che si trasformano con rotazione nello stesso senso bloccano quindi il meccanismo, ovvero, nella pratica, quando tutti gli ombrelli sono collegati in serie, l'apertura degli ombrelli B e C tende a chiudere l'ombrello A. Dunque per realizzare una sequenza di apertura e chiusura continua devono disporsi diagrammi che prevedano una rotazione con verso opposto.

Nel rispetto di queste condizioni, i diagrammi possono essere molto diversi uno dall'altro, come quelli illustrati nella figura seguente.

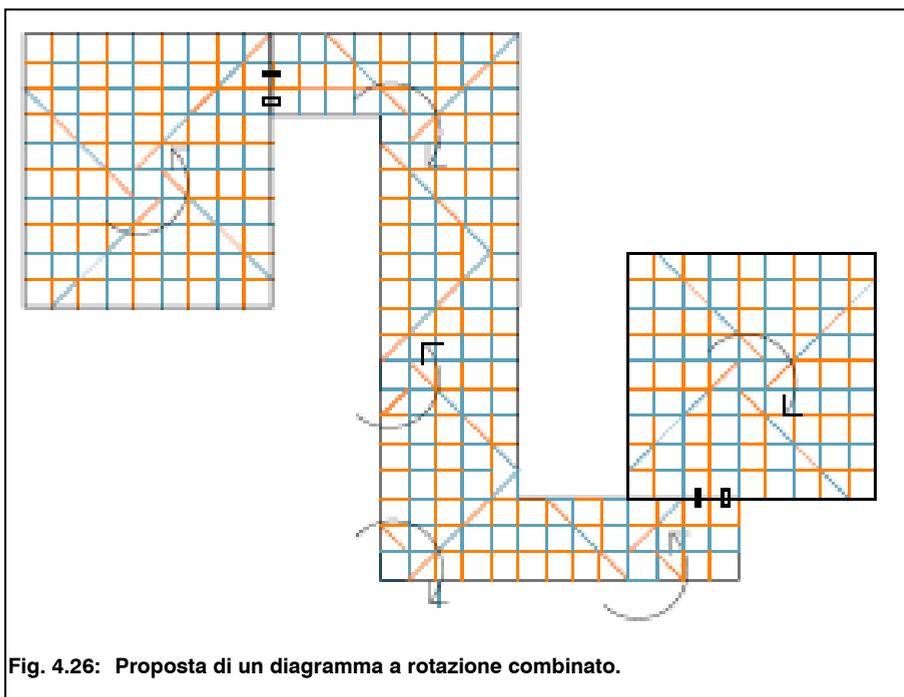


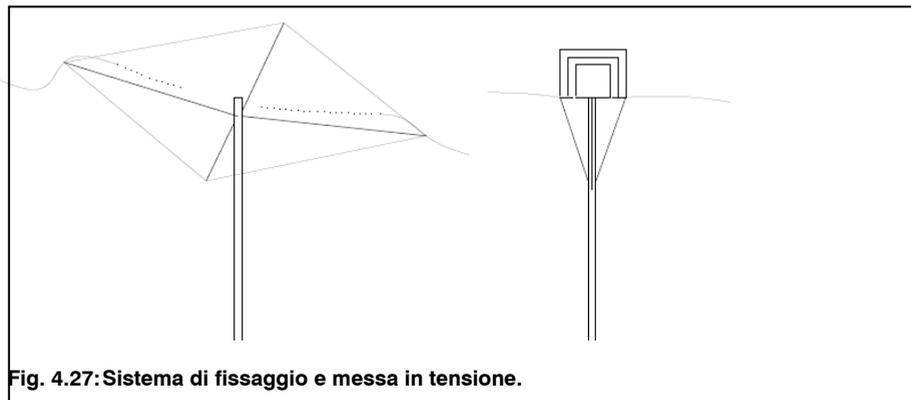
Fig. 4.26: Proposta di un diagramma a rotazione combinato.

Il numero di diagrammi, e quindi di strutture semi indipendenti, può essere ridotto se si accetta di collegare in modo fisso alcune diramazioni appartenenti a pannelli centrali diversi: similmente a quanto visto in questo paragrafo per il caso di una copertura pieghevole a telaio, la soluzione comporta che le fasce delle diramazioni in contatto in configurazione chiusa rimangano perpendicolari al piano orizzontale e siano psote a una distanza uguale a quella tra i rispettivi centri di rotazione.

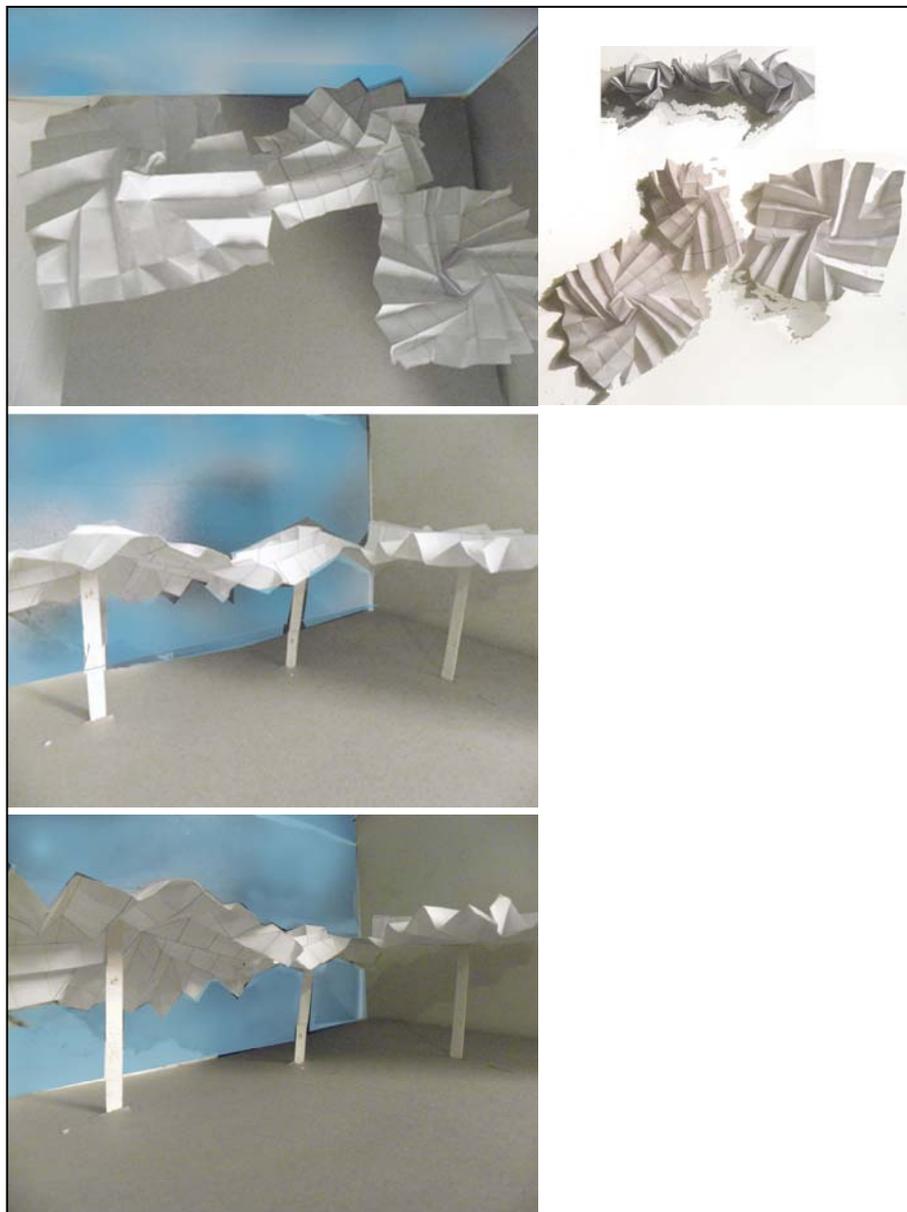
Sotto il punto di vista cinematico, ogni diagramma in fase di trasformazione ha un grado di libertà.

È allora possibile realizzare un sistema di due cavi, uno di andata e l'altro di ritorno, collegati a pulegge, che si raccordino ai diagrammi in modo tale da generare due sequenze opposte di apertura e chiusura degli ombrelli. Essi devono essere collegati ponendo particolare attenzione a che non impediscano le varie rotazioni. In prima istanza, si può osservare che non è necessario i cavi raggiungano il pannello centrale, ma è sufficiente essi si colleghino a due fasce contrapposte in ogni diagramma.

La messa in tensione e il fissaggio si ottengono facilmente con un sistema barre scorrevoli sull'elemento di sostegno come negli ombrelli più tipici. Una soluzione costruttivamente più complessa può essere realizzata collegando direttamente anche i cavi di andata e ritorno alle aste di fissaggio.



**Fig. 4.27: Sistema di fissaggio e messa in tensione.**



**Fig. 4.28:** Modellini esplicativi dell'idea progettuale.

Note:

[PE01b] SERGIO PELLEGRINO, JULIAN F.V. VINCENT,. How to fold a membrane, in SERGIO PELLEGRINO (a cura di) *Deployable structures*, Berlino, DE, Springer, 2001, pp.70-74.

#### 4.2.2. Sistema concavo convesso.

Superfici pieghevoli a una curvatura.

L'ipotesi qui presentata riguarda la possibilità di creare diagrammi con punti notevoli da usare per adattare la superficie a più di una configurazione aperta, nella fattispecie, sia a forme convesse che concave. L'ipotesi di progetto è motivata dalla frequenza sempre maggiore con la quale l'architettura fa propria la forma curva.

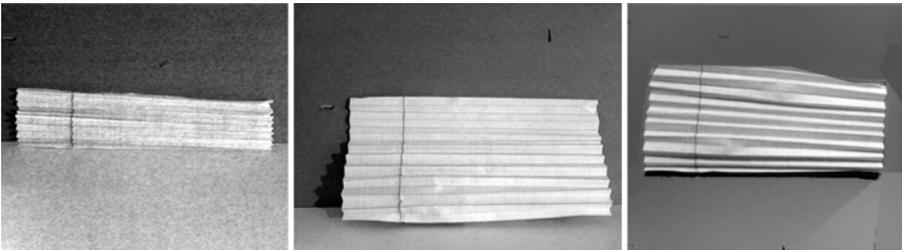


Fig. 4.29: Una semplice superficie origami estensibile linearmente può adattarsi a una qualsiasi curvatura.



Fig. 4.30: Struttura di sostegno e controllo del meccanismo per un origami estensibile su superficie dotata di una singola curvatura.

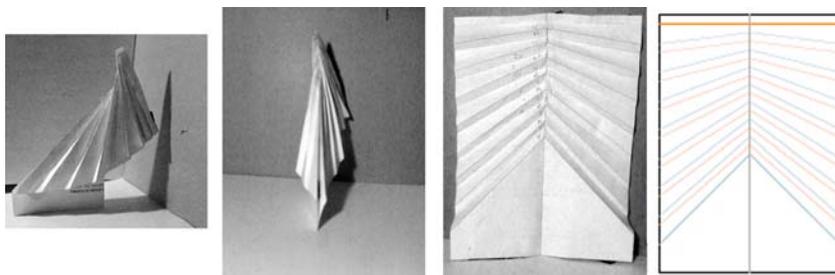
La figura precedente mostra una semplice superficie estensibile linearmente in una direzione, composta da pannelli uguali tra loro. Se i pannelli sono fissati a due a due (in corrispondenza delle pieghe a valle) tramite cerniere su carrelli a dei binari scorrevoli che seguono la direzione della superficie di progetto, i pannelli si adattano alla curvatura.

Superfici con curvatura modificabile.

Le superfici, curve, però, possono se correttamente configurate assolvere avere particolari performance acustiche. In particolare, ogni tipo di spettacolo richiede determinate caratteristiche delle superfici che racchiudono l'ambiente, per cui si è costretti nel progetto dell'involucro di questi ambienti a mediare tra le esigenze richieste dai vari usi, oppure a impiegare rivestimenti temporanei da rimuovere e mettere in sede singolarmente secondo i casi.

Un'interessante soluzione è utilizzare superfici dispiegabili semplici, arricchite solo da un opportuno set di pieghe che disegnino le linee lungo le quali è necessario per il progetto che la curvatura della superficie muti.

Si sceglie per sviluppare l'idea la superficie mostrata in figura 4.31.. Essa ha un diagramma composto da pannelli simmetrici da destra a sinistra, mentre la parte terminale è priva di pieghe. Ricordando quanto già esposto riguardo le tassellature estensibili, si nota che caratteristica condizionante la superficie è la possibilità di piegatura nei due sensi, anche non in modo continuo (nella trasformazione del diagramma scelto, prima le due grandi aree simmetriche verticali si portano una verso l'altra, e solo allora le facce di area minore si chiudono una verso l'altra); le altre caratteristiche del diagramma, come l'assenza di pieghe nella parte terminale e la variazione uniforme dell'angolo settore delle pieghe in verticale non sono sostanziali ai fini del cinematismo, sono state scelte su base edetica perché rendono la superficie "avvolgente" e particolare in configurazione chiusa.

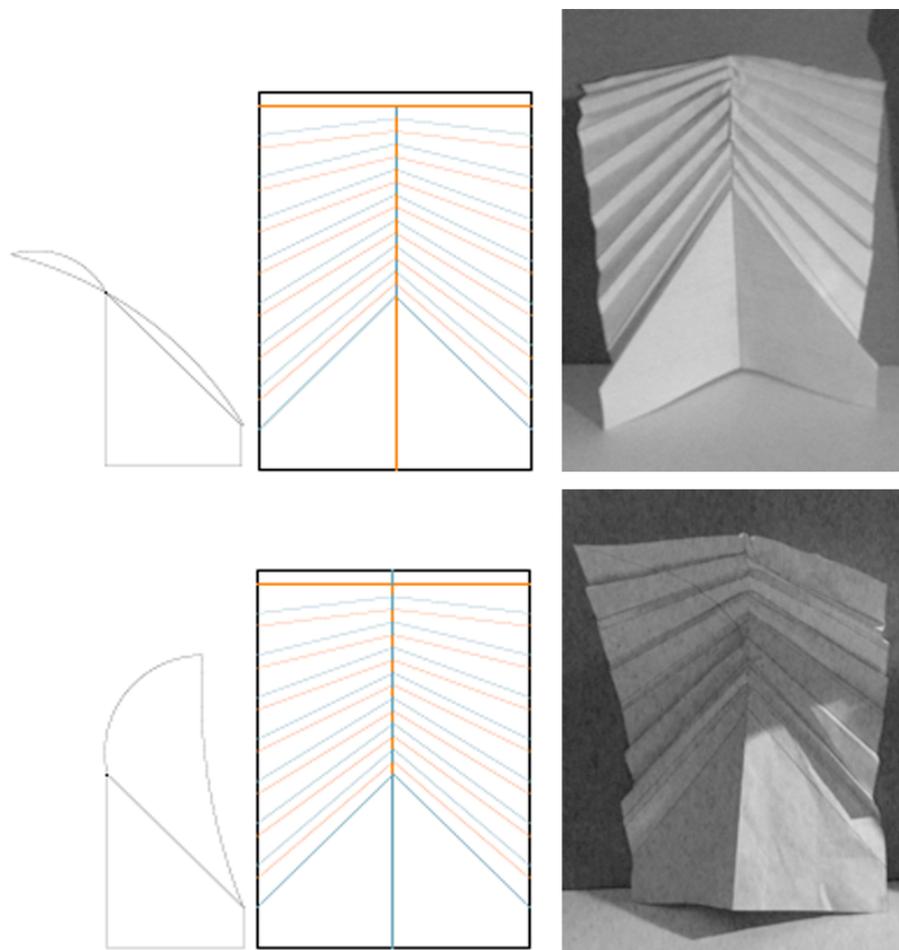


**Fig. 4.31: Vista laterale e frontale dell'origami in configurazione chiusa, vista frontale in configurazione aperta e diagramma.**

Si applica ora una forza lungo la linea centrale, in modo tale da imporle di invertire la propria curvatura. Se si confronta il nuovo diagramma con il precedente, si nota che la modifica non muta l'indice delle pieghe simmetriche, ma solo inverte gli indici delle pieghe poste sulla linea che è centrale, lungo la quale si è applicata la forza. In ogni vertice le pieghe laterali mantengono lo stesso indice e le pieghe superiori e inferiori lo invertono. La piegatura rimane localmente piana e rispetta il teorema di Makeawa. Per le caratteristiche di simmetria del diagramma già esposte a inizio paragrafo, si può affermare che anche globalmente le modifiche non impediscono la trasformazione del diagramma in un origami piano.

Ancora, se le pieghe laterali non sono coinvolte, i loro giunti devono essere posti sull'asse dei pannelli, in modo da permettere la rotazione nei due sensi senza sforzi. Una soluzione interessante, e particolarmente adatta al caso specifico, può essere di realizzare le giunzioni interne come quelle delle pareti mobili acustiche.

Il sistema può essere azionato con l'aiuto di un meccanismo a barre. La figura 4.33 e 4.34 mostra in prospettiva trasversale il cinematismo del meccanismo nelle quattro configurazioni: superficie in massima apertura, superficie chiusa, superficie estesa con inclinazione convessa e estesa con inclinazione concava.



**Fig. 4.32:** La superficie con curvatura concava e convessa.

Si fa notare che la struttura è spaziale, perciò i punti B, C e D giacciono simmetricamente su due piani paralleli al piano contenente i punti A e E ed equidistanti da esso. I punti B e C sono fissi, mentre il punto A ruota sul piano orizzontale attorno al punto B.

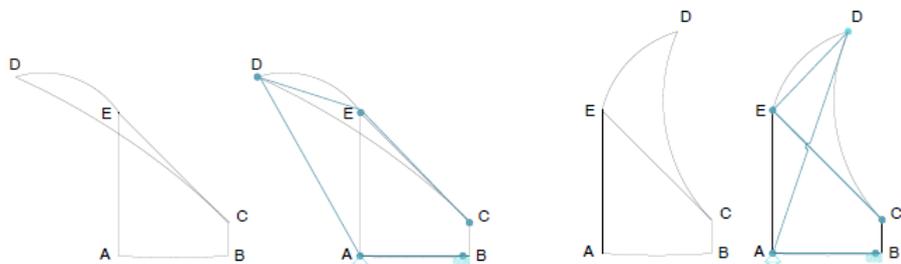


Fig. 4.33: Origami e struttura di supporto in configurazione estesa convessa e concava.

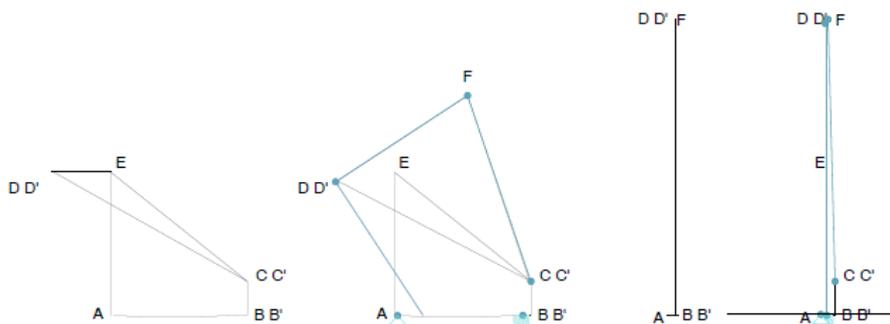


Fig. 4.34: Origami e struttura di supporto in configurazione chiusa e aperta alla massima estensione.

Sicuramente, oltre all'ottimizzazione del digamma specifico in base alle condizioni al contorno imposte dal progetto architettonico, e con esso della struttura di supporto, un'interessante linea di sviluppo riguarda i margini del diagramma, nella fattispecie attorno ai vertici D e D'. Al di là dell'inflessione visibile nel modello, dovuta all'elasticità della carta, la piegatura tende per geometria ad abbassare la posizione dei nodi D e D' rispetto al nodo centrale F. Come conseguenza, in configurazione estesa l'origami non proietta sul piano verticale un rettangolo e lascia delle aree libere rispetto ad un eventuale soffitto superiore. Si pensa comunque che il problema sia risolvibile ampliando la superficie in corrispondenza dei nodi suddetti, e

piegandola sotto il perimetro rettangolare in configurazione completamente estesa e in configurazione chiusa. Le barre possono essere incernierate al vertice esterno delle pieghe così aggiunte, assicurando che esse si adeguino al cinematismo.

Superfici pieghevoli adatte a qualsiasi curvatura.

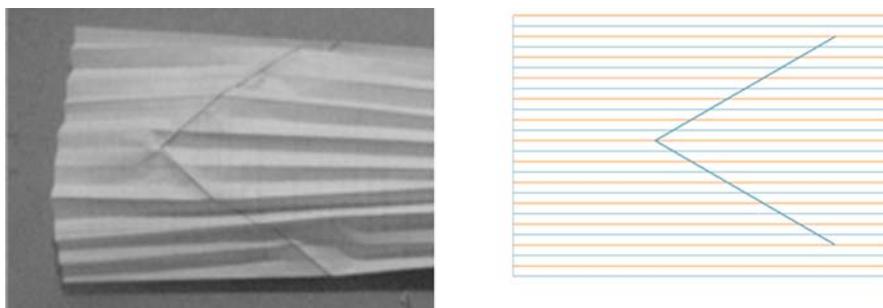
Un'altra interessante linea di sviluppo prende in considerazione gli involucri architettonici.

Gli involucri contemporanei tendono ad esplorare forme sempre più complesse, dotate di una e spesso più curvature sia in pianta che in prospetto. Grazie alla tecnica della piegatura a freddo, queste anche i vetri possono seguire queste curvature. In questi casi, i sistemi vetrati sono composti con materiali particolarmente performanti, così da porre un parziale controllo delle condizioni di benessere interno agli ambienti, e sono integrati con sistemi di ventilazione meccanica e oscuramento interno all'ambiente o frapposto tra i vetri. Entrambe le soluzioni di oscuramento, però, non sono ottimali perché non impediscono al calore di raggiungere la superficie interna dei vetri. D'altro canto, non è perseguibile l'idea di un oscuramento rettilineo che neghi le forme di progetto.

Si vuole valutare, perciò, la possibilità di realizzare un origami pieghevole in grado di adattarsi alle varie curvature dell'involucro architettonico che essa può incontrare nel suo dispiegarsi.

La differenza sostanziale rispetto al caso precedente risiede nel fatto che ora l'origami non può muoversi liberamente, ma è vincolata dalla presenza dell'edificio. Inoltre, le facce dell'origami devono adattarsi alla curvatura nel momento nel quale la incontrano, altrimenti sarebbe necessaria una struttura di supporto che del tutto inutile per la facciata, e estranea al suo disegno.

Si consideri l'origami estensibile linearmente della figura seguente. Si è già detto che l'origami può seguire una curvatura qualsiasi lungo la sua linea di apertura e chiusura, Si immagini di dover realizzare una ulteriore curvatura con direzione opposta alla linea di apertura e chiusura dell'origami. Si disegnano sul diagramma le linee principali che guideranno la piegatura dell'origami secondo la nuova curvatura.

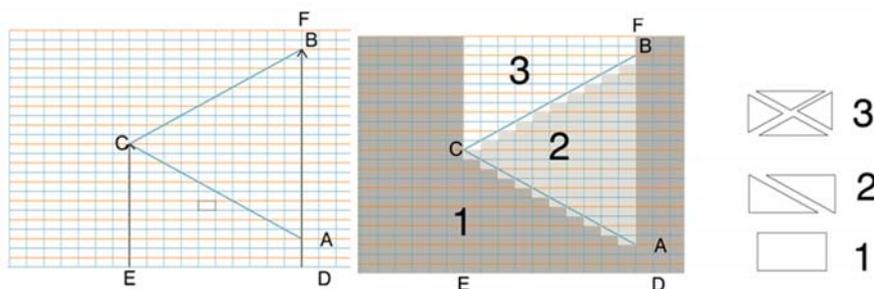


**Fig. 4.35: L'origami e il diagramma proposti.**

Le linee AC e BC permettono alla superficie di seguire la curvatura desiderata. Non considerando lo spessore del materiale, tutti i punti del diagramma lungo la linea da D a B in configurazione chiusa nell'origami si trovano in D. Dato il cinematismo lineare retto del diagramma, quando l'origami inizia ad estendersi, i punti si spostano linearmente verso l'alto. Alcuni, quelli dei pannelli superiori, superano le linee di taglio in A e in B e uno raggiunge il punto F. Altri, appartenenti ai pannelli immediatamente sotto, coprono il tratto da B ad A e incontrano perciò solo la linea di taglio in A. Altri ancora, quelli più in basso, non incontrano nessuna linea di taglio. Così ragionando, i punti del diagramma sono divisibili in tre aree, illustrate nella figura seguente, in base a quante linee di taglio incontrano. Come diretta conseguenza, si hanno tre tipi di pannelli, uno per ogni area.

A questo punto si può già osservare che è importante che le linee di taglio

siano tra loro simmetriche e più in generale che la loro direzione e la direzione delle altre pieghe (le quali nel complesso determinano la forma dei singoli pannelli) si combinino in modo tale da limitare al massimo il ricorso a pannelli di forma diversa dagli altri.



**Fig. 4.36: La superficie è scomponibile in tre aree.**

La direzione delle pieghe di taglio dipende dalle condizioni imposte dal progetto, ed i pannelli devono avere un passo ad essa subordinato.

Dunque il sistema, permette di adattarsi a superfici di curvatura varia rimanendo pieghevole e limitando il numero di pannelli diversi.

Tuttavia, poiché come si è detto riguardo la cinematica degli origami ogni piega introduce un grado di libertà, è evidente che se si vuole ottenere una struttura stabile in ogni suo punto, il sistema scorrevole di supporto visto all'inizio di questo paragrafo non è sfacente. In particolare, i pannelli dell'area 3 possono piegarsi autonomamente per cause esterne..

Un aspetto interessante del processo di ingegnerizzazione sono proprio i giunti tra i pannelli, Senza entrare in uno studio specifico, si accenna brevemente alla possibilità di sfruttare meccanismi secondari di stabilizzazione dei punti critici così come sviluppati in ambito aerospaziale [SC00] [PE01]. Essi sfruttano l'instabilità del terso tipo della struttura, ermettendole di passare con un piccolo apporto di energia da una

configurazione di equilibrio a un'altra completamente diversa ma anche essa di equilibrio senza subire deformazioni permanenti. Concettualmente, i sistemi si basano sugli stessi principi visti per le strutture a forbice autobloccanti.

Nel caso di realizzazioni di piccola entità, invece, si può sfruttare lo spessore dei pannelli e, attraverso un'opportuna sagomatura della sezione, controllare l'inclinazione reciproca tra le facce e mantenere la superficie senza soluzioni di continuità.

#### Note:

[SC00] TYGE SCHIOLER, SERGIO PELLEGRINO, *A bistable structural element*", in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 222, n. 11, 2008, pp. 2045-2051.

[PE01] SERGIO PELLEGRINO, *Deployable structures*, Berlino, DE, Springer, 2001.

### **Cap, 4.3. La forma degli involucri contemporanei.**

Nel presente capitolo si sono discusse alcune applicazioni delle strutture che lavorano per piani, costituite cioè da pannelli collegati su più lati tramite giunti a cerniera in modo tale da formare superfici continue.

Le strutture cinematiche per piani impongono di lavorare sulle geometrie non solo per ottenere una determinata configurazione aperta e chiusa, ma soprattutto per ottenere la trasformazione della superficie da una configurazione all'altra attraverso movimenti rigidi, che non deformino il materiale. Ciò rende di primaria importanza lo studio della forma e delle combinazioni dei pannelli. Sotto il punto di vista architettonico, questi sistemi obbligano il progettista a considerare la geometria della trasformazione, ovvero, permettono di avere il pieno controllo degli aspetti morfologici, oltreché performativi, dell'adattabilità.

Su tali basi si è proposto un sistema estensibile modulare per facciate. La tassellazione estensibile presentata non è stata pensata in funzione di un progetto specifico, ma, lavorando sulle sue possibili variazioni geometriche, si sono messe in luce le capacità espressive e performative ottenibili. Ne è risultata una struttura mobile in grado di assolvere ad un tempo diversi ruoli. Essa, variando configurazione, gestisce le richieste di adattabilità e, attraverso l'opportuna scelta del materiale costituente i pannelli, regola l'isolamento dall'esterno. Essendo il meccanismo direttamente esposto alla vista, senza tamponamenti o elementi frapposti, esso può esercitare una forte valenza comunicativa, personalizzata in base alle esigenze specifiche.

La coincidenza di struttura e superficie di chiusura limita gli ingombri complessivi del sistema mobile, rendendolo idoneo ad applicazioni alla piccola scala, bucatore, divisori quanto a scala edificio, facciata ,copertura, gestione degli spazi aperti. Gli altri esempi proposti esplorano tutte queste possibilità.

Poiché le forme attraverso le quali attuare i vari movimenti sono alquanto inusuali nella meccanica, derivando direttamente dagli origami, anche questi sistemi sono stati esemplificati nei termini più generici, procedendo per limitazioni, sicuri della bontà dell'esito. Si è così indicato cosa è possibile fare in base alle condizioni cinematiche imposte dalle caratteristiche delle strutture cinematiche origami, si sono date indicazioni su come controllare e stabilizzare il movimento, si sono rilevati punti nodali della fase di ingegnerizzazione.

Limitando il campo, è emersa la specificità di queste strutture. Anche nelle soluzioni più semplici, come nel sistema di oscuramento a rotazione proposto, il movimento dei pannelli non è solo un fatto meccanico o ingegneristico, ma è un vero e proprio elemento architettonico in quanto il movimento costruisce l'estetica dell'edificio. In particolare, il movimento delle strutture per piani è necessariamente tridimensionale e, poiché i pannelli sono vicendevolmente collegati, coinvolge tutto lo spazio attorno alla superficie, trasformandolo.

Negli involucri architettonici contemporanei si assiste da un lato ad un processo di ispessimento della sezione, costituita da più strati funzionali giustapposti, dall'altro all'appiattimento dell'immagine complessiva dell'edificio. I sistemi mobili per piani tipo origami dimostrano di comportarsi in maniera opposta. essi assumono ad un tempo funzione di sostegno, separazione e isolamento; la struttura inoltre occupa gli spazi ad essa demandati in modo dinamico, a seconda delle esigenze del progetto e questo suo movimento è leggibile in profondità nello spessore dell'involucro.

**PARTE QUINTA.**  
**CONCLUSIONI.**



## Cap. 5.1. Conclusioni.

Il testo riguarda l'integrazione di strutture cinematiche nell'architettura, così da realizzare forme e spazi trasformabili. Le strutture in grado di cambiare la propria forma sono ad un tempo strutture e meccanismi, perché trasferiscono autonomamente tra i loro elementi le forze ma anche il movimento.

Dal punto di vista architettonico il progetto dell'architettura cinetica si traduce nell'uso delle tecnologie di volta in volta disponibili per realizzare un'architettura internamente coerente e capace di rispondere alle necessità espresse e latenti.

Partendo dall'assunto che è oggi l'adattabilità una esigenza stringente, alla quale è espressamente richiesto dare risposta e che non può essere tacciata come realizzazione di bisogni secondari o utopici, si è verificato che l'architettura mobile è intrinsecamente adattabile e che nelle sempre più diffuse declinazioni di architettura trasformabile, ovvero architettura fissa, non trasportabile, ma dotata di cinematismi interni, è usata specificatamente a questo scopo. La validità degli esiti ottenuti dipende dall'attitudine della forma a mantenersi in equilibrio senza snaturarsi, vitale in rapporto all'insieme mutevole delle tensioni e dei bisogni cui è sottoposta ne corso del tempo.

Dal punto di vista cinematico – ingegneristico, il progetto delle strutture movimentabili si traduce nella ricerca di una configurazione che, data un'azione iniziale, produca il movimento desiderato. I sistemi possono essere divisi in strutture per punti a tamponamenti morbidi, strutture per punti a tamponamenti rigidi e strutture per piani. L'analisi morfologica e cinematica delle strutture realizzate in architettura, nonché in altri ambiti ma all'architettura riconducibili, mostra un patrimonio particolarmente ricco di possibilità e soluzioni. La suddivisione strutturale si rispecchia nelle diverse

attitudini applicative che le strutture dimostrano. In particolare emerge con evidenza come i sistemi per piani siano dotati di resistenza lungo tutta la superficie e capacità di chiusura continua, possano rispondere a esigenze di controllo energetico ed essere integrati in involucri edilizi stabili: essi sono perciò particolarmente idonei a soddisfare le attuali esigenze dell'adattabilità. Purtroppo, però, i sistemi a pannelli per quanto diffusi in forme basilari nella pratica edilizia (porte e così via) non sono stati in passato molto approfonditi. Si è guardato allora ad altri campi e si è notato che negli ultimi anni c'è una particolare congerie d'interessi da parte di diverse discipline attorno alle tecniche alla base degli origami. Essi, architettonicamente parlando, sono pannelli incardinati come le semplici strutture a concertina, ma, diversamente da queste, sono connessi tra loro su più lati in modo da formare una superficie continua. Nonostante il cinematismo sia costretto dalla sola possibilità di rotazione di un pannello rispetto a quelli adiacenti e nonostante le strutture per piani impongano condizioni al movimento molto più stringenti delle strutture per punti (non intersezione e non deformazione dei pannelli) esse dimostrano nei fatti una grande libertà di forme. Questa deriva dall'attento studio della geometria con la quale i pannelli sono composti tra loro e sotto la quale ne viene studiata la trasformazione, ovvero il movimento. Dunque, a partire da fonti d'informazione diversificate, si è studiate la possibilità di realizzare una determinata forma di progetto, la possibilità di realizzare una forma di progetto dotata di cinematismo ed infine le condizioni per realizzare strutture cinematiche estensibili. Le conoscenze innovative qui presentate sono state esemplificate da alcune proposte di realizzazione.

In esse si è posta attenzione a definire le condizioni del movimento e ad impostare le questioni della realizzabilità. Svincolati da un progetto specifico, i casi semplificativi hanno permesso di illustrare le variazioni e combinazioni possibili, e con esse gli esiti performativi e ottenibili. È emersa

in particolare la capacità di queste strutture di lavorare non su piani, ma su spazi, che esse anche nelle realizzazioni più semplici vanno a definire in modi sempre innovati.

Si è dimostrato, dunque, che l'architettura dotata di cinematismi integrati può divenire diffusa senza snaturare la storia dell'architettura stessa e i suoi cardini, ma anzi arricchendola dal di dentro: essa esalta quel connubio tra arte e scienza i difficile realizzazione ma che è deve rimanere alla base dell'architettura.

### **CAP. 5.2. Questioni aperte.**

Il testo ha cercato di raccogliere e organizzare le possibilità offerte per le strutture mobili per punti e per piani così come provengono da settori disparati anche normalmente estranei al terreno d'azione dell'architettura diffusa fintantoché le soluzioni proposte pongono utili suggestioni, ma anche pratiche soluzioni, per i problemi dell'architettura. Ad esempio, le strutture cinematiche sputiate in ambito aerospaziale sono meccanismi a un grado di libertà, attuabili e gestibili da un solo punto di controllo, non necessitano dell'intervento manuale per il fissaggio delle struttura in configurazione aperta, come è spesso per le architetture trasportabili (tende, palchi e così via). Esse, però, sono pensate per lavorare in assenza di gravità e per lo più non devono sorreggere carichi oltre al peso proprio. L'analisi dal punto di vista strutturale che accompagna tutti i sistemi presentati mette in luce questi diversi approcci e le eventuali possibili soluzioni. Similmente, alcuni meccanismi studiati per applicazioni a piccola scala, come i diaframmi delle macchine fotografiche, presentano delle complessità costruttive nel passaggio di scala a causa delle caratteristiche dei giunti, andando a minare la durabilità del sistema, come avviene nel caso specifico per l'Institut du Monde Arabe. Altri meccanismi, come le strutture a rotazione radiale periferica, possono ottenere risultati equiparabili

in modo più efficace per l'ambito architettonico. Anche in questo caso, l'analisi comparata di cinematismo e morfologia mette in luce le questioni legate all'uso architettonico. Il testo ha dato in questo una panoramica si ritiene esaustiva delle macro possibilità sperimentate dalle strutture mobili per l'architettura. Il testo accoglie anche altre soluzioni in via di studio e di elaborazione, pensate specificatamente per sistemi trasformabili, ovvero costruzioni stabili dotate di cinematismi integrati.

Questo lavoro, come gli altri contributi critici al dibattito sul tema dell'architettura mobile, dovrebbe trovare accoglimento non solo da specialisti del campo, tecnologi o ingegneri. Il tema dell'architettura mobile non è il sogno utopico che si traduce in esiti meccanicisti e di dubbio valore progettuale. Esso è un tentativo di rispondere alle esigenze di adattabilità con mezzi ormai noti nei loro limiti e nelle loro potenzialità, affidabili, praticamente eseguibili e su molti dei quali si è andata accumulando una buona esperienza di realizzazione. L'architettura mobile invita il progettista a porsi di fronte ai problemi della costruzione con approcci inusuali; viceversa l'architettura mobile può trovare nel confronto con le esigenze particolari del singolo progetto l'input per soluzioni nuove e migliori. Ampliare le occasioni di dibattito è una fonte di arricchimento importante specie quando si affronta uno stesso problema, qui l'adattabilità, da punti di vista in parte diversi (la sicurezza dei risultati, l'economicità, la disponibilità sul mercato per il progettista; la facilità d'impiego, la versatilità, la realizzabilità per quanti lavorano specificatamente sulle strutture mobili) Le conoscenze diversificate costruiscono il terreno su cui poggia l'architettura.

L'architettura delle immagini informatiche, dei materiali performanti sta progressivamente appiattendolo spazio architettonico. Mentre gli involucri degli edifici divengono sempre più complessi, spessi e stratificati, al suo esterno come all'interno di questo processo non c'è traccia. Ci si è chiesti se sia oggi possibile creare uno spazio adattabile, vivo, che sappia

accogliere le persone e non solo appiattirsi davanti al loro sguardo. Designer e artisti, che come sempre per primi hanno affrontato il paradigma informatico, realizzano molte costruzioni mobili a piccola scala, installazioni e divisori, ma le maggiori funzioni e capacità strutturali richieste all'involucro edilizio limitano il passaggio di scala di queste soluzioni.

Le strutture a pannelli tipo origami presentate e sviluppate nelle ultime parti di questo testo introducono prepotentemente nuove possibilità. Essendo i pannelli elementi tipici della costruzione architettonica, essi possono costituire delle superfici performanti dal punto di vista energetico. Questi sistemi non sono altro che pannelli incernierati, ma i singoli elementi sono collegati gli uni agli altri da più lati, così che si crea una superficie continua nella quale anche il più piccolo movimento è necessariamente un movimento tridimensionale, che agisce nello spazio, trasformandolo. Senza necessità di ingombranti sottostrutture o altri strati performanti, l'edificio riacquisisce il suo spessore murario, anche se è uno spessore cangiante e mutevole come il quadro esigenziale che il movimento vuole soddisfare.

Sull'analisi comparata che, dalla struttura, estrapola il rapporto tra morfologia e cinematica ci si è mossi anche nel discorso sulle strutture tipo origami. Le tecniche presentate sono state chiaramente rilette sotto la prospettiva dell'applicabilità in architettura, dove per applicabilità si è inteso indicare non solo l'utilità e la capacità di risolvere problemi in modo consono e efficiente, ma anche la praticabilità di realizzazione. Tuttavia, benché le soluzioni proposte siano state pensate avendo a mente i problemi della realizzazione, essi non possono essere solo ipotizzati.

La grande questione aperta per le strutture mobili a pannelli, come quelle proposte nell'ultima parte del testo, è la necessità di confrontarsi con la realizzazione concreta e con tutte le fasi di ingegnerizzazione che la precedono.



**APPARATI.**



## A.1. BIBLIOGRAFIA.

Argomenti nei quali la bibliografia è suddivisa: Delimitazione dell'ambito di ricerca; Teorie sull'architettura cinetica e / o adattabile; Casi applicativi dell'architettura cinetica; Tendenze dell'architettura contemporanea; Strutture movimentabili, panoramica; Cinematica; Strutture per punti, tamponamenti morbidi; Strutture tensegrity pieghevoli; Strutture per punti, tamponamenti rigidi; Strutture per piani; Origami, panoramica; Origami, la pratica tradizionale; Origami, caratteristiche geometriche e formali, cinematica; Origami, metodi di progetto; Origami, tassellazioni; Origami, ingegnerizzazione.

.

### Delimitazione dell'ambito di ricerca.

- [ZE48] BRUNO ZEVI, *Saper Vedere l'Architettura*, Torino, IT, Einaudi, 1997, (1948), pp.22.
- [TH17] D'ARCY W. THOMPSON, *On Growth and Form*, Cambridge, University Press, 1917. (Trad. It. *Crescita e forma*, Torino, IT, Bollati-Boringhieri, 1992)
- [GA38] GALILEO GALILEI, *Discorsi e dimostrazioni matematiche intorno à due nuove scienze*, 1638.

### Teorie sull'architettura cinetica e / o adattabile.

- [NE70] NICHOLAS NEGROPONTE, *The Architecture Machine*, Cambridge, US-MA, MIT Press. 1970.
- [ZU70] WILLIAM ZUK, ROGER H. CLARK, *Kinetic Architecture*, New York, US-NY, Van Nostrand Reinhold, 1970, pp. 9-11.
- [NE75] NICHOLAS NEGROPONTE, *Soft Architecture Machines*, Cambridge, London, US-MA, UK, MIT Press. 1975.

- [AL77] CHRISTOPHER ALEXANDER, *Pattern Language. Towns, Buildings, Construction, Center for Environmental Structure Series*, Oxford, UK, Oxford University Press, 1977.
- [VI78] LARA VINCA MASINI, (a cura di), *Topologia e morfogenesi*, Venezia, La Biennale di Venezia, 1978.
- [MA91] ARMAND MATTELART, *Advertising International. The privatization of public space*, London: Routledge, 1991.
- [ME85] JOSHUA MEYROWITZ, *No Sense of Place. The impact of Electronic Media on Social Behaviour*, Oxford: Oxford University Press, 1985.
- [VI91] PAUL VIRILO, *Lost Dimension*. First published in French in 1984. New York: Semiotext(e), 1991.
- [ZU91] SHARON ZUKIN, *Landscapes of Power*. Berkeley: University of California Press, 1991.
- [LY93] GREG. LYNN, *Folding in architecture*, Londra, A.D. Architectural design profile, 1993 .
- [BR94] STEWART BRAND, *How buildings learn. What happens after they're built*, New York, US-NY, Viking. 1994.
- [JO95] WES JONES (A cura di), ANY, 'Mech in tecture. Reconsidering the mechanical in the electronic age' , n.10, 1995..
- [SC96] PATRIK SCHUMACHER, "The architectutre of Movement", in *Arch+*, n. 134/135, 1996.
- [WI98] BRIAN WINSTON, *Media Technology and Society. A History from the Telegraph to the Internet*. London, UK, Routledge, 1998.
- [DE99] MARK DERY, "The Persistence of Industrial Memory" in AMERIGO MARRAS (a cura di), *Eco-Tec. Architecture of the In-Between*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 1999.
- [LY99] GREG LYNN, *Animate form*, Princeton Architectural Press, 1999
- [LY99] GREG LYNN, *Animate Form*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 1999.
- [LA01] LANCE LAVINE, *Mechanics and meaning in architecture*, Minneapolis, US-MN. University of Minnesota Press, 2001.

- [FO02] MICHAEL FOX, *Beyond Kinetic*, Spon Press, London, UK. 2002, pg. 27.
- [PA02] STYLIANOS PAPATHANASSOPOULOS, *European Television in the Digital Age. Issues, Dynamics and Realities*. Cambridge: Polity Press, 2002.
- [WI02] MICHAEL WIGGINTON, JUDE HARRIS, *Intelligent skins*, Architectural Press, 2002, pp. 20.
- [HA03] FUMIO HARA, ROLF PFEIFER, *Morpho-functional machines . The new species. Designing embodies intelligence*, Tokyo - Berlin, Springer-Verlag, 2003.
- [AA06] AA., VV., *Responsive architectures, subtle technologies*, Toronto, CAN, Riverside Architectural Press, 2006.
- [ED06] JAN EDLER, TIM EDLER, "Message vs. Architecture? Dynamic Media as a Continuation of Architecture", in KAS OOSTERHUIS, LUKAS FEIREISS (a cura di), *Proceedings International Conference Game Set and Match II. On Computer Games, Advanced Geometries and Digital Technologies*, Delft, (2006), Rotterdam, Episode Publishers, 2006, pp. 181-189.
- [LE07] CHARLOTTE LELIEVELD, LIEK VOORBIJ, WIM POELMAN, "Adaptable Architecture", in YOSHINORI KITSUTAKA (a cura di), *Proceedings of Building Stock Activation, Tokyo, 2007, International Conference of 21st Century*, COE Program of Tokyo Metropolitan University, Tokyo, JP, 2007.
- [HE08] MICHAEL HENSEL, *Versatility and Vicissitude. Performance in Morpho-Ecological Design*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2008.
- [FO09] MICHAEL FOX, MILES KEMP, *Interactive Architecture*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 2009.
- [SA10] CHRIS SALTER, PETER SELLARS, *Entangled. Technology and the Transformation of Performance*, Cambridge, US-MA, MIT Press, 2010

### Casi applicativi dell'architettura cinetica.

- [MC62] JOHN MCHALE, *R. Buckminster Fuller*, New York, US-NY, 1962 (trad. it. E. BATTISTI, (a cura di) *R. Buckminster Fuller*, Milano, Il saggiatore, 1964.
- [IN71] INSTITUT FOR LEIGHTWEIGHT STRUCTURES, IL5 Convertible Roofs, University of Stuttgart, 1971.
- [AM78] ISABELLA AMIRANTE, ROSALBA LA CRETA, *Cupole per abitare*, Napoli, IT, Litografia AGEA, 1978.
- [SA79] FRANCISCO ALEMÁN SAINZ, "Emilio Pérez Piñero o las formas que vuelan", in *Revista Murgetana*, n 56, 1979.
- [FU86] FUTURE SYSTEMS PROJECT 124 "peanuts": *Kinetic living unit for two people*, 1986,. *Architectural Review*, Vol. 179, n.1067, p. 67.
- [NO90] JEAN NOUVEL, *Institut Du Monde Arabe*, Princeton Architectural Press, 1990.
- [HO92] CHUCK HOBERMAN. "The art and science of folding structures: New geometries of continuous multidimensional transformations." in *Sites* n.24, 1992. pp.31-53.
- [ED92] AMY C. EDMONDSON, *A Fuller Explanation, The Synergetic Geometry of R. Buckminster Fuller*. New York, US-NY, Van Nostrand Reinhold, 1992, pp. 288-289.
- [HO93] CHUCK HOBERMAN, "Unfolding architecture", in *Architectural design*, vol. 63, n.3-4, 1993, pp. 56-59.
- [OT95] FREI OTTO, BODO RASCH, *Finding Form. Towards an Architecture of the Minimal*, München, DE, Axel Menges. 1995.
- [TO93] ELENA TOMEI, "Una struttura espandibile. The Iris Dome", in *L' Arca* n.73, 1993, pp.54-57.
- [AA94] AA.. VV., *Jean Nouvel*. 1987-1994, *El Croquis*, n. 65/66, 1994.
- [NO95] GUY NORDENSON, "Chuck Hoberman, Mahadev Raman, Interview: Three Engineers (sitting around talking)", in WES JONES (A cura di), ANY, 'Mech in tecture. Reconsidering the mechanical in the electronic age', n.10, 1995, pp.50-55.

- [KR95] ROBERT KRONENBURG, *Houses in Motion*, Wiley-Academy, UK; Wiley-Academy, 1995 (2002).
- [TZ95] ALEXANDER TZONIS, DIANE LEFAIVRE, *Movement, Structure and the Work of Santiago Calatrava*, Basel, DE, Birkhauser Press, 1995.
- [ESC96] FELIX ESCRIG, "General Survey of Deployability" in *Architecture, Proceedings of the MARAS 96 International Conference on Rapidly Assembled Structures II*, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996.
- [RO96] T. ROBBIN, *Engineering a New Architecture*, Yale University Press, New Haven and London, 1996.
- [SE96] RINALDO SEMINO, *Sistemi autocostruibili per il progetto di strutture estensibili*, Genova, JoshuaLibri, 1996.
- [RI99] TERENCE RILEY, *The un-private house*, New York, NY-US, Museum of Modern Art, 1999, pp. 93-95.
- [ZE99] PETER ZELLNER, *Hybrid Space. New Forms in Digital*, London, UK, Thames & Hudson. 1999.
- [FA00] CARMINE C. FALASCA, *Architetture ad assetto variabile*, Alinea, Firenze, 2000.
- [KR00] ROBERT. KRONENBURG, *Portable architecture 2. ed.*, Oxford Architectural Press, Oxford, 2000.
- [CA00] ATTILIO CAROTTI, PAOLO BENETTI, *Ingegneria delle costruzioni smontabili e di emergenza e le grandi strutture orbitanti dell'ingegneria spaziale*, Bologna, Pitagora, 2000.
- [IS00] KAZUO ISHII , *Structural design of retractable roof structures*, WIT Press, 2000.
- [GE01] CHRISTOPH GENGNAGEL, RAINER BARTHEL, "Retractable roofs", in *Detail*, n. 5, 2001, pp. 841 – 846, Muenchen. 05/2001.
- [SC01] JESSIE SCANLON, "Suspended Animation", in *Wired*, n. 9, 2001
- [MO01] PER MOLLERUP, *Collapsibles. A design album of space-saving objects*, Londra, Thames & Hudson, 2001
- [DE02] CLAUDIO CLAUDI DE SAINT MIHIEL, (a cura di), *Strategie integrate per la progettazione e produzione di strutture temporanee per le emergenze insediative*, Napoli, Clean, 2002.

- [KR02] ROBERT KRONENBURG, *Houses in motion. The genesis, history and development of the portable building*, Chichester : Wiley-Academy, 2002
- [SI02] JENNIFER SIEGAL, *Mobile. The art of portable architecture*, New York, Princeton architectural press, 2002.
- [DSA03] CLAUDIO CLAUDI DE SAINT MIHIEL *Strategie integrate per la progettazione e produzione di strutture temporanee per le emergenze insediative*, Napoli, IT, CLEAN , 2003.
- [KR03] ROBERT KRONENBURG, J. LIM, W.Y. CHII, *Transportable environments 2*, Londra, Spon, 2003.
- [KR03] ROBERT KRONENBURG, *Portable architecture 3. ed.*, Oxford Architectural Press, Oxford, 2003.
- [KR03] ROBERT KRONENBURG, J. LIM, W.Y. CHII, *Transportable environments 2*, Londra, Spon, 2003.
- [KO03] BRANCO KOLAREVIC, *Architecture in the Digital Age*, Taylor & Francis, 2003.
- [MA03] A. MANFREDINI, G. MANFREDINI, *Progettazione architettonica e residenze temporanee integrate*, Firenze, Alinea, 2003.
- [ZA03] ALESSANDRA ZANELLI, *Trasportabile / Trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Milano, IT, Libreria Clup, 2003.
- [AL04] SERGIO ALTOMONTE, *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per una architettura sostenibile*, Firenze, Alinea, 2004.
- [GU04] B. GÜÇYETER, *A Comparative Examination of Structural Characteristics of Retractable Structures*, MSc Thesis, Dokuz Eylül University, Turkey, 2004.
- [KO04] KORAY KORKMAZ, *An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture*, Ph.D. Thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, TR, 2004..
- [KO04] KORAY KORMAZ, *An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture*, Ph.D. Thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, TR, 2004.

- [NE05] WINFRIED NERDINGER (a cura di) *Frei Otto. Complete Works*, Basel, DE, Birkhäuser Architecture, 2005.
- [KO05] BRANKO KOLAREVIC, ALI MALKAWI, *Performative Architecture. Beyond Instrumentality*, London, UK, Routledge, 2005, pp. 205.
- [ST05] TRISTAN D'ESTRÉE STERK, "Building Upon Negroponte: A Hybridized Model of Control for Responsive Architecture" in *Automation in Construction*, Vol.14, n. 2, 2005, pp. 225-232
- [FR06] KENNETH FRAMPTON, AURELIO GALLETI, *Invernizzi. Villa Girasole, the revolving house.*, Mendrisio, Accademia di Architettura di Mendrisio, 2006.
- [AA06] AA., VV., *Jean Prouvé. La poetica dell'oggetto tecnico*, Milano, IT, Skira, 2006.
- [ME06] RICARDO FRANCO MEDINA, *Estructuras adaptables*, Universidad Nacional de Colombia, Facultad de artes, Bogotá, Colombia, 2006.
- [SU06] A.B. SUMA, "3D Adaptable Building Skin: An Invention for Freedom in Shape of Façades", in *Adaptables2006*, TU/e, International Conference On Adaptable Building Structures, Eindhoven The Netherlands 03-05 July 2006"
- [KR07] ROBERT KRONENBURG, *Flexible. Architecture that responds to change*, London, UK, Laurence King Publishers, 2007.
- [BO07] H. BOGNER-BALZ, A. ZANELLI, *Tensinet Symposium 2007. Ephemeral architecture, time and textiles.*, Politecnico di Milano 16th-18th April 2007, Clup, Milano, 2007.
- [RA08] C. RANDL, *Revolving architecture. A history of buildings that rotate, swivel, and pivot*, New York, Princeton architectural press, 2008.
- [SI08] JENNIFER SIEGAL, *More mobile. Portable architecture for today*, New York, Princeton architectural press, 2008.
- [KR06] ROBERT KRONENBURG, *Transportable environments 3. Proceedings of the 3rd International Conference on Portable Architecture and Design*, April 28-30, 2004 Toronto, Taylor & Francis, 2006.
- [HO08] CHUCK HOBERMAN, CRAIG SCHWITTER, "Adaptive Structures. Building for Performance and Sustainability", in *DesignIntelligence*, n.4,

2008.

- [RA08] CHAD RANDL, *Revolving architecture. A history of buildings that rotate, swivel, and pivot*, New York, US-NY, Princeton Architectural Press, 2008.
- [VI08] MARÍA CLAUDIA VILLATE, *Estructuras no convencionales en arquitectura*, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia, 2008.
- [HA09] ARIEL HANAOR, "Some Structural Morphological Aspects of Deployable Structures for Space Enclosures", in RENÉ MOTRO, *An Anthology of Structural Morphology*, Singapore, SNG, World Scientific, 2009, pp. 83-100.
- [MU09] ANTONIO MUSACCHIO, *Architetture cinetiche. Apparatı meccanici ed elettronici nel progetto di architettura*, Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna, IT, 2009.
- [PE09] STEPHEN PERRELLA, *Hypersurface Architecture II*, in RONALD RAEL, ( a cura di) *Earth architecture*, New York, Princeton Architectural Press, 2009.
- [AS10] MAZIAR ASEFI, *Transformable and Kinetic Architectural Structures: Design, Evaluation and Application to Intelligent Architecture*, VDM Verlag Dr. Müller, 09 aprile 2010.

SITOGRAFIA.

[KI@] KINETIC ARCHITECTURE, <http://kineticarchitecture.net/>.

[FL@] FLICKR, < <http://www.flickr.com/>>

### **Tendenze dell'architettura contemporanea.**

- [MC64] MARSHALL MCLUHAN, *Understanding Media*, London: Routledge, 1964.
- [LE02] DAVID LEATHERBARROW, MOHSEN MOSTAFAVI; *Surface architecture*, Cambridge, London, The Mit Press, 2002

- [DO99] JOHN DOWNEY , JIM MCGUIGAN, (a cura di.), *Technocities*. London: Sage, 1999.
- [LU02] ELLEN LUPTON, *Skin. Surface substance + design*, New York, Princeton architectural press, 2002.
- [GA03] DEBORAH GANS, ZEHRA KUZ, *The organic approach to architecture*, Chichester, Wiley Academy, 2003.
- [LI03] YU-TUNG LIU, (a cura di.), *Developing Digital Architecture*. Basel: Birkhäuser, 1999.
- [BA04] YOSEPH BAR-COHEN , Electroactive polymer (EAP) actuators as artificial muscles. Reality, potential, and challenges, Bellingham WA, SPIE Press, 2004.
- [BR04] ALAN J BROOKES., Dominique Poole , *Innovation in architecture*, London - New York, Spon Press, 2004.
- [CL04] DEREK CLEMENTS-CROOME, *Intelligent buildings, Design, management and operation*, London, Thomas Telford, 2004.
- [KO05] BRANKO KOLAREVIC, *Architecture in the Digital Age*, Taylor & Francis, Abingdon, 2005.
- [CO06] ALESSANDRA COPPA, (a cura di), *Facciate a secco*, Milano, Motta, 2006.
- [AR06] ALI ARSHAD, CARLOS A. BREBBIA, *Digital architecture and construction*, WIT, 2006.
- [MO06] FARSHID MOUSSAVI, MICHAEL KUBO, *The function of ornament*, Barcelona, Actar, 2006.
- [WA07] ANDREW WATTS, *Scratching the surface. New London facades by London architects*, Wien, New York, Springer, 2007.
- [MA07] LIAT MARGOLIS, ALEXANDER ROBINSON, *Living systems. Innovative materials and technologies for landscape architecture*, New York, Springer, 2007.
- [MI07] MAMORU MITSUISHI, KANJI UEDA, FUMIHIKO KIMURA., *Manufacturing Systems and Technologies for the New Frontier*, Berlino, Springer, 2007, pp.159-162..

- [ON07] EUGENIO OÑATE, BERNARD KRÖPLIN , *Textile Composites and Inflatable Structures II*, New York, Springer, 2007.
- [PR08] VITTORIO PRINA, *Architettura e involucri complessi. Pelle, rivestimento, involucro, texture, tecnologia, leggerezza, metamorfosi, luce e spazi. Sistemi innovativi dal dettaglio alla complessità urbana e ambientale*, Santarcangelo di Romagna : Maggioli, 2008.
- [BI08] ANTONIO BICCHI, *The sense of touch and its rendering : progress in haptics research*, Berlin, DE, Springer, 2008.
- [GA09] KASPAR GASPARINI, *Design in superficie. Tecnologie dell'involucro architettonico mediatico*, Milano, IT, Angeli, 2009.
- [HA09] HANK HAEUSLER, *Media facades. History, technology, content*, Ludwigsburg, Avedition, 2009.
- [MA10] MAZIAR ASEFI, *Transformable and Kinetic Architectural Structures: Design, Evaluation and Application to Intelligent Architecture*, VDM Verlag Dr. Muller Aktiengesellschaft & Co. KG, 2010.
- [PE10] BEN PELL, "The Articulate Surface. Ornament and Technology" in *Contemporary Architecture*, Birkhäuser, Boston, 2010.

### **Strutture movimentabili, panoramica.**

- [CA93] SANTIAGO CALATRAVA, FELIX CANDELA, FELIX ESCRIG, EMILIO PÉREZ PINERO, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCE, *Arquitectura Transformable. Textos de arquitectura*, Siviglia, E, Publication de la Escuela Tecnica Superior de Arquitectura de Sevilla, 1993.
- [PA93] PARKE G. A. R., HOWARD C. M. (a cura di), *Space structures 4. International conference on space structures*, 1993, London, Thomas Telford, 1993.
- [ES96a] FELIX ESCRIG, CARLOS A. BREBBIA (a cura di), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II. Computational Mechanics Pub.*, Southampton, UK, 1996.
- [ES96b] FELIX ESCRIG, "General survey of deployability in architecture", in

CARLOS A. BREBBIA, FELIX ESCRIG (a cura di), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II, conference proceedings*, Seville, Wessex Institute of Technology, UK, University of Seville, E, 1996.

- [ES00] FELIX ESCRIG, CARLOS A. BREBBIA (a cura di), *Mobile and rapidly assembled structures III*. Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 2000.
- [GA01] CHARS J. GANTES, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, U.K. WIT Press, 2001.
- [PE01] SERGIO PELLEGRINO, *Deployable structures*, Berlino, DE, Springer, 2001.
- [PA02] GERARD A. R. PARKE, PETER DISNEY (a cura di), *Space structures 5. Proceedings of the fifth international conference on space structures*, Guilford, London, UK, Thomas Telford, 2002, pp. 139-151.
- [KO04] KORAY KORKMAZ, *An Analytical Study of the Design Potentials in Kinetic Architecture*, Ph.D. Thesis, Izmir Institute of Technology, Izmir, TR, 2004.
- [HA09] ARIEL HANAOR, "Some Structural Morphological Aspects of Deployable Structures for Space Enclosures", in RENÉ MOTRO, *An Anthology of Structural Morphology*, Singapore, SNG, World Scientific, 2009, pg 83-100.
- [MU09] ANTONIO MUSACCHIO, *Architetture cinetiche. Apparati meccanici ed elettronici nel progetto di architettura*, Maggioli editore, Santarcangelo di Romagna, IT, 2009.

### **Cinematica.**

- [GO42] MICHAEL GOLDBERG, "Polyhedral Linkages" in *National Mathematics Magazine* 16, n.7, 1942, pp. 323-332.
- [GO78] MICHAEL GOLDBERG, "Unstable Polyhedral Structures." In *Mathematics Magazine*, Vol 51, n. 3, 1978, pp. 165-170.

- [YO86] Wan S. Yoo, Edward J. HAUG, “*Dynamics of articulated structures, part I: theory*”, in *Journal of Structural Mechanics*, n. 14, 1986, pp. 105-126.
- [SH95] SHIGLEY, J. E., UICKER, JR., J. J.; *Theory of Machines and Mechanisms*, 2nd edition, McGraw-Hill, New York, NY-US, 1995.
- [GR96] GIUSEPPE GRIOLI, *Lezioni di Meccanica Razionale*, Padova. Cortina, 1996
- [MCC00] MICHAEL MCCARTHY, GIM SONG SOH, *Geometric design of linkages*, Springer, Heidelberg, 2000.
- [GA04] CARLO GALLETI, JADRAN LENARCIC, *On advances in robot kinematics*, Dordrecht, Kluwer, 2004. [DE07] DEMAINE, ERIK D, AND JOSEPH O'ROURKE. *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*. Cambridge, Cambridge University Press, 2007.
- [FU05] ETTORE FUNAIOLI, et al, *Meccanica applicata alle macchine*, vol. I , Bologna, Patron, 2005.

### **Strutture per punti, tamponamenti morbidi.**

- [ZE76] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures*, US Patent n. 3,968,808, 1976.
- [ZE77] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures*, US Patent n. 4,026,313, 1977.
- [SA79] FRANCISCO ALEMÁN SAINZ, “*Emilio Pérez Piñero o las formas que vuelan*”, in *Revista Murgetana*, n 56, 1979.
- [CA81] SANTIAGO CALATRAVA, *Zur Faltbarkeit Von Fachwerken*. Phd Thesis, Zurich, ETH Zurich, 1981.
- [PI61] EMILIO PEREZ PINERO, “*Project for a Mobile Theatre*, in *Architectural Design*, n.12, pp. 570, 1961.
- [ZE81] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures and panels and hub therefore*, US Patent n. 4,290,244, 1981.
- [PI62] EMILIO PEREZ PINERO, “*Expendable Space Framing*”, in *Progressive*

- Architecture*, n.12, 1962, pp. 154-155.
- [CL84] R. C. CLARKE, “*The kinematics of a novel deployable space truss structure system*”, in HOSHYAR NOOSHIN (a cura di) *Proceedings of the third International Conference on Space Structures*, Guildford, (1984), Elsevier, UK, 1984, pp 820-822.
- [ZE84] THEODORE ZEIGLER, *Collapsible self supporting structures and panels and hub therefore*, US Patent n. 4,437,275, 1984.
- [GA89] CHARLES J. GANTES, JEROME J. CONNOR, ROBERT D. LOGCHER, YECHIEL ROSENFELD, “*Structural Analysis and design of deployable structures*”, in *Computers & Structures*, Vol.32, n. 3-4, 1989, pp. 661-669.
- [HO90] CHARLES CHUCK HOBERMAN, *Reversibly Expandable Doubly-curved Truss Structures.*, US Patent 4,942,700, 1990.
- [HO91] CHARLES CHUCK HOBERMAN, *Radial Expansion Retraction Truss Structure*, US Patent 5,024,031, 1991.
- [VA91] JUAN B. PÉREZ VALCÁRCEL , FÉLIX ESCRIG PALLARÉS, EMILIO MARTÍN, “*Expandable space structures with self-folding textile cover*”, in P.S. BULSON (a cura di), *Rapidly Assembled Structures*, Southampton, UK, 1991, Southampton, UK, Boston, USA, Computational Mechanics Publications. 1991.
- [ES92] FELIX ESCRIG, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCEL, “*La obra arquitectónica de Emilio Pérez Piñero*”, in *Boletín Académico*. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña, Universidade da Coruña, E, n.16, 1992, pp. 3-12.
- [KR92] ANANDAVISAM KRISHNAPILAI, *Deployable Structures*, US Patent n. 5,167,100, 1992.
- [PE93] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, “*Foldable Ring Structures*”, in *Space Structures 4*, G. A. R. Parke, C. M. Howard, (a cura di), Thomas Telford, 783-792, 1993
- [CH95] JOHN CHILTON, BAN SENG CHOO, OLGA POPOVIC, “*Reciprocal Frame Retractable Roofs*”, in G.C. GIULIANI (a cura di), *Spatial Structures. Heritage, present and future*, Proceedings of the International Symposium, Milano, S. G. Editoriali, Padova, 1995, pp. 467-474.

- [RA98] IGOR RASKIN, *Stiffness and Stability of Deployable Pantographic Columns*, Ph.D. Thesis, University of Waterloo, Waterloo, CDN, 1998.
- [SA98] MASSEOD SAIDANI, OLIVIER BAVEREL, “*Investigation into a new type of multireciprocal grid*”, in *International Journal of Space Structures*, Vol. 13, n 4, 1998, pp. 215–218.
- [SA98] MASSEOD SAIDANI, OLIVIER BAVEREL, “*Retractable multi-reciprocal grid structure*”, in *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 39, n. 2, 1998, pp. 141–146.
- [BE96] E.P. BELDA, “*Constructive problems in the deployable structures of Emilio Perez Pinero*”, in CARLOS A. BREBBIA, FELIX ESCRIG, (a cura di), *Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, Computational Mechanics Pub, Southampton, UK, Boston, USA, 1996.
- [ES96] FELIX ESCRIG, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCE, JOSÉ SÁNCHÉ, “*Deployable Cover on a Swimming Pool in Seville*”, in *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 37, n. 1, 1996, pp. 39-70.
- [ES96b] FELIX ESCRIG, “*General Survey of Deployability in Architecture*”, in Proceedings of the MARAS 96 International Conference on Rapidly Assembled Structures II, Computational Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996
- [SA96] LUIS SANCHEZ-CUENCA, “*Geometric models for expandable structures*” In: F. ESCRIG, C.A. BREBBIA, *Editors, Mobile and Rapidly Assembled Structures II*, Computer Mechanics Publications, Southampton, UK, 1996, pp. 93.
- [PO96] OLGA POPOVIC, *Reciprocal frame structures*, PhD Thesis, University of Nottingham, UK, 1996,
- [ES97] FELIX ESCRIG, JOSÉ SÁNCHÉ, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCE, “*A new geometry for Cylindrical Deployable X-frames*”, in *International Colloquium. Structural morphology*, Nottingham. 1997.
- [KO97] TUTOMU KOKAWA, “*Cable scissors arch-marionettic structure. Structural morphology, towards the new millennium*”, in *Proceeding of international conference of IASS*, Venezia, IT, 1997,

pp. 107-114.

- [CH00] JOHN C. CHILTON, *Space grid structures*, Architectural Press, Oxford, UK, Butterwoth Heinemann, 2000, pp. 131-156.
- [BA00] OLIVIER BAVEREL, *Nexorades: A Family of Interwoven Space Structures*. Ph.D. thesis, University of Surrey, 2000.
- [CH00] JOHN C. CHILTON, *Space grid structures*, Architectural Press, Oxford, UK, Butterwoth Heinemann, 2000, pp. 131-156.
- [RO00] CAROLINA RODRIGUEZ, *Arquitectura Metamórfica*, ICFES, Colombian Institute for the Superior Education, Bogota, CO, 2000.
- [ES00] FELIX ESCRIG, CARLOS A. BREBBIA, "Transformable Architecture", in *Journal of the International Association for Shell and Spatial Structures*, Vol. 41, n. 1, 2000, pp. 3-22.
- [PE01] SERGIO PELLEGRINO, *Deployable structures*, Berlin, DE, Springer, 2001.
- [PI00] M. PIEKARSKI, "Constructional Solutions for Two-Way-Fold-Deployable. Space Trusses", in SERGIO PELLEGRINO, SIMON D. GUEST (a cura di), *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures. Theory and Applications*, Cambridge, UK, 1998, Springer, 2000, pp. 302-321
- [RO03] CAROLINA RODRIGUEZ, JOHN C. CHILTON, "Swivel Diaphragm. A New Alternative for Retractable Ring Structures", in *International Journal of Space Structures*, vol. 44, N. 143, 2003, pp. 181-188.
- [ZA03] ALESSANDRA ZANELLI, *Trasportabile trasformabile. Idee e tecniche per architetture in movimento*, Milano, IT, CLUP, 2003.
- [HO04] CHUCK HOBERMAN CHARLES, *Folding covering panels for expanding structures*, Patent US6,834,465 B2, NY-USA, 2004.
- [GA04] C.J. GANTES, E. KONITOPOULOU, "Geometric design of arbitrarily curved bi-deployable arches with discrete joints", in *International Journal of Solids and Structures*, Elsevier Ltd, Vol. 41, n. 20, 2004, pp. 5517-5540.
- [ES06b] FELIX ESCRIG, JOSÉ SÁNCHEZ, "New designs and geometries of deployable scissor structures", in *Adaptables 2006, TU/e*,

*International Conference On Adaptable Building Structures*, Eindhoven, NL, 2006.

- [VO06] WALTER VORTRAG VON MATTHIAS, *Convertible Roofs*, Technische Universität München. Course document, Munich, DE, 2006.
- [BO07] HEIDRUN BOGNER-BALZ, ALESSANDRA ZANELLI (a cura di), *Tensinet Symposium 2007. Ephemeral architecture, time and textiles*, Politecnico di Milano 16th-18th April 2007, Clup, Milano, IT, 2007.
- [AK07] YENAL AKGÜNA, WALTER HAASE, WERNER SOBEK, "Proposal for a new scissor-hinge structure to create transformable and adaptive roofs", in *Proceeding of international association of spatial structures symposium*, Venezia, IT, 2007.
- [ZH09] JING-SHAN ZHAO FULEI CHU, ZHI-JING FENG, "The mechanism theory and application of deployable structures based on SLE", in *Mechanism and Machine Theory*, n.44, 2009, pp. 324–335.
- [AK10] YENAL AKGÜNA, CHARIS J. GANTES, KONSTANTINOS E. KALOCHAIRETIS, GÖKHAN KIPER, "A novel concept of convertible roofs with high transformability consisting of planar scissor-hinge structures", in *Engineering Structures*, n. 32, 2010, pp. 2873-2883.

### **Strutture tensegrity pieghevoli.**

- [BU62] RICHARD BUCKMINSTER FULLER, *Tensile-integrity structures*, U.S. Patent n° 3.063.521, 1962.
- [PU76] ANTHONY PUGH, *An introduction to tensegrity*. University of California Press, Berkeley, US- CA, 1976.
- [CA78] Chris R. Calladine, "Buckminster Fuller's 'tensegrity' structures and Clerk Maxwell's rules for the construction of stiff frames", in *International Journal of Solids Structures*, n. 14, 1978, pp.161–172.
- [HA93] ARIEL HANAOR, "Double-layer tensegrity grids as deployable structures", in *International Journal of Space Structures*, Vol. 8, n. 1&2, 1993, pp.135–143.

- [LE99] CÉDRIC LE SAUX, MOURAD BOUDERBALA, CEVAER FRANCK, RENÉ MOTRO, “*Strut-Strut contact on numerical modelling of tensegrity systems folding*”, in *40th Anniversary Congress of IASS. Shell and spatial structures from recent past to the next millennium*, Madrid E, 1999, pp.1-10.
- [MO01] RENÉ MOTRO, “*Foldable tensegrities*”, in SERGIO PELLEGRINO (a cura di), *Deployable structures*, Berlin, DE, Springer, 2001, pp. 199-238.
- [TI02] GUNNAR TIBERT, *Deployable Tensegrity Structures for Space Applications*, Royal Institute of Technology, Ph.D. Thesis, Stockholm, DE, 2002.
- [TI03] GUNNAR TIBERT, SERGIO PELLEGRINO, “*Deployable Tensegrity Masts*”, in *44th AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference and Exhibit*, Norfolk, USA, 2003.
- [SU03] CORNEL SULTAN, ROBERT SKELTON, “*Deployment of tensegrity structures*”, in *International Journal of Solids and Structures*, Vol. 40, 2003, pp. 4637–4657.
- [ST03] IAN STERN, *Deployable Reflector Antenna*, U.S. Patent n 6,542,132 B2 , 2003.
- [DE03] TRISTAN D'ESTRÉE STERK, “*Using actuated tensegrity structures to produce a responsive architecture*”, in *ACADIA22 conference*, 2003, Ball State University, Muncie, US-ID, Kevin R. Klingner, 2003.
- [MO03] RENÉ MOTRO, *Tensegrity. Structural systems for the future*, Hermes Science Publishing, UK. 2003, pp. 147-187
- [EL04a] ALI EL SMAILI, *Pliage/dépliage de systèmes de Tenségrité*, Laboratoire de Mécanique et Génie Civil, didactic document, Université Montpellier II, 2004.
- [EL04b] Ali EL SMAILI , RENÉ MOTRO, VINICIUS RADUCANU, “*New concepts for deployable tensegrity systems*”, in *IASS Symposium: Shell and Spatial Structures from models to realization*, 20-24 Settembre 2004, Montpellier, FR, 2004.
- [EL05] ALI EL SMAILI, RENÉ MOTRO, “*Folding/unfolding of tensegrity systems by removal of self-stress*”, in *Proceedings the International*

*symposium on shell and spatial structures: theory, technique, valuation, maintenance, Bucharest, IASS, 2005,*

- [CH07] ZHIHUA CHEN, MAMORU KAWAGUCHI, *Tensegrity System by Pantadome and Its Units*
- [SK09] ROBERT E. SKELTON, MAURICIO C. DE OLIVEIRA *Tensegrity systems*, Heidelberg, DE, Springer, 2009. pp. 135-143

SITOGRAFIA:

- [SH@] SHELTER SYSTEMS, San Mateo, US-CA, (< <http://www.shelter-systems.com/>>)

### **Strutture per punti, tamponamenti rigidi.**

- [SA79] FRANCISCO ALEMÁN SAINZ, "Emilio Pérez Piñero o las formas que vuelan", in *Revista Murgetana*, n 56, 1979.
- [ES92] FELIX ESCRIG, JUAN B. PÉREZ VALCÁRCEL, "*La obra arquitectónica de Emilio Pérez Piñero*", in *Boletín Académico. Escola Técnica Superior de Arquitectura da Coruña*, Universidade da Coruña, E, n.16, 1992, pp. 3-12.
- [PE93] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, "*Foldable Ring Structures*", in *Space Structures 4*, G. A. R. PARKE, C. M. HOWARD, (a cura di), Thomas Telford, 783-792, 1993
- [VA93] JUAN B. PÉREZ VALCÁRCEL, FÉLIX ESCRIG PALLARÉS, EMILIO MARTÍN GUTIERREZ, *Expandable domes with incorporated roofing elements*, in PARKE G. A. R., HOWARD C. M. (a cura di), *Space structures 4. International conference on space structures*, 1993, London, Thomas Telford, 1993, pp. 803-814.
- [PE97] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, "Foldable bar structures", in *International Journal of Solids and Structures*, n. 34, 1997, pp. 1825-1847.
- [CH00] JOHN C. CHILTON, *Space grid structures*, Architectural Press, Oxford, UK, Butterworth Heinemann, 2000, pp. 131-156.

- [AB02] MASARU ABE, MAMORU KAWAGUCHI, "On Some Characteristics of Pantadome System", in *Lightweight Structures in Civil Engineering*, Proceedings of the International Symposium, Warsaw, Micro Publisher Jan B. Obrebski, 2002, pp. 50-57.
- [LU07] YAOZHI LUOA, DECAN MAOA, ZHONG YOU, "On a type of radially retractable plate structures", in *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, n. 10, 2007, pp. 3452-3467.
- [KA08] MAMORU KAWAGUCHI, "The design of structures, from hard to soft", in GUY NORDENSON, FÉLIX CANDELA, *Seven structural engineers: the Felix Candela lectures*, The Museum of Modern Art, New York, US-NY, 2008, pp. 103-111.
- [HO09] CHARLES CHUK HOBERMAN, MATTHEW DAVIS, *Strata*, US Patent 7,559,174, 14-Jul.-2009.
- [HO09] CHARLES CHUK HOBERMAN, MATTHEW DAVIS, *Permea*, US Patent 7,584,777, 08- Sept.-2009.

## SITOGRAFIA.

- [HO@] ADAPTIVE BUILDING INITIATIVE – ABI, New York,US- NY, <<http://www.adaptivebuildings.com/>>,

**Strutture per piani.**

- [PE93] SERGIO PELLEGRINO, ZHONG YOU, "*Foldable Ring Structures*", in *Space Structures 4*, G. A. R. PARKE, C. M. HOWARD, (a cura di), Thomas Telford, 1993, pp. 783-792
- [KA00] KAZUO ISHII, *Structural design of retractable roof structures*, Southampton, UK, WIT Press, 2000.
- [PI00] M. PIEKARSKI, "*Constructional Solutions for Two-Way-Fold-Deployable. Space Trusses*", in SERGIO PELLEGRINO, SIMON D. GUEST (a cura di), *IUTAM-IASS Symposium on Deployable*

*Structures. Theory and Applications*, Cambridge, UK, 1998, Springer, 2000, pp. 302-321.

- [ZH00] ZHONG YOU, *A New approach to Design of Retractable Roofs*, in SERGIO PELLEGRINO, SIMON D. GUEST (a cura di), *IUTAM-IASS Symposium on Deployable Structures. Theory and Applications*, Kluwer Academic Publishers, Dordrecht, DE, 2000, pp 477-483.
- [MA02] IVAN MARGOLIUS, *Architects + Engineers = Structures*, New York, NY-US, Wiley Academy, 2002, pp. 83-84.
- [BR06] BLAINE ERICKSON BROWNELL, *Transmaterial. A catalog of materials that redefine our physical environment*, Vol. 1, New York, NY-US, Princeton Architectural Press, 2006, pg. 50.
- [YA07] YAOZHI LUOA, DECAN MAOA, ZHONG YOU, "On a type of radially retractable plate structures", in *International Journal of Solids and Structures*, vol. 44, n. 10, 2007, pp. 3452-3467.
- [KH07] KHAC KIEV VU, *Deployable tension structures. Concept, structural behavior and implementation*, Ph.D Thesis, University of Singapore, Singapore, JP, 2007.
- [OD07] KATHLEEM O'DONNELL, "Starlight Theatre", in *Ottagono*, n. 205, 2007, pp.177-181.
- [KI08] CHRISTINE KILLORY, RENÉ DAVIDS, *Detail in process*, Princeton Architectural Press, New York, US-NY, 2008, pp..50-60.
- [GU10] GUOWU WEI, JIAN S. DAI, "Overconstrained Mechanisms with Radially Reciprocating Motion", in JADRAN LENARCIC (a cura di), *Advances in Robot Kinematics, Motion in Man and Machine*, Springer, Heidelberg, DE, 2010, pp. 293 – 301.

#### SITOGRAFIA.

[GA@] STUDIO GANG ARCHITECTS, Chicago, US-IL,

< <http://www.studiogang.net/> >

[HY@] HYPOSURFACE CORP., <<http://hyposurface.org/>>

**Origami, panoramica.**

- [HU89] HUMIAKI HUZITA (a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, Ferrara, (1989), Comune di Ferrara / Centro Origami Duffusion, Ferrara, IT, 1989.
- [MI94] KORYO MIURA (a cura di), *Proceedings of the 2nd International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, Seian University, Ōtsu, (1994), Seian University of Art and Design, Otsu, JP, 1997.
- [HU02] THOMAS HULL. (a cura di), *Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education*, Monterey, Asilomar, (2001), Natick, MA, A K Peters / CRC Press, 2002.
- [DE07] ERIK D. DEMAINE, JOSEPH O'ROURKE, *Geometric folding algorithms. Linkages, origami, polyhedra*, Cambridge University Press, 2007, pp. 240-253.
- [LA09] ROBERT J. LANG (a cura di), *Origami 4. Proceedings of the 4th International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education*, California Institute of Technology, Pasadena, (2006), Natick, MA, AK Peters, 2009.
- [OS11] 5OSME PLUS!, *Proceedings of 5OSME, 5th international conference on Origami in Science, Mathematics and Education*, (2010), Singapore, SNG, (in corso di pubblicazione).

**Origami, la pratica tradizionale.**

- [LA97] ROBERT J., LANG, *Origami in Action. Paper Toys That Fly, Flap, Gobble and Inflate*, S. T.Martin Giffit, US-NY, 1997
- [KA85] KUNIHICO KASAHARA, *Origami for the Connoisseur*, Saurio Ko, Tokio, JP, 1985.

SITOGRAFIA.

- [PA@] CHRIS K. PALMER, <<http://www.shadowfolds.com/>>

### Origami, caratteristiche geometriche e formali, cinematica.

- [DU82] J.P. DUNCAN, J.L. DUNCAN, “*Folded developables*”, in *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 383, 1982, pp. 191-205.
- [KA87] KUNIHICO KASAHARA, TOSHIE TAKAHAMA. *Origami for the Connoisseur*. Japan Publications Inc., 1987.
- [KA89] TOSHIKAZU KAWASAKI, “*On the relation between mountain-creases and valley-creases of a flat origami*”, in HUMIAKI HUZITA, ( a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, Ferrara, IT, 1989, pp. 229-237.
- [HU89] HUMIAKI HUZITA, BENEDETTO SCIMEMI. “*The algebra of paper folding (origami)*” in HUMIAKI HUZITA ( a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, Ferrara, IT, 1989, pp. 215–222
- [JU89a] JACQUES JUSTIN. “*Aspects mathématiques du pliage de papier (Mathematical aspects of paper folding)*”, in HUMIAKI HUZITA ( a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, Ferrara, IT, 1989, pp. 263–277.
- [JU89b] JACQUES JUSTIN. “*Resolution par le pliage de l’équation du troisième degré et applications géométriques*”, in HUMIAKI HUZITA ( a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, Ferrara, IT, 1989, pp. 251–261.
- [JU94] JACQUES JUSTIN. “*Towards a mathematical theory of origami*”, in KORIO MIURA (a cura di) *Proceedings of the 2nd International Meeting Origami Scientific*, Otsu, JP, 1994, Scientific Origami, 1994, pp. 15–29.
- [JU86] JACQUES JUSTIN. “*Mathematics of origami*”, in *British Origami* , June 1986, pp 28-30.
- [MI89] KORYO MIURA, “*A note on intrinsic geometry of origami*”, in HUMIAKI HUZITA ( a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, Ferrara, IT, 1989, pp. 239-249.
- [DE97] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE. *Computing extreme origami bases*. Technical Report CS- 97-22, Department of Computer

Science, University of Waterloo, Waterloo, Ontario, Canada, 1997.

- [DE01] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, “Recent Results in Computational Origami”, in *Origami3: Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education* (OSME 2001), Monterey, California, March 9–11, 2001, Natick, MA, AK Peters, 2001, pp.3–16.
- [DE01] ERIK D. DEMAINE, JOSEPH S. B. MITCHELL, *Reaching folded states of a rectangular piece of paper*, Manuscript, May 2001.
- [BE02a] SARAH-MARIE BELCASTRO, THOMAS C. HULL, “A mathematical model for non-flat origami “ in *Origami3: Proc. 3rd Int. Meeting Origami Sci., Math, Educ.* Wellesley, US-MA, 2001, A K Peters, 2002, pp. 39–51,
- [BE02b] SARAH-MARIE BELCASTRO, THOMAS C. HULL, “Modelling the folding of paper into three dimensions using affine transformations” in *Linear Algebra and its Applications*, vol. 348, n.1, 2002, pp. 273-282.
- [HU06] THOMAS HULL, *Project Origami: Activities for Exploring Mathematics*. A K Peters, Wellesley, US-MA, 2006.
- [DE07] ERIK D. DEMAINE, JOSEPH O'ROURKE, *Geometric Folding Algorithms: Linkages, Origami, Polyhedra*, Cambridge University Press, July 2007.
- [WA09] NAOHIKO WATANABE, KEN-ICHI KAWAGUCHI, “The method for Judging rigid foldability”, in ROBERT J. LANG ( a cura di), *Origami4*, A K Peters, Wellesley, US-MA, 2009 .

#### SITOGRAFIA.

- [HU10] THOMAS C. HULL, “Maekawa and Kawasaki Revisited and Extended” lettura al Massachusetts Institute of Technology, 2010 (disponibile on-line, <[http://courses.csail.mit.edu/6.849/fall10/lectures/L20\\_images.pdf](http://courses.csail.mit.edu/6.849/fall10/lectures/L20_images.pdf)>).
- [OR@] Orugami – USA, <http://www.origami-usa.org/>

### Origami, metodi di progetto.

- [ME92] TOSHIYUKI MEGURO, “*Jitsuyou oorigami sekkeihou*” (Practical methods of origami designs), in *Origami Tanteidan Shimbun*, n. 7-14, 1991-1992.
- [MA94] JUN MAEKAWA, “*Evolution of origami organisms*”, in *Symmetry, culture and science*, Vol.5, n.2, 1994, pp. 167-177.
- [KA95] HUMIAKI KAWAHATA, *Fantasy origami*, Tokyo, Gallery Origami House, 1995, pp. 174-179.
- [AI95] OSWIN AICHHOLZER, FRANZ AURENHAMMER, DAVID ALBERTS, BERND GÄRTNER, “*A novel type of skeleton for polygons*”, in *Journal of Universal Computer Science*, Vol.1, n.12, 1995, pp. 752–761.
- [AI96] OSWIN AICHHOLZER, FRANZ AURENHAMMER, “*Straight skeletons for general polygonal figures in the plane*”, in *Proceedings of the 2nd Annual. International Conference Computing and Combinatorics - COCOON '96, Lecture Notes in Computer Science*, n. 1090, Springer-Verlag, 1996, pp. 117–126.
- [KA97] HUMIAKI KAWAHATA, “*The technique to fold free flaps of formative art origami* “ in KORYO MIURA (a cura di), *Origami science and art. Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, Otsu,1994, Seian University of Art and Design, JP, 1997, pp. 63-71.
- [LA97] ROBERT J. LANG, “*A Computational Algorithm for Origami Design*”, in KORYO MIURA (a cura di), *Origami science and art. Proceeding of the 2<sup>nd</sup> International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, Otsu, 1994, Seian University of Art and Design, JP,1997, pp. 98-105.
- [LA97] ROBERT J. LANG, “*A Computational Algorithm for Origami Design*”, in KORYO MIURA (a cura di), *Proceedings of the Second International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, Otsu,1994, Seian University of Art and Design, JP,1997, pp. 98-105.
- [DE98] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, ANNA LUBIW. “*Folding and cutting paper*”, in J. AKIYAMA, M. KANO, M. URABE (a cura d), *Lecture Notes in Computer Science*, Vol. 1763, Proceedings of the Japan

- Conference on Discrete and Computational Geometry, Tokyo, JP, 1998, pp. 104-117.
- [LU98] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, ANNA LUBIW. “*Folding and one straight cut suffice*”, in *Technical Report CS-98-18*, University of Waterloo, Waterloo, CDN, 1998.
- [DE99] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, ANNA LUBIW, “*Folding and one straight cut suffice*”, in *Proceedings of the 10th Annual ACM-SIAM Symposium on Discrete Algorithms*, Baltimore, US-MD, 1999, pp. 891-892
- [BE99] MARSHALL BERN, ERIK DEMAINE, DAVID EPPSTEIN, BARRY HAYES, “*A Disk-Packing Algorithm for an Origami Magic Trick*”, in ELENA LODI, LINDA PAGLI, NICOLA SANTORO (a cura di), *Fun with Algorithms*, Carleton Scientific, 1999, pp. 32-42,
- [EP99] DAVID EPPSTEIN, “*Raising roofs, crashing cycles, and playing pool*” in *Discrete & Computational Geometry, Proceedings of the 14th Annual ACM Symposium on Computational Geometry*, 1998, Vol. 22, n. 4, 1999, pp. 569-592.
- [BE01] MARSHALL BERN, ERIK DEMAINE, DAVID EPPSTEIN, BARRY HAYES, “*A Disk-Packing Algorithm for an Origami Magic Trick*,” in *Origami3: Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education – OSME*, Monterey, 2001, Natick, US-MA, A K Peters, 2001, pp. 17–28.
- [DE04] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, “*Fold-and-Cut Magic*”, in BARRY CIPRA E ALT. (a cura di). *Tribute to a Mathematician*, Natick, US-MA, A K Peters, 2004, pp. 23–30.
- [LA03] ROBERT J., LANG, *Origami Design Secrets*, Natick, US-MA, A K Peters, 2003.
- [LA03] ROBERT J. LANG, *Origami design secrets. Mathematical methods for an ancient art*, Natick, US-MA, A K Peters Ltd., 2003.
- [DE05] ERIK D. DEMAINE, JOSEPH O'ROURKE, “*A survey of folding and unfolding in computational geometry*”, in *Combinatorial and Computational Geometry*, MSRI Publications, Vol. 52, 2005, pp.186-188.

- [DE06] ERIK D. DEMAINE, ROBERT J. LANG, “*Facet Ordering and Crease Assignment in Uniaxial Bases*”, in ROBERT J. LANG ( a cura di) *Origami 4, Proceedings of the Fourth International Meeting of Origami Science, Mathematics, and Education*, Natick, US-MA, A K Peters Ltd., 2006, pp. 189-207.
- [DE07] ERIK D. DEMAINE, JOSEPH O'ROURKE, *Geometric folding algorithms. Linkages, origami, polyhedra*, Cambridge University Press, 2007, pp. 244-246.

## SITOGRAFIA.

- [DE@] ERIK D. DEMAINE, < <http://erikdemaine.org/> >

**Origami, tassellazioni.**

- [GR87] BRANKO GRÜNBAUM, GEOFFREY C. SHEPHARD, *Tilings and Patterns*, New York, W.H.Freeman & Co Ltd, 1987.
- [PA94] CHRIS K. PALMER, “*Extruding and tessellating polygons from a plane*”, in KORYO MIURA, (a cura di) *Proceedings of the 2nd International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, , Otsu, Japan, November-December 1994, pp. 323-331.
- [DE01] ERIK D. DEMAINE, MARTIN L. DEMAINE, “*Recent Results in Computational Origami*”, in *Origami<sup>3</sup>: Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education (OSME 2001)*, Monterey, California, March 9–11, 2001, Natick, MA, AK Peters, 2001, pp. 3–16.
- [KA88] TOSHIKAZU KAWASAKI, MASAOKI YOSHIDA, “*A Crystallographic flat origami*”, *Memoirs of the Faculty of Science*, Kyushu University. Series A, Mathematics, Vol. 42, n. 2, Fukuoka, JP, 1988, pp. 153-157
- [BA01] ALEX BATEMAN. “*Computational tools for origami tessellations*”, in

*Proceedings of the 3rd International Meeting of Origami Science, Math, and Education*, Monterey, California, March 2001

- [KA89] TOSHIKAZU KAWASAKI, MASAOKI YOSHIDA, Crystallographic flat origamis, in Humiaki Huzita, (a cura di), *Proceedings of the 1st International Meeting of Origami Science and Technology*, pp. 223 - 227, Ferrara, IT, 1989.
- [VE98] HELENA VERRILL, "Origami tessellations", in R. SARHANGI (a cura di), *Conference proceedings of bridges. Mathematical Connections in Art, Music, and Science*, 1998, pp. 55 -68.
- [GR87] BRANKO GRÄUNBAUM, G. C. SHEPHARD, *Tilings and patterns*. W. H. Freeman, 1987
- [TA94] PAULO TABORDA BARRETO, "Lines meeting on a surface. The Mars paperfolding" in KORYO MIURA, (a cura di), *Proceedings of the 2nd International Meeting of Origami Science and Scientific Origami*, Otsu, JP, 1994, pp. 323 – 331.
- [GI04] KEN GIESECKE, *Deployable structures inspired by the origami art* M.Arch. Thesis, Massachusetts Institute of Technology, Dept. of Architecture, 2004.
- [MA02] JUN MAEKAWA, "The Definition of Iso-Area Folding", in THOMAS C. HULL (a cura di) *Origami3 . Proceedings of the 3rd International Meeting of origami mathematics, science, and education*, A.K. Peters, Ltd., 2002, pp. 53-60
- [MI89] KORYO MIURA, *A note on intrinsic geometry of origami*, *Proceedings of the First International Meeting of Origami Science and Technology*, H. Huzita ed., 1989, pp. 239-249.
- [MI94] KORYO MIURA, *Folds - the basis of origami*, *Symmetry: Culture and Science*, Vol. 5, n.1, 1994, pp. 13-22.
- [MI97] KORYO MIURA, *Fold - its physical and mathematical principles*, *Origami Science and Art*, K. Miura ed., Otsu, Japan, 1997, pp. 41-50.
- [DU82] J.P. DUNCAN, J.L. DUNCAN, *Folded developables*, *Proceedings of the Royal Society of London, Series A*, Vol. 383, 1982, pp. 191-205.
- [VE98] HELENA VERRILL, "Origami tessellations". In R. Sarhangi, editor,

*Conference Proceedings of Bridges: Mathematical Connections in Art, Music, and Science*, 1998, pp. 55-68.

SITOGRAFIA.

- [PE00] JESÚS DE LA PEÑA HERNÁNDEZ, *Matemáticas y Papiroflexia. Asociación Española de Papiroflexia*, Madrid, 2000; vers. consultata *Matemática e origami, disponibile on – line:*  
<<http://www.telefonica.net/web2/caprichos-ingenieros/pdf/pdfmaths.pdf> > )

**Origami, ingegnerizzazione.**

- [SC00] TYGE SCHIOLER, SERGIO PELLEGRINO, *A bistable structural element*”, in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part C, Journal of Mechanical Engineering Science*, vol. 222, n. 11, 2008, pp. 2045-2051.
- [GA01] CHARS J. GANTES, *Deployable Structures: Analysis and Design*, Southampton, U.K. WIT Press, 2001.
- [PE01] SERGIO PELLEGRINO, *Deployable structures*, Berlino, DE, Springer, 2001.
- [BA04] DEVIN BALKCOM, *Robotic Origami Folding*, Ph. D. Thesis, The Robotics Institute, Carnegie Mellon University, Pittsburgh, Pennsylvania, 2004.
- [AR05a] WILL ARORA, ERIK D. DEMAINE, GEORGE BARBASTATHIS, PAUL STELLMAN, SATOSHI TAKAHASHI, “Kinematics and Dynamics of Nanostructured Origami” in *Proceedings of the ASME International Mechanical Engineering Congress and Exposition*, Orlando, Florida, November 5–11, 2005, pp. 541–548.
- [AR05b] WILL ARORA, ERIK D. DEMAINE, GEORGE BARBASTATHIS, PAUL STELLMAN, SATOSHI TAKAHASHI, “Design and Control of Nanostructured

Origami “ in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Nanomanufacturing*, Orlando, Florida, November 3–5, 2005, pp.4.

- [KR06] ANANDASIVAM KRISHNAPILLAI, LIEW J. Y. RICHARD, KHAC KIEN VU, “*Deployable tension-strut structures: from concept to implementation*”, in *Journal of Constructional Steel Research*, Vol. 62, n. 3, 2006, pp. 195-209.
- [VU07] KHAC KIEN VU, *Deployable tension-strut structures. Concept, structural behavior and implementation*, Ph.D: Thesis, National University of Singapore, 2007.
- [BU09] HANI BURI, YVES WEINAND , “Gefaltet” In: *TEC21*, num. 8, 2009, pp. 18-22
- [MI09] ANKON MITRA, *The grammar of developable double corrugations (for formal architectural applications)*. Masters thesis, UCL, University College London, 2009
- [BU10] HANI BURI, YVES WEINAND, “*Origami aus Brettsper Holz. Origami in legno lamellare*”, in *Detail*, n.10, 2010, pp. 1066-1068.
- [BU10] HANI BURI, *Origami - Folded Plate Structures, Ph. D Thesis, Laboratory for timber constructions*, IBOIS, - Ecole Polytechnique Fédérale Lausanne, EPFL, Lausanne, Switzerland, 2010.