



POLITECNICO DI TORINO

DIPARTIMENTO DI ARCHITETTURA E DESIGN

CORSO DI LAUREA IN ARCHITETTURA PER IL PROGETTO SOSTENIBILE

TESI DI LAUREA MAGISTRALE:

THINK PARAMETRIC, BUILD ORIGAMI

PENSARE PARAMETRICO, COSTRUIRE ORIGAMI

Candidato:

Andrea Tomalini

Relatore:

Prof. Massimiliano Lo Turco

Correlatori:

Prof. Roberto Giordano

Prof. Michele Calvano

Luglio 2019

ABSTRACT

Durante il percorso di studi è stato maturato l'interesse per i nuovi strumenti di rappresentazione digitale e per le ricadute che questi portano a livello progettuale.

L'obiettivo primario della ricerca è l'approfondimento delle modalità in cui approcci di tipo BIM supportati da applicativi parametrici utilizzati in modo complementare possano concorrere alla realizzazione di forme sempre più complesse, da cui derivano dettagli tecnologici ottimizzati in base a specifiche esigenze, sempre più in uso nell'architettura contemporanea. In particolare, assecondando il desiderio di evoluzione proprio di ogni creatura vivente, sono state studiate le superfici adattive, sistemi che si evolvono mutando la forma generale attraverso la modifica dei singoli elementi che li compongono per rispondere a determinati impulsi-richieste.

Il Palazzo del Lavoro, caso studio preso in considerazione, ha permesso la sperimentazione in prima persona di questi nuovi strumenti.

L'edificio si inserisce e si integra in modo "monumentale" nel contesto in cui è collocato con una carica innovativa, in questo momento inutilizzata, in quanto privo di funzione. Non ci si deve sorprendere, come aveva già denunciato l'architetto Zevi, non si può progettare il "contenitore" trascurandone il "contenuto".

La tesi si concentra, attraverso un percorso interdisciplinare, sull'individuazione di particolari elementi responsivi che, ispirati dai cinematismi degli origami, possano adattarsi al variare delle esigenze e degli input ricevuti. La modellazione ricostruttiva dell'esistente, operata attraverso strumenti BIM, si è basata su un'accurata ricerca di dati di archivio. Gli strumenti parametrici, cuore della ricerca, hanno supportato in particolare la fase di studio dei cinematismi che caratterizzano questi elementi responsivi. È stata dedicata particolare attenzione all'analisi critica dei possibili pattern adottabili, individuando quelli che più si potessero adattare alla scala architettonica, concentrandosi su quelle particolari soluzioni appartenenti alla classe dei rigid-foldable. Questo tipo di pattern è caratterizzato da cinematismi che permettono la sostituzione delle facce con pannelli rigidi e delle

pieghe con cerniere.

A seguito dell'indagine effettuata sui pattern, con particolare attenzione agli aspetti geometrico-costruttivi si è proseguito con lo sviluppo tecnologico di uno di essi, approfondendo nel dettaglio le specifiche meccaniche che ne regolano i cinematismi. La scelta è ricaduta sul pattern denominato Ron Resh in quanto, proprio grazie alla sua peculiarità di essere un origami rigid-foldable, ha la necessità di piegarsi al di fuori del piano su cui giace in partenza, potendo giungere a diverse forme con estrema facilità.

Una volta terminato lo studio teorico di questi cinematismi, reso ancor più esplicito dal proficuo connubio tra gli strumenti della geometria descrittiva e le recenti procedure di tipo algoritmico, si è lavorato sulla sperimentazione di nuovi dettagli tecnologici su modelli fisici in scala, per analizzare la fattibilità della soluzione proposta. Anche in questa fase gli strumenti digitali hanno accompagnato lo studio di modelli di spessore non trascurabili, simulando il comportamento dinamico dei materiali e la loro spazializzazione, prevedendo e correggendo gli errori emersi durante la loro realizzazione.

Il lavoro di tesi si è concluso con l'approfondimento delle fasi che caratterizzerebbero la produzione fuori opera e la produzione in opera di un modulo origami Ron Resh a scala architettonica. Il percorso di ricerca condotto ha dimostrato che i più moderni processi parametrici, se ben governati, possono costituire un indispensabile supporto per la gestione della complessità in un processo progettuale.

INDICE

ABSTRACT	3
<i>I FASE: definizione del quadro interpretativo</i>	11
APPROCCIO METODOLOGIA BIM	
Definizione e campi di utilizzo	13
Le differenze tra CAD e BIM	18
Le dimensioni del BIM	22
Interoperabilità	24
Lo stato dell'arte	26
ALTRI MODI DI INTENDERE L'APPROCCIO PARAMETRICO	
Dall'Alberti al Parametric Design	33
Pensare Parametrico	37
Strutture parametriche	43
Riordinare le città	48
Cantieri parametrici	50
ARCHITETTURA RESPONSIVA	
Che cos'è l'Architettura responsiva	59
Dalla costruzione, alla cinetica, all'interazione	60
I nuovi strumenti	64

II FASE: <i>esplorazione del caso studio</i>	71
STORIA DEL PALAZZO DEL LAVORO	
Torino nel 1961	73
Il Palazzo del Lavoro	78
L'esposizione internazionale del lavoro	80
Le altre strutture	82
Il destino di Italia '61	84
METAPROGETTO	
Lettura critica del contesto	91
Pub sotto la Cappella Sistina?	101
Illustrazione della proposta	102
GLI ORIGAMI	
Le origini degli origami	109
Campi di applicazione	113
Le basi degli origami	117
La piega	122
La piega obliqua	130
La piega inversa	133
Rigid-Foldability e Flat-Foldability	142
Le superfici corrugate spesse	143
I pattern origami	145
La scelta del pattern	161

III FASE: <i>scenari progettuali</i>	165
PROGETTO	
Gli strumenti	167
Realizzazione del modello BIM	169
Modellazione del contesto	183
Realizzazione del modello con spessore trascurabile	188
Realizzazione del modello digitale con spessore non trascurabile	197
COSTRUZIONE MODELLO FISICO	
Gli strumenti	203
Le fasi	208
PRODUZIONE FUORI OPERA E PRODUZIONE IN OPERA	
Scelta di tecnologie costruttive e materiali	225
Il cantiere	230
Le fasi della produzione fuori opera e in opera	234
CONCLUSIONI	259
BIBLIOGRAFIA	271

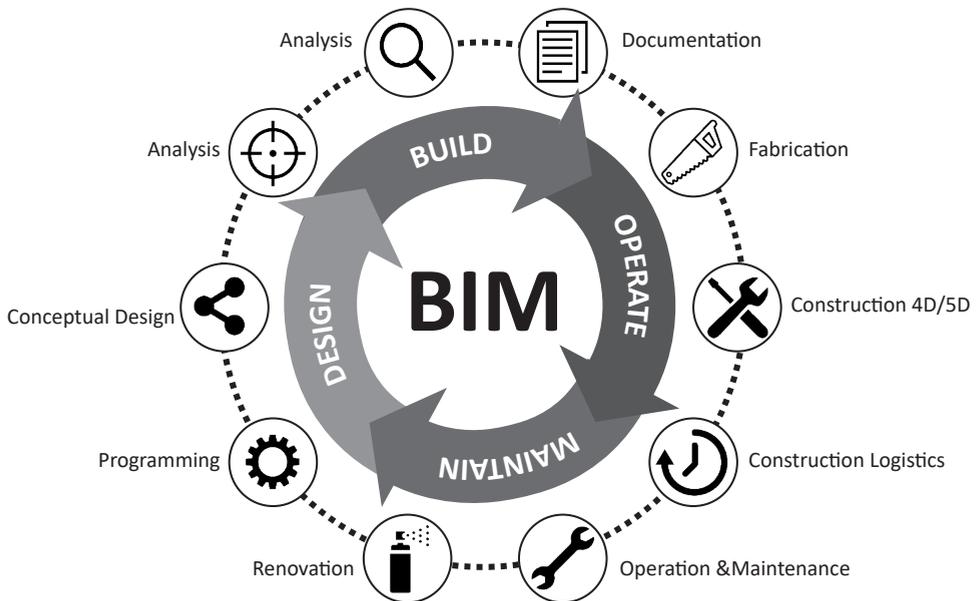
I FASE: *definizione del quadro interpretativo*

APPROCCIO METODOLOGIA BIM

Definizione e campi di utilizzo

Spesso nel campo della progettazione e in quello dell'edilizia più in generale si sente nominare il BIM, viene associato ai modelli 3D, ai software, ai database e usato spesso in modo erroneo; quindi che cos'è il BIM?

Il termine BIM è l'acronimo di Building Information Modelling ed è stato coniato da Charles Eastman nel 1975. Si parte da un modello tridimensionale del manufatto edilizio, forse anche per questo viene erroneamente confuso con il modello 3D. La differenza è che il modello BIM, oltre ad esprimere la geometria dell'edificio, ricostruisce l'intero processo edilizio utilizzando componenti che equivalgono a quelli usati nella realtà, sono in grado di relazionarsi tra di loro e contengono informazioni che esulano dalla semplice rappresentazione.¹



Integrazione tra approccio BIM e ambiti progettuali

Le informazioni contenute permettono analisi approfondite sull'edificio influenzandone le scelte progettuali. Inoltre, le informazioni contenute possono essere utilizzate non solo in fase di costruzione, ma anche nelle fasi di gestione e manutenzione.

Quindi il termine BIM non indica solo un modello 3D contenente tutte le informazioni utili, ma un nuovo metodo di progettazione a cui ci stiamo avvicinando per le necessità di unire tutti i dati provenienti da attori differenti, per un progetto più sostenibile economicamente ed energeticamente, per ridurre così gli errori in fase di progettazione diminuendo aumenti di costi o ritardi.

Il CAD ha cambiato il modo di disegnare, il BIM invece le modalità di progetto.

Da sempre progettista e produttore hanno utilizzato rappresentazioni figurative, plastiche e testuali per comunicare i dati che descrivono il manufatto da realizzare. Fino a non troppi decenni fa ci si è sempre basati sullo scambio di documenti cartacei, indispensabili ancora oggi, ma spesso con errori dovuti a mancati aggiornamenti o alla loro organizzazione/catalogazione.

Con l'arrivo delle nuove tecnologie digitali si conferisce alla rappresentazione la possibilità di scomporre i modelli e raffigurare le forme che compongono il progetto in modo indipendente dalla loro complessità. Inoltre, con la diffusione dei personal computer e la loro diminuzione dei prezzi alla fine degli anni 70, il mondo business ha adottato sempre di più questi sistemi per la modellazione.

Già negli anni 60 si erano vista l'introduzione dei primi strumenti innovativi per la rappresentazione, un esempio è lo SKETCHPAD, sviluppato dal MIT di Boston nel 1962. Era un software molto primitivo confrontato con quelli di adesso, che dava la possibilità di riprodurre le primitive geometriche con l'ausilio di una penna ottica.

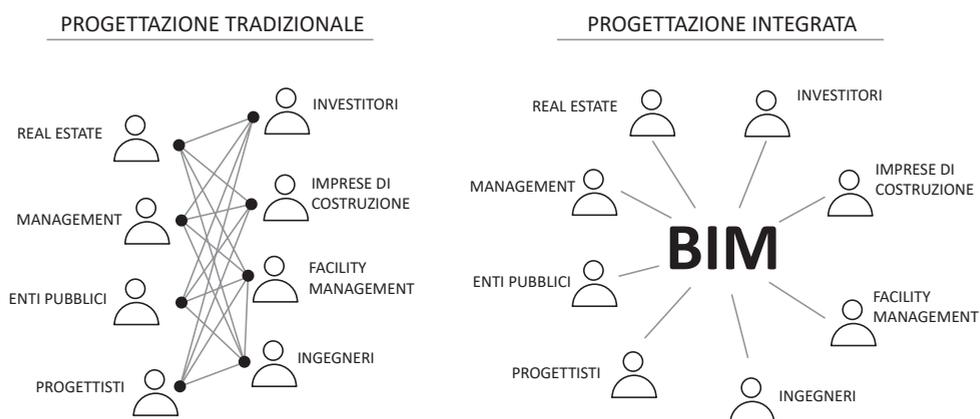
I principali settori che hanno favorito la diffusione di tali software sono quello dell'industria aeronautica e manifatturiera, in quanto settori che potevano affrontare l'investimento economico iniziale del software e dell'hardware adeguato. L'evoluzione iniziata in questo periodo non si è ancora arrestata e i tradizionali CAD hanno implementato funzio-

ni di rappresentazione non solo di elementi geometrici ma anche annotazioni, simboli, testi, tabelle ed hanno perfezionato le modalità di modellazione di geometrie spaziali che possono essere gestite dal calcolatore.

Gli approcci su cui si basano i nuovi software si dividono in due categorie: la prima calcola le superfici secondo un approccio b-rep, basato sugli studi di Coon De Casteljau, Bèzier, De Boor; studi nati dal bisogno di utilizzare con macchine a controllo numerico per la creazione di stampi adatti all'industria dell'automotive e aeronautica.² La seconda invece detta CSG (Constructive Solid Geometry) unisce, sottrae e interseca con logiche booleane oggetti vuoti o pieni in grado di approssimare elementi costruttivi reali.³

Questo tipo di strumenti costituiscono le fondamenta di quella che è l'attuale modellazione BIM.

Charles Eastman, nel 1974, assieme ad altri ricercatori della Carnegie-Mellon University di Pittsburgh, con la ricerca "An Outline of the Building Description System"⁴ gettò le basi di un software che partendo da singoli elementi, successivamente uniti in un modello, possono descrivere un edificio completo e si possono anche estrapolare viste assonometriche e viste ortogonali. I singoli elementi usati per creare il modello contengono informazioni che descrivono il materiale che lo compone e le sue caratteristiche tecniche.



Confronto tra i tradizionali flussi di progetto (sinistra) e un flusso di lavoro coordinato da un modello BIM (destra).

L'articolo scritto nel 1975 sul A.I.A. Journal da Eastman è il resoconto dell'utilizzo di questo software e successive sue sperimentazioni, in questo articolo si introduce per la prima volta il concetto il Building Information Model. Non si riferisce al BIM come a un oggetto informatico ma come un processo per coordinare attività e informazioni riguardati il mondo delle costruzioni.

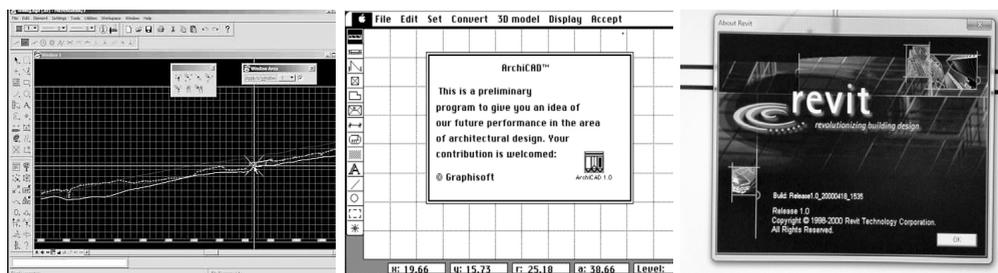
Il BIM così viene definito come l'insieme delle azioni necessarie per realizzare e gestire flussi di informazioni provenienti da soggetti differenti per garantire qualità ed efficienza durante tutto il processo edilizio.

Da allora la complessità dei modelli, dei dati e delle operazioni possibili ad essi collegati si è evoluta in modo direttamente proporzionale con l'hardware a disponibile dei professionisti.

Ad oggi l'interoperabilità e la condivisione delle informazioni non è ancora perfetta, ci sono ancora diverse criticità dovute all'utilizzo di modellatori BIM, in grado di generare delle costruzioni virtuali dell'edificio, che unendo una grande varietà di informazioni nello stesso modello non sono in grado di generare file di interscambio leggibili in modo universale e si hanno sempre delle perdite di informazioni.

I modellatori BIM più diffusi, in ordine di uscita, sono:

La Nemetschek Group era già sul mercato dal 1963 ma solo nel 1984 inizia lo sviluppo di



Da destra: interfaccia Microstation 1.0, interfaccia ArchiCAD1.0, interfaccia Revit1.0

AllPlan, alla fine del decennio inizia la sua espansione internazionale.

ArchiCAD, scritto nel 1985 dal fisico Gábor Bojár: è il primo software per PC per la costruzione di modelli architettonici che si avvalgono di programmi parametrici che descrivono i componenti dell'edificio.

MicroStation 1.0, era già presente sul mercato ma da CAD 2D ma si evolve velocemente, venduto e scritto dalla società Bentley Inc. Nel 2004 la Bentley System lancia Bentley Architecture, evoluzione di Triforma. Questo insieme a Bentley Structural, Bentley Building Mechanical Facilities, Bentley Building Electrical Systems, Bentley Facilities, Bentley Power Civil e Bentley Generative Components sono i moduli applicativi che vanno ad interpretare la metodologia BIM.

Nel 1993, realizzato nel Lawrence National Laboratory di Berkley (USA), si introduce il Building Design Advisor, un sistema che al variare dell'esposizione solare, della longitudine e latitudine, o dei materiali che definiscono i componenti poteva portare a termine simulazioni analitiche sul comportamento dell'edificio.

Nel 2000, la Charles River Software, crea un software completamente dedicato alla costruzione di modelli architettonici. Il software viene battezzato Revit. Solo due anni dopo viene acquisita dal colosso Autodesk, la quale in 12 anni farà di Revit il software BIM più diffuso al mondo.

In molti programmi BIM i componenti edilizi sono detti "oggetti intelligenti" questo per la loro autoconsapevolezza: per esempio un oggetto definito muro è un elemento con la capacità di raccordarsi con tetti o solai e può automaticamente ospitare oggetti come porte o finestre. Grazie alla capacità degli oggetti intelligenti di comprendere l'elemento che rappresentano si limiteranno errori come finestre scollegate dai muri, favorendo la creazione di un modello coerente con quello che sarà il prodotto finale.

Non è da sottovalutare che negli ultimi anni, oltre ai software di modellazione BIM, si sono diffusi numerosi applicativi che interagendo con il modello possono effettuare analisi più specifiche o migliorare la coerenza del modello generando nuovi oggetti. Le informazioni

ricavate attraverso l'uso di questi applicativi andranno ad implementare le informazioni già presenti nel modello.

Le differenze tra CAD e BIM

Il principale scopo dei software CAD era quello di automatizzare il modo di disegnare, quindi utilizzando linee e retini era possibile disegnare un elemento che convenzionalmente veniva inteso come muro. Per velocizzare il processo tutte le linee che utilizzate per rappresentare la stessa categoria, esempio le linee che indicano muri sezionati, vengono racchiuse all'interno dello stesso layer. Processo analogo si ha per il CAD 3D, al posto di utilizzare linee, archi o retini si creano solidi o superfici ai quali si applicano texture o effetti di luci per avere render realistici, anche in questo caso gli elementi che rappresentano lo stesso elemento vengono raggruppati all'interno dello stesso layer. In entrambi i casi con i modelli geometrici si potevano chiarire problemi di tipo geometrico e da esso partire con la costruzione di un modello analitico. Questo tipo di modello è molto facile

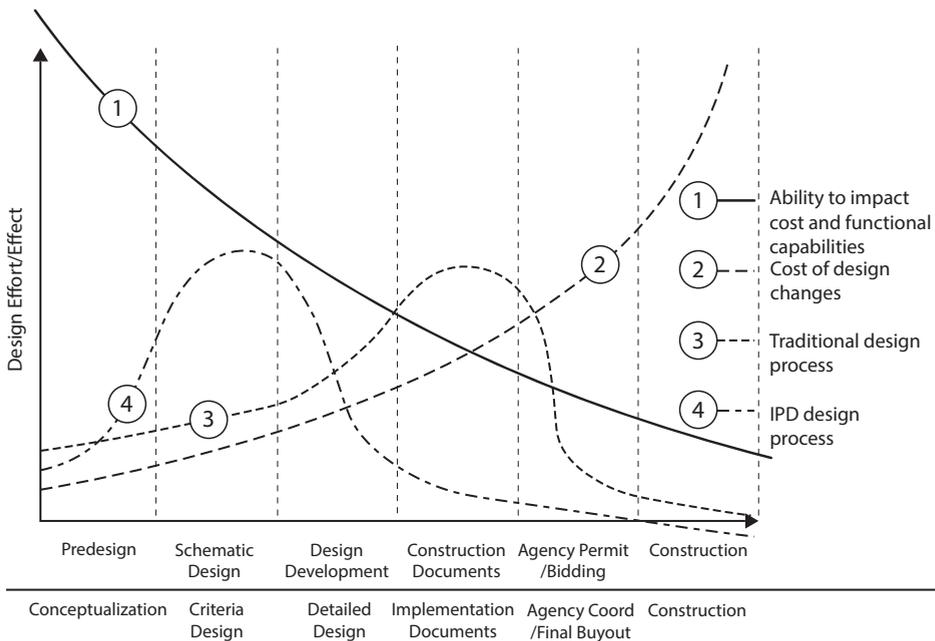
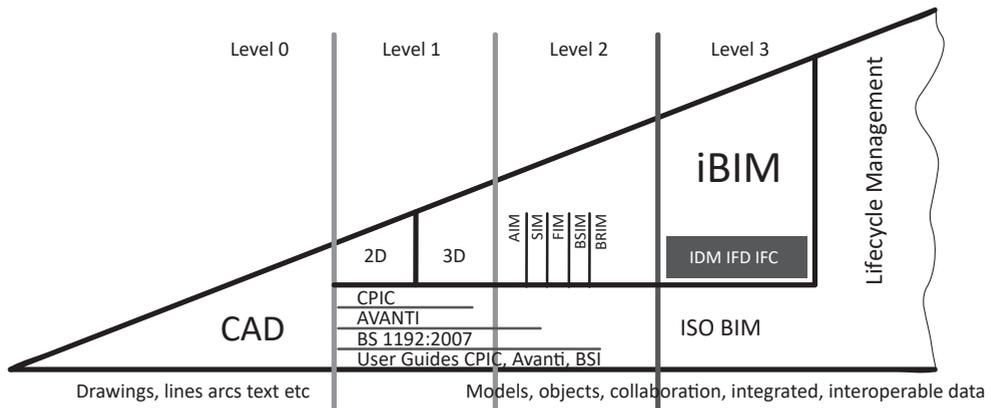


Diagramma che relaziona l'andamento dell'attuale processo di progettazione con gli effetti derivati dalle metodologie BIM. Fonte: MacLeamy, 2005

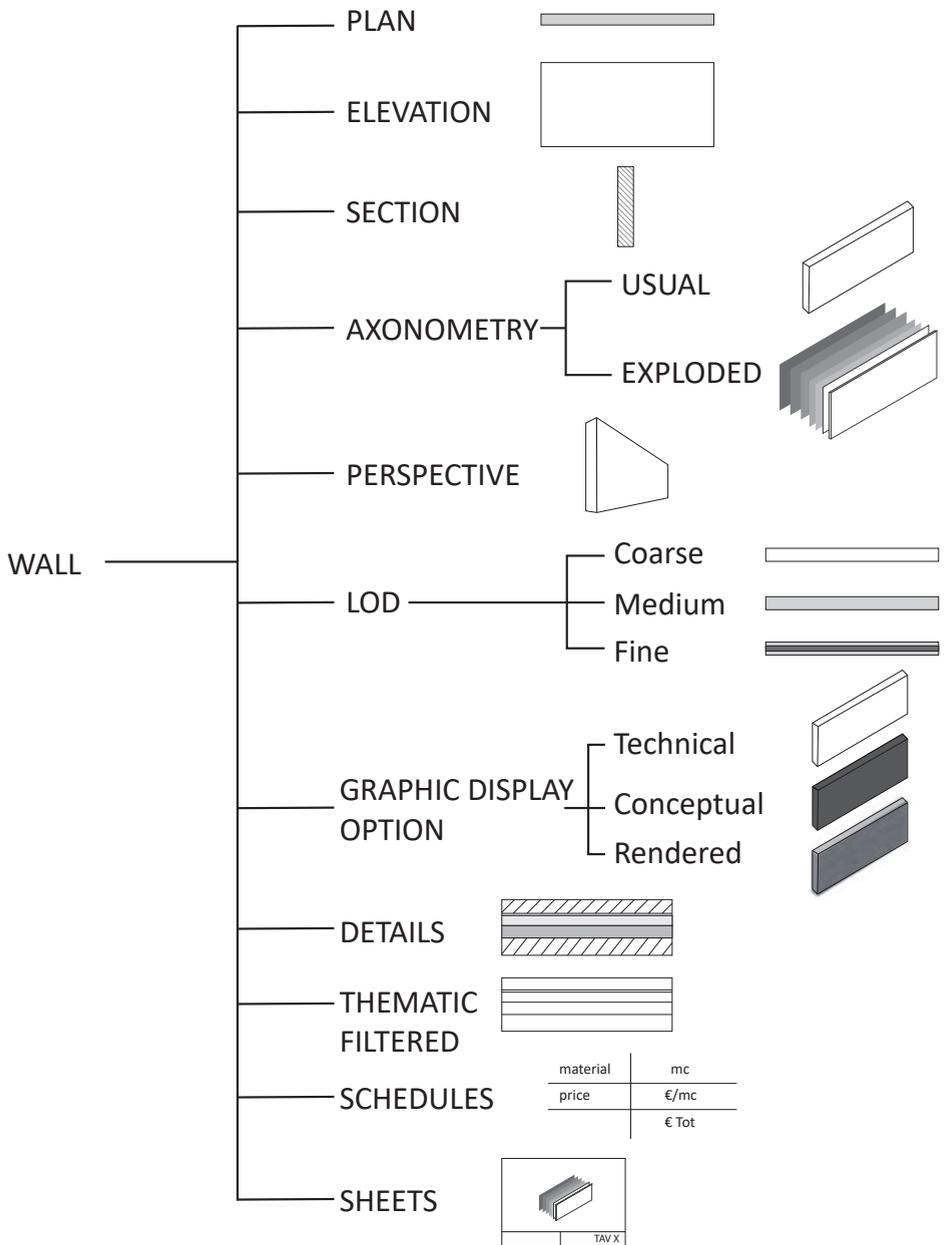


Definizione grafica del significato di Level of Detail. Fonte: Bew-Richards, 2008

da scambiare grazie al basso contenuto informatico che hanno al loro interno.⁵

L'evoluzione del CAD 3D, il CAD Object-Oriented, aggiunge, oltre alle linee, archi e retini anche elementi in grado di rappresentare componenti edilizi. Questi possono essere visualizzati su viste differenti, adattabili a seconda della scala di rappresentazione e gli possono essere associati non solo texture, ma anche impostare variabili parametriche che ne descrivono la dimensione, gli si può associare una specifica stratigrafia con il relativo valore che ne descrive la trasmittanza. Alcuni componenti possono unirsi a degli altri (muri con solai) o possono essere posizionati solo all'interno di altri (porte e finestre possono essere contenute solo all'interno dei muri). Si possono delimitare degli spazi con componenti fisiche e gli si possono assegnare delle caratteristiche.

Il BIM è l'ulteriore upgrade di questi sistemi OOCAD, è una metodologia dove oltre a poter rappresentare in modo più accurato il manufatto può essere integrato con database e informazioni riguardanti tutta la vita dell'edificio. Le informazioni provenienti dai numerosi attori che partecipano al processo edilizio possono comprendere le specifiche degli elementi che compongono l'edificio, i dati economici, gli estremi dei fornitori, i piani di lavoro e la descrizione del luogo in cui l'edificio si colloca. Il BIM ovviamente è ancora in grado di esportare i disegni tradizionali, ma si possono ottenere altri tipi di output di informazioni aggiuntive per differenti scopi o per automatizzare dei processi. È anche per l'elevata complessità dei modelli che il requisito dell'interoperabilità non è ancora



Schematizzazione delle diverse modalità di rappresentazione di un componente muro in ambiente BIM
 Fonte: Lo Turco, 2015

stato raggiunto. In breve, il BIM è uno flusso che può essere utilizzato ed offre molteplici miglioramenti rispetto al CAD, ci vogliono ancora numerosi investimenti perché diventi strumento comune.

In breve, l'Arch. Erez Levin sostiene che:

“La necessità di sviluppare progetti complessi, dalla fase concettuale fino al completamento, richiede una particolare attenzione sul valore del progetto, soprattutto quando si vogliono aggiungere servizi specifici [...]. In quest’ottica il BIM rappresenta certamente una opportunità da sfruttare, poiché grazie alla modellazione tridimensionale integrata si ha la possibilità di controllare meglio l’intero processo, comprese le eventuali interferenze tra le scelte architettoniche, strutturali ed impiantistiche prima di arrivare in cantiere...”⁶

Molto importante è il discorso della collaborazione all’interno dello stesso progetto, collaborazione impensabile con i sistemi CAD, durante la quale si possono identificare tre stadi principali:

Nel primo stadio si parla di interscambio lineare dove finita la progettazione inizia la costruzione. La collaborazione tra le parti in questa fase è minima e anche i dati scambiati, si tratta di disegni 2D o dei semplici modelli 3D.

Nel secondo stadio l’integrazione è migliore e la collaborazione si fonda sul modello, quindi i modelli contengono delle informazioni provenienti da diverse discipline e comunicano tra loro. La collaborazione può avvenire simultaneamente tra attori (architetto, impiantista, strutturista) e/o fasi differenti, quindi si riesce ad introdurre il fattore tempo e costi della costruzione; aggiornandosi simultaneamente si ha la possibilità di effettuare delle analisi prima di finire il progetto.

Nell’ultimo stadio i processi edilizi si vanno a sovrapporre e l’integrazione dei dati avviene trasversalmente tra tutti gli attori che partecipano al processo. Nessuna informazione viene perduta durante gli scambi e si riesce ad ottenere un modello multidisciplinare. Questo tipo di collaborazione detta Integrated Project Delivery (IPD) consente di utilizzare il modello anche per la gestione e manutenzione del manufatto costruito.

Però bisogna riflettere anche sulle parole del Prof. Arto Kiviniemi, il quale rammenta che nonostante le grandi potenzialità e la forte innovazione di questo metodo di lavoro:

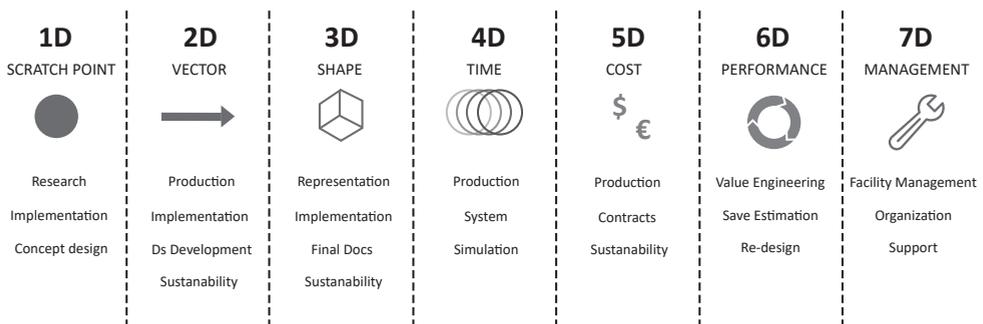
“Il BIM non è una panacea che risolve tutti i problemi del nostro settore, non è una pietra filosofale che trasforma il piombo in oro, e non è un pacchetto di software che si può acquistare. Il BIM è, per esempio, un cambiamento fondamentale del processo edilizio, un mezzo di comunicazione efficiente, una tecnologia che consente una migliore integrazione, una collaborazione della gestione delle informazioni, una tecnologia che rende la prototipazione virtuale degli edifici finanziariamente fattibile. Il BIM non riguarda solo la tecnologia, ma coinvolge anche le persone ed i processi...””

Le dimensioni del BIM

L’arricchimento di informazioni durante la fase progettuale crea dimensioni diverse del BIM superando la semplice rappresentazione grafica.

BIM 2D: alcuni modellatori che si collocano a metà tra il CAD e il BIM si basano sull’utilizzo del disegno bidimensionale che genera parallelamente un modello 3D intelligente dal quale si estrapolano poi le diverse rappresentazioni grafiche. Le informazioni contenute in questi modelli sono minime, come pro si ha la possibilità di scambiare i propri modelli con estrema facilità.

BIM 3D: il BIM, come avevamo già detto, viene associato al modello 3D dell’edificio. Da



Rappresentazione schematica delle dimensioni del BIM

questo modello si possono facilmente estrapolare viste tridimensionali e piane del progetto o render. Il modello 3D è la base da cui si ottengono tutti i tipi di output e, per ottenere le sole piante, se si confronta con il CAD, la costruzione del modello è quasi sicuramente più lenta, si avranno maggiori vantaggi nelle fasi successive di creazione di viste, prospetti o sezioni, o di modifica, dato che ogni vista viene aggiornata automaticamente. Altre funzioni sono strettamente collegate al livello di dettaglio del modello, per esempio: con solo il volumetrico dell'edificio e del contesto, la localizzazione e l'orientamento si possono ottenere delle analisi sugli ombreggiamenti. Un'analisi strutturale invece necessita di un modello molto più dettagliato con maggiori informazioni, ad esempio la resistenza a compressione dei materiali, la resistenza del suolo su cui il progetto è situato, etc. Spesso per non appesantire il modello si disegnano dei sotto-modelli per effettuare le singole analisi. Altre funzioni sono il code checking, per poter verificare e convalidare un progetto seguendo le norme edilizie, o la clash detection, che dà l'opportunità di individuare le sovrapposizioni ed errori tra parte architettonica, strutturale ed impiantistica.

BIM 4D: la quarta dimensione rappresentata all'interno del modello è quella del tempo, i dati temporali infatti, collegati all'elemento costruttivo, possono essere esportati in modo da poter programmare, attraverso l'ausilio di software di project management, la cantierizzazione dell'edificio. Questa programmazione riduce i tempi morti e di conseguenza riduce anche i costi, inoltre si possono effettuare ulteriori analisi per verificare la sicurezza del cantiere durante l'avanzamento di quest'ultimo e di conseguenza riduce i rischi di incidenti.

BIM 5D: la quinta dimensione è quella dei costi, infatti il BIM riesce a quantificare e catalogare gli elementi che compongono l'edificio. La stima dei costi così diventa molto più accurata e rapida rispetto ai metodi tradizionali. Non si devono dimenticare nemmeno i costi di manutenzione ordinaria e straordinaria. Con software specifici si possono calcolare anche i guadagni che un edificio può produrre a seconda delle funzioni che vi andremo a collocare, verificando così se un investimento può essere vantaggioso.

BIM 6D: la sesta dimensione è quella della sostenibilità ambientale. Essa viene calcolata principalmente tenendo conto del fabbisogno energetico, delle ore di utilizzo e della

funzione inserita. Con alcuni software BIM, come funzione nativa, è possibile verificare anche l'embodied energy dell'intera costruzione. Queste verifiche semplificano il procedimento per ottenere le certificazioni ambientali.

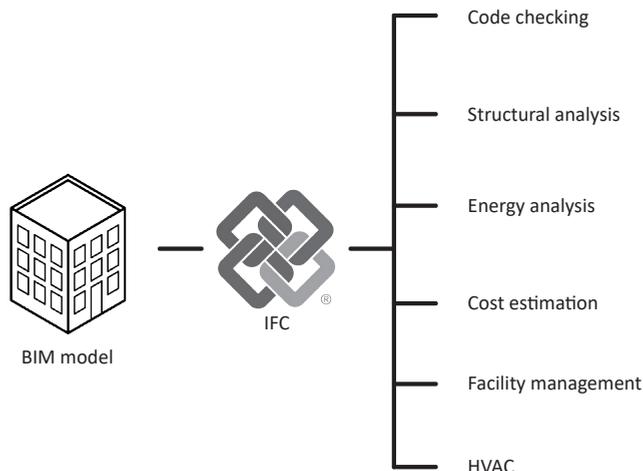
BIM 7D: la settima dimensione ha come obiettivo quello di gestire i servizi e di mantenere attiva la struttura. Infatti, il modello BIM ha al suo interno le liste delle apparecchiature e dei componenti, esportandole diventano la base per i software di Facility Management.

Interoperabilità

Nel mondo dell'edilizia si hanno molteplici attività che devono collaborare tra loro e non esiste un programma in grado di portare a termine tutte queste attività. Così nasce l'esigenza di far comunicare professionisti differenti che lavorano con applicazioni differenti. Per far in modo che il BIM non si limiti solo alla fase della progettazione, ma che diventi effettivamente un flusso di informazioni che iniziano durante la progettazione e finiscono con la demolizione dell'edificio, è necessario che lo scambio di dati e modelli tra le diverse applicazioni sia possibile.

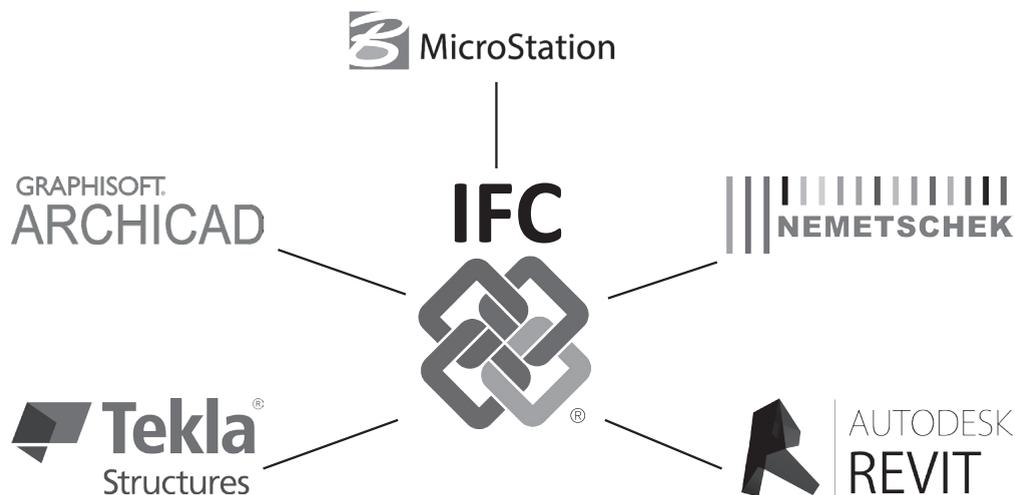
I software oggi in commercio però oltre a progettare e risolvere problemi isolati sono anche sistemi proprietari, quindi chiusi che impediscono la comunicazione con programmi di produttori differenti. Per rispettare la logica del flusso di lavoro BIM oggi tutte le parti coinvolte devono essere consapevoli degli standard di scambio che caratterizzano il proprio software, ed inoltre adottare un protocollo di scambio predefinito. Questo tipo di azione è reso difficile anche dal fatto che i modelli sono sempre più ricchi di informazioni e questa loro elevata complessità non permette l'identificazione di standard universali.

Per risolvere questo problema di comunicazione nel 2001 è stata fondata l'International Alliance for Interoperability (IAI), rinominata nel 2007 buildingSMART™, è una organizzazione senza scopo di lucro ed ha come missioni: quella di pubblicare le norme per le Industry Foundation Classes (IFCs) come base per condividere informazioni di progetto; la stesura e aggiornamento dell'International Framework Dictionaries (IFD) Library, cioè



Gracificazione del processo di trasformazione da modello proprietario a modello condivisibile attraverso protocollo IFC

una libreria che fornisce la descrizione dei parametri necessari affinché il emissione e la ricezione dei dati avvenga senza difficoltà; specificare attraverso l'Information Delivery Manual (IDM) quando certe informazioni potrebbero essere richieste durante la fase di progettazione o durante la vita dell'edificio stesso, la stesura dell'IDM spesso può essere difficoltosa nelle situazioni in cui manchi un processo ben delineato e le informazioni vengono così a mancare. Quello dell'interoperabilità sarà un requisito raggiunto solo nel



Gracificazione del concetto di interoperabilità tra software attraverso la codifica di un protocollo come IFC
 Ispirato a fonte: graphisoft.com/archicad/partner_solutions/bimcollab/

momento in cui: siano state redatte le normative necessarie per la definizione degli standard tecnici che definiscono il flusso BIM; tutti i modellatori conterranno al loro interno tutti gli standard necessari per la creazione di file che mantengano, in modo inequivocabile, al loro interno le stesse informazioni del modello originale; le problematiche legate all'operazione saranno nascoste all'utilizzatore del software e saranno eseguite automaticamente dal modellatore; i progettisti, una volta aggiornati e consapevoli dello strumento che stanno utilizzando, struttureranno le informazioni e la progettazione in modo tale da non avere perdite di informazioni.⁸

Lo stato dell'arte

Paesi come Australia, Danimarca, Finlandia, Norvegia, Regno Unito, Stati Uniti d'America, Canada, e Singapore sono i paesi dove l'approccio BIM è più diffuso. Questi paesi sono la dimostrazione che la metodologia BIM è possibile solo dove governi e pubbliche amministrazioni investono risorse in questo settore di ricerca.⁹

La sua sempre maggior espansione come strumento di lavoro è dovuta dalle sue capacità di modellazione, analisi e simulazione che rivoluzionerà il mondo dell'edilizia, sfortunatamente molte amministrazioni locali difettano di professionalità e strumenti per accettare modelli così ricchi di informazioni. Nonostante esistano degli standard come l'IFCs, e siano in continuo sviluppo, non sono ancora ad un livello accettabile per permettere un interscambio di informazioni in modo sufficiente per far sì che la metodologia BIM possa essere applicata in modo universale nel mondo. Inoltre, non tutti gli utenti sono consapevoli dello strumento che stanno utilizzando.

Nonostante questi impedimenti l'impiego di tecnologie BIM si sta ampliando, soprattutto associato a progetti importati dove le sue qualità permettono una riduzione dei costi, tempistiche più certe e qualità delle analisi sul prodotto edilizio migliori. Inoltre, il futuro dove l'uomo dovrà preoccuparsi riguardo all'approvvigionamento e al consumo energetico, è ormai iniziato, effettuare scelte ponderate è fondamentale, il modello è sempre più strumento per verificare le proprie scelte.

In Italia mancano ancora normative e standard chiari in materia. Questa mancanza può tramutarsi in risorsa e si potrebbe prendere spunto dagli esempi internazionali ad oggi più evoluti. Inoltre, c'è da considerare come il sistema edile italiano sia assai frammentato, dove circa l'80% delle imprese abbia meno di cinque dipendenti.¹⁰ Nelle parole del Geom. Franco Osegna si vede nel BIM l'opportunità per migliorare la competitività e che si vedono già i primi passi per l'adozione di questa metodologia:

“La conoscenza e la richiesta di soluzioni BIM è in aumento e sempre più spesso enti pubblici e statali rendono obbligatorio l'utilizzo del BIM per grandi progetti. Anche le grandi aziende hanno compreso il potenziale e hanno adottato questo processo di lavoro per favorire la crescita rapida ed efficiente. Anche l'agenda per la salvaguardia dell'ambiente incoraggia l'adozione del BIM...”¹¹

<p>Regno Unito</p> <hr/> <p>Ricerca preliminare, progetti pilota e riconoscimento istituzionale</p>	<p>Finlandia</p> <hr/> <p>Progetti pilota e linee guida</p>	<p>Spagna</p> <hr/> <p>Introduzione graduale di normativa e introduzione di un formato di interscambio comune</p>
<p>Danimarca</p> <hr/> <p>Creazione di una piattaforma digitale e casi studio</p>	<p>Estonia</p> <hr/> <p>Manuale che esplicita i vantaggi e la tecnologia BIM</p>	<p>Olanda</p> <hr/> <p>Fase di ricerca, introduzione graduale di una normativa</p>
<p>Irlanda</p> <hr/> <p>Progetti di ricerca e task group per analizzare e monitorare le esperienze estere</p>	<p>Portogallo</p> <hr/> <p>Creazione di una piattaforma digitale e digitalizzazione degli appalti</p>	<p>Australia</p> <hr/> <p>Progetti pilota, sviluppo di un'industria di tecnologie digitali</p>
<p>Argentina</p> <hr/> <p>Promozione universitaria</p>	<p>Brasile</p> <hr/> <p>Manuale di buone pratiche per la costruzione, aiuto ai progettisti che intraprendono il processo BIM</p>	<p>Cina</p> <hr/> <p>Appaltatori come categoria primaria interessata al BIM</p>

<p>Islanda</p> <hr/> <p>Promozione con seminari e conferenze e definizione di linee guida</p>	<p>Norvegia</p> <hr/> <p>Definizione requisiti necessari al BIM e attenzione alle opere pubbliche</p>	<p>Svezia</p> <hr/> <p>Guida per introdurre il BIM nelle imprese</p>
<p>Germania</p> <hr/> <p>Progetto di ricerca e creazione di una strategia nazionale con casi studio</p>	<p>Lituania</p> <hr/> <p>Simulazione e progetti pilota, promozione del comparto pubblico</p>	<p>Belgio</p> <hr/> <p>Ricerca preliminare e accademica e promozione di linee guida nazionali</p>
<p>Nuova Zelanda</p> <hr/> <p>Sperimentazione e definizione di linee guida</p>	<p>Stati Uniti</p> <hr/> <p>Guide metodologiche, promozione tra progettisti e nel settore delle costruzioni</p>	<p>Canada</p> <hr/> <p>Protocollo sulla base di quello Inglese, definizione di standard</p>
<p>Hong Kong</p> <hr/> <p>Progetti pilota, standard CAD come punto di partenza</p>	<p>Singapore</p> <hr/> <p>Promozione da parte delle istituzioni, creazione di un database accessibile, formazione e casi studio</p>	<p>Italia</p> <hr/> <p>Progetto Innovance per la creazione di una banca dati unitaria: normativa in corso di approvazione</p>

NOTE

- 1 Eastman, 1975
- 2 Dimas & Briassoulis, 1999
- 3 Duff, 1992
- 4 Eastman, 1974
- 5 MacLeamy, 2004
- 6 Osello, et al., 2012
- 7 Kiviniemi, 2012
- 8 Meossi, 2007; Caffi, 2006
- 9 Wooyoung & Ghan, 2015
- 10 UNI 11337-7:2018
- 11 Osello, et al., 2012

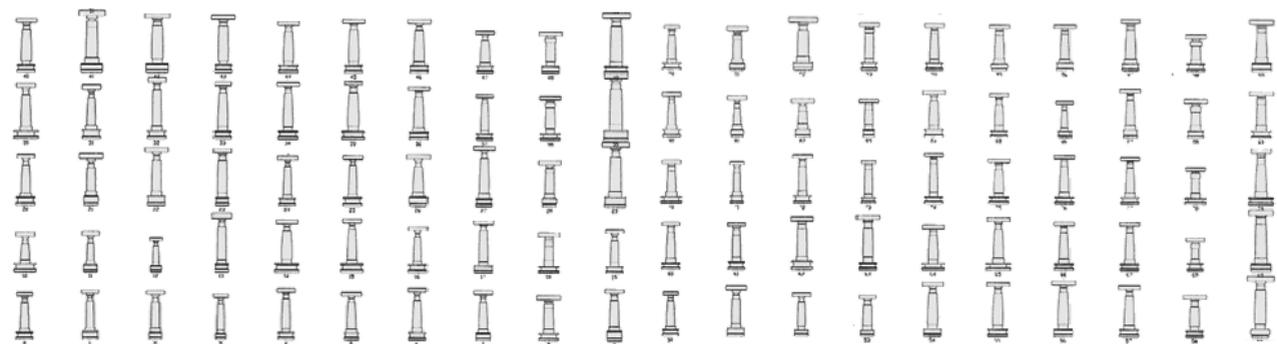


ALTRI MODI DI INTENDERE L'APPROCCIO PARAMETRICO

Dall'Alberti al Parametric Design

Un crescente desiderio di cercare un continuum storico in opposizione al radicale abbandono di idee e metodi storici è evidenziato nella riscoperta delle basi poste dai maestri del passato e dal suo sviluppo proattivo; si tratti dell'estensione e dell'accessibilità del genio strutturale di Pier Luigi Nervi, Frei Otto, Antoni Gaudí, o l'appropriazione del calcolo evolutivo di John Holland e John Frazer, o le grammatiche di forma di George Stiny e così via. È particolarmente significativo notare che la ricerca contemporanea in informatica architettonica condivide un rinnovato interesse per il lavoro pionieristico di architetti e ingegneri degli anni '60 e '70, in contrasto con il passato più immediato dell'architettura postmoderna.

Il parametricismo in architettura però ha una storia molto più lunga di quella che si pensa e il vero precedente alla variabilità computazionale di oggi deve essere trovato nella teoria architettonica delle civiltà pre-meccaniche, che in Occidente include l'antichità classica e il Medioevo. Ad esempio, sia Vitruvio (I secolo a.C.) che Leon Battista Alberti (1404-72) scrissero manoscritti-trattati destinati a essere copiati a mano senza immagini o illustrazioni. Quindi, quando spiegando come costruire una colonna, vengono specificate le regole sulle proporzioni e l'impilamento delle parti verbalmente, ma non offrendo

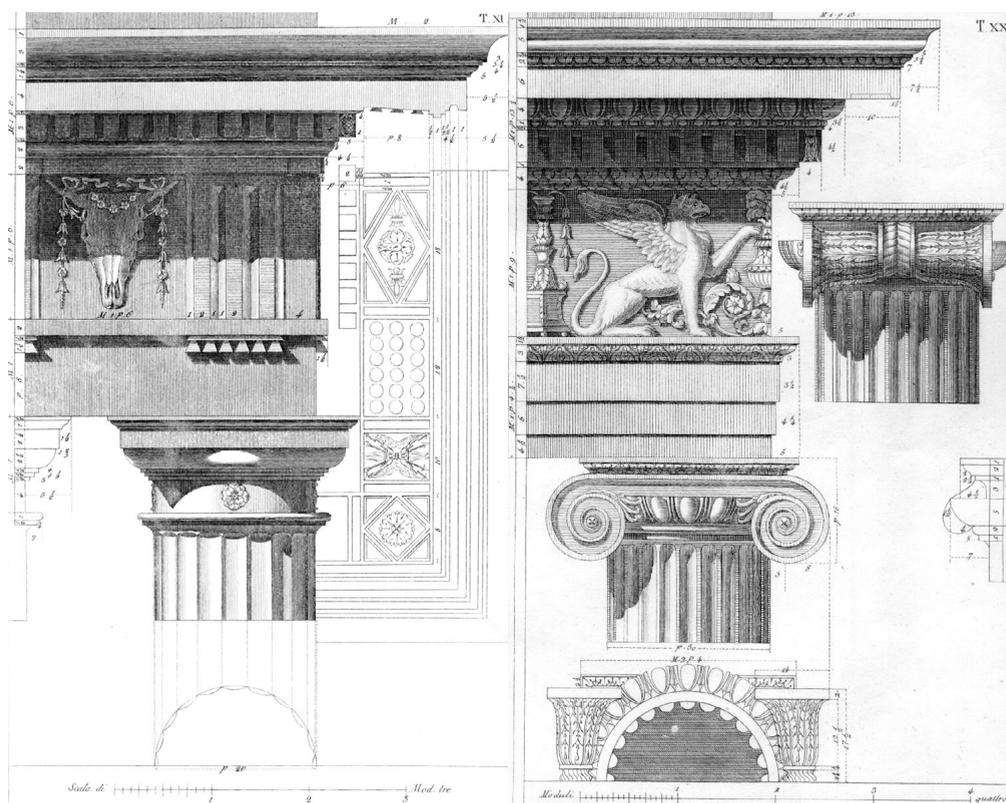


▲ John Frazer e Peter Graham- Evoluzione di una colonna toscana utilizzando le regole parametriche di James Gibbs (1732) e algoritmi genetici

◀ Marc Fornes, Pleated Inflation, Francia, 20015

alcun esempio visivo di come dovrebbero essere effettivamente queste parti queste regole erano sorprendentemente sofisticate, spesso nel formato di una sequenza di clausole if-then che era simile a quello che oggi chiameremmo un “algoritmo procedurale”. Inoltre, poiché il prodotto finale non poteva essere mostrato, le istruzioni verbali potevano solo generare una vasta gamma di forme diverse, tutte diverse ma tutte simili, in quanto condividevano uno script comune.¹

Simili regole geometriche per lo più orali presiedevano l’edificio medievale. Le regole medievali spiegavano come realizzare un oggetto passo dopo passo, ma non descrivono la forma finale di ogni singolo pezzo. Di conseguenza, parti architettoniche con la stessa funzione e posizione in edifici gotici sono spesso simili, ma raramente identiche tra loro: appartengono tutte al medesimo genere, ma ognuno è individualmente diverso.



Ordini architettonici secondo Vignola: tavola 11 e tavola 20

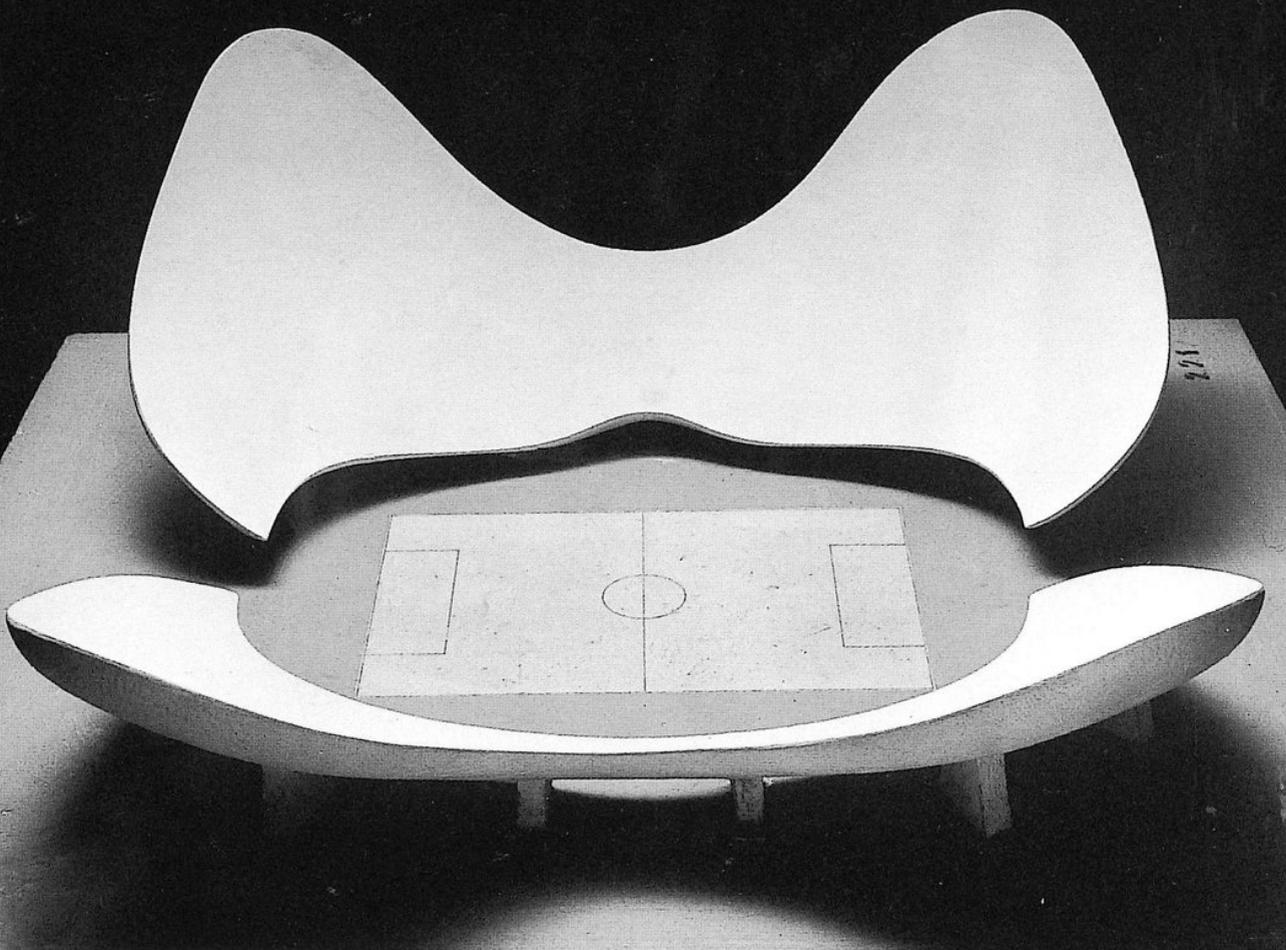


Vista del cantiere in corso. © FMGB Guggenheim Bilbao Museoa, 2017

Il modo di costruire medievale, proprio come l'antico, classico, era generativo e basato su regole- e proprio come il Parametricismo di oggi, ha generato infinite variazioni entro determinati limiti.²

Il Parametricismo classico e medievale si è concluso con l'avvento di moderne tecnologie riproduttive basate su matrici: dal Rinascimento in poi, le immagini stampate hanno sostituito le regole verbali e modelli visivi esattamente ripetibili hanno sostituito gli algoritmi generativi. Così, per esempio, le capitali di Vitruvio e Alberti erano formule astratte senza una forma standard; nel XVI secolo le capitali del Vignola e del Palladio furono stampate con immagini destinate a repliche identiche. Con la rivoluzione industriale, la produzione di massa si diffuse dalle immagini agli oggetti 3D, e la cultura e le tecnologie moderne di copie identiche sostituirono la cultura antica e medievale delle variazioni scribali e artigianali. Questo è ciò a cui il Parametricismo digitale si è opposto alla fine del 20° secolo. Ed è per questo che è stata ed è ancora una rivoluzione: perché produce variazioni, proprio come l'antico parametricismo, ma usa macchine, proprio come la modernità industriale; e quindi può produrre in serie variazioni, che né l'antichità né la modernità potrebbero mai avere.

I computer si sono aperti al mondo business dalla metà del XX secolo e recenti studi hanno sottolineato la continuità tra l'arte elettronica negli anni '60 e '70 e l'ascesa dell'architettura intelligente digitale nei primi anni '90. Durante questa prima fase, nessuna



Luigi Moretti, Modello Parametrico per uno Stadio realizzato secondo le curve di equi, 1960

architettura cibernetica è mai stata realizzata. Alcuni studiosi degli anni '60 e '70 potrebbero essere stati più previdenti di altri, ma quando la svolta digitale in architettura è stata compiuta- nei primi anni '90- è avvenuta in modi che nessuno aveva previsto. Le interfacce utente grafiche e i modellatori hanno favorito un approccio più semplice e intuitivo alla progettazione computazionale e i nuovi strumenti digitali sono stati fortemente adottati dai designer decostruttivisti e formalisti (vecchi e giovani) che avevano bisogno di progettare e costruire geometrie complesse. La rivoluzione del Parametricismo digitale in architettura negli anni '90 riguardava la realizzazione di forme architettoniche. Può sembrare un'ovvietà, ma è stata la rivoluzione digitale che ha cambiato l'architettura negli anni '90 e non gli esperimenti degli anni '60 e '70. Lo spirito della cibernetica potrebbe aver per-

vaso l'esuberanza tecnologica della prima tecnologia high-tech britannica, quando Peter Eisenman, Zaha Hadid o Frank Gehry diventarono digitali non cercarono l'ispirazione in questi software, piuttosto trovarono degli strumenti di rappresentazione.

Pensare Parametrico

Il disegno è usato dall'architetto come strumento per organizzare le idee, immaginare gli spazi, gestire le risorse e predire la costruzione che verrà. Il disegno tradizionale è un processo additivo, in cui la complessità è ottenuta con l'aggiunta e la sovrapposizione di segni indipendenti su carta, durante questo processo non è possibile gestire relazioni associative. La correttezza progettuale non può essere verificata dallo strumento ma solo dall'esperienza del progettista. Il disegno come strumento ha come limite il non riuscire a tener conto di aspetti fisici e strutturali che spesso influenzano poi la forma finale. Gli strumenti CAD appena vennero introdotti ebbero lo stesso limite. La svolta si ebbe dagli anni 60' quando i calcolatori entrarono negli studi di designer e progettisti.

Progettare parametrico significa non disegnare la forma finale che si vuole ottenere, ma stabilire le regole, la ricetta che la dovranno generare. Con le parole dell'Architetto Cesare Griffa³ *“Esattamente come il genotipo di Dna controlla la forma fenotipica dell'essere vivente a cui corrisponde, così il codice controlla la forma dell'architettura. Una volta definito un codice, questo elabora degli input per produrre degli output specifici. Una caratteristica importante di questo modo di ragionare è che la forma finale cambia in funzione dei dati di progetto usati come input, senza che ci siano variazioni nel codice dell'architettura stessa”*.

La base per un calcolo parametrico è composta da parametri variabili che rispondendo a delle interazioni modificano il risultato dell'algoritmo.

Fu possibile la creazione degli algoritmi solo dalla metà del XX secolo, quando si riuscì ad inserire all'interno dei computer il linguaggio di parametri e variabili proprietario della matematica.

Con il termine “Architettura parametrica” si intende l’utilizzo di processi computazionali reali, introdotto dall’architetto Luigi Moretti nel 1940, il quale aveva studiato la relazione tra la progettazione architettonica e le equazioni parametriche, nel 1960 alla triennale di Milano, con l’ausilio di un IBM 610, è stato in grado di esporre modelli di stadi progettati parametricamente.

Mark Burry, dopo una faticosa analisi è arrivato alla conclusione che il lavoro di Gaudì è parametrico. Il calcolo parametrico qui dovrebbe forse allora essere accreditato a Burry piuttosto che a Gaudì?

Anche se negli studi di Mark Burry⁴ sono presenti esempi di descrizioni parametriche di forme tridimensionali, sembrerebbe che fosse Moretti, probabilmente, il primo a creare architetture tridimensionali utilizzando un insieme complesso di relazioni parametriche risolto dal calcolo digitale.

Il design parametrico com’è inteso oggi non è fondamentalmente diverso dal modo in cui Moretti lo descrisse negli anni ’40. La definizione di Wassim Jabi:

“ Parametric Design: A process based on algorithmic thinking that enables the expression of parameters and rules that, together, define, encode and clarify the relationship between design intent and design response.”⁵

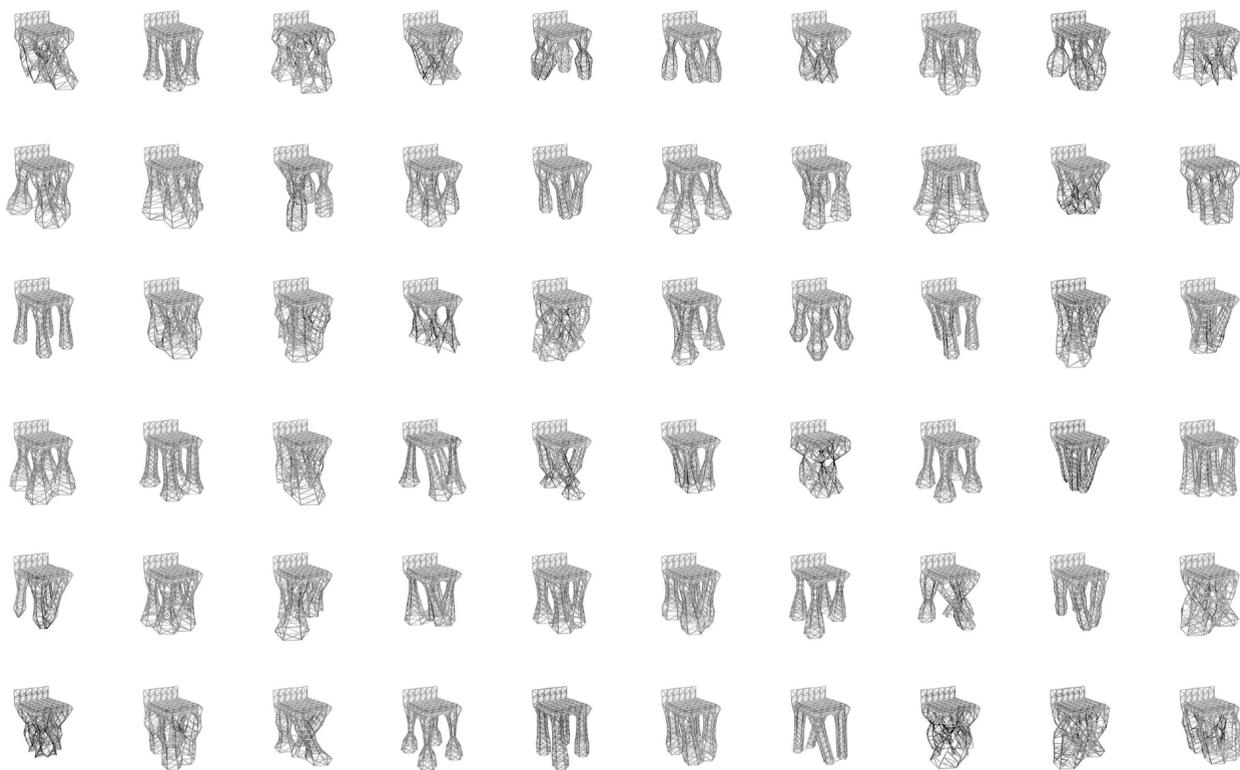
Il processo di progettazione parametrica dipende dal modello parametrico, Patrick Jansen differenzia le tecniche di modellazione parametrica in base a come si interfacciano con l’interazione:

“an algorithm that generates models consisting of geometry and attributes (e.g. material definitions). This algorithm uses functions and variables, including both dependent and independent variables. Some of the independent variables can be given a more prominent status, as the interface to the parametric model – these are referred to as the parameters of the model.”⁶

Questa definizione esplica come possono essere diversi i sistemi parametrici e di come siano capaci di rappresentare stili diversi e in effetti possono essere usati per definire questi stili.

Prendiamo come esempio una colonna classica, essa ha parametri che definiscono le relazioni proporzionali tra gli elementi come la base, il capitello e la trabeazione. Tali dimensioni specifiche di ogni elemento possono essere controllate da una variabile, come l'altezza della colonna. Tutte le altre dimensioni, come il diametro, sono variabili prodotte automaticamente dalle regole di proporzionamento controllate dall'algoritmo.

Proprio come cambiare i parametri del dosaggio di una ricetta le regole cambiano lo stile di una colonna classica di Dorica a Ionica, lo stesso vale per lo stile, per esempio, di un edificio di Zaha Hadid Architects dipende dai parametri che controllano le relazioni tra gli elementi geometrici e l'uso di procedure generative iterative per controllare le variabili.



Una selezione di opzioni per una sedia create attraverso la progettazione generativa e il factoring in vincoli quali carico, peso e materiale. Fonte: Autodesk

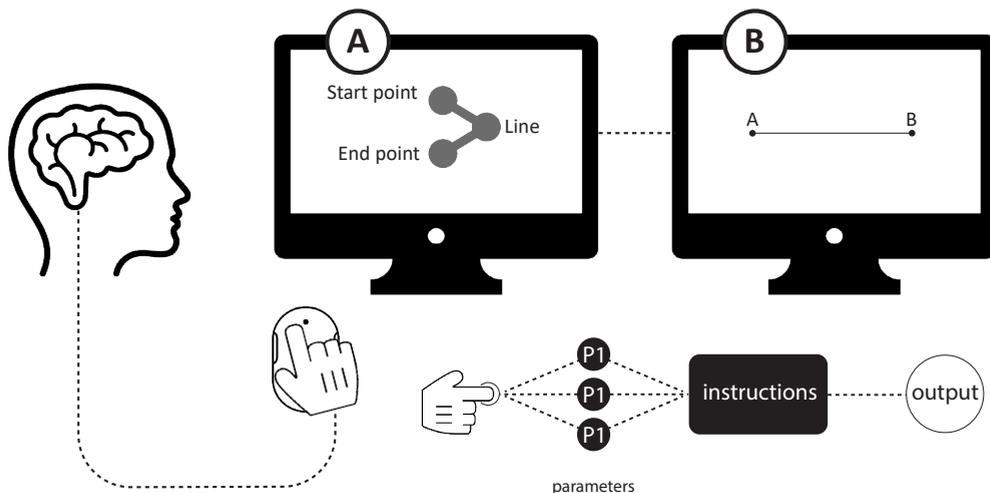


Illustrazione schematica del think parametric. Ispirato a fonte: Tedeschi, 2014

I parametri selezionati da un progettista per definire lo stile e l'aspetto sono un sottoinsieme molto piccolo dei possibili parametri che potrebbero essere modificati, questo sottoinsieme molto ristretto è ciò che conferisce a un edificio uno stile architettonico in particolare, curvilinearità barocca, rettilinea minimalista. L'uso di parametrici in quanto tali non porta necessariamente a nessuno stile, ed è solo un modo efficiente di descrivere in modo flessibile la geometria.

A tempo debito Patrik Schumacher ha coniato il termine 'Parametricismo' per indicare un'intenzionalità stilistica, e più recentemente, "Parametricism 2.0" per enfatizzare la seconda fase incentrata sull'affrontare il mondo reale problemi sociali e ambientali, che alla fine è ciò a cui gli autori parametrici puntavano fin dall'inizio.

Nel descrivere, definire e posizionare il parametricismo, i due volumi di Schumacher su *The Autopoiesis of Architecture* scoprono un doppio significato. Descritto sia come stile nel senso visivo, e anche come un'architettura process-driven in termini di metodo. Con questi scritti stabilisce un nuovo ambizioso obiettivo: Il parametricismo è il grande nuovo stile dopo il Modernismo.

Schumacher identifica le caratteristiche del nuovo stile:

“There is a strong, global convergence in recent avantgarde architecture that justifies the enunciation of a new style: Parametricism. Its most conspicuous outward characteristic is a complex and dynamic curvilinearity accentuated by a swarm-like proliferation of continuously differentiated components.”⁷

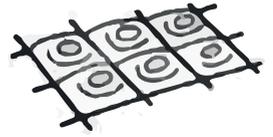
Facendo riferimento ai nuovi metodi:

“Beyond such obvious surface features one can identify a series of new concepts and methods that are so different from the repertoire of both traditional and modern architecture that one is justified in speaking of the emergence of a new paradigm within architecture. New design tools play a crucial part in making this possible, establishing a whole new design process and methodology. [...] Parametricism is thus dependent on the adoption of sophisticated computational techniques. However as a style rather than as a mere panoply of new techniques, Parametricism is characterised by its new distinctive values and sensibilities that started to emerge even before the computational methods were ready to hand.”⁸

E in fine scrive:

“An architectural style is a coherent and comprehensive (research) programme, complete with both a functional and a formal heuristic”⁹

L'architettura non affronta problemi banali, un programma per computer che possa svolgere un ruolo attivo nella costruzione ha bisogno di apprendere competenze ben oltre la conoscenza del programmatore. Il design non è ovviamente un processo algoritmico, questo non significa che gli algoritmi non sono utili, tuttavia ad oggi gli script non sono abbastanza avanzati per affrontare qualcosa che vada oltre il variare qualche geometria. Il parametricismo sta avendo un veloce sviluppo che abbraccia le nuove tecnologie e le nuove esigenze sociali e ambientali. Adesso abbiamo quasi terminato di esplorare le nuove forme e i nuovi strumenti informatici, in seguito queste nuove geometrie non saranno fini a loro stesse ma la risposta ad input ambientali e sociali.



etc.

Strutture parametriche

L'architettura contemporanea ha sviluppato una chiara divisione dei ruoli tra le figure dell'architetto e dell'ingegnere. L'architetto è concentrato sulla "venustas" e sulla "fruitas" del manufatto, l'ingegnere si occupa della "firmitas". Gli sviluppi tecnologici e le ricerche architettoniche contemporanee hanno tentato di riunire i due campi fondendo la forma con la statica del manufatto, così come la creatività e il calcolo strutturale. Gli studi dell'ottimizzazione integrano il design con le strutture, per ottenere una soluzione ottimizzata nel range di parametri prestabiliti. Queste soluzioni spesso hanno ricadute positive sulla struttura: riduzione del materiale, campate maggiori, forme che sfruttano le forze statiche.

I due principali settori di ottimizzazione sono: ottimizzazione della forma e ottimizzazione topologica. Entrambe le forme di ottimizzazione tentano di raggiungere una soluzione ottimale rispetto ad un insieme di parametri che definiscono una funzione di fitness.

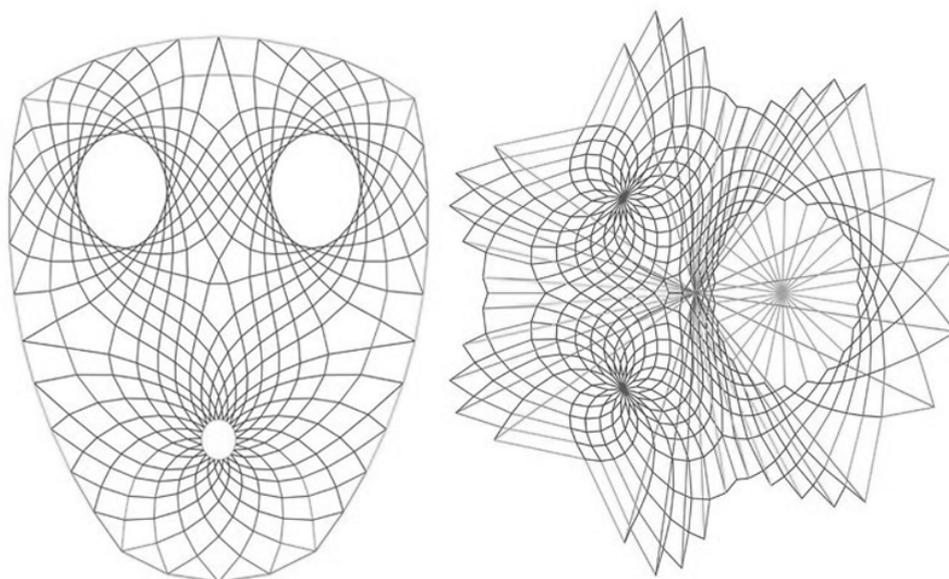
Entrambi gli approcci condividono lo stesso approccio logico:

viene definita una geometria iniziale

vengono definite le condizioni di controllo dei vari parametri

definizione di una o più funzioni di ottimizzazione

Gli esempi più comuni di queste ottimizzazioni sono visibili nella progettazione e la costruzione di strutture a shell. Le shell rappresentano l'unione tra la tradizione storica e i nuovi metodi di progettazione. Alcuni esempi risalgono all'epoca gotica, con le sue sensazionali cattedrali, alle volte di tegole di Rafael Guastavino all'inizio del XX secolo, e più recentemente al periodo dei grandi costruttori di coperture degli anni '50 e '60 guidati da professionisti del calibro di Eduardo Torroja, Félix Candela e Heinz Isler nell'uso del cemento armato, o Eladio Dieste specialista dei mattoni rinforzati. È solo ora, tuttavia, che questa conoscenza viene reintrodotta e migliorata attraverso nuove ricerche.



Block Research Group (BRG), guscio ad imbuto funicolare, ETH Zurigo, 2013

Grazie alle recenti innovazioni nell'ingegneria strutturale, in particolare nello sviluppo di metodi di progettazione computazionale estremamente flessibili e veloci, nonché in tecniche di ottimizzazione multicriterio, il divario tra la geometria curva strutturale complessa e architettonica si sta restringendo. Il potenziale di questa conoscenza appena generata è che consente di realizzare progetti che trovano un equilibrio tra forma e forza. I termini "espressivo" e "strutturalmente efficiente" non sono più ossimori, ma possono essere sinonimi. Il parametricismo propone uno stile che sfrutta le strutture espressive della superficie, consentendo alla geometria in architettura di affrontare adeguatamente le esigenze complesse e dinamiche proprie dell'era contemporanea.¹⁰

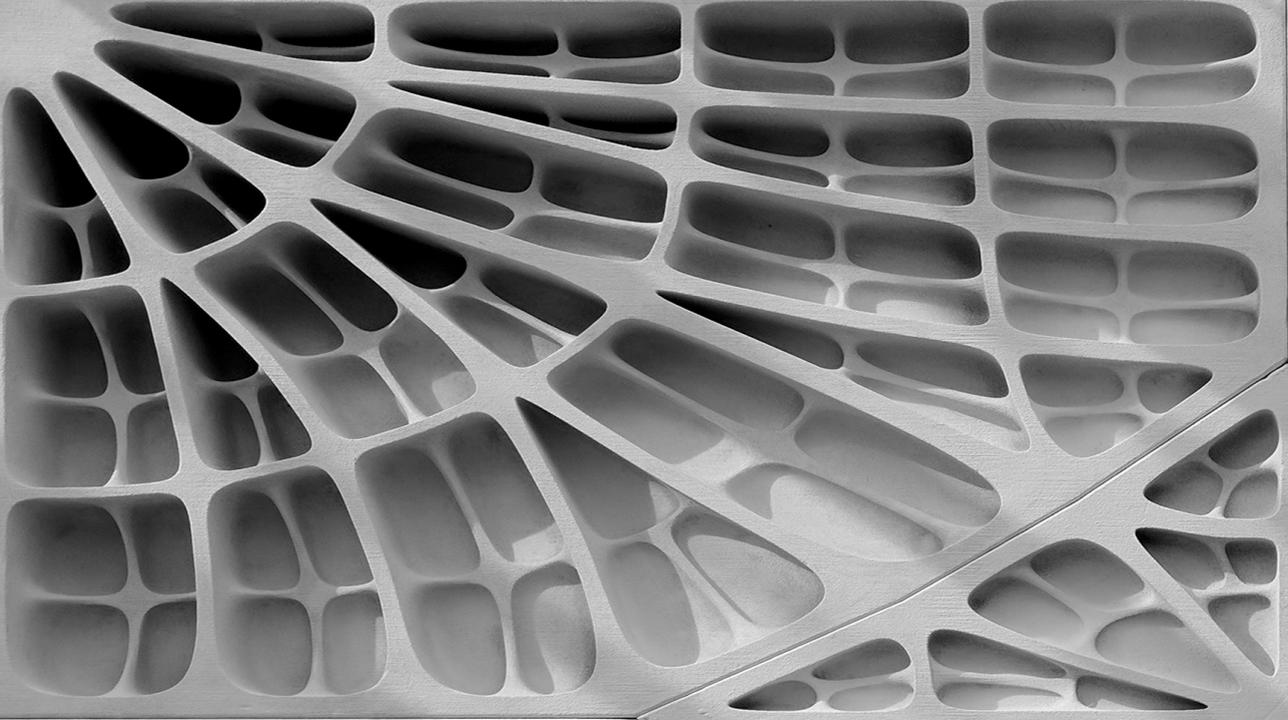
L'uso di strutture a guscio e di conseguenza le conoscenze connesse sono diminuite in modo significativo a partire dagli anni '60 per una serie di motivi. In primo luogo perché presentano una varietà di problemi nell'arena della fisica dell'edificio, nonché sfide nei dettagli architettonici. Formalmente passarono di moda, specialmente durante l'ascesa del Modernismo del XX secolo. Inoltre, considerati i costi tipici legati alla costruzione di casseforme, essi sono materialmente e laboriosi e, in definitiva, i tipi disponibili di geometria ottimizzata per le strutture a guscio sono stati limitati fino a poco tempo fa. Il

parametrismo può utilizzare geometrie complesse per affrontare le molteplici esigenze dell'architettura contemporanea, ad esempio fornendo modi più intuitivi e naturali per navigare nello spazio utilizzando i potenziali semiologici intrinseci delle forme. Affronta quindi uno dei motivi chiave sopra menzionati per cui le strutture a guscio sono cadute in disuso: la sfida di integrare i bisogni programmatici in modo elegante.

La shell richiede generalmente casseforme piene e rigide. Inoltre, i materiali utilizzati per costruire le casseforme per cassetta vengono spesso utilizzati una sola volta, poiché sono personalizzati per una geometria specifica. Forme nuove e complesse possono essere generate indipendentemente dalla loro stabilità strutturale o fattibilità. Le soluzioni strutturali necessarie per costruire queste nuove forme spesso usano un "imbarazzante

Nest HiLo - courtesy Michael Lyrenmann, ETH Zurich, 2016





Concrete 3D Printed Floor , ETH Zurich, 2016

accumulo di materiali” piuttosto che “resistenza attraverso la forma” come la definiva Eladio Dieste.¹¹ Ciò porta a un approccio alla costruzione che è intellettualmente- e spesso anche architettonicamente- insoddisfacente. Ad esempio, una mancanza di pensiero strutturale durante il processo di progettazione porta a costruzioni come la Walt Disney Concert Hall di Frank Gehry a Los Angeles (2003), dove gli ingegneri strutturali arrivano in seguito per portare gli schizzi fantasiosi dell’architetto in tre dimensioni. Un tale processo unidirezionale si traduce in strutture pesanti, materiali sprecati e dettagli poco eleganti.

Le strutture in guscio di calcestruzzo, se progettate e costruite in modo appropriato in un processo che coinvolge architetti e ingegneri, sono in grado di coprire spazi ampi con il minimo costo del materiale attraverso sforzi di membrana compressiva e / o di trazione efficienti, diventando forme funzionali tridimensionali piuttosto che semplici schermi. Le forme della conchiglia ora vanno oltre le forme e le tipologie ideali ottimizzate sviluppate da ingegneri e matematici nei giorni delle coperture degli anni ‘50 e ‘60. Sono fluidi nelle loro potenzialità, il che è reso possibile da nuovi approcci e strumenti di progettazione.

Tracciare la storia dell’uso o del disuso delle strutture shell non è semplicemente una questione di seguire i cambiamenti nel gusto stilistico o nella moda. Imparare dal passato

ci aiuta a costruire nel presente con logica e moderazione. Le innovazioni e le innovazioni digitali e tecnologiche ci consentono ora di ottenere geometrie complesse e spettacolari quasi indipendentemente dal costo materiale o finanziario. Tuttavia, le risorse decrescenti del pianeta e l'ampliamento della consapevolezza dell'opinione pubblica, nonché le sempre più stringenti leggi nazionali ed europee, riguardo all'uso dei materiali o alla dimensione delle impronte di carbonio richiedono agli architetti un impegno ed un approccio che tenga in considerazione di queste problematiche. Dobbiamo porre la domanda: possiamo fare lo stesso meglio e con meno?

Il parametrismo favorisce la geometria complessa e le strutture di superficie curve e richiede quindi una spinta continua verso una maggiore ricerca e innovazione nelle strutture di guscio. Inoltre, giustifica il valore dei gusci che possono essere costruiti in modo più efficiente attraverso la (pre) fabbricazione o altri metodi per evitare sprechi di materiale o per integrare meglio le tecnologie di costruzione.

Il centro di ricerca NEST-HiLo a Dübendorf, in Svizzera, cerca di affrontare molte sfide legate all'uso delle strutture a guscio. Progettato dalla BRG e presidente di Architecture and Building Systems (ETH Zurich) con la supervisione di super-imprese e Zwarts & Jansma Architects, il progetto è più di un semplice guscio con la sola funzione di semplice copertura, è invece una struttura, facciata, un sistema di riscaldamento e raffreddamento e un generatore di energia.¹²

Il sistema del tetto è stato progettato come una leggera struttura a sandwich a doppia curvatura, la cui forma è strutturalmente ottimizzata per superare i limiti di ciò che è possibile nel calcestruzzo. La sua magrezza e l'ampia area superficiale funzionano come un radiatore per il trasferimento di calore nello spazio all'interno utilizzando un sistema di riscaldamento e raffreddamento idronico a bassa temperatura. Inoltre, per la generazione di energia solare verranno utilizzate celle fotovoltaiche ad alta efficienza. Per ridurre al minimo i ponti termici la connessione tra la facciata in vetro e il guscio richiede il design a sandwich, aumentando la profondità strutturale e riducendo la sensibilità a carichi esterni e imperfezioni.

Il design del pavimento dell'unità HiLo rappresenta il risparmio di materiali più significati-

vo all'interno del progetto NEST. La sua struttura è costituita da una sottile volta funicolare in cemento, irrigidita da un sistema di costolature sul suo estradosso e sostenuta dalla struttura principale del telaio dell'unità ai suoi quattro angoli. Questi angoli sono collegati da legami di tensione per assorbire le spinte orizzontali del guscio. Il sistema strutturale è progettato in calcestruzzo per ottenere uno spessore di soli 2 centimetri sia per la volta che per le finiture. L'introduzione di queste costole crea un sistema di pavimenti estremamente leggero con un risparmio di oltre il 70% in termini sia di materiale che di peso rispetto alle lastre cave precomprese.

Riordinare le città

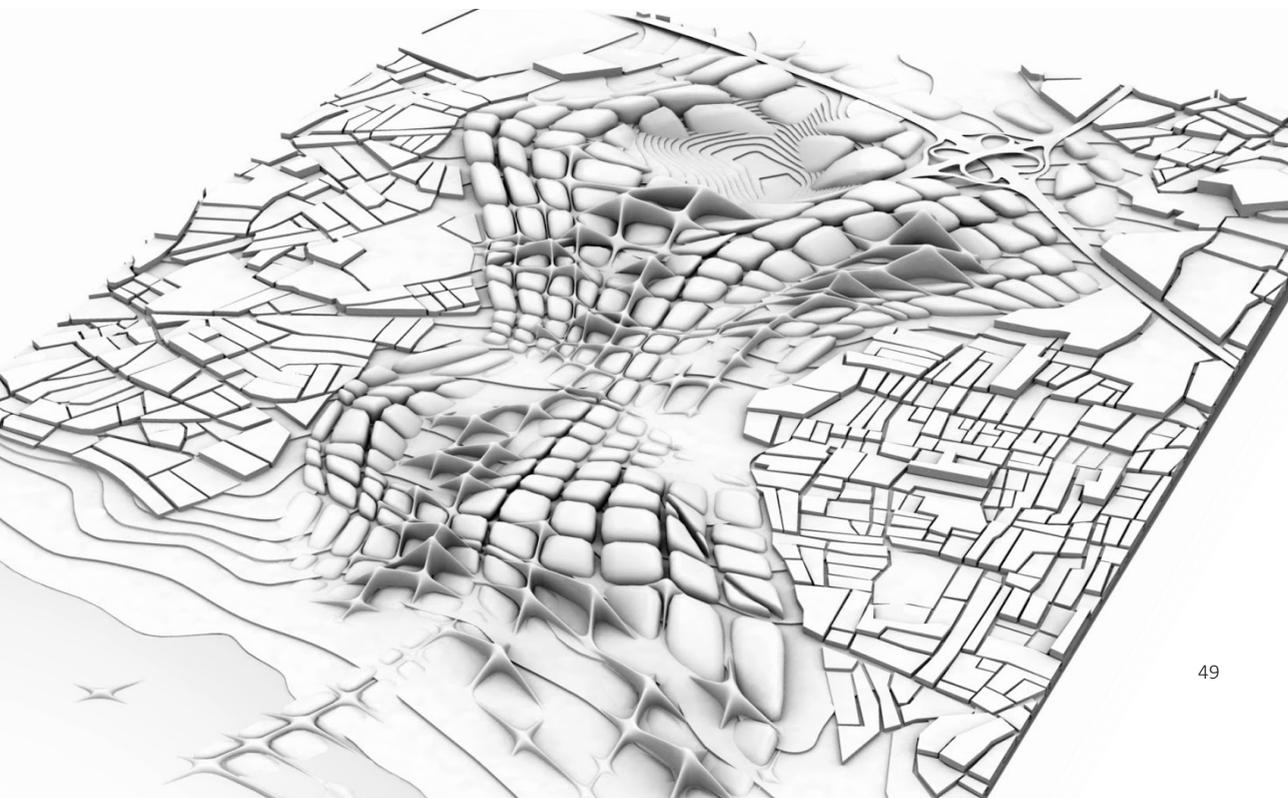
Il Parametricismo rende l'urbanistica e l'ordine urbano compatibili con l'emergenza neo-liberista dei processi di mercato dopo la fine del Modernismo. La pianificazione urbana su vasta scala si è ritirata negli anni '80 e da allora l'urbanistica come discorso, disciplina e professione è quasi scomparsa, risulta difficile l'utilizzo degli strumenti urbanistici del passato perché basati su regole e schemi non più comparabili al modello attuale. Tuttavia, negli ultimi 15 anni, l'urbanistica innovativa è riemersa sotto la bandiera di 'Parametric Urbanism', sviluppando le risorse concettuali, formali per sagomare un ordine urbano complesso e variegato sulla base di logiche parametriche che permettono di adattarsi alle forze dinamiche del mercato.

Non vi è alcun dubbio che nuovi dispositivi di ordinamento computazionale come gradienti, campi vettoriali e metodi di modellazione associativa di dati geometrici consentano ai progettisti di generare morfologie urbane complesse e ordinate con identità distinte che potrebbero in teoria fornire una quantità molto maggiore di informazioni. A contribuire a questa raccolta di informazioni contribuisce la tecnologia si è inserita negli spazi e negli oggetti di uso quotidiano, infatti, può rappresentare il tessuto nervoso della città. L'internet of things rappresenta una realtà in cui oggi siamo immersi grazie alla diffusione di sensori e tecnologie di trasmissione dei dati non invasive. Se i sensori sono ben distribuiti e i dati raccolti ed elaborati in modo da essere associati alle esatte coordinate spaziali a cui fanno riferimento, è possibile creare un layer digitale sovrapposto a quello fisico.

L'ordine parametrico non si basa sulla ripetizione uniforme dei modelli come l'urbanismo modernista. A differenza dei masterplan barocchi o delle belle arti, le sue composizioni sono intrinsecamente aperte (incomplete). Il loro ordine è relazionale piuttosto che geometrico. Stabiliscono l'ordine e l'orientamento attraverso la legittima differenziazione dei campi, attraverso i vettori di trasformazione, nonché attraverso le correlazioni contestuali e le correlazioni del sottosistema. Un ordine unico, imprevedibile, ma riconoscibile e leggibile

Questo modo di sviluppo è certamente più adatto ai nuovi processi socioeconomici rispetto all'ordine fallimentare e semplicistico della pianificazione e dell'urbanistica modernista. Tuttavia, produce una scena urbana percettivamente difficile da digerire, un'identità fenomenologica paradossale e minacciosa nonostante la ricca diversità dei suoi contenuti.

Kartal-Pendik Masterplan, Zaha Hadid Association, Modello tridimensionale, 2009



Cantieri parametrici

La progettazione parametrica contiene al proprio interno un elevato quantitativo di informazioni, informazioni difficili da implementare perfino nei modelli BIM. Esempio di queste informazioni è il progetto Silk Wall degli Archi-Union Architects a Shanghai, dove ogni singolo blocco di cemento aveva una rotazione prestabilita in base alla posizione. Progetti del genere richiedono una cantierizzazione complessa dove non sempre le tecnologie tradizionali sono abbastanza.

La tecnologia più facile da immaginare in questi nuovi cantieri è di certo la stampa 3D. Essa riduce i tempi, i costi, i materiali e gli sprechi di costruzione, consentendo al contempo la varietà e la complessità del design a costi aggiuntivi minimi. La WinSun Decoration Design Engineering Co ha già stampato in 3D un condominio a cinque piani in Cina, mentre la società olandese KameMaker sta stampando una casa nel centro città ad Amsterdam. Queste stampanti 3D offrono una costruzione economicamente competitiva, tuttavia il loro processo di produzione lineare e il volume di costruzione fisso non sono l'ideale per molti scenari sul posto.

Nella sperimentazione di questi nuovi cantieri non si è limitati all'utilizzo di bracci robotici o stampanti 3D, il forte sviluppo dei Sistemi a Pilotaggio Remoto ha ispirato architetti e ingegneri.

I multicotteri sono già operativi in cantieri edili per compiti come rilievi di terreno e costruzioni, ma la ricerca attuale suggerisce ulteriori potenziali. La stampa a sciame utilizzando multicotteri offre maggiore flessibilità e velocità attraverso un movimento tridimensionale non vincolato e una produzione parallela, uno degli esempi è quello dell'ETH di Zurigo, Gramazio Kohler Research e Raffaello D'Andrea hanno recentemente assemblato un edificio in scala composto da blocchi leggeri.¹³

Precursori come Alan Turing e John von Neumann avevano previsto che i computer sarebbero stati in grado di eseguire più che semplici calcoli automatici.¹⁴ Con la programmazione di intelligenza artificiale ora utilizzata in molti settori, la costruzione guarderà anche al di là dell'automazione? Ci sono stati alcuni esperimenti in questa direzione. Liberati



Gramazio&Kohler and Raffaello D'Andrea, ETH Zurich, 2012

dall'adesione a stili o metodologie, la produzione comportamentale consente un dialogo potenzialmente più aperto tra designer, utente e ambiente. Attraverso l'interazione e il feedback in tempo reale, le interazioni non lineari dei robot consentono approcci creativi alla costruzione ed interessanti possibilità di progettazione.

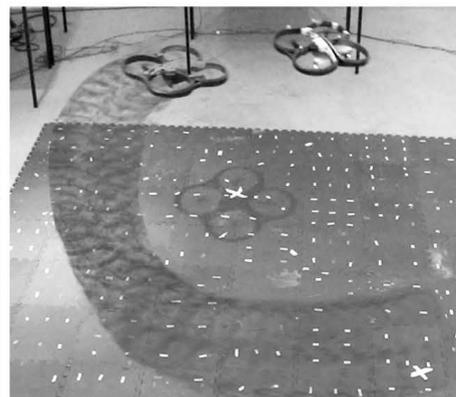
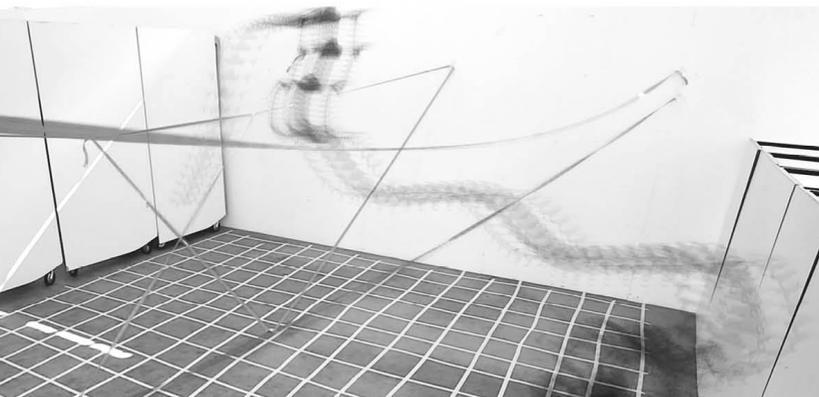
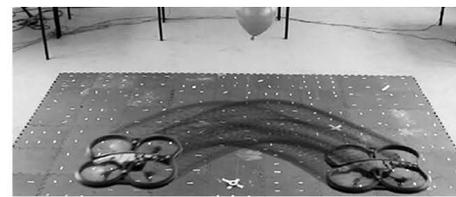
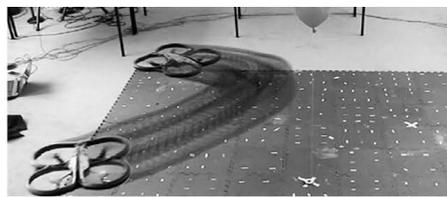
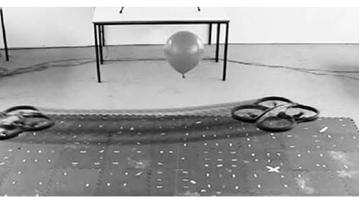
I multicotteri sono generalmente gestiti manualmente tramite telecomando o utilizzando percorsi di volo preprogrammati. Con un computer di bordo e sensori aggiuntivi, un multicottero può essere migliorato e non richiede un set preprogrammato di istruzioni, ma di risposte a esperienze localmente rilevate. Attraverso semplici regole condizionali, i robot possono eseguire algoritmi on-board, consentendo agli algoritmi di formare autonomamente un processo di produzione in-situ.

La costruzione di ponti in località remote con accesso limitato è stata esplorata dal team di studenti SCL. Il progetto Swarm Bridge (2014) ha cercato di costruire un ponte in modo incrementale da due lati opposti, che potrebbero quindi essere uniti nel mezzo per creare una struttura unificata. I due ancoraggi distribuiscono lo stress e la deflessione in



▲ LC student group, Swarm Bridge, 2014

▼ Studio Robert Stuart Smith, Aerial Floss student team, 2013



modo diverso, richiedendo diverse organizzazioni ottimali di materiale. SCL ha proposto la stampa 3D per ottenere un organismo leggero, che possa rispondere ai cambiamenti di tipo strutturale che si possono avere durante la fabbricazione. Le variazioni dal modello di progetto originale dovrebbero verificarsi durante il processo di costruzione a causa del vento o altri agenti esterni, per rendere il modello reattivo è stata introdotta un'analisi strutturale in tempo reale. Ciò ha consentito ai multicotteri di interrompere spontaneamente le attività e creare ulteriori supporti strutturali quando necessario per mantenere l'integrità strutturale del ponte. Il progetto ha mescolato con successo una forma 3D preconfigurata con una risposta strutturale in tempo reale ai numerosi feedback ricevuti dai sensori.¹⁵

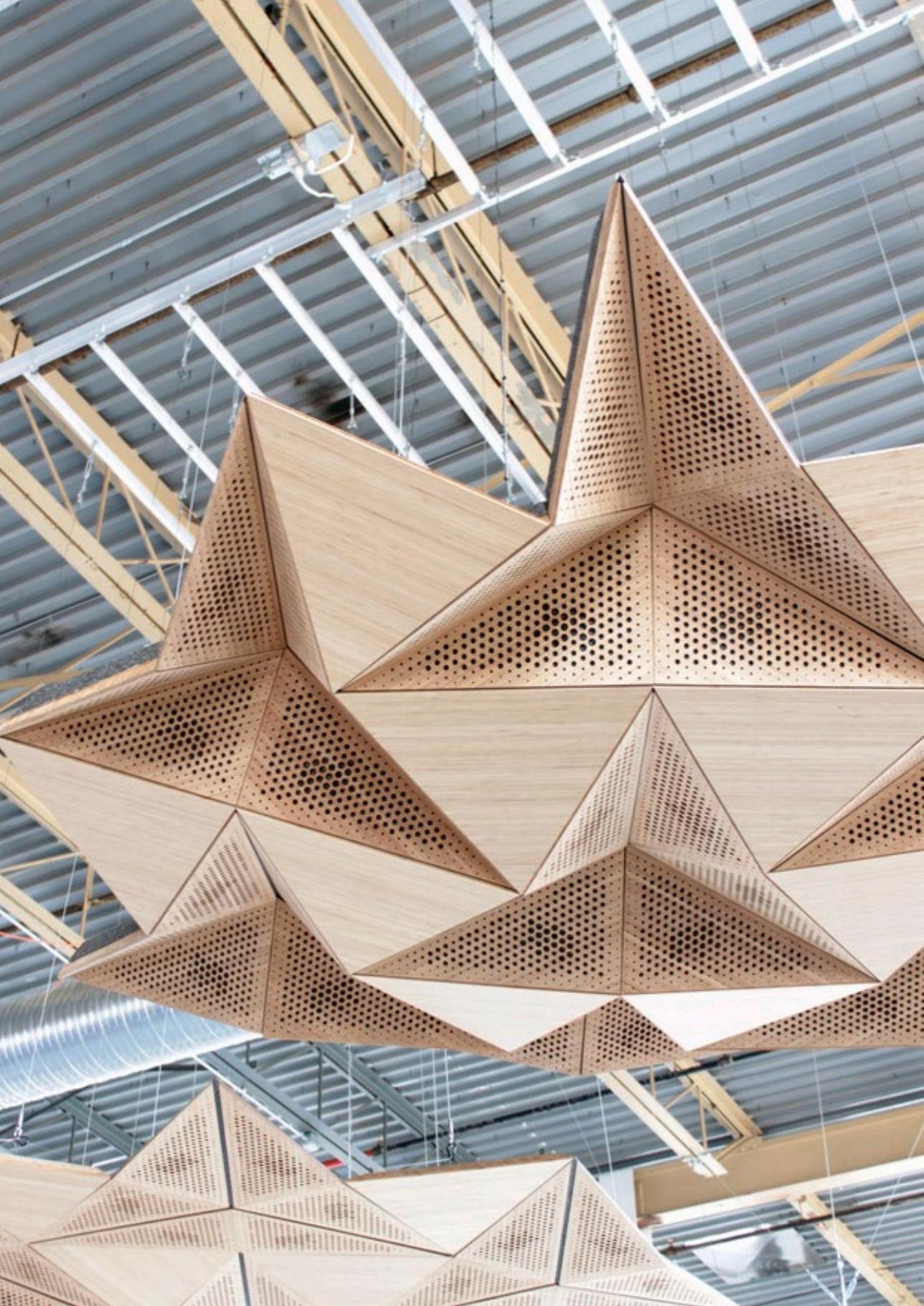
Un ulteriore esempio di ricerca in questa direzione è quello degli studenti di AerialFloss. Hanno programmato dei multicotteri e adesso questi utilizzano il processo decisionale per intraprendere l'avvolgimento autonomo del filo e l'evitamento di fili già avvolti. L'algoritmo che li gestisce è a bordo di ogni multicottero ed è eseguito in parallelo su uno sciame di multicotteri. Questo tipo di programma incorpora regole che consentono a ciascun multicottero di rispondere alla visione del computer in tempo reale, consentendo alle attività di costruzione di adattarsi a diversi siti fisici. Questo processo non è lineare, infatti, piccole differenze nella configurazione iniziale di un sito potrebbero portare a risultati di progetto estremamente diversi.¹⁶

La costruzione convenzionale non è in grado di trattare queste informazioni dettagliate sul sito, tuttavia la progettazione e la costruzione di robot potrebbero consentire agli edifici di adattarsi o andare oltre la matrice compositiva di ogni singolo sito in modi sensibili e profondi. La produzione comportamentale suggerisce una proposta alternativa alla progettazione architettonica che è in grado di estendere l'influenza del design nel dominio apparentemente pragmatico della costruzione. Ciò può essere ottenuto impegnandosi direttamente con i robot che possono operare autonomamente, collettivamente e in relazione alle persone e all'ambiente durante un processo di costruzione. La partecipazione umana al design è quindi possibile attraverso modelli di progettazione 3D e la codifica degli algoritmi on-board definiti prima della costruzione, e/o anche attraverso il posizionamento di marcatori fisici durante la costruzione, consentendo così agli osservatori umani

di vincolare la costruzione robotica. Questo rifà le possibilità architettoniche della costruzione robotica in un dialogo potenzialmente più aperto tra designer, utente e ambiente.

NOTE

- 1 Haque, 2007
- 2 Worringer, 1920
- 3 Griffa, 2012
- 4 Burry, 2016
- 5 Jabi, 2013
- 6 Janssen, 2015
- 7 Schumacher, 2011/2012
- 8 Schumacher, 2011/2012
- 9 Schumacher, 2011/2012
- 10 Heinz, 1959
- 11 Dieste, 2000
- 12 Noelle, 2016
- 13 Willmann, et al., 2012
- 14 Turing, 1950
- 15 Hunt, Mitzalis, Alhinai, Hooper, & Kovac, 2014
- 16 Stuart-Smith, 2016



ARCHITETTURA RESPONSIVA

Che cos'è l'Architettura responsiva

Il termine Architettura Responsiva, introdotto alla fine degli anni sessanta da Nicholas Negroponte¹, descrive quel tipo di architettura capace di riconfigurarsi a seconda degli input che riceve dall'ambiente e dagli utenti. Non esiste una definizione univoca, ogni ricercatore che si è impegnato sull'argomento ha dato la propria. Sono tutti concordi però nell'affermare che essa derivi direttamente dal movimento parametrico. Come detto in precedenza, il termine "parametrico" deriva dall'utilizzo di parametri matematici, al variare dell'input varia il risultato finale dell'equazione.

L'architettura responsiva nasce con l'esigenza di dover creare oggetti o spazi che mutino al variare degli input che riceve, che essi siano di tipo ambientale o dati dagli individui che la popolano. L'architettura non è più vista come una materia statica ma, anzi, è fortemente dinamica e adattiva.

Alcune delle definizioni sono:

"L'Architettura Interattiva (iA) non è semplicemente l'architettura che è reattiva o adattiva. Al contrario iA si basa sul concetto di comunicazione bi-direzionale [...] in primo luogo è definita come l'arte di costruire relazioni tra componenti costruiti e, in seconda battuta, come la costruzione di relazioni tra le persone e componenti e costruiti"

Oosterhuis K., Xia X.²

"L'Architettura Interattiva può essere definita come l'integrazione totale delle discipline di progettazione dell'interazione e architettura. [...] Se l'architettura continua a rispondere alle possibilità di innovazione tecnologica che la circondano, allora non potremo più chiedere 'Cos'è quell'edificio?' o 'Com'è fatto?', piuttosto, 'Cosa fa quell'edificio?'"

◀ Resonant Chambre, RVTR, University of Michigan, 2011

Fox M.³

“E’ la forma architettonica non più statica, pronta ad accettare il cambiamento. Il suo stato temporaneo è determinato dalle circostanze del momento, sulle basi di un processo attivato, un’intelligenza incorporata e potenzialità per il cambiamento. Viene creata un’architettura basata su un processo, la cui forma è definita da un comportamento dinamico dei suoi utenti e dalle mutevoli esigenze e condizioni ambientali; un’architettura che ha le caratteristiche di un sistema ecologico, che emula la natura e, pertanto, si impegna in una fusione di natura e cultura”

Kolarevic B.⁴

Dalla costruzione, alla cinetica, all’interazione

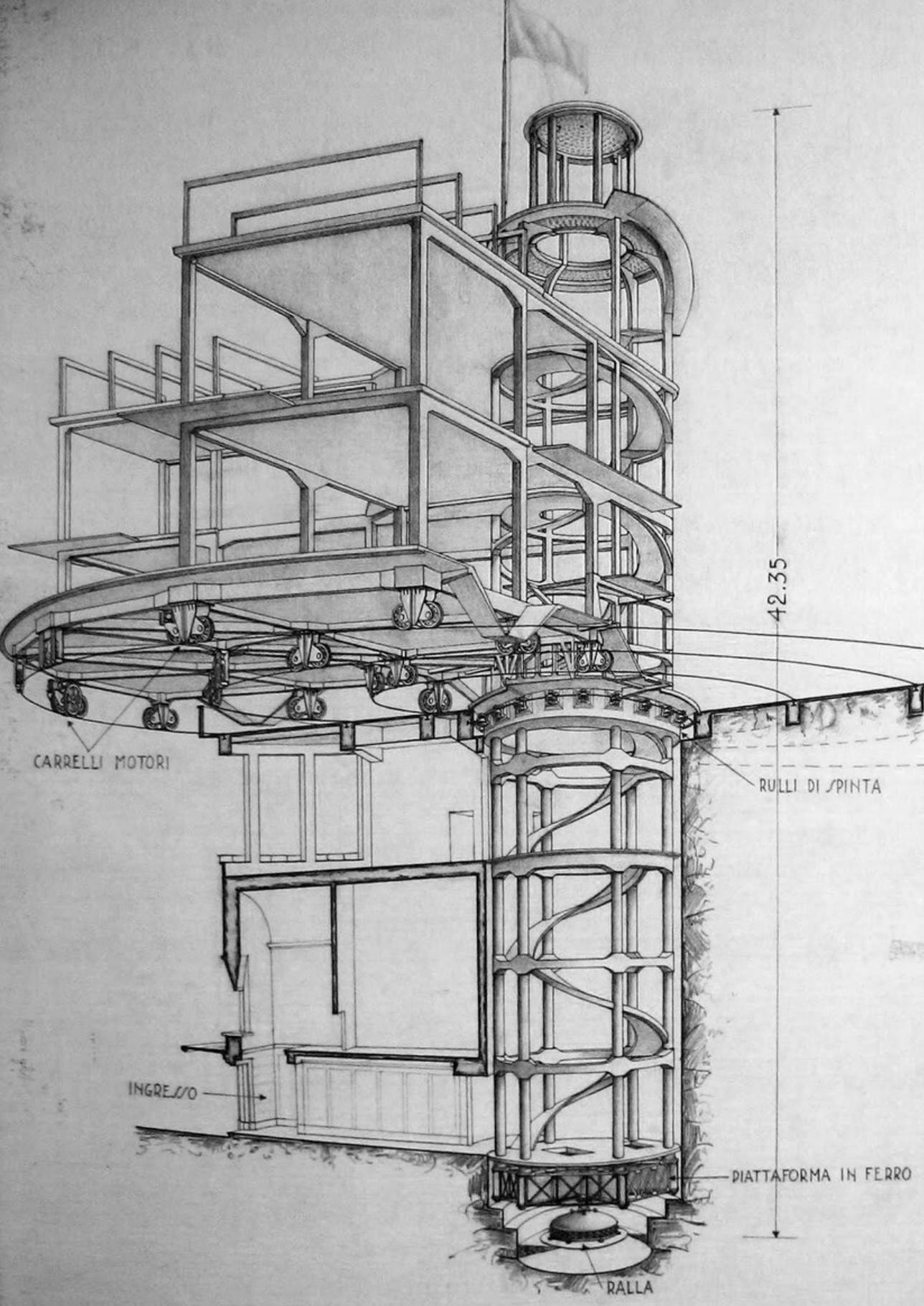
Prosper Enfantin

“L’architettura, in quanto teoria costruttiva, è un arte incompleta: in essa manca il concetto di mobilità e di movimento”

Antonio Musacchio sostiene che fin dalle prime costruzioni si è avuto il bisogno di utilizzare dettagli cinetici in architettura. Gli esempi più antichi si possono ritrovare ad esempio nelle tende delle popolazioni nomadi, esse rispondono ancora oggi all’esigenza di mobilità e di riparo dagli agenti atmosferici; nel velarium rappresentato da Vitruvio ed utilizzato nell’antica Roma per ombreggiare le aree teatrali, si sono applicate tecniche derivanti dal settore navale;

Seguendo il libro⁵ di Musacchio si viene a conoscenza che tali modalità sono state tramandate fino ad oggi da Frei Otto, infatti l’architetto teutonico, seguendo una ricerca di Peter Stromeyer, approfondisce i sistemi a cavi per limitare gli attriti. Nella fine della sua ricerca viene sottolineato come, dopo una breve fase di sperimentazione, già all’inizio del novecento vengono capite le potenzialità di questi sistemi costruttivi.

Villa girasole, Angelo Invernizzi, 1929-1935 ►



42.35

CARRELLI MOTORI

RULLI DI SPINTA

INGRESSO

PIATTAFORMA IN FERRO

RALLA

Esempio tutto italiano di questa ricerca è Villa Invernizzi o Villa Girasole, progettata nel 1929 e completata nel 1935 dagli ingegneri Angelo Invernizzi, Romolo Carapacchi e Fausto Saccorotti. Questa villa, situata in cima a un colle a Marcellise, Verona, è in grado di ruotare attorno all'asse dei collegamenti verticali. Anche in questo caso l'ingegnerizzazione si ispira ad elementi costruttivi usati nella cantieristica navale.

Richard Foster nel 1964 progetta la propria abitazione. In quegli anni la ricerca di nuovi materiali a basso fattore d'attrito permise di uscire da una fase di prototipazione e di realizzare opere più grandi e molto più performanti. Inoltre, c'era il desiderio, da parte della società, di liberarsi dai vecchi canoni formali e la volontà di creare spazi che facilitassero il progresso e l'interazione. Questo tipo di coperture e di soluzioni trasformabili sono quasi sempre state utilizzate in ambito sportivo o per padiglioni espositivi, usando nuovi materiali e soluzioni tecniche sempre più leggere.⁶

Nello scenario contemporaneo, quando ci si riferisce all'architettura responsiva, si fa riferimento alla capacità degli edifici di rispondere agli input climatici. Questi edifici sono caratterizzati da una forte componente impiantistica ed elettronica, pensata per poter ottenere il maggior risparmio energetico. I primi prototipi contemporanei sono stati realizzati da Buckminster Fuller e dai suoi studenti. Tra i suoi studenti, Chuck Hoberman, finiti gli studi, porta avanti la sperimentazione in quell'ambito intrecciando i suoi studi con quelli di Kas Oosterhuis. Mentre Hoberman si concentra su sistemi composti da elementi rigidi e cerniere, Oosterhuis pone la sua attenzione sui nuovi materiali e componenti elastici.

Solo però negli anni Novanta il costo dell'elettronica e dei processori scende affinché questi si possano utilizzare nella costruzione architettonica. Esempio di edificio realizzato in quegli anni è l'Institut du Monde Arabe a Parigi, 1987, progettato da Jean Nouvel, dove un lato dell'edificio è caratterizzato da 27000 pannelli che, ispirati agli otturatori delle macchine fotografiche, regolano la quantità di luce entrante nell'edificio. Invece, ricerca importante di quegli anni, 1999, è stata condotta dal gruppo dECOi, la "Aegis Hypo-Surface". Il prototipo dimostra come sia possibile muovere una superficie di materiale plastico e metallico attraverso l'ausilio di pistoni elettromagnetici controllati da un computer che rileva la luce tramite sensori optometrici.



One Ocean, SOMA, Yeosu, Expo 2012

Gregory Turner, nel suo scritto “Construction Economies and Building design: A Historical Approach” cita Kennet Frampton⁷. Frampton afferma che nell’architettura contemporanea si sta verificando un fenomeno di dematerializzazione, lo si evince dal costo dei nuovi edifici. L’incidenza del costo della struttura è diminuita da un 80% a un 20% sul costo totale dell’edificio, le partizioni mobili invece crescono da un 3% a un 20%, incremento ancora maggiore lo si ha per il costo degli impianti che ad oggi arrivano fino al 35% dei costi totali. Guardando queste percentuali si comprende come nell’architettura responsiva un ruolo sempre maggiore viene giocato da queste terminazioni nervose composte dai più svariati sensori che oggi propone il mercato.

Ad oggi le maggiori ricerche in questa direzione vengono seguite dalle università dove l’incontro tra differenti competenze, differenti visioni hanno creato un’iterazione molto forte che è sfociata nella creazione di piattaforme, un esempio è Grasshopper, e micro-controllori, Arduino, capaci di comunicare grazie ad alfabeti comuni.

Esempi recenti costruiti piuttosto virtuosi: il progetto Resonant Chamber, dello studio

RVTR, è nato seguendo le regole dettate dagli origami e la voglia di provare nuove forme in grado di assecondare acustiche differenti, è un controsoffitto composto da pannelli multistrato capaci di modificare la loro forma per poter alterare le condizioni sonore della stanza; L'Al Bahar Tower progettata dal gruppo Aedas Architects, con la loro altezza di 145 metri si riconoscono nello skyline di Abu Dhabi per la loro facciata responsiva. I progettisti hanno messo a punto un sistema ispirato alla "mashrabiya", tradizionale reticolo islamico per ombreggiare le corti degli edifici, in grado di rispondere all'esposizione solare. Ogni componente reagisce in maniera autonoma, l'obiettivo è quello di ridurre la radiazione incidente sulla vetrata, con un conseguente riduzione nell'utilizzo degli impianti di condizionamento; Il One Ocean progettato dallo studio SOMA per l'Expo 2012 tenutosi a Yeosu, con un sistema di lamelle in vetroresina in grado di ruotare promette, oltre a controllare la luce incidente, una ventilazione naturale del foyer.

I nuovi strumenti

Si è anticipato come i nuovi apparecchi abbiano modificato l'approccio al progetto architettonico. La necessità di realizzare prototipi per lo studio dei nuovi elementi cinematici hanno avvicinato l'architetto alla figura dell'artigiano, tornando ad una visione dell'architettura più vicina alla figura del Brunelleschi rispetto a quella dell'Alberti. Per secoli, da dopo il *De re aedificatoria* il mezzo di comunicazione tra architetto e costruttore è stato il disegno bidimensionale, ma il nuovo architetto ha a disposizione nuovi strumenti sia per la progettazione che per la

Al-Bahar new courtesy, Aedas, 2013 ►



creazione di prototipi.

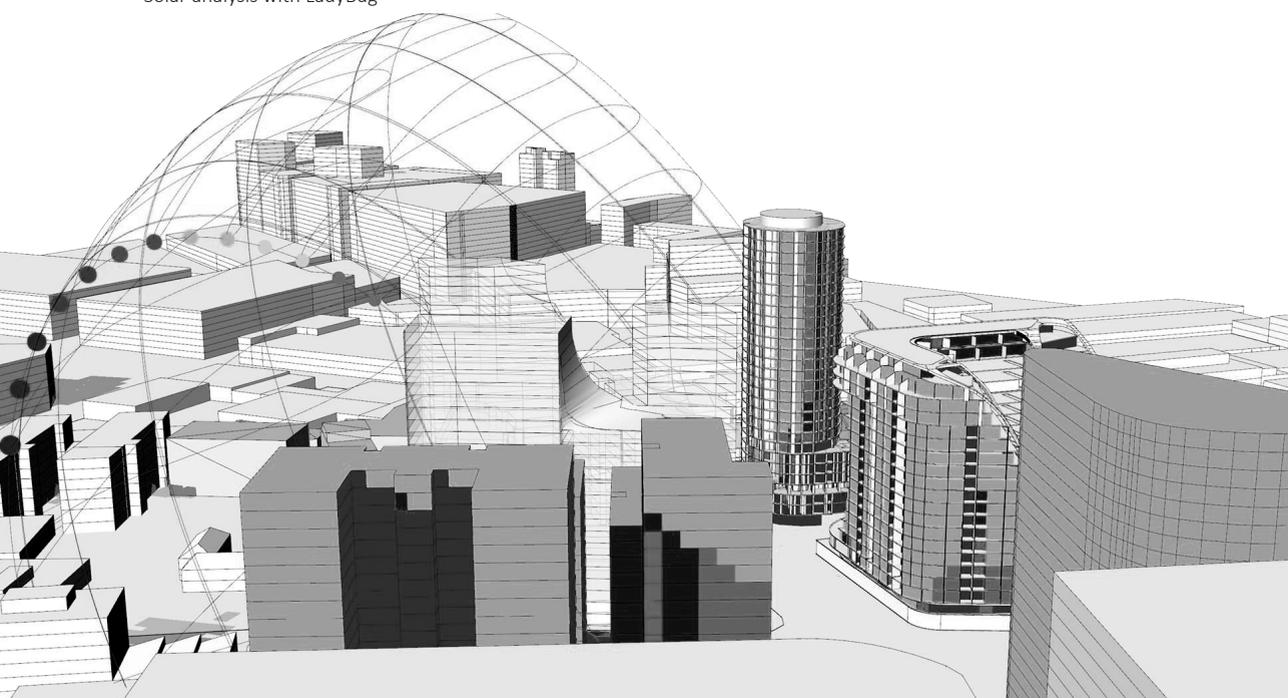
L'Architettura Responsiva, utilizzando algoritmi generativi, così come quella parametrica, sostituisce la mano dell'architetto con una serie di codici che elaborano dei dati. L'architetto è il creatore di questi codici. Il nuovo materiale di studio dell'architetto sono i componenti come codici, sensori e processori. Con questi l'architetto è in grado di comunicare con agenti esterni, capirne il comportamento e fare in modo che l'ambiente dia una risposta a questi input.

Si passa dal poter controllare il disegno e quindi la forma attraverso la mano al conoscere non solo la forma finita della struttura ma al processo che ha portato ad essa, quindi dà la possibilità a chiunque di riuscire a modificare il processo di crescita dell'edificio.

Nelle nuove materie di studio dell'architetto troviamo anche quegli strumenti che fanno parte della digital fabrication. Con digital fabrication non ci si riferisce alla stampa 3d di semplici modellini, ma ad un insieme di processi produttivi sempre più mediati dai computer. Sono processi che in altre discipline (automotive, aerospaziale e navale) ormai sono diventati di uso comune ma che devono ancora trovare il loro spazio nel processo edilizio, più restio al cambiamento.

Per l'applicazione di questi sistemi è necessario effettuare un upgrade del nostro modo

Solar analysis with LadyBug



di pensare promuovendo una cultura del cambiamento e di condivisione. Non è più possibile accettare i limiti di un processo architettonico tradizionale, si ha sempre di più la necessità di personalizzarlo e riconfigurarlo sbloccando nuove funzioni e realtà non raggiungibili con un processo tradizionale.

La leggerezza e la flessibilità sono le caratteristiche che accomunano questi nuovi sistemi architettonici.

“La leggerezza in architettura va intesa come approccio progettuale volto a trasformare le risorse materiali e immateriali, finalizzato alla ricerca e alla costruzione di spazi e di modalità dell’abitare innovativi e sostenibili [...] s’intende riferirsi ad una attenzione progettuale verso la compatibilità ambientale, la costruzione programmata, l’adattabilità ai luoghi, la reversibilità e la riduzione del materiale, cioè verso i tre aforismi dell’architettura moderna e contemporanea: Less is more/ Biology and building/ More with less”⁸

Nell’ambito dell’architettura responsiva si è sentita anche la necessità di focalizzarsi sugli involucri responsivi e intelligenti, analizzando anche l’evoluzione del settore della progettazione e della produzione di involucri costituiti da layer dinamici. Interesse che nasce dalla necessità di rispondere a richieste funzionali, qualitative e spingono verso lo sviluppo di elementi edilizia dinamici. Questa componente quindi è in grado di rispondere a degli input sia interni che esterni.

Con questa premessa viene introdotto l’argomento dell’architettura tessile il cui studio ispirerà alcune soluzioni progettuali. L’architettura tessile è definita da superfici si comportano come le membrane delle cellule e in modo osmotico regolano flussi sia ambientali che materiali. I materiali tessili, in generale, rappresentano al meglio gli obiettivi che si cercano di raggiungere tramite l’architettura responsiva. L’involucro, nella storia dell’architettura, è cambiato non solo stilisticamente ma anche in termini tecnologici. È evidente come nel corso della storia ci sia stata un’ottimizzazione delle forme e un alleggerimento della struttura portante. L’architettura tessile, ad oggi, rappresenta l’apice di questa ricerca, basti pensare alle potenzialità delle strutture pneumatiche nelle quali forma e stabilità sono ottenute solo dalla differenza di pressione tra interno e esterno e non vi è alcun supporto strutturale rigido.

Non volendo ripetere la storia dell'architettura tessile, già spiegata precedentemente seguendo gli esempi di Musacchio, vorrei soffermarmi sulle proprietà dell'involucro tessile nel progetto contemporaneo. Secondo Reyner Bahnam vi sono tre "modelli di controllo ambientale" all'interno della Classe di Unità Tecnologica denominata Chiusura: Il primo modello è definito conservativo, caratterizzato da grandi masse murarie per ridurre le dispersioni termiche; Il secondo modello è definito selettivo, adopera la struttura non solo per conservare le condizioni desiderate, ma, se possibile, le fa entrare dall'esterno; Il terzo modello è definito rigenerativo, le condizioni desiderate sono totalmente garantite dai sistemi impiantistici. L'involucro tessile appartiene alla categoria di involucro di tipo selettivo ed è chiamato a rispondere alle problematiche collegate al benessere visivo, all'integrazione tra i sistemi di involucro e struttura e alle fasi del processo edilizio relative alla realizzazione, gestione e dismissione.

Per quanto concerne al benessere visivo l'architettura moderna e contemporanea considera la luce come un materiale da costruzione. Le membrane tessili, caratterizzate da strutture portanti molto fini e da una vasta gamma di prodotti, sono in grado di controllare e modulare la trasmissione luminosa all'interno dell'edificio.

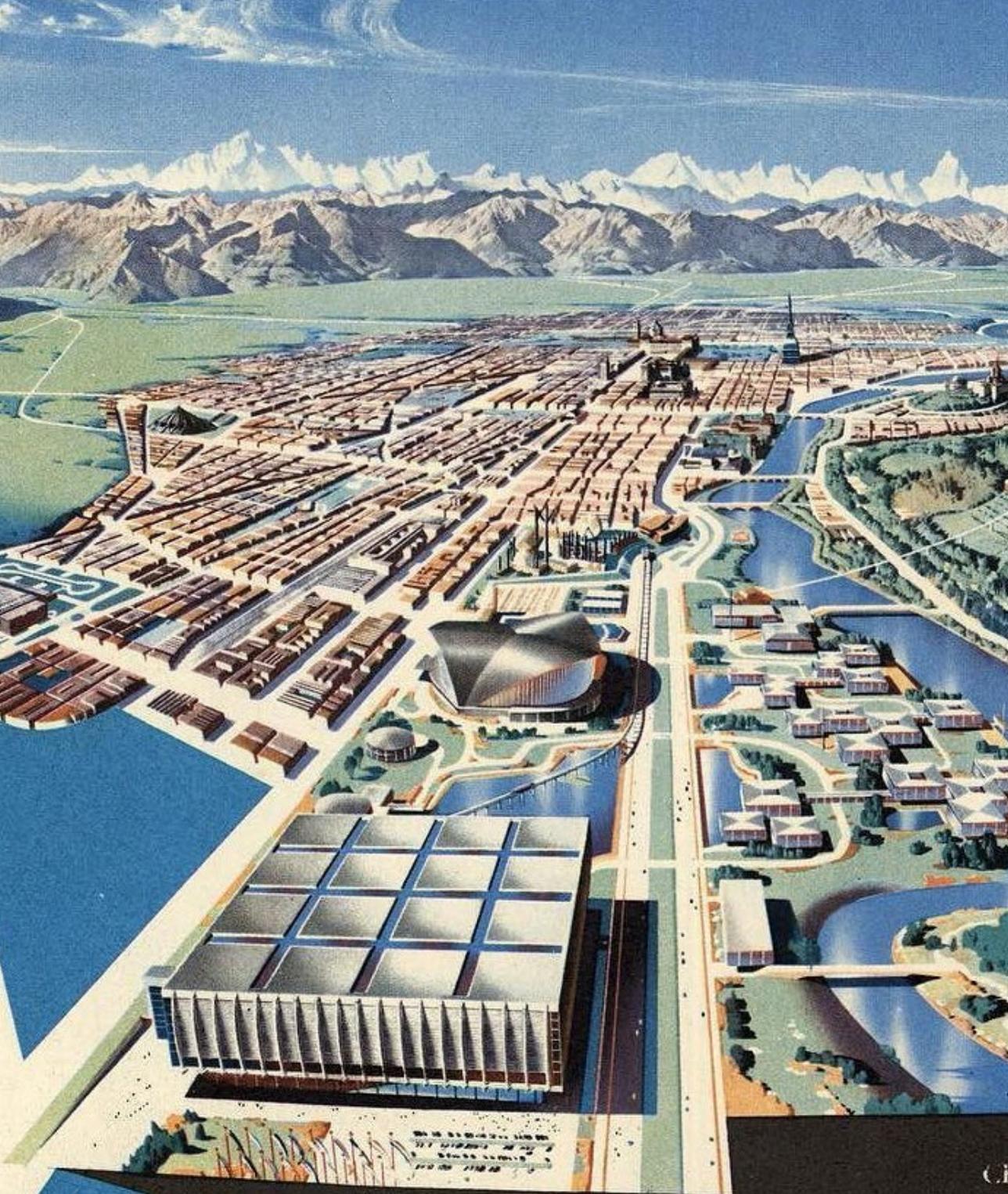
L'integrazione tra involucro e struttura, in caso di rivestimenti tessili, concedono molteplici spunti per un utilizzo innovativo di materiali di nuova generazione e non, diversi tra loro, ma facilmente integrabili, efficienti sia dal punto di vista funzionale che tecnologico. La leggerezza strutturale dei componenti tessili influisce anche sul processo costruttivo, è sostanzialmente un cantiere a secco, caratterizzato da elementi prodotti in fabbrica

Le chiusure tessili nelle fasi del processo edilizio relative alla realizzazione, gestione e dismissione, sono caratterizzate da una serie di prerogative che ne permettono un'attenta gestione e dismissione. Tali sistemi, infatti, permettono di programmare la durata dei singoli componenti, in base alla durata scegliere la tecnica di assemblaggio reversibile più adatta.

NOTE

- 1 Negroponte, 1970
- 2 Oosterhuis & Xia, 2007
- 3 Fox, 2016
- 4 Kolarevic, 2009
- 5 Musacchio, 2009
- 6 Bottero , Rossi, Scudo, & Silvestrini, 1984
- 7 Frampton, 1995
- 8 Capasso, 2005

Il FASE: *esplorazione del caso studio*



torino

M A G G I O - O T T O B R E 1 9 6 1

CE
CE
M
M
ES
M
ES

STORIA DEL PALAZZO DEL LAVORO

Torino nel 1961

Nel 1961, a Torino, venne organizzata l'Esposizione Internazionale del Lavoro, come celebrazione del centenario dell'Unità d'Italia. In questi anni, si registrò una crescita demografica della città, dai 719.300 abitanti del 1951 si arrivò ai 1.124.714 nel 1967, oltre che un notevole incremento di posti di lavoro. Un esempio fu la crescita dei dipendenti della FIAT che, nel corso del 1960, passarono da 92.000 a 107.000. Ciò fu probabilmente una conseguenza dell'aumento della produzione, infatti in quell'anno la FIAT superò il mezzo milione di vetture prodotte, cosa che gli fece conquistare il secondo posto tra le aziende automobilistiche dopo la Volkswagen.¹

Tuttavia, dietro alla prosperità economica che caratterizzava Torino in quegli anni, erano presenti malessere e disagio sociale, causati dal flusso sempre più numeroso di immigranti che necessitavano di ogni servizio e bene. Ciò ha portato ad un aumento del ritmo con il quale si costruivano edifici residenziali, portando la città a densificarsi sempre di più. Le imprese dovevano quindi sopperire velocemente ad una domanda di tipo quantitativo, dovendo rinunciare alla qualità del costruito. Nacquero così i quartieri di estrema periferia, come Mirafiori e Falchera, che risultavano essere delle città dentro la città, in quanto non sembravano avere nessun tipo di connessione con Torino se non quello di tipo lavorativo. Nel caso della Falchera, da un punto di vista architettonico, il complesso fu un'opera di rilievo: infatti, in quegli anni, il quartiere della Falchera poteva essere preso come esempio architettonico che proponeva diversi tipi abitativi. Veniva risolta la necessità di sopperire urgentemente alla richiesta abitativa tramite interventi settoriali e spesso di tipo privato, per evitare i fenomeni che si riscontrarono spesso nelle periferie delle altre grandi città italiane, mantenendo così un decoro urbanistico della città. Altro insediamento di natura popolare, caratterizzato però da un'impostazione monoculturale, composto quindi interamente da immigranti, fu il quartiere Le Vallette (1959). Esso rappresentava un modello di architettura per le sue caratteristiche innovative; venne uti-

lizzato, anche se inizialmente sprovvisto di servizi e di ogni collegamento, per accogliere i visitatori delle manifestazioni del 1961. Questo era il clima che caratterizzava la nascita del complesso delle celebrazioni del Centenario dell'Unità d'Italia.

Già in precedenza, la città aveva accolto una delle prime Esposizioni Internazionali per la celebrazione del Cinquantenario dell'Unità d'Italia, nel 1911. L'idea di ospitare nuovamente questa celebrazione trovò subito molti sostenitori, come il sindaco, l'avvocato Amedeo Peyron, che nell'autunno del 1956 affidò l'incarico di preparare tutti gli elementi necessari alla realizzazione di un progetto di massima ad alcuni assessori municipali. Due anni dopo, successivamente alla nomina del comitato ordinatore composto da 32 membri e presieduto dal prof. Alessandro De Magistris, venne riconosciuto alla città di Torino il diritto di celebrare l'evento.²

Nel 1958, vennero presentati il bilancio preventivo, la bozza di statuto e il programma della manifestazione. In quest'ultimo, erano espressi il periodo nel quale si doveva tenere l'esposizione, che sarebbe iniziata il 1° maggio 1961 e si sarebbe conclusa il 31 ottobre

L'on. Gronchi si intrattiene con l'avv. Agnelli, il prof. A. M. Dogliotti e l'avv. Casati. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale pe la celebrazione del primo centenario dell'unità d'italia



Torino, 10 luglio 1961

La Società degli Ingegneri e degli Architetti di Torino, in occasione della Celebrazione del Primo Centenario dell'Unità d'Italia ha voluto portare il suo caldo contributo sia sul piano tecnico che sul piano organizzativo alle Esposizioni e Mostre del '61.

Di questo contributo sono una preziosa documentazione le conferenze tenute dagli Ingegneri e Architetti sugli aspetti strutturali architettonici e organizzativi, ad iniziativa del Presidente della Società, Ing. Mario Catella, a cui va in particolare il ringraziamento del Comitato « Italia '61 ».

Nerci, Rigotti, Levi, Renacco, Bertolotti, hanno con le loro dotte, documentate e brillanti conversazioni, illustrato ai colleghi ed al pubblico quale è stato lo scopo creativo, le difficoltà tecniche da superare, nonché le esigenze estetiche e organizzative con cui ci si



Palazzo del Lavoro. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia

dello stesso anno, l'elenco delle attività proposte, 3 mostre e 18 manifestazioni collaterali. Le mostre in programmazione erano: la Mostra Storica dell'Unità d'Italia, la Mostra delle Regioni e la Mostra Internazionale del Lavoro. Fu, inoltre, presentato lo statuto, dove erano definiti due enti preposti allo svolgimento della manifestazione:

Il comitato nazionale "Italia '61", presieduto dall'onorevole Giuseppe Pella, che aveva il compito di organizzare la mostra storica, la mostra delle regioni e l'Esposizione Internazionale del Lavoro, oltre alle altre manifestazioni su piano nazionale della Celebrazione del Centenario, presentate con lo slogan "Torino vi chiama".

Il comitato locale "Torino '61", presieduto dall'avvocato Giovanni Agnelli, avente lo scopo di organizzare e migliorare la ricettività cittadina, organizzare mostre ed esposizioni varie, programmare spettacoli e festeggiamenti, finanziare congressi di carattere nazionale ed enti cittadini per le opere connesse con le manifestazioni, pubblicizzare l'evento tramite il



Giovanni Agnelli di fronte al masterplan di Italia '61, Torino, Walter Mori, 1961

suo ufficio stampa, assumere a proprio carico spese generali e di personale.

La costruzione di palazzi e strutture accessorie alla manifestazione fu localizzata nel quartiere di Millefonti, situato in prossimità del polo ospedaliero torinese nonché nella zona periferica della città. A curare la mostra fu, invece, Gino Pestelli, capo della direzione stampa e propaganda della Fiat. Pestelli definì la mostra come “il palcoscenico ideale in cui ribadire l’identità dell’Italia quale nazione moderna, economicamente e socialmente progredita, ricca e orgogliosa della sua specifica tradizione culturale”³, ma la vedeva anche come un modo per dare a Torino, ormai ex-capitale, un nuovo volto, quello di metropoli della produzione industriale. Fu, inoltre, Pestelli ad affidare nel 1959 all’architetto milanese Gio Ponti l’incarico di progettare l’allestimento dell’Esposizione Internazionale

Fase di costruzione del Palazzo del Lavoro, Sergio Poretti, Roma ►



del Lavoro, oltre all'incarico di progettazione urbanistica dell'area destinata alla mostra. Ponti iniziò già nel luglio dello stesso anno a studiare l'impostazione della mostra, senza però poter avere un quadro completo prima di sapere come sarà il "contenitore" dove verrà allestita la mostra.

Infatti, per la progettazione del palazzo che avrebbe ospitato l'Esposizione Internazionale del Lavoro, venne indetto un concorso d'appalto dal Comitato Generale Nazionale per la celebrazione del Centenario dell'Unità d'Italia nel luglio del 1959, al quale parteciparono, sotto invito, le seguenti imprese:

Nervi & Bartoli;

Ing. Guerrini & C.;

Ing. Guffanti, Borini padana spa;

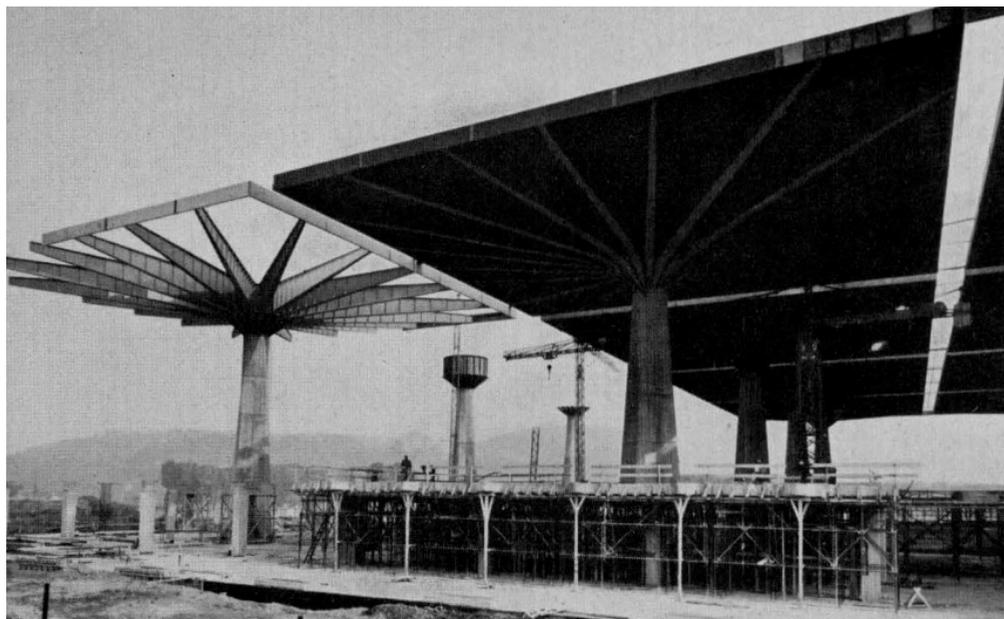
Ing. E. Recchi & soc. Savigliano;

Soc. Dalmine, Ilva e Terni.

Come riportato nei documenti degli Affari di Gabinetto del Sindaco del 20/10/1960 venne scelto all'unanimità il progetto dell'Ing. Pier Luigi Nervi, in quanto, anche se non rispecchiava precisamente le richieste del bando, rispondeva ai requisiti economici e garantiva la realizzazione nei tempi stretti richiesti dal bando. Quest'ultimo fattore fu forse quello che più influenzò la scelta del progetto vincitore.

Il Palazzo del Lavoro

Il Palazzo del Lavoro, progettato e realizzato da Nervi, era unico per dimensione e forma. Esso si estendeva per 25000 mq e doveva essere realizzato in dieci mesi. Per rispettare i tempi, si dovette ricorrere ad un sistema che ne semplificasse la costruzione e che fosse realizzabile in serie, utilizzando elementi singoli autosufficienti, in modo tale, una volta



▲ Fase della costruzione. Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia

▼ Paolo Monti allestimenti interni al Palazzo del Lavoo per l'esposizione di Italia '61



ultimato un determinato numero di essi, da poter gettare il solaio perimetrale e collocare le vetrate. La soluzione adottata fu la divisione dello spazio di copertura in un determinato numero di solai autoportanti ed eseguibili autonomamente, sorretti da enormi pilastri a forma di fungo, ottenendo così un grandioso risultato.

Tuttavia, nonostante fosse stato accettato, il progetto originario del concorso subì delle variazioni, studiate da Nervi in accordo con Ponti, prima di essere presentato nel maggio del 1960 come definitivo. Il salone, da seminterrato, viene sollevato al piano di campagna e la balconata fu ridotta dai 60 metri inizialmente previsti ad una decina di metri, in modo da poter eliminare, come definita da Ponti, la “selva di 182 pilastrini che lasciava in vista solo le 4 colonne centrali e chiudeva la vista alle altre”⁴. Persino durante il cantiere, Ponti suggerisce dei cambiamenti; come per esempio la provenienza dell’illuminazione della grande sala che, secondo Ponti, doveva provenire solamente dal basso per fare risaltare meglio le colonne e la raggiera di travi. In seguito, a più riprese, Ponti rivendicò le modifiche apportate al progetto di concorso e Nervi non mancò di riconoscere il merito all’amico.

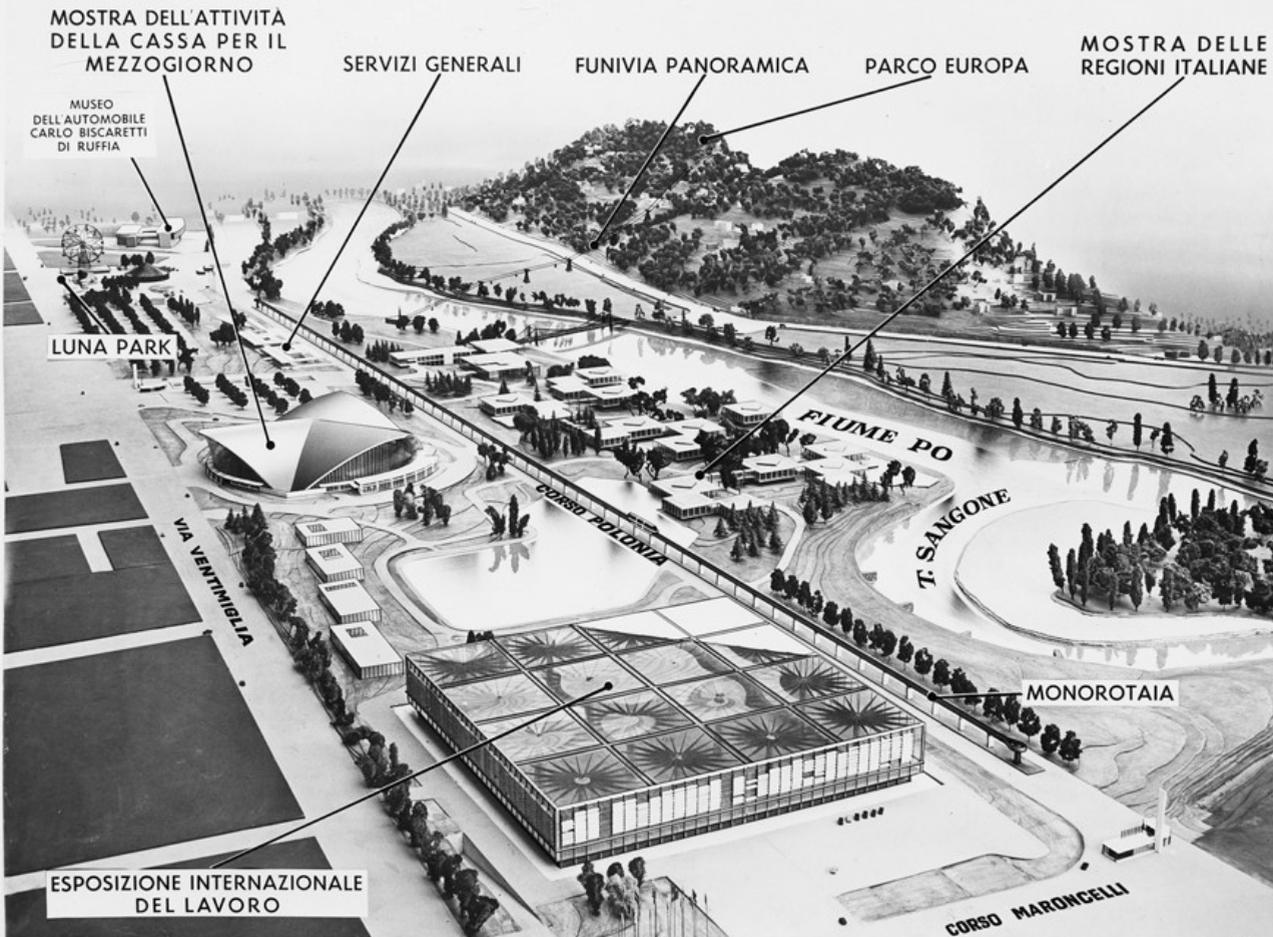
Il Palazzo venne completato in soli diciassette mesi, contemporaneamente allo studio per gli allestimenti, organizzati oltre che da Giò Ponti anche da Giancarlo Pozzi, quando fu completato l’allestimento era in parte già stato realizzato. Ciò ha comportato l’impossibilità di comprendere, da parte di Ponti e dei suoi collaboratori, la reale percezione spaziale del Palazzo, se non quando furono completati sia il cantiere del palazzo stesso sia l’impostazione dell’allestimento.

L’esposizione internazionale del lavoro

L’esposizione del lavoro aveva come tema “l’uomo al lavoro. 100 anni di sviluppo tecnologico e sociale: conquiste e prospettive” e vi parteciparono 19 nazioni e 5 organismi internazionali. Era suddivisa in due sezioni principali: quella perimetrale dedicata alle nazioni ed organismi internazionali partecipanti e quella centrale riservata all’Italia. Tra le due zone vi era un corridoio di passaggio per i visitatori che consentiva la vista dell’intero

CELEBRAZIONI CENTENARIO UNITA D'ITALIA - TORINO MAGGIO-OTTOBRE 1961

PLASTICO DELLA ZONA DELLE ESPOSIZIONI



Locandina di presentazione dell'evento. Fonte: museotorino.it

edificio. Fu compito di Ponti progettare le strutture temporanee all'interno del Palazzo del Lavoro in modo tale da mostrare il più possibile gli imponenti pilastri e la copertura, a volte isolandole con l'utilizzo di alte pareti. Era inoltre accentuato il fattore di temporaneità delle strutture interne della mostra grazie anche ai materiali utilizzati: alluminio e plexiglass per la suddivisione degli spazi perimetrali e acciaio inossidabile riflettente per le barriere della sezione italiana. Era tuttavia evidente dall'allestimento la difficoltà che ha riscontrato Ponti a studiare un percorso espositivo all'interno del palazzo di Nervi, che era affascinante ma al tempo stesso gigantesco e privo di proporzione e ritmo spaziale.⁵

Per la sezione dell'Italia, delimitata da mura che riproducevano l'andamento del bastione fortificato della città di Lucca, si è optato per la suddivisione dello spazio in nove am-

bienti in successione. Per ciascuno dei temi contenuti nella mostra italiana fu appaltata alle grandi società industriali italiane dell'epoca che incaricarono, a loro volta, architetti e artisti italiani di realizzare spazi e volumi, giocando con luci naturali e artificiali, colori e materiali per raggiungere un'armonia ambientale.

Per la sezione estera, Ponti aveva inizialmente pensato di coinvolgere architetti di leva internazionale, come Paul Rudolph e Kenzo Tange, oltre ad aver tentato senza successo di contattare Carlo Mollino. Decise infine, in accordo con il Comitato Ordinatore, di affidare parte della progettazione dei padiglioni stranieri agli architetti torinesi che furono esclusi dai concorsi per la costruzione dei palazzi realizzati per l'evento.

Le altre strutture

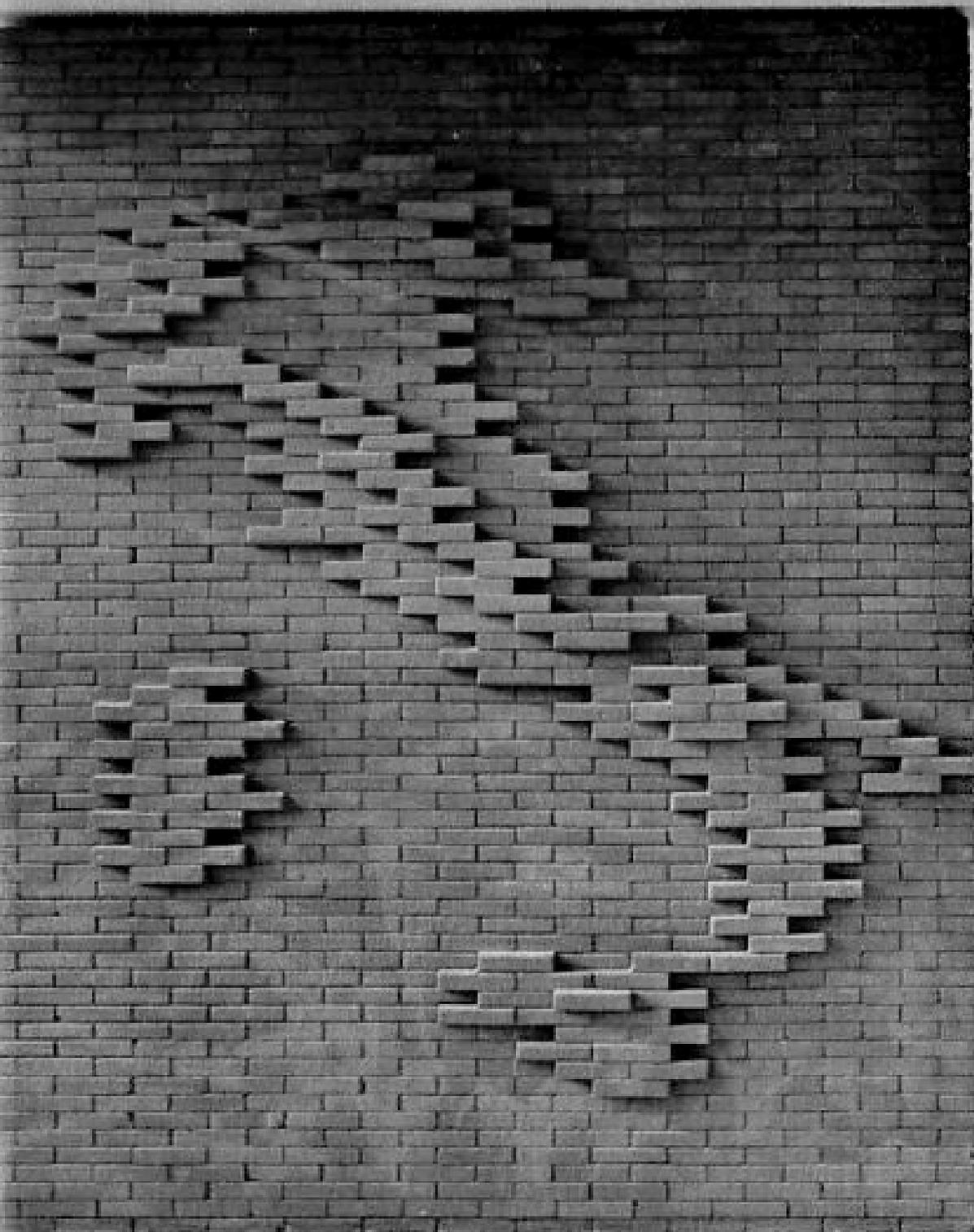
Altre costruzioni hanno avuto grande importanza durante l'esposizione, uno dei più importanti fu quello dedicato alle mostre: il Palazzo a Vela, detto anche Palavela, chiamato così per la forma della sua struttura, realizzata con un sistema a cupola formata dall'intersezione a crociera di tre volte. In questa sede venne accolta la mostra della moda, a cura del cavaliere Pininfarina, dal titolo "Moda, stile e costume", che aveva come obiettivo quello di rappresentare i vari aspetti della vita contemporanea.

Di rilevante importanza furono anche le costruzioni che ospitarono la mostra delle regioni, sviluppata in 19 singoli padiglioni disposti lungo la riva del Po. Questi padiglioni, 11 dei quali di vaste dimensioni, si integravano ed armonizzavano in un unico comprensorio che rispecchiava in tutto l'integrazione logica delle grandi mostre.

Non meno importanti furono le altre costruzioni accessorie, come la fontana luminosa, il circarama, realizzato da Walt Disney, l'ovovia diretta al parco Europa di Cavoretto, la cappella realizzata dagli architetti Romano e Rizzotti, il ponte sul Po e la monorotaia, che collegava i due ingressi dell'area dedicata all'Esposizione: il Museo dell'Automobile (In-

Mostra delle Regioni, Ingresso al padiglione unitario. ►

Fonte: la Celebrazione del Centenario, a cura del Comitato nazionale per la celebrazione del primo centenario dell'unità d'Italia



gresso Nord) e il Palazzo del Lavoro (Ingresso Sud).

Ultima, non per importanza ma per collocazione, era la Mostra Storica, che venne allestita all'interno di Palazzo Carignano. In questa mostra, vennero esposti i più importanti cimeli provenienti dai musei del Risorgimento di Torino e di Milano, oltre che da quelli provenienti dalle altre città italiane che furono luogo fulcro del risorgimento italiano: Firenze, Venezia, Roma, Napoli, Palermo, Vicenza, Perugia e Brescia.

Vennero inoltre organizzati due ricevimenti che si tennero a Palazzo Madama e nella Pallazina di Caccia di Stupinigi, oltre che una serie di festeggiamenti che ebbero come scenario l'area del parco del Valentino e il comprensorio espositivo.⁶

Il destino di Italia '61

Rimaneva però un problema: come riutilizzare le strutture, compresi i due enormi palazzi, una volta terminati i festeggiamenti? Purtroppo, non si riuscì a trovare una funzione che potesse essere ospitata a tempo pieno dal Palazzo a Vela. Esso accolse, infatti,

Incendio al Palazzo del Lavoro. Fonte: Il Corriere, 2015





Fotoinserimento della proposta di rifunzionalizzazione in centro commerciale. Fonte: Studio Rolla, 2014

sporadicamente mostre ed esposizioni, in alternanza con l'edificio non molto lontano di Torino Esposizioni, fino a quando nel 2003, in occasione dei Giochi Olimpici Invernali che si tennero a Torino nel 2006, venne completamente riqualificato su progetto dell'architetto Gae Aulenti, che prevedeva la demolizione quasi completa dell'edificio originario del quale venne mantenuta soltanto la caratteristica copertura a forma di vela. Fu convertito in palazzetto del ghiaccio dove, durante i Giochi Olimpici, si tennero le gare di pattinaggio di figura e short track. Attualmente, la pista di pattinaggio è aperta al pubblico durante i periodi invernali.

Non fu altrettanto fortunata la sorte del Palazzo del Lavoro. Come già detto, uno dei requisiti della gara d'appalto per la costruzione del Palazzo del Lavoro, era garantire la possibilità che potesse essere utilizzato come sede del Centro Nazionale per l'Istruzione Professionale una volta che le manifestazioni fossero finite. Sfortunatamente, non fu utilizzato né come previsto nel bando di costruzione né come proposto in fase di progettazione da Nervi: utilizzarlo come Palazzetto dello Sport. Purtroppo, non si riuscì a trovare nessuna funzione che potesse essere ospitata dall'enorme struttura, che rimase quindi pressoché inutilizzata, salvo alcune manifestazioni, fino al completo abbandono. La struttura attualmente risulta fatiscente, conseguenza dell'evidente abbandono e degli incendi di origine dolosa che ha subito nel corso del 2015. Attualmente sono in corso le trattative riguardo ad una riqualificazione dell'edificio. Nel 2007 infatti la società Gefim ha acquistato, insieme a Fintecna, dal demanio pubblico la proprietà della ormai fatiscente struttura. Il progetto di riqualificazione, in accordo con il colosso olandese Córío, prevede la trasfor-

mazione dell'imponente edificio in una galleria commerciale.

Il progetto per la trasformazione di Palazzo del Lavoro in un enorme centro commerciale è a cura dell'architetto Alberto Rolla.

La proposta per la riqualificazione prevede la realizzazione di una galleria commerciale all'interno dell'edificio, ispirata a quelle già presenti in centro a Torino (San Federico e Subalpina), quattro piazze pubbliche ed un'area verde situata di fronte all'edificio.

Per la galleria commerciale sarebbero riservati il piano terra e il primo piano, mentre verrà riservato il secondo piano alla ristorazione. Una grande piazza centrale interna, sulla quale si affacceranno i negozi, permetterà di ammirare le grandi colonne preesistenti realizzate da Nervi. Saranno, inoltre, realizzati un ascensore panoramico che porterebbe ad una piazza situata sul tetto, un impianto fotovoltaico di ultima generazione che si estenderebbe per due dei moduli che compongono la copertura dell'edificio e una passerella pedonale che collegherebbe la monorotaia con il centro commerciale. Nel progetto sono comprese la realizzazione di una nuova rotonda su via Ventimiglia ed un parcheggio interrato di due piani che ospiterebbero 1800 posti auto. Per la realizzazione del parcheggio, però, saranno abbattuti i 260 alberi presenti nell'area del parco limitrofa al Palazzo del Lavoro, con la promessa di "compensare" la loro rimozione e al loro posto sarà realizzato, con molta probabilità, un prato pubblico che sovrasterà l'area del parcheggio coperto.

Per la progettazione degli spazi verdi, la società olandese Cório ha incaricato il paesagista tedesco Andreas O. Kipar, già noto per la mutazione della Ruhr in parco naturale. Il progettista trasformerà il giardino antistante al Palazzo del Lavoro in uno spazio composto da due piazze pubbliche e fontane. Il suo compito sarà aggiungere degli spazi verde di qualità che potranno essere vissuti anche durante la sera.

Il progetto per la trasformazione del fatiscente edificio in un centro commerciale è stato però bloccato, nonostante fosse stato approvato dalla soprintendenza, a causa del ricorso presentato al Tar dalla società immobiliare 8 Gallery del Lingotto. Il Tribunale amministrativo regionale ha, infatti, accolto il ricorso annullando la delibera del Comune che avrebbe avviato la realizzazione del progetto di riqualificazione principalmente per due motivi:

il primo è che il Comune ha optato una variazione parziale al piano regolatore anziché una strutturale per velocizzare la procedura ed imporre meno vincoli. Una variazione strutturale avrebbe, infatti, richiesto il coinvolgimento di un maggior numero di enti e di un maggior numero di accorgimenti. Il secondo motivo è stato il fatto che il Comune ha approvato la realizzazione del centro commerciale con un'estensione di 13 mila metri quadri quando sarebbe stato possibile fare edificare non più di 6 mila metri quadri, considerando il nuovo complesso come un centro commerciale naturale, cioè un agglomerato di singoli negozi, anziché considerarlo come il progetto di un unico complesso.

Render interno della proposta di rifunzionalizzazione in centro commerciale. Fonte: Studio Rolla, 2014



NOTE

- 1 Fofi, 1964
- 2 Buscioni, 1990
- 3 Pace, Chiorino, & Rosso, 2005
- 4 Pace(cur.), Nervi, (2011)
- 5 Zevi, Cronache di architettura, 1971
- 6 Mostra delle regioni, 1961



Esque de Miyake

METAPROGETTO

Lettura critica del contesto

Il Palazzo del Lavoro è inserito in un contesto caratterizzato sul confine di interventi urbanistici disorganici e frammentati.

Via Ventimiglia rappresenta il limite di un disegno rigoroso composto da edifici a corte che caratterizzano tutta Torino, dalla parte opposta è collocato invece il “non progetto” del parco fluviale del Po, a fare da filtro tra queste due realtà molto differenti, è collocato il Parco Italia '61 nel quale è inserito anche il Palazzo del Lavoro.

Ad evidenziare la frammentazione dell'area contribuisce anche l'accessibilità della stessa. La presenza dei due assi Via Ventimiglia e Corso Unità d'Italia, molto trafficati e legati agli spostamenti dei pendolari, superabili solo attraverso passaggi sopraelevati o passaggi pedonali, non sempre rispettati dagli automobilisti, scoraggia alcuni dei potenziali usufruttuari.

Censendo le attività insediate nell'area circostante al Palazzo del Lavoro si percepisce come l'area di Italia '61 non sia solo un confine per quanto riguarda il disegno della città ma anche nelle funzioni che vi sono collocate. Dal lato di Via Ventimiglia si ha una distribuzione piuttosto omogenea di esercizi commerciali di diversa tipologia e di immobili ad uso residenziale, dal lato di Corso Unità d'Italia invece sono stati collocati diversi stabili dove hanno sede aziende o enti come: la Società Metropolitana Acque Torino, il Centro Internazionale di Formazione dell'OIL (BIT), Autostrada Torino Savona, il Centro UNESCO di Torino, l'Autocrocetta ed altri concessionari. Nella fascia di Italia '61, invece, sono presenti scuole e centri sportivi che comunicano già con il quartiere. Ciò dovrebbe consigliare un riuso del Palazzo del Lavoro come polo culturale, che possa mantenerlo aperto e permeabile al resto della città trascinato, anche, dal progetto Corona Verde,¹ data la sua vicinanza con il Parco Fluviale del Po.

◀ Foto della genesi del progetto

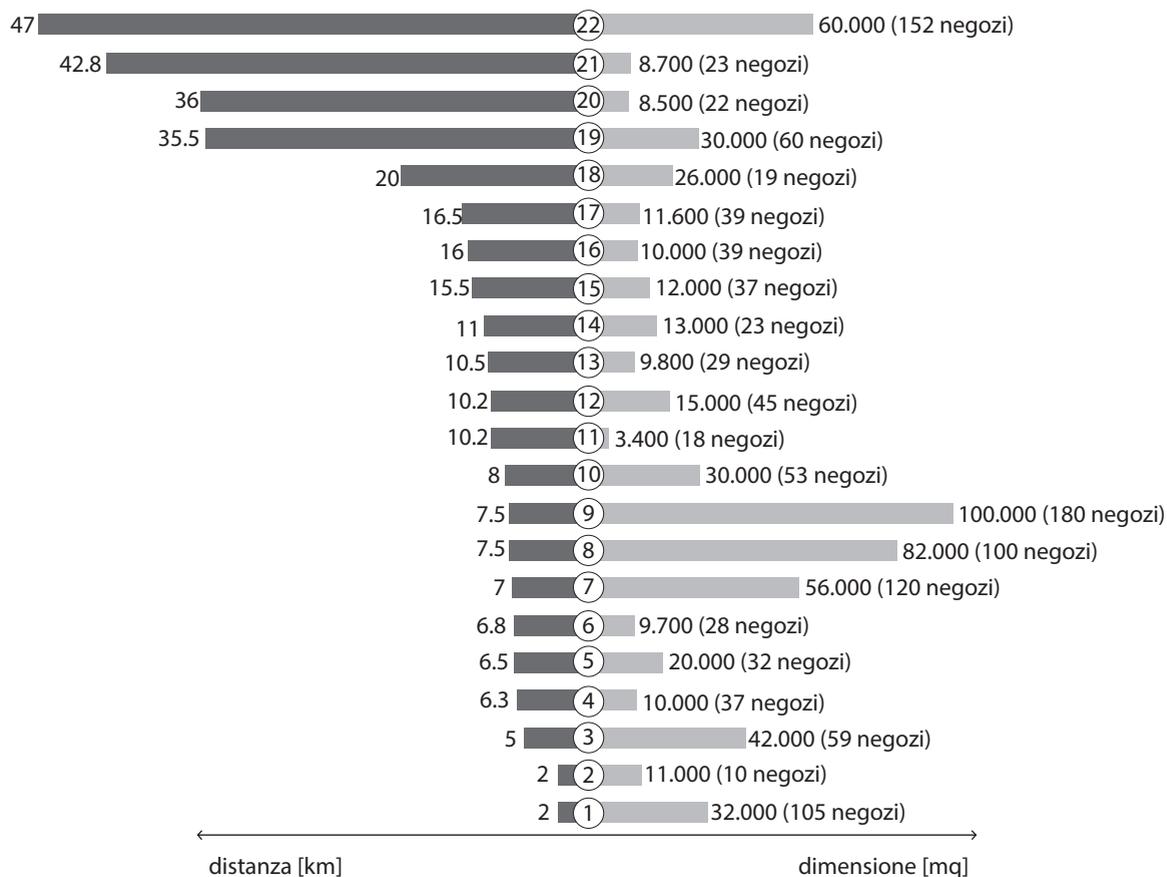
Il Parco Fluviale del Po, in Torino, ha la potenzialità di collegare Italia '61 ad altri poli turistici come: il Museo dell'Automobile, la Cittadella della Salute, il Sommergibile Andrea Provana, il Borgo Medievale, il Castello del Valentino, il Museo dell'Orto Botanico, la zona dell'ex Zoo di Torino, il Motovelodromo "Fausto Coppi" e diversi centri sportivi.

Il confine con il vicino Comune di Moncalieri, invece, è un luogo senza una caratterizzazione, con spazi destinati a parcheggi o a funzioni raggiungibili in auto, il trasporto pubblico, essendo una zona periferica per entrambi i comuni, è in mano ai sevizi extraurbani, sicuramente si ha del potenziale latente in quanto nella vicina piazza Bengasi la Linea 1 della metro avrà il suo capolinea. Con questo intervento si vorrebbe incoraggiare, per gli spostamenti motorizzati, la scelta di un trasporto pubblico a discapito di quello privato (trasporto pubblico 27%- trasporto privato 73%²) e a diminuire il traffico pendolare.

Nel 2015 l'ex assessore Lo Russo con ha voluto sottolineare il concetto che *"Innovazione, conoscenza e cultura sono gli assi attorno ai quali si deve muovere la politica"* presenta il Piano Strategico "Torino Metropoli 2025". Uno degli obiettivi di "Torino Metropoli 2025" è quello di riqualificare e risanare lo spazio che circonda edifici dismessi come il Palazzo del Lavoro (oltre al Palazzo del Lavoro si è previsto il riuso anche dell'ex stabilimento Westinghouse, le acciaierie Thyssen, la vecchia Manifattura Tabacchi, lo scalo dismesso in Vanchiglia, le Officine Grandi Motori e anche gli stabilimenti FIAT di Mirafiori) attraverso l'organizzazione di nuove infrastrutture e servizi.³ La rifunzionalizzazione di questi spazi vuole essere dettata non solo dalle esigenze di mercato ma da un disegno più ampio che risponda anche alle richieste della città in modo che queste aree siano fruibili da parte dei cittadini i quali devono offrire proposte non cancellando la memoria storica di questi luoghi e così evitando che i grandi operatori gestiscano il disegno della città⁴.

L'idea di rifunzionalizzare il Palazzo del Lavoro trasformandolo in centro commerciale è stata osteggiata più volte sia per tutelare i negozi del quartiere sia perché la zona torinese è già satura di strutture di queste dimensioni. È importante sottolineare come a soli 2km di distanza sia presente l'8gallery, prodotto di un'operazione conclusa nel 2003. Altri sette centri, invece, sono a meno di 10 km di distanza. L'area prevalentemente residenziale non





- ① 8 GALLERY
- ② EATALY
- ③ I VIALI SHOPPING CENTER
- ④ PORTA NUOVA
- ⑤ PORTE DI MONCALIERI
- ⑥ LAGRANGE 15
- ⑦ LE FORNACI
- ⑧ MONDO JUVE SHOPPING CENTER
- ⑨ SHOPVILLE LE GRU
- ⑩ 45° NORD ENTERTAINMENT CENTER
- ⑪ LE SERRE SHOPPING CENTER

- ⑫ PARCO DORA SHOPPING CENTER
- ⑬ PIAZZA PARADISO
- ⑭ SNOS CENTER
- ⑮ LA CERTOSA
- ⑯ PANORAMA DI TORINO
- ⑰ AUCHAN TORINO NORD
- ⑱ SETTIMO CIELO RETAIL PARK
- ⑲ AREA 12 SHOPPING CENTER
- ⑳ AUCHAN VENARIA
- ㉑ CASELLE CENTER
- ㉒ LA PORTA DEL PIEMONTE



ATTIVITA' COMMERCIALI



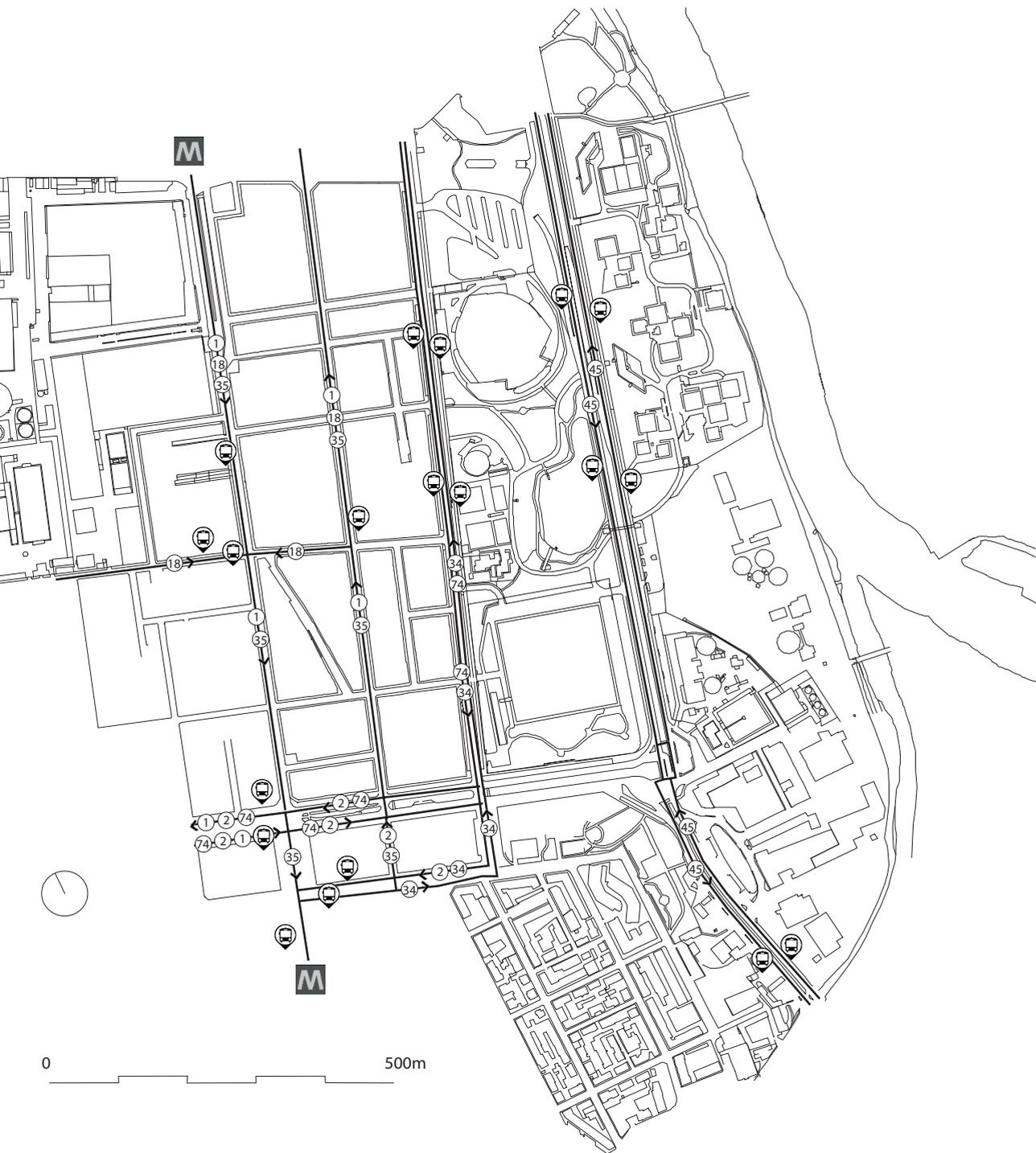
RISTORANTI E BAR



AZIENDE



SCUOLE E ATTREZZATURE
SPORTIVE



Identificazione dei mezzi di trasporto pubblico a servizio dell'area e dei relativi punti di fermata



Intensità del traffico veicolare medio registrato lunedì alle ore 7.00

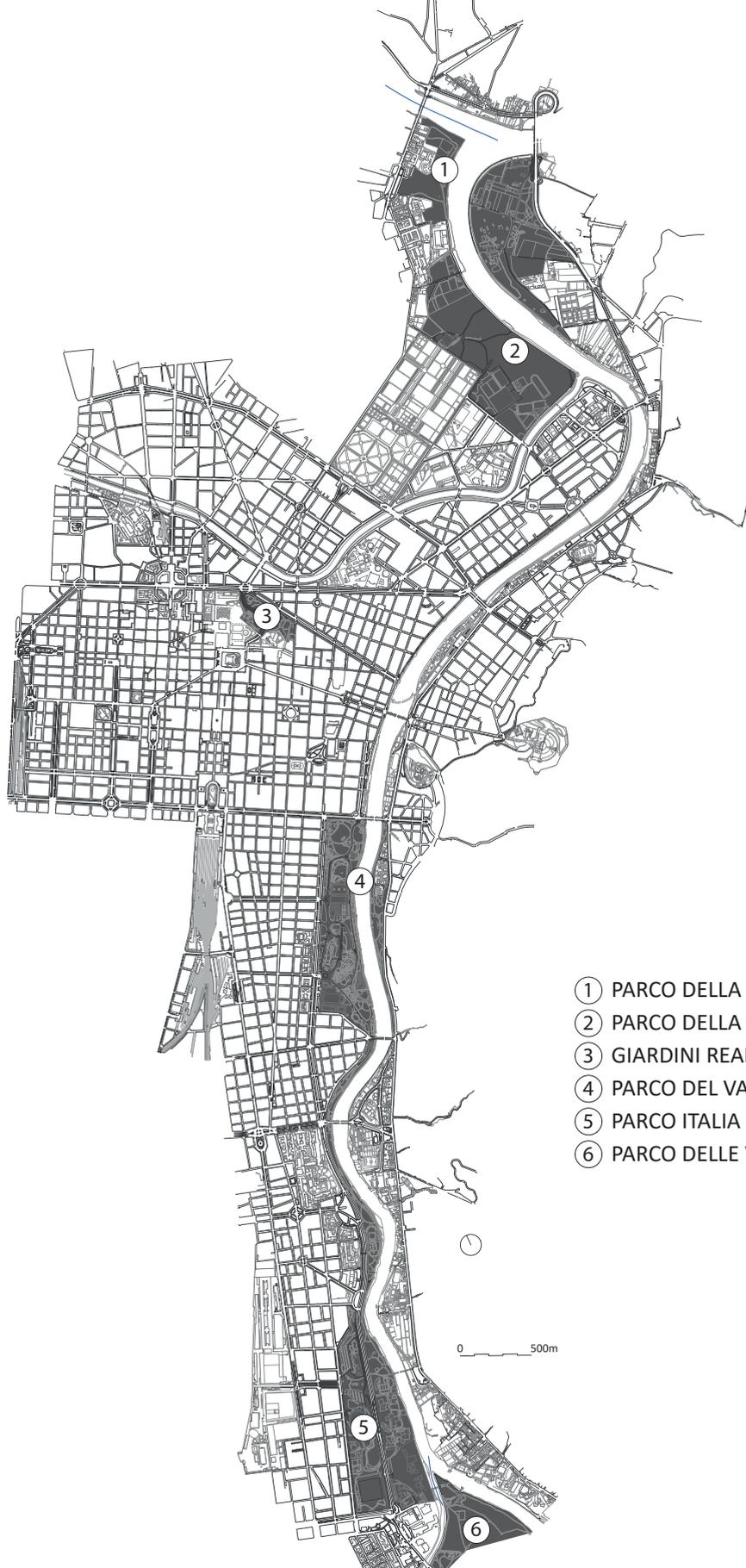


0 500m

Intensità del traffico veicolare medio registrato mercoledì alle ore 12.00



Intensità del traffico veicolare medio registrato venerdì alle ore 19.00



- ① PARCO DELLA CONFLUENZA
- ② PARCO DELLA COLLETTA
- ③ GIARDINI REALI
- ④ PARCO DEL VALENTINO
- ⑤ PARCO ITALIA '61
- ⑥ PARCO DELLE VALLERE

0 500m

favorisce tale funzione, in quanto solitamente questi grandi centri vengono edificati in prossimità di autostrade o tangenziali, inoltre, la Circoscrizione 9 ha richiesto che questo edificio potesse rimanere ad uso della comunità e che il suo valore storico ed architettonico non venga stravolto⁵.

Pub sotto la Cappella Sistina?

Il Palazzo del Lavoro, edificio come già detto fuori scala rispetto il contesto in cui è inserito, in questo momento, senza una funzione, non accessibile, abbandonato è percepito come un ripudio della città.

“Gli architetti progettano i fabbricati indipendentemente dai contenuti, poi sovrappiungono gli architetti allestitori che si affannano a riempire gli spazi predefiniti e generici. Alla radice di tutti i difetti estetici e tecnici delle architetture espositive sta questa dissociazione procedurale. Il perimetro del Colosseo è di 527 m, quello del Palazzo del lavoro raggiunge i 640m, la Basilica di san Pietro copre un’area di 15.160 mq e il Palazzo del Lavoro 25.000 mq. Ma a chi interessano questi dati? Il giudizio positivo su Italia ’61 si limita alla sistemazione urbanistica. Il resto è retorica, futilità più o meno macchinistica e folclore, tanto più che nessuno ha ancora inventato una possibile utilizzazione razionale del Palazzo del Lavoro a festa finita.”⁶

Il giudizio, molto critico, di Zevi vuole sottolineare come le dimensioni del Palazzo del Lavoro possano impedire un suo riuso futuro. I rapporti “monumentali” di scala che regolano la composizione del Palazzo del Lavoro condizionano irrimediabilmente la percezione che si ha di questa costruzione. Per questo motivo, fin da subito, non si è riusciti a trovare una nuova funzione permanente al Palazzo del Lavoro. L’esposizione di Italia ’61, curata da Gio Ponti, riuscì perché sottomessa⁷ all’architettura di Nervi. Da allora, questo edificio, si è isolato dal resto della città perdendo la possibilità di diventare un monumento e trasformandosi non in una rovina storica ma in un landmark della zona. Questa perdita di valore dell’architettura è sottolineata dalle motivazioni che hanno bloccato il centro commerciale in questi anni, ci si è limitati a dare giustificazioni economiche e commerciali

◀ Censimento dei parchi urbani del comune di Torino adiacenti al fiume Po

dimenticandosi invece il valore artistico di questo edificio.

Nonostante la sensibilità collettiva si sia evoluta dal '61 ad oggi il tema del riuso dei padiglioni espositivi è ancora attuale, si consideri come già prima che si fosse scelta l'area per Expo 2015 si parlasse di "Expo dopo Expo"⁸

"Non possiamo rischiare infatti di perdere la straordinaria occasione di fare del progetto di trasformazione del Palazzo del Lavoro un caso di risonanza nazionale e internazionale di una procedura innovativa di intervento su una delle architetture più simboliche del Novecento italiano"⁹

Il Palazzo del Lavoro, proprio per la sua posizione, all'ingresso di Torino, la sua dimensione, e per la sua storia, potrebbe diventare il simbolo della trasformazione di Torino da città industriale a città della cultura ed essere la testa di un percorso educativo che, seguendo il Parco Fluviale del Po, raggiunge il centro della città. Il suo fine in questo caso non è di tipo economico ma quello di salvaguardare il bene e rilanciare la città metropolitana di Torino ed il suo patrimonio artistico.

Ricordando la sua funzione iniziale per la quale è stato realizzato, enorme espositore, e studiando gli errori che hanno portato al suo abbandono: inserimento di funzioni che non si integravano con il tessuto della città, che non esaltavano l'architettura e sottodimensionate per lo spazio che andavano ad occupare; si deve ricercare una nuova funzione che possa non ripetere gli errori precedenti.

Utilizzare un'architettura elevata come il Palazzo del Lavoro per un centro commerciale, quindi omologarla a standard commerciali e privarla della sua storia significherebbe rinunciare ad una grande occasione di sviluppo e rilancio. Per valorizzare la Città del Vaticano inserireste un Pub sotto la Cappella Sistina? Perché farlo a Torino?

Illustrazione della proposta

Come già detto nei capitoli precedenti ad oggi il Palazzo del Lavoro è in stato di abbandono perché le funzioni che negli anni hanno cercato di occuparlo non sono riuscite a

rapportarsi con esso.

Ma dove risiede il motivo per il quale il Palazzo del Lavoro non riesce a rapportarsi con altre funzioni. Il problema, secondo Zevi, non risiede solamente nelle sue dimensioni, ma anche nella modalità progettuale:

“Della procedura dissociativa risentono anzitutto gli edifici. Le pareti vitree dell’immenso Palazzo del Lavoro avrebbero potuto animarsi, spezzando il blocco chiuso del parallelepipedo, qualora il contenuto ne avesse suggerito l’esigenza per motivi concreti, non soltanto formali. Ma bisognava capovolgere le fasi dell’operazione: prima, stabilire con esattezza -che cosa- si voleva esporre; poi, -come- allestire il materiale; infine, progettare gli involucri. Era l’unica, insostituibile condizione perché le architetture non fossero affidate a mere giustificazioni strutturali o estetiche, ma realtà pertinenti. ...”¹⁰

Partendo quindi da queste riflessioni si è cercata una nuova funzione all’altezza del contenitore e che potesse riavvicinare il Palazzo del Lavoro alla città nella quale è costruito.

Proprio durante l’analisi del quartiere di Nizza Millefonti si è riusciti a trovare la funzione, visto la vicinanza con il Museo dell’Automobile e il Sommergibile Andrea Provana è sembrato ovvio creare un sistema museale incentrato sul tema dei trasporti, date le imponenti dimensioni il museo dell’aeronautica è sembrata la soluzione più naturale per il contenitore nel quale si deve inserire.

La proposta di riuso si è impegnata nella ricerca di uno schema compositivo elastico che consentisse di ricucire il Palazzo del Lavoro con il suo contesto. Il fine è stato quello di creare strutture che potessero adattarsi al mutare delle esigenze del quartiere evitando così una mummificazione dell’opera di Nervi.

L’ingresso al Palazzo del Lavoro è garantito sia su Via Ventimiglia (prospetto Ovest) che sul Giardino Corpo Italiano di Liberazione (prospetto Nord). In prossimità degli ingressi vengono previsti degli spazi che potessero rispondere alle funzioni di biglietteria, book shop ed un’area bar/ristorante. Invece, a rapportarsi con i pilastri a fungo, sono stati inseriti i velivoli ed è stato previsto uno spazio che potesse essere sfruttato sia come percorso di mostre temporanee libere sia come piccola sala conferenze. Il piano terra, con questa

libertà compositiva, vorrebbe attirare i flussi pedonali della città al suo interno. Lo scopo è quello far riscoprire il Palazzo del Lavoro al quartiere in modo che non venga nuovamente recluso ai margini, per farlo si dà la possibilità attraversarlo liberamente per capire che cosa succede al suo interno e, se incuriositi, avere l'opportunità di fermarsi, altrimenti, di andare oltre. Le balconate costruite successivamente all'evento di Italia 61' sono state rimosse per ripristinare allo stato iniziale il manufatto. Sulla balconata risalente al periodo dell'esposizione è stata prevista la funzione museale, la posizione sopraelevata consente una visione differente dei velivoli ed una miglior gestione dei flussi.

Per evitare che le strutture possano irrigidire lo spazio e quindi non permettere un adattamento a richieste future il lavoro di tesi ha voluto ricercare soluzioni progettuali e tecnologiche non vincolanti. Per ricercare queste nuove forme e creare un abaco di soluzioni progettuali adatte si è applicato un processo interdisciplinare, allontanandosi dal mondo dell'architettura, intesa nel suo significato più tradizionale, avvicinandosi anche a campi più ingegneristici e artistici.

Particolare attenzione è stata spesa sul mondo degli origami in quanto, non solo consentono di creare molteplici forme e possono mutarle attraverso i loro cinematismi, ma anche per la loro caratteristiche statiche. Gli origami, infatti, raggiunta la loro fase di piegatura completa, sono rigidi per forma, la stessa rigidità che Pier Luigi Nervi ricercava all'interno delle sue architetture.

Con questo lavoro di tesi si vuole sottolineare, attraverso lo sviluppo di un progetto più di dettaglio di una struttura origami/cinetica, come l'obiettivo dell'architettura oggi non dovrebbe essere quello di ricercare soluzioni tecnologiche e costose, oggi i progetti dovrebbero essere non solo economicamente sostenibili ma anche socialmente. Questa ricerca della sostenibilità comporta che si debba seguire un iter metodologico interdisciplinare per far incontrare diversi attori che possano contribuire con le loro esperienze.

Questo momento storico, al contrario di come si potrebbe immaginare, è un buon momento per l'architettura, adesso è necessario effettuare l'integrazione tra ambiente "naturale" e mondo digitale. Bisogna effettuare un upgrade del nostro modo di pensare promuovendo una cultura del cambiamento e di condivisione, a volte anche in contrasto

con il sistema di regole oggi vigenti. Non è più possibile accettare i limiti di un processo architettonico tradizionale, si ha sempre di più la necessità di personalizzarlo e riconfigurarlo sbloccando nuove funzioni e realtà.

Alcune di queste funzioni le possiamo trovare nella digital fabrication. Con digital fabrication non si riferisce alla stampa di modellini 3D, ma è una rivoluzione che potrebbe coinvolgere il mondo delle costruzioni. I cambiamenti di paradigma attualmente in gioco nella progettazione architettonica contemporanea sono fondamentali e inevitabili. In un progetto digitalmente mediato le pratiche del passato appaiono improvvisamente irrazionali. Modelli di design capaci di repentine trasformazioni, continue e dinamiche stanno sostituendo le norme statiche dei processi convenzionali. Le relazioni prevedibili tra il design e le rappresentazioni vengono abbandonate a favore di complessità generate dal calcolo. Le geometrie topologiche e curvilinee sono prodotte con la stessa facilità delle geometrie euclidee di forme planari e forme cilindriche, sferiche o coniche. Griglie, ripetizioni e simmetrie potrebbero perdere la loro ragion d'essere in quanto la variabilità infinita è diventata fattibile come la modularità e la personalizzazione di massa. Mentre gli architetti si trovano sempre più a lavorare attraverso le discipline dell'architettura, della scienza dei materiali e della produzione, la relazione storica tra architettura e mezzi di produzione è messa in dubbio dai nuovi processi di progettazione, fabbricazione e costruzione. La fusione di quelle che fino a poco tempo fa erano imprese separate ha già trasformato altri settori come quello aerospaziale, automobilistico e navale, ma non è stato ancora raggiunto un impatto altrettanto significativo e a livello di settore nel mondo della progettazione e della costruzione di edifici¹¹.

NOTE

- 1 [“http://www.regione.piemonte.it/ambiente/coronaverde/web/”](http://www.regione.piemonte.it/ambiente/coronaverde/web/) il piano vuole promuovere la costruzione di percorsi ciclopeditoni che possano collegare i comuni dell’area torinese.
- 2 Comune di Torino, Piano Urbano del Traffico e della Mobilità delle persone, approvato con deliberazione del Consiglio Comunale in data 19 giugno 2002.
- 3 “Per promuovere sviluppo economico è necessario selezionare, ripensare e riprogettare a scala metropolitana spazi e luoghi urbani adatti alle sfide delle nuove economie e alla creazione di una diffusa qualità urbana” in Torino Metropoli 2025. Il terzo Piano Strategico dell’area metropolitana di Torino, Torino, Torino Internazionale, 2015, p.115-117
- 4 Guido Montanari, Memoria e genius loci. Il caso di Torino da città fabbrica a “città degli eventi”, in “Nuvole”, n.47, 31 marzo 2015, p.32.
- 5 Circoscrizione Amministrativa Nizza Millefonti – Lingotto. Filadelfia, Città di Torino. Provvedimento del Consiglio della Circoscrizione 9, Doc. N. 27/101110 marzo 2011
- 6 Zevi, 1961
- 7 [“http://pierluiginervi.org/category/focus-on”](http://pierluiginervi.org/category/focus-on)
- 8 [“http://www.ordinearchitetti.mi.it/it/notizie/dettaglio/862”](http://www.ordinearchitetti.mi.it/it/notizie/dettaglio/862)
- 9 [“http://pierluiginervi.org/category/focus-on”](http://pierluiginervi.org/category/focus-on)
- 10 Zevi, 1961
- 11 Kolarevic, 2001



GLI ORIGAMI

Le origini degli origami

Le strutture piegate della lamiera attirano sia architetti che ingegneri per le loro qualità strutturali, spaziali e plastiche. Le superfici sottili possono essere trattate da una serie di pieghe e quindi non solo coprono lo spazio ma fungono anche da elementi portanti. La variazione di luce e ombra sottolinea la plasticità dello spazio e dell'involucro e le pieghe creano non solo una profondità strutturale ma anche una percezione percettiva. Le pieghe danno ritmo allo spazio e le variazioni possono essere usate per sottolineare una sequenza spaziale ma anche per modificare la forza strutturale.

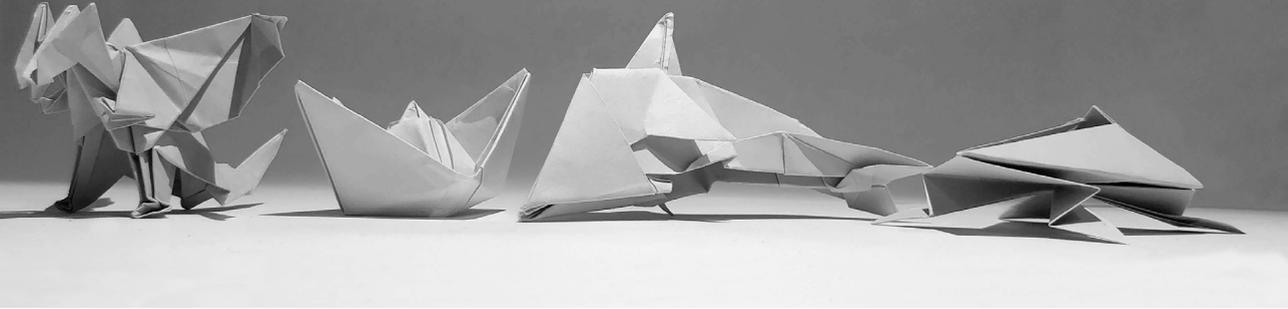
Una sottile superficie orizzontale può coprire una grande campata ma si piegherà sotto il suo peso morto. Le pieghe conferiscono alla superficie la resistenza per sostenere i carichi. Ogni faccia inclinata della superficie piegata agisce come un raggio ed è supportata orizzontalmente dalla faccia adiacente. Se il carico diventa troppo pesante le pieghe si apriranno e la superficie si piegherà. Pertanto, i bordi della superficie ondulata devono essere rinforzati per impedire l'apertura delle pieghe.

È interessante notare che lo sviluppo di strutture di strutture piegate è strettamente correlato ai nuovi materiali da costruzione. La loro implementazione richiede nuovi metodi di costruzione e offre nuove possibilità strutturali.

Origami, dal giapponese ori=piegare e kami=carta, La tecnica, l'arte di creare mediante la semplice piegatura di fogli di carta, e di regola senza l'uso di forbici o colla, figure bi- o tridimensionali che rappresentano esseri viventi, oggetti, fiori, forme astratte.¹

L'obiettivo dei primi origami era quello di ricercare i caratteri che contraddistinguevano la forma dell'oggetto che si voleva rappresentare e di rappresentarlo attraverso quei tratti fondamentali che ne descrivevano l'essenza.

◀ Richard Sweeney, Paper Sculpture, 2009



Realizzazione di origami che ricercano la forma finita. Da sinistra: drago, barca, delfino e rana

Le origini di tale tecnica si possono far risalire solo dopo l'invenzione della carta, circa il 105 d.C. in Cina. Alcuni autori sostengono che gli origami siano nati in Cina in quanto uno degli schemi più antichi, il junk, è molto simile all'antica imbarcazione usata ancora oggi inventata in Cina.² L'origine cinese è anche ricercata in un'antica usanza funebre che voleva accompagnare il defunto nell'aldilà bruciando monete di carta.³ Sfortunatamente però non ci sono documenti antichi in lingua cinese che possano attestare con certezza l'origine dell'origami a questa nazione, nonostante la carta per quasi 500 anni fosse stata solo a loro disposizione. Invece, la letteratura giapponese è ricca di riferimenti: prima venivano realizzati origami per le funzioni religiose, poi si è evoluta fino a diventare un tratto distintivo di questa nazione.

Nello studio della storia degli origami vengono distinte la tradizione giapponese da quella occidentale. Questo tipo di arte nella tradizione giapponese è nata per celebrare i defunti e poi da solo fine religioso e celebrativo si è diffusa fino ad essere inserita come insegnamento per i bambini, quindi, dato le sue origini è molto più importante il procedimento e la fase di costruzione e analisi piuttosto che la forma finita. In occidente si parla di origami già prima dell'avvento della carta, durante i banchetti i tovaglioli venivano piegati a scopo decorativo per rappresentare frutta o animali, in questo caso era molto più importante la forma finita piuttosto che il procedimento. Altre differenze si hanno nel tipo di costruzione, la tradizione giapponese solo se necessario effettua pieghe preliminari, se effettuate vengono presentati sia schemi a griglia che a raggera, la tradizione occidentale, invece, predilige la costruzione di pieghe preliminari a griglia che aiutino nella costruzione successiva.

Nonostante sia un'arte antichissima solo a metà del secolo scorso grazie alle esibizioni di New York e Amsterdam di Aikira Yoshiwazawa diventa popolare e materia di studio da parte dei matematici, ingegneri e architetti al di fuori della cultura nipponica ed è da

questo momento che si inizia a parlare di origami moderno. Questo nuovo interesse aprì, in modo definitivo, la strada a nuove sperimentazioni affinando quest'arte fino a trovare le giuste relazioni tra pattern e forma e così riuscire a riprodurre qualunque forma.

L'origami moderno, identifica il momento in cui si passa da uno studio non programmato di tradizioni ad un'attività programmata a livello globale. Vengono introdotte nuove tecniche di piega come il wet-folding e l'odierno sistema di notazione per il disegno dei pattern.

Le occasioni che l'Origami offre nella realizzazione di strutture complesse vanno ricercate nella capacità di piegare fogli sottili lungo determinate direzioni, sono il risultato naturale tra lo spessore e le dimensioni del foglio che possono essere considerate piane. Questo tipo di rapporto, tra spessore quasi nullo rispetto alle altre due dimensioni, permette ai modelli Origami di poter variare nella loro dimensione senza variare la movimentazione: la stessa geometria utilizzata per disegnare un determinato pattern può essere utilizzata a livello architettonico, quindi macro-scala, come a scala nanometrica.



Una delle più vecchie pubblicazioni riguardanti gli Origami, Senbazura Orikata, 1797

I sistemi Origami nell'ambito dell'ingegneria strutturale su grande scala oggi si possono suddividere in tre sottoinsiemi: strutture dispiegabili, strutture che vengono sfruttate per la capacità di movimentazione, strutture che grazie alla resistenza per forma migliorano la propria portanza meccanica.

Gli innumerevoli campi di applicazione degli origami hanno spinto sempre di più matematici, architetti, ingegneri e fisici a ricercare nei pattern determinate soluzioni di cinematico. Esempi di queste ricerche sono gli studi condotti da Mark Schenk e Simon D. Guest presso l'Università di Cambridge, i quali hanno introdotto una nuova struttura a guscio ripiegata, superficie corrugata costituita da gusci sottili connessi da pieghe rigide, che nonostante il singolo elemento sul piano teorico si può considerare un continuum, a scala globale riesce ad adattarsi a curvature di tipo gaussiano. La ricerca dimostra che è possibile identificare la forma globale di una struttura origami partendo dalle deformazioni delle singole unità, quindi in assenza di forze esterne la geometria dominante dipenderà esclusivamente dal pattern.⁴

Lo scopo di una seconda ricerca, condotta presso l'Università di Tokio da Tomohiro Tachi, è stato quello di modellare a partire da pattern origami forme tridimensionali prestabilite. Il risultato di quest'indagine è stato la scrittura di tre software differenti: origamizer, il cui scopo è quello di ottenere un modello tridimensionale partendo da un elemento piano, FreeFormOrigami, che effettua il processo inverso e RigidOrigami, il quale una volta inserito il pattern di partenza mostra le fasi di piegatura. Tachi ha anche studiato il comportamento di origami costituiti da pannelli spessi posizionando cerniere cilindriche al centro dello spessore dei pannelli, per poi eliminare le parti che sarebbero risultate intersecanti una volta piegato il pattern.⁵

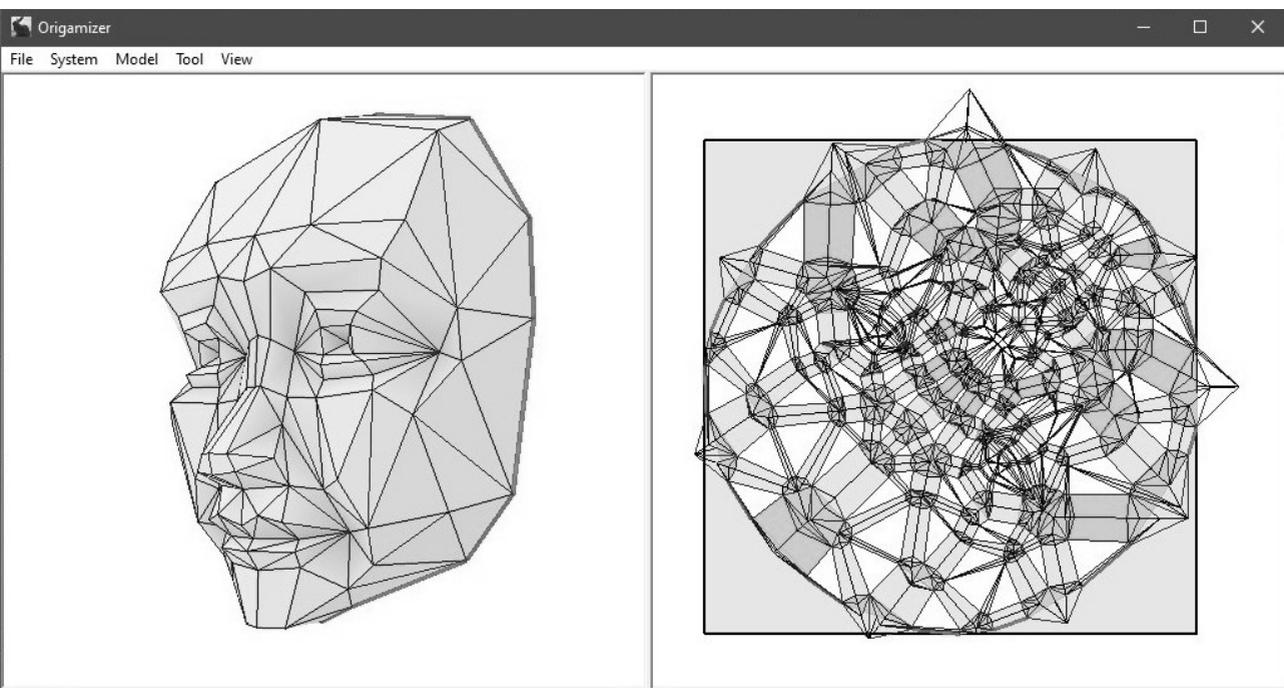
Presso l'École Polytechnique Fédérale di Losanna si sono condotti studi riguardanti anche le proprietà meccaniche dell'intera struttura origami e delle singole giunzioni, attraverso la creazione di modelli su vasta scala.⁶

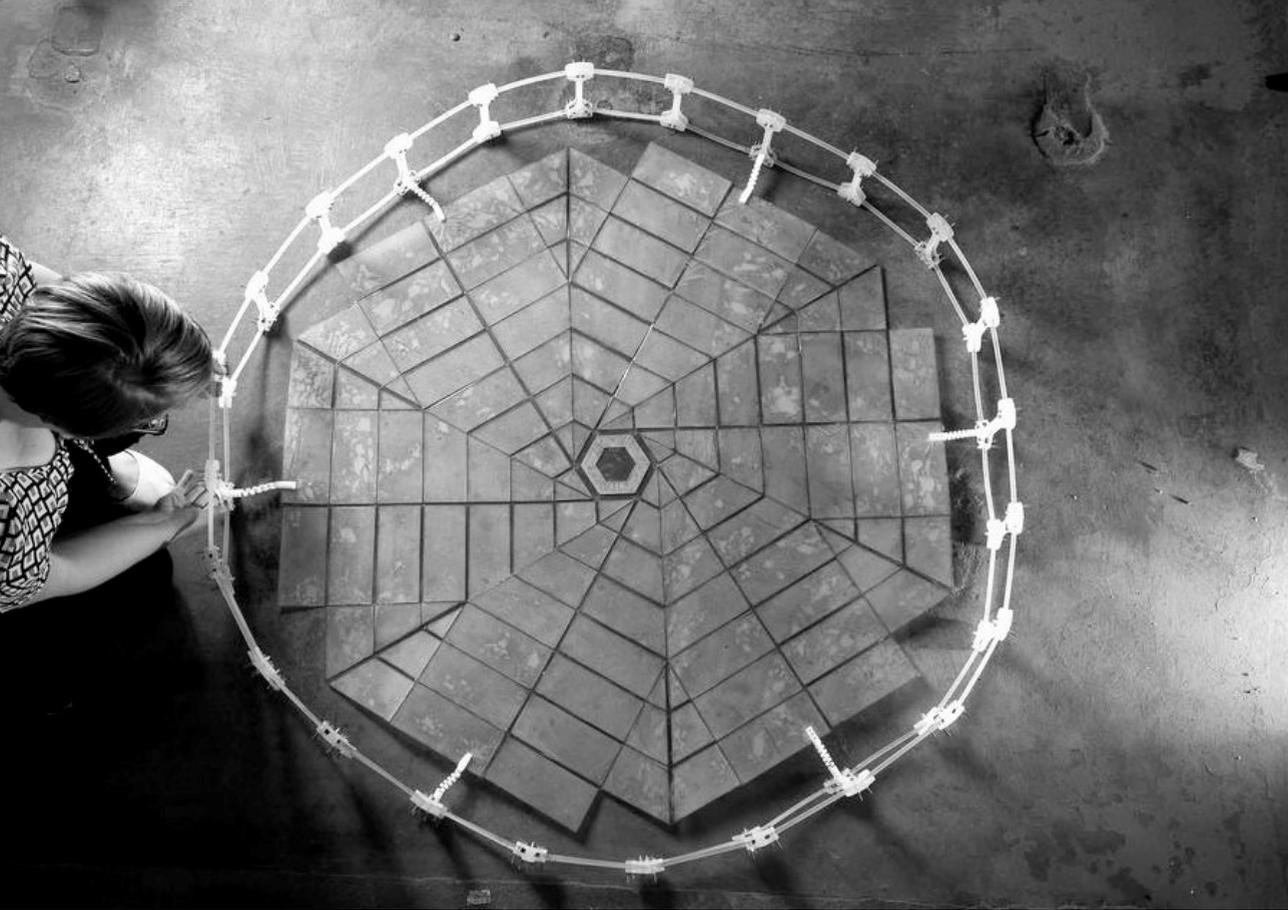
Campi di applicazione

Come è già stato scritto precedentemente i primi origami erano usati come oggetti decorativi, dovevano riprodurre oggetti di uso comune o forme naturali, adesso i campi di applicazione variano dall'architettura, al design, all'ingegneria e alla fisica. Questo interesse multidisciplinare è spiegato dalle molteplici potenzialità trovate in diversi settori: quello statico, caratteristica delle strutture corrugate è l'aumento di rigidità nonostante la loro leggerezza; quello costruttivo, singolare è la loro costruzione che partendo da un foglio e solo attraverso le pieghe, senza tagli o giunzioni, ottiene la forma desiderata; e quello dinamico, notevole per lo sviluppo di organismi ripiegabili.

I matematici hanno sentito il bisogno di avvicinarsi a quest'arte per indagare gli aspetti geometrico-fisici che regolano il movimento dell'origami. In particolare, si sono spese molte energie per capire quali forme si potessero ottenere attraverso semplici pieghe. Kawasaki seguendo questo filone di ricerca è riuscito a determinare un'equazione che stabilisce se un determinato pattern è flat-foldable o meno. Diversi sono anche gli algoritmi che partendo da una free-form ricercano il pattern piano che una volta piegato la approssima il più possibile.

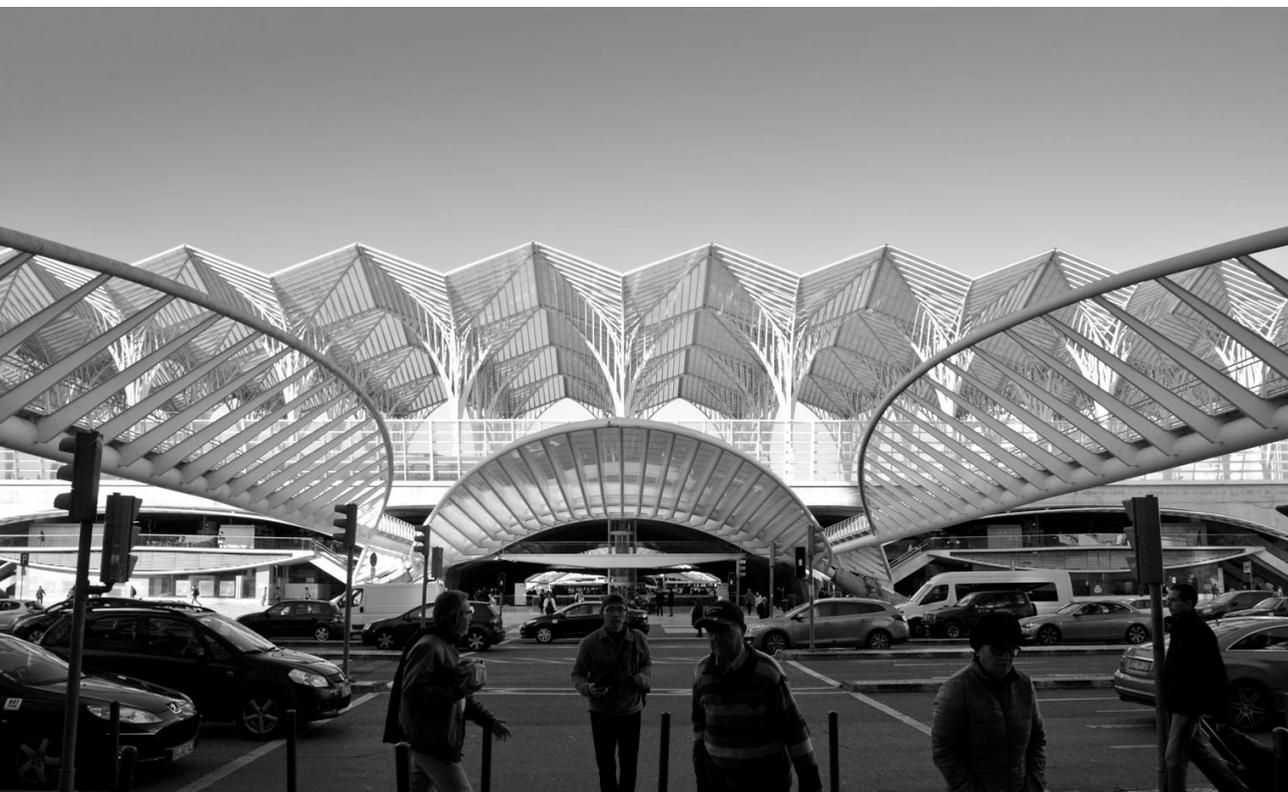
Screenshot interfaccia grafica Software eseguibile Origamizer





▲ Prototipo di pannello solare richiudibile, Jet Propulsion Laboratory NASA, 2014

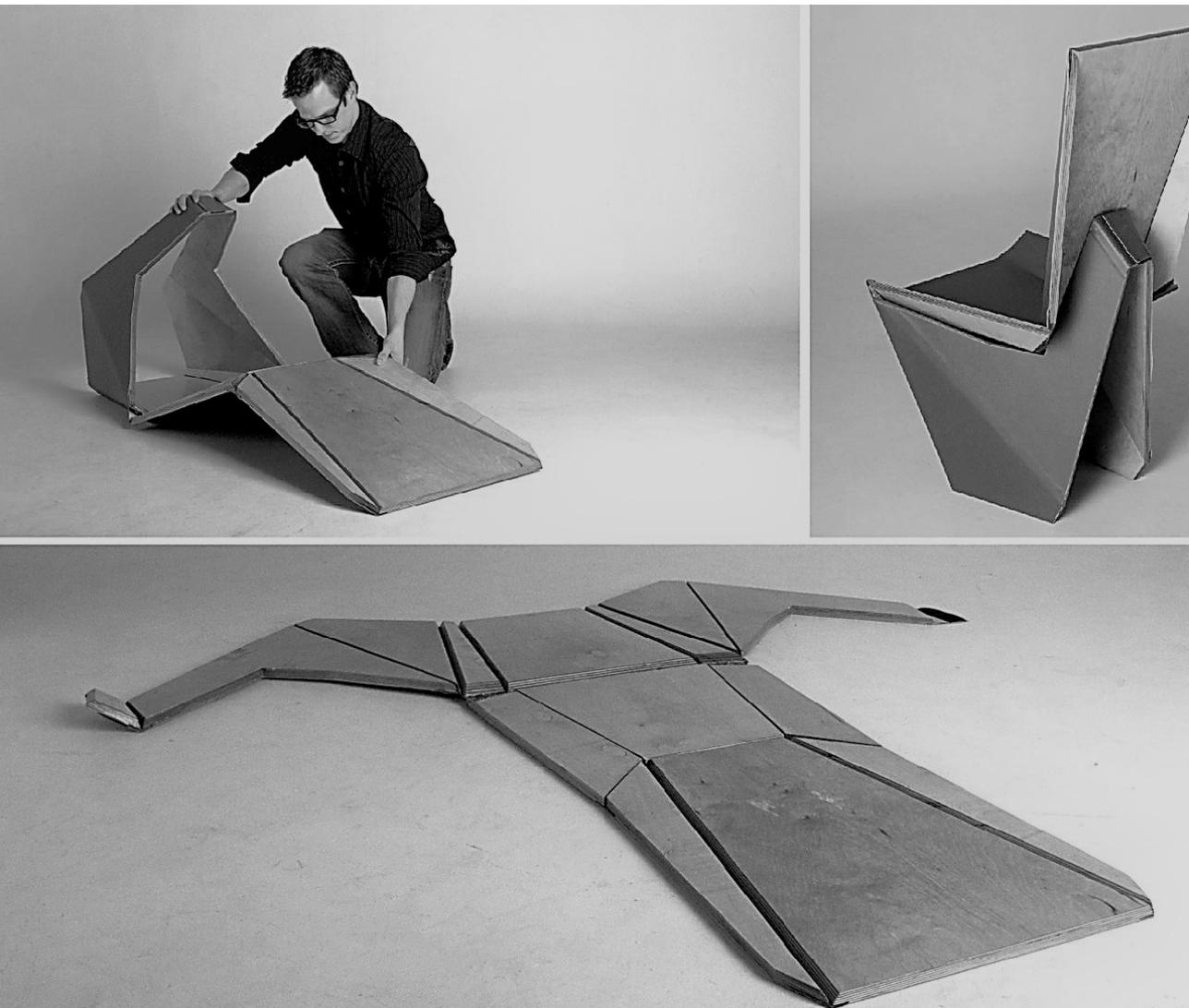
▼ Stazione d'Oriente, Santiago Calatrava, Lisbona, 1998



Gli ingegneri aerospaziali ispirati dagli origami hanno creato diversi componenti di sonde ed alcuni aerei. Le deployable structures fanno proprio delle pieghe il loro punto di forza, questo tipo di strutture durante il trasporto viene ripiegata su sé stessa riducendo così il volume, si dispiega quando necessario, esempi di questa ricerca sono i pannelli solari dei satelliti e la Inflatable Antenna Experiment del 1966 per la stazione internazionale.

Sempre in campo ingegneristico, ed ancora in piena fase di studio, gli origami hanno ispirato anche la creazione dei metamateriali. I metamateriali sono materiali capaci di riconfigurarsi oltre allo stato iniziale garantendo performance differenti grazie alle caratteristiche del loro pattern di base capace di alterarsi dinamicamente. I pattern usati per

The Flat Stanley Origami Chair, Brett Mellor, 2016



la creazione dei metamateriali sono caratteristici degli origami rigidi, la loro peculiarità risiede nella capacità di non deformare o incurvare i tasselli che rimangono planari, la possibilità di movimento risiede solamente nelle pieghe di questi pattern.

In ambito medico sono stati sviluppati degli stent chirurgici vascolari da collocare nelle arterie dove queste sono occluse.

Gli origami in architettura invece, vengono usati sia come fonte d'ispirazione per i concept progettuali, un esempio è la copertura della Stazione Oriente di Lisbona progettata da Calatrava, sia per lo sviluppo di nuovi dettagli tecnologici che sfruttano le proprietà cinetiche per migliorare le condizioni di confort ambientale all'interno degli edifici, un esempio è l'Investment Council Headquarters ad Al Bahar.

Nel campo del design, essendoci meno vincoli, gli origami riescono ad esprimersi più liberamente. Gli esempi spaziano dai semplici rivestimenti interni, a elementi d'arredo, diverse sculture sia statiche che cinetiche, giocattoli, alcuni capi d'abbigliamento in grado anche di seguire la crescita di chi li indossa e lo studio di un nuovo packaging che, nonostante risparmi materiale, garantiscano maggior rigidità alla confezione.

Le basi degli origami

“basics are basics. What was basic yesterday will be basic tomorrow. Basic are the constants, the unchanging foundations upon which creative work can be built”⁷

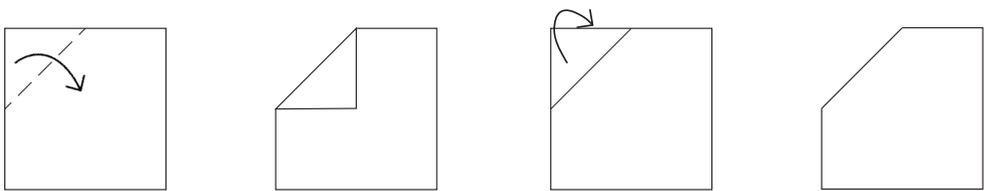
Piega: La piega origami è l’atto di incurvare il foglio fino a delineare un segno lineare chiamato linea di piega. A seconda dell’angolo di chiusura si ottengono angoli differenti.

Valley fold: In origami le pieghe valley sono pieghe con angolo convesso, contrassegnate da una linea tratteggiata e da una freccia piena nera.

Mountain fold: In origami le pieghe mountain sono pieghe con angolo concavo, contrassegnate da una linea tratto punto.

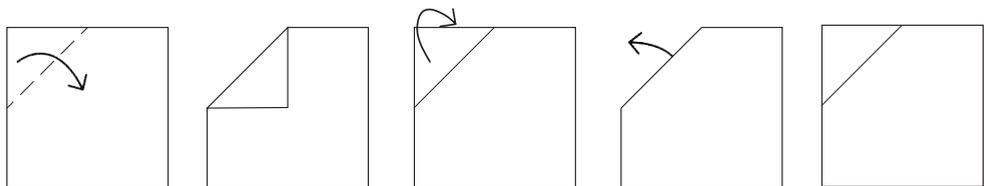
Schema di piega: è l’insieme delle linee disegnate sul supporto da piegare successivamente.

Schema di piegatura: è l’identificazione sullo schema di piega della tipologia di linea che descrive l’origami, quindi se linea di valley o di mountain. È l’insieme delle istruzioni per ottenere l’origami voluto.



1. Valley fold

2. Mountain fold

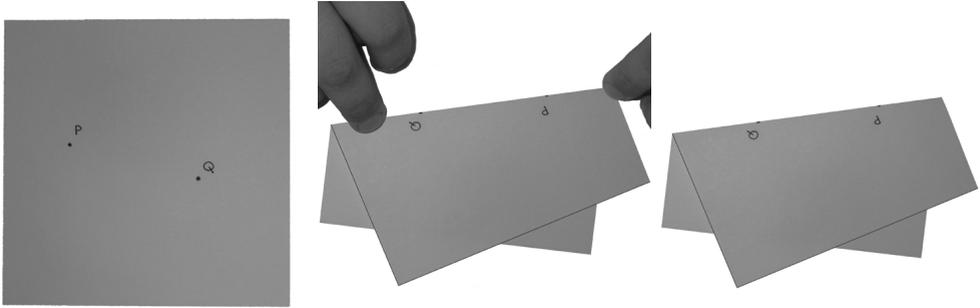


1. Universal fold

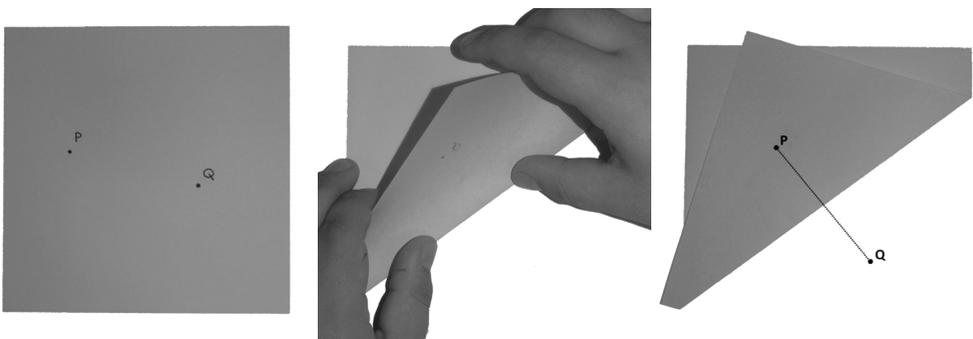
Le rappresentazione delle pieghe base degli origami

“Gli assiomi di Huzita-Hatori:

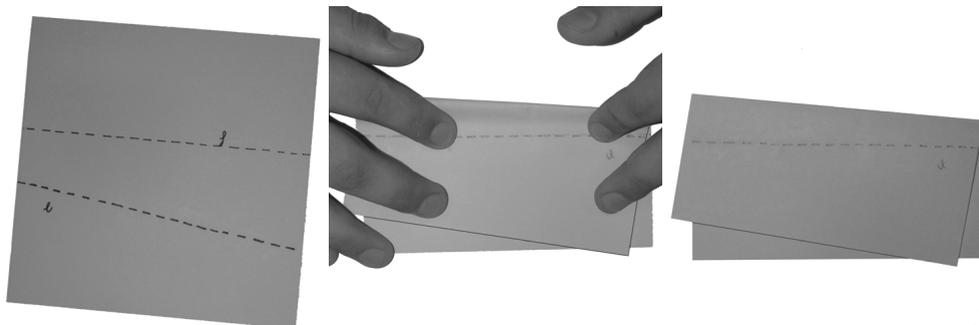
- 1- *Dati due punti P e Q esiste una piega che passa per entrambi. È evidente l'operazione da eseguire, basta ribaltare una porzione di foglio di carta in modo che la piega passi per i due punti dati.*



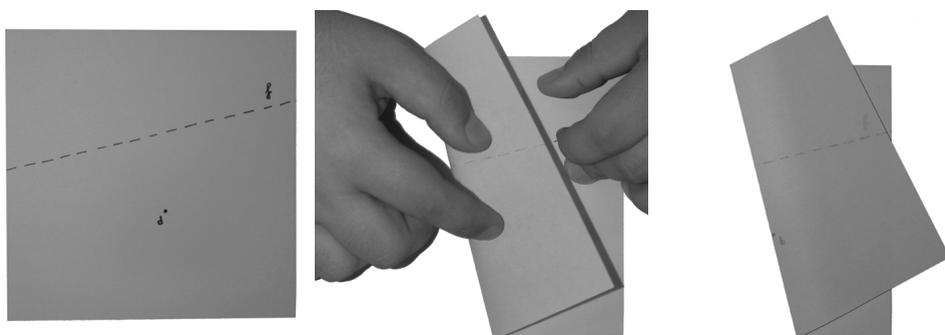
- 2- *Dati due punti P e Q esiste un'unica piega che porta P su Q . Per realizzare la piega ribaltiamo una porzione di foglio in modo che i due punti si appoggino uno sull'altro*



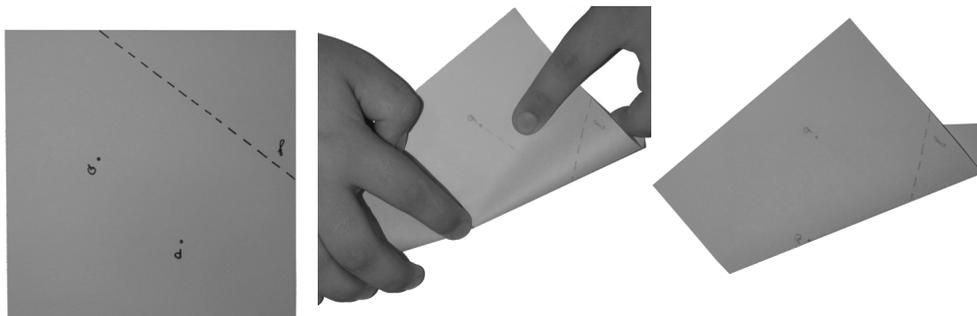
- 3- Date due linee rette l e f , esiste una piega a che porta l su f . In questo caso il ribaltamento della porzione di piano da la possibilità di individuare la sovrapposizione delle due rette e quindi di fare la piega



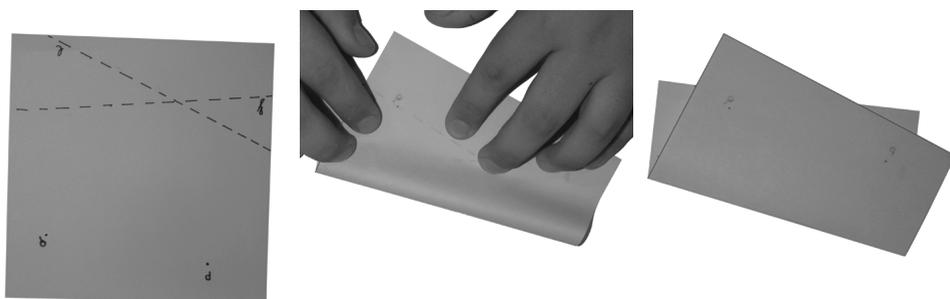
- 4- Dati un punto P e una retta f , esiste una piega perpendicolare alla f che passi per P . In questo caso per risolvere il problema di costruzione della piega dobbiamo effettuare uno scivolamento: pieghiamo il lembo in modo che la retta f si sovrapponga a se stessa e quindi la facciamo scivolare fino a che la piega non si appoggia al punto P .



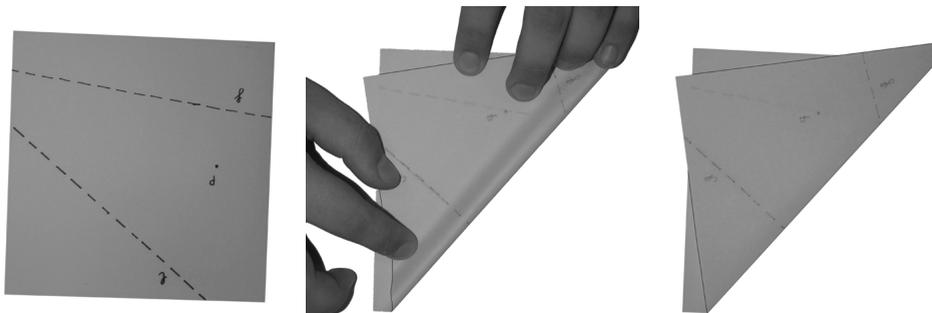
- 5- *Dati due punti P e Q e una retta f , esiste una piega passante per Q che porta P su f . Nella pratica prima si propone un ribaltamento che determini una iniziale piega che passa per Q , poi si ruota la piega obbligandola a passare per Q , facendo scivolare la porzione di piano che contiene P fino a che questo non si sovrappone alla retta f .*



- 6- *Dati due punti P e Q e due rette f e l , esiste una piega che porta P su l e Q su f . In questo caso due sono le operazioni che dobbiamo compiere, prima ribaltiamo la porzione di foglio di carta in modo che il punto P cada sulla retta l , poi facciamo scorrere questo punto P sulla retta l fino a che il punto Q non si appoggia alla retta f . Abbiamo quindi due operazioni: il ribaltamento e lo scivolamento che agiscono contemporaneamente per risolvere il problema.*



- 7- *Dati un punto P e due rette l e f , esiste una piega perpendicolare a l che porta P su f . Ribaltiamo la porzione di foglio in modo che la retta l ricada su se stessa e facciamola scivolare sul piano, quando il punto P si porta sulla linea F facciamo la piega.*⁸



La piega

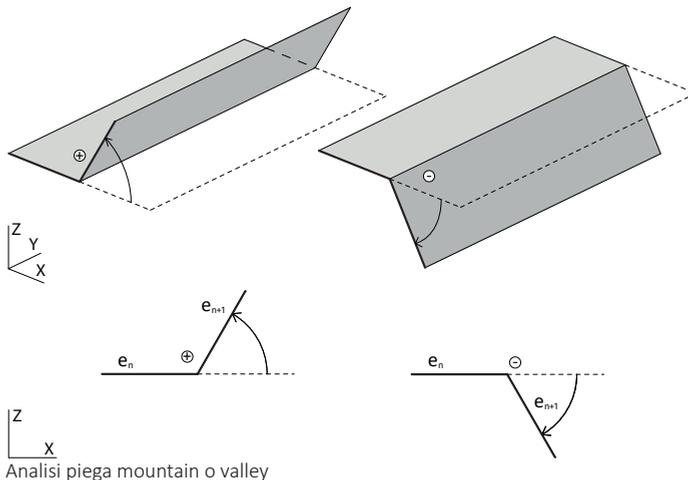
“Nulla è come appare. Proprio come un pezzo di carta può essere più di un pezzo di carta negli origami, diventando una gru, un pesce o un fiore, così un samurai non dovrebbe mai sottovalutare le proprie potenzialità nel piegarsi alla vita. Un samurai deve sforzarsi di diventare più di quanto appaia in un primo momento, deve superare i propri limiti più evidenti. Questo è ciò che ci insegnano gli origami.”⁹

Così Chris Bradford definisce la piega e gli origami, come atto, strumento di evoluzione in qualcosa di diverso che possa superare i limiti iniziali.

La corrugazione semplice è la prima delle pieghe, uno dei modi per ottenerla è quello di eseguire una successione di pieghe parallele con orientamenti diversi, gli orientamenti definiscono una piega montagna, nel caso si formi un angolo convesso, o concava, nel caso si formi un angolo concavo. Per descrivere questo tipo di pieghe e il loro movimento Buri ne inserisce una all'interno di un sistema di coordinate ortogonali tra loro, in seguito, ne descrive le fasi in base al loro comportamento nello spazio.

Sviluppata: è la fase iniziale nella quale la superficie è piatta e le pieghe sono rappresentate da un insieme di linee che giacciono sullo stesso piano. In questa fase iniziale il volume della superficie si sviluppa solamente sul piano orizzontale.

Parzialmente piegata: è una fase intermedia nella quale le pieghe sono attivate, non sono

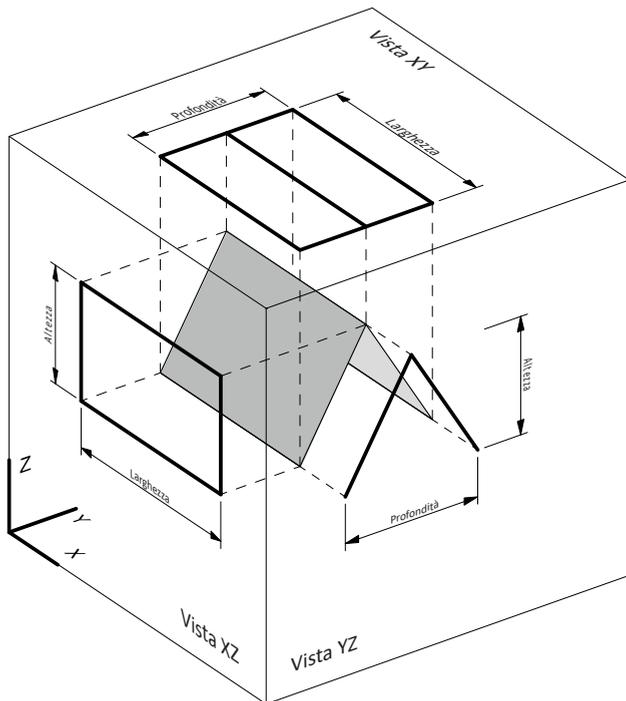


più linee che giacciono sul medesimo piano e sono visibili gli angoli fra le facce. Il volume non si sviluppa più solamente sul piano orizzontale ed inizia a svilupparsi anche in verticale.

Piegata: è la fase finale nella quale la superficie è completamente ripiegata su sé stessa, gli angoli di piega sono diventati nulli e l'ingombro della superficie orizzontale si riduce ad una linea, mentre l'area proiettata verticale ha la sua massima estensione.

L'esempio appena visto si riferiva a pieghe parallele, ma le pieghe possono essere anche oblique l'una con l'altra. In una semplice ondulazione con pieghe oblique, le pieghe non si intersecano all'interno della superficie piegata ma all'esterno della superficie piegata o sul bordo. Analogamente all'ondulazione parallela, è possibile osservare tre configurazioni tipiche: sviluppate, parzialmente piegate e completamente piegate.

È interessante notare le relazioni che si hanno tra il processo di piegatura e la proiezione ortogonale. Supponiamo che il piegamento e lo spiegamento siano lineari, lungo un

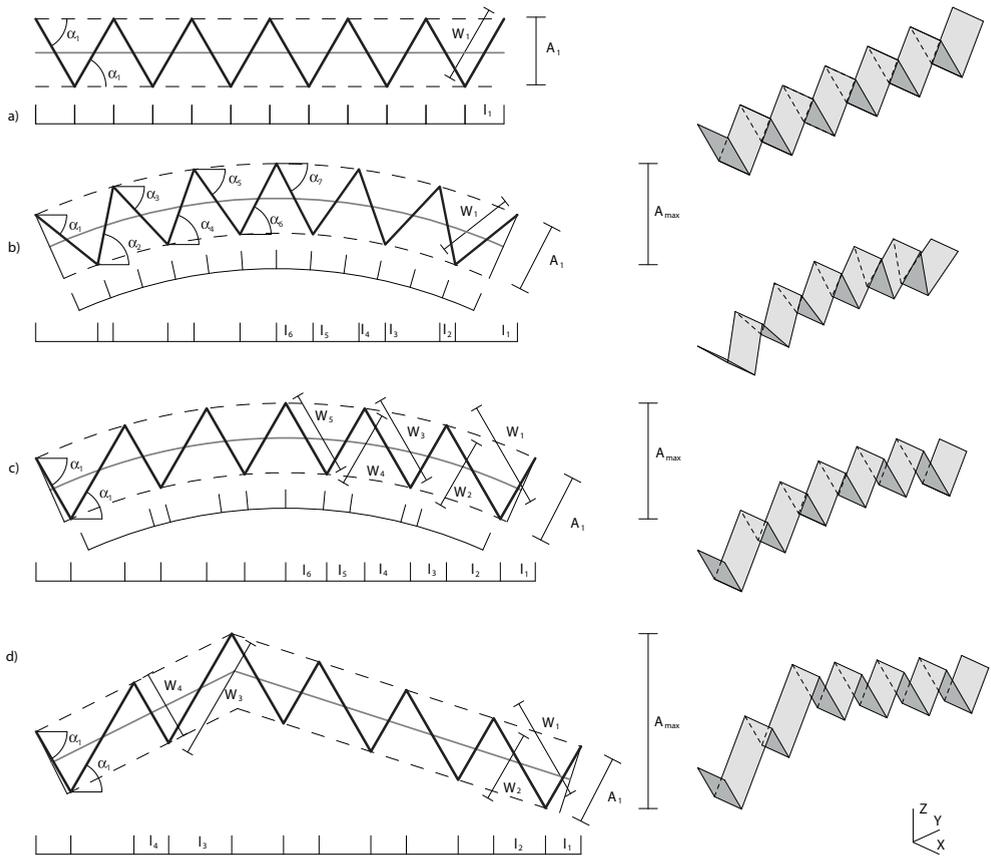


Proiezione ortogonale. Fonte: Buri, 2010

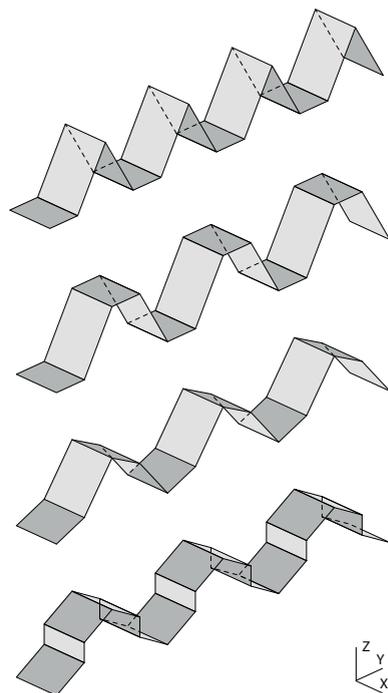
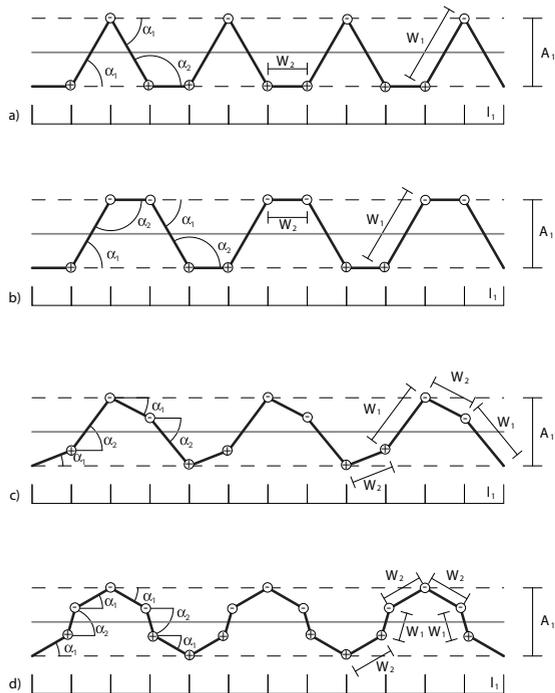
vettore perpendicolare al piano di proiezione frontale xz. Il vettore secondo cui avviene la piega è quindi parallelo ai raggi di proiezione. Se osserviamo il passaggio da superficie sviluppata a completamente piegata, si vede come la proiezione vari al variare dell'angolo di piega. Nello stato iniziale in cui la superficie è completamente sviluppata sul piano xy sui piani xz e yz si vedono solo delle linee, appena viene innescato il processo di piega l'area proiettata sul piano xy va diminuendo fino a ridursi ad una sola linea a processo di piega completato, comportamento opposto invece si ha per la proiezione dell'origami sul piano yz sul quale, al variare dell'ampiezza dell'angolo di piega, si ha una trasformazione da singola linea a superficie la cui massima ampiezza la si ha al fine del processo. Sul piano xz, sul quale vengono proiettate le linee che compongono l'origami si ha una singola linea ad inizio del processo che viene spezzata per descrivere gli angoli fino a che essi non diventano nulli a fine del processo.

Si andranno ad identificare nella corrugazione semplice a pieghe parallele la linea d'asse, l'orientamento, l'ampiezza, l'angolo di inclinazione e la larghezza della piega. Questo tipo di parametri sono identificabili in tutti i pattern più semplici ma sono più facili da visualizzare in questo tipo di corrugazione.

La linea d'asse: La linea d'asse descrive la forma generale della corrugazione, diritta, curva o poligonale. Il profilo ondulato oscilla attorno alla linea d'asse. L'ondulazione dell'oscillazione attorno alla linea d'asse influenza l'angolo di inclinazione dei bordi. Con una linea d'asse diritta l'angolo di inclinazione α è costante, mentre varia quando la linea d'asse è curva. Le corrugazioni che oscillano con un angolo di inclinazione costante α attorno alla linea mediana poligonale appaiono meno regolari perché se la linea d'asse dell'ondulazione non è diritta, così si influenza fortemente l'ampiezza totale A massima della corrugazione.



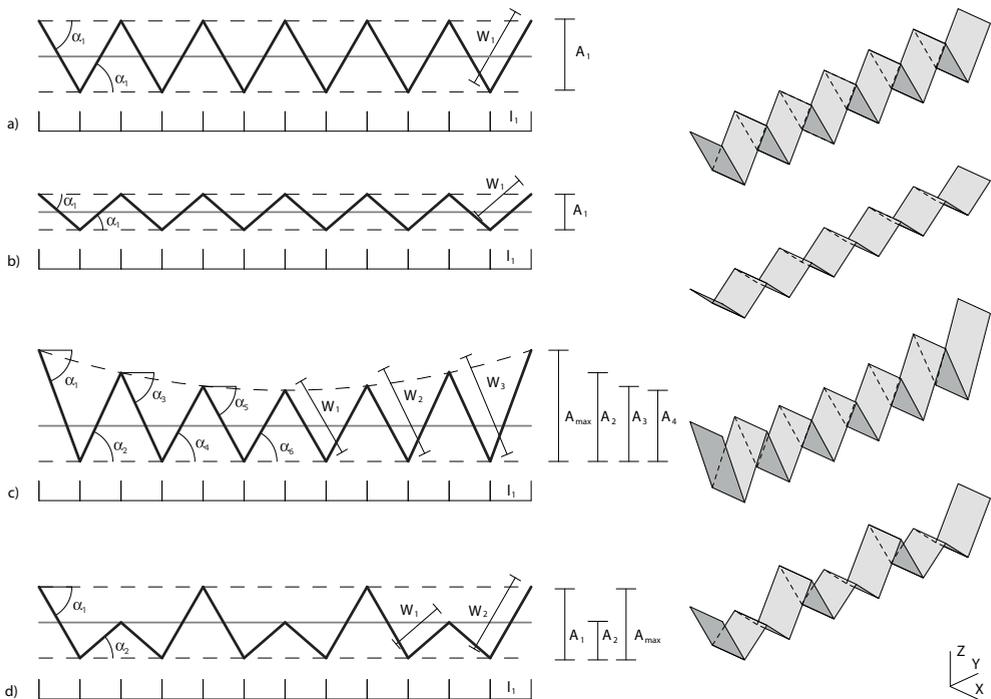
Linea d'asse o mediana di piega



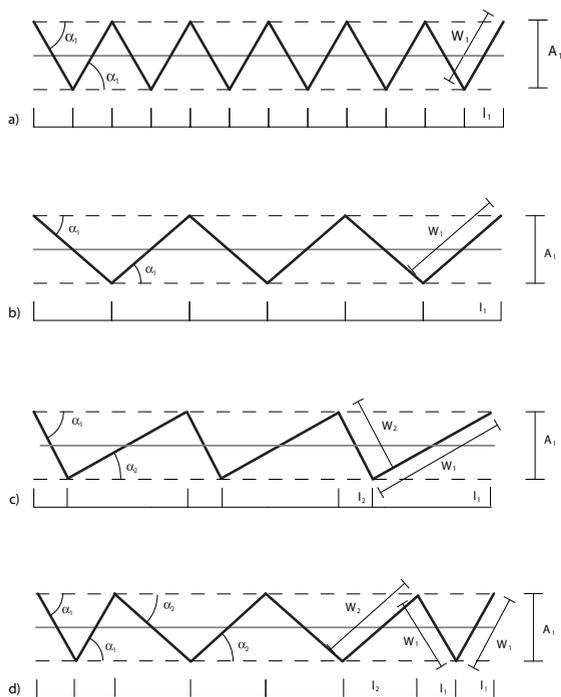
Orientamento delle pieghe convesse e concave

L'orientamento: L'ordine delle pieghe convesse e concave influenza fortemente la comunicazione architettonica delle strutture origami. Se l'ordine più comune è un'alternanza di pieghe convesse e concave, sono possibili altri ordini. L'angolo di inclinazione di tali profili non può essere costante. Se si hanno profili di corrugazione con bordi orizzontali ne consegue che si deve avere una successione di due pieghe con lo stesso orientamento. Questo tipo di corrugazione separa i bordi che hanno principalmente funzioni strutturali, dai bordi che coprono principalmente lo spazio. Quando due o più pieghe concave rispettivamente convesse si succedono, gli angoli di inclinazione diventano molto piccoli e il profilo di corrugazione allenta la sua nitidezza e diventa più curvilineo. Se tali profili arrotondati potrebbero essere interessanti per l'espressione architettonica, sono probabilmente meno efficienti nel loro comportamento strutturale.

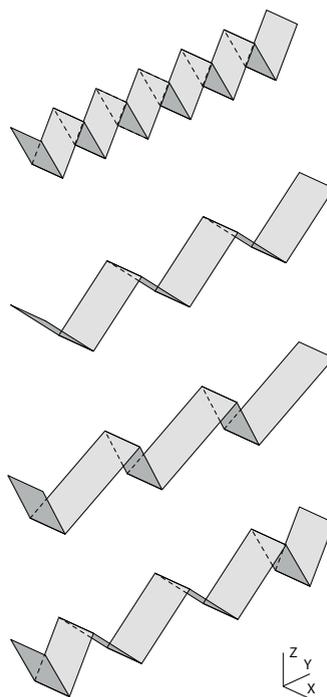
L'ampiezza: L'ampiezza è un parametro importante della corrugazione: influenza direttamente la resistenza della struttura della piastra piegata. Qui distinguiamo l'ampiezza A di ciascuna piega, che può essere modificata individualmente e quindi rinforzare la struttura localmente, e l'ampiezza totale della corrugazione A_{max} che è importante perché influenza la possibilità di piegare la corrugazione. Quando cambiamo l'ampiezza ma non variamo l'intervallo, la forza della struttura viene influenzata. La profondità strutturale diminuisce, ma diminuisce anche l'angolo di inclinazione dei bordi di corrugazione, e quindi le facce hanno minore capacità portante. La variazione dell'ampiezza può essere utilizzata anche per una valenza architettonica. Alternando piccole e grandi pieghe, accentuando le parti della corrugazione, è possibile introdurre il ritmo nello spazio avvolto, sottolineare parti eccezionali e modificare l'intensità della luce e dell'ombra.



Ampiezza del profilo delle pieghe

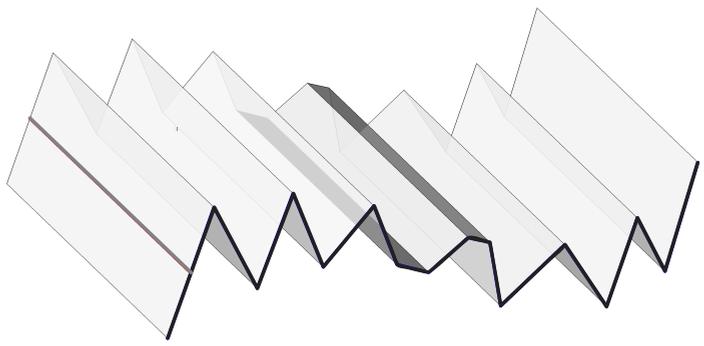
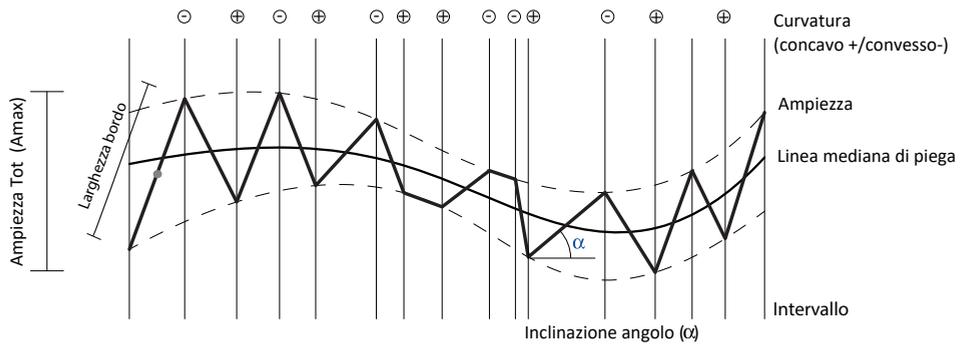


Inclinazione della faccia e angolo alfa di piega



L'angolo di inclinazione: L'angolo di inclinazione α indica l'angolo tra un bordo ondulato e un asse orizzontale x. Usiamo un valore assoluto per l'angolo di inclinazione α . Con l'ampiezza costante A, l'angolo di inclinazione α e l'intervallo I sono strettamente correlati. Quando l'intervallo I tra due pieghe aumenta, l'angolo di inclinazione α diminuisce. Come l'ampiezza A, l'angolo di inclinazione α può essere usato per rinforzare parti della struttura: più grande è l'angolo di inclinazione α migliore è il comportamento strutturale sotto carico.

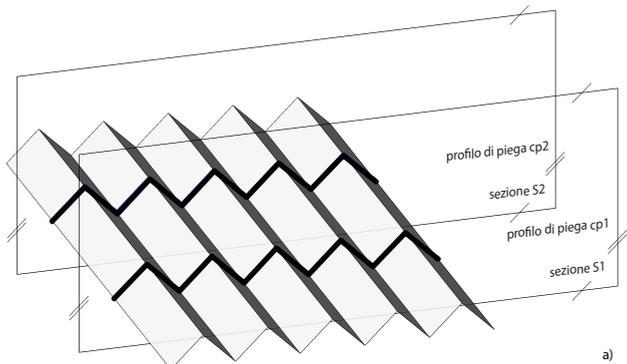
La larghezza del bordo di piega: La larghezza del bordo W dipende dagli altri parametri del corrugamento.



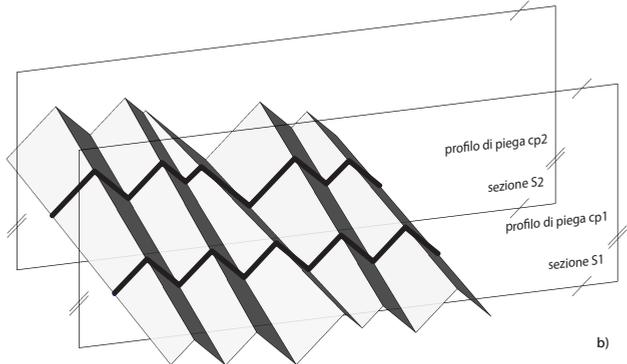
Profilo di corrugazione di pieghe parallele

La piega obliqua

Definiamo le pieghe oblique come superfici sviluppabili composte da facce triangolari o facce quadrangolari planari con bordi di piega non paralleli. Le pieghe non si intersecano all'interno della superficie. Due sezioni trasversali parallele mostrano profili di ondulazione con bordi paralleli ma larghezze diverse. I parametri dei profili di corrugazione sono gli stessi delle pieghe parallele.



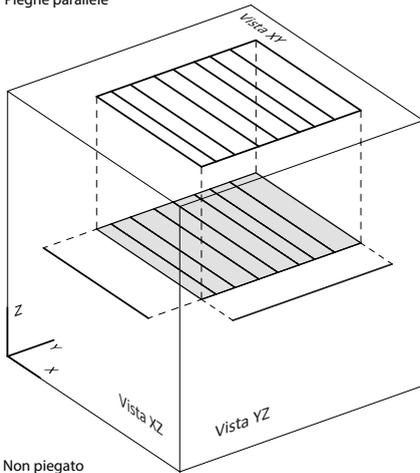
a)



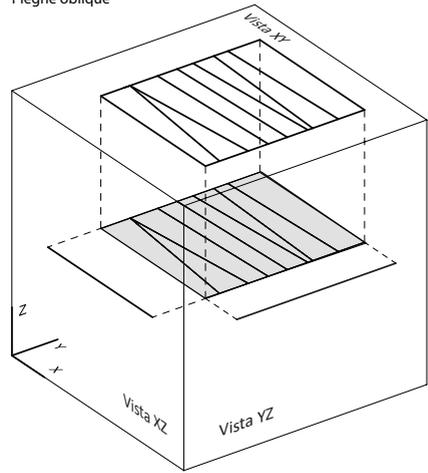
b)

Superfici a pieghe semplici

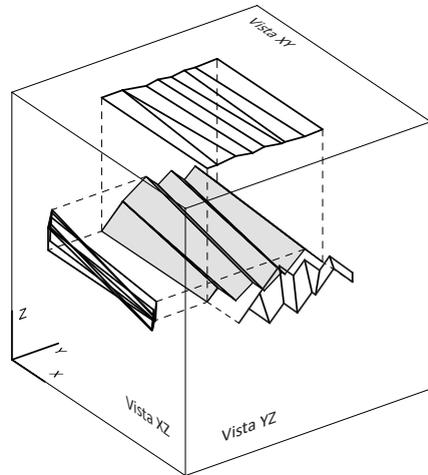
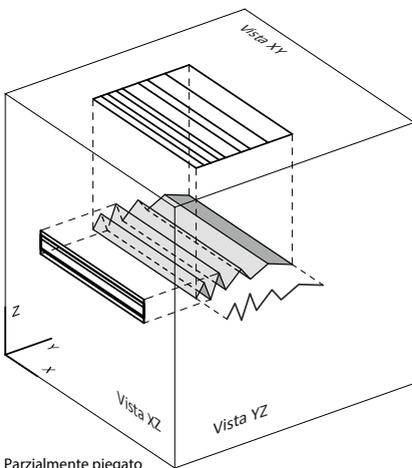
Pieghe parallele



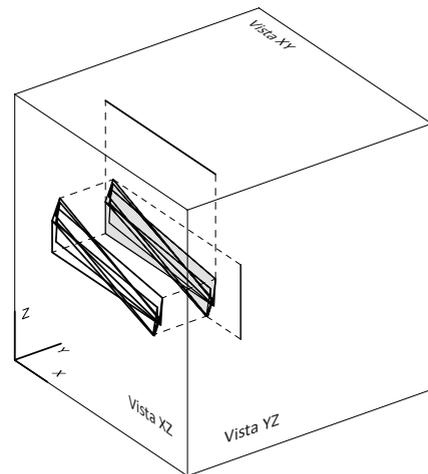
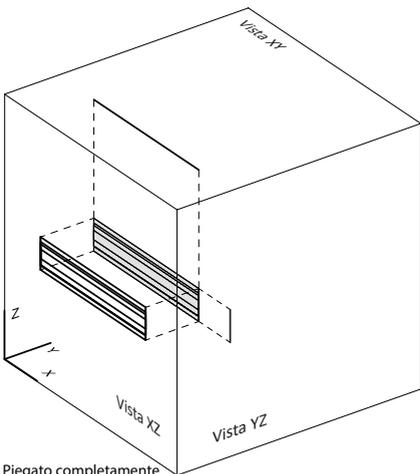
Pieghe oblique



Non piegato

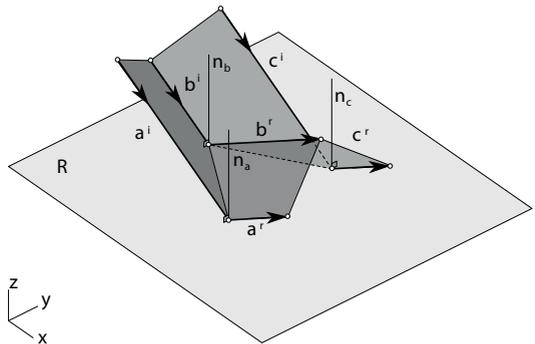
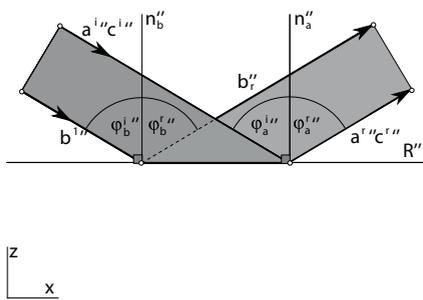
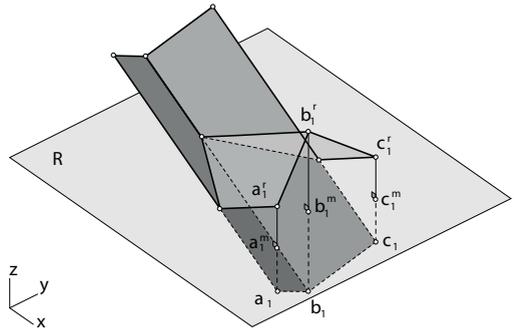
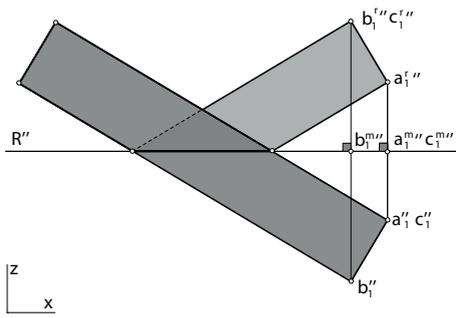


Parzialmente piegato



Piegato completamente

Corrugazioni parallele e oblique: diversi stati di piegatura. Fonte: Buri,2010



Piega inversa come riflesso su un piano

La piega inversa

Le geometrie a cui siamo interessati sono tutte basate sulla piega inversa o reverse fold. Usando la piega inversa, le pieghe diritte possono cambiare la loro direzione nello spazio. Pertanto, la piega inversa è lo strumento principale che consente di progettare la forma delle strutture origami.

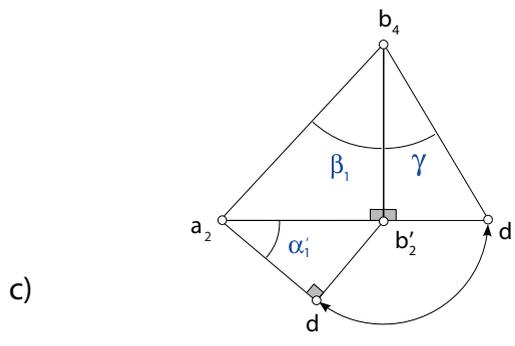
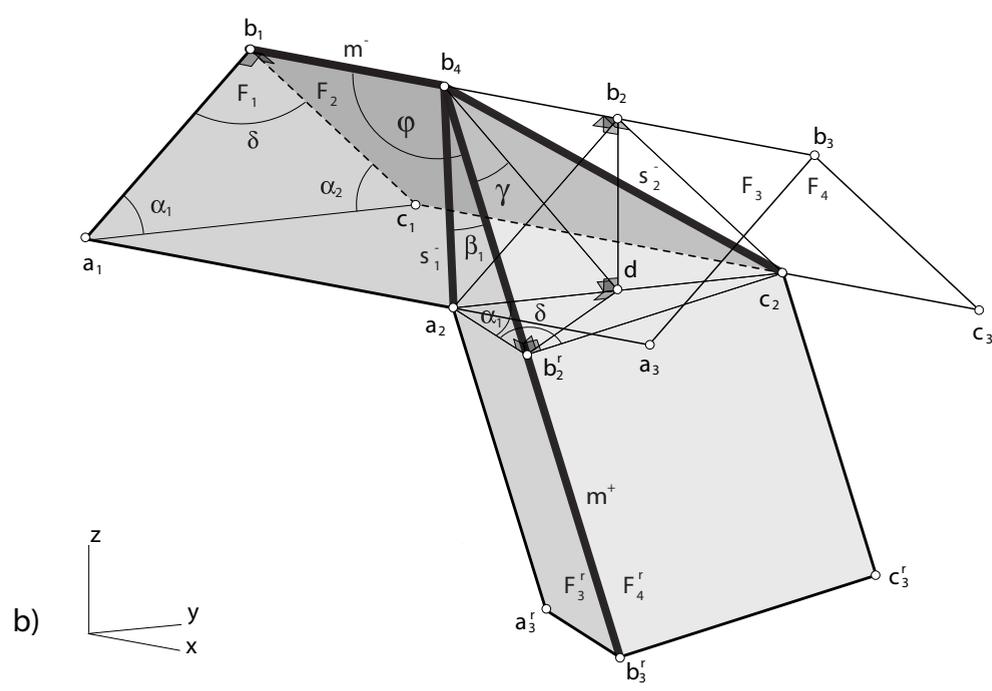
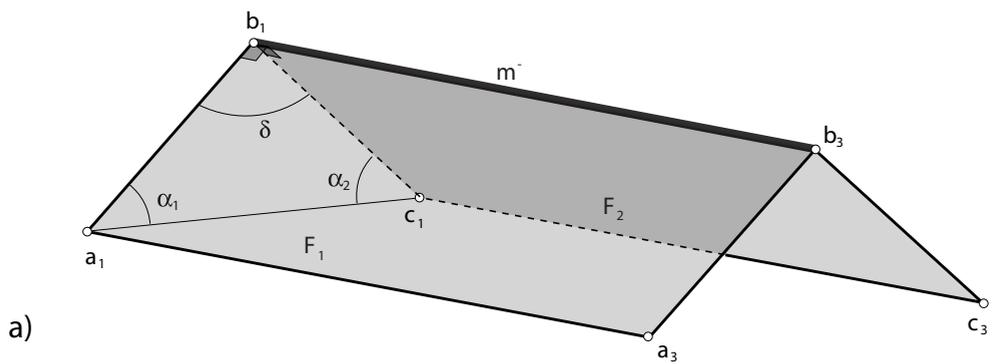
Per poter capire meglio i rapporti geometriche che controllano la piega inversa è fondamentale vedere il significato di “riflessione” sia in ambito matematico che fisico. In ambito matematico un oggetto o un ente si trasforma nella propria immagine riflessa. L’oggetto specchiato si trova dal lato opposto del piano specchiante ed è una copia inversa dell’originale, i cui punti corrispondenti avranno la stessa distanza dalla superficie di riflessione. Perciò, la riflessione, in ambito matematico, è una trasformazione inversa congruente. In ambito, invece, identifica il fenomeno di rimbalzo di un oggetto su una superficie. Al contrario della riflessione matematica, qui l’oggetto non attraversa la superficie di riflessione, e l’angolo di incidenza sarà uguale all’angolo di riflessione, in riferimento alla normale della superficie nel punto di contatto.

Per spiegare il metodo di indagine ed il procedimento per ottenere la piega inversa verrà citato Giodice:

La piega inversa può essere indagata facendo riferimento ai due casi principali: nel solo sviluppo planare, come viene spesso usata negli Origami, che permette di comprendere facilmente la natura della piega inversa come risultato di una riflessione su una linea, e nel suo sviluppo spaziale, la piega inversa viene analizzata anche nelle configurazioni intermedie, ovvero quando è il risultato di una riflessione su un piano.

La piega inversa è una delle tecniche alla base dell’arte degli Origami. È utilizzata per modificare la direzione delle pieghe rettilinee. Generalmente, la configurazione finale della piega inversa è completamente piatta, in maniera che il risultato finale sia una figura bidimensionale.

Una piega inversa bidimensionale può essere definita come segue: ad una piega rettilinea principale m vengono aggiunte ulteriori due creste secondarie inclinate s_1 ed s_2 , secondo un angolo $0 < \gamma < \pi/2$ rispetto ad m e mai perpendicolari



Rappresentazione 3d piega inversa

o parallela ad essa. In questa maniera si sono generate quattro facce F1, F2, F3 ed F4. Una volta definite tutte le creste, mentre due facce F1 ed F2, al di sotto delle creste $s_{1;2}$, iniziano a piegarsi in un senso lungo la cresta $m-$, le restanti facce F3 ed F4, al di sopra delle creste $s_{1;2}$ si piegano nell'altro senso lungo la cresta $m+$. Si chiamino angolo della piega laterale β l'angolo fra le creste $s_{1;2}$, e la cresta $m-$, e angolo di piegatura γ l'angolo creato fra i due tratti della cresta $m+/-$. La rappresentazione del processo di piegatura di una piega inversa planare aiuta a comprendere la natura e la geometria della stessa e può essere espresso `seguendo queste semplici operazioni:

1. Si consideri un foglio rettangolare, suddiviso da una piega centrale m in modo che si creino due porzioni ciascuna F1 ed F2.

2. Lungo la cresta m viene ripiegata una delle due porzioni sull'altra, secondo un angolo di rotazione γ fino a che le due facce non si sovrappongono.

3. Una volta conclusa la prima fase di piegatura, si induce una nuova piega, in questo caso in direzione opposta alla precedente in modo da generare una nuova cresta s su entrambe le facce F1 ed F2, che cambiano forma. Si generano così 2 nuove porzioni F3 ed F4.

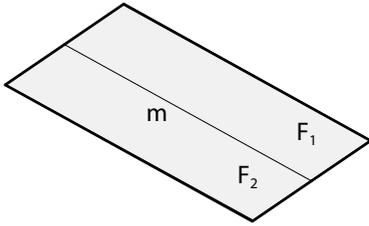
4. Dispiegato nuovamente il foglio, si avranno 4 creste: le due oblique $s_{1;2}$, una monte l'altra valle, e i due tratti, entrambi valle, della cresta m suddivisi dall'incrocio con le creste $s_{1;2}$.

5. Si procede nuovamente al piegamento lungo l'intera cresta m : questa volta non dovrà avvenire una rotazione completa secondo un angolo γ , ma sarà necessario fermarsi ad una posizione intermedia t . 6. Dalla posizione t si fa ruotare la faccia F3 intorno a s_1 in un senso e la faccia F4 intorno ad s_2 nel verso opposto fino a che il foglio non torni alla posizione intermedia t .

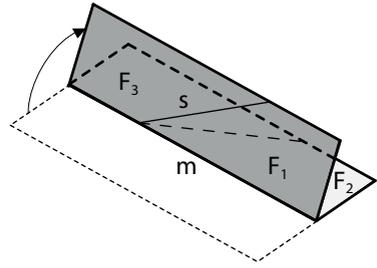
6. Dalla posizione t si fa ruotare la faccia F3 intorno a s_1 in un senso e la faccia F4 intorno ad s_2 nel verso opposto fino a che il foglio non torni alla posizione completamente piegata.

7. Una volta dispiegato nuovamente il foglio si noterà come le due pieghe $s_{1;2}$ saranno diventati due monti, mentre la piega longitudinale m sarà in parte `monte, $m+$, ed in parte valle $m-$.¹⁰

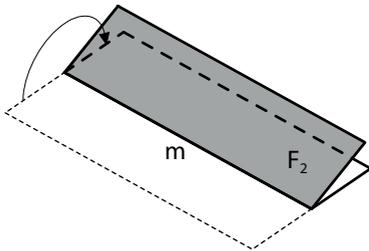
1)



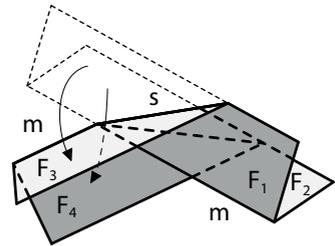
5)



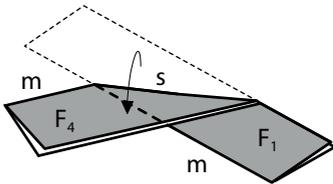
2)



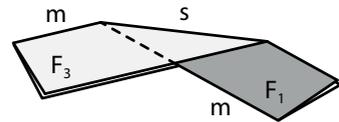
6)



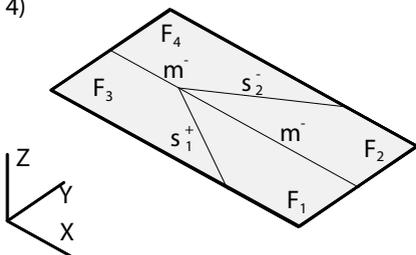
3)



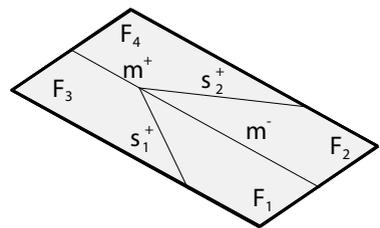
7)



4)

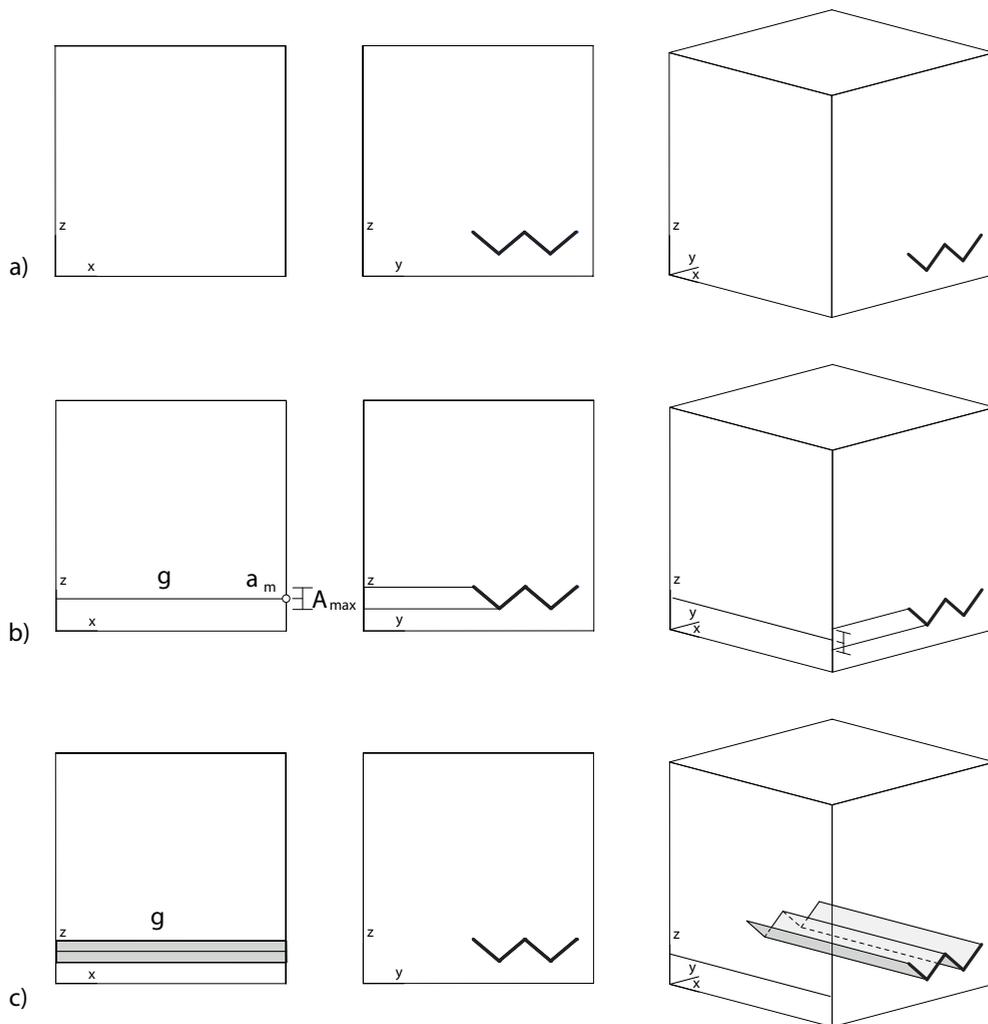


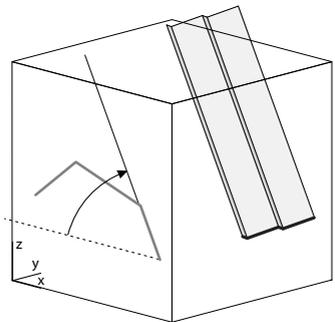
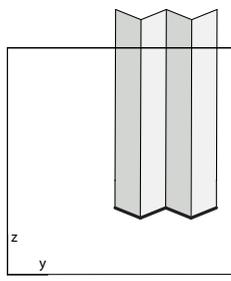
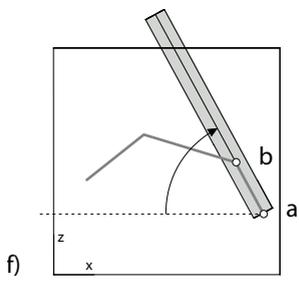
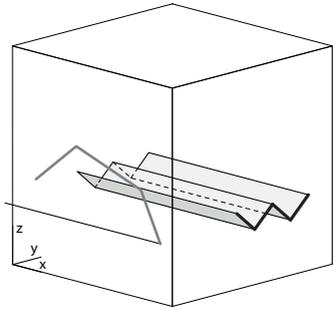
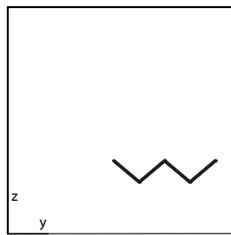
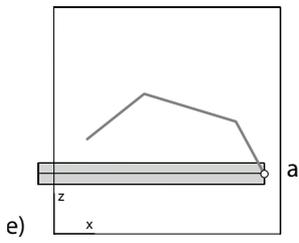
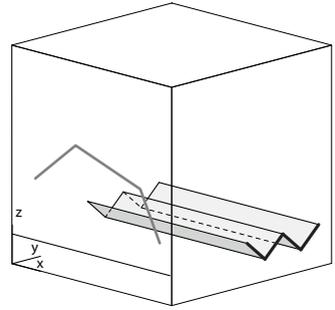
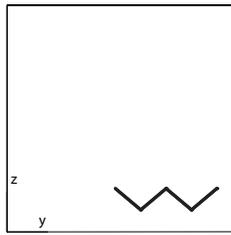
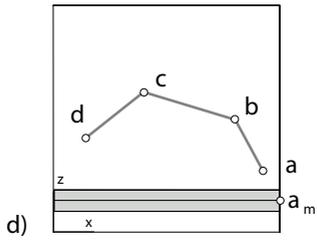
8)

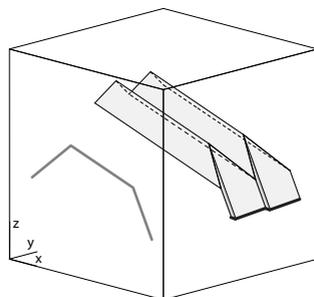
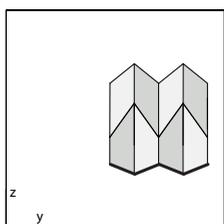
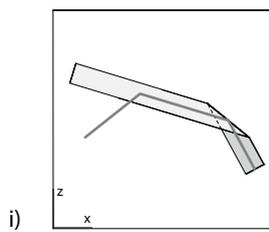
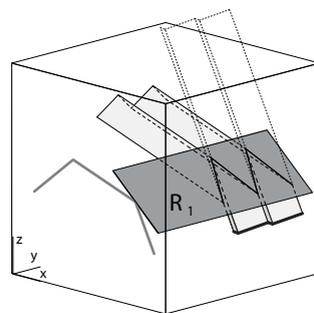
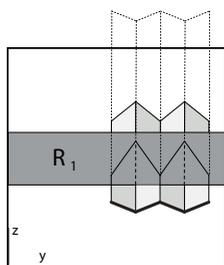
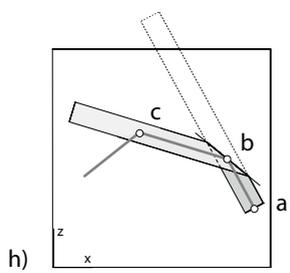
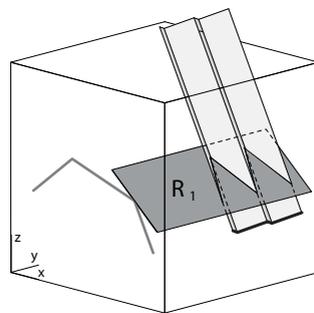
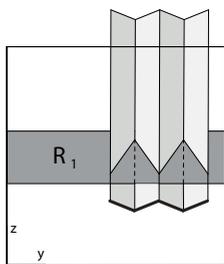
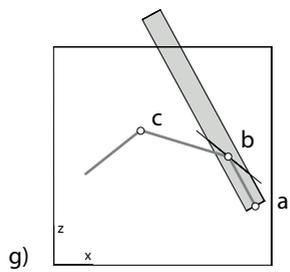


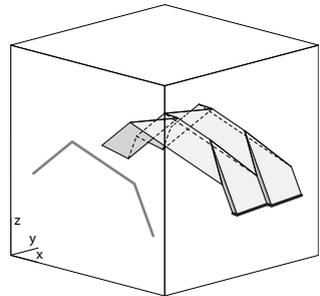
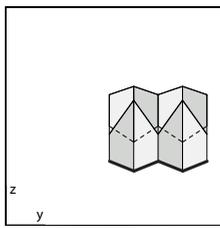
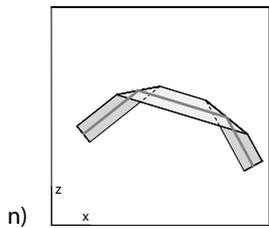
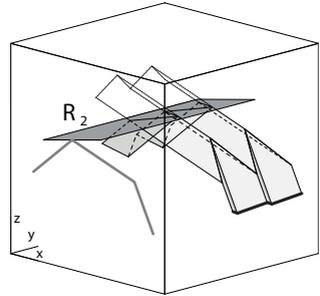
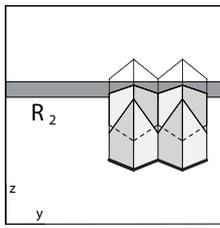
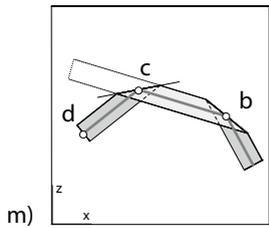
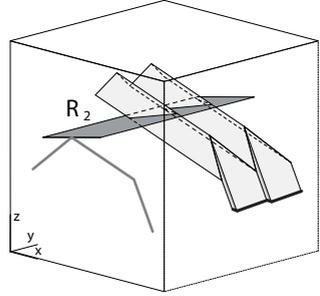
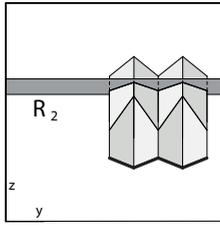
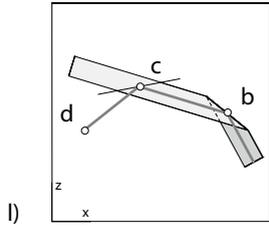
Step per ottenere una piega inversa

Anche in questo caso le analisi di Buri, che inserisce questo processo di piega all'interno di un sistema di coordinate ortogonali, sono utili a capire il movimento della piega e la sua costruzione.









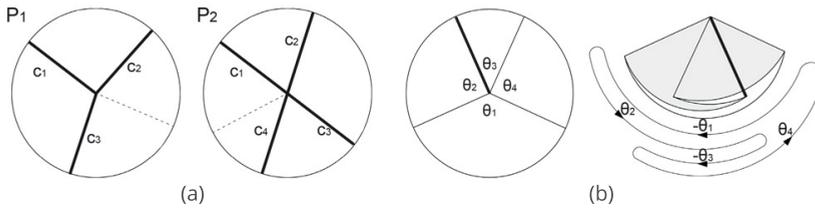
Rigid-Foldability e Flat-Foldability

I vari pattern origami si possono distinguere in rigid-foldable o in flat-foldable. Questo tipo di distinzione è quella che influenza maggiormente il sistema costruttivo nel momento in cui si fa il salto di scala da modello di carta a modello architettonico.

Un sistema rigid-foldable è caratterizzato da cinematismi che permettono la sostituzione delle facce con pannelli rigidi e le pieghe con cerniere. Questo tipo di pattern è il più rilevante a livello architettonico e ingegneristico, le facce, dato che non si deformano, impediscono reazioni “involontarie” all’intera struttura. Questo tipo di pattern, avendo deformazioni nulle, è più semplice da modellare e analizzare, dato che si riduce ad un meccanismo solo geometrico non influenzato dalla componente elastica del materiale che lo comporrà. La capacità di deformazione avviene solo all’interno delle pieghe, così facendo la conformazione finale del pattern, che può essere molto deformata, non va ad influenzare sulla rigidità e sulla planarità delle singole facce che lo compongono.

Un sistema flat-foldable, per essere definito tale, deve essere un sistema pieghevole che però, una volta raggiunta la conformazione finale, tutte le facce risultano poi complanari. Questa caratteristica è poi descritta dal teorema di Kawasaki.

“Secondo Kawasaki, si parte col considerare un sistema formato da un singolo vertice, risultato dell’intersezione di 4 pieghe, di cui una ha orientamento opposto alle altre. Quest’ultima può corrispondere ad una delle due pieghe che non toccano l’angolo al centro più grande e per questo, una volta piegato, sarà nascosta all’interno del sistema. Assumendo la sviluppabilità del sistema, è noto che la somma di tutti gli angoli interni al vertice dovrà essere uguale all’angolo giro: $\alpha + \beta + \gamma + \delta = 2\pi$. Poichè nella configurazione chiusa le coppie di angoli opposti condividono l’orientamento, la somma di queste paia di angoli dovrà essere uguale: $\alpha + \gamma = \beta + \delta$. Da queste due relazioni è facile assumere che la somma dei due angoli opposti dovrà corrispondere all’angolo piatto: $\alpha + \gamma = \beta + \delta = \pi$ ”¹¹

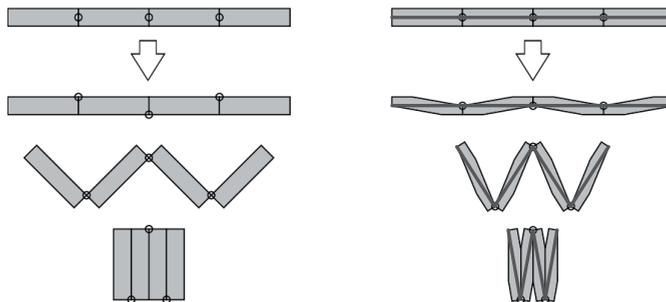


Rigid- foldability (sinistra), Flat-foldability (destra). Fonte: Buri, 2010

Le superfici corrugate spesse

Fino ad adesso le analisi effettuate sono riferite a origami formati da superfici con spessore nullo o trascurabile realizzati o in uno spazio digitale e/o di carta. Per poter effettuare il salto di scala da modello di studio di carta o digitale a modello architettonico è indispensabile considerare anche l'aspetto dello spessore.

Diversi studiosi si sono già interessati all'argomento. Hoberman nel 1988 creò dei modelli utilizzando come sistema di piegatura le cerniere delle porte. Le cerniere devono essere montate adiacenti agli spigoli sui quali i pannelli dovranno ruotare. Per garantire con questa modalità costruttiva il movimento gli assi delle cerniere devono essere sfalsati, quindi le cerniere non giaceranno tutte sul medesimo piano, da qui deriva anche il nome di questo sistema è detto axis-shift.¹² Questo sistema può essere impiegato a vertici interni dove vi è la possibilità di connettersi agli assi di rotazione sfalsati utilizzando spessori differenti nel pannello che si andrà ad utilizzare. I limiti di questo sistema si presentano in pattern complessi flat-foldable, dove si genererebbe un meccanismo sovravincolato, o in pattern rigid-foldable non simmetrici, dove si raggiungerebbe la rottura delle cerniere a meno che il sistema non sia aperto.

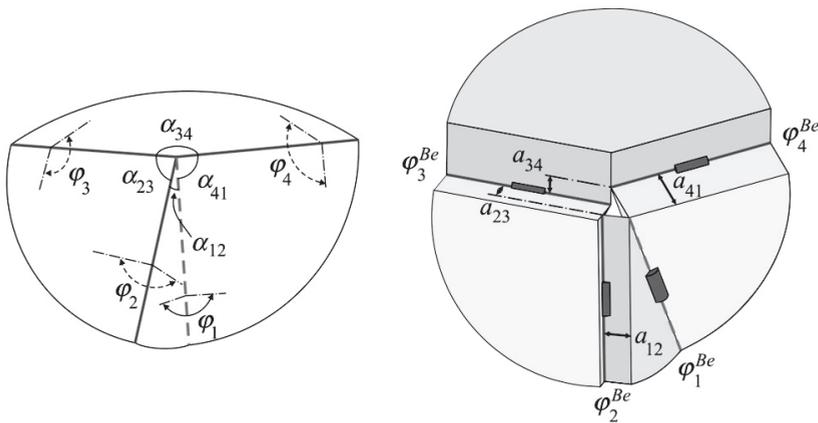


Spessore non trascurabile, a confronto Axis-shift (sinistra) e Tapered Method (destra)

Traunz e Kunstler superano Hoberman inserendo la possibilità di far scorrere le cerniere lungo il proprio asse di rotazione, però, dato che il sistema a cerniere strutturali non è stato sperimentato su tutti i pattern, non è un meccanismo adatto a generalizzare il movimento degli origami dato che potrebbe presentare altri problemi.¹³

Tachi, invece, in contrapposizione all'axis-shift, presenta il Tapered Method. Il metodo in questo caso è l'opposto a quello di Hoberman, le cerniere non sono più posizionate su lati differenti del pannello a seconda della piegatura, ma sono complanari e nella stessa direzione, per garantire il cinematismo è il pannello che cambia. Lo spessore del pannello, considerato un offset, in entrambe le direzioni, della linea su cui giacciono tutte le cerniere, viene scavato nella porzione che si sarebbe andata ad intersecare con il pannello adiacente una volta avviata la piega. I pannelli non saranno più con sezione rettangolare omogenea ma saranno rastremati per consentire un completo movimento della struttura. Questo sistema ha la peculiarità di riuscire a trattare l'intera struttura come se fosse di nuovo a spessore nullo.¹⁴

L'ultima e più recente soluzione per riprodurre la piega è stata presentata dal gruppo Y.Chen, della School of Mechanical Engineering a Tianjin in Cina. La loro curiosa soluzione è la sintesi delle esperienze precedenti, la peculiarità di riuscire a trattare il cinematismo come se fosse a spessore trascurabile persiste. Per risolvere il problema dello



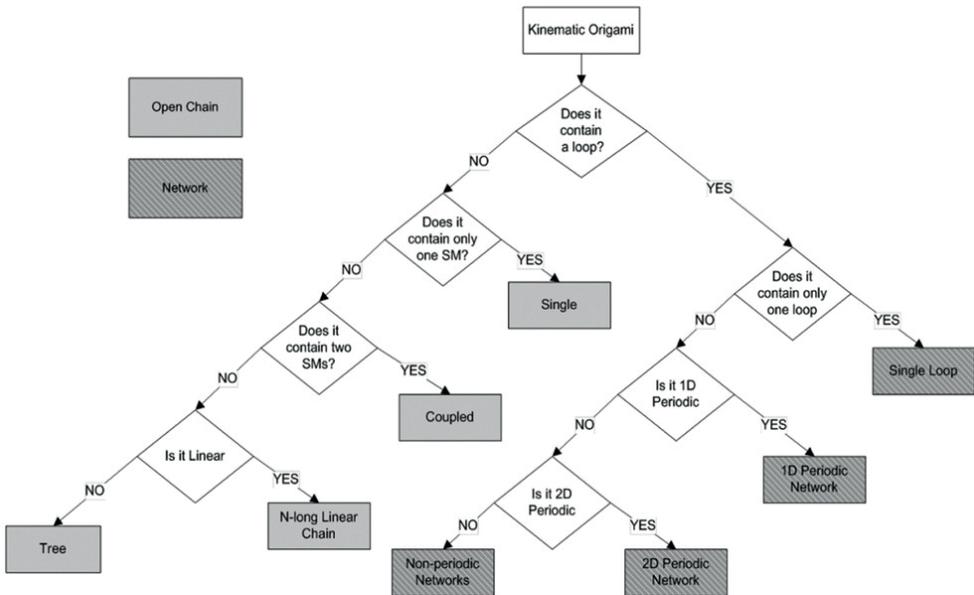
Spessore non trascurabile, Y.Chen Method

spessore dei pannelli hanno progettato un sistema di connessione sferiche in corrispondenza delle pieghe superiori ed inferiori di ogni pannello. Nonostante sia un sistema molto simile a quello di Hoberman ma in questo caso il valore degli angoli interni al vertice non crea nessun vincolo.¹⁵

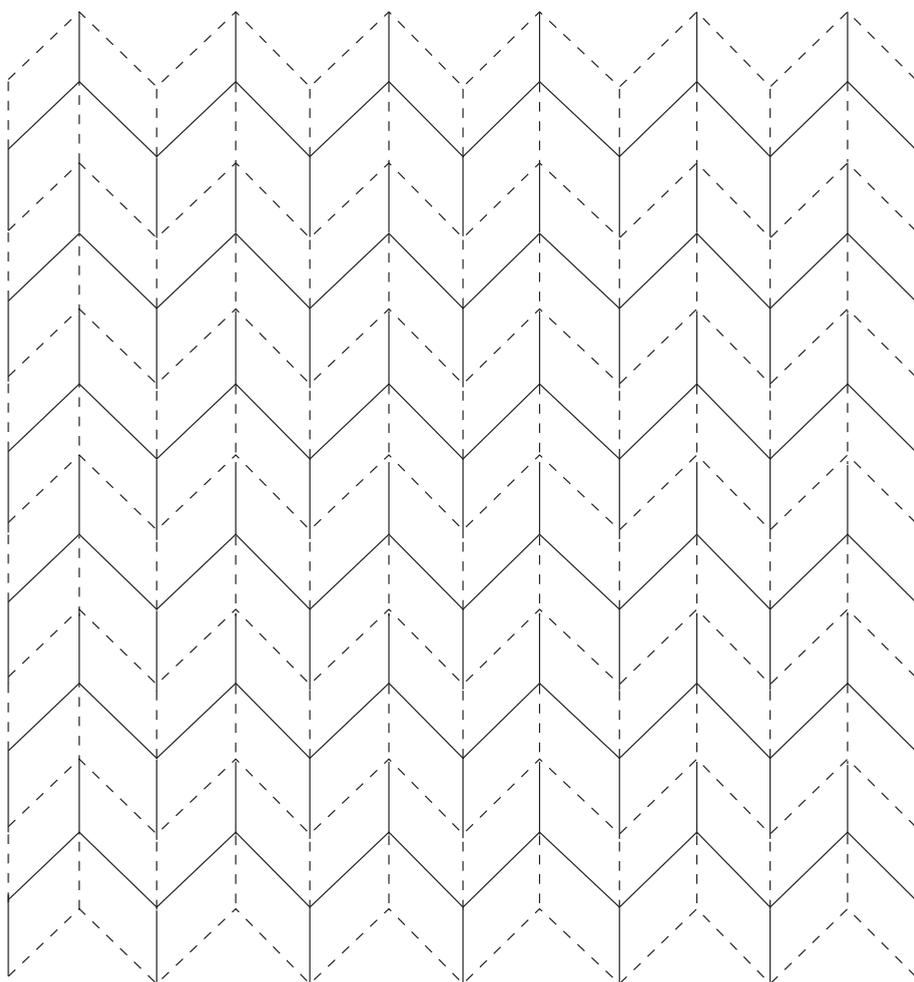
I pattern origami

Come detto in precedenza, i pattern origami hanno la capacità di subire grandi deformazioni solo grazie all'azione delle pieghe. Alcuni di questi, durante le fasi di piegatura, mostrano altri comportamenti, questi sono già visibili nel modulo base che li compone, ma essendo ripetuti in serie questi si sommano e si amplificano nel modello globale.

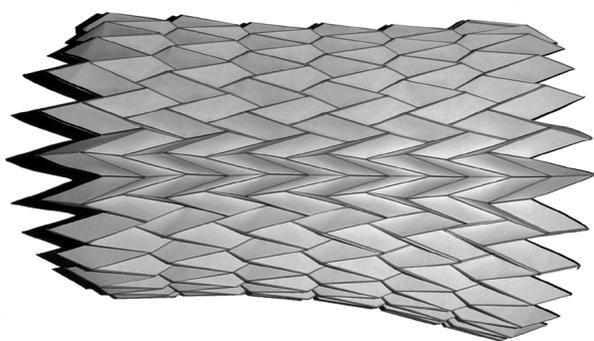
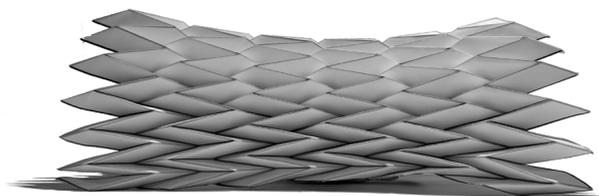
I pattern che verranno indagati sono tutte tassellazioni, il modulo di base viene ripetuto per tutto il foglio di cui è composto, selezionati perché sono i più comuni e studiati in campo architettonico e strutturale.



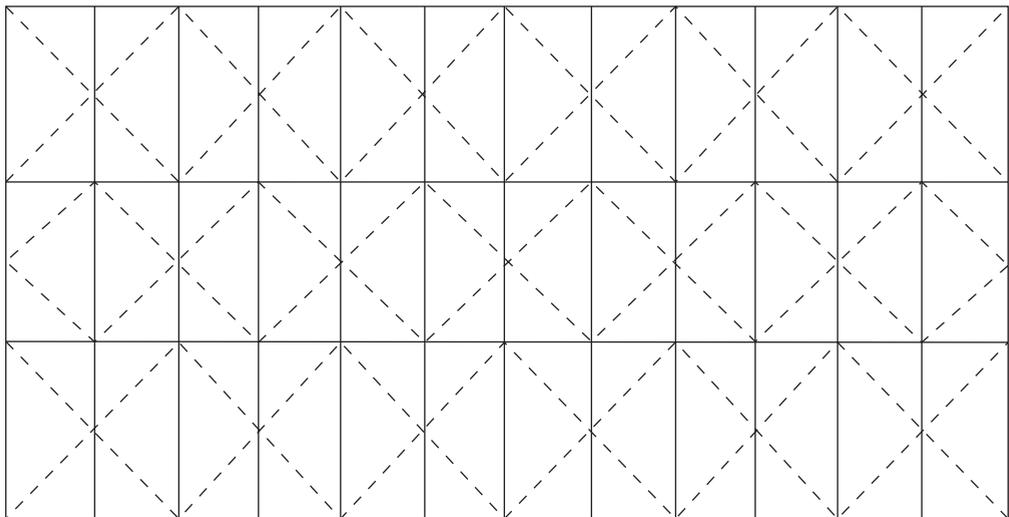
Miura-ori. Il pattern Miura-ori, chiamato anche herringbone, basato sulla piega inversa, è descrivibile come una serie di parallelogrammi che si specchiano sui loro lati corti formando una “spina di pesce” alternando in questo modo pieghe di valle con pieghe di monte. Il Miura-ori presenta tendenze diverse quando si muove all’interno di un piano rispetto a quando ne esce, infatti, si nota come in fase di compressione e trazione presenta un coefficiente di Poisson¹⁶ negativo, mentre se sottoposto a flessione e torsione è positivo.¹⁷ Per aumentare la sua flessibilità a livello globale e permettergli deformazioni maggiori è sufficiente dividere i parallelogrammi che lo compongono con una piega neutra che, inoltre, ne facilita anche la piega. Questo origami è sia rigid-foldable che flat-foldable.



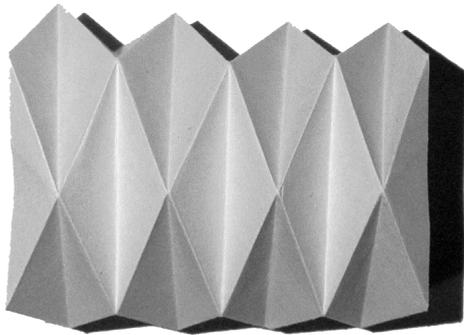
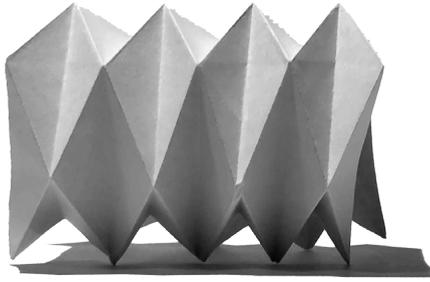
Pattern Miura-ori



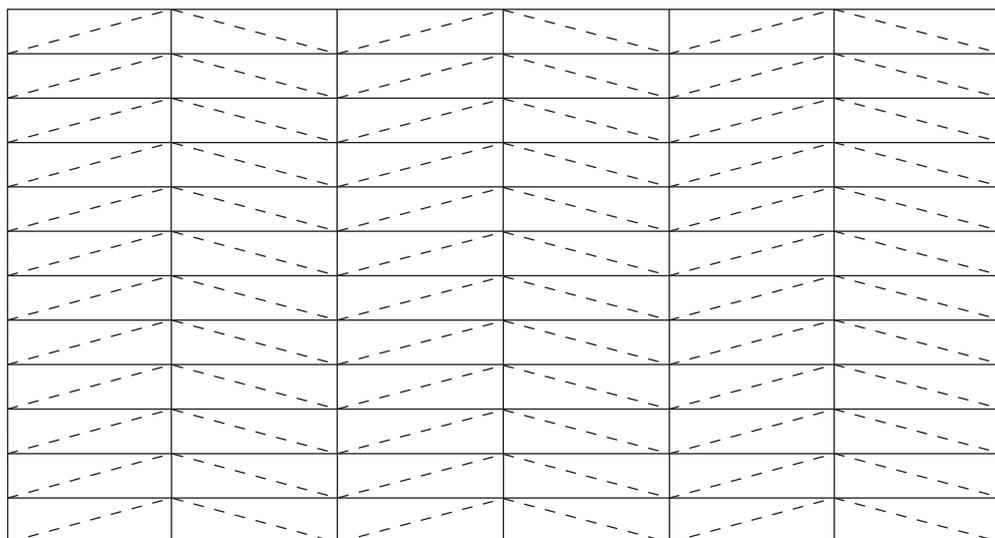
Yoshimura. Il pattern Yoshimura, per via del suo inventore, o Diaomond, basato sulla piega inversa, è formato da linee di valley parallele tra di loro e, di solito, parallele a due lati del foglio, da pieghe di mountain disposte diagonalmente rispetto a quelle di valley ma parallele tra di loro. Il disegno del pattern ricorda la conformazione a diamante per questo il suo secondo nome. Una volta piegato tenderà a formare delle superfici cilindriche o a volta a botte. Se sollecitato perpendicolarmente alle linee di valley ha la capacità di ripiegarsi completamente, invece se sollecitato nella direzione delle linee di valley rimane rigido. La potenzialità di questo pattern risiede nella facilità di customizzazione per ottenere forme differenti. Questo origami è sia rigid-foldable che flat-foldable.



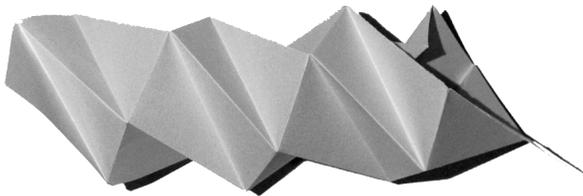
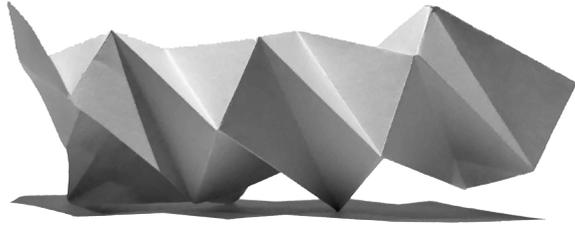
Pattern Yoshimura



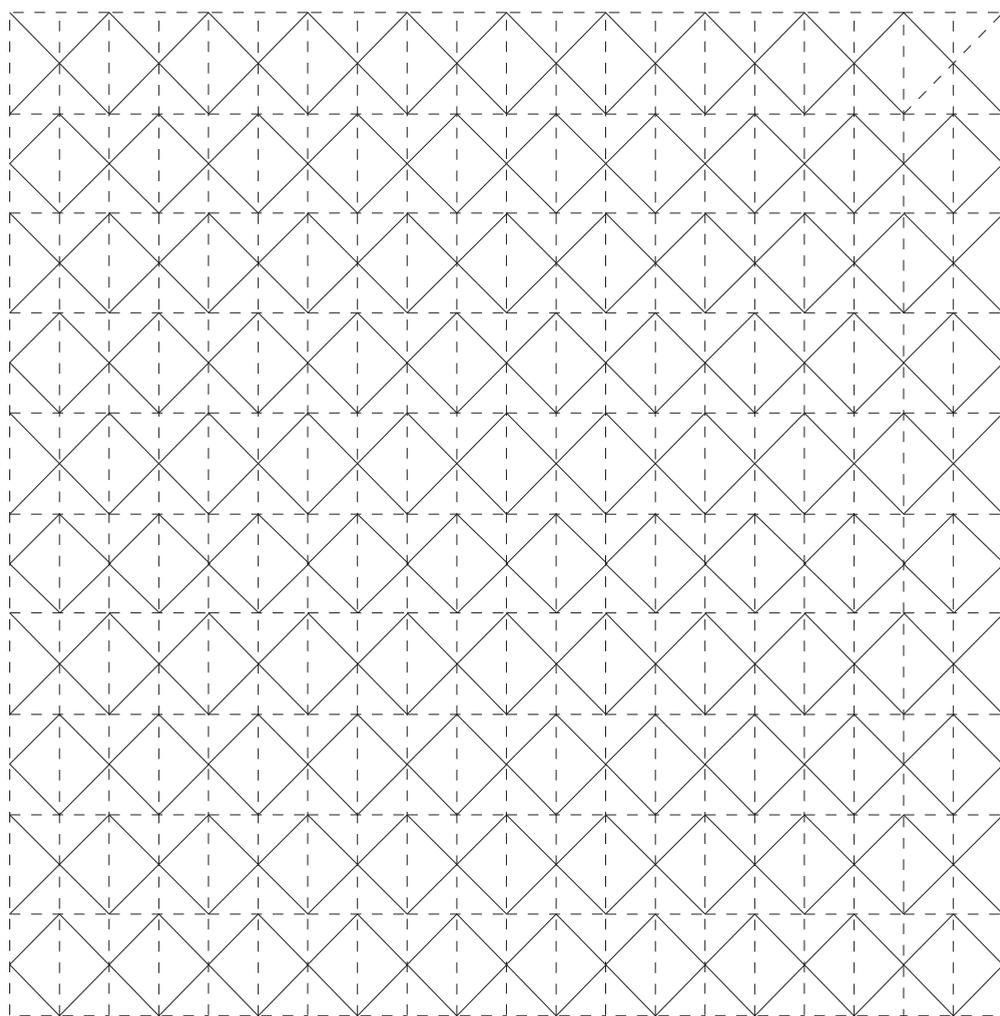
Diagonal. Il pattern diagonal è caratterizzato da una griglia rettangolare di pieghe valley, i rettangoli vengono divisi sulla diagonale da una piega mountain che ha sempre lo stesso verso per tutti i rettangoli. Si possono trovare delle similitudini con il pattern Yoshimura, però questo, non essendo un pattern periodico, durante la fase di piega subisce una naturale torsione. Quando sottoposto a pressione risponde come lo Yoshimura.



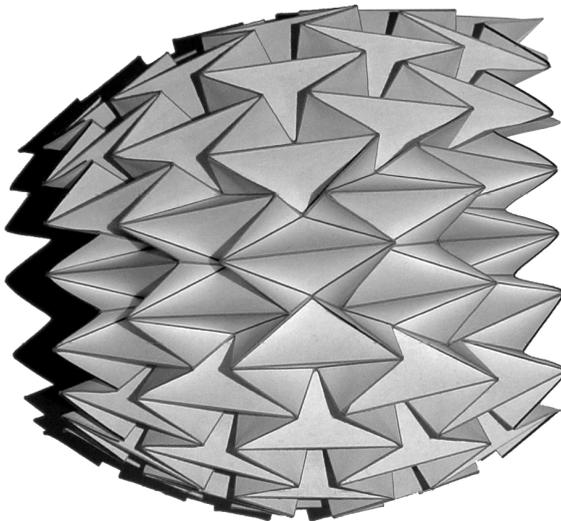
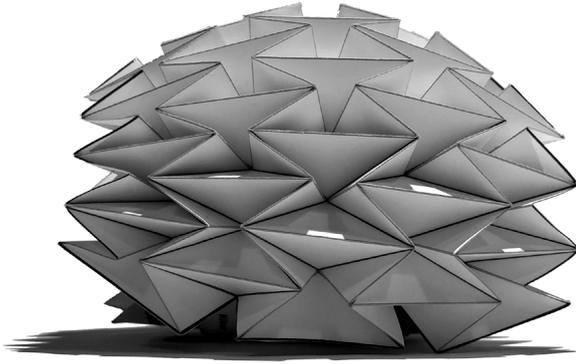
Pattern Diagonal



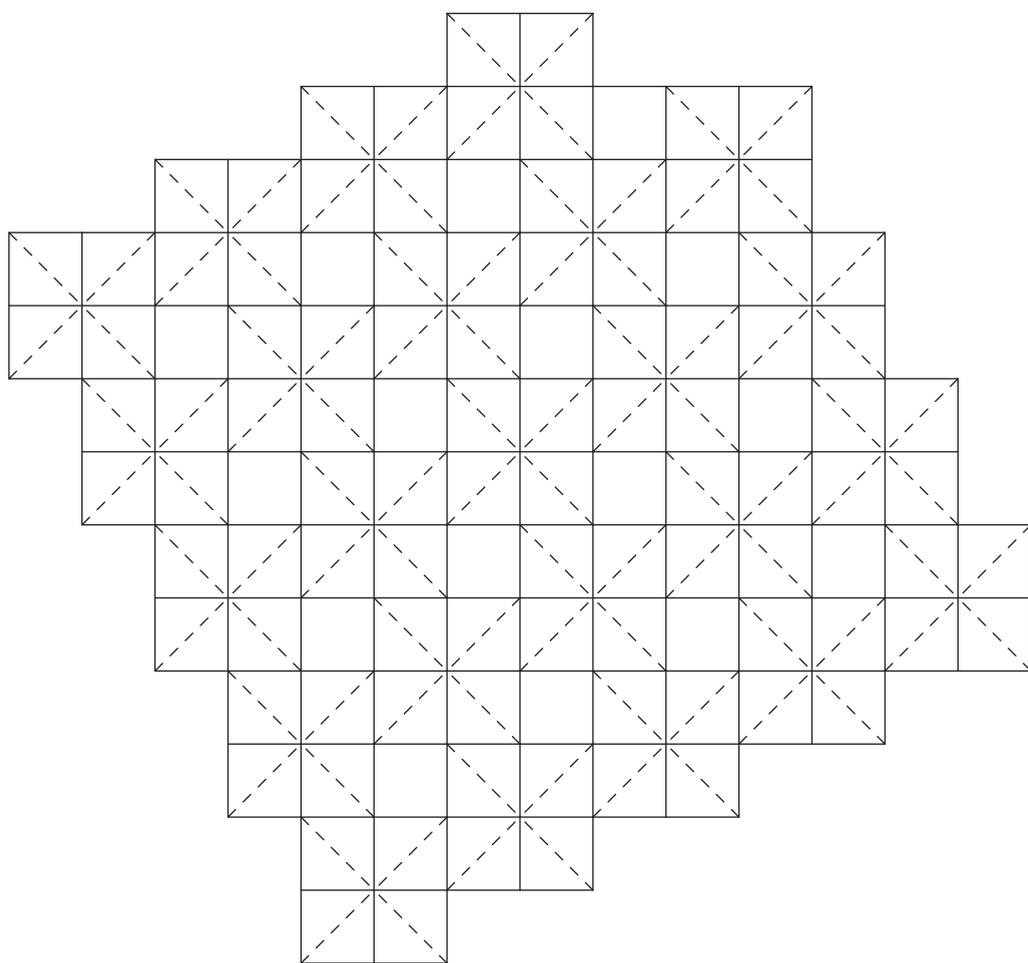
Magic-Ball. Il pattern ha come base una griglia rettangolare di pieghe mountain, questi rettangoli, presi in coppia formano dei quadrati che vengono divisi sulla loro diagonale da pieghe valley. La peculiarità di questo pattern è quella di sapersi adattare a molte forme differenti, se sottoposto a sforzi di compressione-trazione o flessione si otterranno naturalmente deformazioni non planari. Questo origami è sia rigid-foldable che flat-foldable.



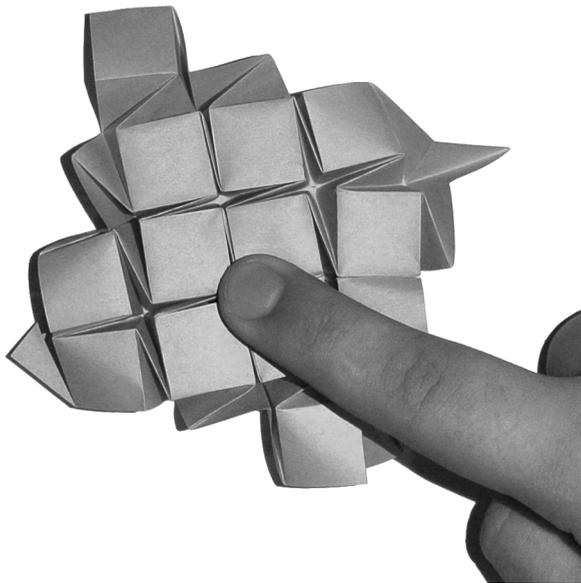
Pattern Magic-Ball



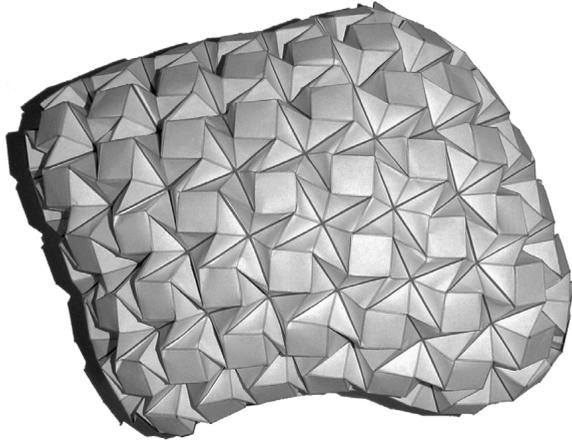
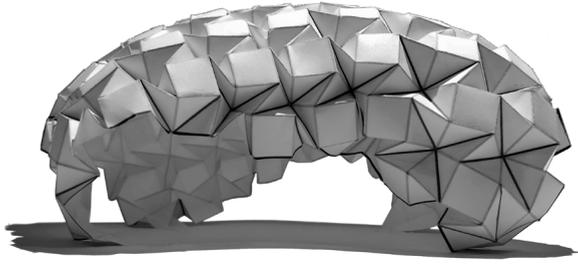
Ron Resh. Il pattern Ron Resh prende il nome dal suo inventore, Ronald Dale Resch. Si hanno due versioni di questo pattern, a forma quadrata o triangolare, dipende da come viene impostata la griglia di pieghe mountain di base. Entrambi sono molto flessibili e per questo durante la fase di piega possono assumere forme con curvatura gaussiana sia positiva che negativa. È periodico in una sola direzione. Questo origami è rigid-foldable ma non è flat-foldable.

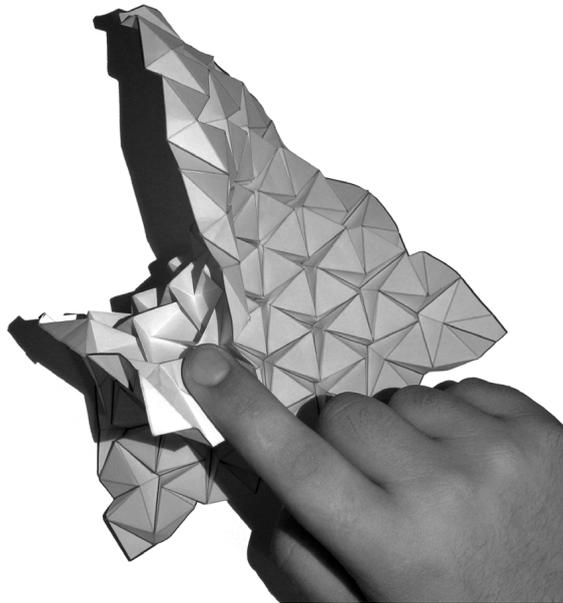
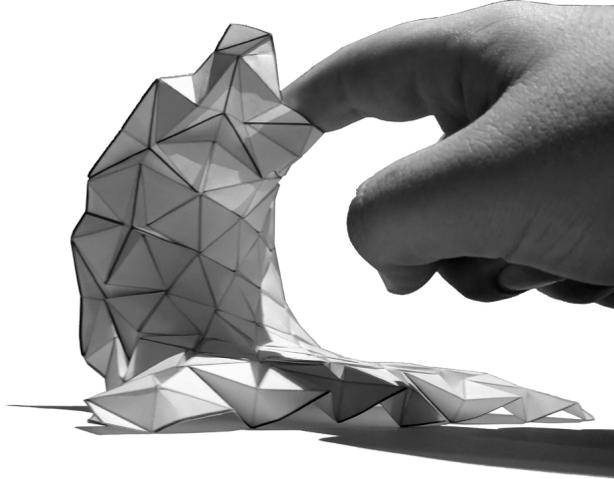


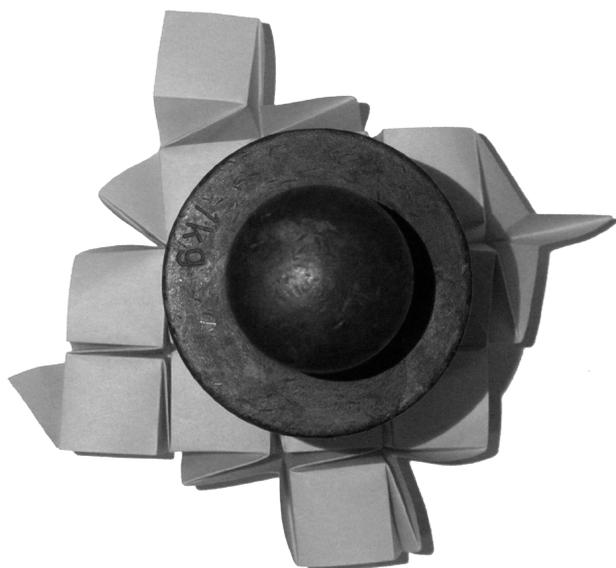
Pattern Ron Resh













Nelle foto precedenti sono rappresentate alcune delle caratteristiche del Ron Resh:

Nelle prime quattro foto è visibile la sua caratteristica di non essere un origami Flat-Foldable ma solo Rigid-Foldable. Inoltre, se non sollecitato la memoria di forma del materiale, in questo caso carta, farà gonfiare l'origami.

Nelle successive quattro, una superficie viene suddivisa più finemente prima con l'utilizzo del pattern del Ron Resh quadrato e poi il Ron Resh triangolare. In entrambi i casi si è voluto evidenziare la sua capacità di adattarsi a superfici a doppia curvatura. Il Ron Resh quadrato, visto che alcune delle facce che lo compongono sono quadrate, è più completo da modellare, nonostante ciò, nel caso rappresentato approssima molto bene una struttura a cupola. L'utilizzo del Ron Resh triangolare permette di approssimare più fedelmente le superfici, si vede come in questo caso si riesca ad approssimare una superficie iperbolica.

Nelle ultime tre si vuole sottolineare come il gesto di piegare la carta, secondo pattern origami regolari, le doni la caratteristica di rigidità. Il peso che in foto sta sollecitando la struttura è da 1kg. Ulteriori test empirici hanno dimostrato come solo superati i 3kg di carico la struttura abbia ceduto e una volta dispiegato il foglio il pattern del Ron Resh non fosse più riconoscibile.

La scelta del pattern

A seguito dell'indagine eseguita sui pattern si è proseguito con la scelta di uno di essi per scendere maggiormente nelle specifiche meccaniche che regolano i suoi cinematismi.

La scelta è ricaduta sul Ron Resh in quanto, proprio grazie alla sua peculiarità di essere un origami rigid-foldable e non falt-foldable, ha la necessità di piegarsi al di fuori del piano potendo giungere a diverse forme con estrema facilità. Ripetiamo che il Ron Resh ha una struttura rigida periodica in una direzione data dalla ripetizione di triangoli o quadrati.

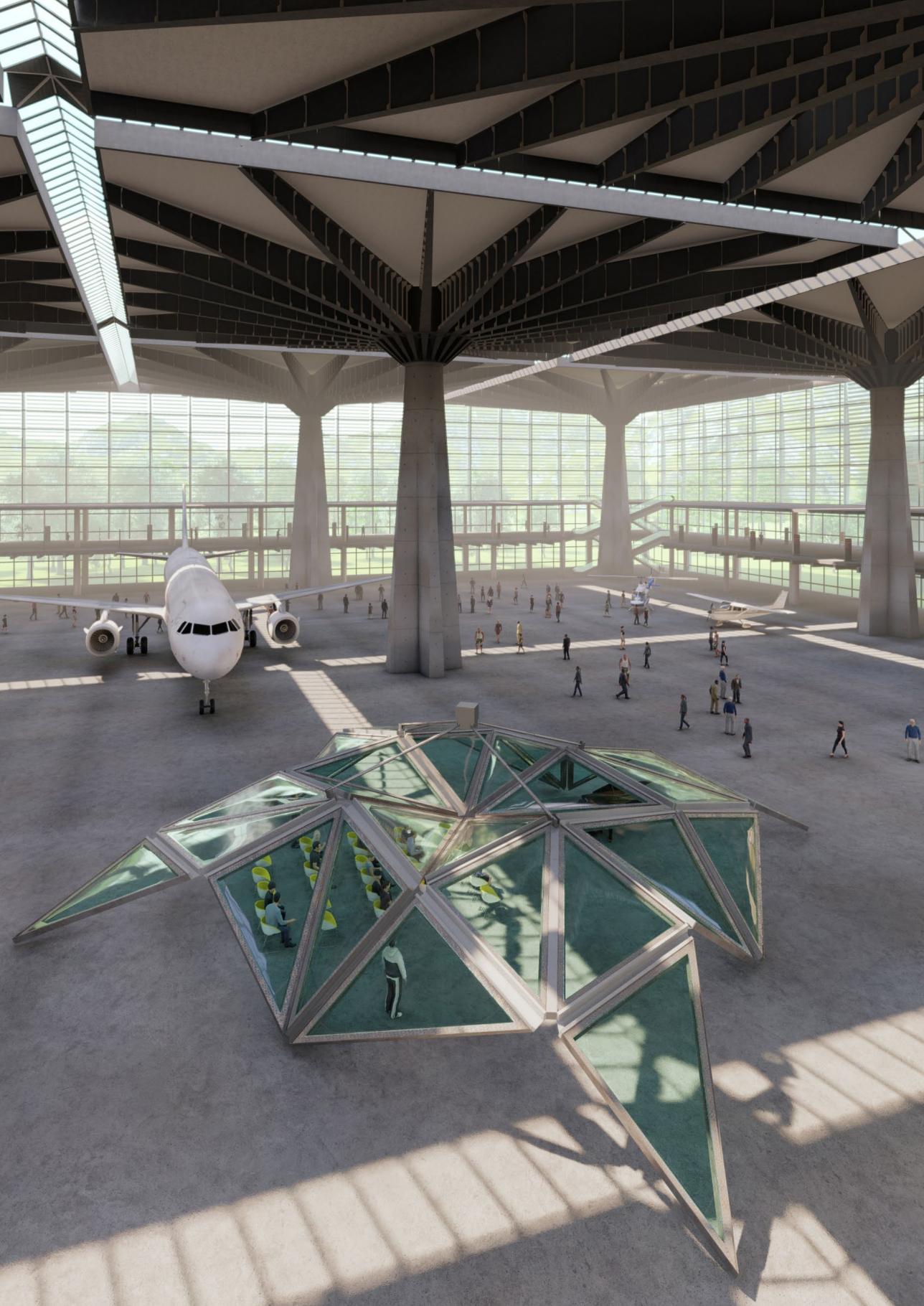
Partendo dal foglio che lo compone si può constatare come le deformazioni durante le fasi di piega avvengano solo al di fuori del piano ed ogni triangolo (e/o quadrato a seconda della tipologia creata) cambi durante tutta la trasformazione il piano su cui giace fino a che non si raggiunge la configurazione completamente piegata dove i triangoli esterni (o i quadrati) arrivano a giacere sul medesimo piano parallelo al foglio iniziale e rialzato dal piano di origine.

Analizzando meglio la reazione dei pattern a forze esterne si nota come sia in grado di simulare qualsiasi forma, questa caratteristica la si ottiene grazie alla sovrapposizione dei triangoli interni che però localmente creano una grande instabilità. Stabilità che però viene rafforzata nel momento in cui nella sua conformazione completamente chiusa sulle facce superiori viene un posto un carico a pressione, in questo caso la struttura diviene molto rigida, l'unica deformazione la si ha nei punti di appoggio poiché questi, essendo puntuali non riescono a distribuire il peso.

NOTE

- 1 Treccani, la cultura italiana, s.d.
- 2 Sakoda, 1997
- 3 Kenneway, 1987
- 4 Schenk & Guest, 2010
- 5 Tachi, 2009
- 6 Al-Mulla & Buehler, 2015
- 7 Jackson, 2011
- 8 Casale, Valenti, & Calvano, 2012
- 9 Bradford, 2010
- 10 Giodice, Romeo, & Bontempi, 2016/2017
- 11 Giodice, Romeo, & Bontempi, 2016/2017
- 12 United States Brevetto n. 4,780,344, 1988
- 13 Trautz & Kuntzler, 2009
- 14 Tachi, Rigid-Foldable Thick Origam, 2011
- 15 Chen, Peng, & You, 2015
- 16 Modulo di Poisson =- deformazione trasversale o laterale / deformazione longitudinale $(\nu) = - (\epsilon_x) / (\epsilon_z)$
- 17 Iv, Krishnaraju, Konjevod, Jiang, & Yu, 2014

III FASE: *scenari progettuali*



PROGETTO

Gli strumenti

Rhino. Rhinoceros, o più conosciuto come Rhino è un software commerciale CAD 2D e 3D basato sulla rappresentazione tramite NURBS (Non Uniform Rational B-Splines) scritto da Robert McNeel & Associates. Al suo interno contiene una vasta serie di comandi che consentono di generare modelli molto precisi e di condurre operazioni di render, analisi delle superfici, animazioni e drafting. La sua peculiarità risiede nella possibilità di gestire le geometrie attraverso le NURBS, le NURBS sono la rappresentazione matematica di geometrie 3D, sia solidi tradizionali che freeform. Rispetto alla rappresentazione tramite mesh la rappresentazione NURBS, avendo funzioni precise a definire la geometria, richiede meno dati da elaborare, di conseguenza, i tempi di elaborazione diminuiscono. La potenzialità di questo software non si ferma solo ai numerosi formati che riesce a leggere ed esportare ma nel suo SDK aperto che lo rende modulare e consente all'utente di personalizzare l'interfaccia e creare comandi e menu personalizzati. Ciò ha permesso lo sviluppo di numerosi plug-in proposti sia da McNeel che da altre società di software che completano ed espandono le capacità di Rhinoceros in campi specifici come rendering e animazione, architettura, ingegneria, prototipazione e altri.

Grasshopper3D. Grasshopper è un linguaggio di programmazione VPL (Visual Programming Language) sviluppato da David Rutten che viene eseguito all'interno del software Rhino. Rappresenta uno dei più diffusi strumenti per la progettazione parametrica oggi sul mercato. Il fatto di essere un Visual Programming Language influenza il modo in cui vengono creati i programmi, questi, infatti, vengono creati trascinando dei componenti nell'"area da disegno" ed in seguito connessi tra loro. Questa logica di lavoro, detta associativa, crea una connessione tra i parametri e la geometria generata, al variare del primo la seconda si modifica automaticamente. La popolarità in ambito architettonico di questo software è da ricercarsi nella crescente necessità di dover gestire un crescente numero di informazioni e modelli sempre più complessi. Gli architetti, in genere, non possiedono conoscenze informatiche di scripting e necessitano di una strumentazione "frinendly"

◀ Immagine fotorealistica dell'idea progettuale

per raggiungere gli obiettivi del progetto. I numerosi plug-in permettono al software di spaziare dall'arte generativa, all'ingegneria strutturale.

Kangaroo. Kangaroo è plug-in nativo di Grasshopper che consiste in un motore fisico per la simulazione interattiva, l'ottimizzazione e il form-finding sviluppato da Robert Cerverellione, Giulio Piacentini e Daniel Piker. Kangaroo è scritto sulla considerazione che le proprietà macroscopiche di un materiale possono essere descritti come interazioni tra particelle a livello molecolare, grazie all'utilizzo dei suoi diversi "Goals", ai quali va assegnato un peso, è in grado di effettuare simulazioni fisiche. Nonostante il modello informatico sia un modello semplificato della realtà è comunque possibile raggiungere un'analisi comportamento che, si avrebbe nel mondo reale che seppur semplificata, ha margini di errore accettabili.

LadyBug e HoneyBee. LadyBug e HoneyBee sono dei plug-in esterni opensource per Grasshopper che consentono di importare ed analizzare dati meteo e valutare le prestazioni ambientali. LadyBug importa in Grasshopper i file meteo EnergyPlus standard (.EPW) e fornisce una grafica interattiva 3D per supportare il processo decisionale durante le fasi iniziali del progetto. HoneyBee collega Grasshopper a quattro motori di simulazione: EnergyPlus, Radiance, Daysim, e OpenStudio. Questi valutano il consumo energetico, il comfort e l'illuminazione diurna.¹

Revit. Revit è un programma BIM prodotto dalla Revit Technologies Inc. e poi acquistato dalla Autodesk. Ciò che contraddistingue Revit dagli altri competitors è il suo approccio molto vicino alla costruzione di un modello reale, ogni forma è collegata alla funzione costruttiva reale.

Python2.7. Python è un linguaggio di programmazione ad oggetti (object oriented) ideato agli inizi degli anni novanta da Guido van Rossum. Usato sia per la scrittura di alcuni plug-in di Rhino sia per la creazione di LadyBug. Una delle potenzialità di Python è la presenza di un ricco assortimento di funzioni e librerie che ne sbloccano ulteriori funzionalità.

Realizzazione del modello BIM

Il primo modello costruito è stato il modello BIM del Palazzo del Lavoro con l'ausilio del software Autodesk Revit.

Per la modellazione del Palazzo del Lavoro su Revit, è stato necessario analizzare e ogni singolo componente architettonico, in particolar modo ogni elemento che compone il sistema a "fungo" caratteristico dell'edificio, e modellare singolarmente questi elementi denominati all'interno dell'ambiente Revit come "famiglia", in modo da poter successivamente ricostruire l'intero edificio.

FAMIGLIA "PILASTRO STRUTTURALE"

Per la realizzazione dei pilastri strutturali è stato necessario partire dal modello di famiglia "pilastro strutturale", in modo da avere, una volta realizzato e posizionato il pilastro all'interno del progetto, una corrispondenza nel modello analitico.

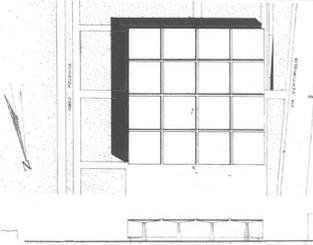
Come già detto in precedenza, il pilastro è una superficie geometrica rigata ottenuta dal raccordo di una sezione cruciforme alla base ed una sezione circolare in sommità. Per riuscire a modellare il pilastro è stato necessario disegnare cinque piani di riferimento intermedi equidistanti in aggiunta ai livelli di riferimento, sui quali sono state posizionate successivamente le sezioni.

Nonostante non fosse necessario in quanto questo pilastro è un elemento unico nel suo genere, è stato deciso di parametrizzare le sue sezioni, in modo tale da poter riutilizzare la famiglia nel caso si volesse riproporre questa tipologia specifica di pilastro in un eventuale progetto di riqualificazione. Per fare ciò è stato necessario studiare i disegni di progetto di tale elemento. Partendo dal disegno esecutivo di Nervi, si può vedere come la definizione delle sezioni intermedie sia il risultato geometrico della divisione delle linee di unione delle due sezioni di estremità. Partendo da ciò, è stato possibile definire delle correlazioni tra le misure delle due sezioni alle estremità, denominate sezione "1" e "7", e le cinque sezioni intermedie, rispettivamente sezione "2", "3", "4", "5" e "6", che sono state adottate nella definizione dei parametri dimensionali di ogni sezione, in modo tale da modificar-

INGG. NERVI E BARTOLI

ANONIMA PER COSTRUZIONI S.p.A.
LUNGOTEVERE ARNALDO DA BRESCIA N° 9 - ROMA - TEL. 355776-37762

PALAZZO DEL LAVORO-TORINO



PROGETTAZIONE STUDIO NERVI

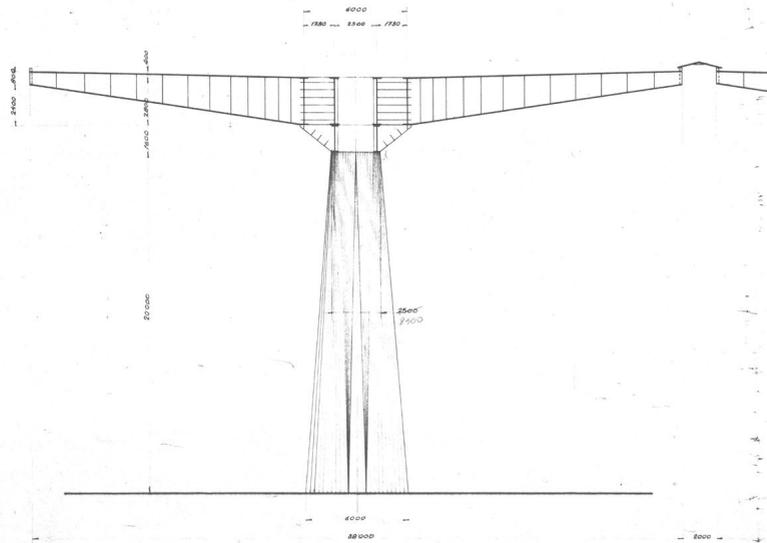
PROGETTISTI: Dott. Ing. PIER LUIGI NERVI - Dott. Arch. ANTONIO NERVI

ROMA, L. 4 - C. 15/3

25 CTB
STRUTTURE DI COPERTURA IN
CARPENTERIA METALLICA
PIANTA E SEZIONI

PROC. N° 455B SOSTITUISCE IL N° SOSTITUITO DAL N° DIS.

Sezione A-A 1:100



Pianta 1:100

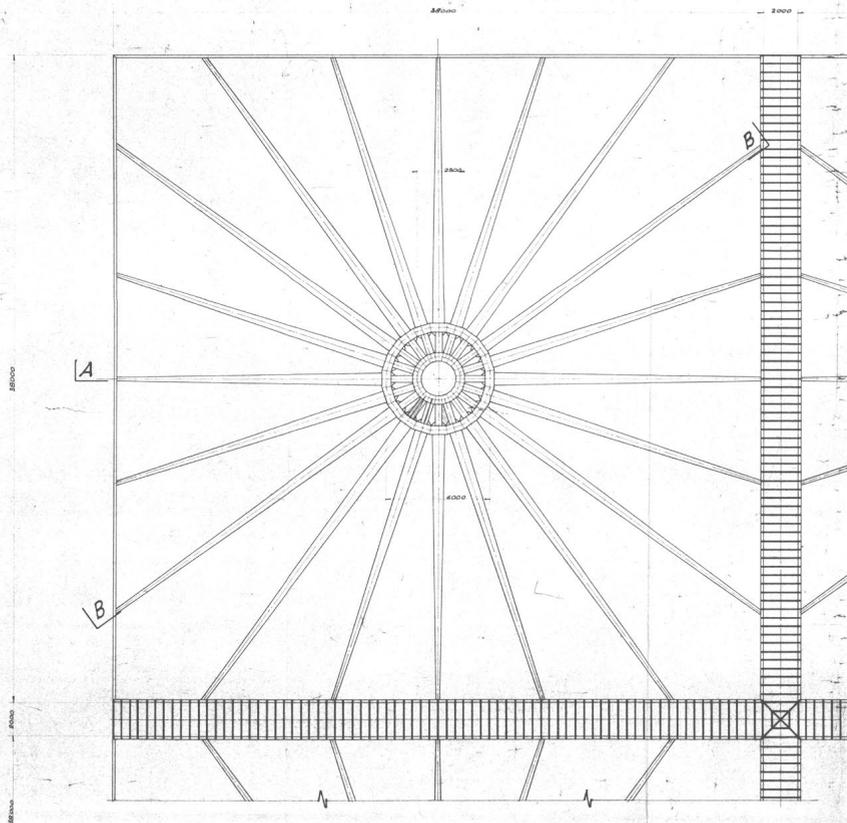
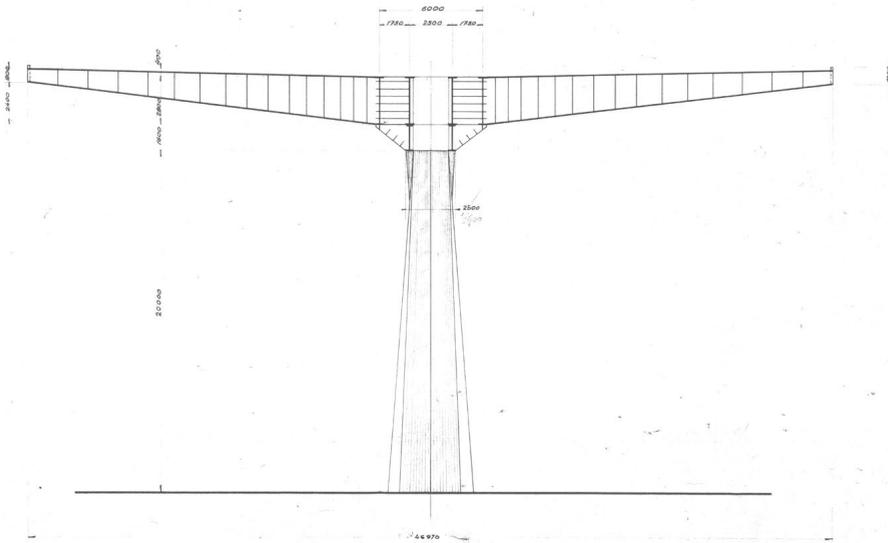
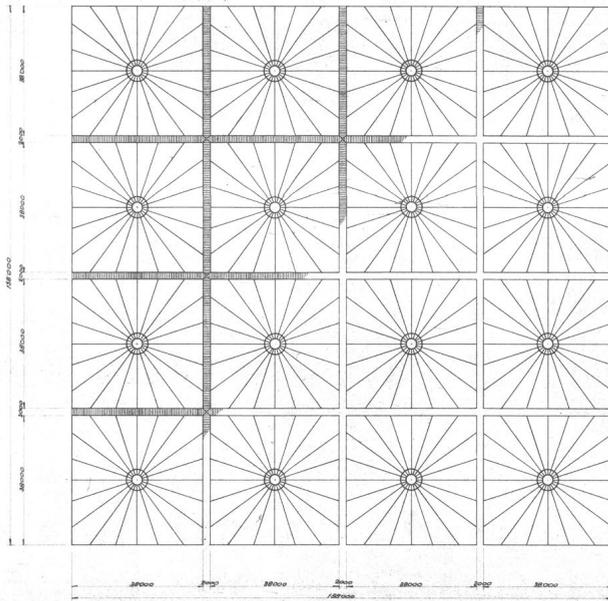


Tavola 25: Strutture di Copertura in carpenteria metallica pianta e sezioni, Archivio Fiat engineering, 1961

Sezione B-B 1:100



Pianta generale 1:500



Proprietà industriale ed intellettuale
protetta a sensi di legge. *M. M.*

S.p.A. ANTONIO BADONI - LECCO
STRUTTURE COVRE. ROMA
APPALTO CONCORSO PALAZZO
DEL LAVORO - TORINO *Prog. W. M.*
Copertura metallica - INSIEME *Dis. M. M.*
Compartimenti con travi a Z *Nota di C. M. M.*
Dis. nr. 5190 Scala 1:100 Roma 22-9-55

si in automatico nel caso si volessero variare le dimensioni delle sezioni “1” e “7”.

Definiti i parametri dimensionali di ogni sezione, è bastato modellare ogni singolo settore con l'utilizzo del comando “Unione” presente nella paletta di comandi “Crea” di Revit per la gestione delle famiglie, che consente di generare dei solidi “la cui forma, modificata nella sua lunghezza, risulta dall'unione tra una forma iniziale e una forma finale”². Utilizzando come “forma iniziale” e “forma finale” le sezioni nella giusta sequenza il risultato che si ottiene è un pilastro con le stesse caratteristiche geometriche dell'originale.

FAMIGLIA “TRAVE IN ACCIAIO PRINCIPALE”

Come per la “famiglia” del pilastro strutturale, è stato necessario partire da uno specifico modello di famiglia avente delle caratteristiche specifiche per l'elemento che si andrà a realizzare. In questo caso, si tratta della tipologia “Telaio strutturale metrico- Travi e rinforzi” che, come dice il nome stesso, permette la realizzazione di travi che compongono il telaio strutturale dell'edificio. Anche in questo caso, è stato deciso di parametrizzarne le dimensioni di sezione e di lunghezza complessiva in modo da poter riutilizzare la famiglia successivamente, sfruttando in maggior modo le potenzialità del software sul quale si sta operando.

Come già detto precedentemente, le travi che reggono la copertura metallica del Palazzo del Lavoro sono di sezione ad “I” con dimensione variabile, quindi anche in questo caso la strada più consona da seguire è quella dell'utilizzo del comando “Unione”, utilizzato già in precedenza per la realizzazione del pilastro strutturale. Per l'inserimento delle nervature di irrigidimento è stato necessario, basandosi sui disegni di progetto, posizionare dei piani di riferimento a distanze specifiche uno dall'altro, in modo da essere il più fedele possibile all'elemento esistente. Una volta fatto ciò, è bastato eseguire una seconda “unione” per definire la forma delle piastre di irrigidimento e successivamente eseguire una sottrazione di solidi nei punti nei quali le piastre non sono presenti. Successivamente è stato necessario attivare dei vincoli per poter fare in modo che tutti gli elementi si modifichino uniformemente cambiando i vari parametri dimensionali, mantenendo intatta la proporzionalità dell'elemento.

FAMIGLIA “TRAVE DI BORDO”

Per la realizzazione della “famiglia” delle travi perimetrali presenti in ogni “fungo” che compongono la copertura dell’edificio è stato utilizzato un procedimento analogo a quello adoperato per la modellazione delle travi in acciaio principali e anche in questo caso è stato necessario partire dalla tipologia di modello di telaio strutturale.

In questo caso, a differenza della trave principale, il comando utilizzato per la modellazione è il comando “Estrusione”, dato che l’elemento che si vuole realizzare è realizzato con un profilato metallico a “C” uniforme per tutta la sua lunghezza. Sono stati quindi necessari da parametrizzare le dimensioni di una sola sezione e la lunghezza totale dell’elemento.

Questa trave, però, presenta dei rinforzi saldati all’anima che servono ad aumentare la resistenza della sezione ed a reggere il profilato che vincola alla trave i pannelli metallici che compongono la testa del fungo. Essi, nel modello, sono stati realizzati singolarmente in una famiglia a parte come “modello generico” e successivamente inseriti all’interno della famiglia principale attraverso la realizzazione di una “famiglia nidificata”. Tale tipologia di famiglia, è molto utile nei casi come questo perché permette non solo di inserire dei modelli già realizzati all’interno di altre famiglie, ma ne permette la modifica attraverso la condivisione dei parametri e la copia in serie degli elementi con la possibilità di parametrizzarne l’interasse. È stata proprio quest’ultima funzione quella necessaria al caso specifico, in quanto tali elementi sono posti ad un interasse costante per tutta la sua lunghezza.

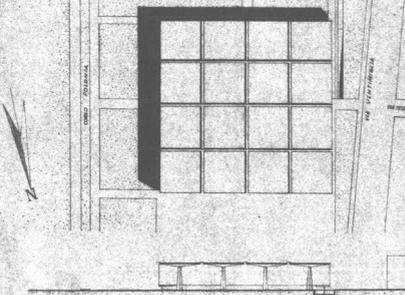
FAMIGLIA “TAMBURO DI ANCORAGGIO”

Per la realizzazione del tamburo di ancoraggio tra le travi principali della copertura e il pilastro la scelta del modello di famiglia non è stata immediata come per le travi o il pilastro, dato che questo elemento non rientra in nessuna categoria di modello che Revit ci fornisce. Perciò è stato scelto la tipologia di “modello generico”, con la quale è possibile modellare l’oggetto e successivamente assegnargli una categoria da “Parametri e categorie di famiglie”, presente nella scheda delle proprietà. Essendo un elemento di ancoraggio, è stato assegnato nella categoria “connessioni strutturali”.

INGG. NERVI E BARTOLI

ANONIMA PER COSTRUZIONI S.p.A.
LUNGOTEVERE ARNALDO DA BRESCIA N° 9 - ROMA - TEL. 355776-87911

PALAZZO DEL LAVORO-TORINO



PROGETTAZIONE STUDIO NERVI

PROGETTISTI: Dott. Ing. PIER LUIGI NERVI - Dott. Arch. ANTONIO NERVI

ROMA U. 4-5-1960

16 C.T.P.

PARTICOLARE PROSPETTO

PROG. N° 4558 SOSTITUISCE IL N° SOSTITUITO DAL N° DE

ANNOTAZIONI

PAVIMENTI:

- P₁ - GOMMA LISCIA TIPO CIVILE (S=4mm)
- P₂ - GRES BIANCO 5x10 (S=9mm)
- P₃ - GRES ROSSO 7,5x15 (S=9mm)
- P₄ - MATTONELLE D'ASFALTO COMPRESSO (S=4cm)
- P₅ - BATTUTO DI CEMENTO
- P₆ - PAVIMENTO ANTISDRUCCIOLIEVOLE PER RAMPE TIPO DUROCRET
- P₇ - MARMO PER PAVIMENTI E PER ALZATE E PEDATE DI SCALE

RIVESTIMENTI

- B₁ - SPATOLATO RESINO-PLASTICO A TUTTA ALTEZZA
- B₂ - PIASTRELLE CERAMICHE TIPO RICHARD-GINORI 15x15 (15x2,10)
- B₃ - RIVESTIMENTO FONDO ASSORBENTE
- B₄ - GRANITO GRIGIO
- B₅ - RIVESTIMENTO IN LASTRE DI TRAVERTINO
- Z₁ - ZOCCOLETTO DI LEGNO ROVERE
- Z₂ - ZOCCOLETTO DI GRES.

INFISSI METALLICI

- M₁ - VETRATA PRINCIPALE A Q. 226,20
- M₂ - INFISSI SCORREVOLI
- M₃ - INFISSI A VASISTAS.
- M₄ - PORTA METALLICA INTERCAPEDINE E PASSO D'UOMO PILASTRO

PORTE INTERNE IN LEGNO

- I₁ - PORTA 2,00x2,20 2 ANTE RIVESTITA CON RESINFLEX
- I₂ - " 1,20x2,20 2 ANTE RIVESTITA CON RESINFLEX
- I₃ - " 1,20x2,20 2 ANTE VERNICIATA
- I₄ - " 1,20x2,20 2 ANTE A VENTOLA VERNICIATA
- I₅ - " 0,80x2,20 1 ANTA VERNICIATA
- I₆ - " 0,80x2,20 1 ANTA RIVESTITA CON RESINFLEX
- I₇ - " 0,60x2,20 1 ANTA VERNICIATA

RINGHIERE E GRIGLIE

- R₁ - RINGHIERA RAMPA
- R₂ - RINGHIERE INTERNE
- R₃ - GRIGLIA SU CANALA PER RACCOLTA ACQUA PIOVANA DI COPERTURA

PARASOLI

- A - SULLA VETRATA PRINCIPALE

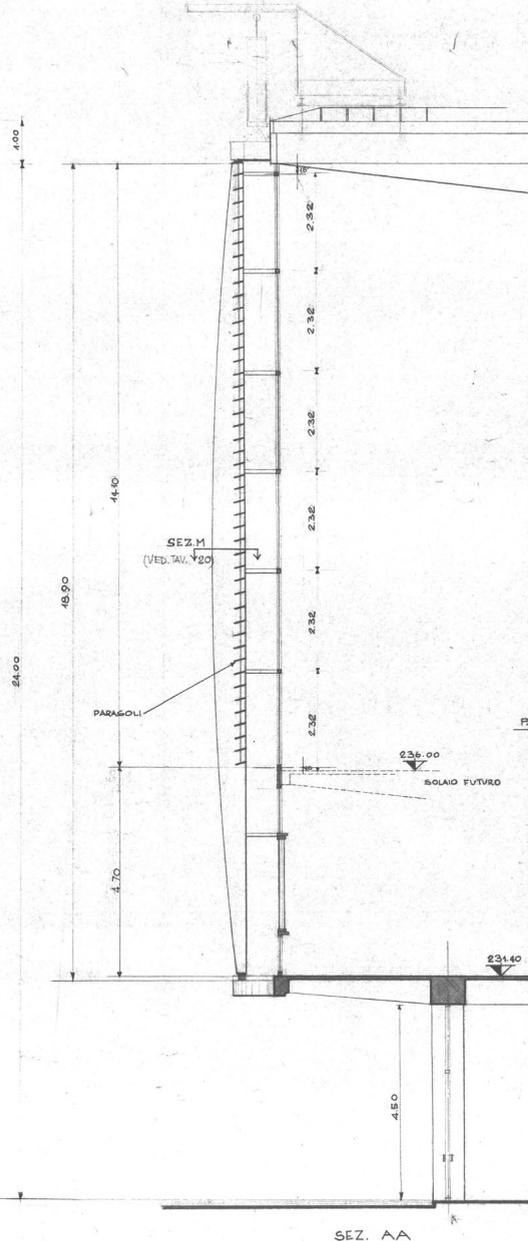
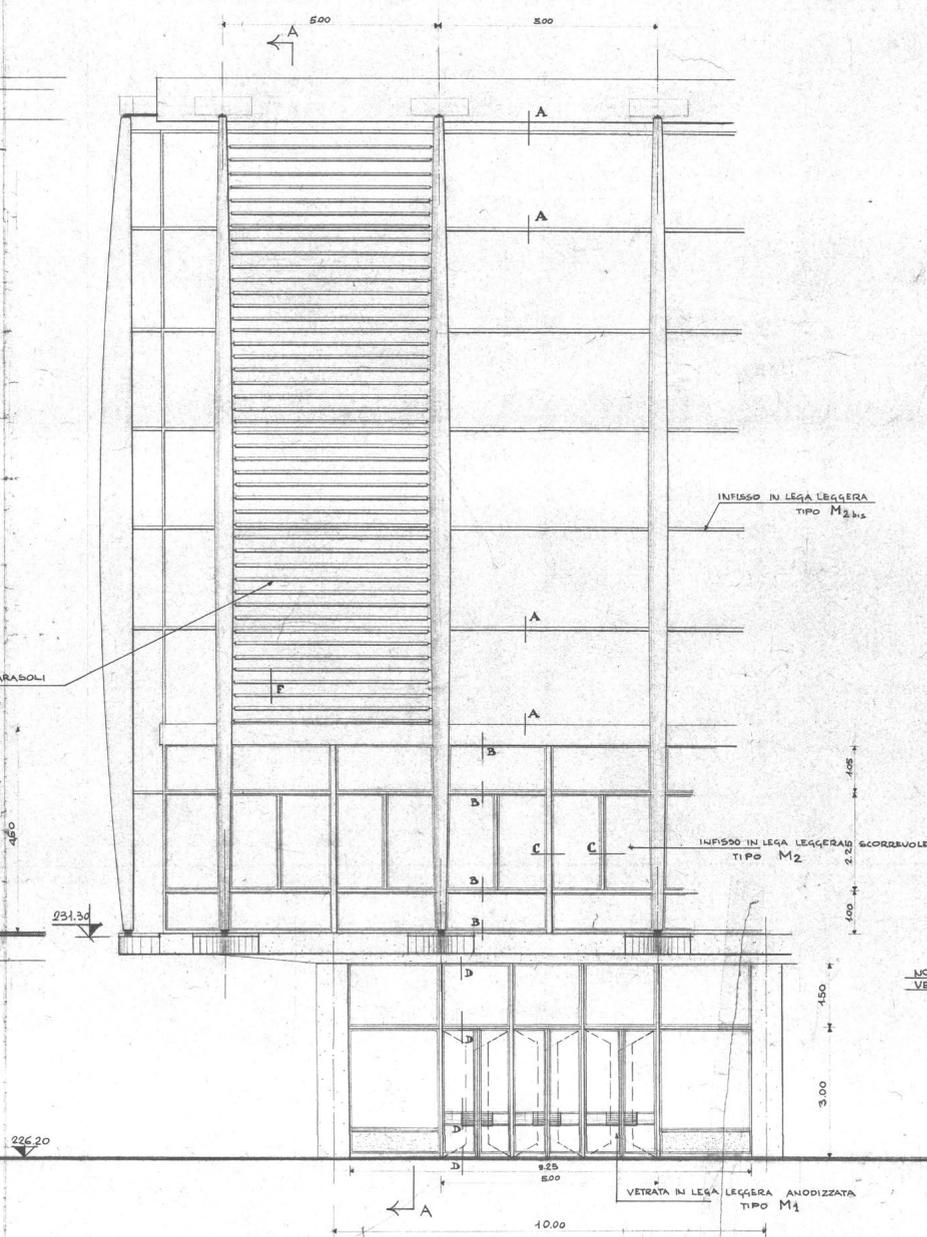


Tavola 16: Particolare Prospetto, Archivio Fiat engineering, 1961



NOTA:
VEDI PARTICOLARI INFISSI E PARASOLE A TAV. N° 20

Per la modellazione dell'elemento vero e proprio, sono stati analizzati i disegni di progetto, dove si poteva vedere, come già detto in precedenza, come l'elemento fosse composto da 20 profilati metallici saldati insieme per formare una corona alla quale si va ad ancorare ogni trave ed altrettante piastre che dovrebbero scaricarne il peso sul pilastro.

Per questo motivo, si è ritenuto più opportuno modellare singolarmente questi elementi e successivamente inserirli nella posizione corretta, collegandone i parametri attraverso la nidificazione della famiglia. Per ogni elemento sono stati parametrizzati gli spessori e le lunghezze dei profilati speciali basandosi unicamente sui progetti originali, non essendo stato possibile alcun tipo di rilievo diretto.

FAMIGLIA "FONDAZIONE STRUTTURALE"

Per la realizzazione della fondazione dei pilastri "a fungo", è stato necessario basarsi unicamente sui disegni originali di progetto non potendo avere un riscontro visivo. Anche in questo caso, come per gli altri elementi, si è partiti dal modello di famiglia più consono alla tipologia di elemento, nel caso specifico quella relativa alle fondazioni strutturali.

La particolarità di questa fondazione, è che essa è formata da un plinto cruciforme sorretto da una palificazione. Per realizzare il plinto cruciforme è stato necessario utilizzare sia la funzione "Estrusione" per la base sia la funzione "Unione" per la parte superiore. Come nei casi precedenti, le dimensioni sono state parametrizzate nel caso si volessero modificare successivamente.

Per la creazione dei pali, non avendo alcuna informazione su tipologia e profondità che i pali possano raggiungere, si è optato per l'utilizzo di una famiglia di sistema, cioè una famiglia di elementi già precaricati all'interno di Revit, inserita come famiglia nidificata. Non essendo a conoscenza della loro lunghezza e non essendo rilevante ai fini del calcolo che si andrà ad eseguire, date le poche informazioni sulle fondazioni, si è deciso di assegnare una lunghezza simbolica di 1,5m non parametrizzata.

FAMIGLIA "NERVATURE SOLAIO"

Il solaio della balconata perimetrale, è un altro elemento particolare del Palazzo del Lavo-

ro, perciò inizialmente si era optato per riprodurre fedelmente le sue nervature aventi la sezione variabile. Pensando però al trasferimento del modello da Revit a Robot Structural Analysis si è optato per l'uso delle famiglie delle travi di sistema in modo da semplificare le nervature centrali e di realizzare una famiglia per le nervature laterali del solaio, che presentano una riduzione di sezione più lineare rispetto alle altre.

Anche per la realizzazione delle nervature, il procedimento è analogo a quello utilizzato per le altre tipologie di travi. Partendo sempre dal modello di famiglia per il telaio strutturale, si è utilizzato nuovamente il comando "Unione" per poter parametrizzare entrambe le sezioni sia in altezza che in larghezza, oltre che la lunghezza totale della trave.

FAMIGLIA "RITTO PERIMETRALE"

Il ritto perimetrale è l'elemento che si fa carico di tutte le azioni agenti sulle facciate, scaricandone poi il peso sul solaio della balconata perimetrale presente al Primo Piano attraverso un giunto cardanico; per questo motivo, è stato necessario modellare separatamente il giunto dal ritto stesso.

Come per il tamburo di ancoraggio, la scelta del modello di famiglia da cui partire per questi due elementi non è stata molto semplice. Infatti, essi non rientrano perfettamente in nessuna delle macro-categorie che Revit considera nella creazione degli elementi costruttivi. Perciò per il giunto si è optato lo stesso metodo utilizzato per il tamburo di ancoraggio, ovvero partire da un modello generico ed andare successivamente a modificare la categoria della famiglia in "connessione strutturale". Per quanto riguarda il ritto stesso, si è deciso di utilizzare il modello di famiglia "pilastro strutturale", nonostante esso non sia un pilastro vero e proprio.

Per la modellazione del giunto cardanico, si è deciso di semplificarne la geometria, in quanto essa non sarà presa in considerazione nello specifico durante l'analisi strutturale ma sarà solamente preso in considerazione la tipologia di vincolo che esso effettuerà sul ritto, impostando dei parametri dimensionali per vincolarne le proporzioni.

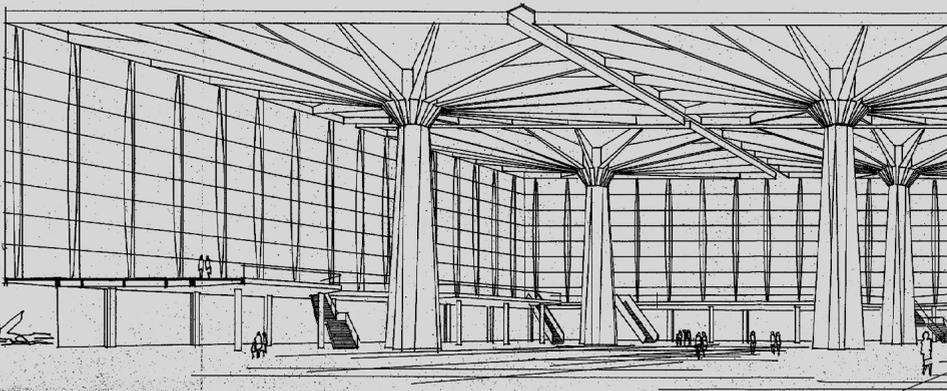
Per la modellazione del ritto è stato necessario, come per il pilastro, dividere l'intero

ITALIA 61 (CELEBRAZIONI UNITA' D'ITALIA)
 31 22-1-60 PALAZZO DEL LAVORO (SOL.C)
 PROSPETTIVA INTERNA
 mq. 0.47

IL PROPRIETARIO
 IL COMITATO PER LE CELEBRAZIONI
 DELL'UNITA' D'ITALIA

IL PROGETTISTI
 PROF. ING. PIER LUIGI NEZVI
 ARCH. ANTONIO NEZVI

Antonio Nezvi
Pier Luigi Nezvi

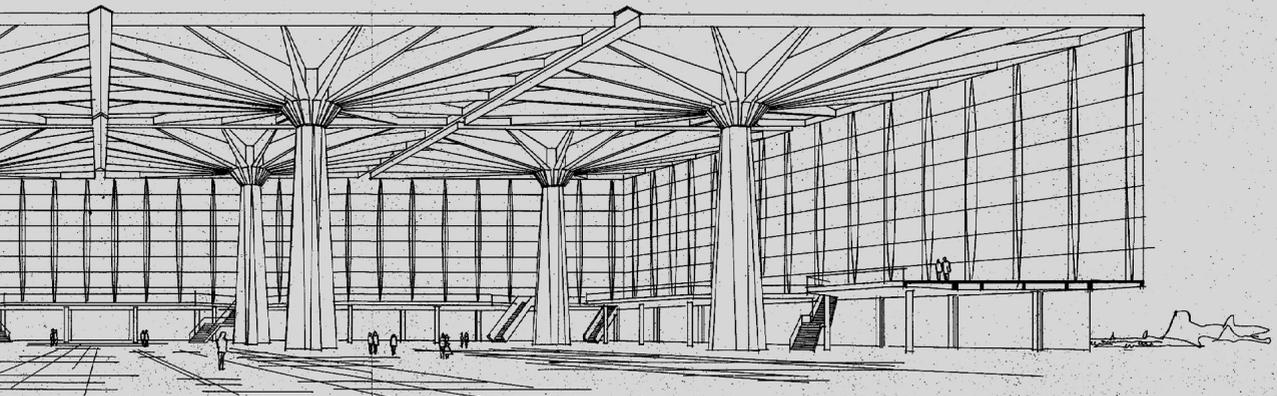


SPERIMENTI
 FONDA
 29 GEN. 1960
 N. 33

87° CORPO ARM. DEL FUOCO
 FAVOREVOLE
 18 FEB. 1960
 Il Capitano

Antonio Nezvi

Tavola 31: prospettiva interna, Archivio Fiat engineering, 1961



Confronto tra foto del Palazzo del Lavoro e modello BIM





elemento in un numero definito di settori, in modo da realizzare una geometria più verosimile possibile all'esistente utilizzando il comando di "Unione" e basandosi sui disegni originali per la definizione delle sezioni. In questo caso, data l'unicità dell'elemento e il gran numero di settori necessari a rappresentare il ritto si è deciso di non parametrizzare le dimensioni delle sezioni ma solamente l'altezza totale dell'elemento e la distanza tra gli elementi di ancoraggio al curtain wall e quella della biella di connessione alla copertura, anch'essa semplificata nella geometria come il giunto cardanico.

REALIZZAZIONE DEL MODELLO COMPLETO

Una volta che tutti gli elementi sono stati modellati in ogni singola famiglia, è stato possibile ricostruire l'intero edificio basandosi sui progetti originali e sulle planimetrie fornite dalla Fondazione Nervi. Dopo aver caricato nel progetto le famiglie create appositamente per il modello come descritto nei paragrafi precedenti attraverso il comando "carica famiglia", per le parti mancanti sono state utilizzate le famiglie di sistema per realizzare i pilastri più semplici che sorreggono le balconate, i solai strutturali, utilizzati non solo per le balconate perimetrali ma anche per le coperture stesse, e il curtain wall.

Durante la realizzazione dei solai delle balconate, è stato necessario suddividere l'intero solaio in diverse piastre, in modo tale che una volta trasferito il modello su Robot Structural Analysis per il calcolo ogni solaio venga rilevato nella maniera corretta.

Per la realizzazione dei lucernari che uniscono i "funghi", è stato utilizzato il comando "tetto" e selezionata la tipologia vetrata inclinata, anche per le parti opache, alle quali sono stati sostituiti i pannelli trasparenti con quelli metallici³

Modellazione del contesto

Per una corretta pianificazione di riuso del Palazzo del Lavoro il progetto di tesi si è proseguito con la creazione del contesto di una porzione del quartiere Nizza Millefonti. Su di esso verranno successivamente eseguite analisi di tipo ambientale. Volendo sfruttare fin dall'inizio tutte le potenzialità dei nuovi strumenti software di tipo parametrico, la creazione di questo contesto è stata effettuata tramite la creazione di un algoritmo che, una volta inseriti i dati, potesse processare in pochi istanti un modello volumetrico dell'area desiderata.

Gli input di cui ha bisogno l'algoritmo sono: il shp (Shapefile, file di formato vettoriale per sistemi informativi geografici nel quale sono registrate identità geometriche) degli edifici, il DTM (Digital Terrain Model, associazione di ogni pixel ad una quota altimetrica assoluta) in formato GeoTiff dell'area desiderata. Una versione precedente dell'algoritmo necessitava anche di una tabella excel dove fossero esplicitati i dati esportati dallo Shapefile.

La prima scrittura dell'algoritmo è stata scritta utilizzando, oltre ai cluster nativi di Grasshopper, anche due script di Python e un componente del plugin TToolbox, Read Excel Sheet. È diviso in due insiemi, il primo la creazione del terreno partendo dal DTM e il secondo la creazione dei volumi prendendo come base lo Shapefile.

La creazione del contesto viene effettuata tramite uno script di Python. All'interno del file di Grasshopper un cluster di IronPython esegue uno script di Python2.7 esterno a Grasshopper, questo script esterno trasforma i pixel del GeoTiff in coordinate creando tre file di testo (uno per le X, uno per le Y e uno per le Z), infine, il cluster importa le tre liste di coordinate. Non è stato possibile integrare all'interno di Grasshopper questo comando in quanto non è permesso installare librerie di Python all'interno di Grasshopper che esegue nativamente IronPython. La libreria necessaria ad eseguire questa operazione è OSGeo4W Shell.

La creazione dei volumi degli edifici è suddivisa in tre fasi principali. Nella prima parte del codice viene importato lo Shapefile e convertito in curve, queste, per evitare errori nella compilazione di comandi futuri, sono state forzatamente chiuse. Nella seconda parte

sono state spostate le polilinee sull'origine del file di Rhino (per non appesantire il file si sono spostate le polilinee da un sistema di grandi coordinate a piccole coordinate) prendendo come riferimento i punti centrali di ogni poligono e sono state ordinate in ordine crescente in base alla loro area. Nella terza parte ogni polilinea, che rappresenta un edificio, prendendo come riferimento la propria area, viene associata alla rispettiva altezza per la quale viene estrusa. In questa fase il primo script di python, per ulteriore verifica, controlla se l'area delle polilinee calcolata all'interno di Grasshopper equivale all'area proveniente dallo Shapefile, evitando di creare degli errori nelle estrusioni.

La seconda scrittura dell'algoritmo è stata effettuata utilizzando, oltre ai cluster nativi di Grasshopper, un solo script di Python e il plugin @it. Anche in questo secondo caso si ha la divisione in due insiemi, il primo che riguarda la creazione del terreno partendo dal DTM è invariato, il secondo, riguardante la creazione dei volumi, invece, è stato alleggerito.

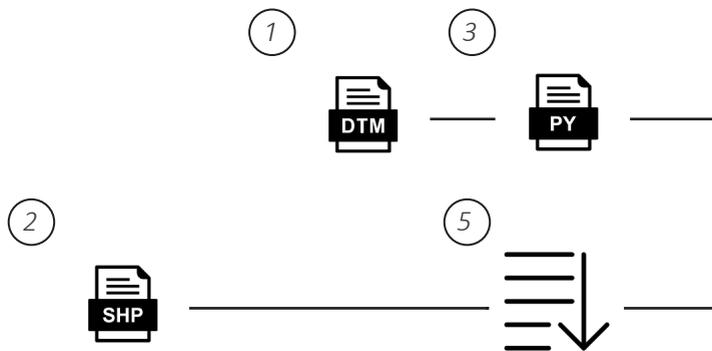
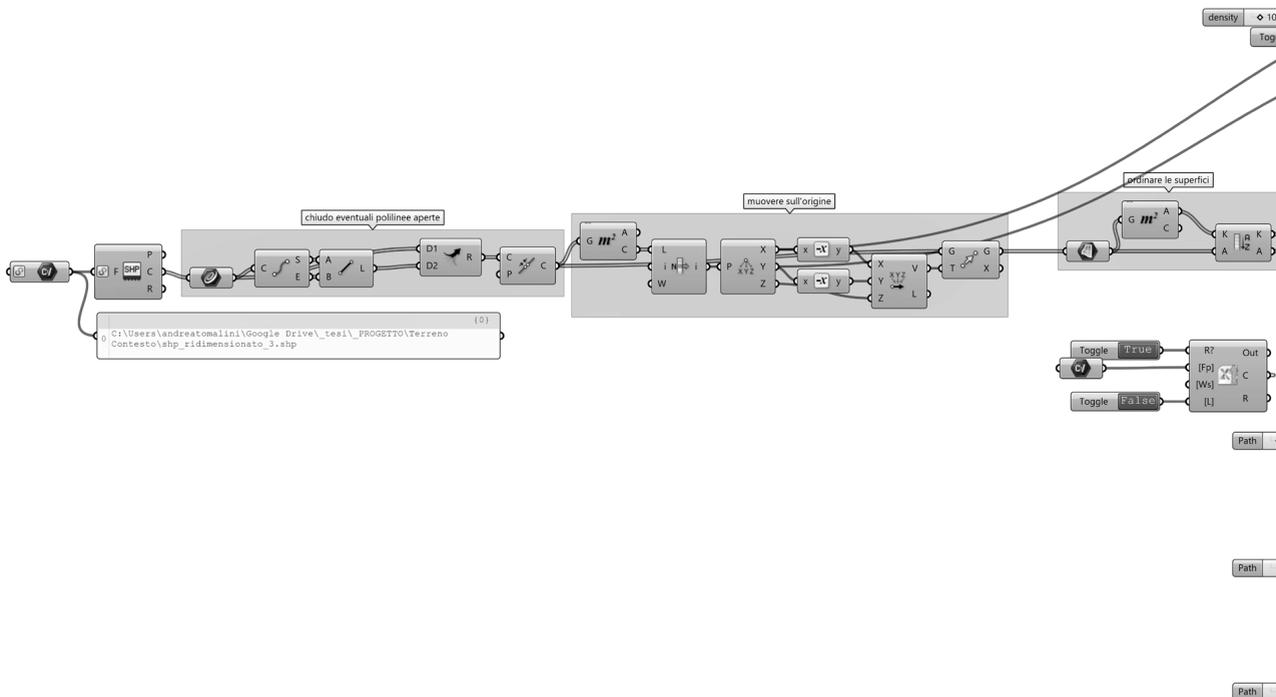
Il foglio excel è superfluo, grazie ai componenti Imp@it e DataVis@it non si ha un impoverimento del dato dello Shapefile, non si ha più bisogno di riordinare le aree per associarvi le altezze ed automaticamente viene associata la misura esatta per la quale estrudere ogni polilinea.

Le analisi di tipo ambientale eseguite sul modello hanno avuto la funzione di dimostrare come il Palazzo del Lavoro, costruito con necessità di altri tempi, sia uno spazio ricco di opportunità, ma difficile da rifunzionalizzare nel suo intero volume rispettando le sempre più esigenti richieste di tipo ambientale.

L'algoritmo, generato utilizzando i componenti di LaduBug e HoneyBee. LadyBug importa, legge e visualizza il file meteorologico standard di EnergyPlus (.epw) all'interno di Grasshopper, HoneyBee connette Grasshopper con motori di calcolo come EnergyPlus, Radiance, Daysim e OpenStudio dando la possibilità di creare diverse simulazioni in modo parametrico. In questo caso si è focalizzata l'attenzione sull'uso naturale della luce all'interno del Palazzo del Lavoro, in quanto, uno dei modi più economici per ridurre il consumo energetico negli edifici non residenziali è la sostituzione della luce elettrica, che contribuisce a circa un terzo del consumo energetico dell'edificio, con la luce diurna.

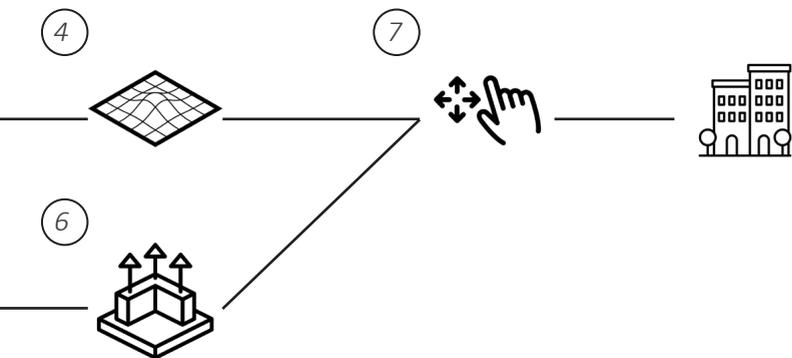
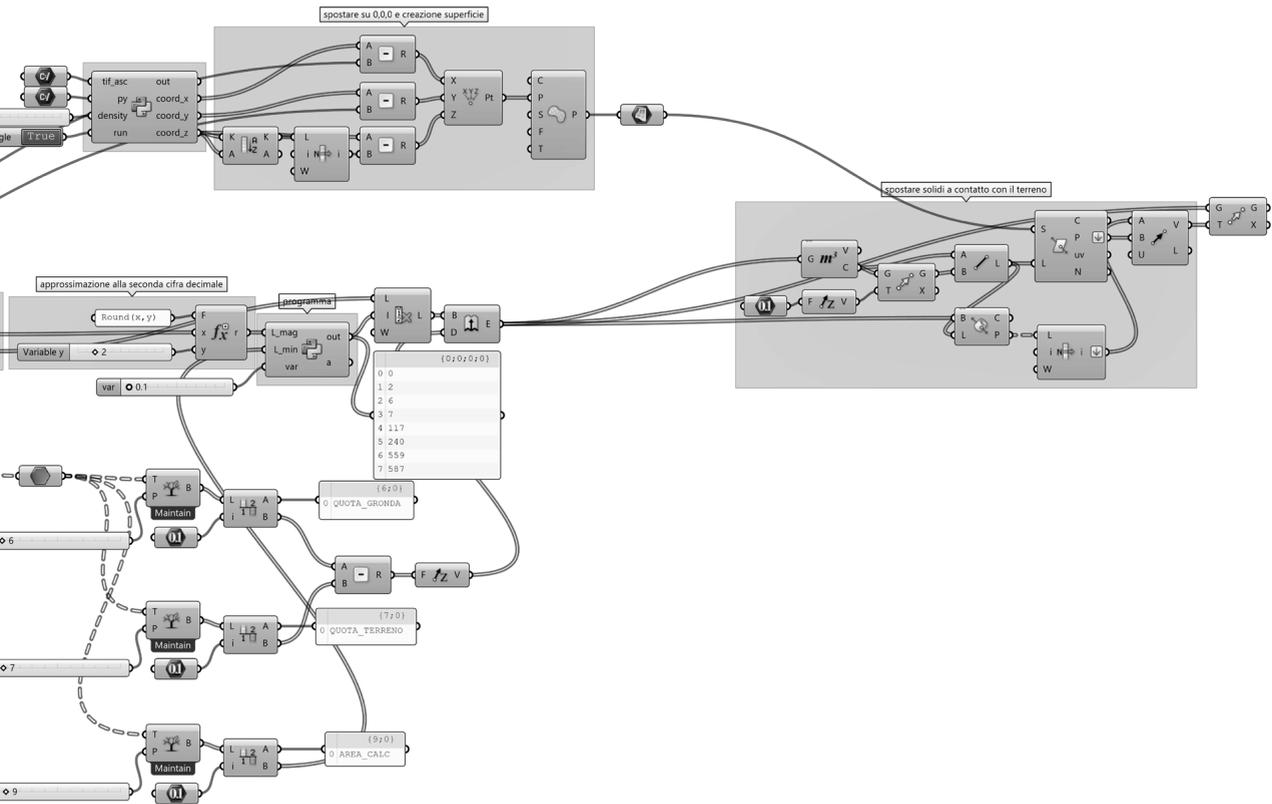
Non potendo modificare i prospetti esistenti l'algoritmo vuole mappare le superfici orizzontali del Palazzo del Lavoro identificando per ogni zona la funzione più adatta.

La procedura richiede di creare un modello semplificato del palazzo del lavoro. Ad ogni superficie viene associato un materiale corrispondente al materiale con caratteristiche di riflessione e rifrazione reali. In seguito, vengono selezionate le superfici sulle quali effettuare le analisi. La tipologia di analisi cambia a seconda del cluster selezionato e il tempo di elaborazione cresce in modo esponenziale all'aumentare del numero di punti su cui effettuare l'operazione e a seconda della precisione del calcolo richiesto.



La creazione del contesto si divide in:

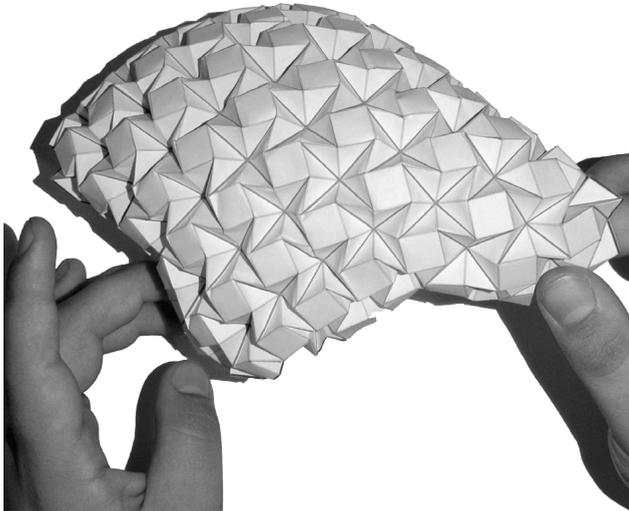
- 1- importazione del file DTM
- 2- importazione dello SHP file
- 3- il programma di Python trasforma il DTM in una nuvola di punti



- 4- dalla nuvola di punti si genera la superficie
- 5- lo SHP file viene ordinato per associare ad ogni perimetro un'altezza
- 6- gli edifici vengono estrusi
- 7- i volumi che rappresentano gli edifici vengono spostati sulla superficie generata dal DTM

Realizzazione del modello con spessore trascurabile

Come detto in precedenza il pattern scelto è il Ron Resh per la sua capacità di essere un origami rigid-foldable e non falt-foldable, ha la necessità di piegarsi al di fuori del piano potendo giungere a diverse forme con estrema facilità. Ripetiamo che il Ron Resh ha una struttura rigida periodica in una direzione data dalla ripetizione di triangoli o quadrati. Partendo dal foglio che lo compone, se le forze in gioco sono omogenee su tutto il pattern, si può constatare come le deformazioni durante le fasi di piega avvengano solo al di fuori del piano ed ogni triangolo (e/o quadrato a seconda della tipologia creata) cambi durante tutta la trasformazione il piano su cui giace assumendo una conformazione a cupola più o meno curva fino a che non si raggiunge la configurazione completamente piegata dove i triangoli esterni (o i quadrati) arrivano a giacere sul medesimo piano parallelo al foglio iniziale e rialzato dal piano di origine.



Origami Ron Resh quadrato

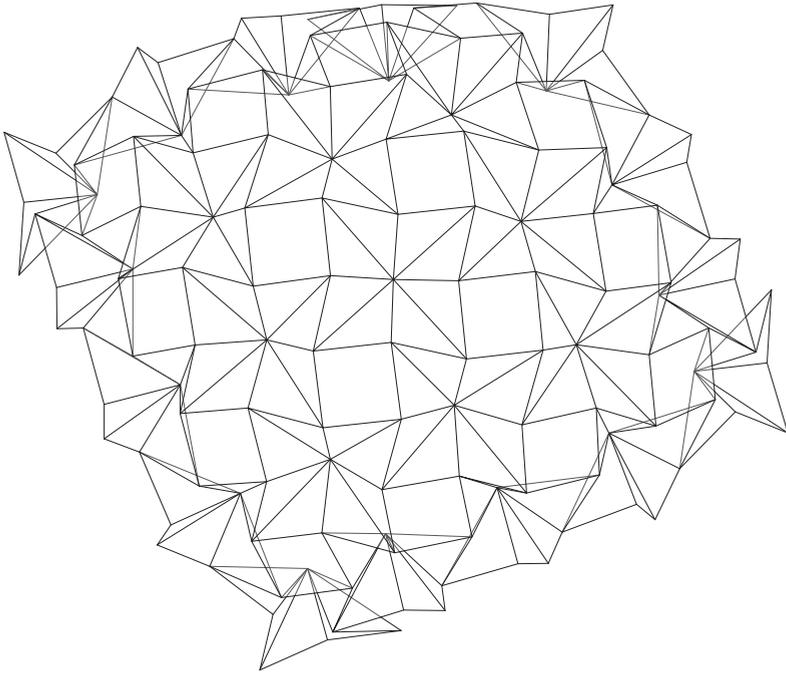
L'obiettivo dell'algoritmo è quello di riuscire a simulare il comportamento reale in ambiente digitale del Ron Resh sia triangolare che quadrato e, in una seconda fase, di ricavare quelle dimensioni che descrivono l'origami nelle fasi scelte del cinematismo per poter studiare i dettagli tecnologici per una movimentazione reale.

Prima di costruire il modello digitale è stato necessario studiare empiricamente i comportamenti di un modello cartaceo. La serie di considerazioni osservate sul modello cartaceo è stata riscritta in forma di goals all'interno di Grasshopper. Per eseguire il passaggio da superficie sviluppata a superficie piegata è necessario spingere nei punti centrali delle valley e, soprattutto nel caso di Ron Resh quadrato, bisogna impedire alle facce che comporranno poi la parte superiore dell'origami di piegarsi. Per "aggiustare" la forma piegata finale è necessario ricalcare le curve di mountain che identificano il Ron Resh come quadrato o triangolare. Una deformazione del modulo di base influenza notevolmente il comportamento del modello globale, questo fenomeno lo si osserva nel momento in cui si va o a spiegare o a piegare completamente un solo "ombrello" che compone le pieghe di valley del Ron Resh. Una volta piegato, se non vengono applicate forze il Ron Resh non è perfettamente planare in quanto gli "ombrelli" di valley non possono essere completamente piegati.

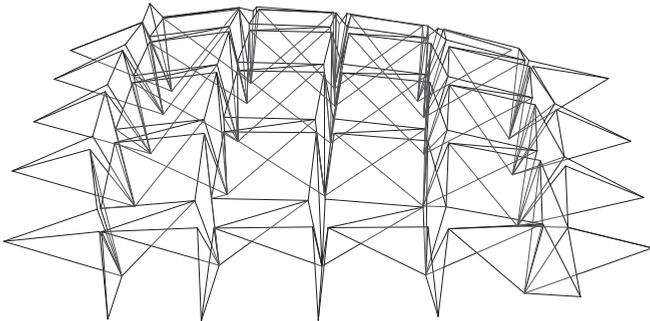
L'algoritmo è stato sviluppato all'interno di Grasshopper con un forte utilizzo dei componenti di Kangaroo, all'interno di questo vengono individuate cinque fasi. Kangaroo ragiona attraverso obiettivi, detti goal, ogni obiettivo ha un peso numerico, se questi "pesi" non sono bilanciati l'algoritmo non funziona correttamente.

Per far sì che l'algoritmo funzioni è necessario disegnare il pattern scelto su Rhino con linee spezzate e avendo una certa attenzione inserendo l'origine di ogni gruppo di linee di valley nello stesso punto ed inserirle su un layer apposito ed applicare la stessa attenzione per le linee di mountain, infine il contorno dei quadrati o dei triangoli, che dovrebbero essere linee di mountain inserirli in un terzo layer, questo contorno deve essere composto da linee spezzate e non è importante come viene disegnato.

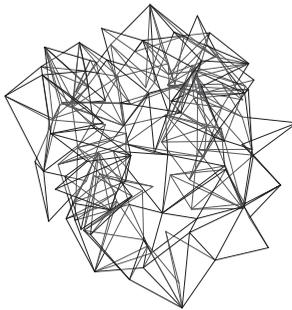
All'interno di Grasshopper è necessario importare le linee di valley e di mountain in cluster differenti e riparametrizzarle e creare anche un cluster che contenga tutte le linee



Origami in fase di movimento



Origami completamente piegato



Origami non bilanciato correttamente

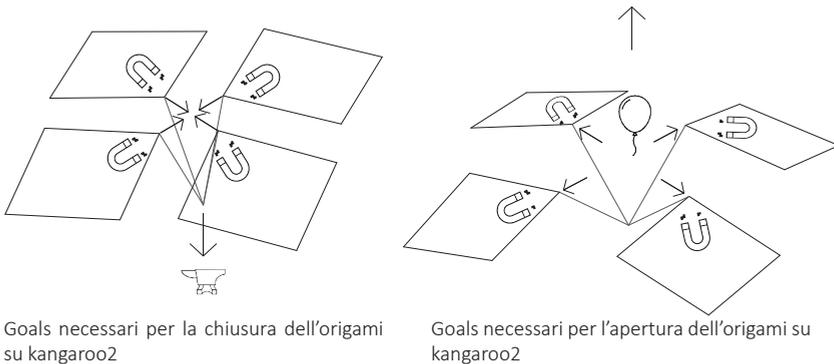
del pattern.

L’algoritmo, se le linee sono state disegnate correttamente, le dividerà in gruppi di linee e identificherà l’origine di questi gruppi di linee, i punti che descrivono o i quadrati o i triangoli del pattern e i punti perimetrali. Su di essi verranno applicati diversi goal come: i punti di ancoraggio al suolo sui punti perimetrali, forze attrattive ai vertici che identificano il pattern come quadrato o triangolare, forze che impediscono la deformazione degli angoli o delle linee di contorno delle facce.

Il goal più importante, che fa iniziare il movimento e che va ad equilibrare le precedenti forze, è l’inserimento di una forza nei punti contrali di ogni gruppo che spinge quei punti verso il basso. Questa forza è quella senza la quale le altre forze non si attiverebbero.

Tutte le linee che descrivono il pattern, invece, vengono utilizzate per la creazione della mesh sulla quale verranno applicate le forze appena descritte e sulla quale verrà applicata una “memoria di forma” presente sui modelli di carta identificando l’angolo massimo raggiungibile dagli angoli valley e mountain.

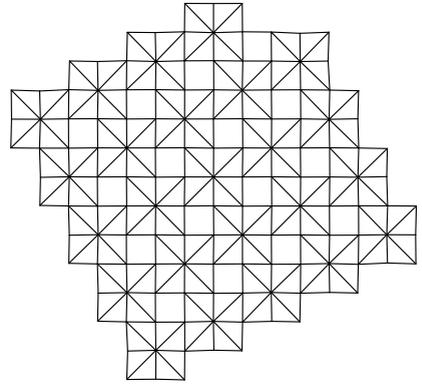
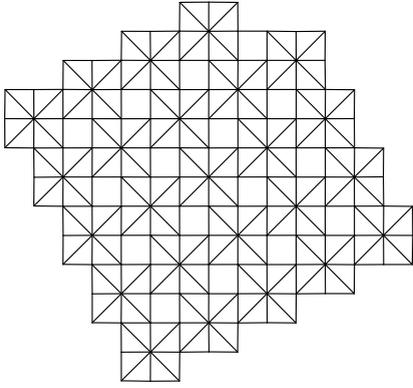
Il processo appena descritto genera una mesh che, a seconda della “percentuale” di piega inserita, mostra il cinematismo del pattern.



10%

20%

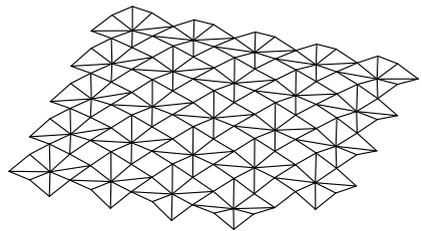
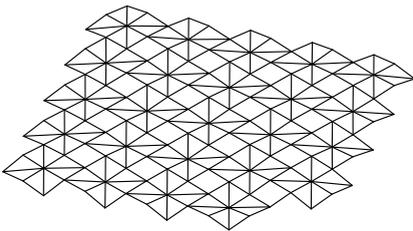
Vista orizzontale



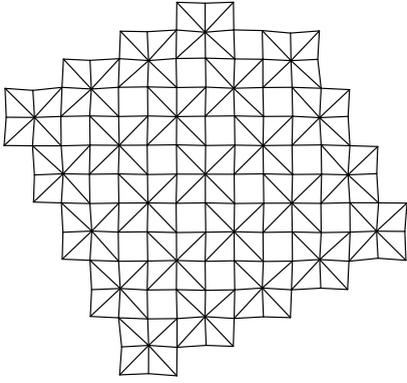
Vista frontale



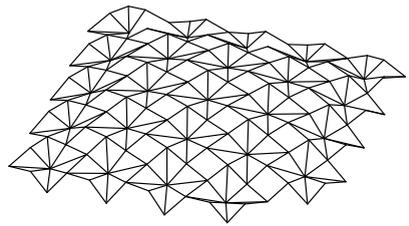
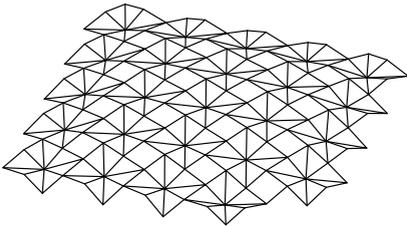
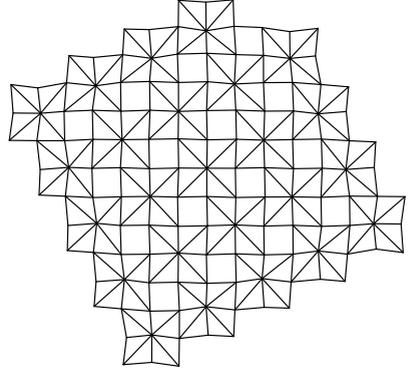
Vista prospettica



30%



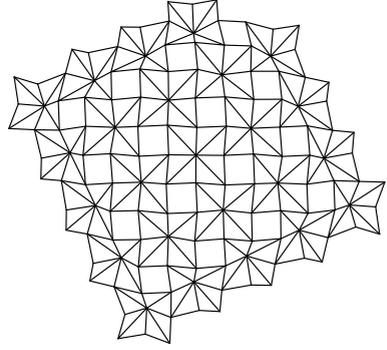
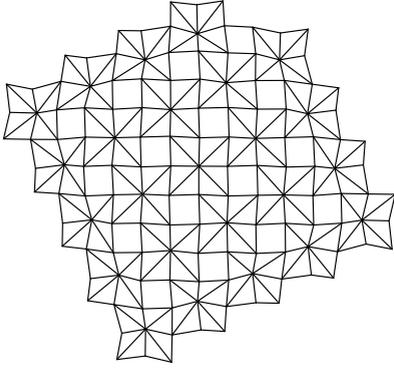
40%



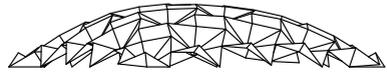
50%

60%

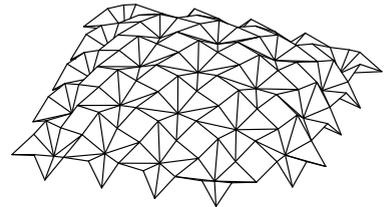
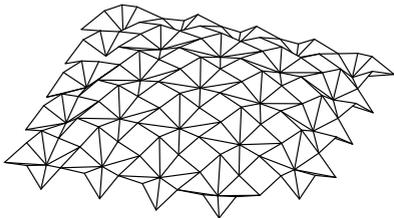
Vista orizzontale



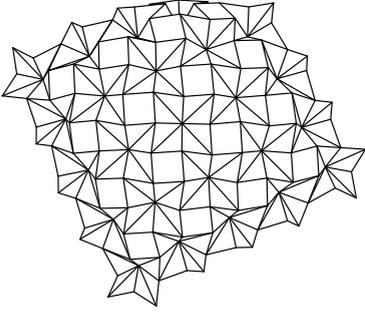
Vista frontale



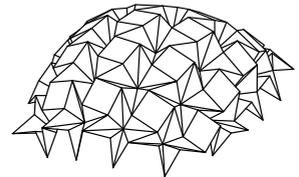
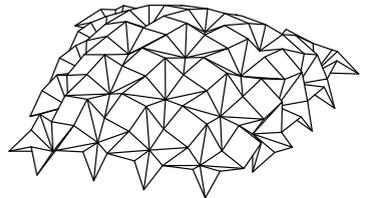
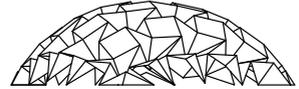
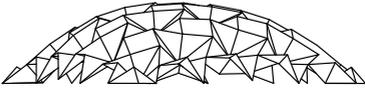
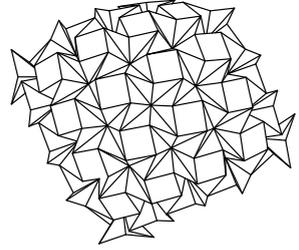
Vista prospettica



70%



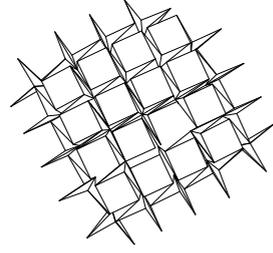
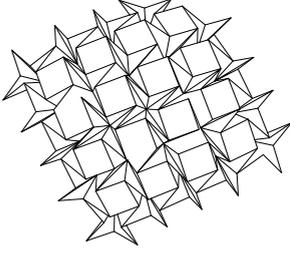
80%



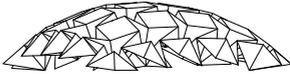
90%

100%

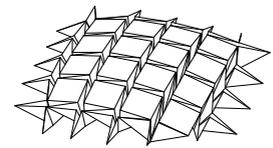
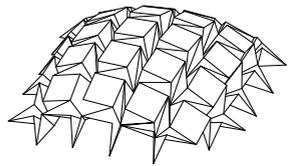
Vista orizzontale



Vista frontale

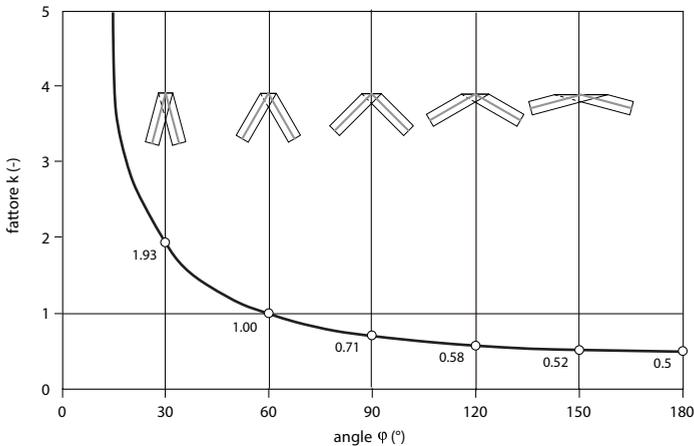


Vista prospettica

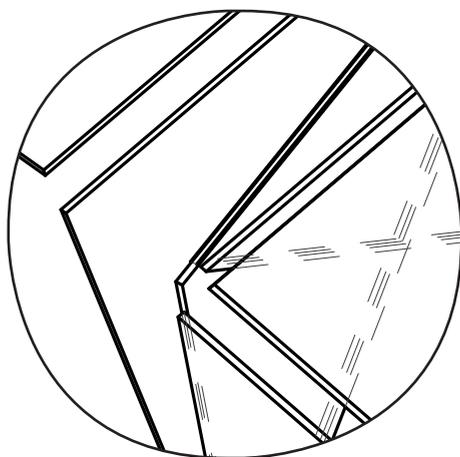
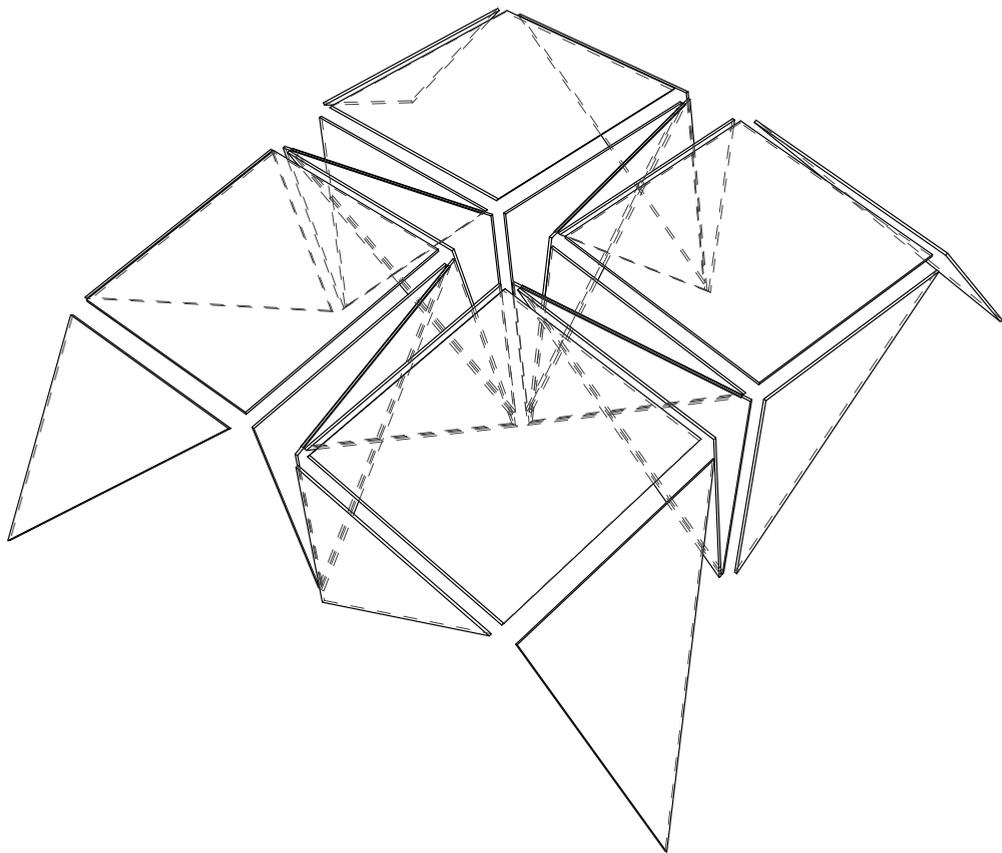


Realizzazione del modello digitale con spessore non trascurabile

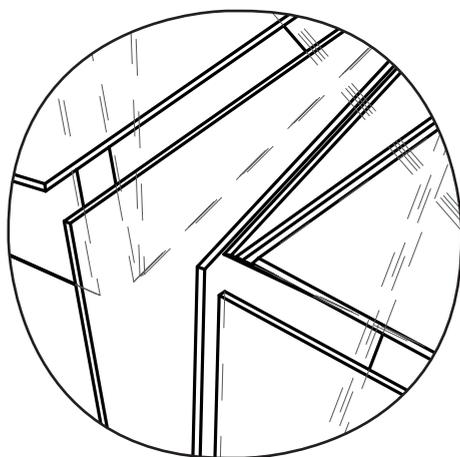
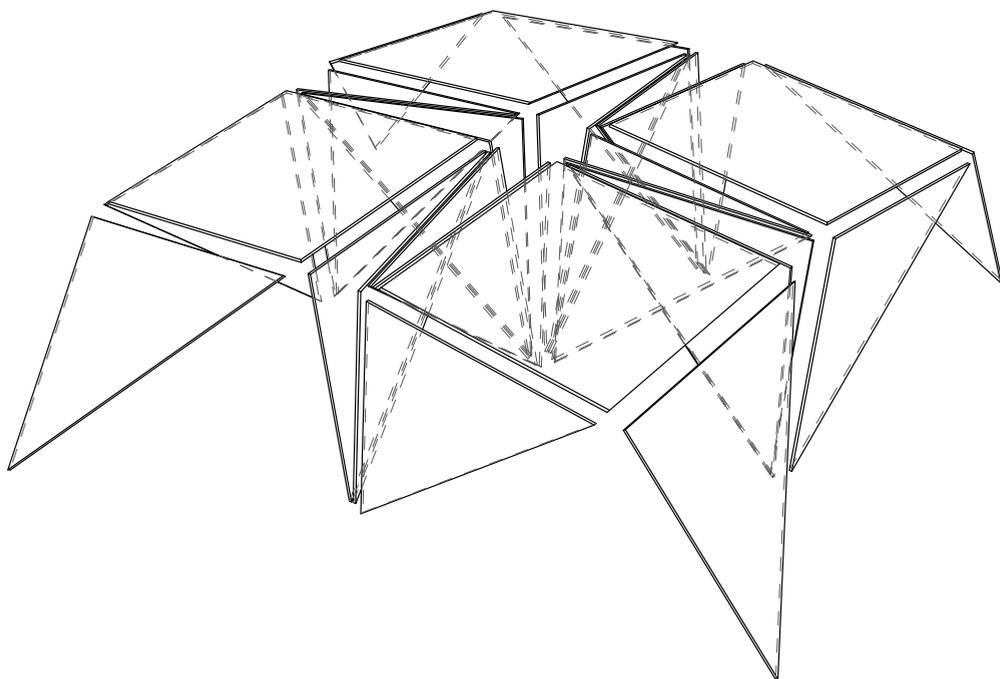
La costruzione del modello con spessore non trascurabile è stato fondamentale per effettuare poi quel passaggio da modello digitale a modello fisico. Una volta acquisite le forme in cui la struttura avrebbe occupato meno spazio, e di conseguenza ci sarebbero state sicuramente delle intersezioni tra i pannelli, di è decostruita la mesh. Le facce con 4 vertici sono state eliminate per semplificare l'algoritmo, quelle a 3 vertici invece sono state estruse secondo la loro normale dello stesso spessore del pannello reale. L'algoritmo riesce ad identificare quali prospetti si intersecano a vicenda e li separa in una seconda lista. Calcolato il volume in comune l'algoritmo allontana i pannelli eliminando l'intersezione e non creandone una nuova. Su questo modello a spessore non trascurabile sono state misurate le distanze e gli angoli tra i pannelli in modo da dimensionare le cerniere.



Relazione tra angolo di flessione e fattore k, il fattore (k) che descrive la sovrapposizione delle facce. Fonte: Buri, 2010.



La criticità maggiore dell'algoritmo generato è quella di gestire le facce del Ron Resh come se non avessero spessore, il risultato è che nel momento in cui si effettua il passaggio da modello composto da facce bidimensionali a facce tridimensionali queste sovrapporranno.



Per evitare che le superfici si sovrappongano è stato creato un secondo codice che individua le facce sovrapposte, ne identifica le normali delle superfici che si sovrappongono e sposta le facce

NOTE

- 1 Roudsari, Pak, & Smith, 2013
- 2 autodesk, s.d.
- 3 La realizzazione del modello in Revit e la descrizione di questa fase è frutto della collaborazione con il mio compagno Andrea Trovato



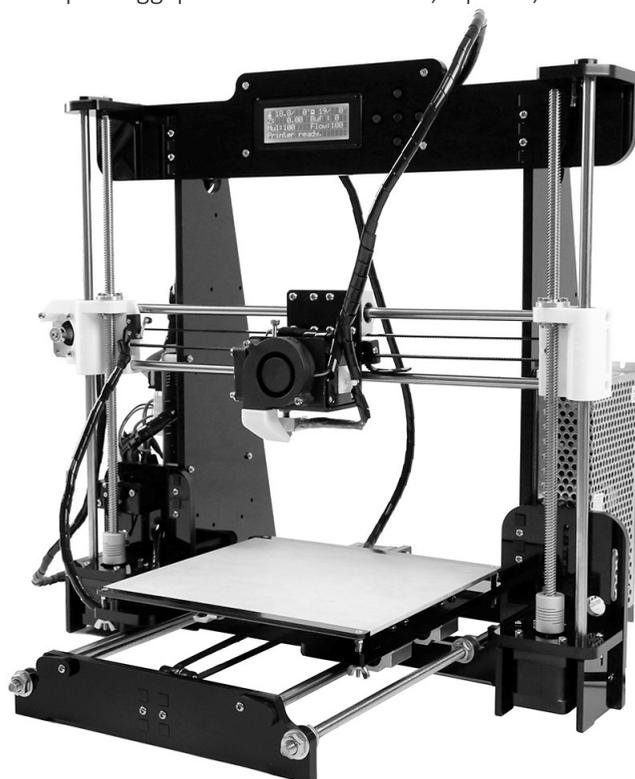
COSTRUZIONE MODELLO FISICO

Gli strumenti

Oltre a strumenti tradizionali, come trapani, seghetto alternativo, troncatrici o smerigliatrici, durante la costruzione del modello fisico, per perseguire nel modo più fedele possibili le soluzioni tecnologiche che verranno spiegate in seguito è stato necessario utilizzare strumenti della digital fabrication.

La stampante 3D, in particolare una cartesiana, la Anet A8, ha permesso la costruzione delle cerniere in gomma per poter garantire l'elasticità necessaria per un movimento fluido della struttura e dei giunti di collegamento tra motore e struttura.

La prototipazione rapida oggi prevede due momenti, il primo, durante il quale si genera

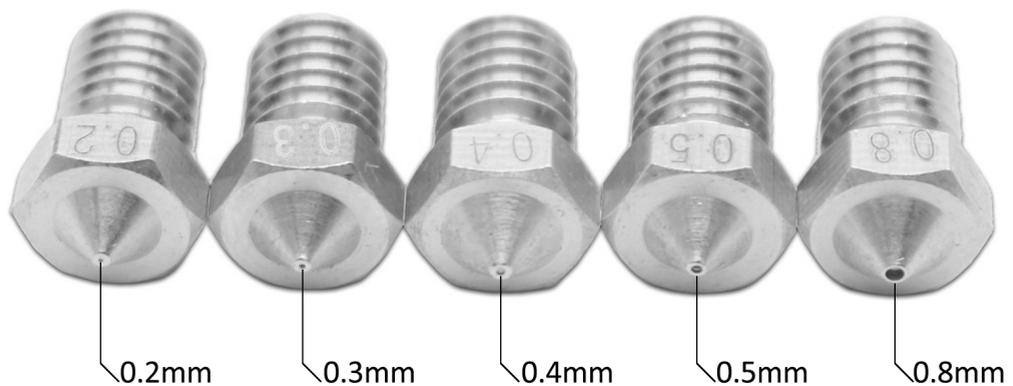


ANET A8 ▲

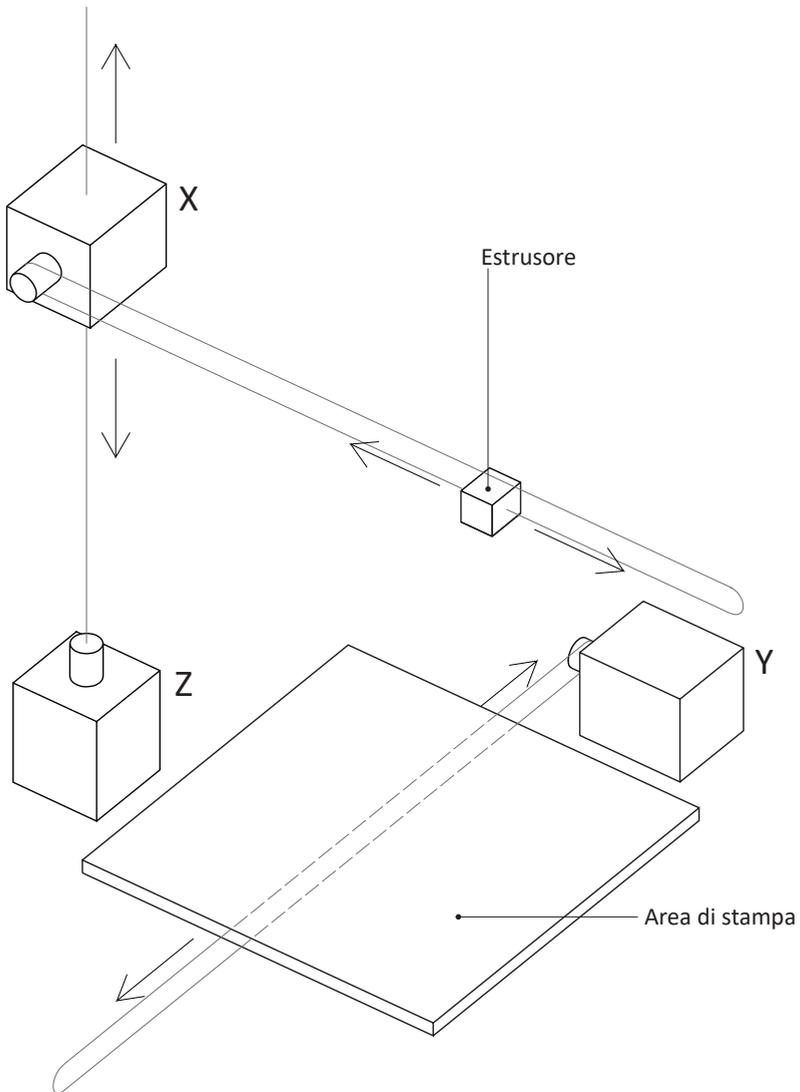
◀ Foto fase di produzione del modello in legno

il modello digitale di ciò che si vorrebbe stampare, il secondo, nel quale si stampa effettivamente il modello. Ad oggi per stampare il modello è necessario che il modello digitale si in formato STL (Stereo Lithography), il modello STL è l'equivalente di una mesh triangolare chiusa.

Il grado di accuratezza che il modello fisico può raggiungere è influenzato dalla precisione dello strumento che viene utilizzato. Nel caso preso in esame l'accuratezza dei movimenti raggiungibile dai motori sul piano XY è di 0.012mm e sull'asse Z di 0.004mm. Nel caso di stampanti 3D FDM (Fused Deposition Modelling) il fattore che incide maggiormente sulla precisione del pezzo stampato è la dimensione del nozzle, nel nostro caso di 0,4mm, in quanto, oggetti con curve, raggi di dimensioni minori di 0,4mm non sarebbero stati stampati.

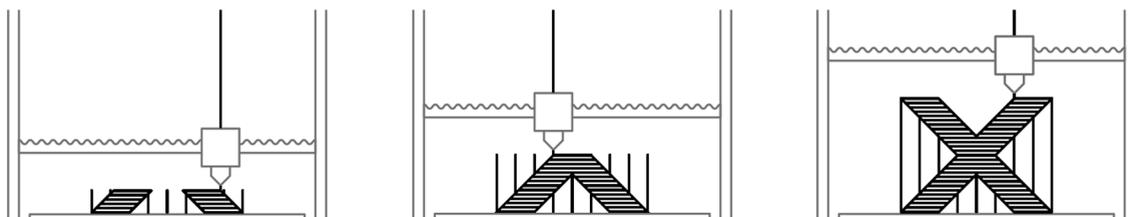


Dimensioni di nozzle in ottone per stampanti FDM



Schema di movimento delle stampanti 3D cartesiane

Il funzionamento della macchina è molto semplice, una volta inserito il file da stampare un filamento polimerico viene spinto verso attraverso un ugello, il quale, riscaldato attraverso una resistenza, lo fonde e lo deposita all'interno dell'area di lavoro strato dopo strato.



Funzionamento stampante 3D FDM "layer by layer"

I materiali che sono stati stampati per il modello sono due, il PLA e il TPU:

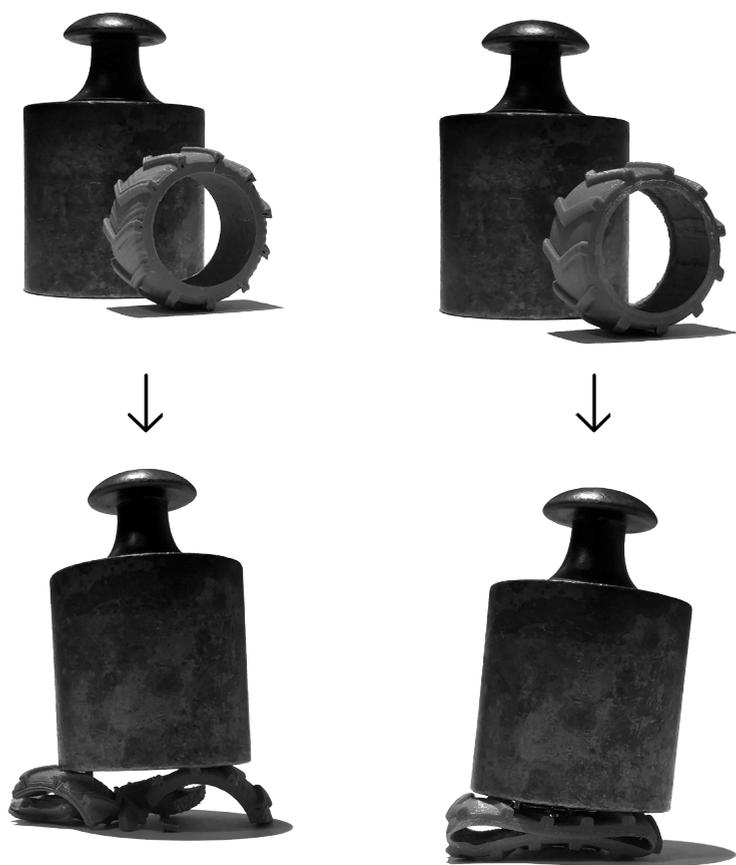
Il PLA, o Poli Acido Lattico, utilizzato per la creazione delle connessioni tra motore e struttura, è un polimero dell'acido lattico. Fonde ad una temperatura di 180 °C, per una migliore adesione tra i layer la stampante viene portata a 210°C, le sue proprietà principali sono meccaniche e di biodegradabilità.

Le proprietà meccaniche del materiale variano da quelle di un polimero amorfo a quelle di un polimero semicristallino. In caso di materiale stampato influisce notevolmente il verso, l'adesione e il riempimento di ogni layer si stampa.

Le sue proprietà di biodegradabilità si attivano solo in seguito ad un processo di idrolisi, la sua vita media è variabile da 1 a 4 anni.

Il TPU, utilizzato per la creazione delle cerniere, è un poliuretano. È un polimero elastomero termoplastico che non richiede di essere sottoposto a processo di vulcanizzazione¹. Caratterizzato da un'elevata resistenza all'abrasione e alle basse temperature, per questo viene utilizzato per applicazioni speciali. Il suo livello di durezza varia da Shore 35 A Shore

80D,² nel caso in esame è uno Shore 85 A. Come altri materiali termoplastici può essere riciclato.

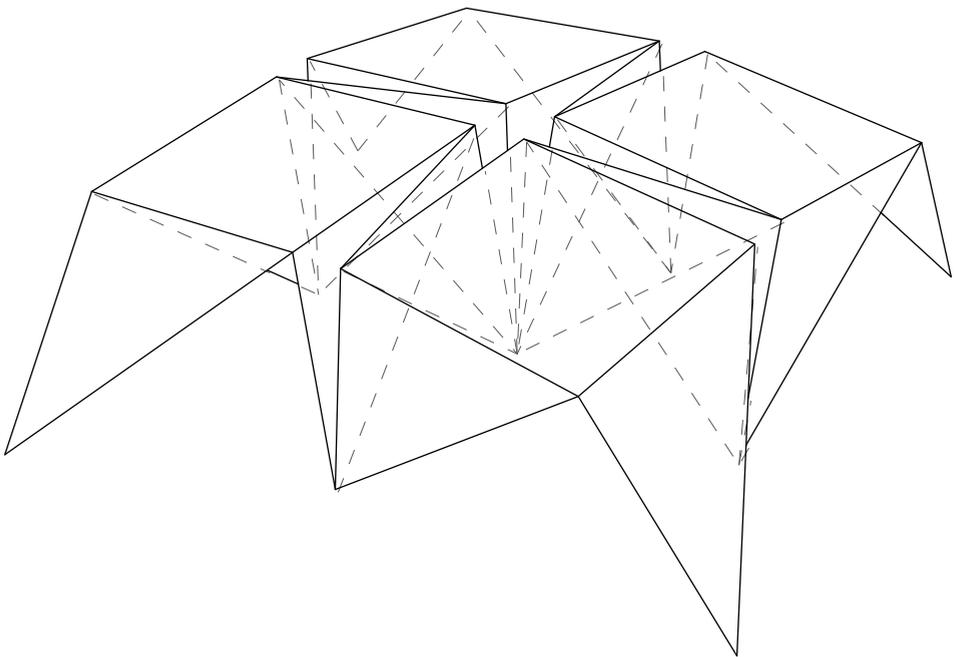


Schema di come il PLA reagisce a carichi. E' un materiale molto rigido e fragile. Nel caso specifico la sua resistenza varia molto a seconda del pattern e della percentuale di riempimento.

Schema di come il TPU reagisce a carichi. E' un materiale elastico. Anche in questo caso la sua resistenza agli sforzi varia molto a seconda del pattern e della percentuale di riempimento.

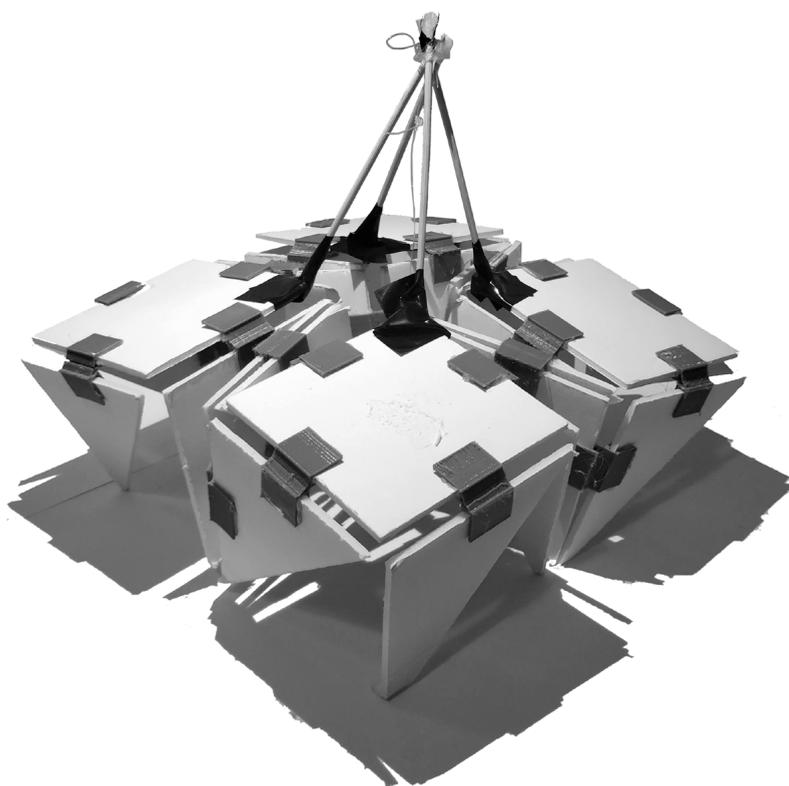
Le fasi

La prima fase, la costruzione del modello matematico, ovvero il disegno tridimensionale dei singoli elementi attraverso software parametrici, è stata descritta in precedenza. Si sono indagate le pieghe e le relazioni tra le facce dell'origami Ron Resh realizzato con la carta e poi riportate sul modello matematico. In questo caso viene definito come modello matematico in quanto i metodi digitali di rappresentazione utilizzati, software parametrici, hanno un approccio alla modellazione che fa uso di parametri che possono modificare in modo interattivo la forma dell'oggetto disegnato. La rappresentazione matematica è quella che fa uso della matematica NURBS e descrive le forme in modo continuo e accurato, metodo preferibile in architettura in quanto consente di avere un maggior controllo delle forme.

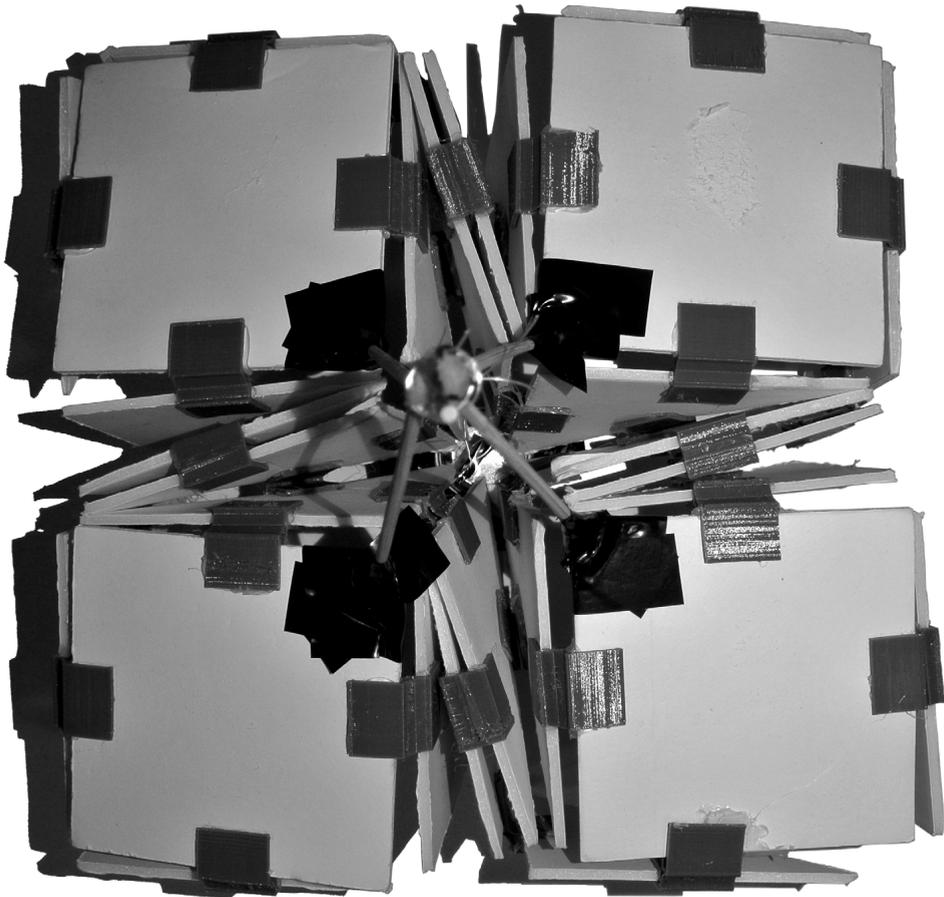
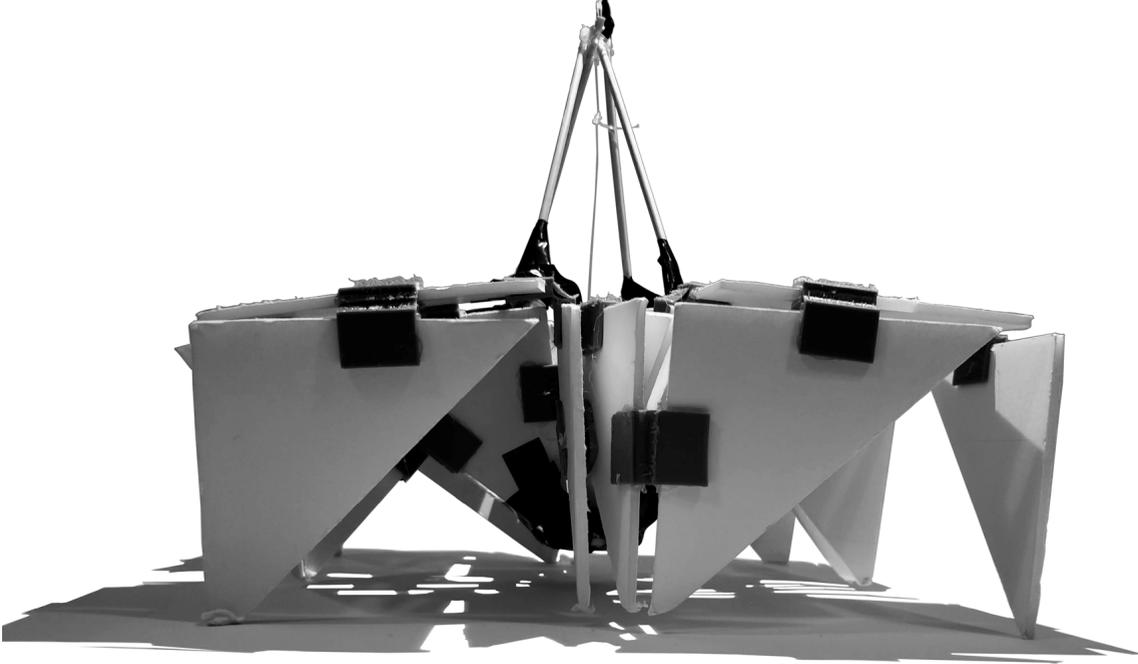


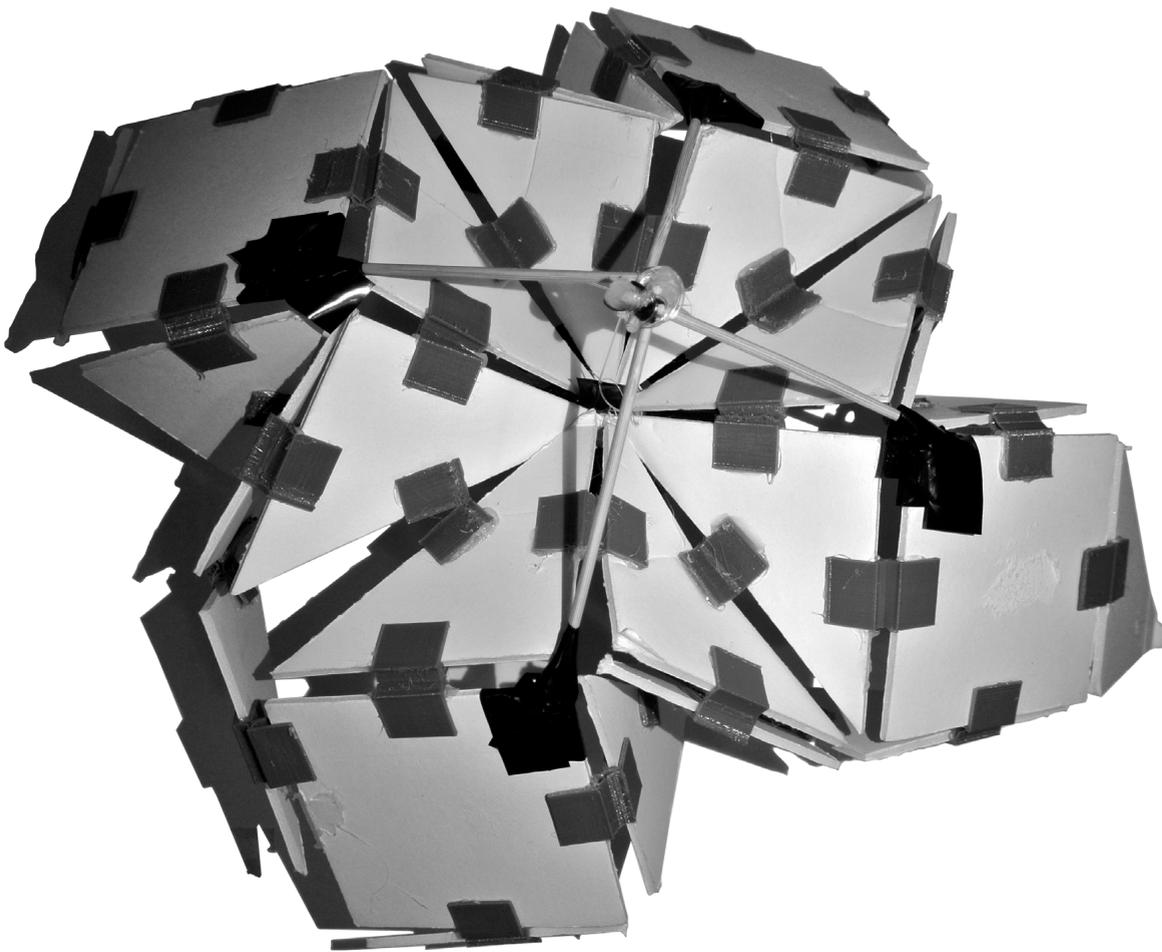
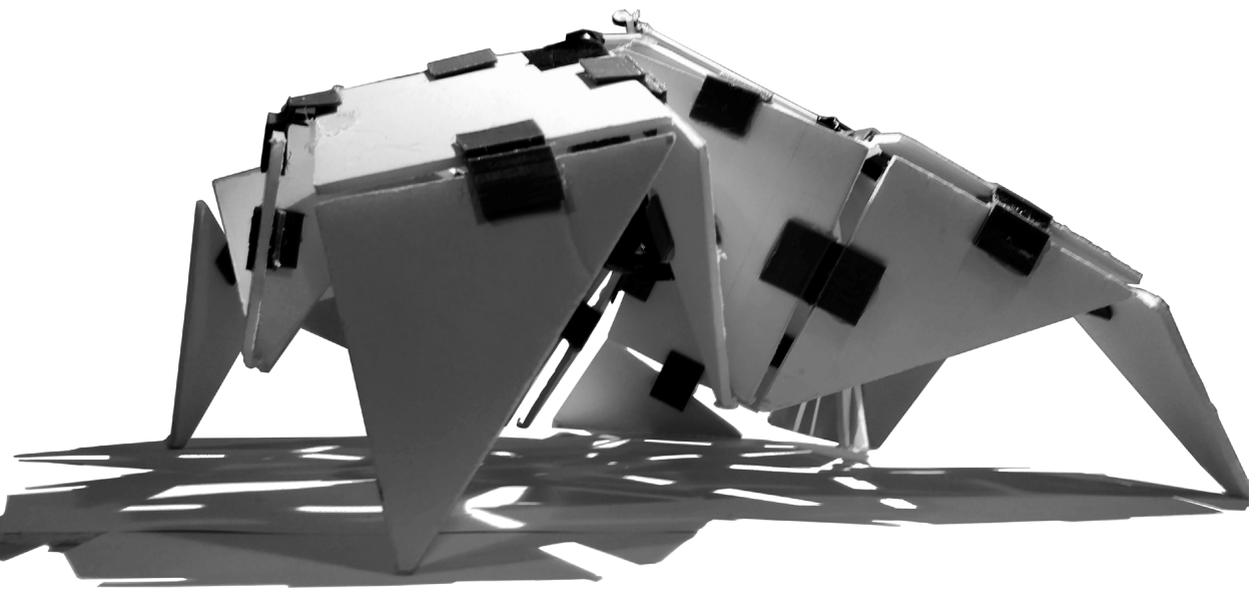
Vista wireframe modello digitale

La seconda fase, la costruzione di un “pre” modello fisico, è consistita nel rapportarsi per la prima volta con i problemi che comporta l’assemblaggio e la movimentazione di questa struttura. Le facce rigide sono state ritagliate a mano sul poliplat, i giunti, invece, sono stati realizzati in TPU attraverso un processo di stampa in 3D. Il materiale del giunto, la gomma, è stato suggerito dall’osservazione dell’origami in carta sul quale sono osservabili determinati movimenti e risposte a forze esterne in quanto, la carta, possiede una determinata memoria di forma. Questa proprietà non sarebbe stata persa utilizzando cerniere metalliche. La forma delle cerniere inizialmente è stata suggerita dagli studi effettuati da T.Tachi sul Tapered Method, in seguito, attraverso prove empiriche, e grazie alla velocità con la quale il singolo giunto viene prodotto, sono stati ottimizzati il numero di layer di contorno, lo spessore dei layer e l’altezza dei layer per ottenere il giunto adatto per garantire quella memoria di forma che sulla carta sarebbe scontata.



Pre modello in poliplat sul quale sono stati effettuati i test per studiare i giunti e il sistema di movimento



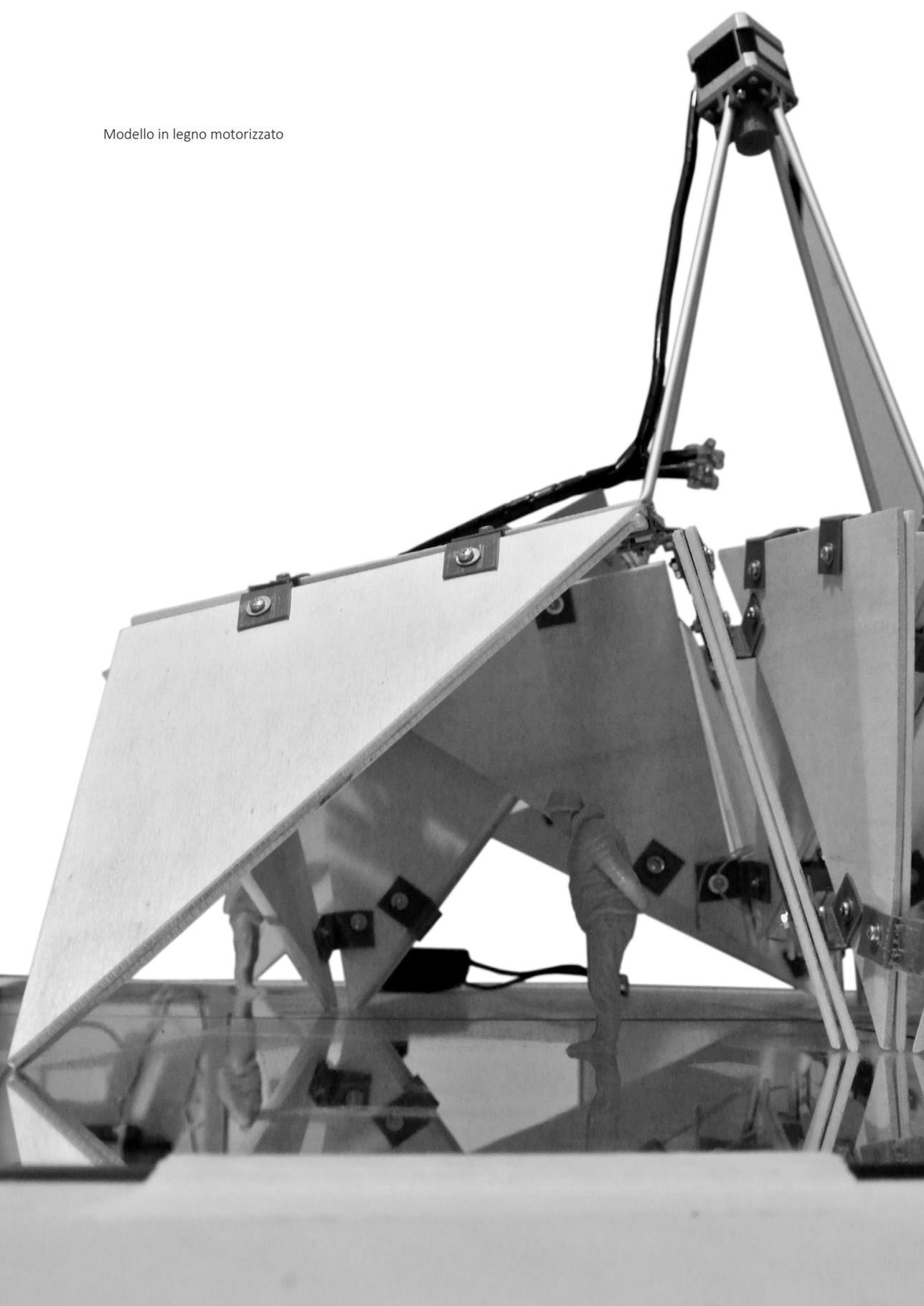


La terza fase è consistita nella costruzione del mockup. Il modello che adesso vediamo è il frutto di esperienze acquisite durante la fase precedente e di un lavoro che ha comportato l'utilizzo di diversi metodi e tecniche costruttive, da quelle tradizionali alla prototipazione rapida 3D. L'impiego di tecniche diverse è stata una scelta indicata dal tipo di elementi presenti in questa struttura, pannelli in legno, connessione tra struttura e motore in PLA, connessione tra i pannelli in TPU. I pannelli in legno sono stati realizzati tramite tecniche tradizionali, dopo che i profili sono stati disegnati su un pannello sono stati tagliati con il seghetto alternativo e levigati.

Le connessioni tra motore e struttura in PLA hanno voluto riprodurre quei movimenti che erano stati osservati nel "pre" modello fisico dove sono state fatte diverse prove di tipo empirico costruendo piccole connessioni con cartoncino o altri materiali. Il pezzo in PLA che permette al motore di arrotolare correttamente il filo è ispirato ai mulinelli montati sulle canne da pesca, anche in questa situazione, infatti, il filo viene arrotolato su una bobina con asse parallelo a quello per il quale il filo viene tirato. Il cavo da arrotolare in questo caso, essendo di lunghezza molto inferiore rispetto a quello di una canna da pesca, non ha bisogno di un guidafile così avanzato e viene reinterpretato come un sistema di fori e scanalature fisso che diminuisce l'attrito del cavo mentre sia viene tirato dal motore e sia quando viene rilasciato dal motore e tirato dai giunti in TPU.

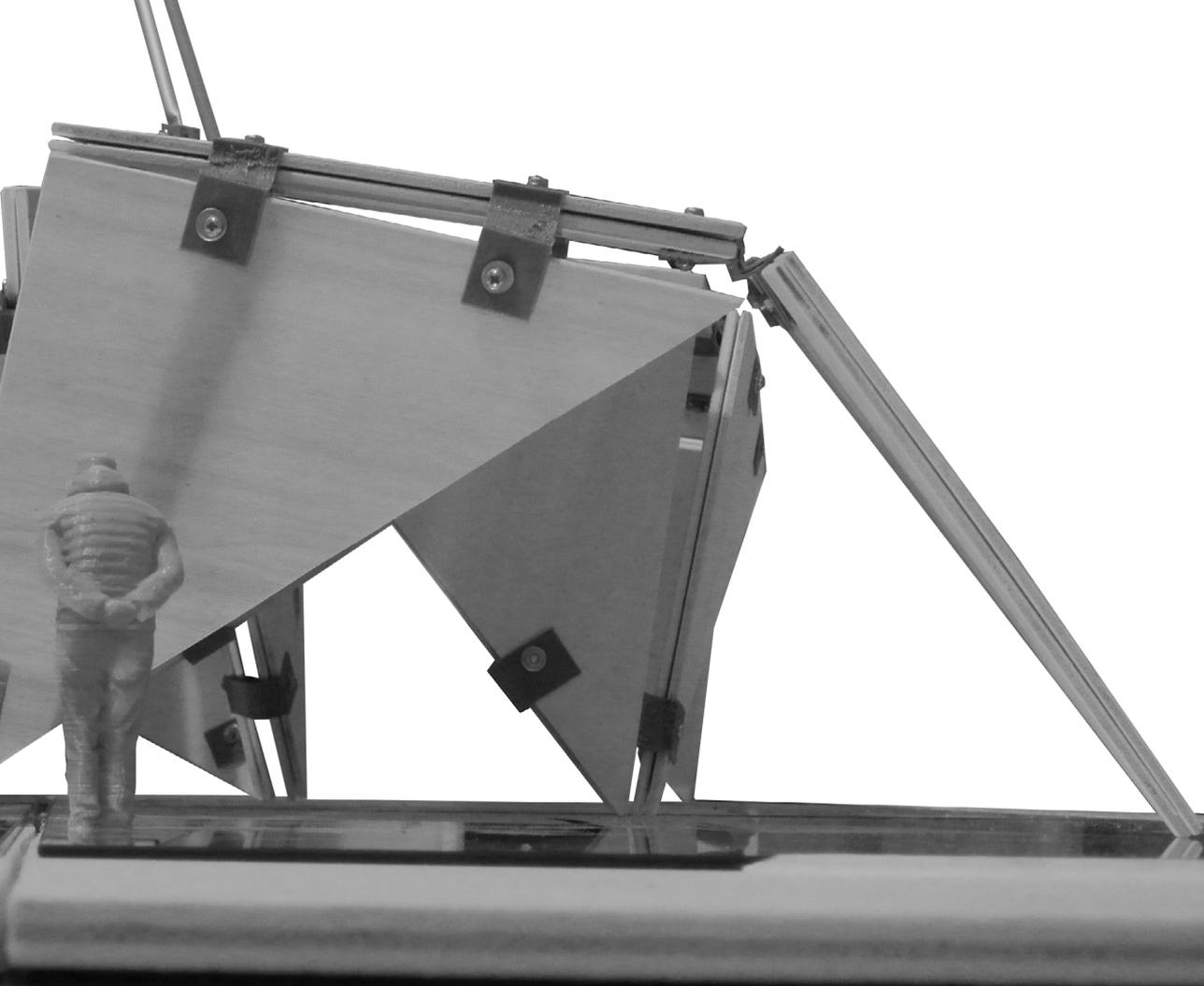
Le cerniere tra i pannelli in TPU sono state disegnate risolvendo alcuni problemi riscontrati con il "pre" modello. La forma che si era ottenuta inizialmente, partendo dagli studi del Tapered Method, era efficace ma, dopo diverse sollecitazioni, le cerniere si staccavano dal pannello in poliplat. Un'osservazione più attenta del fenomeno ha dimostrato come le forze in gioco si concentrassero sugli spigoli delle linguette poi incollate al pannello in poliplat. La risoluzione del problema è stata quella di aggiungere una terza linguetta che venisse poi pinzata tra due pannelli in legno, la terza linguetta ha così la funzione di smorzare gli sforzi e di ridurre lo stress che si generava sulle linguette laterali.

Modello in legno motorizzato



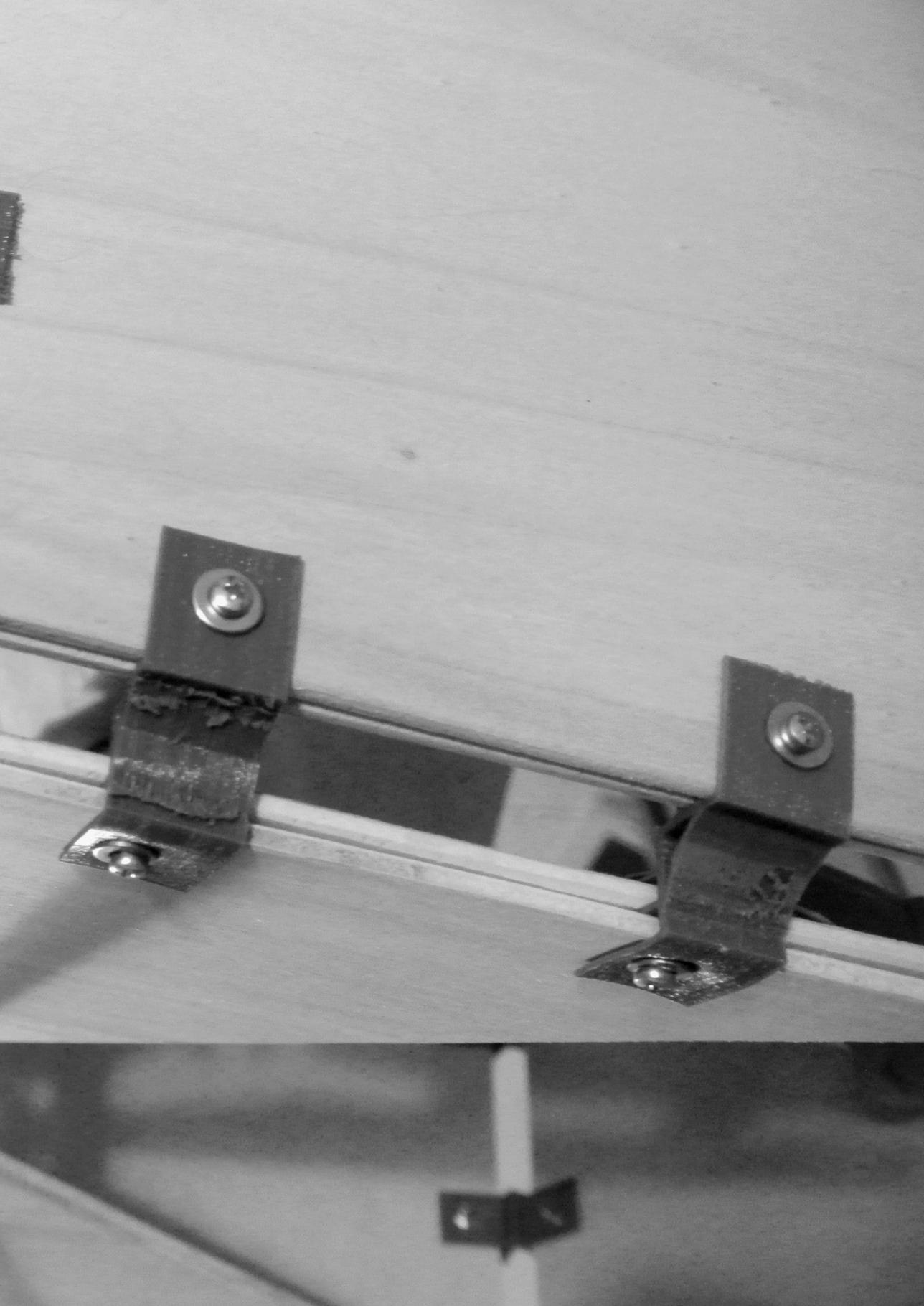
Modello in legno motorizzato





Dettaglio dei giunti in TPU del modello in legno motorizzato





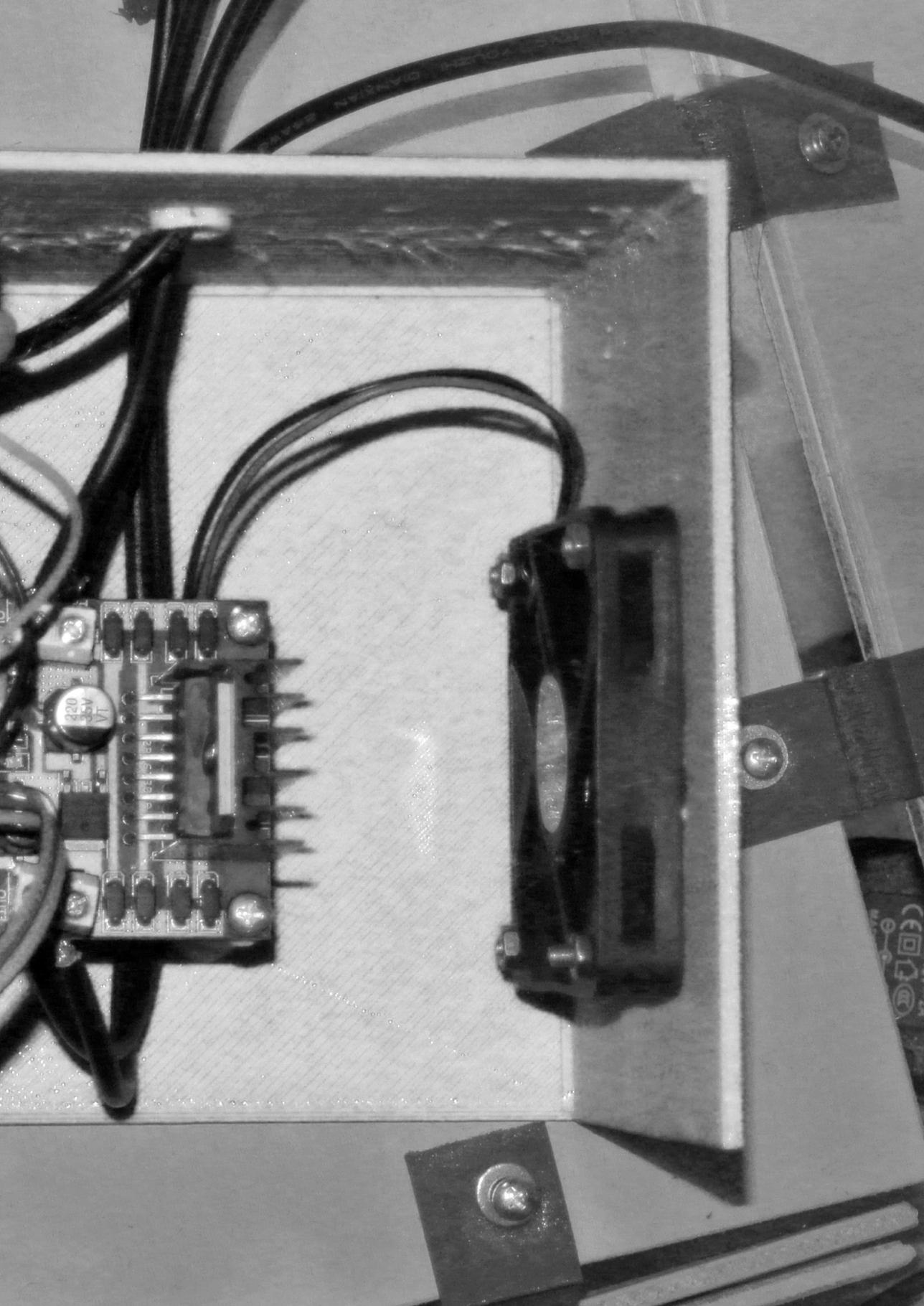
Dettaglio dei giunti in PLA del modello in legno motorizzato





Dettaglio della componentistica elettronica del modello in legno motorizzato





NOTE

- 1 La vulcanizzazione è un processo chimico di lavorazione della gomma che ne aumenta la resistenza a solventi organici e ne impedisce il rigonfiamento. Il processo consiste nel legare dello zolfo alla gomma mediante riscaldamento.
- 2 La durezza Shore è una scala di misurazione della durezza elastica dei materiali. Viene misurata tramite un test non distruttivo durante il quale si lascia cadere un oggetto sul materiale preso in esame e viene misurata l'altezza alla quale l'oggetto rimbalza.



PRODUZIONE FUORI OPERA E PRODUZIONE IN OPERA

Scelta di tecnologie costruttive e materiali

Nel caso studio preso in esame è evidente come le funzioni di forma, struttura e involucro debbano coesistere nel minor spessore e peso possibile perché il Ron Resh possa muoversi correttamente. L'ispirazione per identificare la migliore soluzione è stata trovata nell'insieme tecnologico che descrive le facciate tessili. I sistemi a membrana sono caratterizzati da qualità come: leggerezza, flessibilità costruttiva e flessibilità prestazionale.

- Leggerezza: *“La leggerezza in architettura va intesa come approccio progettuale volto a trasformare le risorse materiali e immateriali, finalizzato alla ricerca e alla costruzione di spazi e di modalità dell’abitare innovativi e sostenibili [...] s’intende riferirsi ad una attenzione progettuale verso la compatibilità ambientale, la costruzione programmata, l’adattabilità ai luoghi, la reversibilità e la riduzione del materiale, cioè verso i tre aforismi dell’architettura moderna e contemporanea: Less is more/ Biology and building/ More with less”*¹. I dettagli tecnologici che supportano queste membrane sono anche il frutto dello studio effettuato sui sistemi abitativi dei popoli nomadi. Queste tribù necessitavano di poter assemblare, smontare e trasportare le loro dimore facilmente. Partendo da questa premessa si può affermare come la leggerezza delle membrane sia misurata non solo in rapporto alle potenzialità dei sistemi motorizzati, ma anche in rapporto alle capacità umane. La leggerezza dei materiali tessili è verificabile in una maggior rapidità di assemblaggio e disassemblaggio e in un minor impiego di risorse umane durante queste fasi.
- Flessibilità costruttiva: L'espressione formale dell'edificio è direttamente influenzata dalla scelta del materiale costruttivo il quale determina il sistema tecnologico. Nel caso delle membrane, invece, un diverso materiale può essere utilizzato

◀ Hoberman Arc, Salt Lake Tribune, Chuck Hoberman, 2002

con molteplici sistemi tecnologici. In questo caso, infatti, il sistema tecnologico con il quale viene montata la membrana non dipende dal materiale con cui è prodotta ma dalle dimensioni che deve ricoprire e dal sistema di ancoraggio. *“La condizione tecnica della flessibilità costruttiva è rappresentata dalla diffusione dei sistemi di fissaggio, che rendono indipendente il rivestimento dal supporto strutturale”*² Nel campo delle facciate tessili i sistemi costruttivi sono molto vari, si può fissare la membrana direttamente alla struttura o possono avere un telaio di ancoraggio apposito. La scelta del sistema costruttivo viene solitamente effettuata in base alla risposta meccanica che si vuole ottenere. Un pannello, ad esempio, ancorato solo lungo i bordi fletterà maggiormente sotto l'azione del vento rispetto ad uno che ha anche un ancoraggio centrale.

- Flessibilità prestazionale: Il grande catalogo dei materiali e la facilità con cui questi vengono prodotti a livello industriale permette di poter rispondere a richieste progettuali molto diverse. Si possono richiedere membrane con diversi valori di isolamento acustico, termico o di resistenza al fuoco.

Queste soluzioni, infatti, pur garantendo spessori e pesi irrisori, 1/20 dei sistemi con involucro in policarbonato, presentano una gamma di materiali più o meno avanzati che offrono riscontri differenti per rispondere a diverse richieste progettuali. Da considerare anche la loro flessibilità, alla quale abbiamo solo appena accennato nel processo di cantierizzazione. La leggerezza delle membrane influisce direttamente anche sui profili delle strutture portanti, i quali, potendo essere più sottili, saranno conseguentemente più leggeri. Né si ottiene un processo di cantiere a secco dove vengono assemblati componenti e dispositivi prodotti e testati in fabbrica. Le strutture sono già predisposte ad accogliere, dove presenti, i sistemi di ancoraggio per le membrane. Queste ultime devono essere dispiegate, tese ed inserite nelle strutture di supporto con grande attenzione e cura per non essere danneggiate. Le attrezzature utilizzate durante la fase di montaggio sono gru, puntoni e carrucole. Il cantiere a secco e “leggero” presenta il vantaggio di poter procedere, con diverse squadre, al completamento di diversi compiti contemporaneamente, riducendo notevolmente i tempi di costruzione.

Fatta la premessa di come i sistemi e i materiali provenienti dalle facciate tessili siano la soluzione ideale in quanto varietà di soluzioni e leggerezza garantita è importante sottolineare come, data una struttura “fissa” per il Ron Resh, la membrana scelta può essere variata in base alle esigenze progettuali. Queste possono essere differenti a seconda del periodo in cui la struttura viene utilizzata, della funzione che deve contenere, del luogo in cui viene montata ecc.

Il Ron Resh in questo caso viene collocato all’interno del Palazzo del Lavoro, situazione nella quale non si ha la necessità di dover schermare la luce in quanto non si hanno situazioni di abbagliamento. Nonostante l’area di progetto si inserisca tra due dei percorsi più trafficati di Torino il discomfort acustico, all’interno del Palazzo del Lavoro, escluso situazioni eccezionali, è ragionevole.

Nel progetto gli elementi maggiori che meritano un approfondimento sulla loro composizione sono: lo scheletro, le cerniere che permettono il movimento, la membrana e il telaio della membrana.

Lo scheletro che compone l’origami è composto da profilati in acciaio ASTM A 350 con sezione a L. È stata scelta questa sezione di profilato perché in relazione alla luce che si deve coprire è quella con meno massa, quindi più leggera, e i più adatta per poter accogliere i sistemi di ancoraggio utilizzati nell’architettura tessile. L’acciaio scelto, invece, è da sempre uno dei più utilizzati nella realizzazione di elementi strutturali, ha un’elevata resilienza³ ed è facilmente saldabile.

Il sistema di cerniere è quello studiato in precedenza durante la realizzazione del modello fisico in legno. È stata dimostrata la fattibilità di tale struttura tramite la costruzione del modello fisico con pannelli di legno. La fabbricazione e il montaggio erano precisi. Le connessioni tra i pannelli erano abbastanza flessibili e garantiscono la memoria di forma che il modello in carta possiede, il che aiuta l’assemblaggio e indica che sembra ragionevole considerarle come cerniere utili per un dimensionamento di quelle reali. Il materiale scelto per i giunti è il TPU, un poliuretano termoplastico, molto versatile, le formulazioni di poliuretano possibili coprono una vasta gamma di rigidità, durezza e densità. Si distingue per la sua estrema resistenza al graffio, all’usura, allo strappo, è possibile effettuare

delle saldature ed ha un'elevata resistenza meccanica e chimica e se esposto all'aperto non soffre i raggi UV temperature estreme e l'umidità. Inoltre, sono state scoperte nuove formule di TPU che possono essere sottoposte a trattamento di riciclaggio⁴.

Vista la natura intrinseca di responsività dell'elemento di progetto, e non avendo una funzione d'uso univoca, la scelta della tecnologia costruttiva e del materiale è ricaduta sui cuscini pluristrato pneumatici di ETFE. Questa soluzione assicura prestazioni differenti a seconda degli input che la membrana riceve incrementando ulteriormente le capacità responsive e di adattabilità della struttura origami in esame.

L'etilene tetrafluoro-etilene o ETFE (C₂H₂F₄), ottenuto dalla molecola dell'etene (C₂H₄) stabilizzata con quattro atomi di fluoro, è un fluoropolimero. È stato sintetizzato negli anni settanta, si cercava un isolante adatto per l'industria aeronautica. Solo dopo una decina d'anni si sperimentò il suo utilizzo anche nel settore edilizio, ma solo dopo quasi vent'anni di innovazioni nel suo processo di lavorazione si ebbero le tecnologie necessarie per produrre membrane con le giuste proprietà e dimensioni. Le sue qualità principali sono:

- Ottima trasparenza, le membrane in ETFE assicurano un irraggiamento dello spettro del visibile dei raggi UV completo. Per un irraggiamento che va dai 400 nm ai 600 nm la sua trasparenza è del 95% (percentuale luce diffusa 12% e percentuale luce diretta 88%).
- Buona resistenza allo strappo e all'abrasione dovuta alla velocità di estrusione che, essendo inferiore, garantisce uno spessore del materiale ridotto rispetto a membrane di altri polimeri e, non fa perdere adesione tra le fibre che la compongono.
- L'elevata resistenza al calore del materiale, dovuta al legame covalente tra carbonio e fluoro, lo rende non infiammabile, autoestinguento e in caso di combustione ne previene il gocciolamento. Questa caratteristica gli fa guadagnare la classe A nella normativa DIN 4102.
- Le membrane semilavorate di ETFE possono essere sottoposte a processo di fis-

saggio. Le stampe spesso possono migliorarne la qualità estetica o ottimizzare la schermatura dall'illuminazione solare. Questi processi possono essere.

- Ottima resistenza agli acidi e non necessita di pulitura in quanto autopulente.
- Ha una buona resistenza a trazione e ne consegue la possibilità di effettuare delle piccole riparazioni della membrana in sito. Eventuali tagli, strappi o buchi vengono rattoppati agendo direttamente sulla porzione di membrana danneggiata.
- Presenta proprietà di isolamento termico. Il livello di isolamento termico di queste membrane può essere facilmente incrementato sommando altri strati di ETFE oppure utilizzando membrane di materiali isolanti a discapito della trasparenza dell'involucro.
- È una membrana elastica, per questo motivo, i suoni prodotti all'interno dell'architettura non vengono riflessi. Per ripararsi da rumori esterni invece è possibile sommare ulteriori strati di ETFE all'interno del cuscino.
- Possibilità di installare sulla membrana più esterna sistemi a celle fotovoltaiche. Queste sfrutteranno parte della radiazione solare per produrre energia elettrica che verrà impiegata nell'alimentazione dei compressori utilizzati per la gestione dell'involucro.
- A fine vita può essere sottoposto a processo di riciclo. La membrana esausta viene preparata e mescolata con altro materiale primario con stesse proprietà chimiche e così potrà essere riutilizzato.

Il telaio consigliato per clampare l'ETFE è costituito dall'alluminio EN AW 6060 che è stato sottoposto a processo termico, soffiando aria fredda per ottenere lo strato di bonifica T5. Detta lega risulta particolarmente adatta all'ossidazione anodica e alla verniciatura e possiede una buona resistenza alla corrosione.

È importante sottolineare come, in questo caso specifico, le scelte effettuate non sono state dettate per soddisfare richieste note. La preferenza nell'utilizzare componenti così

innovativi, che richiedono manodopera altamente specializzata e fasi di costruzione controllate severamente, non è stata un vezzo stilistico, piuttosto si è provato a preparare un organismo. Ispirati dai comportamenti che si osservano in biologia è nata la speranza di poter preparare al futuro questo origami e che questa preparazione gli conceda la possibilità di rispondere al maggior numero di richieste e che in un futuro sia capace di evolversi leggendo il contesto in cui esso si trova.

Solitamente i sistemi capaci di trasformarsi contemporanei si riducono ad una responsabilità ai soli input climatici, sistemi di controllo elettronico regolano il movimento di alcuni elementi per diminuire il consumo energetico della struttura. In questo caso, invece, si può identificare un modulo ripetibile di un prototipo di copertura che può permettere funzioni d'uso differente e riconfigurazioni di diverso genere. L'ETFE, e più in generale i sistemi tecnologici scelti, vogliono solo impedirne una sclerotizzazione ed incrementare l'intelligenza di reazione di questo organismo.

Il cantiere

“it is clearly impossible to bring the construction industry to such a high level that every building can become an artwork, yet this is in the scope of its possibilities, and it would be very important under the moral, economic and social point of view to direct our construction activity towards fulfilling the characteristics of good functionality, good economic return, that is to say towards a construction correctness from which today we are too often removed.”⁵

Giorgio Benvenuto racconta l'evoluzione del cantiere come un teatro dove macchinari, impalcature e supporti provvisori descrivevano la pericolosa influenza dei carichi, di come questi debbano essere equilibrati. Benvenuto distingue l'edificio antico da quello moderno: nel primo, una volta rimosse le opere provvisorie, è evidente una immobilità che cancella il precedente turbamento; nel secondo, in epoca moderna, al contrario, la macchina non scompare, ma viene inglobata all'interno dell'edificio e ci permette di leggere il funzionamento delle sue parti.

Le scienze meccaniche ristabilirono una centralità del cantiere, contestata in epoca umanistica, a beneficio di un concetto di design (lineamentum) che doveva essere tradotto meccanicamente nel lavoro finito (structura). Galileo si assicura di restituire al cantiere l'autorità di un luogo in cui la traduzione di un'idea architettonica in un'opera costruita è un'operazione mediata da procedure che richiedono test continui.

Nel diciannovesimo secolo, lo sviluppo dell'architettura potrebbe essere scritto di nuovo come la storia dei cantieri esemplari in cui è stata stabilita l'autorità delle nuove tecniche di costruzione, di nuove pratiche legate all'impiego di materiali come il ferro.

Nel XX secolo, il cantiere è ancora un luogo fisico in cui il progetto prende forma grazie alla collaborazione di diverse figure professionali. Architetti, tecnici, costruttori e cliente trovano compromessi che danno vita ai disegni.

Pier Luigi Nervi (nella sua figura convivono le professionalità dell'ingegnere, dell'architetto e del costruttore) affermava come, attraverso il cantiere, i grandi appaltatori abbiano l'opportunità di affermare la propria autorità lasciando il segno di uno stile diverso.

Costruire una campata di cinque metri non era e non è una sfida, ma lo può essere una volta che si effettua una riduzione estrema degli elementi strutturali. Esempio analogo lo si può fare con il profilo aerodinamico di un frigorifero, di sicuro non serve per farlo volare meglio, ma gli conferisce una forma che rappresenta un fascino collettivo per la velocità.⁶

La rivoluzione digitale descritta precedentemente si sta preparando a trasferire il cantiere in un ambiente virtuale dove le diverse figure coinvolte possono interagire evitando l'area dell'edificio. Nonostante sia una evoluzione inevitabile e probabilmente positiva è importante non ridurre il cantiere a solo evento storico o alla semplice realizzazione dell'opera. Il cantiere deve essere un luogo di sperimentazione e di studio e va progettato nelle sue parti.

Progettare la cantierizzazione significa studiare le diverse fasi lavorative, della programmazione del cantiere. Ciò comprende: la progettazione delle strutture temporanee; prevedere i flussi e i carichi sulle vie di accesso e delle aree prescelte alla lavorazione dei componenti; lo studio sulle modalità di trasporto dei materiali dei rifiuti e dei lavoratori con l'obiettivo di garantire la massima sicurezza di questi ultimi; scegliere mezzi e materiali che lascino il minor impatto ambientale possibile.

La necessità di studiare l'organizzazione dei cantieri è connessa all'esigenza di rafforzare la continuità tra fase progettuale e la fase del cantiere. La transizione tra progetto e realizzazione rappresenta l'ostacolo maggiore e per questa ragione l'attenzione all'aspetto costruttivo deve iniziare dalla fase progettuale. Si deve entrare nel merito delle scelte tecnologiche e di sicurezza in modo da poter programmare al meglio la realizzazione in cantiere. Previsioni errate o sottovalutate possono comportare difficoltà che possono determinare l'aumento dei costi che potrebbero condurre all'irrealizzabilità dell'opera.

Il caso studio scelto, un'installazione all'interno del Palazzo del Lavoro, presenta ovviamente un rischio medio alto dovuto alla vulnerabilità dell'edificio stesso, che potrebbe essere danneggiato durante le fasi di cantiere, e una vulnerabilità dell'assetto urbano che, soprattutto durante le ore diurne durante le quali il traffico urbano è molto intenso, non è compatibile con il trasporto eccezionale di materiale edile.

Per questo tipo di riflessioni appare indispensabile studiare la cantierizzazione per diminuire le probabilità di rischio per i lavoratori, per i frequentatori del quartiere Nizza Millefonti e per il Palazzo del Lavoro.

Come abbiamo già anticipato in precedenza, con l'evoluzione degli strumenti BIM e parametrici le informazioni sono sempre più legate ai loro rispettivi modelli digitali, ciò ha aperto nuove opportunità per utilizzare questi prodotti. Una di queste opportunità è quella di utilizzare i modelli in fase di cantiere, sia per la valutazione e l'analisi dei rischi durante la costruzione, sia, attraverso supporti elettronici, per aiutare le fasi di assemblaggio per esempio dando in tempo reale informazioni sui dettagli costruttivi. Nel caso studio preso in esame il modello ha fornito informazioni utili sia per elaborare un computo metrico e sia per erigere il cronoprogramma. Inoltre, il controllo così dettagliato della struttura origami, simulandola in ogni sua fase, ha permesso di intervenire fin da subito su eventuali conflitti o errori che, se non fossero stati risolti per tempo, sarebbero sorti o nella fase di cantiere o durante il periodo di vita della struttura. È evidente come i processi di interoperabilità tra AD e BIM stiano avvicinando i due workflow offrendo nuove prospettive in entrambi i campi. Questo nuovo e unico workflow offre degli strumenti che superano il semplice trasferimento bi-direzionale di geometrie. Grazie ai nuovi processi interoperabili si ha la possibilità di tradurre le forme geometriche in elementi BIM conservando, al contempo, le opportunità derivate dal mondo AD. Questo tipo di vantaggi, durante la stesura della tesi, è stato riscontrato nel momento in cui si è passati da un modello a spessore non trascurabile ma matematico, ad un modello architettonico.

Le fasi della produzione fuori opera e in opera

All'interno della fase di cantiere sono state individuate otto fasi:

1. La prima fase è quella di produrre in officina gli elementi che compongono l'origami. Nel caso studio preso in esame si fa riferimento ad una struttura composta da quattro moduli base, quindi gli elementi più importanti sono:

32 triangoli con profilo in acciaio a L

32 teli in ETFE

96 telai fissi per il tamponamento in ETFE in alluminio

42 giunti in gomma

4 profilati a sezione circolare

4 profilati a sezione rettangolare

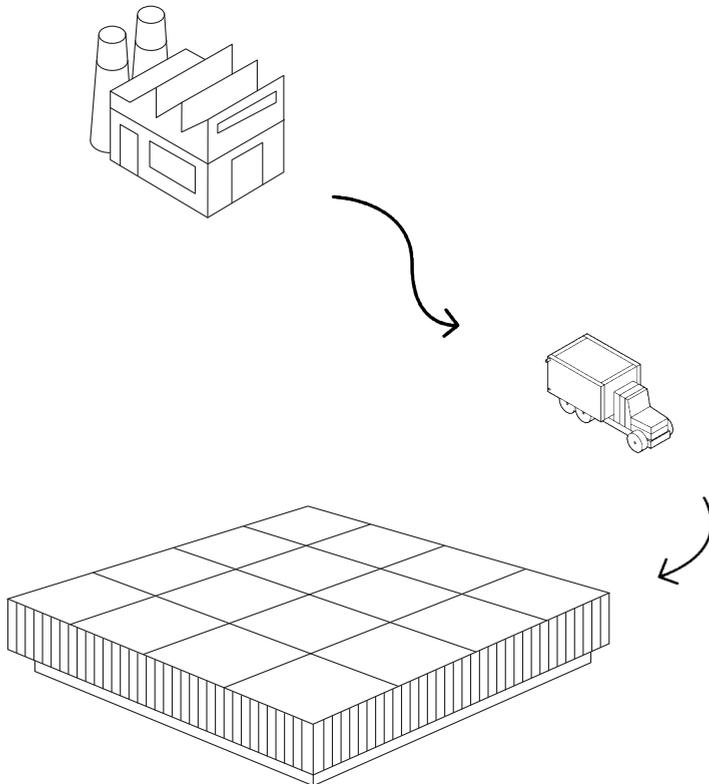
1 motore elettrico

Un modulo triangolare assemblato con il cateto di lunghezza 3m pesa circa 350kg

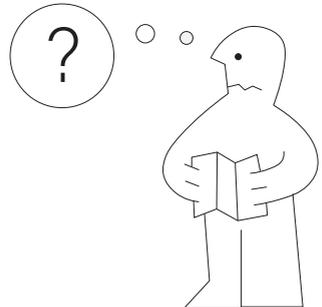
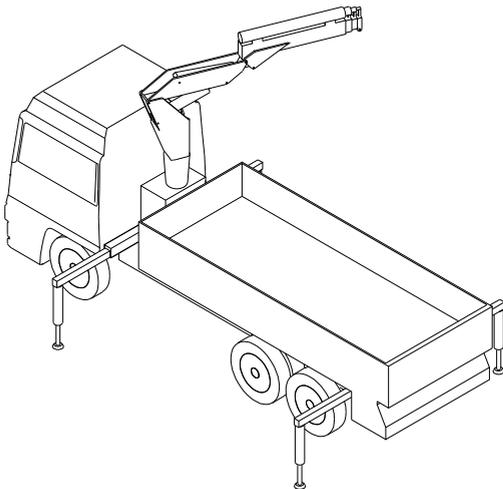
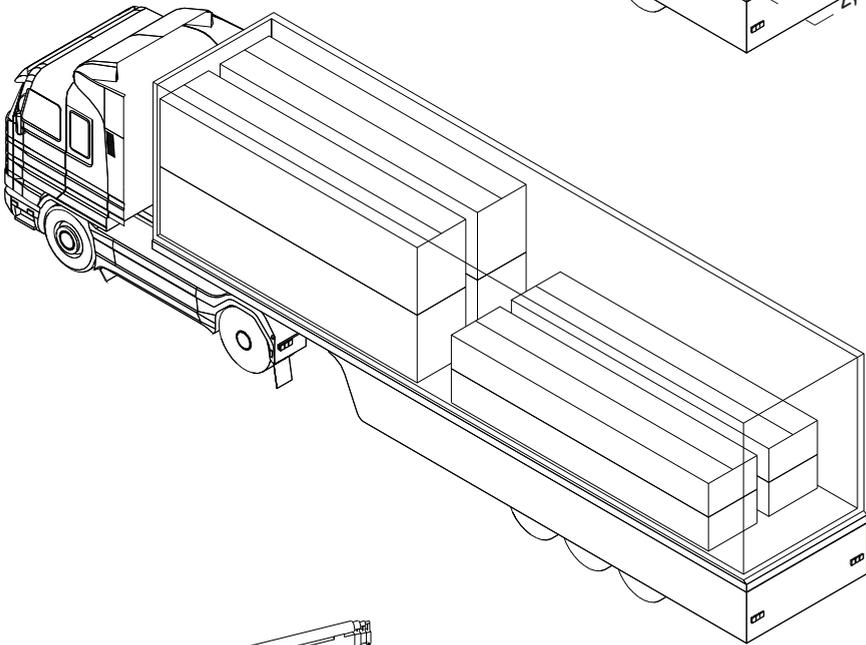
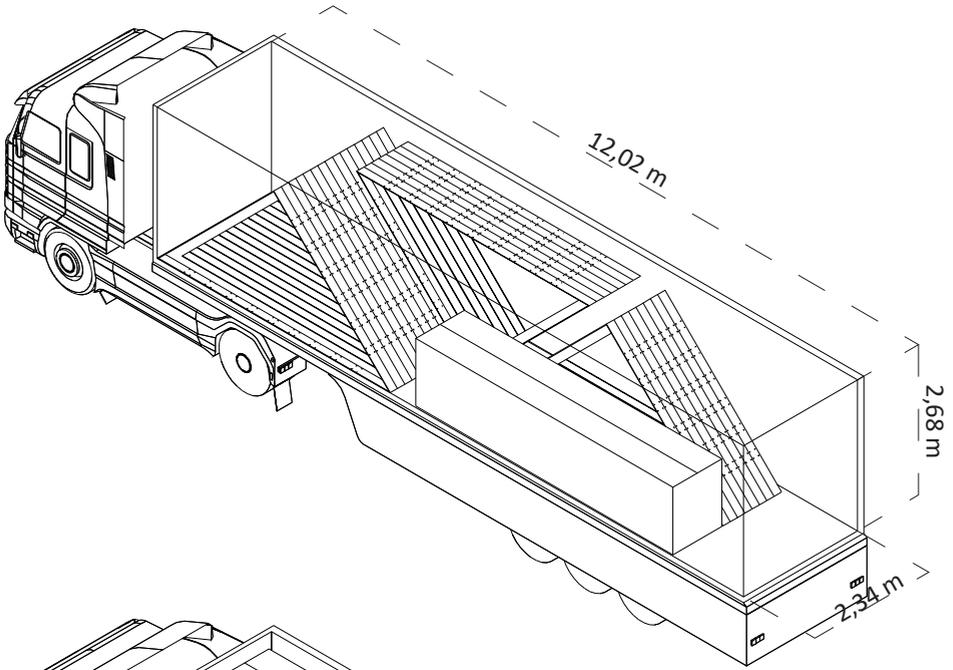
Da non dimenticare inoltre quei componenti indispensabili per l'assemblaggio in loco dell'impalcatura utilizzata per la costruzione dell'elemento origami. L'impalcatura è composta da due parti: la prima sostiene il modulo quadrato sospeso e facilita l'imbullonatura dei triangoli adiacenti; la seconda, invece, aiuta a congiungere quelle facce triangolari che nel pattern Ron Resh connettono i moduli a base quadrata.

Per velocizzare la fase di assemblaggio il progetto ha scomposto le facce quadrate in facce triangolari. Il risultato ottenuto è quello di avere lo stesso tipo di profilato a L triangolare in acciaio. Per diminuire gli errori umani all'interno del cantiere i fori sui quali verranno imbullonati i giunti in gomma o i profili scelti per creare gli elementi quadrati vengono eseguiti in officina. La scelta di avere una sola tipologia di profilato triangolare, non semplifica solo la fase di costruzione, ma semplifica anche la fase seguente di trasporto.

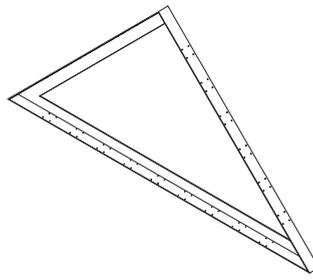
2. La fase di trasporto è la seconda fase di cantierizzazione. La struttura origami, disassemblata viene caricata all'interno di due container 40' high cube (dimensioni esterne 12192 x 2438 x 2896 mm) e trasportata, come trasporto non eccezionale, in prossimità del Palazzo del Lavoro. Arrivati in vicinanza del cantiere i container vengono depositati e spostati all'interno dell'edificio. Il vantaggio di aver scomposto le facce quadrate in due facce triangolari consente di avere due soli container quindi, considerando la tipologia di elementi, un trasporto veloce.



Schema esplicativo della fase di trasporto



Telaio con profilato a L
Acciaio ASTM A 350



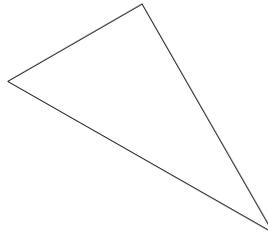
X 32

Telaio per clampatura ETFE
Alluminio EN AW 6060



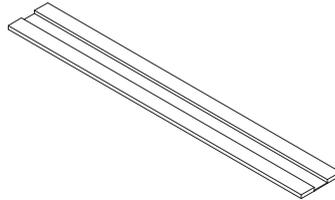
X 32

Membrana
ETFE



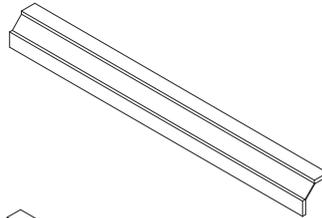
X 32

Giunto piatto
TPU



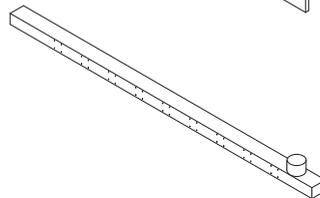
X 12

Giunto a L
TPU



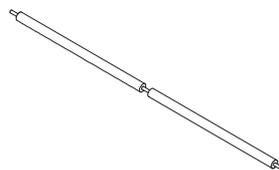
X 24

Giunto
Acciaio ASTM A 350



X 4

Braccio telescopico

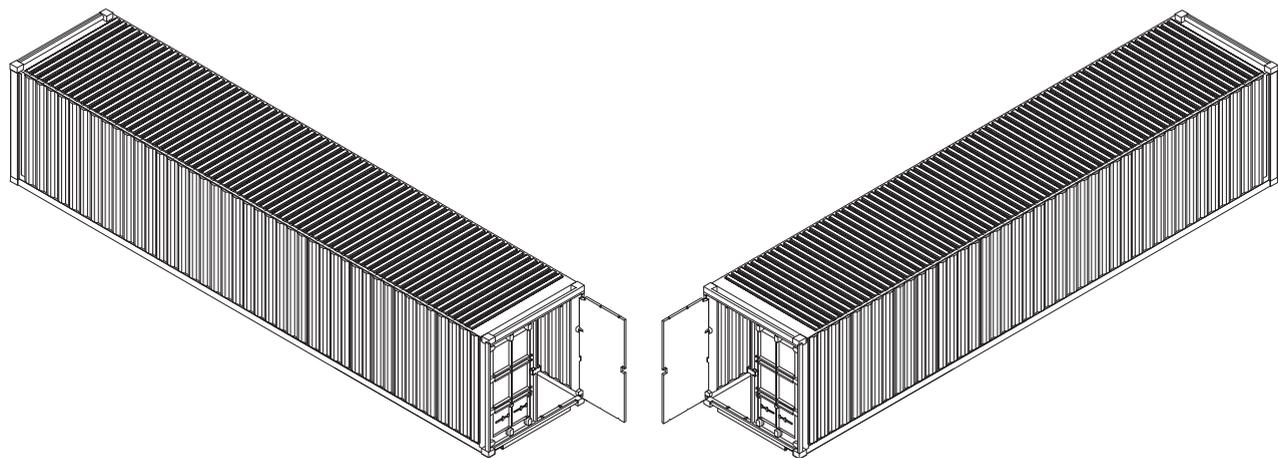


X 4

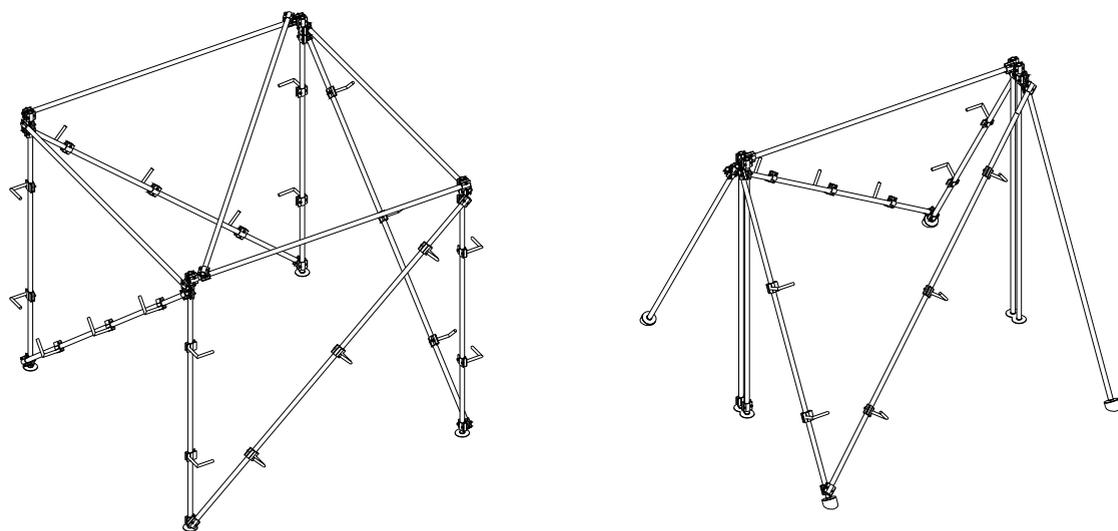
Motore passo passo



X 1

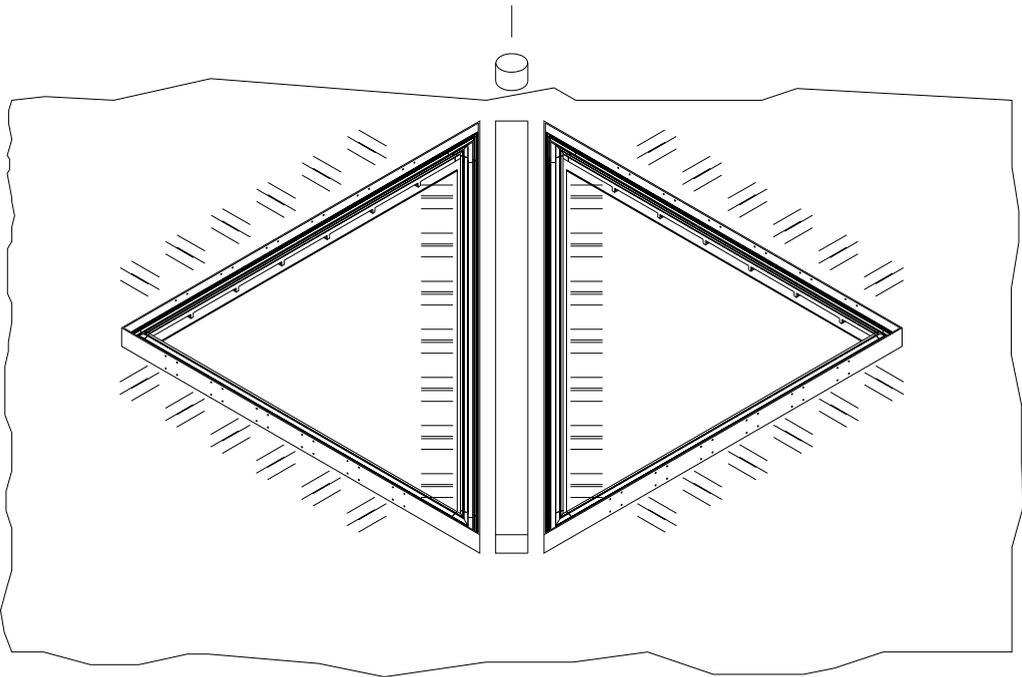


3. La terza fase è quella in cui iniziano le operazioni di montaggio all'interno del Palazzo del Lavoro. Come prima operazione vengono assemblate le due tipologie di centine necessarie per un corretto assemblaggio nelle fasi successive. La prima è necessaria a mantenere in quota la faccia quadrata del Ronresh e per posizionare le facce triangolari tangenti alle facce quadrate che, nel Ronresh, caratterizzano la copertura dell'origami; la seconda, invece, è necessaria ad assemblare le facce triangolari necessarie a collegare i moduli quadrati tra di loro.



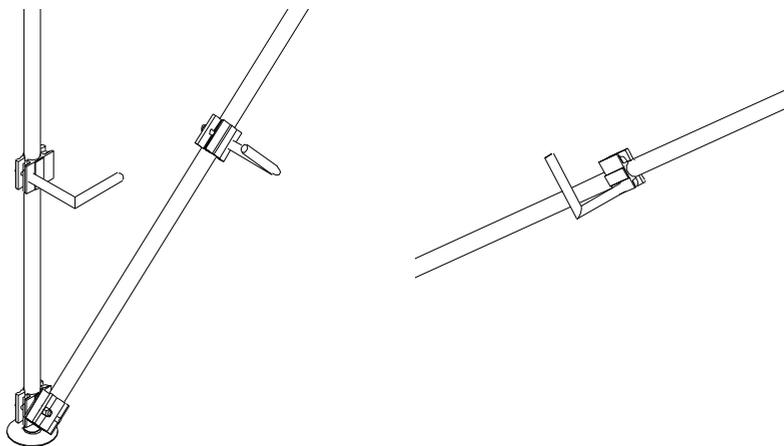
Schema esplicativo della centinatura necessaria

4. Nella quarta fase viene avviato l'assemblaggio della struttura origami. Si inizia con la composizione degli elementi quadrati di copertura. Questo tipo di operazione viene effettuato a quota terra. Le facce quadrate si ottengono affiancando per la loro ipotenusa due elementi triangolari che vengono imbullonati ad un profilato quadrato. Ai profilati quadrati, su una loro estremità superiore, viene imbullonata una cerniera che nelle fasi successive accoglierà i profilati a sezione circolare che sostengono il motore. In questa fase viene imbullonato alla L in acciaio anche il telaio fisso in alluminio che in seguito conterrà la membrana in ETFE. Al di sotto di questo elemento in alluminio è posizionato un vano tecnico nel quale è previsto che passino cavi elettrici, tubi per il gonfiaggio dell'ETFE o dove vengano installati apparecchi acustici o luminosi. Alla fine di questa fase vengono selezionati anche gli otto telai triangolari che caratterizzeranno il perimetro della struttura, al vertice tra cateto ed ipotenusa di ciascuno di essi deve essere fissata una ruota girevole e bloccabile.

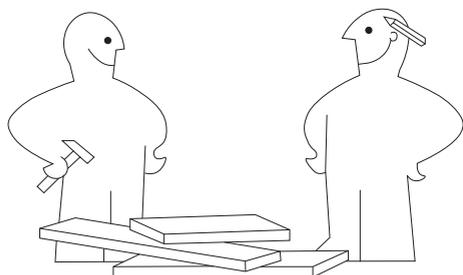


Schema esplicativo della quarta fase. Viene assemblata la faccia quadrata attraverso l'unione di due triangolari

5. La quinta fase consiste nell'issare sulla centina appropriata gli elementi quadrati appena ottenuti ed affiancare, in posizione verticale, i triangoli che ne descrivono le facce adiacenti. La centina, per aiutare questa fase di allineamento, possiede sedi disegnate appositamente per impedire errori umani ed ottenere il minor gioco possibile tra le strutture delle facce. Per effettuare questa operazione correttamente i telai vengono spostati con l'ausilio di una gru, l'altezza a cui devono essere spostati gli elementi ed il loro peso, non consentirebbe agli operai di spostarli in sicurezza e con la precisione adeguata. Gli elementi, ora in posizione corretta, verranno collegati tra di loro imbullonando le cerniere di gomma appropriate.

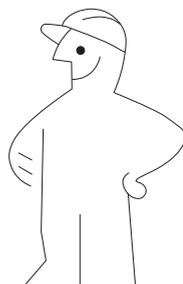
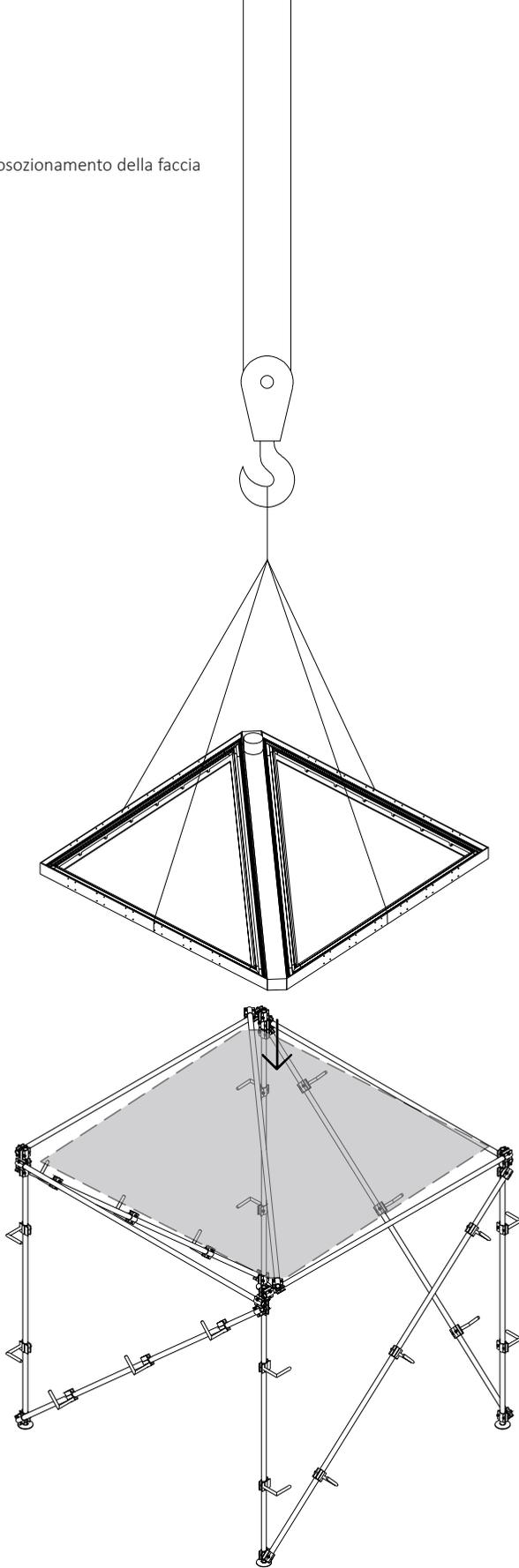


▲ Zoom sulla struttura di centinatura. Ispirati ai giunti utilizzati per i tubi innocenti questi servono per aiutare l'allineamento delle facce triangolari.

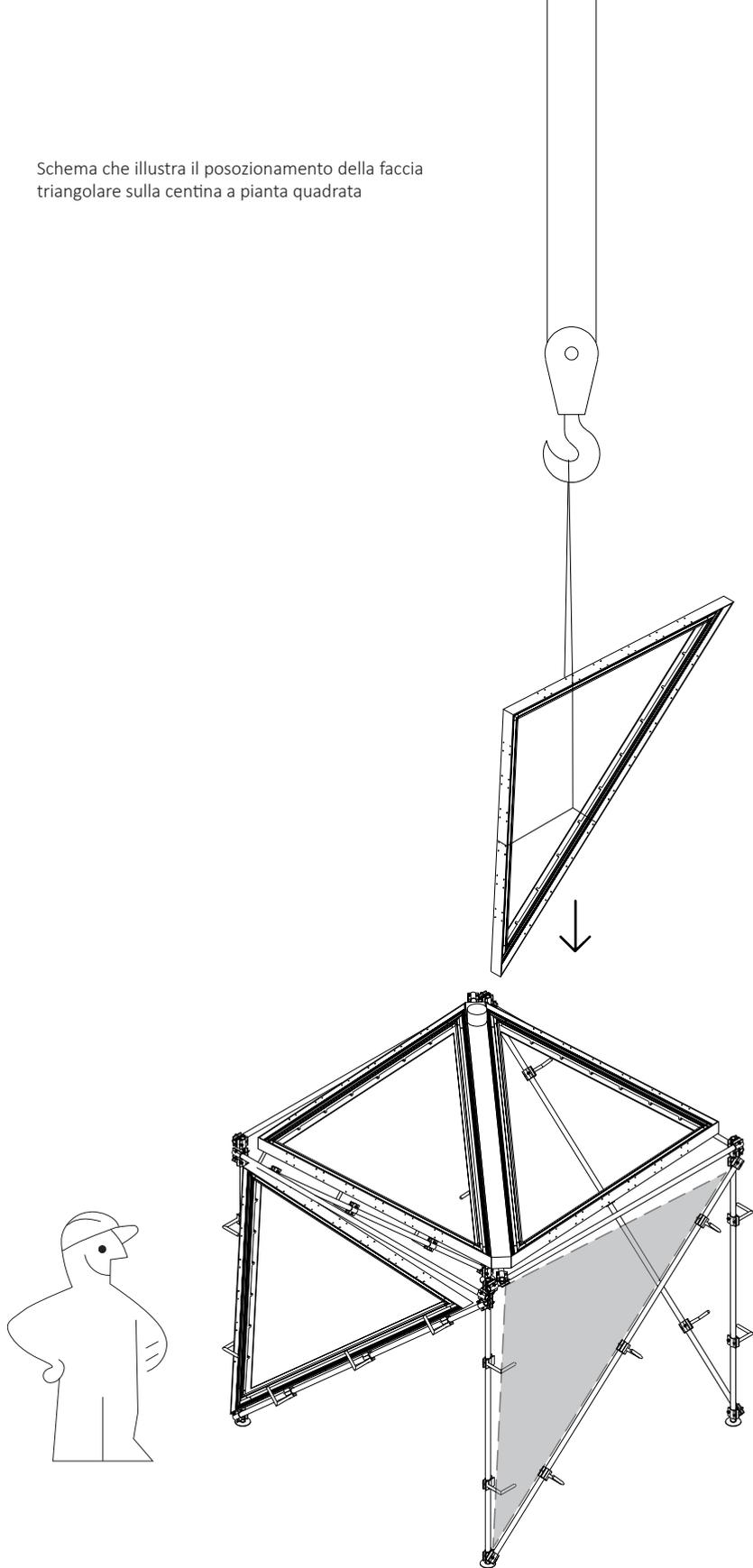


Nelle pagine seguenti gli step illustrati di come i pannelli vengono inseriti all'interno degli appositi spazi nelle centine. ►

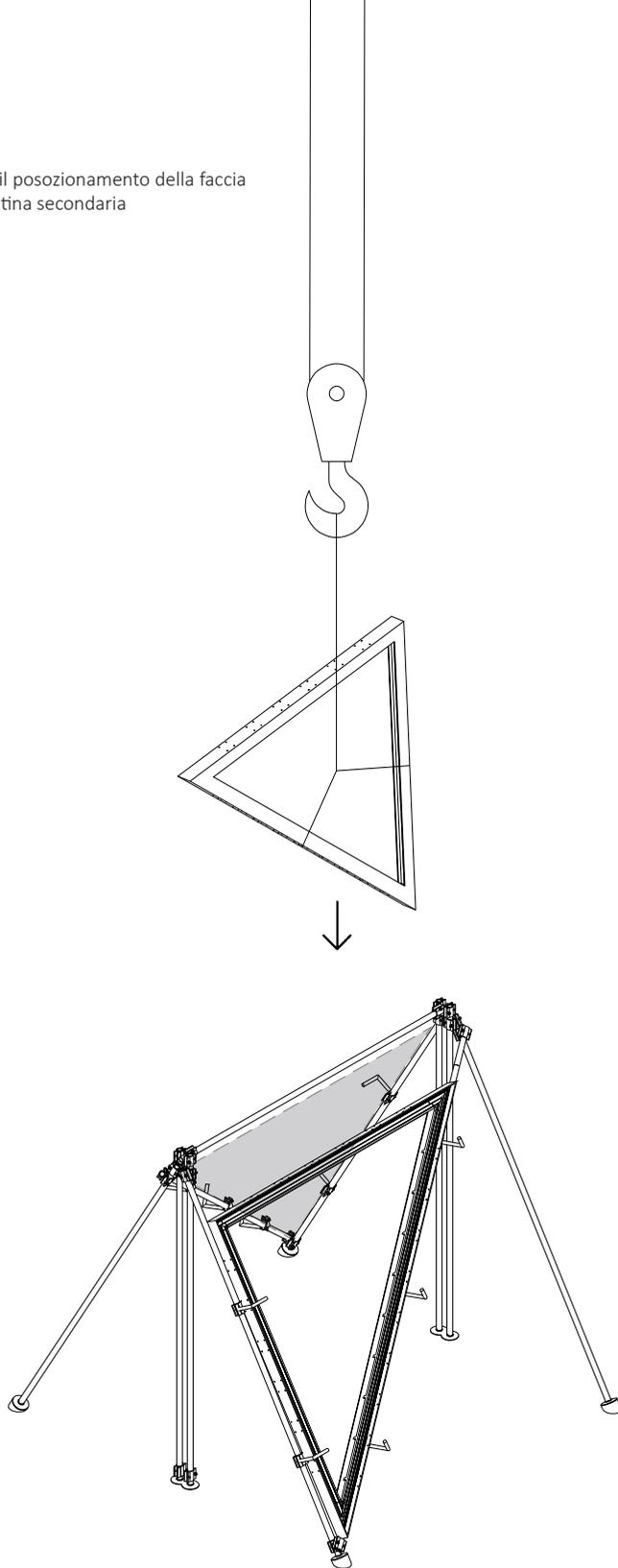
Schema che illustra il posizionamento della faccia quadrata sulla centina



Schema che illustra il posizionamento della faccia triangolare sulla centina a pianta quadrata



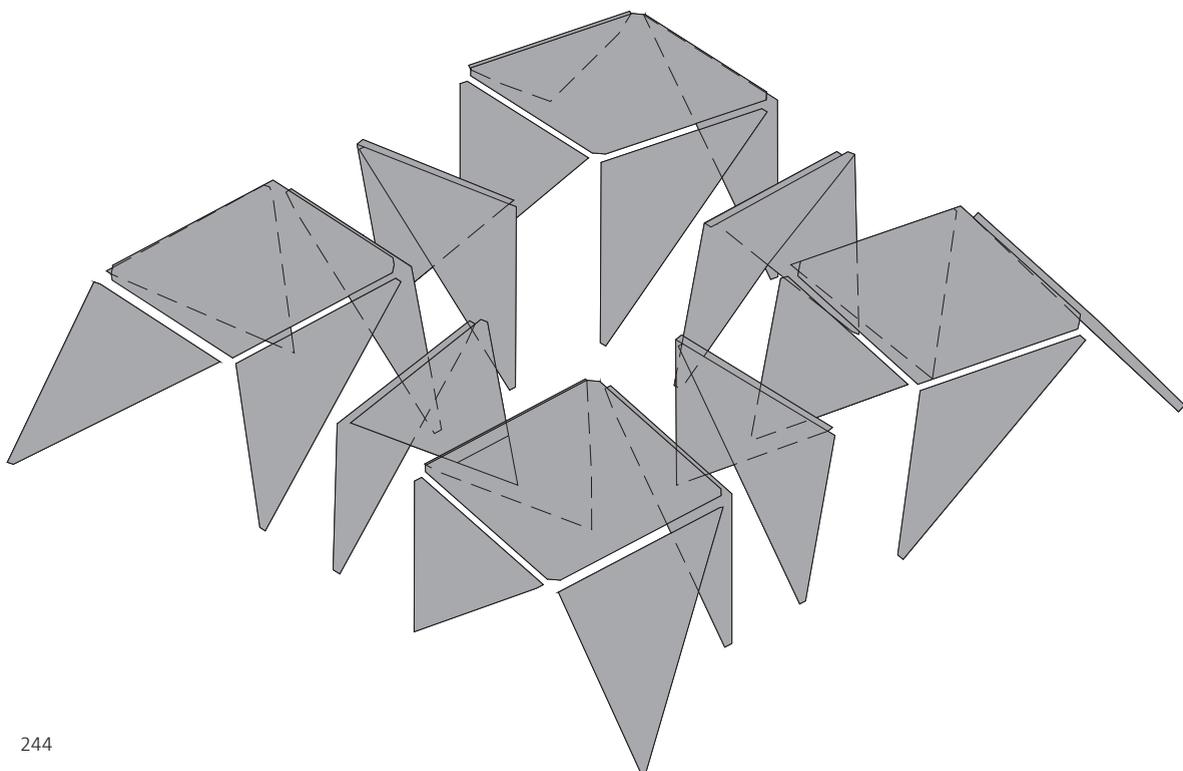
Schema che illustra il posizionamento della faccia triangolare sulla centina secondaria



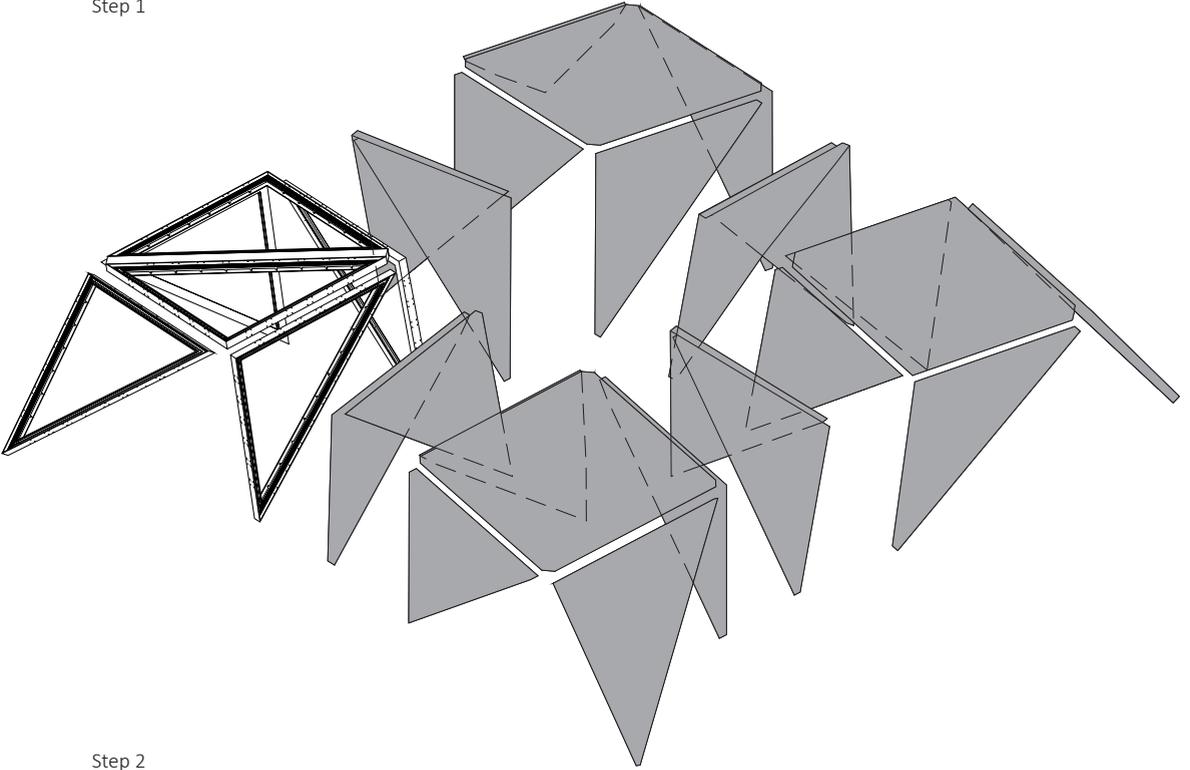
- Ottenuti i quattro moduli a pianta quadrata ed i quattro elementi di collegamento composti da soli due elementi triangolari si procede con la sesta fase. In questa fase gli si avvicinano tutti gli elementi e si imbullonano le cerniere in gomma rimanenti. Per eseguire l'operazione correttamente in questa fase bisogna seguire un ordine di montaggio. Partendo dal punto centrale prima vanno fissate quelle poste più in alto, in seguito quelle più in basso. Le quattro cerniere poste in basso lungo il perimetro vanno inserite per ultime. Per facilitare l'operazione di fissaggio di queste ultime quattro cerniere è consigliabile sollevare il punto centrale della struttura, una volta sollevato i cateti ai quali fissare la cerniera si avvicineranno agevolando l'operazione.

Questa struttura origami è composta da quattro moduli quadrati e quattro moduli composti da solo due telai triangolari. Per rispettare il pattern, e quindi per permettere un corretto movimento, devono essere disposti ed avvicinati come segue ▼

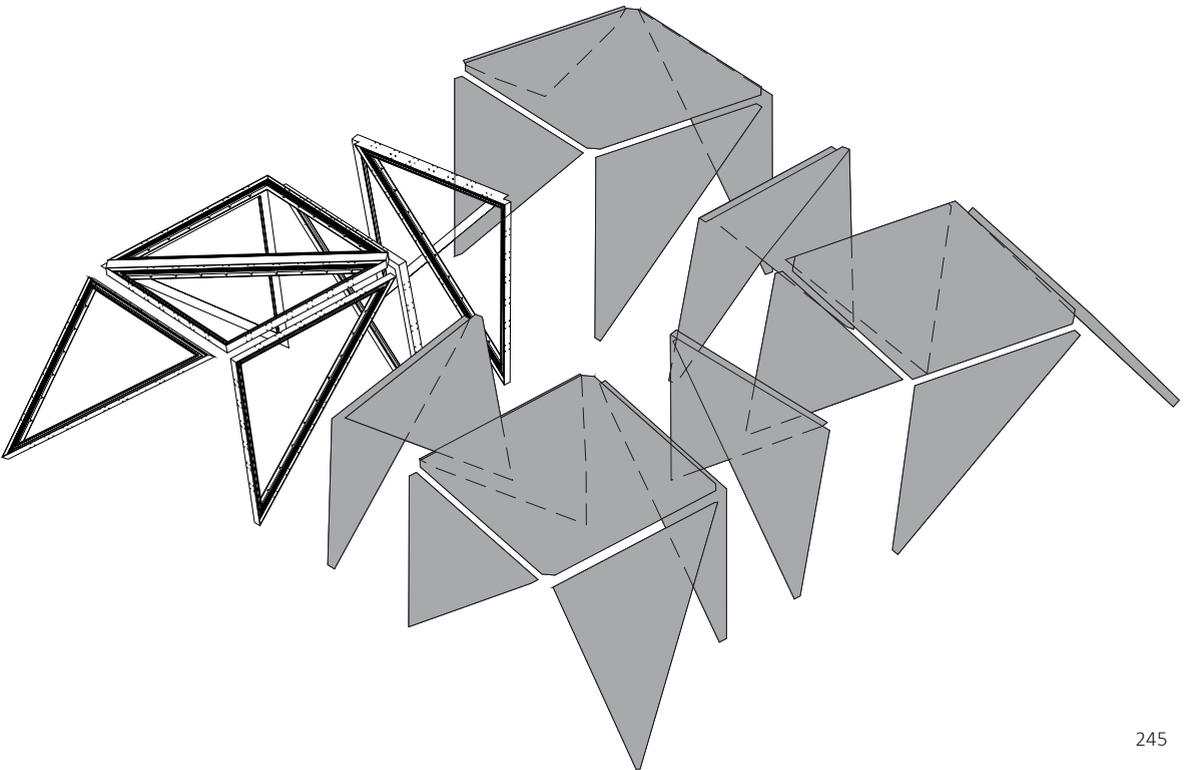
Step 0



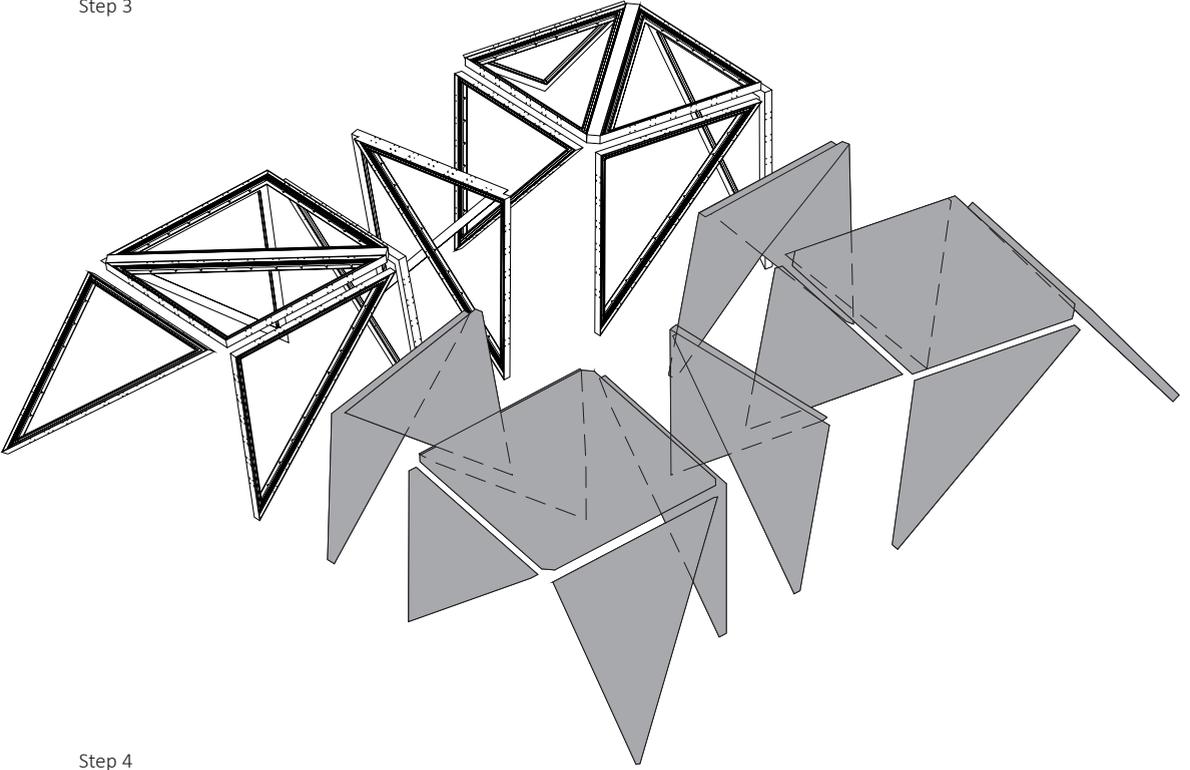
Step 1



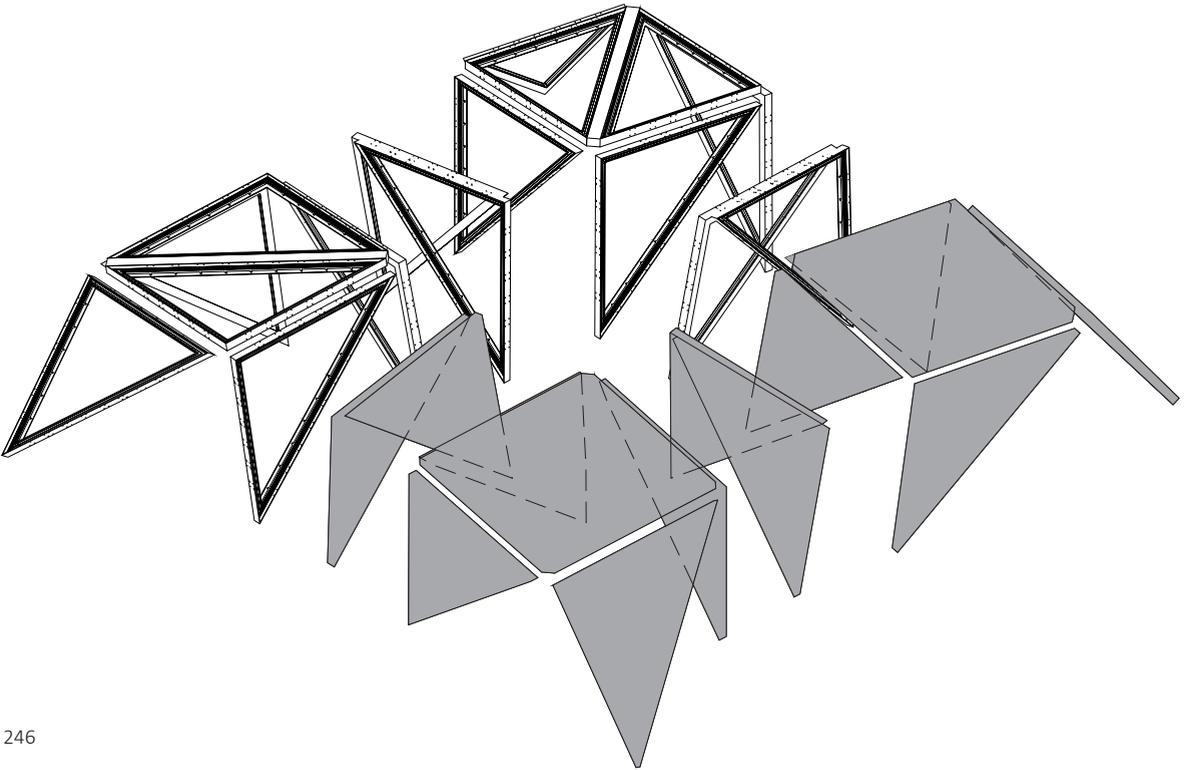
Step 2



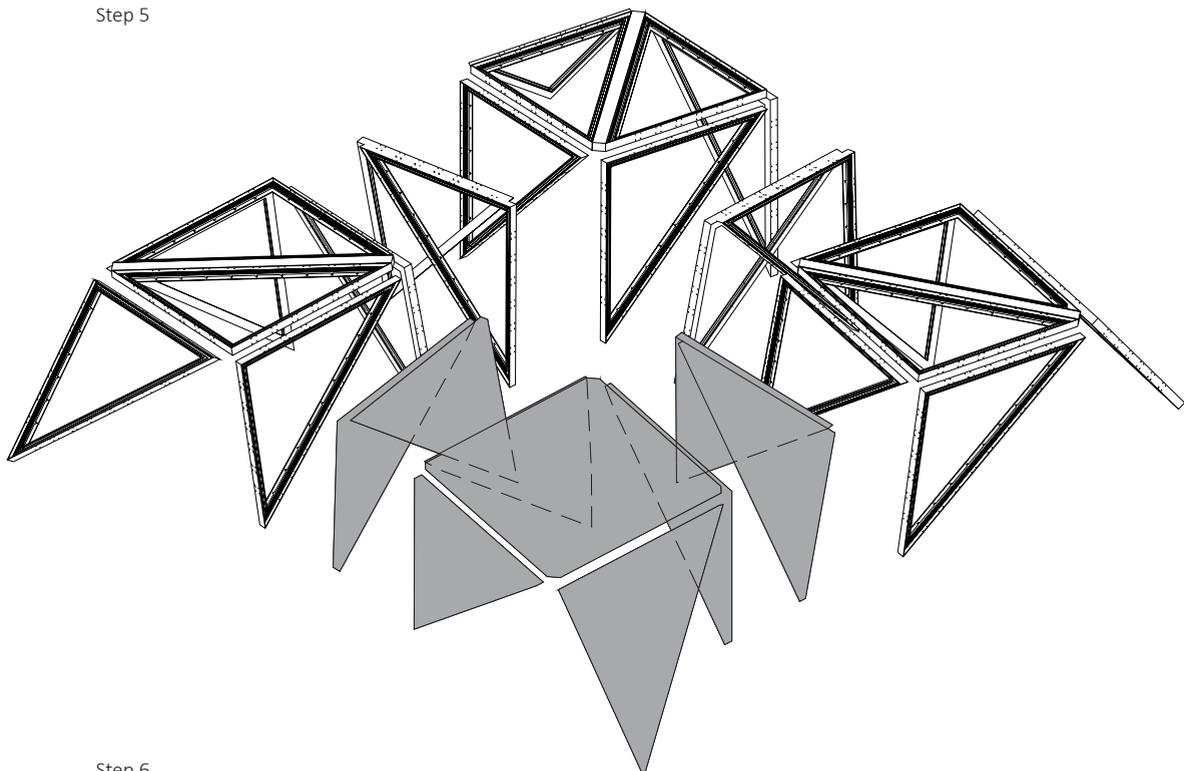
Step 3



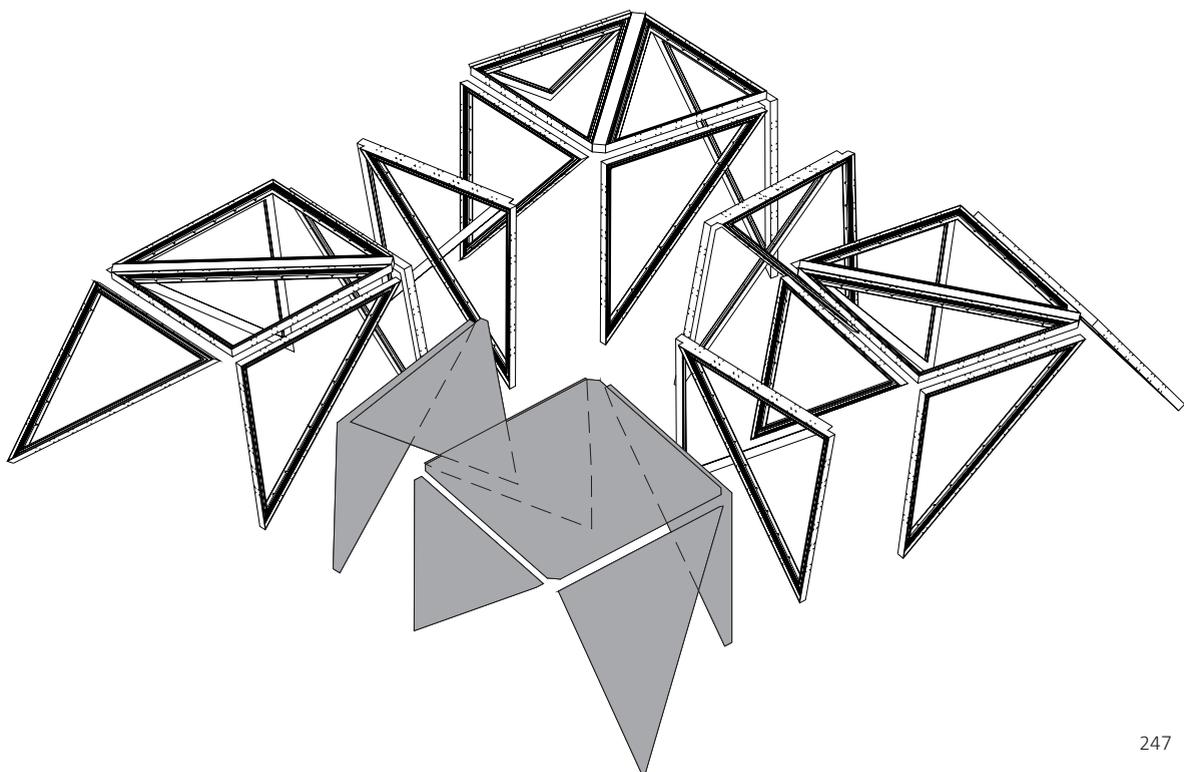
Step 4



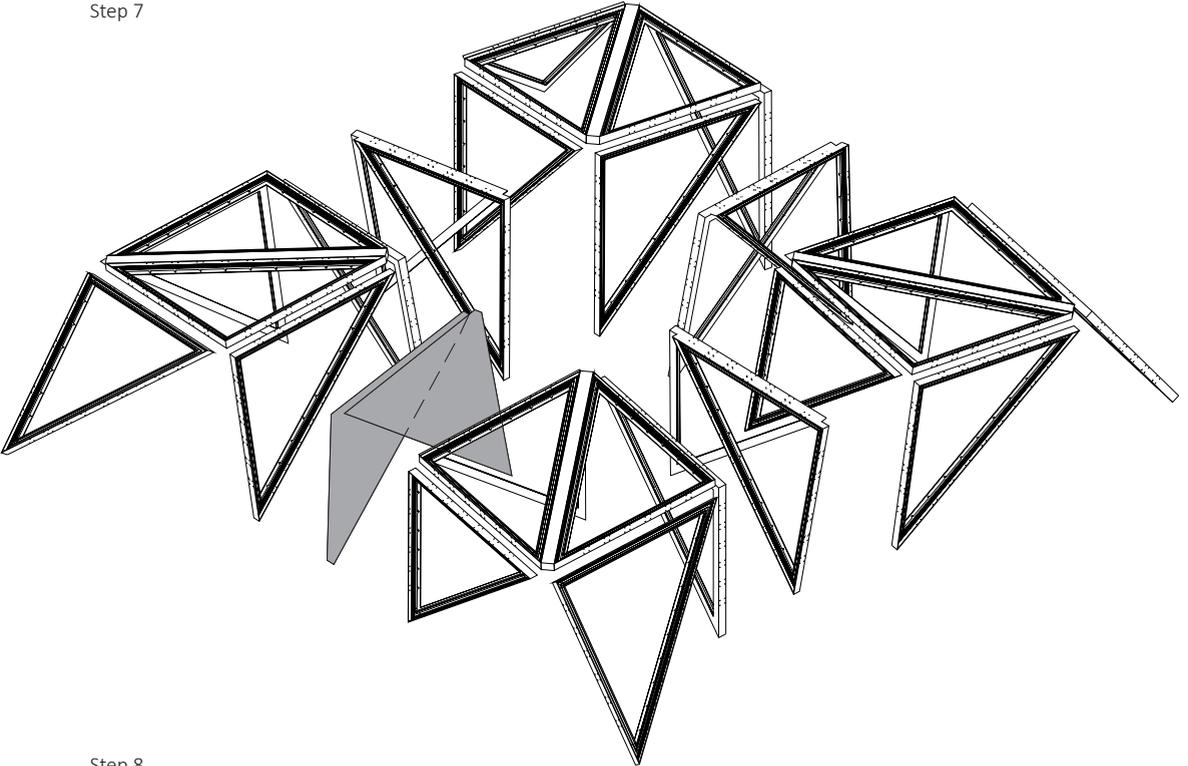
Step 5



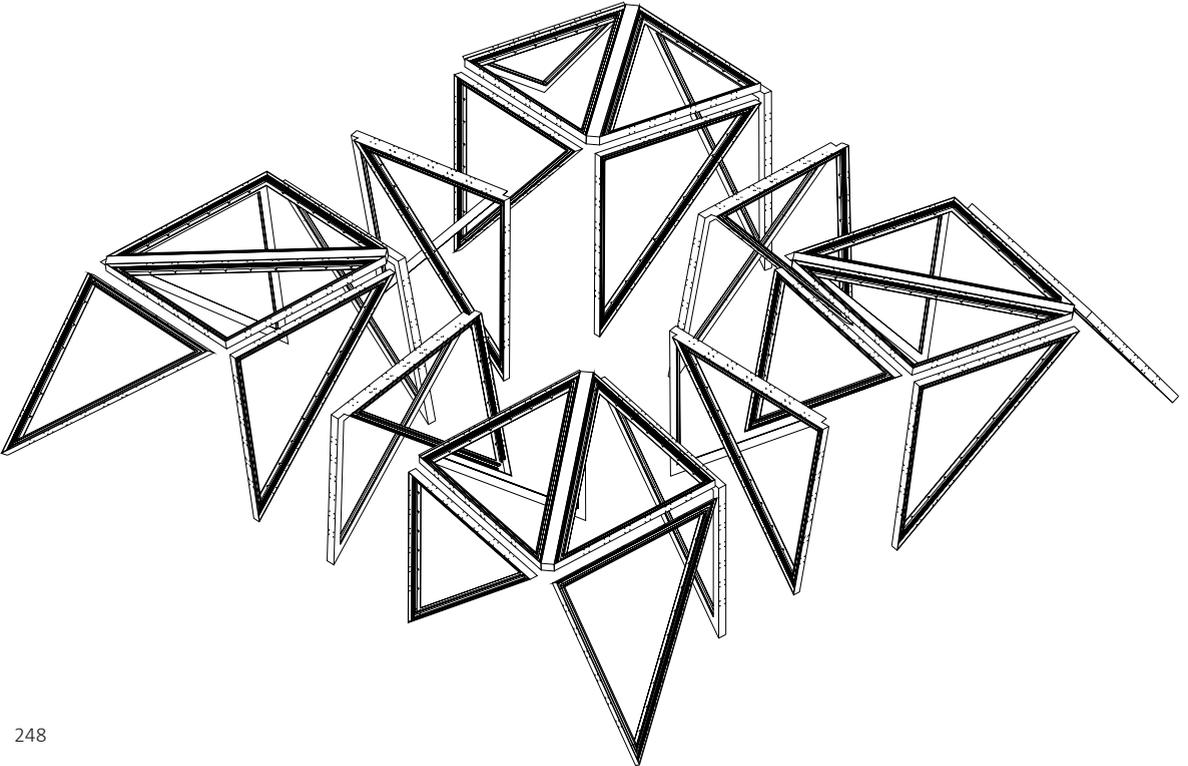
Step 6

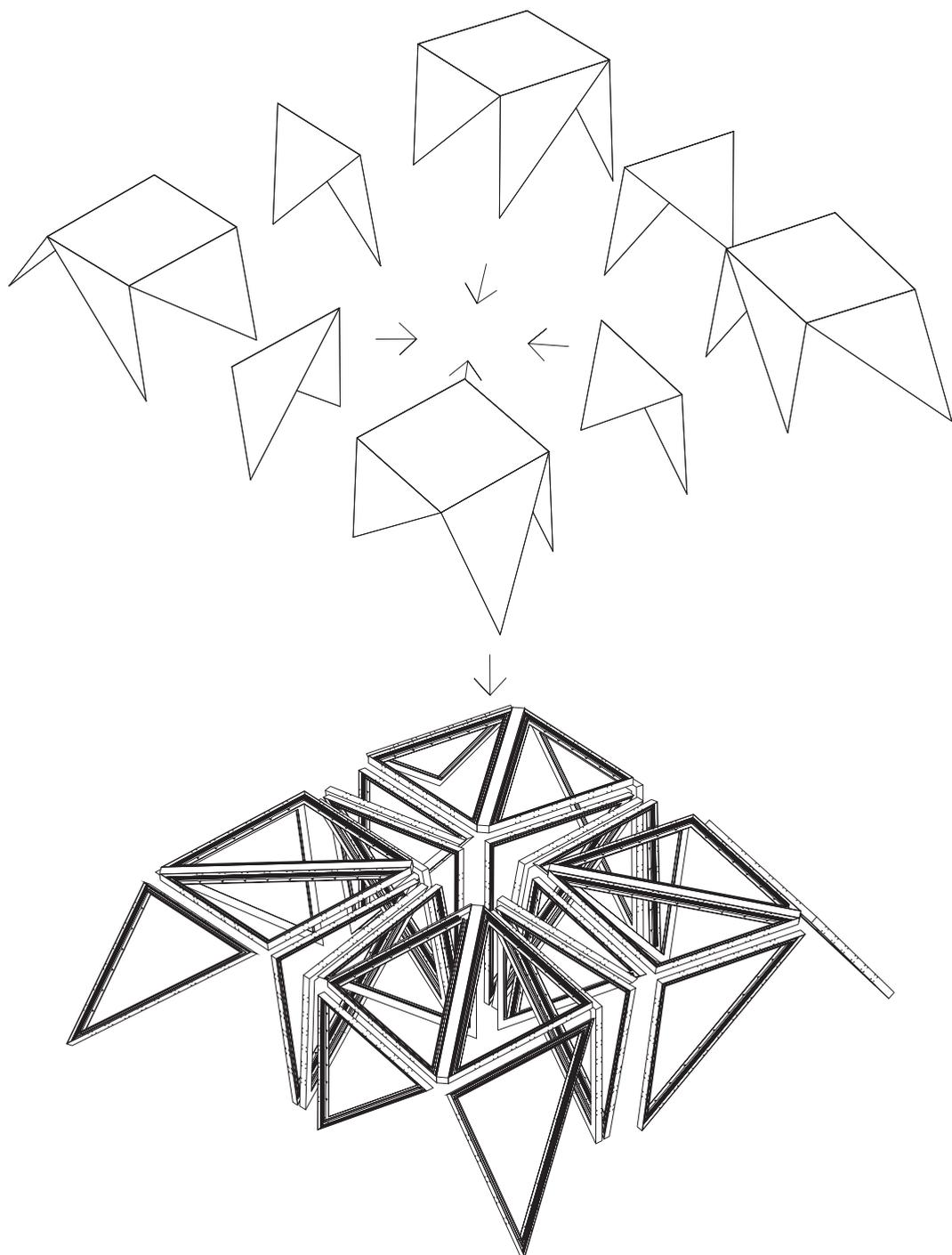


Step 7

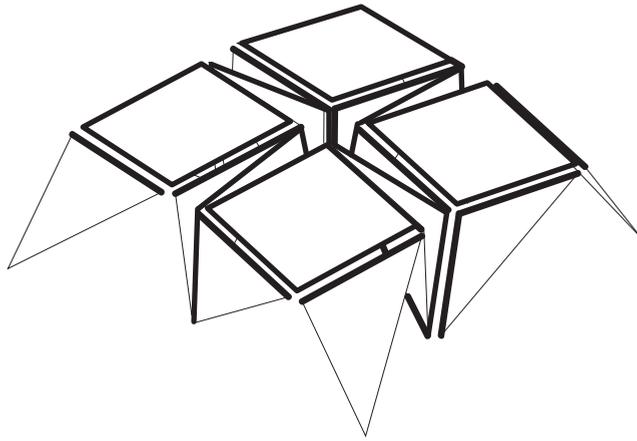


Step 8



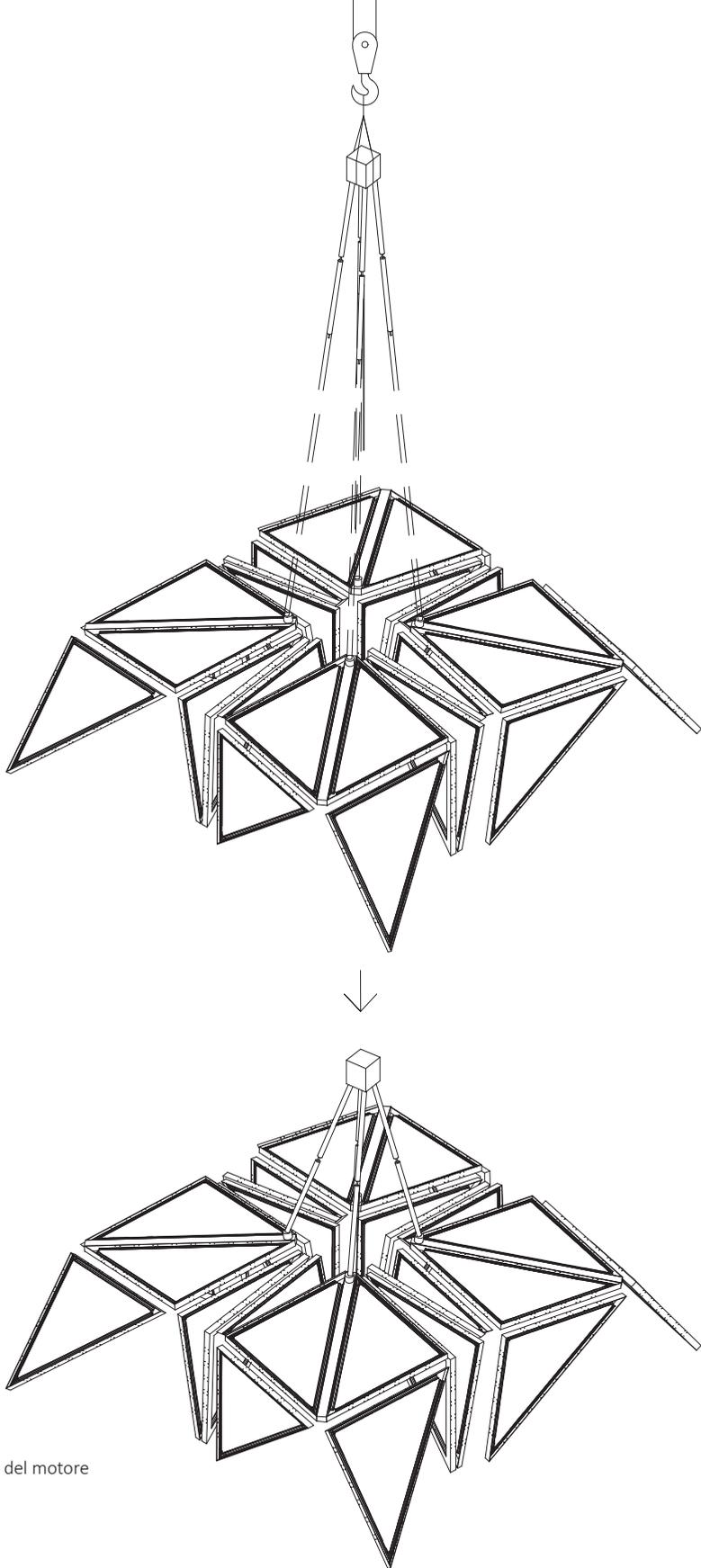


Dopo aver posizionato i telai metallici sulle rispettive centine le impalcature vengono avvicinate come mostrato nella prima parte dello schema. La seconda mostra il risultato ottenuto dopo questo passaggio.

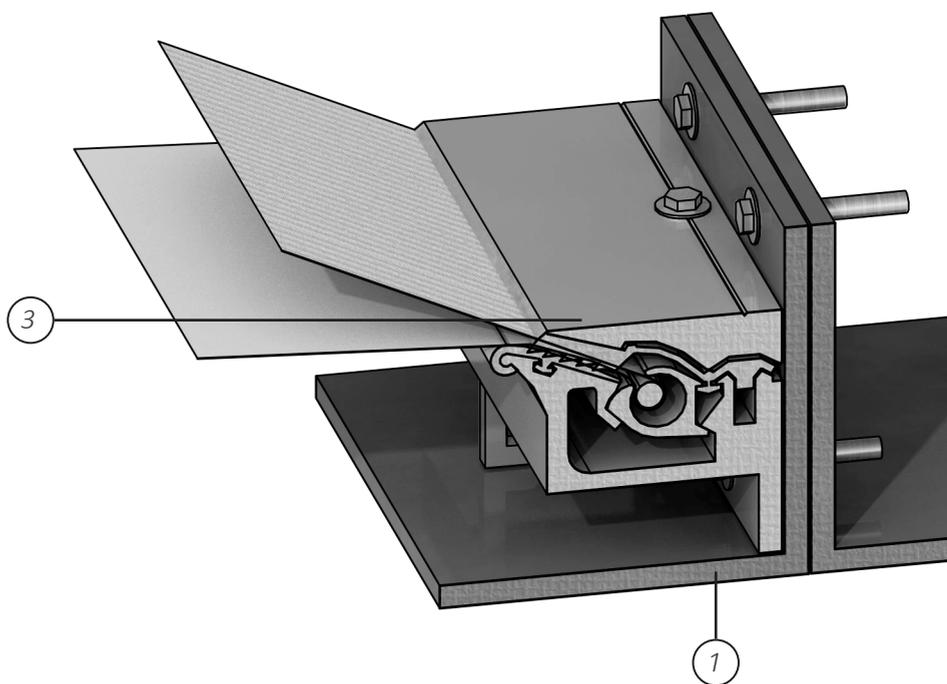


Lo schema evidenzia i lati dei telai sui quali verranno imbullonate le cerniere

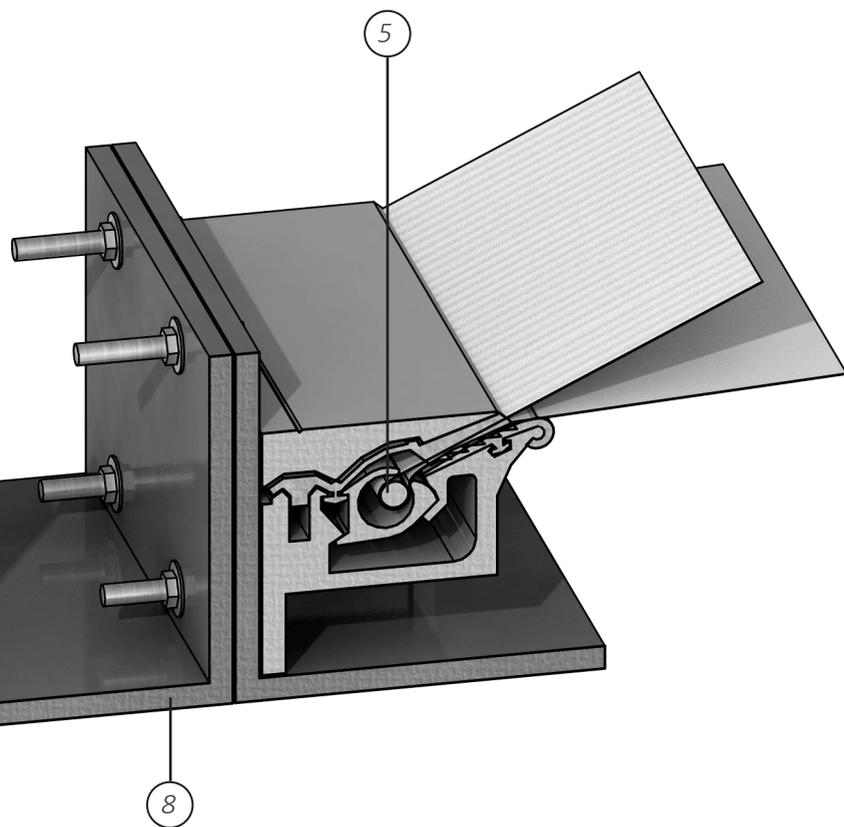
7. Le operazioni della settima fase consentiranno il movimento alla struttura. Il motore, al quale sono già stati fissati i quattro profilati a sezione circolare viene issato al di sopra dell'origami. Una volta issato gli operai dovranno semplicemente imbullonare le estremità dei profilati circolari alle rispettive sedi. Queste, a loro volta, erano state imbullonate all'estremità dei profilati quadrati che compongono le facce quadrate durante la quarta fase.
8. La membrana di ETFE, per evitare danneggiamenti, viene dispiegata e inserita nel telaio fisso solo in questo momento. Durante il trasporto è ripiegata negli appositi contenitori, una volta aperti ed estratta la membrana, si dovranno fissare le aste telescopiche che sono inserite lungo i suoi lembi. Ciascun lembo della membrana deve a sua volta essere inserito all'interno di un occhiello che andrà a posizionarsi nell'apposita sede nel telaio fisso in alluminio. L'occhiello, seppur solo appoggiato alla sua sede, manterrà la posizione, questo faciliterà la manovra successiva, quella di morsettare la membrana tra il telaio fisso e la sua chiusura. Una volta morsettato l'ETFE nel telaio fisso si può procedere al suo gonfiaggio se e dove desiderato.



Installazione del motore



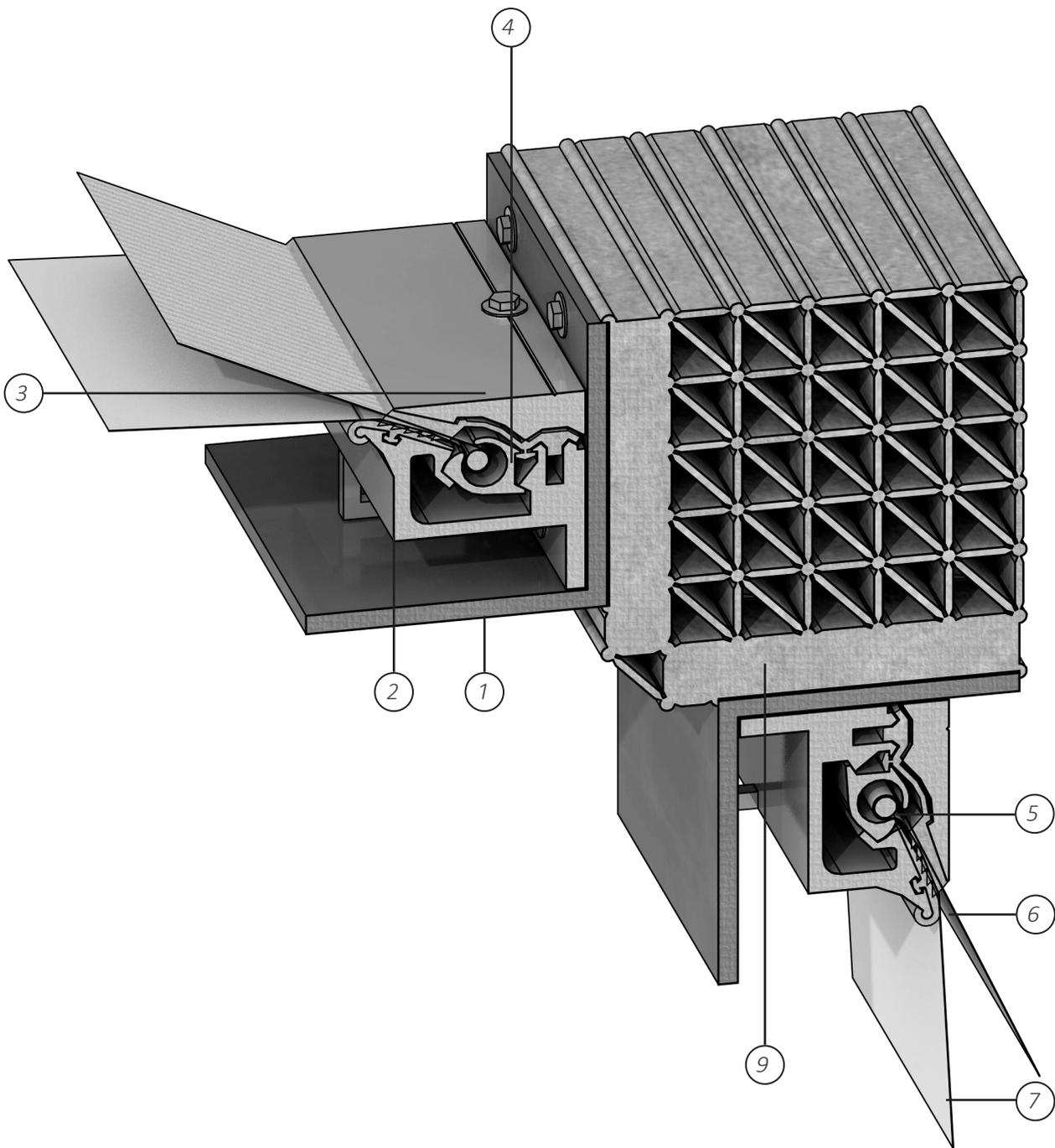
- 1- Telaio con profilato a L in acciaio ASTM A 350
- 2- Telaio fisso in alluminio EN AW 6060
- 3- Chiusura telaio fisso in alluminio EN AW 6060
- 4- Occhiello nel quale inserire la membrana in ETFE
- 5- Telaio telescopico interno alla membrana in ETFE da inserire all'interno dell'occhiello
- 6- Giunto in gomma per non danneggiare la membrana in ETFE durante la clampatura



7- Membrana in ETFE

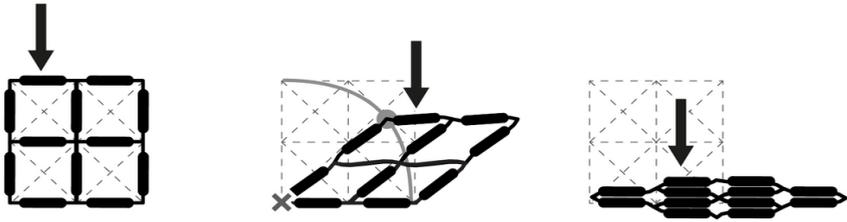
8- Profilato a C usato come giunto per creare le facce quadrate in acciaio ASTM A 350

3cm

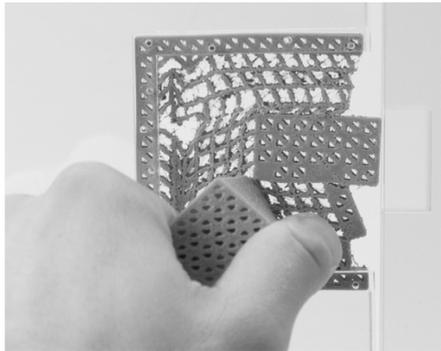
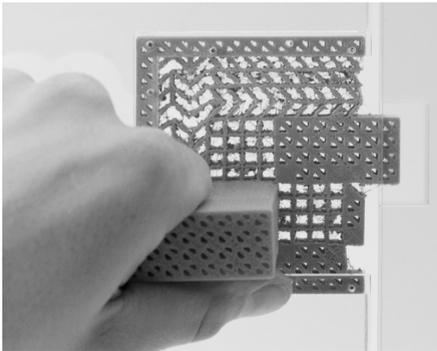


- 1- Telaio con profilato a L in acciaio ASTM A 350
- 2- Telaio fisso in alluminio EN AW 6060
- 3- Chiusura telaio fisso in alluminio EN AW 6060
- 4- Occhiello nel quale inserire la membrana in ETFE
- 5- Telaio telescopico interno alla membrana in ETFE da inserire all'interno dell'occhiello
- 6- Giunto in gomma per non danneggiare la membrana in ETFE durante la clampatura
- 7- Membrana in ETFE
- 9- Giunto in gomma ispirato alle ricerche effettuate dall'Hasso Plattner Institut

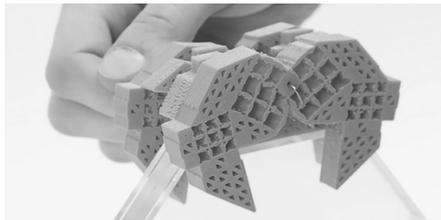
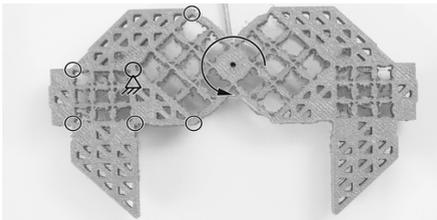
3cm



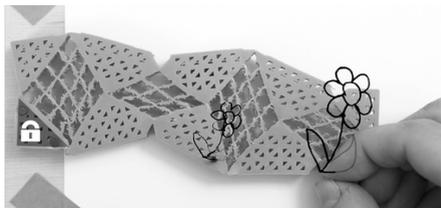
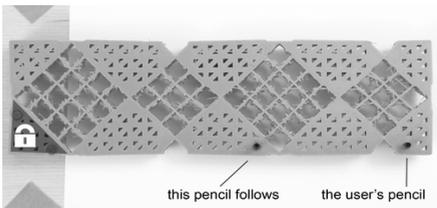
The shearing cell_Hasso-Plattner-Institut



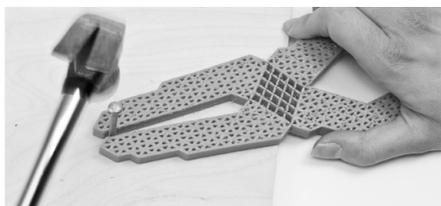
metamaterial door latch_Hasso-Plattner-Institut



metamaterial Jansen walker_Hasso-Plattner-Institut



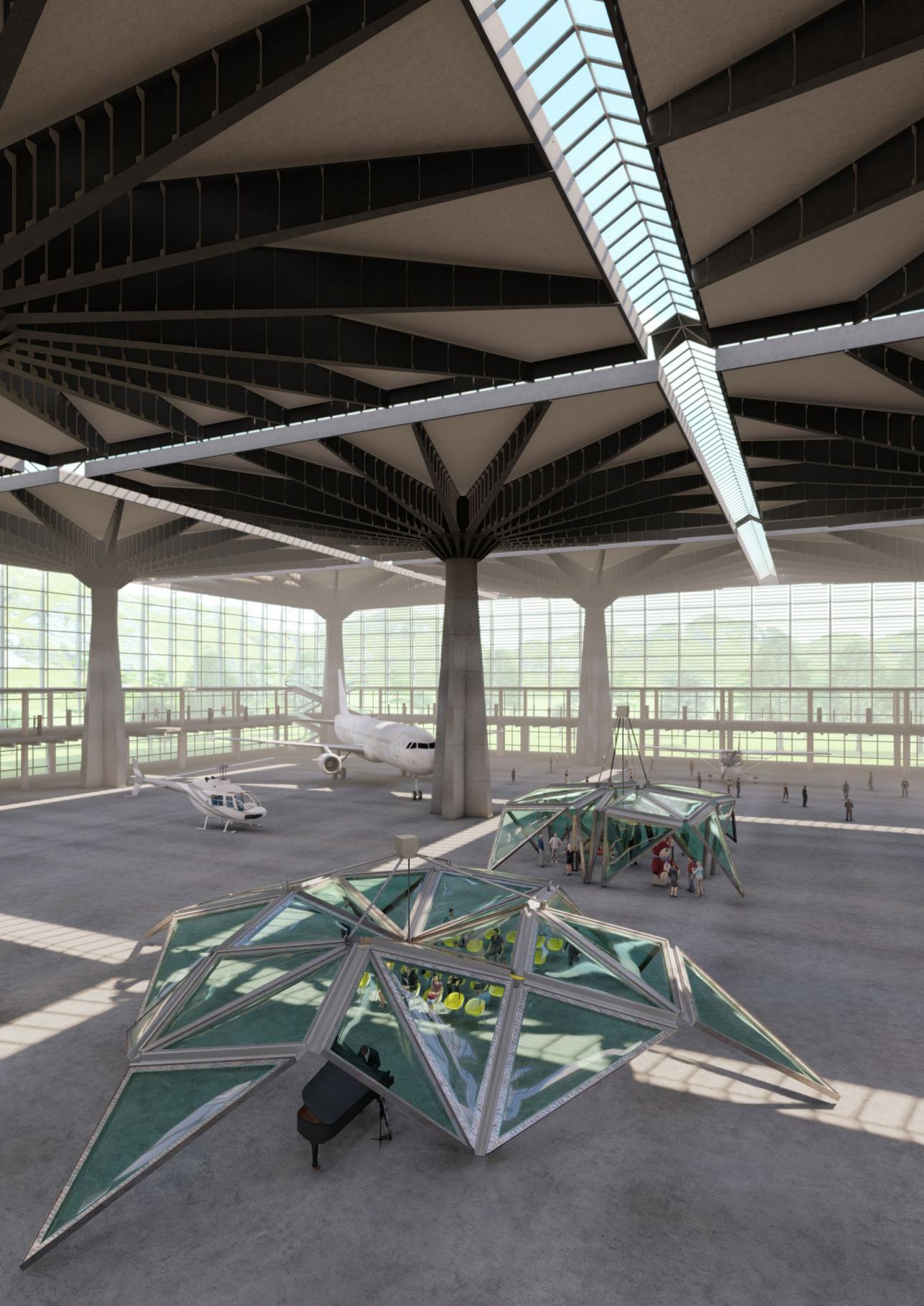
pantograph_Hasso-Plattner-Institut



pliers from metamaterial with one hinge array in the center_Hasso-Plattner-Institut

NOTE

- 1 Capasso, 2005
- 2 Pedrotti, 1995
- 3 Resilienza: capacità di un materiale di assorbire gli urti senza rompersi
- 4 Si fa riferimento ad una ricetta dell'azienda API presentata ed inizio 2019, APILON 52 SOFT (apiplastic.com, 2019)
- 5 Nervi, 1964
- 6 Marko, 2015



CONCLUSIONI

I nuovi workflow che caratterizzano il processo architettonico, lentamente influenzati da continuo avanzamento informatico, aprono nuove prospettive ai progettisti. Si può affermare che ormai, non tanto le forme, ma piuttosto il pensiero parametrico è concretamente entrato all'interno dei processi decisionali dell'architettura contemporanea. Le nuove esigenze ambientali hanno contribuito a questo sviluppo, rendendo indispensabile parlare di ottimizzazione e quindi di impiegare processi parametrici.

La costruzione di modelli informatizzati non rappresenta un traguardo ma un primo step di questo nuovo tipo di workflow. Però, essendo ancora in una fase acerba, il timore è che il progettista diventi strumento di queste tecnologie e non viceversa. Fatta questa premessa, il dubbio che sorge spontaneo è: gli architetti dovrebbero imparare a programmare? Con questo lavoro non si vuole rispondere alla domanda ma mostrare le potenzialità di un processo iterabile controllato da software differenti.

Il Palazzo del Lavoro a oggi possiede un enorme e inespresso potenziale ed è il pretesto attraverso cui la ricerca dimostra come approcci di tipo BIM, supportati da applicativi provenienti dall'Algorithmic Design, permettono di poter generare geometrie complesse in grado di rapportarsi anche con architetture di pregio.

Da un punto di vista progettuale, la funzione presentata è stata suggerita dal contesto stesso in cui l'edificio si trova nonché dalle sue dimensioni. Il museo dell'aeronautica potrebbe suggerire future progettazioni di un museo dei trasporti diffuso lungo il percorso del Parco Fluviale del Po, data la vicinanza con il Museo dell'Automobile e al Sommergibile Andrea Provana.

Non volendo stravolgerne l'identità si è optato per non agire sul curtain wall o sui pilastri a funghi in alcun modo. Inoltre, per scongiurare un nuovo abbandono, si è deciso che gli interventi dovessero essere facilmente smontabili e all'insegna della flessibilità.

Maggiore attenzione è stata spesa sulle modalità di intervento all'interno dell'edificio. Lo studio delle architetture di Nervi ha rilevato come vi sia la capacità di coniugare struttura e forme nel rispetto di spazi rigorosi. La ricerca ha individuato nelle strutture origami caratteristiche simili e la potenzialità di essere descritte attraverso regole matematiche o geometriche, quindi di essere gestite attraverso degli algoritmi. In modo analogo alle architetture di Nervi, le strutture origami sono in grado di descrivere struttura, spazio e volumetria attraverso il semplice gesto di piegatura di un'unica superficie. Come è stato analizzato all'interno del Palazzo del Lavoro, la distinzione tra parte architettonica e parte strutturale non è applicabile e stessa peculiarità è propria degli origami.

Questo loro carattere ambivalente ha mosso la ricerca a trovare un origami adatto ad accogliere la funzione del padiglione per piccole conferenze o eventi temporanei.

Le strutture dei pattern sono state esaminate combinando un approccio empirico con un'analisi più scientifica delle pieghe. Il primo obiettivo raggiunto è stato quello di comprendere i movimenti che li regolano. Questo sistema di analisi ha raccolto le osservazioni che in seguito sono state utilizzate per fornire un metodo di progettazione che genera la geometria origami attraverso algoritmi di modellazione 3D.

Per la funzione selezionato è stato scelto il pattern Ron Resh in quanto, grazie alla sua peculiarità di essere un origami *rigid-foldable* e non *falt-foldable*, ha la necessità di piegarsi al di fuori del piano potendo giungere a diverse forme con estrema facilità.

Enfatizzare la finalità della prima parte del lavoro di tesi è stata dunque la scrittura di un algoritmo. Questo ha come principi le forze che regolano il comportamento osservato nel modello cartaceo: a differenza delle infinite azioni applicabili al modello cartaceo, si è preferito agire solo sugli angoli per analizzare il suo comportamento nelle fasi di piegatura.

A causa della riduzione a un solo parametro in input modificabile, le geometrie che il Ron Resh assume durante le fasi di piega possono essere generate e modificate rapidamente. La forma e l'angolo di apertura generale possono essere adattati alle condizioni specifiche di progetto. Ad esempio, l'ampiezza della corrugazione può essere aumentata per otte-

nere una struttura a cupola o ristretta fino ad ottenere ambienti separati da “tramezzi” di forma triangolare.

Questa flessibilità è interessante perché consente all’architetto e all’ingegnere di agire su condizioni specifiche del progetto, modificando il parametro della struttura senza alterarne il carattere espressivo.

Abbiamo mostrato le conseguenze di specifiche variazioni dei parametri e dei loro limiti. Ciò consente al progettista di essere consapevole delle implicazioni di determinate decisioni nel processo di progettazione fin dall’inizio.

È da sottolineare come la scrittura di questo algoritmo permetta di modificare la geometria di output in funzione delle esigenze che si possono avere un progetto attraverso un feedback immediato.

La seconda fase del lavoro di tesi è proseguita con la costruzione di modelli fisici e prototipi. Questa è stata di grande importanza per la comprensione delle geometrie proposte e per capire come si sarebbe potuta suddividere la cantierizzazione. Costruire le geometrie generate nel software 3D, prima con pannelli in poliplat e poi con pannelli in legno, ha facilitato la verifica della loro esattezza e ci ha dato la consapevolezza di problemi che non sospettavamo.

In particolare, il modello in poliplat ha sollevato quesiti sulla geometria delle giunture tra le piastre e su di esso sono stati effettuati i primi ragionamenti per capire la tecnologia con cui si sarebbe mosso.

È stata dimostrata la fattibilità di strutture origami costruendo un modello fisico con pannelli di legno basato sulle soluzioni tecniche proposte. La fabbricazione e il montaggio erano precisi. Le connessioni tra i pannelli erano abbastanza flessibili e garantiscono la memoria di forma che il modello in carta garantisce, agevolandone l’assemblaggio pare dunque ragionevole considerarle come cerniere utili per un dimensionamento congruente con le dimensioni reali.

Ulteriore sviluppo di questo lavoro di ricerca potrebbe riguardare uno studio più appro-

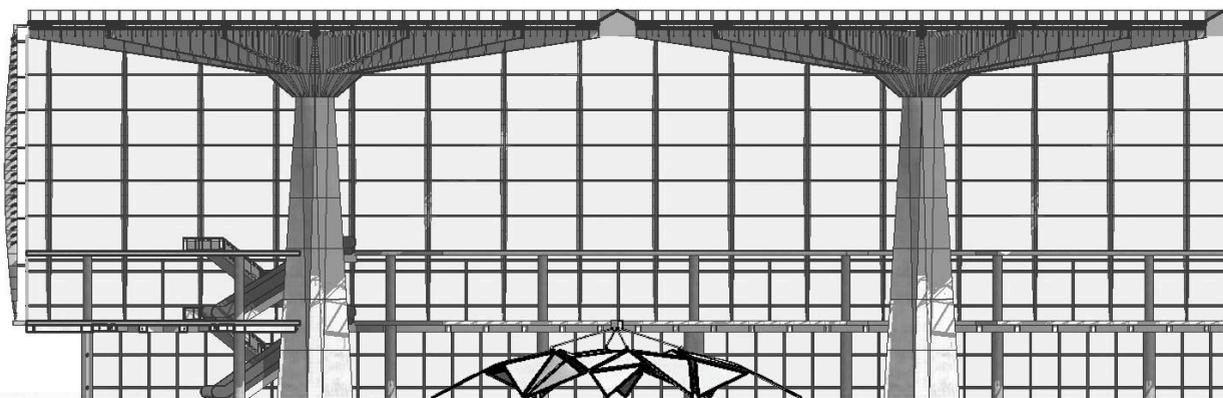
fondito, a scala architettonica, del giunto in gomma, utilizzando i processi e gli strumenti dell'industria4.0.

Interessanti sviluppi futuri riguardanti il museo dell'aeronautica potrebbero prevedere l'utilizzo della stessa metodologia di analisi per l'identificazione di pattern utilizzabili anche per le altre strutture architettoniche interne.

La lettura di questo lavoro vorrebbe trasmettere i valori della sperimentazione e della condivisione, per un cambiamento di paradigma nel pensare l'architettura e le costruzioni, applicando workflow interdisciplinari che possano attingere dal knowhow di altre materie superando quindi i limiti di un processo architettonico tradizionale.

Merita sottolineare come allo stato attuale le architetture responsive contemporanee si limitano a leggere input solo di carattere ambientale: per ogni valore letto è stato programmato un ventaglio di azioni. Questo ventaglio di azioni programmate non deve essere considerato un traguardo. Siamo solo agli albori dell'Intelligenza Artificiale, in cui si potranno istruire e preparare le costruzioni per poter rispondere a input non solo ambientali ma anche funzionali; in tal senso, gli edifici devono essere capaci di trasformarsi o meglio di evolversi.

Il compito di questa trasformazione non può ridursi all'installazione di "tapparelle smart". L'evoluzione dell'edificio dev'essere il risultato di una collaborazione tra diverse discipline per promuovere ricerche nel campo dei materiali, nei processi produttivi, nei sistemi meccanici, nell'architettura, nella programmazione e in tutto ciò che sarà l'indotto di conoscenze necessario. Il punto di arrivo, molto ambizioso, è quello di costruire un edificio migliore che prenda ispirazione dalla natura, in grado di instaurare un processo di simbiosi con ciò che lo circonda e i suoi occupanti.



Sezione del Palazzo del Lavoro con modulo origami inserito al suo interno. SCALA 1:500

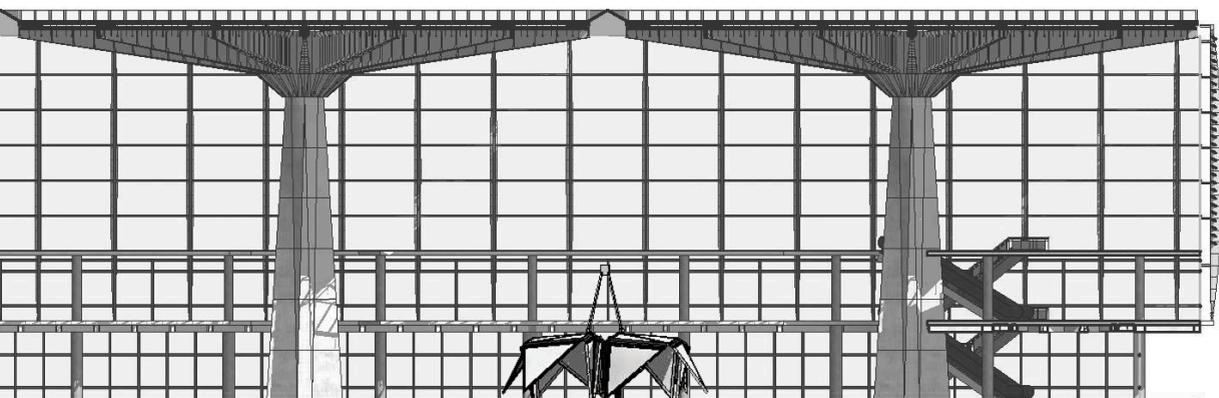


Immagine fotorealistica del modulo origami aperto





Immagine fotorealistica del modulo origami chiuso



Immagine fotorealistica del modulo origami chiuso



BIBLIOGRAFIA

- Al-Mulla, T. & Buehler, M. J. (2015). Origami: Folding creases through bending. *Nature Materials*.
- Bazzetta, G. (2017). *Pier Luigi Nervi. Il modello come strumento di progetto e costruzione*. Macerata: Quodlibet Studio.
- Beorkrem, C. (2012). *Material Strategies in Digital Fabrication*. Londra: Routledge.
- Berlanda, F. (1962). L'italia '61 a Torino. *Casabella n°252*.
- Bossaglia, R., Godoni, E. & Rosci, M. (1994). *Torino 1902: le arti decorative internazionali del nuovo secolo: Torino 1994*. Milano: Fabbri.
- Bottero, M., Rossi, G., Scudo, G. & Silvestrini, G. (1984). *Architettura solare*. Milano: CLUP.
- Bradford, C. (2010). *La via della spada, Young samurai*. Milano: Mondadori.
- Buffin, I. & Longhi, S. (2016). La metodologia BIM nel processo costruttivo. Il rilancio dell'edilizia attraverso l'interoperabilità. *Tesi di Laurea Magistrale*. Trieste: Università degli studi di Trieste.
- Buri, H. (2010). *Origami - Folded Plate Structures*. Suisse: Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne.
- Burry, M. (2016). Gaudi, Teratology and Kinship'. *Architectural Design*, 30-35.
- Buscioni, M. (1990). *Esposizioni e "Stile nazionale" 1861-1925*. Firenze: Alinea.
- Caffi, V. (2006). *Disegno digitale esplicito. Rappresentazioni responsive dell'architettura e della città*. Roma: CUSL.
- Calvano, M. (2019). Disegno di progetto e codici informatici interoperabili. *Sui codici del disegno di progetto* (p. 405-414). Milano: Aracne editrice.
- Capasso, A. (2005). Da less is more a more with less. Dalla leggerezza alla sostenibilità in architettura. *Progetto e innovazione, CLEAN*, 67.
- Casale, A., Valenti, G.M., Calvano, M. (2012). *Architettura delle superfici piegate, le geometrie che muovono gli origami*. Roma: Edizioni Kappa.
- Chen, Y., Peng, R., You, Z. (2015). Origami of thick panels. *Science*, 396-400.
- Chilton, J. (2007). *Space Grid Structures*. Taylor & Francis.

- Cumino, C., Pavignano, M., Spreafico, M., Zich, U. (2018). The Mole Antonelliana between real shape and folding design. *7th International Meeting on Origami in Science, Mathematics and Education* (p. 73-88). Oxford: Tarquin.
- Cumino, C., Pavignano, M., Spreafico, M., Zich, U. (2018). The Origami model as geometrical extension of Visual Thinking. *40° Convegno Internazionale dei Docenti delle Discipline della Rappresentazione. Rappresentazione/Materiale/Immateriale. Drawing as (in)tangible representation* (p. 1075-1078). Roma: Gangemi.
- De Vecchi, L. (2016). L'impiego dell'EFTE in architettura: studio delle pressostrutture. Valutazione delle prestazioni e analisi di progetti rilevanti. *Laurea in Architettura di Primo Livello*. Milano: Politecnico di Milano.
- Della Torre, S. (2012). Il centro studi BIM(M). *Il Building Information Modelling: come sta cambiando l'industria delle costruzioni*. Atti di conferenza. Torino.
- Di Marco, G. (2017). *Simplified Complexity. Metodo per la modellazione NURBS avanzata con Rhinoceros*. Brienza: Le Penseur.
- Dieste, E. (2000). *The Engineer's Contribution to Contemporary Architecture*. Londra: Thomas Telford Publishing.
- Dimas, E. & Briassoulis, D. (1999). 3D geometric modelling based on NURBS: A review. *Advances in Engineering Software* , 741-751.
- Duff, T. (1992). *Interval arithmetic recursive subdivision for implicit functions and constructive solid geometry*. ACM SIGGRAPH computer graphics.
- Eastman, C. (1974). An Outline of the Building Description System. *Research Report No.50*.
- Eastman, C. (1975). The use of computers instead of drawings in building design. *AIA Journal*, 46-50.
- Farina, M. (2018). Metodologie innovative nell'era digitale: il BIM per la "cost optimal analysis". *Tesi di Laurea Magistrale*. Torino: Politecnico di Torino.
- Fofi, G. (1964). *L'immigrazione meridionale*. Milano: Feltrinelli.
- Fox, M. (2016). *Interactive architecture: adaptive world*. New York: Chronicle Books.
- Frampton, K. (1995). *Studies in Tectonica Culture - The Poetic of Construction in Nineteenth and Twentieth century*. Cambridge: The MIT Press.
- Frigerio, E., & Spreafico, M. (2018). *Ed ora, Origami*. Monza: Edizioni Kangourou Italia.

- Giodice, M. (2016/2017). Modellazione parametrica e comportamento meccanico di superfici adattive in architettura: analisi e sperimentazione. *Tesi di Dottorato*. Roma: Sapienza, Università di Roma.
- Griffa, C. (2012). *SMART CREATURES, Progettazione parametrica per architetture sostenibili*. Roma: EDILstampa.
- Haque, U. (2007). The architectural relevance of Gordon Pask. *Architectural Design*, 54-61.
- Heinz, I. (1959). New Shapes for Shells. *International Colloquium on Construction Processes of Shell Structures*. ASS Bulletin.
- Hoberman, C. (1988, Ottobre 25). *United States Brevetto n. 4,780,344*.
- Hunt, G., Mitzalis, F., Alhinai, T., Hooper, P., Kovac, M. (2014). 3D printing with flying robots. *IEEE International Conference on Robotics and Automation*.
- Iv, C., Krishnaraju, D., Konjevod, G., Jiang, H., Yu, H. (2014). *Origami based Mechanical Metamaterials*. Tempe: Arizona State University.
- Jabi, W. (2013). *Parametric Design for Architecture*. Londra: Laurence King.
- Jackson, P. (2011). *Folding techniques for designers from sheet to form*. Londra: Laurence King Publishing Ltd.
- Jackson, P. (2012). *Structural packaging. Design your own boxes and 3-D forms*. Londra: Laurence King Publishing Ltd.
- Jackson, P. (2013). *Cut and fold techniques for promotional materials*. Londra: Laurence King Publishing Ltd.
- Jackson, P. (2014). *Cut and fold techniques for pop-up designs*. Londra: Laurence King Publishing Ltd.
- Janssen, P. (2015, Luglio 9).
- Kenneway, E. (1987). *Complete origami*. New York: St. Martin's Press.
- Kiviniemi, A. (2012). Where BIM goes; challenges and promises for the AEC industry. *Il Building Information Modelling: come sta cambiando l'industria delle costruzioni*. Atti di conferenza. Torino.
- Kolarevic, B. (2001). Digital Fabrication: Manufacturing Architecture in the Information Age. *ACADIA*, 268-277.
- Kolarevic, B. (2009). Exploring architecture of change. *Proceedings of the ACADIA*, 58-61.

- Lago, M. (2018). Aiming Zero Emission in a high-rise building. Methodological analysis of an Integrated Design Process. *Tesi di Laurea Magistrale*. Trondheim: NTNU.
- Lo Turco, M. (2015). *Il BIM e la rappresentazione infografica nel processo edilizio. Dieci anni di ricerche e applicazioni*. Roma: Aracne editrice.
- MacLeamy, P. (2004). Collaboration, integrated information and the project lifecycle in building design, construction and operation. *The Construction Users Roundtable*.
- Magnaghi, A. & Monge, M. (1995). *Guida all'architettura moderna di Torino*. Torino: Lindau.
- Marko, P. (2015). Building site. *Viceversa*, 42- 47.
- Meossi, M. (2007). *Info -Architecture. L'architettura performativa dell'età dell'informazione*. Saonara: Il Prato.
- Miura, K. (1980). Method of packaging and deployment of large membranes in space. *Proceeding of 31st Congress of International Astronautics Federation* (p. 1-10). Tokyo: International Astronautics Federation .
- Miura, K. (1989). Folding a plane- scenes from nature technology and art. *Symmetry of structure, interdisciplinary Symposium* (p. 391-394). Budapest: Danvas G. & Nagy D. ed.
- Mostra delle regioni. (1961). *Catalogo guida*. Torino.
- Musacchio, A. (2009). *Architetture cinetiche*. Milano: Maggioli Editore.
- Negroponte, N. (1970). *The architecture machine*. MIT press.
- Nervi, P. (1964). *Costruire correttamente*. Milano: Hoepli.
- Noelle, P. (2016). Supercharging shell. *Architectural Design*, 74-75.
- Oosterhuis, K. & Xia, X. (2007). *Interactive Architecture*. Delft: Jap Sam Books.
- Osello, A., Provisiero , G., Sirago, V., Pavan, A., Levin, E., Vinci, R., . . . Osegna, F. (2012). Il BIM, nuove opportunità per l'industria delle costruzioni. *Il Building Information Modelling: come sta cambiando l'industria delle costruzioni?* Atti di conferenza. Torino.
- Pace, S. (cur.) & Nervi, P. (2011). *Torino, la committenza industriale, le culture architettoniche e politecniche italiane*. Bruxelles: Silvana editoriale- PLN Project, Cinisello Balsamo.

- Pace, S., Chiorino, C., Rosso, M. (2005). *Italia '61: la nazione in scena. Identità e miti nelle celebrazioni per il centenario dell'Unità d'Italia*. Torino: Umberto allemandi & c.
- Pedrotti, L. (1995). *La flessibilità tecnologica dei sistemi di facciata: evoluzione delle tecniche di produzione e di assemblaggio*. FrancoAgnelli.
- Pier Luigi Nervi Research and Knowledge Management Project asbl. (s.d.). *pierluiginervi.org*. Tratto il giorno 2019 da <http://pierluiginervi.org>
- Pontello, E. (2015). Approccio parametrico alla progettazione architettonica. *Tesi di Laurea Magistrale*. Udine: Università degli Studi di Udine.
- Pozzoli, S., Bonazza, M., Villa, W. (2016). *Revit 2017 per l'Architettura. Guida completa per la progettazione BIM*. Milano: Tecniche Nuove.
- Rosen, J. (1989). *Symmetry in the structure of science*. Pudapest: ISIS-SYMMETRY.
- Roudsari, M., Pak, M., Smith, A. (2013). LADYBUG: A PARAMETRIC ENVIRONMENTAL PLUGIN FOR GRASSHOPPER TO HELP DESIGNERS CREATE AN ENVIRONMENTALLY-CONSCIOUS DESIGN. *13th Conference of International Building Performance Simulation Association* (p. 3128-3135). Chambéry: +Gordon Gill Architecture.
- Sakoda, J. (1997). *Modern Origami*. Baltimora: DiscoverBooks.
- Scarpati, F. (2016). Progettare sul confine. *Tesi di Laurea Magistrale*. Napoli: Università degli Studi di Napoli Federico II.
- Schenk, M. & Guest, S. (2010). Origami folding a structural engineering approach. *Origami 5 Fifth International Meeting of Origami Science Mathematics and Education*. Singapore.
- Schumacher, P. (2011/2012). *The Autopoiesis of Architecture, Vol II: A New Agenda for Architecture*. Chichester: John Wiley & Sons.
- Stuart-Smith, R. (2016). Behavioural Production: Autonomous Swarm-Constructed Architecture. *Architectural Design*, 54-59.
- Tachi, T. (2009). Generalization of rigid foldable quadrilateral mesh origami. *Journal Of The International Association For Shell And Spatial Structures*.
- Tachi, T. (2011). *Rigid-Foldable Thick Origam*. Origami 5 Fifth International Meeting of Origami Science Mathematics and Education.
- Tancredi, M. (2015). Applicazione del BIM per l'analisi LCA: il caso studio Sunslice. *Tesi di Laurea Magistrale*. Torino: Politecnico di Torino.

- Tedeschi, A. (2014). *AAD_Algorithms-Aided Design. Parametric strategies using grasshopper*. Brienza: Le Penseur.
- Torretta, P. (2012). Il progetto InnovANCE e il futuro del BIM in Italia. *Il Building Information Modelling: come sta cambiando l'industria delle costruzioni*. Atti di conferenza. Torino.
- Trautz, M. & Kuntzler, A. (2009). *Deployable folded plate structures - folding patterns based on 4-fold-mechanism using sti plates*. Valenzia: Universidad Politecnica de Valencia.
- Turing, A. (1950). Computing Machinery And Intelligence. *Mind*, 433-460.
- Willmann, J., Augugliaro, F., Cadalbert, T., D'Andrea, R., Gramazio, F., Kohler, M. (2012). Aerial Robotic Construction towards a New Field of Architectural Research. *International journal of architectural computing*, 439-459.
- Wooyoung, J. & Ghan, L. (2015). The Status of BIM Adoption on Six Continents. *International journal of civil, environmental, structural, construction and architectural engineering*, 444-448.
- Worringer, W. (1920). *Form problems of the Gothic*. New York: Authorized American ed.
- Zevi, B. (1961). La dissociazione architettonica, tara delle esposizioni. *Casabella*.
- Zevi, B. (1971). *Cronache di architettura*. Bari: Laterza.

SITOGRAFIA

- API (s.d.). *apiplastic.com*. Consultato in Giugno 2019 da <https://www.apiplastic.com/tpu-poliuretani-termoplastici/>
- autodesk. (s.d.). *help.autodesk.com*. Consultato in Aprile 2019 da <https://help.autodesk.com/view/RVT/2019/ITA/?guid=GUID-674E9A83-9743-4470-BB3E-A05E3DEA23A7>
- Grasshopper. (s.d.). *grasshopper3d.com*. Consultato in Ottobre 2018 da grasshopper3d.com
- Ladybug Tools. (s.d.). *ladybug.tools*. Consultato in Ottobre 2018 da ladybug.tools/ladybug.html

museoTorino. (s.d.). *museotorino.it*. Consultato in Gennaio 2019 da museotorino.it/site/documentation

Redshift by AUTODESK. (s.d.). *autodesk.com/redshift*. Consultato in Gennaio 2019 da autodesk.com/redshift/category/architecture

Treccani, la cultura italiana. (s.d.). *treccani.it*. Consultato in Gennaio 2019 da treccani.it

RINGRAZIAMENTI

Vorrei ringraziare, in primo luogo, i miei relatori, il Prof. Massimiliano Lo Turco, il Prof. Michele Calvano e il Prof. Roberto Giordano. Mi avete sempre seguito con entusiasmo, disponibilità ed educazione, avete il merito di avermi fatto appassionare alla ricerca spingendomi a dare il massimo in ogni fase del percorso.

Il Prof. Massimiliano Lo Turco merita un'ulteriore menzione per avermi mostrato il fascino dell'insegnamento, per aver speso il suo tempo al fine di prepararmi al meglio, scommettendo su di me.

Un grazie a tutti coloro che con estrema disponibilità mi hanno fornito materiale o spunti di riflessione, senza di loro la ricerca non avrebbe questa forma. In particolare un grazie va alla Prof.ssa Michela Barosio per avermi incoraggiato ad intraprendere scelte audaci e all'Arch. Cristina Chiorino, per la sua estrema disponibilità nel fornirmi così velocemente tutto il materiale a sua disposizione.

Voglio ringraziare anche i miei amici e poi colleghi: Agostino ed Edoardo. Mi avete sempre aiutato, sostenuto e sopportato. Non vi sto ringraziando per il solo contributo dato al lavoro di tesi o per quello ricevuto durante la magistrale, ma soprattutto per la vostra amicizia al di fuori dell'ambito universitario che è rimasta costante.

Ringrazio inoltre Andrea per avermi fatto da spalla tutto questo tempo e Silvio per avermi introdotto al modo di Grasshopper.

Un grazie anche al mio amico Sergio che, dopo avermi iniziato al mondo del disegno e dell'architettura, mi ha sempre cercato, interessandosi sempre a cosa stesse combinando la "vecchia ciabatta".

Ai miei vecchi amici di Noli e quelli nuovi di Torino: grazie! Nonostante la distanza, le litigate per gli atelier e molto altro mi siete stati vicino.

A mia sorella che mi hai sempre aiutato, nonostante scadenze imminenti e i continui rimproveri sull'uso scorretto dei "the".

Grazie a mamma e papà che prima di questo percorso mi hanno insegnato il valore dell'istruzione. Grazie anche per il supporto in questo lungo percorso, nonostante non abbiate mai avuto ben presente cosa stessi facendo, mi avete sempre porto cecamente il vostro aiuto. Grazie a voi non mi è mai mancato nulla. Spero ci siano altri modellini da fare in tre in cantina, mi ero divertito tanto.

Infine, grazie soprattutto ad Ambra per avermi fatto ragionare, aiutato, amato e fatto sorridere per tutti questi anni.