



*Ministero dell'Istruzione,  
dell'Università e della Ricerca*



## **UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI SALERNO**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA CIVILE**

*Dottorato di Ricerca in Ingegneria civile, edile-architettura,  
ambientale e del territorio*

**XXIX Ciclo (2015-2016)**

**Curriculum in: Ingegneria delle Strutture, Recupero edilizio ed Urbano**

*Tesi di dottorato in*  
**OTTIMIZZAZIONE ENERGETICA DEGLI EDIFICI  
ESISTENTI: LO SVILUPPO DI SCHERMATURE SOLARI  
INTELLIGENTI E INNOVATIVE IN TECNOLOGIA  
TENSEGRITY**

*Maria Chiara Cimmino*

**Il Tutor**

*Prof. Arch. Enrico Sicignano*

**Il Coordinatore**

*Prof. Ciro Faella*

**Il Co-Tutor**

*Prof. Ing. Fernando Fraternali*



# INDICE

<b>ABSTRACT</b> .....	1
<b>INTRODUZIONE</b> .....	4
<b>CAPITOLO 1 ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE</b> .....	13
<b>1.1 Premesse metodologiche</b> .....	13
<b>1.2 L'evoluzione storica delle tecnologie di involucro</b> .....	18
<b>1.3 L'involucro edilizio con tecnologie avanzate</b> .....	22
<b>1.4 Le schermature solari</b> .....	31
1.4.1 Il ruolo dei sistemi di ombreggiamento in Architettura.....	33
1.4.2 I sistemi di schermatura solare .....	57
<b>1.5 Interventi sul patrimonio edilizio esistente</b> .....	65
<b>1.6 Tensegrity</b> .....	66
1.6.1 Cenni storici.....	68
1.6.2 Campi di applicazione.....	73
1.6.3 Proprietà.....	80
1.6.4 Caratterizzazione.....	84
1.6.5 Principali realizzazioni.....	91
<b>CAPITOLO 2 COTRUZIONE DI APPARATI E CATEGORIE OPERATIVE</b> .....	103
<b>2.1 Progetto dell'ombra</b> .....	103
<b>2.2 I raggi solari e le ombre generate dal movimento del Sole</b> .....	104

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

2.2.1	Caso studio.....	112
<b>2.3</b>	<b>Approccio alla progettazione tensegrity.....</b>	<b>121</b>
2.3.1	Teoria generale delle strutture tensegrity.....	121
2.3.2	Ricerca di forma.....	145
2.3.3	Force Density Method.....	149
2.3.4	Applicazione della tecnologia tensegrity alle schermature solari dinamiche.....	154
 <b>CAPITOLO 3 CONCEPT DI NUOVE SCHERMATURE SOLARI IN TECNOLOGIA TENSEGRITY.....</b>		<b>157</b>
<b>3.1.</b>	<b>Il concept.....</b>	<b>159</b>
<b>3.2</b>	<b>Blinking Sail Façade System.....</b>	<b>161</b>
3.2.1	Meccanismo di attivazione.....	164
3.2.2	Blinking Sail Solar Façade System.....	165
3.2.3	Blinking Sail Wind Energy Harvester.....	170
<b>3.3</b>	<b>Fan-Fish Solar Façade System.....</b>	<b>174</b>
3.3.1	Dal concept al modello fisico.....	175
3.3.2	Predimensionamento del modulo.....	183
<b>3.4</b>	<b>Osservazioni.....</b>	<b>195</b>
 <b>CAPITOLO 4 CONCLUSIONI.....</b>		<b>198</b>
<b>4.1</b>	<b>Conclusioni e impatti attesi.....</b>	<b>198</b>
 <b>BIBLIOGRAFIA.....</b>		<b>202</b>
 <b>SITOGRAFIA.....</b>		<b>210</b>

## **ABSTRACT**

L'impatto ambientale della progettazione, costruzione ed esercizio degli edifici è enorme: in Europa gli edifici sono responsabili, direttamente o indirettamente, di circa il 40% del consumo di energia primaria complessiva e di circa il 36% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> (COM(2008) 772 final COMMUNICATION FROM THE COMMISSION Energy efficiency). Un progetto realizzato con criteri di sostenibilità ambientale può minimizzare o eliminare del tutto gli impatti ambientali negativi e consente di ridurre i costi operativi, aumentare il valore dell'immobile nel mercato e la produttività degli utenti finali.

La ricerca si riallaccia al filone di studi internazionali sul tema degli involucri di facciata evoluti e degli edifici intelligenti, focalizzando l'attenzione sulle tematiche legate al settore tecnologico Ambiente-Energia e Costruzione. L'obiettivo fondamentale dello studio è la progettazione di nuovi componenti tecnologici Tensegrity di facciata altamente innovativi tramite la valutazione degli aspetti legati al design e alle problematiche di carattere tecnologico. Attualmente l'involucro è ormai svincolato dalla struttura portante dell'edificio ed è diventato un elemento di chiusura chiamato a regolare prevalentemente i flussi energetici legati al passaggio di calore, alla trasmissione della luce per un'adeguata illuminazione degli ambienti interni. Un passo avanti nella progettazione dell'involucro sono i sistemi di Automazione (BACS/HBES) che hanno la funzione di

massimizzare l'efficienza energetica degli impianti dell'edificio in relazione alle condizioni ambientali esterne e ai differenti e variabili scenari di utilizzo e occupazione dei singoli ambienti dell'edificio stesso, fornendo nel contempo i massimi livelli di comfort, sicurezza e qualità. Un particolare elemento di facciata che può essere collegato all'impianto di gestione centralizzato dell'edificio (BMS - Building Management System), sono le *schermature solari* che limitano i carichi termici estivi; tramite sensori di radiazione solare, le componenti di facciata si orientano automaticamente seguendo l'andamento delle condizioni esterne, permettendo, quindi, di avere una riduzione dell'apporto solare quando la radiazione è incidente, ma garantendo allo stesso tempo alla luce naturale di diffondersi all'interno dell'ambiente.

Per la realizzazione di schermi solari innovativi si è pensato di adottare il paradigma progettuale Tensegrity. I punti di forza di queste strutture sono la leggerezza e la possibilità di ottenere forme architettoniche complesse che prefigurano nuovi scenari architettonici. Queste strutture sono leggere e facilmente pieghevoli, meccanismo possibile semplicemente controllando l'allungamento di un numero limitato di stringhe.

La ricerca ha visto l'elaborazione di un approccio progettuale che ha prodotto due componenti di facciata aventi origine dalla stessa struttura geometrica, differenziandosi per i due diversi meccanismi di attivazione. Il primo progetto di componente, *Blinking Sail Solar Façade System*, prevede una geometria romboidale costituita da 5 nodi, 6 barre e 2 cavi. L'attuazione avviene tramite il controllo dell'allungamento dei due cavi verticali che permettono al componente di chiudersi uscendo dal piano di facciata. La schermatura così progettata può essere utilizzata come

collettore sia di energia solare che di energia eolica, nel primo caso applicando le celle solari e nel secondo sfruttando l'allungamento indotto dal vento nei cavi.

Il secondo progetto di componente è il *Fun Fish solar Façade System*. Prendendo spunto dalla natura, si è pensato ad un componente di facciata che avesse caratteristiche strutturali simili alle scaglie dei pesci. La singola scaglia è stata pensata come un ventaglio, in modo da poter cambiare la configurazione del pannello da aperto a chiuso, rendendo il sistema adattivo. Inoltre sulle stecche dei ventagli è possibile porre dei pannelli solari di ultima generazione. Il modello prevede una struttura caratterizzata da 5 nodi, 4 barre e 4 cavi.

Attraverso l'impostazione delle matrici statiche caratterizzanti i due differenti design e l'utilizzo di codici di calcolo ad hoc (Tensop3 – codice Matlab) per applicare l'algoritmo di minimizzazione della massa, si è ottimizzato il sistema strutturale tensegrity ottenendo la soluzione che garantisca la minor massa possibile, al fine di rendere effettivamente ed economicamente vantaggiosa la scelta di una facciata Tensegrity. In particolare si è elaborato un procedimento di predimensionamento della struttura, in modo da ottenere dei valori di input per il programma di calcolo che portassero a dei risultati fisici sufficientemente vicini alla realtà, in particolare alle esigenze costruttive dell'oggetto.

L'utilizzo della tecnologia Tensegrity permette di controllare e gestire luce e calore garantendo un clima ottimale e conferendo un'immagine architettonica significativa unica e variabile, ottenendo sistemi di facciata leggeri e facilmente movimentabili con un bassissimo impiego di energia, per altro reperibile dai pannelli solari applicati sui componenti.

## INTRODUZIONE

### I. Inquadramento del problema scientifico

Il concetto di *Sostenibilità* fu introdotto embrionalmente per la prima volta nel 1972 dal *Rapporto sui limiti dello sviluppo*, meglio noto come *Rapporto Meadows*<sup>1</sup>. Lo studio segnalava come il sistema ambiente avesse subito repentini cambiamenti a seguito della rivoluzione industriale e che tali mutamenti dipendessero da una serie di fattori in forte crescita, quali il numero della popolazione mondiale, la richiesta di alimenti e di capitale industriale, il consumo di risorse naturali e le emissioni di sostanze inquinanti in aria, acqua e suolo. Inoltre evidenziava che tale modello di crescita avrebbe incontrato inevitabilmente i limiti posti dalla disponibilità delle risorse in natura e dalla capacità del pianeta terra di “metabolizzare” rifiuti ed inquinanti immessi nell’ambiente. Successivamente alla crisi petrolifera degli anni ’73-75 l’attenzione dell’opinione pubblica fu ulteriormente attirata su questo problema facendo concretamente acquisire la consapevolezza della limitatezza ed esauribilità delle risorse naturali a fronte della dipendenza della propria economia da approvvigionamenti di materie prime provenienti da altri paesi. Negli anni

---

<sup>1</sup> Il *Club di Roma*, associazione non governativa e no-profit, commissionò al MIT di Boston una ricerca avente per oggetto l’indagine delle risorse disponibili esistenti sul pianeta. Il rapporto basato sulla simulazione al computer *World3*, predice le conseguenze della continua crescita della popolazione sull’ecosistema terrestre e sulla stessa sopravvivenza della specie umana

a seguire questa consapevolezza portò i capi di Stato e di Governo, in particolare quelli appartenenti alle Nazioni Unite, a riunirsi in conferenze vertenti su Ambiente e Sviluppo e a costituire apposite commissioni con lo scopo di produrre e, quindi, approvare Dichiarazioni di intenzioni e impegni comuni, Agende per la programmazione pluriennale degli stessi e Protocolli contenenti indicazioni operative per l'attuazione degli impegni più urgenti previsti dalle convenzioni sui cambiamenti climatici. Nasce pienamente, dunque, verso la fine degli anni '80 il concetto di *Sviluppo Sostenibile* intesa come prospettiva di rendere attuabile uno sviluppo definito come *volto a soddisfare i bisogni del presente senza compromettere la possibilità delle future generazioni di soddisfare i propri bisogni*<sup>2</sup>. Nel 1997 venne approvato il *Protocollo di Kyoto*, il primo trattato che prevedesse l'obbligo dei Paesi industrializzati ad operare nel periodo 2008-2012 una riduzione non inferiore al 5% delle emissioni di gas climalteranti (CO<sub>2</sub> ed altri gas serra tra i quali il metano e l'ossido di azoto) rispetto alle emissioni registrate nel 1990, considerato come anno base. Nel 2012 ha avuto luogo la conferenza delle Nazioni Unite sullo sviluppo sostenibile Rio+20 con l'obiettivo di garantire un rinnovato impegno politico per lo sviluppo sostenibile, valutando i progressi fatti fino ad oggi e le lacune ancora esistenti rispetto al conseguimento dei principali obiettivi sullo sviluppo sostenibile, cioè assicurare che alle risorse del pianeta sia data la

---

<sup>2</sup> Nel 1983 le Nazioni Unite istituirono la *Commissione Mondiale per l'Ambiente e lo Sviluppo* (World Commission on Environment and Development), più nota come Commissione Brundtland. Dopo quattro anni la Commissione pubblica il rapporto *Our Common Future* all'interno del quale la protezione dell'ambiente è ritenuta un requisito indispensabile per uno sviluppo stabile e durevole, che richiede interventi ad ogni scala e in ogni settore, introducendo così il concetto di sviluppo sostenibile.

possibilità di rigenerarsi, minimizzare in generale i consumi di energia, produrre energia ricorrendo a fonti rinnovabili.

Per rendere efficaci le politiche di sviluppo sostenibile intraprese a livello mondiale, in particolare in recepimento di quanto stabilito dal Protocollo di Kyoto, a livello europeo sono stati stabiliti gli obiettivi di risparmio energetico da perseguire tra il 2013 e il 2020. In particolare l'approvazione della Direttiva 2012/27/CE, Direttiva sull'efficienza energetica (in modifica le direttive 2009/125/CE e 2010/30/UE e abrogazione delle direttive 2004/8/CE e 2006/32/C), configura un ambizioso quadro di prescrizioni e vincoli finalizzato ad ottenere un netto cambio di marcia nel processo di efficientamento e riduzione dell'impatto ambientale con misure che investono in modo decisivo i diversi settori dell'efficienza. Ogni provvedimento in materia di risparmio energetico non può prescindere dal fatto che le costruzioni hanno un impatto considerevole. Infatti, gli effetti sull'ambiente naturale della progettazione, costruzione ed esercizio degli edifici sono considerevoli: in Europa circa il 40% del consumo di energia primaria complessiva e di circa il 36% delle emissioni totali di CO<sub>2</sub> (COM(2008) 772 final COMMUNICATION FROM THE COMMISSION Energy efficiency) sono imputabili direttamente o indirettamente agli edifici.

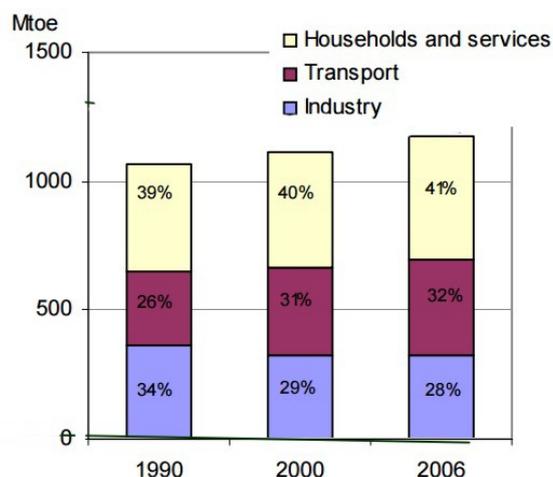


Fig. I.1: Consumo di energia primaria complessiva per settore espresso in milioni di tonnellate equivalenti di petrolio.

La constatazione del consumo di questa grande quantità di energia ha condotto alla Direttiva 2002/91/CE, “Energy Performance of Buildings” (EPBD), per il miglioramento del rendimento energetico in edilizia, integrata e aggiornata dalla Direttiva 2010/31/UE, “EPBD recast” del 19 maggio 2010, considerata il cardine per gli attuali obiettivi di efficienza energetica in edilizia. L’obiettivo generale è quello di migliorare le prestazioni energetiche degli edifici con una progettazione accurata dell’involucro edilizio e con il ricorso integrato alle fonti rinnovabili, nonché attraverso la riqualificazione energetica degli edifici esistenti. Un progetto realizzato con criteri di sostenibilità ambientale può minimizzare o eliminare del tutto gli impatti ambientali negativi e consente di ridurre i costi operativi, aumentare il valore dell’immobile nel mercato e la produttività degli utenti finali, riducendo nel contempo le potenziali

responsabilità conseguenti ai problemi relativi alla scarsa qualità dell'aria interna agli edifici.

Attualmente, quindi, i temi correlati alla sostenibilità ambientale ed al risparmio energetico, sono diventati settori di ricerca prioritaria e trasversale a tutte le aree disciplinari, così come indicato dagli enti di ricerca internazionale e come stabilito dalle normative in materia di risparmio energetico emanate dalla Commissione Europea e dal Parlamento Italiano. L'applicazione delle Direttive europee sul risparmio energetico, l'aumento dei costi energetici registrato negli ultimi anni, le elevate emissioni di CO<sub>2</sub>, hanno indotto sia la ricerca scientifica che industriale ad elaborare nuovi prodotti capaci di contenere il consumo energetico degli edifici e di limitare, conseguentemente, l'impatto ambientale degli stessi durante tutto il loro ciclo di vita. La ricerca tecnologica nel settore dei componenti dinamici e dei materiali innovativi sta sviluppando e proponendo soluzioni innovative capaci di rispondere alle esigenze di mercato, sempre più orientate verso prodotti che garantiscano molteplici prestazioni con una riduzione dei tempi e dei costi di produzione e realizzazione. La ricerca si propone di affrontare i temi delle Tecnologie costruttive e dell'Innovazione di prodotto focalizzando l'attenzione sulle tematiche legate al settore tecnologico Ambiente-Energia e Costruzione. I settori scientifico-disciplinari interessati dalla ricerca sono:  
ICAR/8- Scienza delle Costruzioni  
ICAR/10- Architettura Tecnica.

## II. Delimitazione del campo d'indagine

L'intenzione di sviluppare una ricerca sull'involucro edilizio nasce dall'esigenza di analizzare la recente evoluzione registrata nel settore della progettazione ed della produzione di elementi di facciata costituiti da layer dal funzionamento dinamico e adattabile alle variazioni delle condizioni al contorno: involucri interattivi intelligenti, a tecnologia avanzata, cioè sistemi innovativi in grado di raggiungere prestazioni elevate e adattabili alle variazioni provocate da fattori endogeni ed esogeni. Si escludono dalla trattazione considerazioni generiche relative al funzionamento termo-fisico e specialistico degli involucri a comportamento dinamico a tecnologia avanzata, intelligenti, addentrando invece nel dettaglio tecnologico e costruttivo e individuando, specificatamente, quali siano i parametri prestazionali che influenzano gli aspetti progettuali del processo edilizio. Altra delimitazione è relativa alla specifico genere di involucro definito come schermatura solare: si tratta di un sistema che "applicato all'esterno di una superficie vetrata trasparente che permette una modulazione variabile e controllata dei parametri energetici e ottico luminosi in risposta alle sollecitazioni solari"<sup>3</sup>. Il principio base del loro funzionamento consiste nell'evitare il surriscaldamento degli ambienti interni causato dalla radiazione solare diretta solamente durante il periodo estivo, senza penalizzare l'ingresso della luce naturale durante il periodo invernale. Si tratta, quindi, di un sistema di involucro a doppia pelle, la cui trattazione

---

<sup>3</sup> Decreto Legislativo 29 dicembre 2006 n. 311: *Disposizioni correttive ed integrative al decreto legislativo 19 agosto 2005, n. 192, recante attuazione della direttiva 2002/91/CE, relativa al rendimento energetico nell'edilizia*. Art. 2 - Definizioni.

viene approfondita da un punto di definizione e conoscenza maggiore rispetto alle altre tipologie di involucro.

### **III. Obiettivi della ricerca**

Riallacciandosi al filone di studi internazionali sul tema degli involucri di facciata evoluti e degli edifici intelligenti, il progetto di ricerca è stato finalizzato, attraverso l'analisi dello stato dell'arte, a individuare i criteri progettuali e gli strumenti operativi che guidano l'elaborazione e la realizzazione di involucri innovativi e avviare un'attività di sperimentazione nel settore dei sistemi di involucro intelligente, sviluppati come elementi tecnologici di facciata capaci di incrementare l'efficienza energetica degli edifici e garantire, attraverso l'integrazione tecnologica nel componente, l'uso di fonti energetiche rinnovabili (fotovoltaico e solare termico). In particolare ci si è posti come obiettivo l'individuazione di criteri di progettazione di sistemi di schermature solari in tecnologia Tensegrity, cercando di coniugare innovazione e architettura, perseguendo un design moderno e ponendo una particolare attenzione all'efficientamento delle prestazioni energetiche degli edifici. Inoltre l'utilizzo della tecnologia Tensegrity permette di controllare e gestire luce e calore garantendo un clima ottimale e conferendo un'immagine architettonica significativa unica e variabile, ottenendo sistemi di facciata leggeri e facilmente movimentabili con un bassissimo impiego di energia, per altro reperibile dai pannelli solari applicati sui moduli stessi.

#### **IV. Individuazione delle metodologie e fasi di lavoro**

Il lavoro d'indagine è stato strutturato per momenti consequenziali di approfondimento. Nella fase istruttoria è stato analizzato lo stato dell'arte attraverso l'acquisizione diretta e indiretta delle informazioni relative agli involucri dinamici e intelligenti e alle tecnologie Tensegrity elaborando criteri guida alla progettazione di schermi solari. E' stato, inoltre, indispensabile condurre una ricerca bibliografica che permettesse di individuare la letteratura scientifica esistente sugli involucri e le strutture Tensegrity. L'analisi dello stato di fatto è stata sviluppata attraverso la conoscenza dei manufatti architettonici realizzati con schermature solari intelligenti, in modo da registrare le innovazioni tecnologiche del componente e di valutarne la sua reale rispondenza alle richieste dell'utenza. Il reperimento di informazioni e documenti è avvenuto anche attraverso la partecipazione a seminari o convegni dedicati all'argomento, al fine di identificare in tempo reale le novità e i contributi rilevabili all'interno del settore scientifico d'indagine.

Ogni fase di lavoro è stata caratterizzata dalla definizione di una metodologia di ricerca precisa e sono state organizzate come segue:

1. Analisi del quadro di riferimento relativo allo stato dell'arte nell'ambito dei sistemi di involucro dinamici ed intelligenti, in particolare delle schermature solari adattive. Strumenti operativi: raccolta dei dati e delle informazioni inerenti le principali linee di ricerca e alle esperienze maturate nel settore dei sistemi di facciata innovativi, analisi e valutazione della letteratura tecnica esistente,

dei manuali tecnici, raccolta di informazioni dai siti web specializzati nel settore d'interesse.

2. Analisi del quadro di riferimento relativo allo stato dell'arte nell'ambito dei sistemi Tensegrity. Strumenti operativi: raccolta dei dati e delle informazioni inerenti alle principali linee ricerca e alle esperienze maturate nel settore dei sistemi Tensegrity.
3. Sviluppo del *concept* di due componenti di facciata innovativi. Strumenti operativi: redazione di un modello meta-progettuale e valutazione delle esigenze prestazionali del componente sviluppato; utilizzo di software di modellazione matematica e di rappresentazione grafica.

Il presente lavoro propone una metodologia che preveda lo sviluppo di un processo di progettazione e costruzione di un nuovo componente di schermatura solare in *tensegrity*.

Le premesse metodologiche della tesi saranno presentate nel capitolo 1, assieme ad un breve *exursus* sull'evoluzione storica della funzione dell'involucro e le sue ultime declinazioni tecnologiche, le istanze della progettazione di una schermatura solare e i fondamenti della tecnologia *tensegrity*.

Nel capitolo 3 saranno presentati gli apparati e le categorie operative utili all'elaborazione dell'approccio progettuale innovativo. Il *concept* e lo sviluppo progettuale delle due schermature solari proposte sono trattati nel capitolo 3. Le conclusioni e le future linee di sviluppo del presente studio per l'applicazione delle architetture *tensegrity* alla progettazione di facciate per edifici energeticamente efficienti di nuova generazione sono presentate nel capitolo 4.

## CAPITOLO 1

### ANALISI DELLO STATO DELL'ARTE

#### 1.1 *Premesse metodologiche*

Il problema scientifico è stato affrontato valutandone i suoi diversi aspetti (energetico, prestazionale, tipologico, progettuale, costruttivo economico, ambientale) e approfondendo opportunamente ciascun ambito in base alla linea, gli obiettivi e le finalità della ricerca.

Il progetto di qualsiasi cosa, sia essa un oggetto o un filone di ricerca, nasce da un'esigenza: le automobili servono per trasportare le persone, gli edifici per riparare l'uomo dalle intemperie, la ricerca in ambito medico per scoprire una cura ad una determinata malattia. È la necessità, dunque, che spinge l'uomo a superare i limiti delle proprie capacità e a trovare soluzioni che permettano di soddisfare praticamente i propri bisogni<sup>1</sup>. Il processo progettuale muove, quindi, da un bisogno e si sviluppa in fasi sempre più articolate che producono risultati via via più complessi.

Nella presente ricerca ci si è interrogati su quale sia la connessione tra Architettura e Sostenibilità Ambientale: il prodotto architettonico deriva, infatti, strettamente dall'evoluzione tecnologica volta all'adeguamento alle

---

<sup>1</sup> “Una buona soluzione in architettura esprime sempre con evidenza il problema da cui muove. Il suo problema, la sua ragione di essere.” - Arch. Giorgio Grassi

caratteristiche ambientali per la realizzazione di oggetti in grado di rispondere alla crescente richiesta di comfort introducendo differenziazioni significative tra i diversi contesti ambientali.

La tecnica e l'approccio progettuale si sono costantemente evoluti e nel tempo l'iter compositivo si è raffinato ed ampliato, arricchendosi di una complessità interdisciplinare prima sconosciuta: oggi l'auto è progettata non solo per trasportare le persone, ma per garantirne l'incolumità e il confort durante il trasporto, senza trascurare l'aspetto funzionale-estetico dell'oggetto automobile.

I nuovi scenari che si aprono in ambito tecnologico sono finalizzati al risparmio energetico ottenuto mediante il controllo dinamico dei fattori ambientali e dei flussi termici e luminosi, governati da un complesso sistema impiantistico capace di garantire condizioni di comfort interno al variare delle condizioni ambientali prevalentemente attraverso l'impiego di sistemi dinamici di controllo e gestione delle condizioni microclimatiche interne. In quest'ottica di rinnovamento della pratica costruttiva, risulta comunque necessario procedere con un impiego consapevole dell'innovazione tecnologica, i cui prodotti vengano integrati nel processo progettuale per armonizzare aspetti formali e tecnologici in un unico insieme.

È tramite una visione unitaria e complessiva che si può rendere compatibile l'ambiente antropizzato con i sistemi naturali e l'Architettura deve costituire l'anello di congiunzione tra natura e tecnologia in grado di promuovere l'uso intelligente delle energie naturali disponibili con i sistemi tecnici più avanzati. È attraverso una rilettura del costruito per mezzo del filtro dell'analisi energetico ambientale che si cercherà di

comprendere la validità e l'applicabilità delle tecnologie edilizie che possono essere applicate come soluzioni di involucro, ai fini del raggiungimento di soluzioni effettivamente caratterizzate dal risparmio energetico e dalla riduzione dell'impatto ambientale. Sono già numerosi gli edifici contemporanei progettati e realizzati, soprattutto a livello internazionale, con sistemi che integrano formalismo architettonico e soluzioni tecnologiche innovative di tipo dinamico, finalizzati all'ottenimento di effetti positivi, sia per quanto riguarda la qualità energetica, sia per la qualità architettonica. Molti edifici progettati su queste basi rappresentano punti di riferimento da analizzare e valutare al fine di procedere verso un rinnovato modo di intendere l'organismo architettonico, caratterizzato da una forte attenzione per l'ambiente, il contesto e l'innovazione tecnologica.

Oggi ci si trova a dover affrontare il tema della sostenibilità dei costi energetici in un contesto nel quale la quasi totalità del costruito necessita, in maniera più o meno estesa, di un radicale adeguamento formale, funzionale, tecnologico ed energetico. Il degrado delle facciate, l'assenza di isolamento termico ed acustico, la presenza di ponti termici in corrispondenza dei nodi tra chiusura verticale e partizione orizzontale, sono le principali cause di inefficienza delle costruzioni che potrebbero vanificare i risultati ottenibili con le nuove costruzioni a seguito dell'applicazione di nuovi processi e tecnologie applicate alle costruzioni. Non potrà esserci effettivo beneficio in termini di sostenibilità e di riduzione dei fabbisogni energetici, con particolare riferimento a quelli derivanti dall'impiego di combustibili fossili, se non si procederà,

parallelamente, a rendere più efficienti anche gli edifici già realizzati con tecnologie inadeguate al raggiungimento di tali scopi.

Nel presente lavoro, durante la raccolta dei casi studio, per la composizione della parte conoscitiva di base dell'argomento, si è ritenuto utile focalizzare l'attenzione su involucri con schermature solari che siano stati concepiti come soluzioni altamente performanti ed in ragione di principi adattativi alle condizioni al contorno come elemento forte e caratterizzante della ricerca progettuale, al fine di analizzare i presupposti che hanno portato a quelle specifiche scelte tecnologiche. In particolare nello studio si è approfondito l'ambito degli schermi solari dinamici in architettura, individuandone le potenzialità in relazione alla capacità di ridurre i consumi energetici dell'edificio e di aumentare il comfort (termico, luminoso, acustico, igrometrico) dello spazio confinato e ponendo l'attenzione soprattutto sulle innovazioni in relazione alla possibilità di variare configurazione geometrica e prestazione termo-igrometrica in funzione delle condizioni climatiche esterne, regolando i flussi di energia passante attraverso l'involucro e eventualmente producendo energia se correttamente integrati nello stesso.

Questo momento di indagine analitica ha portato alla stesura di una raccolta di esempi virtuosi di sistemi di schermature solari intelligenti; per le quali sono state evidenziate le innovazioni di processo legate alle soluzioni di configurazione del sistema, ai sistemi di controllo e regolazione degli strati che costituiscono l'involucro e alle prestazioni energetiche, in termini di trasmittanza termica e controllo della radiazione solare incidente.

Successivamente, nell'ambito del processo progettuale, si è elaborato un ventaglio di proposte tra le quali è stata scelta la più conveniente sotto diversi punti di vista. Infine le proposte progettuali scelte, sono state approfondite ed elaborate al grado di raffinatezza giudicato appropriato allo scopo perseguito. Questo momento di indagine è stato caratterizzato dalla definizione di un *concept* di schermatura solare intelligente che potesse diventare un esempio concreto della possibilità di migliorare le prestazioni delle facciate di progetto ed esistenti soprattutto in area mediterranea, caratterizzata dalla necessità di regolare la componente termica dell'irraggiamento solare nei mesi estivi e di garantire buone prestazioni di resistenza termica nelle stagioni più fredde, quando i fenomeni indotti come l'effetto serra, possono contribuire a ridurre, ed in taluni casi annullare, la necessità di ricorrere a sistemi di riscaldamento meccanico. Il progetto è, quindi, lo strumento pratico che attraverso l'analisi delle esigenze e dei problemi, elabora, in diversi gradi di accuratezza, soluzioni applicabili e sostenibili, cioè immediatamente fattibili e fruibili. Per la realizzazione di schermi solari innovativi si è pensato di adottare il paradigma progettuale *tensegrity*: Nonostante la semplicità dei componenti, elementi compressi in un continuum teso, le *tensegrity* possono essere assemblate in diverse configurazioni di stabilità. Infatti, variando la tensione nel cavo, con l'installazione di martinetti idraulici (attuatori), è possibile modificare facilmente la forma dell'elemento di base e quindi variare l'intera struttura rendendola intelligente, cioè in grado di reagire ai cambiamenti del contesto. I punti di forza di queste strutture sono la leggerezza, la possibilità di ottenere forme architettoniche complesse che prefigurano nuovi scenari architettonici.

## 1.2 L'evoluzione storica delle tecnologie di involucro

Il termine involucro è stato introdotto nell'ambito dell'edilizia abbastanza recentemente e racchiude in se stesso il concetto di globalità.

Il termine *involucro* indica tutto ciò che avvolge esternamente qualcosa, definendo quindi un sistema complesso che spesso diventa uno spessore-filtro ben leggibile in sezione. Questo spazio di transizione, soglia tra interno ed esterno, è del tutto indipendente dal contenuto dell'edificio: nella maggior parte dei casi rappresenta se stesso. Si può pertanto definire l'involucro come un sistema di chiusura integrale dell'edificio: sistema in quanto costituito da diversi elementi tecnici strettamente interdipendenti, e chiusura integrale grazie alla continuità degli elementi che lo compongono.



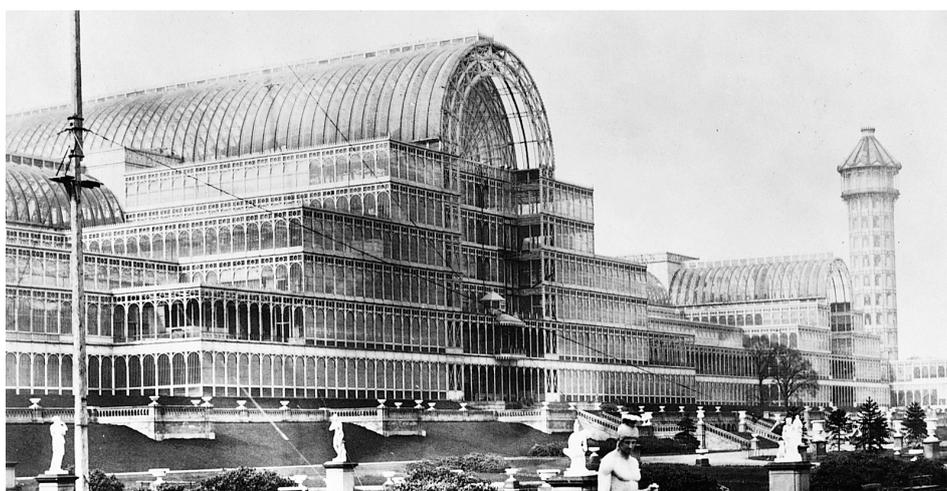
**Fig. 1.1** Il Reichstag a Berlino impacchettato dall'artista Christo, nel giugno del 1995

L'involucro architettonico da elemento prevalentemente di barriera si è evoluto in un complesso sistema-filtro selettivo e polivalente. L'evoluzione è avvenuta nel senso della trasformazione delle strutture massive e pesanti in sistemi più leggeri e sottili atti ad emancipare le funzioni dell'involucro da quelle dell'edificio.

Attraverso le diverse epoche gli involucri, costruiti in primo luogo per soddisfare esigenze funzionali, hanno mutato forma e sostanza, in senso fisico e metafisico.



**Fig. 1.2** Michelozzo, Palazzo Medici Riccardi, Firenze, XV sec.



**Fig. 1.3** Joseph Paxton, Crystall Palace, Londra, 1851

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

Grazie all'introduzione di nuovi materiali da costruzione, l'architettura ha potuto liberarsi dalla pressione della muratura portante, in cui forma e struttura si corrispondevano tettonicamente<sup>2</sup>.

Il progressivo svincolarsi della pelle esterna dalle funzioni portanti ha avuto come inevitabile conseguenza la scissione tra involucro e struttura. Gli involucri si sono progressivamente smaterializzati fino all'affermazione del curtain wall, la cui leggerezza e versatilità lo hanno reso la soluzione progettuale più usata ed abusata in architettura.

---

<sup>2</sup> Frampton K., *Tettonica e Architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano, 2007



**Fig. 1.4** Ludwig Mies van der Rohe, Seagram Building, New York City, 1958

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensesgrity.*

Attualmente le soluzioni tecnologiche e la scelta dei materiali si orientano verso quei sistemi tecnologici che riescono a governare gli scambi termici e luminosi, garantendo al contempo i requisiti estetici dettati dai nuovi linguaggi architettonici<sup>3</sup>. Un passo in avanti nella progettazione dell'involucro è stato compiuto con la realizzazione di facciate in grado di adattarsi in maniera dinamica al variare delle situazioni climatiche<sup>4</sup>.

### ***1.3 L'involucro edilizio con tecnologie avanzate***

Il modello architettonico proposto dal movimento moderno, riconoscibile per l'inconsistenza materica dei suoi confini fisici comincia a manifestare le sue carenze in termini di efficienza energetica negli anni settanta, in corrispondenza della prima crisi energetica, quando i sistemi impiantistici di condizionamento, a causa della mancanza delle fonti energetiche fossili, non riescono a garantire le prestazioni termiche degli spazi confinati. È proprio in questi anni che si diffonde una nuova coscienza ecologista anche nell'ambito della cultura architettonica, promuovendo nuovi modelli dell'abitare che puntano a riproporre, in chiave contemporanea, soluzioni tecnologiche del passato, capaci di sfruttare passivamente ed attivamente le fonti energetiche naturali per soddisfare il fabbisogno energetico degli edifici. L'involucro, che dall'età industriale in poi diventa assoluto rispetto

---

<sup>3</sup>Archetti G., *Involucri evoluti e comportamento dinamico: tecnologie e modelli applicativi nel contesto geografico, normativo e imprenditoriale della Regione Emilia Romagna*, Università degli Studi di Ferrara, 2009

<sup>4</sup>Baldinelli G., "Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system", *Building and Environment*, 44, pp. 1107-1118, 2009

alle caratteristiche climatiche locali, ritorna a strutturarsi come sistema complesso, in grado di agire ed interagire rispetto all'ambiente circostante, mediando in modo attivo il rapporto tra uomo ed ambiente. I sistemi meccanici di controllo legati all'involucro di facciata sono potenziati ed automatizzati, garantendo la possibilità di esercitare un controllo ambientale flessibile al variare sia delle condizioni dell'ambiente esterno, sia delle esigenze dell'utenza interna. Da struttura bidimensionale, l'involucro diventa un sistema tridimensionale, assumendo la qualità di uno spazio; doppio, triplo, a molteplice polivalenza, capace di sviluppare proprietà innovative di spazio cuscinetto e di filtro altamente dinamico e selettivo.

Di recente la ricerca tecnologica sta indagando nuove frontiere di sperimentazione capaci di ribadire la qualità osmotica di un processo di scambio che riguarda i flussi di energia passati e scambiati proprio attraverso l'involucro<sup>5</sup>. In tal senso l'evoluzione e la diffusione dei sistemi di controllo informatico (dalla domotica ai Building Management System) hanno permesso di trasferire alla scala dell'edificio le potenzialità dei sistemi dotati di intelligenza artificiale, permettendo una regolazione dello spazio anche in assenza dell'utente umano ed in stretta relazione con tutta una serie di necessità che garantiscono di ottimizzare dal punto di vista funzionale e fisico lo spazio costruito. Le architetture adattive sono quindi l'ultima frontiera della ricerca architettonica contemporanea e sono sempre più connesse alla volontà di proporre nuovi modelli d'involucro

---

<sup>5</sup> Altomonte S., L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile, prefazione di Giorgio Peguiron, Editrice Alinea, Firenze 2004

dinamico che contribuiscano alla riduzione del fabbisogno energetico dell'edificio, rendendolo strettamente dipendente dalle condizioni climatico-ambientali esterne, e sviluppando quindi tutte quelle componenti che ne incrementino la capacità di variare conformazione in relazione alla necessità di regolare i flussi di energia termica, luminosa, sonora passanti attraverso di esso.

Le prestazioni dell'involucro devono garantire il comfort termico e igrometrico degli spazi confinati e il contenimento dei consumi energetici mediante il soddisfacimento dei seguenti requisiti prestazionali:

– Requisiti ambientali:

1. Mantenimento della temperatura dell'aria negli spazi abitativi nelle stagioni di esercizio degli impianti di riscaldamento entro i limiti di legge di 20 – 22 °C ;
2. Mantenimento delle condizioni di comfort termico negli ambienti interni nel periodo estivo.

– Requisiti tecnologici:

1. Controllo dei fenomeni di condensa superficiale e interstiziale;
2. Controllo della combinazione Temperatura-Umidità-Ventilazione;
3. Resistenza termica e inerzia termica ai fini del risparmio energetico e del comfort ambientale interno.

L'ideazione, la progettazione e la realizzazione di un involucro architettonico dinamico comportano una complessità direttamente proporzionale alle prestazioni richieste ed alle variabili presenti in ogni intervento. Per questo motivo è importante definire a priori le

caratteristiche principali dell'involucro e giungere, attraverso queste, ad organizzare un sistema di priorità nella fase della sua progettazione e realizzazione. Un edificio tradizionale è capace di rispondere alle sollecitazioni esterne soltanto attraverso la sua componente massiva e la sua configurazione costruttiva, mentre risulta essere incapace di rapportarsi ad un ambiente in continua variabilità. Al contrario, un edificio intelligente deve possedere la capacità di conoscere ciò che accade al suo interno e nel suo immediato intorno, decidere il modo in cui intervenire per rendere confortevole gli ambienti confinati e rispondere velocemente al mutare delle esigenze e delle condizioni climatiche.

Gli involucri sono, tra le componenti architettoniche, quelle che possiedono una maggior interdipendenza con i sistemi meccanici di controllo e negli ultimi anni si sono trasformati da sistemi passivi, capaci di utilizzare gli agenti naturali esterni e le fonti di energia rinnovabili, in:

- Sistemi attivi, che riescono ad integrarsi con gli impianti grazie a captatori solari, pannelli fotovoltaici, vetri a prestazioni elevate ecc.;
- In sistemi ibridi, dinamici e polivalenti, capaci di prestazioni sia attive che passive.

L'involucro passivo, strettamente legato alle caratteristiche dell'ambiente esterno, garantisce di: massimizzare il guadagno solare diretto perché dotato di estese superfici vetrate ad elevato isolamento termico e attrezzate con sistemi schermanti per il controllo dell'abbagliamento e per la protezione solare nel periodo estivo; accumulare l'energia solare anche quando essa non penetra direttamente nell'ambiente, grazie all'adozione di tecnologie quali il muro Trombe, o i collettori solari ad aria ed acqua; avere

spazi cuscinetto tra i sistemi di chiusura trasparente e opaca al fine di incrementare la protezione dal freddo e sfruttare l'energia solare nel periodo invernale; ridurre l'apporto di calore durante i mesi estivi attraverso la presenza di schermature solari artificiali e/o naturali; incrementare l'illuminazione naturale attraverso un adeguato dimensionamento delle aperture trasparenti; favorire la ventilazione naturale diminuendo i consumi energetici per la climatizzazione estiva; integrare soluzioni per l'adozione di sistemi per il *passive cooling* che garantiscono nei mesi estivi una riduzione del carico termico interno attraverso la ventilazione notturna degli ambienti.

L'involucro attivo, è invece caratterizzato dalla presenza di sistemi impiantistici per la captazione dell'energia solare e la ventilazione naturale e artificiale. Sono esempi di involucri attivi le facciate dotate di collettori solari ad aria o ad acqua e di pannelli fotovoltaici; ma, in qualche modo, anche le facciate a doppia pelle o i sistemi d'involucro dotati di recuperatori di calore, che permettono di ridurre il fabbisogno energetico dell'edificio mantenendo le condizioni a contorno ad una temperatura costante. Certamente l'involucro attivo risulta più efficiente in termini energetici e più controllabile in termini funzionali rispetto a quello passivo: i componenti impiantistici per la captazione dell'energia solare e per la distribuzione e l'accumulo dell'energia trasformata hanno, infatti, prestazioni testate ed i flussi d'aria movimentati da elettroventilatori trasportano quantità di calore ben definite in relazione alle differenze di temperatura in gioco. Non si può negare che la modularità dimensionale tipica dei componenti impiantistici vincola non poco le opportunità di espressione architettonica e crea problemi di accoppiamento fra il disegno

della facciata ed i caratteri distributivi e morfologici degli ambienti interni. L'involucro ibrido, è caratterizzato dalla complementarietà delle tecnologie impiantistiche ed edilizie e dalla presenza di sistemi di regolazione e controllo che lo rendono una componente fondamentale all'interno del complesso sistema edificio-impianto. In generale questi tipi di involucro sono contraddistinti dalla presenza di uno o più dei seguenti sistemi tecnologici:

- Materiali e sistemi innovativi ad alte prestazioni per la captazione e l'accumulo dell'energia solare;
- Dispositivi per gestire la ventilazione naturale in combinazione con sistemi di ventilazione meccanica;
- Schermi mobili per il controllo dell'irraggiamento solare;
- Presenza di soluzioni tecnologiche atte ad incrementare la penetrazione della luce naturale e modularne l'intensità;
- Sistemi di *building automation* per la gestione integrata degli impianti e degli elementi che costituiscono la pelle dell'edificio.

L'involucro ibrido garantisce diverse prestazioni in termini termigrometrici e funzionali, prestazioni che in passato erano affidate ad apparati tecnologici di differente natura; inoltre può essere definito dinamico, perché in grado di modificare le sue prestazioni termigrometriche nel tempo, in relazione alle circostanze climatiche ed alle esigenze dell'utenza.

In generale gli involucri ibridi presentano, rispetto ai sistemi di involucro tradizionale, costi di costruzione e di manutenzione superiori, a causa dei materiali impiegati, dell'entità dei pezzi speciali, della complessità di gestione dei componenti e della loro reciproca collocazione. Si tratta di

sistemi tecnologici che tuttavia contribuiscono efficacemente al bilancio energetico dell'edificio, limitando la necessità di ricorrere a dispositivi elettromeccanici di climatizzazione invernale ed estiva, con una conseguente riduzione dei consumi energetici. Nell'ultimo decennio si sono diffuse con successo a scala globale, anche nuove ricerche sull'architettura cinetica, in cui all'involucro è data la possibilità di trasformarsi muovendosi nello spazio e permettendo all'edificio di assumere conformazioni diverse nel tempo. Lo sviluppo tecnico dalla meccanica attraverso l'elettronica fino alla connessione digitale di unità decentralizzate si basa su una tradizionale funzionalità che attualmente sta conducendo al concetto di elementi edili mobili. I cambiamenti a lungo termine vengono realizzati tramite conversioni irreversibili e singolari nell'ambito di una struttura utilizzabile di massima flessibilità, mentre adattamenti a breve termine reversibili sono considerati tramite soluzioni meccaniche. Una persiana di notte deve potersi chiudere per incrementare la sicurezza della finestra e limitare le dispersioni termiche. Il movimento è sempre connesso con un elevato impegno: da un lato, l'energia impiegata per movimentare la parte, dall'altro lato, sono richieste soluzioni tecnologiche complesse per rendere questa sequenza di movimento elegante, durevole, sicura e reversibile. È possibile quindi progettare involucri caratterizzati da dispositivi che permettono di regolarne l'apertura e la chiusura o le dimensioni spaziali, attraverso apparati che ne calibrano le superfici in larghezza e lunghezza. L'obiettivo è il guadagno energetico o per lo meno la riduzione del fabbisogno di energia o di materiali ai minimi termini. La particolare attrattiva degli elementi mobili di facciata si realizza tramite una riproduzione seriale degli elementi. In altri termini, dal movimento di una

singola persiana è possibile creare alla fine un'immagine ricca di mutamenti e modulata che attraverso diversi stati di posizione di ogni singolo elemento di facciata si modifica nel corso della giornata.

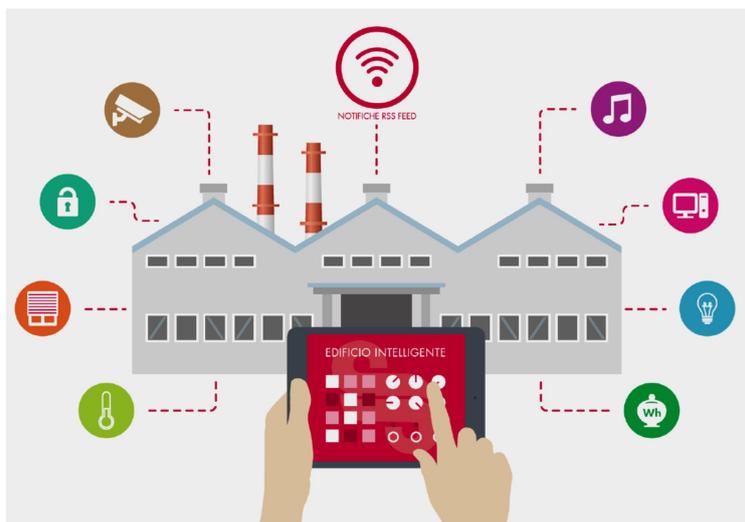
La pelle intelligente dell'edificio garantisce:

- Protezione dalle intemperie, pioggia, vento e temperature esterne.
- La possibilità di regolare la radiazione solare.
- La possibilità di gestire il passaggio di energia termica.
- Un adeguato isolamento acustico.
- Il controllo dell'edificio aumentandone il grado di sicurezza.

L'evoluzione tecnologica che ha portato alla definizione di un nuovo concetto di involucro, non più statico e passivo, ma adattivo e complesso, ha permesso di indagare e comprendere i vantaggi dell'integrazione di sistemi di automazione a scala architettonica che interagiscono e regolano sia il sistema impiantistico, sia la conformazione estetico-architettonica dell'involucro, con l'obiettivo di ridurre il fabbisogno energetico. Il cervello di un edificio è il sistema di automazione ad esso associato, e nel dettaglio il computer e il programma informatico che ne regola la gestione. Continuando l'analogia con il corpo umano un sistema di automazione può essere paragonato all'ipotalamo organico.

I vantaggi dell'adozione di involucri variabili nel tempo in modo autonomo rispetto alla gestione dell'utenza sono giustificati dal fatto che spesso questi sistemi sono adottati in edifici in cui non è garantita la continuità della presenza dell'utenza, come ad esempio nel caso di edifici per uffici. Dei termostati esterni collegati, ad esempio al sistema impiantistico, permettono di regolare la conformazione delle aperture esterne e del sistema di climatizzazione indipendentemente dalla presenza dell'utenza.

Il concetto di edificio intelligente è, quindi, strettamente correlato a quello di facciata intelligente, poiché è proprio la facciata l'elemento principale che è capace di cambiare configurazione garantendo le performance richieste, enfatizzando la somiglianza tra la facciata e la pelle umana. Questi sistemi di involucro complessi e multi-layer sono sempre caratterizzati dalla possibilità di essere controllati manualmente e in modo automatico, così da gestire in modo efficiente i flussi di energia passanti attraverso di essa. Naturalmente sono i sistemi automatici che garantiscono la completa autonomia del sistema che cambia conformazione in relazione agli input esterni-interni. L'involucro diventa così una vero e proprio sistema organico collegato al sistema centrale di controllo dell'edificio ed all'impianto di climatizzazione che può essere confrontato al sistema arterioso umano.



**Fig. 1.5** Wireless e Servizi Integrati nell' applicazione dell'IT

## **1.4 Le schermature solari**

La cultura della progettazione e della gestione degli edifici definita sostenibile, ossia generante un basso impatto sugli ecosistemi naturali-ha comportato in architettura un recupero di pratiche progettuali, rivisitate in chiave più attuale, affrontando problemi antichi con nuovi strumenti e tecnologie.

La risoluzione del problema dell'oscuramento degli edifici ha assunto rilievo proprio in ragione della necessità di ottimizzazione dell'apporto energetico in entrata e in uscita dall'edificio, prevedendo in che modo la radiazione solare possa essere adeguatamente schermata e sfruttata quando l'apporto energetico rappresenti un valore aggiunto, passivo od attivo, allo svolgimento delle diverse attività antropiche. Inoltre, la cura e il controllo dell'illuminazione naturale possono tornare utili ai fini di una più agevole fruizione e svolgimento delle funzioni quotidianamente svolte nelle strutture civili. La possibilità di schermare un edificio dalla radiazione solare è una pratica progettuale assai complessa, sia perché relativa ad aspetti intrinseci della struttura, sia perché coinvolge l'intero iter progettuale a partire dall'analisi di quale sia il contesto e le caratteristiche territoriali del luogo oggetto della modificazione progettuale. Il problema va complicandosi, poi, qualora sia necessario provvedere ad un adeguamento finalizzato al miglioramento del comfort fisico e termigrometrico di un edificio esistente: in questi casi, gli aspetti tecnologici diventano preponderanti rispetto a considerazioni di carattere ecosostenibile e pertanto la scelta è vincolata al raggiungimento di una ottimizzazione della proposta progettuale e delle azioni esecutive più

appropriate. Quando ci si confronta con la progettazione ex-novo, preliminarmente alla progettazione di un'opera di schermatura solare ed al fine di difendere adeguatamente, quando richiesto, un edificio dal surplus energetico che deriva dalla radiazione solare impattante, è necessario comprendere in che modo l'edificio stesso si collochi nel territorio e in che modo esso espone le sue superfici all'azione solare. In altre parole, nota quale sia l'ubicazione dell'edificio e definita la forma generale dello stesso, va compreso quali siano i punti critici e le condizioni al contorno delle superfici di cui appaia necessario garantire protezione dalle radiazioni solari. Non solo, ma uno studio accurato del contesto ove è situata l'opera progettuale è altresì fondamentale per comprendere in che modo l'interazione con strutture preesistenti, con elementi dell'ambiente naturale in aggiunta all'orografia del territorio interviene nella valutazione delle più efficaci scelte progettuali da attuare. È quindi evidente che, contestualmente alla più efficace conformazione geometrica di una costruzione, è necessario pensare alla gestione della penetrazione solare al suo interno. Ciò va attuato anche in relazione all'orientamento cui sono soggette le superfici esposte degli edifici. Infatti, nei confronti della collocazione globale (emisfero considerato, latitudine, ecc.) gli apporti energetici variano notevolmente e tale variazione deve influire sulla configurazione scelta per la pianta. Va anche osservato che l'inclinazione dei raggi solari è più elevata a sud e tende pertanto a colpire maggiormente le superfici ivi esposte piuttosto che quelle laterali.

Lo studio dell'esposizione delle facciate assume forte rilievo per la progettazione delle superfici trasparenti, ossia quelle porzioni di superficie dell'involucro edilizio non solo deputate alla chiusura verso il contesto

ambientale esterno, ma altresì a interazione con le attività umane che si estrinsecano in essa. Come dispositivi atti al miglioramento della fruizione della struttura da considerarsi, soprattutto nella schermatura delle superfici trasparenti dell'involucro edilizio riguarda anche il grado di agio nello svolgimento delle attività antropiche al suo interno. La schermatura solare interviene quindi nella modulazione di tale fabbisogno psico-fisico dell'utenza, evitando che si possa avere o impatto diretto della radiazione solare, comportante innalzamento delle temperature interne, o viceversa povertà di luce naturale, condizione non necessariamente negativa sul piano del soleggiamento di un ambiente ma che tuttavia richiede un apporto energetico aggiuntivo per il ricorso a fonti di illuminamento artificiali.

#### ***1.4.1 Il ruolo dei sistemi di ombreggiamento in Architettura***

È alquanto difficile definire quale sia storicamente il punto esatto in cui sia emersa la necessità di sviluppare, per la prima volta, un sistema di regolazione della luce per l'ambiente costruito. Risulta invece chiaro come, con il passare del tempo, la cultura dello schermo, del frangisole, abbia intrecciato le proprie radici con il tessuto sociale del luogo dove è andato sviluppandosi.

Il tema del frangisole è, infatti, intrinsecamente legato alle condizioni del contesto nel quale si colloca. La modulazione della luce naturale è un tema tipico di quei paesi dove la variazione del gradiente solare è più accentuata. È sin dall'antichità che si aveva coscienza del legame tra protezione dai raggi solari e benessere abitativo. Sia le abitazioni tradizionali si

conformavano e prevedevano accorgimenti contro i raggi del sole, che opere più sofisticate e di pregio coglievano i vantaggi di un'adeguata protezione solare. Gli stessi porticati, tipici della tradizione ellenica, se da un lato avevano il pregio di proteggere dagli agenti atmosferici, erano adeguatamente profondi da garantire un passeggio protetto e in ombra anche durante i periodi più caldi dell'anno, senza che quindi venissero inficiate le attività pubbliche. Anche la tradizione romana ha lasciato esempi singolari in cui si poneva attenzione al problema del sole, come il *Velarium*, sistema di tendaggi intirantati usato per proteggere gli astanti nei teatri ed anfiteatri romani. La stessa età medievale ha lasciato il segno in merito alla protezione dai raggi del sole. Se, infatti, il Medioevo ha segnato l'Europa anche per quel che concerne la costruzione razionale delle città e delle abitazioni, una notevole cura invece caratterizzava la perizia costruttiva di altre civiltà, quali l'Islam e quella nipponica rispettivamente nel Medio e nell'Estremo oriente. Seppur in modalità differenti, queste civiltà hanno riposto notevole cura nella edificazione di edifici quanto più possibile confortevoli e che contrastassero agenti atmosferici e irraggiamento solare. La necessità di riparare gli ambienti interni dalla forte radiazione nelle ore diurne ha permesso alla sensibilità araba di sperimentare una serie di elementi decorativi di grande pregio e raffinatezza, derivante dall'intreccio di figure geometriche semplici, a formarne di più complesse e strutturate. È il caso dei *moucharabieh* (*mashrabiya* o *claustra*), elementi frangisole che impreziosiscono molti edifici presenti in Medio Oriente e in alcune parti d'Europa, come per l'Alhambra (Granada).

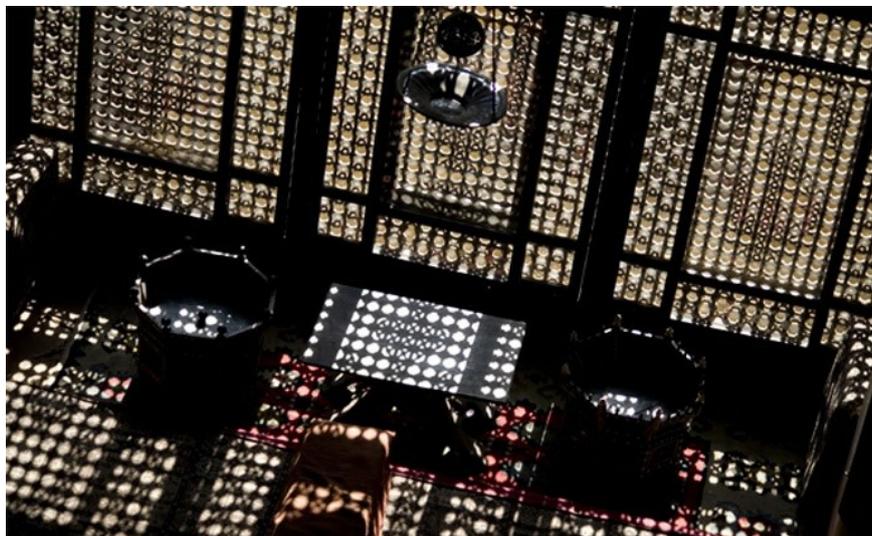
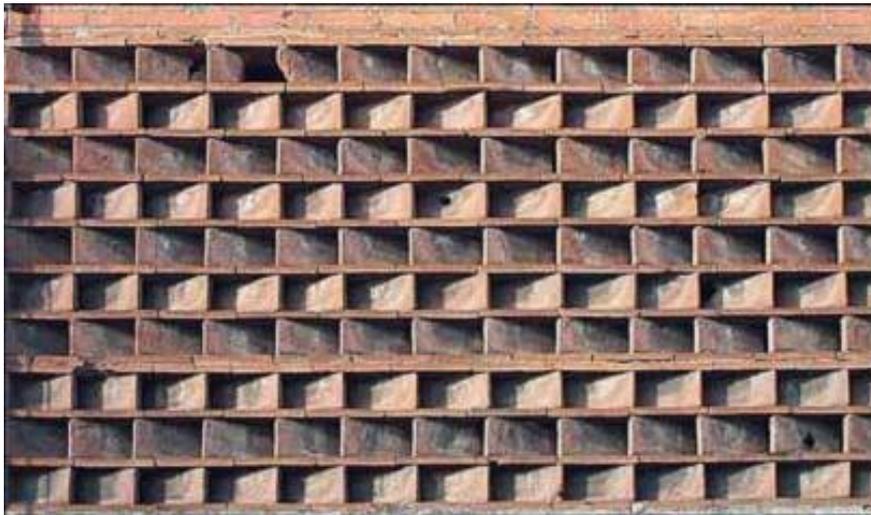


Fig. 1.6: Mashrabiya araba.

In un caso come nell'altro, le strutture lignee (chiamate gelosie) utilizzate a protezione degli ambienti dalla calura del sole nord-sahariano o di setti di carta di riso pesante intelaiata per diffondere la luce naturale evitandone il diretto impatto, possono essere considerate precursori tradizionali di elementi schermanti oggi ripresi. Si fa notare che in ambo i casi, l'uso di dispositivi così conformati, per cui si otteneva una cortina invalicabile alla visione dall'interno verso l'esterno, rendeva necessario ricorrere ad accorgimenti che permettessero, anche solo puntualmente, di oltrepassare questa cesura verso l'esterno (mediante l'interposizione di pannelli mobili o scorrevoli). L'eredità mediorientale giunse poi anche in Europa, grazie alla diffusione culturale a seguito dei traffici commerciali che rifiorirono con forza durante il basso Medioevo: è in questo periodo che tende a diffondersi, ad esempio, l'uso di doppi infissi con scuri alla veneziana,

elementi di facciata per il controllo solare entrati oramai nella prassi costruttiva italiana.

Tra i tanti esempi riscontrabili nella tradizione del territorio italiano, invece, vi è la tecnica che permette di realizzare il cosiddetto *mandolato di mezzane*.



**Fig. 1.7:** Mandolato di mezzane.

Questo sistema costruttivo può trovare facilmente nelle campagne toscane, ed è costituito da file di elementi in laterizio, posizionati di costa e orientati in maniera obliqua, in modo da permettere il passaggio di una minima quantità di luce, mai diretta verso il centro del locale ma sempre mediata dalle pareti laterali o dal pavimento. Un sistema costruttivo assai povero, quindi, ma in grado di rendere un luogo ospitale rispetto alla funzione per il quale è stato pensato. La tipologia presa in esempio mostra come la schermatura non rappresentasse un sistema tecnologico chiaramente distinguibile rispetto al complesso edificato: essa diventa filtro per la

radiazione solare, parete perimetrale, talvolta anche struttura portante, nel caso in cui gli elementi in laterizio siano disposti in maniera opportuna.

Durante il Rinascimento, inoltre, in Europa si diffuse l'uso di coprire l'esterno di grandi aperture con panneggi sostenuti in sommità da supporti in legno o metallo ad imitazione delle tende da campo di origine militare (la cappottina alla Olandese e la tenda alla Romana), generando anche in questo caso prototipi di quelli che sarebbero poi divenute tendaggi da esterni. Per gran parte dell'era moderna, anche assecondando il gusto europeo negli stili dedicati all'architettura monumentale, gli unici elementi di facciata utilizzati per contrastare l'irraggiamento solare furono i tendaggi interni, posti a ridosso delle aperture, i quali avevano uno scopo ornamentale almeno quanto fossero destinati alla protezione dal sole. Le sole applicazioni funzionali allo scopo erano invece le proiezioni tessili utilizzate dai locali commerciali, a protezione delle attività che ivi andavano espletandosi.

Una rinnovata attenzione al problema dell'irraggiamento solare e al suo controllo nelle costruzioni civili vi fu dai primi decenni del XX secolo, laddove una congiuntura di condizioni condusse verso nuovi approcci nel concepire l'involucro edilizio: da un lato l'evoluzione nelle conoscenze scientifiche, dall'altro il costituirsi di studi pionieristici nella pratica edilizia a seguito dei nuovi modi del costruire offerti dalle nuove tecnologie, vennero definendo un corpo di modelli a cui ispirarsi e dai quali via via andarono attingendo intere generazioni di progettisti. In tal modo, il problema dell'irraggiamento solare divenne, nella sua totalità, una componente fondante nella concezione dell'organismo architettonico.

Le ragioni di questo radicale cambio di paradigma sono da ricercarsi in vari aspetti della cultura e della società del tempo, ma soprattutto sulla comparsa di due grandi attori di quel tempo: il calcestruzzo armato e Le Corbusier. Fu, infatti, l'architetto svizzero a sostenere più di tutti l'idea di un'architettura funzionale, luminosa, libera dal peso della muratura portante e sorretta da un telaio di travi e pilastri in grado di rendere le pareti semplici elementi di tamponamento, attraversati da finestre continue che ne denunciavano ulteriormente la liberazione dal peso dell'intera costruzione. In quel periodo l'utilizzo della luce come strumento espressivo assume un ruolo fondamentale.



**Fig. 1.8:** *Solar Pavilion*, Le Corbusier - Chandigarh ,1965.



**Fig. 1.9:** *Villa Shodhan*, Le Corbusier - Ahmedabad ,1956.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

Dopo una stasi di qualche decennio, durante la quale le schermature solari hanno assunto un ruolo secondario nella definizione formale dell'involucro, un rinnovato interesse per l'ottimizzazione e la modulazione della luce solare nelle opere d'architettura, si è avuto il recupero di pratiche esecutive ed approcci progettuali che hanno reintegrato la schermatura solare nel repertorio degli elementi tecnologici indispensabili nella buona progettazione architettonica.

Le schermature solari sono ormai parte integrante di ogni opera architettonica, senza distinzioni di destinazione d'uso, a dimostrazione di come lo studio della luce per il comfort e la modulazione energetica negli edifici. Questo ritorno intensivo all'uso delle schermature solari nella progettazione è stato anche determinato da un potenziamento nelle strumentazioni informatiche a servizio dell'architettura ecosostenibile ormai a disposizione di un pubblico più ampio di specialisti del settore edile, e che hanno facilitato l'integrazione della schermatura nel processo ideativo e progettuale nel rispetto della qualità. Ad oggi, dunque, si assiste ad una quanto mai varia casistica di proposte tecnologiche, con esiti formali spesso estremamente interessanti sul piano del design. Tra l'altro, la modulazione della luce solare per una migliore fruizione degli ambienti interni di un'architettura sta estendendo il concetto stesso di schermatura solare, al punto che la tendenza della nuova progettazione architettonica è tesa alla sperimentazione, sia tecnologica che nei materiali, di proposte compositive funzionalmente e tecnicamente valide.

Parte del patrimonio, legato alla decorazione funzionale dei paesi di cultura araba, è stato tramandato all'interno dell'architettura contemporanea, dove uno degli esempi più interessanti di combinazione tra aspetti legati alla

tradizione e utilizzo di componenti high-tech si può ritrovare nell'*Istitut du Monde Arabe* (Paris, 1987), realizzato su progetto di Jean Nouvel, Pierre Soria, Gilbert Lezénés e Architecture Studio. La facciata dell'edificio principale è realizzata mediante l'accostamento di elementi modulari complessi, all'interno dei quali sono presenti degli elementi di regolazione automatica della luce, i quali funzionano come l'otturatore di una macchina fotografica, aprendosi e chiudendosi della misura necessaria a garantire l'ingresso della corretta quantità di luce all'interno. L'innovazione apportata da questa tecnologia consiste nella capacità di adattarsi automaticamente al contesto, mentre dal punto di vista espressivo è chiaramente riconoscibile il richiamo ai *mashrabiya*, citando elementi tipici della cultura islamica.



**Fig. 1.10:** *Istituto del Mondo Arabo*, Jean Nouvel - Parigi ,1987.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

Il movimento high-tech, di cui l'*Istitut du Monde Arabe* è un esempio, ha portato ad un tipo di utilizzo particolarmente avanzato degli elementi frangisole. La combinazione di sistemi meccanici in acciaio e alluminio ha permesso lo sviluppo di architetture estremamente innovative, sia sotto il punto di vista tecnico, sia sotto il punto di vista prettamente estetico, andando appunto a definire i canoni tipici dello stile in questione.



**Fig. 1.11-12:** Particolari del sistema di schermatura dinamica della facciata.

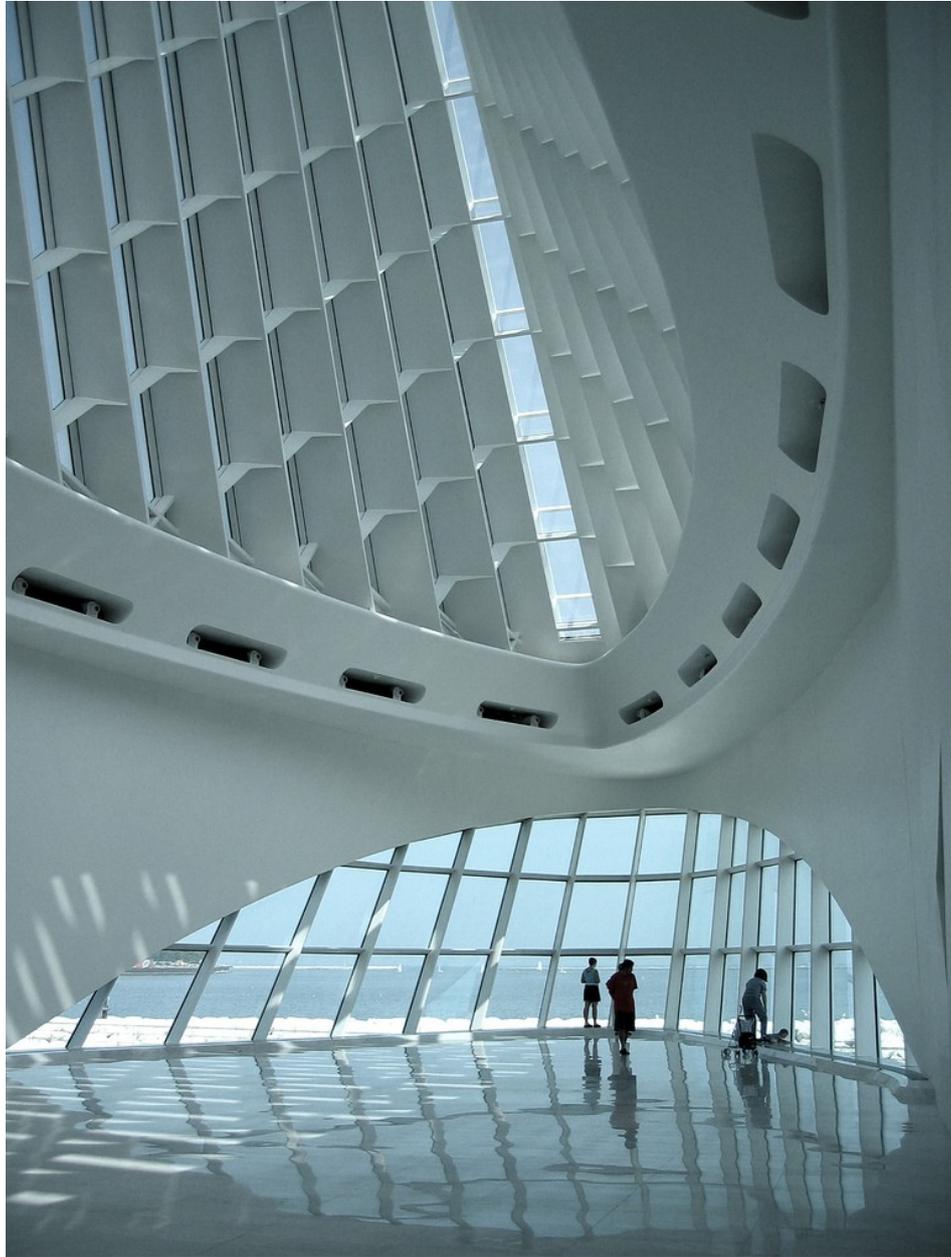
I metodi di produzione industrializzati e il basso costo del prodotto finito hanno permesso una larga diffusione di brise-soleil metallici; un esempio è il *Milwaukee Art Museum* (Milwaukee, 2001), progettato dall'architetto spagnolo Santiago Calatrava. La schermatura per l'ingresso della luce, all'interno del *Quadracci Pavilion*, è composta da due parti: la prima, costituita da una struttura fissa in vetro, che filtra la luce all'interno del grande volume a tutta altezza, e la seconda parte, situata all'esterno, che permette una regolazione dinamica del soleggiamento, per mezzo di un sistema meccanico dall'aspetto altamente espressivo, in grado di combinare insieme funzionalità ed espressionismo.



**Fig. 1.13:** *Quadracci Pavilion* del *Milwaukee Art Museum*, Santiago Calatrava - Milwaukee, 2001.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 1.14:** Interno del *Quadracci Pavilion*.

Un altro materiale interessante, dal punto di vista della schermatura è il vetro. L'innovazione tecnologica ha portato, anche in questo settore, allo sviluppo di prodotti dalle ottime prestazioni, eventualmente integrabili con l'aggiunta di apposite pellicole protettive, sia trasparenti sia oscuranti. Tra gli esempi più recenti è la *Agbar Tower* (Barcellona, 2005) ideata da Jean Nouvel.



**Fig. 1.15:** *Agbar Tower*, Jean Nouvel - Barcellona, 2005.

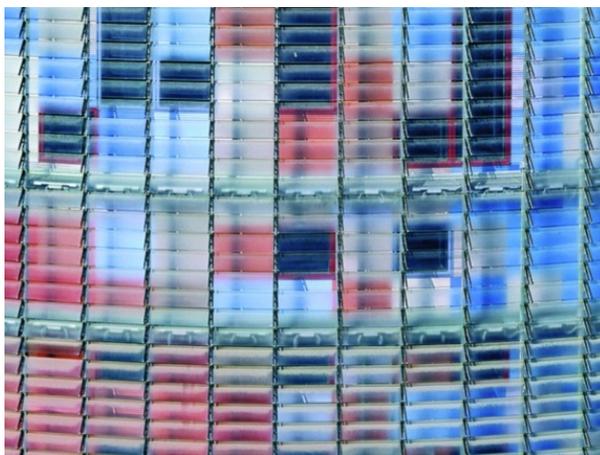
---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

Questo progetto è un esempio di edificio passivo, cioè, sfruttando le caratteristiche dell'ambiente circostante e del clima, riesce a mantenere delle condizioni ottimali interne sia in estate che in inverno.

Le 4400 finestre sono disposte in maniera da sfruttare al meglio l'esposizione solare, ma anche pensando alle differenti visuali che si colgono dall'interno dell'edificio sulla città.

La varietà di colori scelti per le lamiere di alluminio che incorniciano le finestre, valorizzano ed arricchiscono la superficie. Le finestre e le lamiere di alluminio sono completamente rivestite da una struttura di brise soleil composta complessivamente da 59619 lamelle di vetro (di dimensioni 120x32cm) trasparente e serigrafato. Queste lamelle sono orientate diversamente a seconda dell'esposizione ed quelle a sud sono dotate di celle fotovoltaiche.



**Fig. 1.16:** Particolare del sistema di brise soleil a lamelle orientate.

Le tipologie di lastre spaziano dal trasparente (viste pregevoli e cavità), allo stampato traslucido (tipologia prevalente), al serigrafato con protezione solare (cupola), sino al vetro integrato con celle fotovoltaiche per

l'ottenimento di energia elettrica. Gli elementi serigrafati, a loro volta, hanno un gradiente di variazione a seconda dell'angolo di incidenza, che varia da un oscuramento del 40% sino all'80%.

Anche il legno, nella sua naturalezza e semplicità, rappresenta un mezzo espressivo di un linguaggio d'avanguardia. È questo il caso degli *US Census Bureau Headquarters* (Suitland, 2007), complesso di uffici realizzato nello stato del Maryland (USA) su progetto di Skidmore Owings & Merrill (SOM). L'involucro edilizio, caratterizzato da superfici vetrate continue, è reso più complesso tramite una grande quantità di listelli in legno dalle forme molteplici, che rendono vibrante la pelle dell'edificio e, nel contempo, assicurano la modulazione del soleggiamento negli uffici. La scelta del legno permette di rendere più caldo e apprezzabile il trattamento di facciata, favorendo un chiaro risparmio di energia durante i processi produttivi e migliorando l'integrazione con il contesto, specie se naturale.



**Fig. 1.17:** *US Census Bureau Headquarters*, Suitland - Skidmore Owings & Merrill (SOM) New York, 2007.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 1.18:** Dettaglio brise-soleil di facciata.

Tra gli architetti italiani che maggiormente hanno affrontato il tema della schermatura nel corso della propria carriera, vi è certamente Renzo Piano. Uno dei progetti più significativi in questo senso è il *New York Times Building* (New York, 2007), che vede l'utilizzo della ceramica estrusa quale soluzione funzionale e, al tempo stesso, linguaggio espressivo. L'involucro della torre è formato, per la maggior parte, da una fitta serie di tubi realizzati appositamente. Le caratteristiche del materiale fanno sì che la radiazione solare venga riflessa verso l'esterno, filtrandola invece verso l'interno. La luce riflessa contribuisce a valorizzare i fronti, con un gradiente di colore che varia a seconda delle ore del giorno.



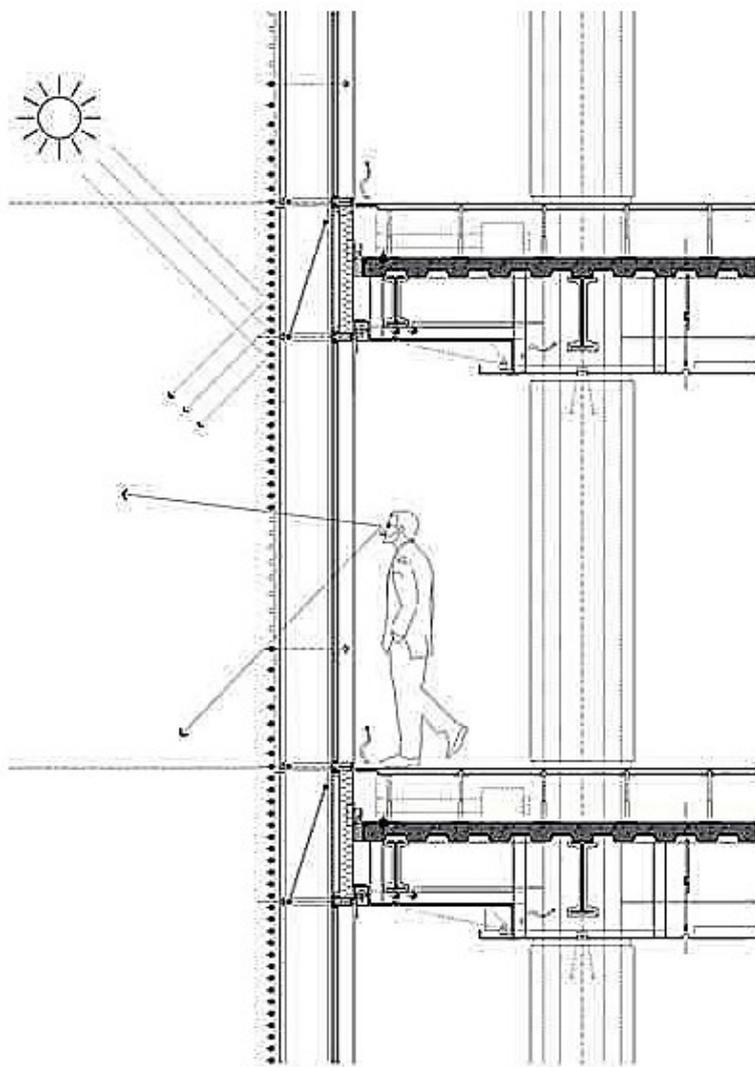
**Fig. 1.19:** *New York Times Building, New York – Renzo Piano, 2007.*

Negli ultimi decenni, oltre a valenze legate alla funzionalità e all'estetica, i componenti frangisole sono riusciti a conquistare una nicchia all'interno del mercato connesso alla sostenibilità ambientale, e in particolare allo sfruttamento delle risorse energetiche rinnovabili. Ovviamente, considerando il caso specifico, la fonte energetica più ovvia è proprio quella del sole, rispetto al quale il brise-soleil garantisce un riparo. Grazie alla

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensesgrity.*

produzione di celle solari sempre più sottili e flessibili si è potuta sviluppare un'ampia gamma di prodotti integrati per lo sfruttamento di energia pulita.



**Fig. 1.20:** Particolare della sezione sulla facciata.

Ovviamente, considerando il caso specifico, la fonte energetica più ovvia è proprio quella del sole, rispetto al quale il brise-soleil garantisce un riparo. Grazie alla produzione di celle solari sempre più sottili e flessibili si è potuta sviluppare un'ampia gamma di prodotti integrati per lo sfruttamento di energia pulita.

Oggi lo sviluppo degli elementi frangisole viene indirizzato verso sistemi capaci di adattarsi in maniera sempre più fluida alle mutazioni dell'ambiente circostante, cercando di sviluppare un sistema di interazione diretta tra le condizioni di irraggiamento e l'orientamento degli elementi frangisole, per fornire la migliore risposta in termini di prestazione. È in questa direzione che si sta muovendo la ricerca in ambito tecnologico, tesa a sviluppare sistemi sempre più adattivi, oltretutto capaci di integrare insieme la funzione protettiva insieme a quella di produzione energetica da fonti rinnovabili.

Un recentissimo e brillante esempio di applicazione di schermature solari adattive sono le *Al Bahar Towers* (Abu Dhabi, 2012) dello studio Aedas Architects.

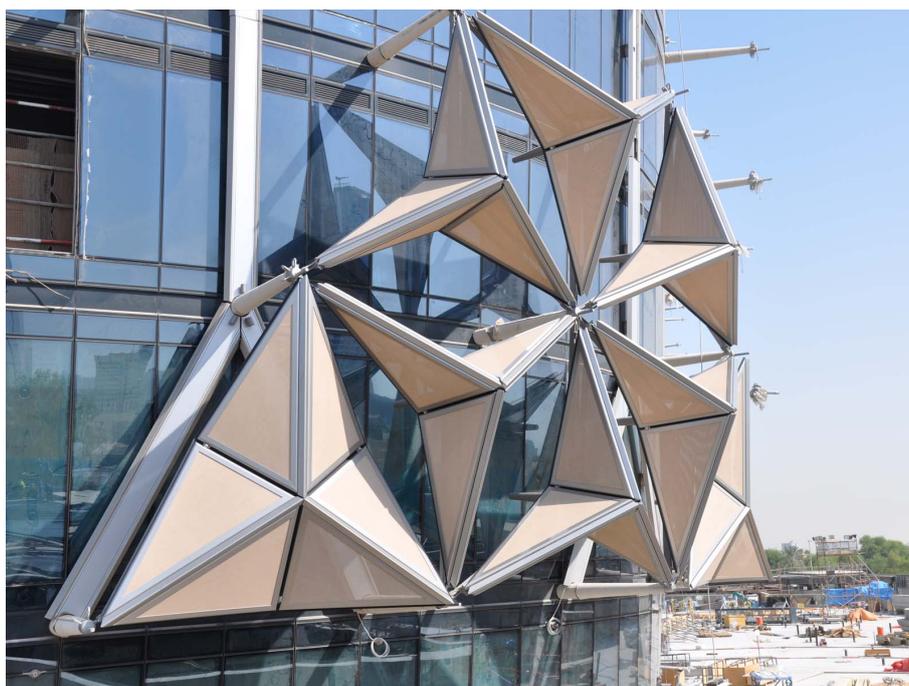


**Fig. 1.21** *Al Bahar Towers*, Abu Dhabi – Aedas Architects, 2012.

Sono costituite da una doppia pelle: un primo involucro vetrato è protetto da un secondo costituito da pannelli mobili a nido d'ape ancorati alla struttura portante tramite elementi metallici. L'apertura e la chiusura di questi dispositivi serve per controllare e regolare la quantità di luce che entra all'interno dell'edificio, evitando il surriscaldamento e garantendo una migliore illuminazione naturale, con conseguente risparmio energetico. Alle latitudini di Abu Dhabi nelle ore centrali del mese di luglio il calore raggiunge i 42°C e per l'elevata umidità relativa, in media del 70%, la sensazione termica è superiore a quella reale. L'insolazione, durando più di

11 ore, contribuisce a surriscaldare eccessivamente gli edifici - le superfici delle vetrate possono sfiorare i 100° C - e durante la notte gli edifici non riescono a dissipare naturalmente tutto il calore accumulato durante il giorno, poiché la temperatura non scende mai sotto i 18° C.

La schermatura è costituita da una maglia poligonale a sei lati agganciata alla superficie delle torri ogni due metri. Ciascun poligono supporta sei triangoli equilateri, all'interno dei quali si aprono e si chiudono sei pannelli semi-trasparenti in PTFE (politetrafluoroetilene) a forma di triangolo rettangolo.



**Fig. 1.22:** Pannelli applicati in facciata.



**Fig. 1.23:** Modulo della maglia poligonale.



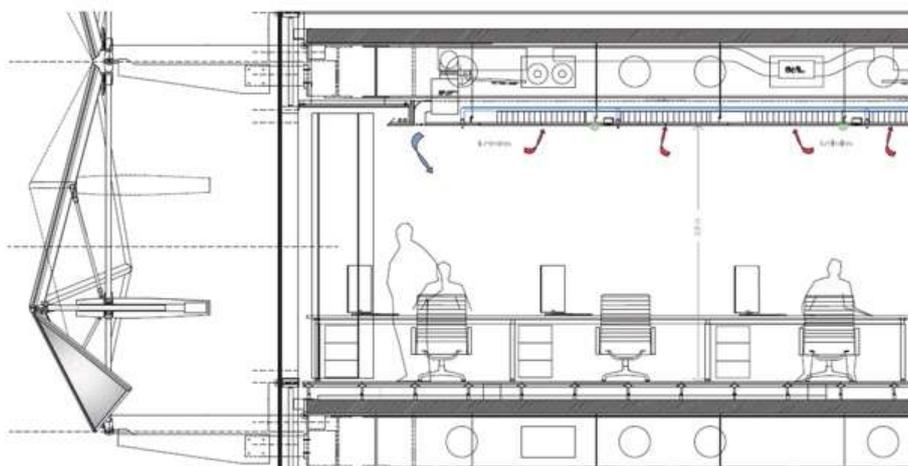
**Fig. 1.24:** Vista dal basso delle connessioni degli elementi alla sottostruttura di facciata.

Lo schermo è molto simile ad un sistema passivo di condizionamento dell'aria perché il tessuto riesce a ombreggiare, a facilitare i moti convettivi dell'aria e quindi abbassa la temperatura superficiale delle facciate. L'idea di sfruttare l'energia solare è stata scartata dai progettisti in quanto i costi, dovuti alla perdita di efficienza per la forza abrasiva della sabbia spinta dal vento e alla necessaria pulizia giornaliera con acqua nebulizzata, non

avrebbero giustificato i benefici ricavabili dalla produzione di energia rinnovabile.



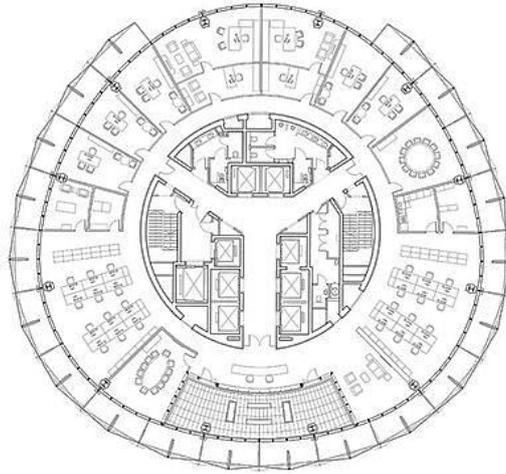
**Fig. 1.25:** Particolare della facciata protetta dagli schermi solari dinamico-adattivi.



**Fig. 1.26:** Sezione di un piano tipo.

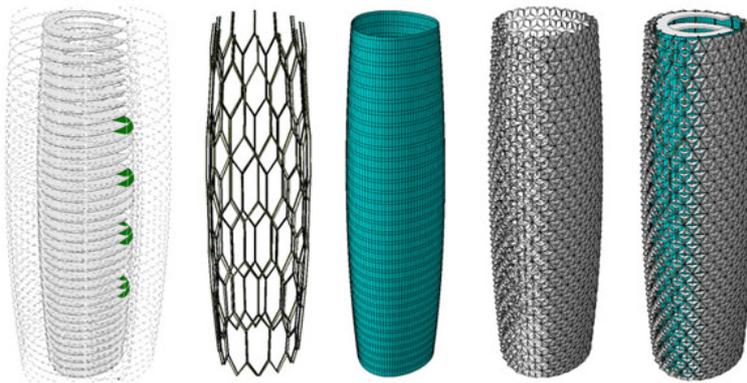
---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 1.27:** Pianta di un piano tipo.

Le torri sono state progettate secondo uno sviluppo per layer strutturali: il primo layer è composto dalla struttura portante in acciaio e dal nucleo d'irrigidimento; il secondo è una maglia tubolare esterna realizzata in acciaio che ha la funzione di controventatura di facciata e di struttura di supporto degli elementi dell'involucro; il terzo è costituito dalla facciata continua in vetro; il quarto consiste nella schermatura solare.



**Fig. 1.28:** Rappresentazione dei diversi layer strutturali delle torri.



**Fig. 1.29:** Spaccato assonometrico di un piano tipo con i diversi layer strutturali evidenziati.

Grazie all'evoluzione tecnologica che mette a disposizione nuovi sistemi di schermature solari nuovi materiali con caratteristiche ottiche di elevata qualità, l'elemento frangisole cessa di esistere come semplice componente edilizio, non è più solo accessorio ma diventa "forma" che si sovrappone alla struttura e ne costituisce l'elemento estetico prevalente: pura forma architettonica.

### ***1.4.2 I sistemi di schermature solari***

I sistemi di ombreggiamento devono fornire una buona protezione solare durante il periodo di raffrescamento, ma non dovrebbero ostacolare gli apporti solari nella stagione di riscaldamento, ridurre l'illuminazione naturale, né impedire una corretta ventilazione naturale. Se correttamente

progettati secondo la tipologia di edificio, latitudine e clima, i sistemi di schermatura possono rispondere a tutti questi requisiti, offrendo anche molte possibilità di espressione architettonica. Il ruolo delle schermature solari è, quindi, quello di migliorare il comfort termico e visivo evitando il surriscaldamento e l'abbagliamento. Gli apporti solari rappresentano un importante contributo al bilancio energetico complessivo del sistema edificio-impianto, soprattutto in presenza di estese superfici vetrate, tipiche di edifici del terziario, dove si sommano agli apporti energetici dovuti agli occupanti e alle attrezzature da ufficio presenti all'interno.

La progettazione dei sistemi di schermatura è finalizzata a limitare principalmente gli effetti della radiazione solare diretta sull'involucro opaco e, soprattutto, trasparente degli edifici. La radiazione solare incidente su una superficie può derivare da tre fonti: radiazione diretta dal Sole (radiazione ad onde corte), la radiazione diffusa dalla volta celeste e la radiazione riflessa dal suolo. Le schermature solari esterne possono bloccare la componente diretta (normalmente la più significativa) della radiazione solare, e ridurre gli effetti delle componenti diffuse e riflesse, ma possono anche influenzare il comfort visivo e la ventilazione.

Il flusso di calore di natura conduttiva che attraversa l'involucro di un edificio esposto alla radiazione solare dipende da numerosi fattori, per esempio dalle temperature delle superfici interne ed esterne dell'involucro, oltre che dalle sue proprietà intrinseche (capacità termica, trasmittanza termica). Per un edificio schermato, ma comunque esposto alla radiazione riflessa e diffusa, il carico termico di raffrescamento complessivo risulterà comunque ridotto, non concorrendo al bilancio energetico la componente diretta della radiazione solare.

Nei climi più caldi, quando le pareti opache non hanno isolamento termico, i sistemi di ombreggiamento possono essere concepiti per la totalità delle pareti verticali, opache e trasparenti per formare un involucro evoluto a comportamento dinamico di tipo traslucido su opaco o traslucido su trasparente. In climi temperati o freddi, i sistemi di ombreggiamento sono generalmente legati alle aperture e alle superfici vetrate. Gli esempi di controllo del soleggiamento attraverso sistemi di ombreggiatura non mancano: tali soluzioni offrono a volte buoni compromessi tra il recupero degli apporti solari nel periodo di riscaldamento e la protezione solare nella stagione calda. In climi temperati, la captazione dell'irraggiamento solare è generalmente privilegiata, per ridurre i bisogni di riscaldamento in inverno, sempre evitando situazioni che potrebbero causare surriscaldamento.

Tuttavia, un aspetto di cui è necessario tenere conto all'adozione di schermature solari, è che mentre il carico termico di raffrescamento sarà ridotto, la riduzione della disponibilità di luce naturale potrebbe aumentare il fabbisogno di energia per l'illuminazione. Ciò potrebbe parzialmente vanificare i benefici energetici derivanti dall'adozione delle schermature.

In sintesi, gli obiettivi di un sistema di schermature solari adeguatamente progettato possono essere riassunti in:

- limitare gli effetti della radiazione solare diretta, intercettandola in tutto o in parte, in determinati periodi dell'anno;
- controllare la radiazione diffusa e riflessa;
- evitare fenomeni di abbagliamento.

Le schermature solari possono essere classificate secondo vari criteri; generalmente vengono suddivise in esterne e interne allo spazio climatizzato, ad installazione fissa, ovvero gli elementi costituiscono parte integrante dell'involucro edilizio, o mobile. Le schermature fisse sono quasi sempre esterne, mentre le schermature mobili possono essere sia esterne che interne.

La scelta della strategia di schermatura ottimale per un edificio deve essere determinata considerando diversi fattori, come la sua architettura, destinazione d'uso, il sito, l'orientamento, le strategie di raffrescamento, di riscaldamento e di illuminazione adottate in fase di progettazione. Stabilite le prestazioni desiderate dell'elemento schermante, è possibile pervenire agli stessi risultati mediante l'impiego di diverse tipologie di schermature.

Gli elementi fissi di schermatura solare sono generalmente posti all'esterno dell'involucro edilizio, e ne costituiscono parte integrante. Di solito, non sono dispositivi applicabili dopo la realizzazione del manufatto edilizio. Tali schermature, se adeguatamente progettati, costituiscono una soluzione estremamente efficace per la schermatura dell'involucro dalla radiazione solare diretta. Non hanno la medesima efficacia nello schermare la radiazione solare riflessa e diffusa. La realizzazione di questi manufatti è in genere economica, in special modo quanto vengono gettati in opera, e spesso non necessitano di manutenzione diversa da quella necessaria agli altri elementi costitutivi dell'involucro.

L'aggetto orizzontale è, senza dubbio, il più diffuso e semplice elemento fisso di schermatura solare, adeguato per intercettare la radiazione solare con elevati angoli di incidenza. Nell'emisfero boreale viene utilizzato prevalentemente per proteggere la superfici vetrate esposte a sud, per le

quali rappresenta una ottima soluzione. Può essere convenientemente usato anche per superfici esposte a sud-est ed a sud-ovest. Correttamente dimensionato, un oggetto orizzontale posto su una superficie esposta a sud può schermare la radiazione solare diretta durante il periodo di raffrescamento, e consentirne invece il passaggio durante la stagione di riscaldamento. Per controllare al meglio la radiazione solare diretta con bassi angoli di azimut, che ha luogo di primo mattino e nel tardo pomeriggio, l'oggetto può estendersi nella sua larghezza oltre i limiti della superficie trasparente da schermare.

In termini generali, la profondità dell'oggetto si determina in funzione dell'altezza dell'elemento vetrato, della latitudine, e della distanza tra il margine superiore della finestra e l'oggetto; la larghezza dell'oggetto viene determinata in funzione della larghezza della finestra e della latitudine.

Per facciate esposte ad est e ad ovest, gli oggetti orizzontali non costituiscono una soluzione di schermatura efficace; in tal caso, risulta più indicato l'utilizzo di setti verticali.

Gli elementi fissi di schermatura solare sono generalmente posti all'esterno dell'involucro edilizio, e ne costituiscono parte integrante. Di solito, non sono dispositivi applicabili dopo la realizzazione del manufatto edilizio. Tipicamente, costituiscono elementi fissi di schermatura gli oggetti orizzontali, come ad esempio le mensole dei balconi, oppure i setti verticali o ancora la combinazione dei due.

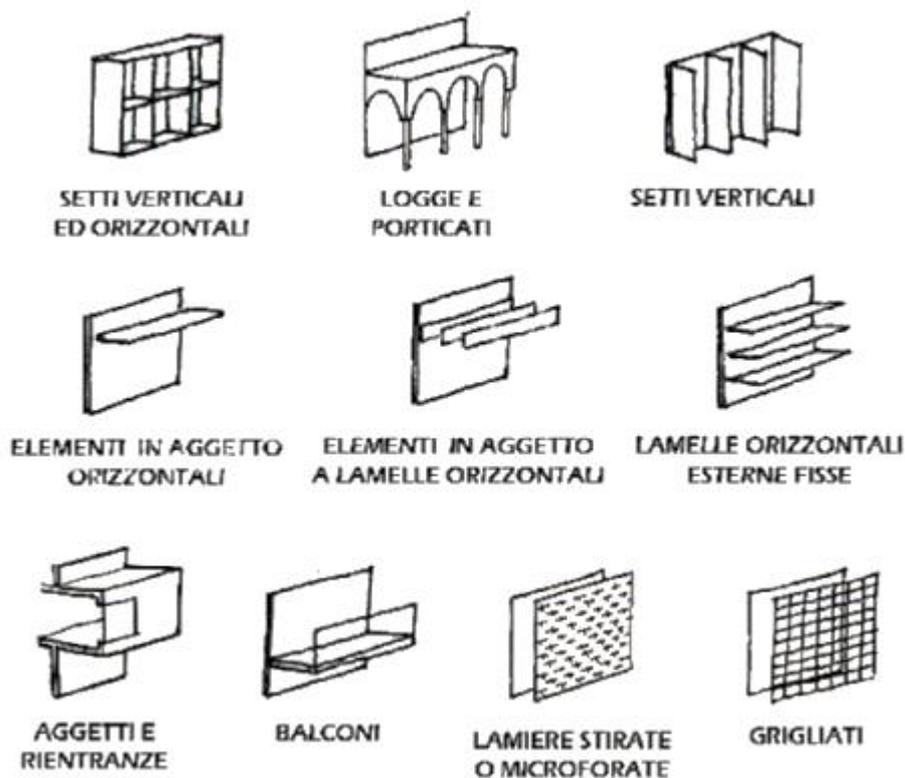


Fig. 1.30: Sistemi di ombreggiamento statici . schermature fisse

I dispositivi di schermatura solare regolabili possono essere installati internamente, esternamente, o nell'intercapedine di finestre doppie o triple. Tuttavia, nel caso più diffuso, i sistemi regolabili sono installati all'interno, dove possono essere facilmente manovrabili dagli occupanti dell'edificio. Esistono comunque dispositivi esterni manovrabili dall'interno per mezzo di meccanismi più o meno complessi. I dispositivi di schermatura regolabili, installati all'esterno, possono intercettare in maniera efficace la componente diretta della radiazione solare, prevenendo fenomeni di surriscaldamento, regolare l'accesso di luce naturale secondo

le esigenze degli occupanti, e sono particolarmente efficaci per operare in condizioni di radiazione solare proveniente da direzioni con bassi angoli rispetto all'orizzonte. A differenza dei dispositivi e degli elementi di schermatura solare fissi, i dispositivi di schermatura solare regolabili possono essere utilizzati in modo da non compromettere l'illuminazione naturale interna. La loro regolazione può essere anche automatizzata, creando sistemi che, se da un lato sono più efficienti, dall'altro sono più costosi e meno affidabili rispetto ai sistemi fissi.

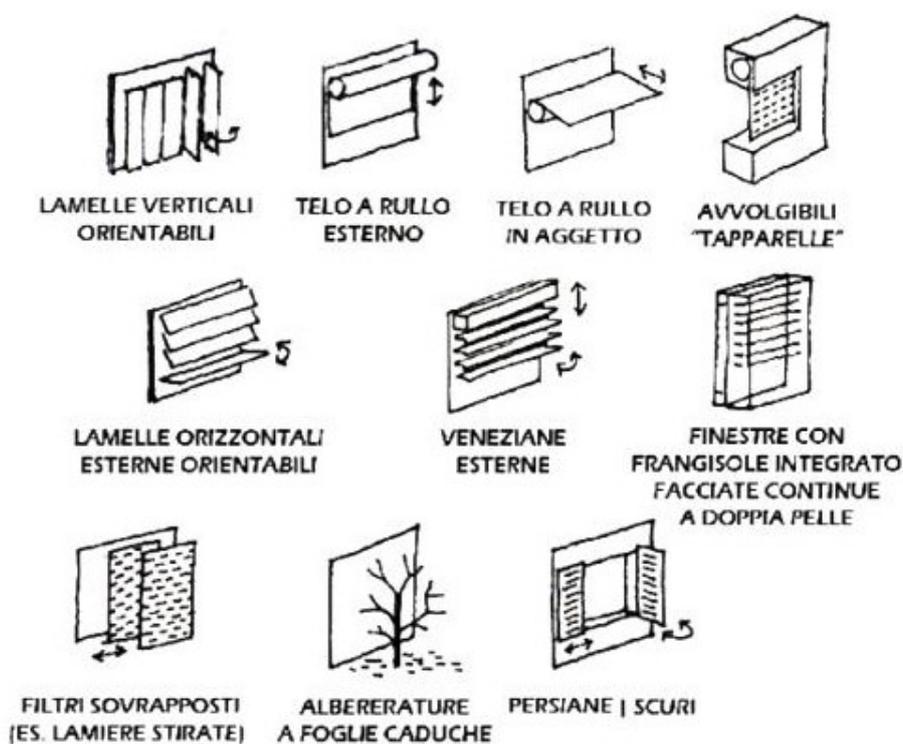


Fig. 1.31: Sistemi di ombreggiamento dinamici – schermature mobili

Dei vari tipi di schermature, quelli esterni sono i più efficaci nel ridurre gli apporti solari perché intercettano la radiazione solare incidente prima che essa raggiunga lo spazio interno dell'edificio, dissipandola in ambiente. Il controllo solare mediante sistemi di schermatura esterni può avvenire impiegando elementi orizzontali a sbalzo (mensole o aggetti), setti verticali, o ancora elementi dell'involucro edilizio la cui forma e materiale contribuiscono alla definizione dell'architettura dell'edificio.

I dispositivi di schermatura solare interni sono in genere regolabili o retraibili, e manovrati autonomamente dagli occupanti dell'edificio. Tipici esempi sono le tende verticali in tessuto, le tende a rullo, e le tende alla veneziana. Sono in linea di massima più economici rispetto ai dispositivi di schermatura esterni, e risultano particolarmente efficaci nel controllare le componenti diffuse e riflesse della radiazione solare, principale causa di abbagliamento. I dispositivi di schermatura solare interni intercettano la radiazione solare diretta solo quando essa ha già avuto accesso allo spazio confinato dell'edificio, e la cedono quindi all'ambiente interno mediante flussi energetici convettivi e radiativi. Pertanto, la loro capacità di ridurre il carico termico di raffrescamento è del tutto marginale, e non dovrebbero essere presi in considerazione a tal fine. Piuttosto, vista la capacità di controllare la radiazione solare diffusa e riflessa, i sistemi di schermatura solare interni devono essere considerati correttamente più come dispositivi funzionali al comfort visivo, ovvero per il controllo dell'accesso della luce naturale e per contrastare i fenomeni di abbagliamento. Un tipico esempio in tal senso è costituito dalle tende alla veneziana che, correttamente regolate, possono intercettare la radiazione solare diretta e rifletterla verso il soffitto, ricreando condizioni di luce naturale diffusa.

## **1.5 Interventi sul patrimonio edilizio esistente**

Dall'analisi della complessa realtà urbana emerge la necessità di riqualificare dal punto di vista energetico gli edifici esistenti con strategie d'intervento mirate all'efficientamento energetico dell'involucro edilizio.

Il contesto italiano è connotato da una grande quantità di edifici esistenti caratterizzati da una scarsa efficienza energetica: storicamente le città italiane sono, infatti, il risultato di una stratificazione architettonica di stili, tecnologie e modi di costruire differenti. L'espansione centrifuga del secondo dopoguerra ha significato la creazione della periferia con tecnologie non prestazionali, rendendo oggi necessario il fenomeno contrario, centripeto, di ridensificazione, fatta di recupero per gli edifici correnti e di recupero/restauro per quelli in cui il valore storico lo richieda. Qualora sia necessario provvedere ad un adeguamento finalizzato al miglioramento del comfort fisico e termoigrometrico di un edificio esistente gli aspetti tecnologici diventano preponderanti rispetto alle considerazioni di carattere ecosostenibile e pertanto la scelta è vincolata al raggiungimento di un'ottimizzazione della proposta progettuale e delle azioni esecutive più appropriate.

Prima di procedere alla progettazione di interventi di riqualificazione, devono essere svolte analisi finalizzate alla conoscenza dell'edificio stesso. Un'analisi storica può essere utile per ipotizzare, in base all'epoca di costruzione, quali materiali potremmo trovare nella composizione dell'involucro.

L'involucro di un edificio è costituito da tutto ciò che separa l'interno dell'edificio dall'esterno. La definizione involucro edilizio opaco si riferisce

all'insieme di tutti gli elementi non trasparenti che compongono l'involucro stesso: le pareti, le strutture orizzontali e le coperture. La diversa capacità di trasmissione del calore definisce le caratteristiche principali delle varie parti dell'involucro.

I materiali utilizzabili oggi per la realizzazione dell'involucro edilizio sono moltissimi, tutti con caratteristiche specifiche che li rendono più o meno adatti a seconda della forma dell'edificio, della sua funzione o della sua localizzazione geografica.

Alcuni materiali, molto resistenti alle sollecitazioni, vengono scelti per realizzare gli elementi strutturali o dell'involucro. Alcuni di questi hanno buone proprietà isolanti, altri invece consentono un notevole passaggio del calore. E proprio per evitare queste dispersioni essi vengono associati ad altri materiali che hanno buone proprietà isolanti, ma che non possono essere utilizzati da soli, senza elementi di supporto, propriamente detti isolanti.

## **1.6 Tensegrity**

Si è scelto di progettare le schermature solari secondo i criteri della tecnologia *tensegrity*. Le *tensegrities* sono strutture pieghevoli, costituite da cavi e aste collegati da cerniere nodali soltanto, tali che, quando le si dispiega facendo loro assumere una configurazione spaziale pre-sollecitata, tutte le aste risultano compresse (puntoni) e tutti i cavi tesi, due puntoni qualunque non risultano mai contigui e i cavi formano un insieme connesso. Il termine *tensegrity*, combinazione delle parole inglesi *tensile* ed *integrity*, è stato coniato proprio per cogliere quest'ultimo carattere

peculiare: nella struttura gli elementi tesi si organizzano in un'unica spezzata spaziale. Una *tensegrity* non ha alcuna rigidezza finché non se ne mette in opera l'ultimo elemento: né i cavi sono tesi né le aste sono compresse. Per la stessa topologia (cioè, per la stessa collezione strutturata di nodi corredati di cavi ed aste), possono darsi diverse configurazioni in cui una data struttura pieghevole si comporta come una *tensegrity*; è possibile passare dall'una all'altra di queste variando simultaneamente le lunghezze di due o più elementi.

Si dice che una *tensegrity* ricerca la propria forma di equilibrio perché, fissata una topologia e le lunghezze di  $(n-1)$  elementi, ne resta univocamente individuata la lunghezza dell'elemento  $n$ -esimo nella configurazione di equilibrio stabile. All'equilibrio, l'energia di deformazione della struttura è per definizione stazionaria; l' $n$ -esimo elemento ha lunghezza minima se è un cavo, massima se è un puntone. In una configurazione di equilibrio, la matrice strutturale di una *tensegrity* non ha rango massimo; di conseguenza, una *tensegrity* si trova tipicamente in uno stato di indeterminazione sia statica che cinematica. Le *tensegrities* sono meccanismi infinitesimi del primo ordine: si intende con questa dizione riferirsi al fatto che ad un loro moto infinitesimo è associata una variazione di lunghezza degli elementi che è infinitesima del secondo ordine negli spostamenti dei nodi; dunque, una *tensegrity* ha rigidezza del primo ordine positiva solo in presenza di uno stato di pre-sollecitazione non nullo dei propri elementi. Un meccanismo infinitesimo del primo ordine risponde ai carichi applicati in modo differente, a seconda che questi ne attivino i cinematismi oppure no. Nel primo caso la relazione forza-spostamento è ben approssimata da una cubica con il flesso nell'origine; la pendenza del

flesso è la rigidità iniziale del sistema, direttamente proporzionale allo stato di pre-sollecitazione. Nel secondo caso la risposta è quella di un sistema iperstatico, lineare fino a quando non si verificano perdite di tensione in qualche elemento.

### **1.6.1 Cenni storici**

Una categoria di strutture molto particolare viene considerata per la prima volta nel 1948 da Richard Buckminster Fuller (docente, architetto, ingegnere, matematico, cosmologo e inventore) e dall'artista Kenneth Snelson (ancora studente presso il Black Mountain College in North Carolina, USA). Quest'ultimo realizzava delle sculture, costituite da fili tesi ed elementi compressi, con la particolarità di avere un piccolo numero di elementi compressi (punti), mai contigui l'uno all'altro e collegati tra loro tramite un sistema continuo di elementi tesi.

Richard Buckminster Fuller analizzando le opere dell'allievo Snelson, intuì la lungimiranza di tali lavori e decise di approfondire lo studio di queste strutture, coniando il termine "tensegrity" e attribuendo i meriti a se stesso. La scultura, vista con l'occhio dello strutturista, possiede dei cinematismi infinitesimi e si presenta in uno stato di presollecitazione autoequilibrato che la rende stabile anche se sottoposta ad azioni esterne. Fuller conia il termine *tensegrity*, combinando le parole *tensile* ed *integrity*, per sottolineare una caratteristica di questi sistemi: gli elementi tesi costituiscono un insieme connesso, che separa ogni elemento compresso da tutti gli altri.



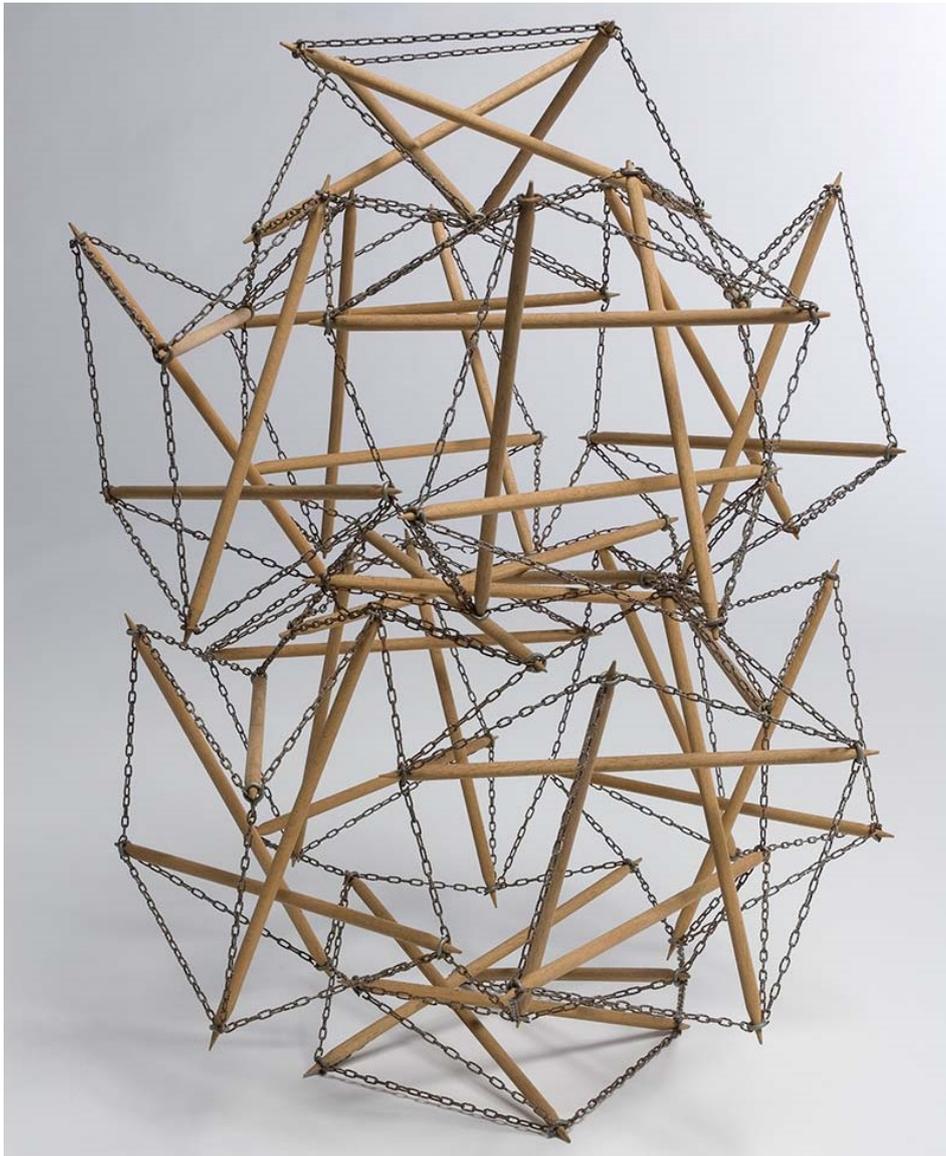
**Fig. 1.32:** Scultura "X-piece" realizzata da Kenneth Snelson nell'autunno del 1948

Tra Fuller e Snelson nascerà una controversia in merito alla paternità della scoperta. Anche un altro personaggio, David George Emmerich, in Francia e

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

nello stesso periodo, afferma di aver di essere l'inventore di questo nuovo sistema strutturale.



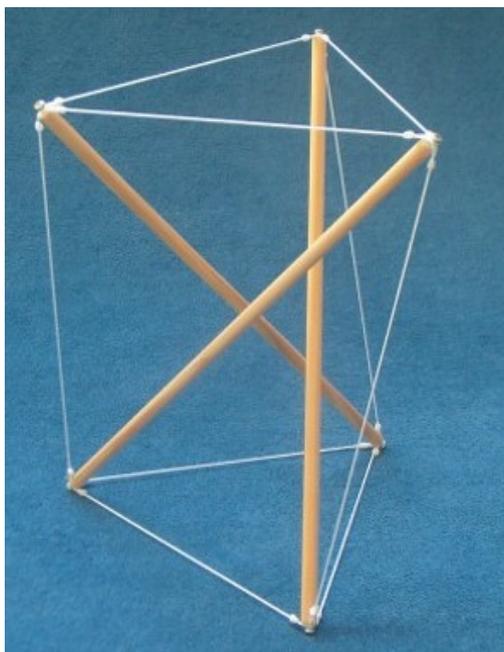
**Fig. 1.33:** Struttura autotendente, David Georges Emmerich, 1962.

Le definizioni date nei tre rispettivi brevetti sono sostanzialmente equivalenti:

*I sistemi Tensegrity sono dei sistemi reticolari spaziali resi rigidi da uno stato di autosollecitazione, gli elementi sono rettilinei e di dimensioni equivalenti. Gli elementi compressi costituiscono un insieme discontinuo, gli elementi tesi costituiscono un insieme continuo. In ogni nodo confluiscono un puntone ed almeno tre cavi. Gli elementi tesi non hanno alcuna rigidità in compressione.*



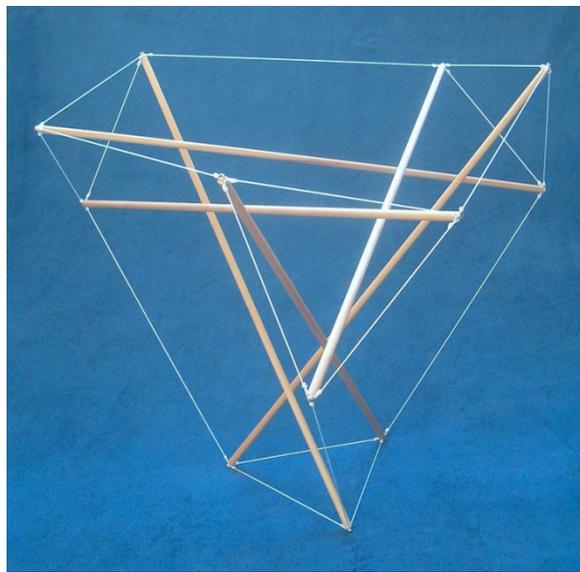
**Fig. 1.34:** *Tensegrity* bidimensionale costituita da un solo elemento compresso e due cavi.



**Fig. 1.35:** *Tensegrity* tridimensionale costituita da tre puntoni e nove cavi.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 1.36:** *Tensegrity* tridimensionale costituita da sei puntoni e diciotto cavi.



**Fig. 1.37:** Scultura di Kenneth Snelson - B-Tree II

### **1.6.2 Campi di applicazione**

Le proprietà dei sistemi tensegrity trovano applicazione in tantissimi campi e forniscono modelli teorici per lo studio di diversi fenomeni fisici. Le origini di questi sistemi sono legate alla scultura, mentre è in un secondo momento che si sono sviluppate applicazioni nel campo dell'architettura e della matematica, diventando un concetto/principio strutturale. Alcuni scienziati, a partire da Fuller e Snelson, concepiscono il tensegrity come principio fondamentale nell'universo, dal macrocosmo al microcosmo, come risposta ad una domanda generale sulla natura della struttura, o meglio sulla struttura della natura.

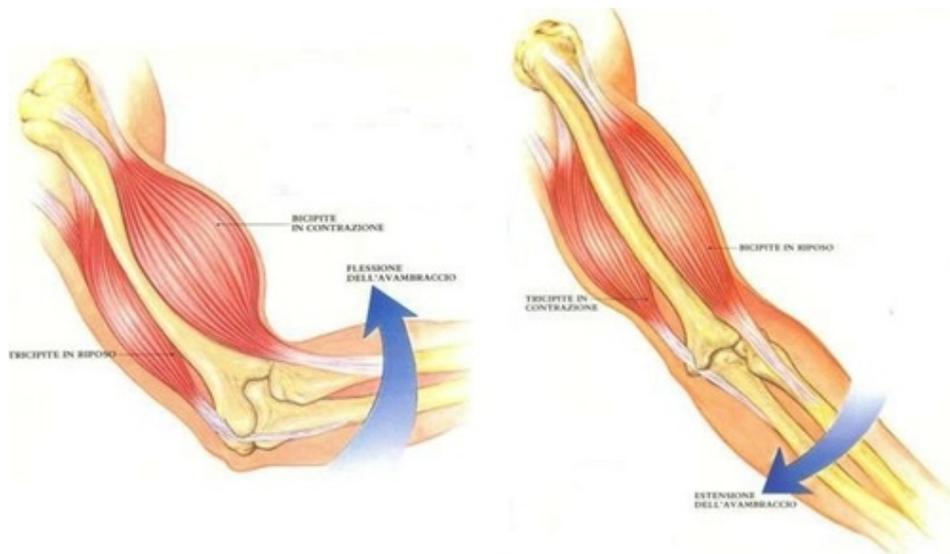
Per utilizzare il sistema tensegrity in un campo diverso da quello relativo a soggetti materiali, è necessario stabilire alcuni concetti importanti. Questi modelli possono essere generalmente considerati come principi strutturali, sottoposti ad un particolare campo di forze, in equilibrio stabile con una distribuzione precisa di elementi o componenti e con la condizione della continuità tensoriale. La compressione e la trazione possono essere, per esempio, associati con la repulsione e attrazione, rispettivamente, che è molto conveniente per gli esempi gravitazionali e atomici. Snelson sottolinea vari modi di collegamento concettuale attraverso tensegrity<sup>6</sup>: in Astronomia (un pianeta al sole), in fisica atomica (un elettrone al nucleo) e in meccanica (un cavo ad un'asta).

E' molto comune trovare il termine tensegrity applicato alla *biomeccanica* e, in particolare, all'anatomia. Nonostante siano stati utilizzati solo come esempio per illustrare i modelli, alcune fonti fanno uso del termine per

---

<sup>6</sup> Snelson K., Kenneth Snelson, [on-line], New York, U.S.A., 2004.

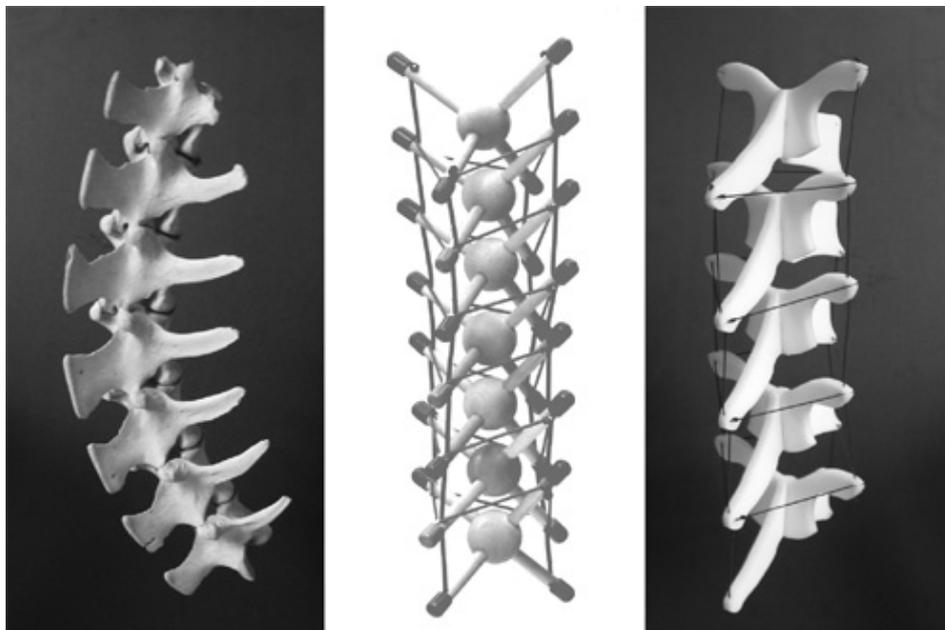
spiegare il rapporto tra i muscoli, tendini e ossa negli animali e nell'uomo. Essi sostengono che lo scheletro non è solo un telaio di sostegno con muscoli, legamenti e tendini, ma è anche un insieme di componenti di compressione sospesi all'interno di una rete continua in tensione. Il primo riferimento ai sistemi tensegrali in anatomia è stato proposto nei primi anni del 1980 da Stephen M. Levin<sup>7</sup> nel testo *Continuous Tension, Discontinuous Compression. A Model for Biomechanical Support of the Body*, riferendosi in particolare al sistema della colonna vertebrale umana.



**Fig. 1.38:** Esempi di tendini collegati a parti ossee che possono essere ricondotti a sistemi tensegrity.

---

<sup>7</sup> Dr. Stephen Levin, ortopedico e pioniere del Biotensegrity. Le sue tesi concernono lo studio della colonna vertebrale basato sul principio tensegrity.



**Fig. 1.39:** Modello di vertebre tensegrali.

Infine, è stato scoperto nel 2001 che anche il sistema nervoso centrale secondo una logica tensegrity. Secondo gli studiosi che hanno scoperto questa relazione, i neuroni sensoriali sono sempre informazioni in movimento (continuamente in tiro), mentre i motoneuroni sono solo occasionalmente coinvolti in qualche azione motoria (spinta discontinua). In sintesi, si può concludere che il modello tensegrale, dal punto di vista di alcuni specialisti, supera il concetto di struttura spaziale fatta esclusivamente di aste e stringhe.

Un altro esempio di struttura tensegrity che si può trovare in natura è la tela dei ragni, in particolare la ragnatela del *Nephila Clavipes*, che possiede una resistenza a trazione pari a  $4 \cdot 10^9$  N/m<sup>2</sup>, molto superiore a quella dell'acciaio. La ragnatela è una proteina complessa composta

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

principalmente da due aminoacidi la glicina e l'alanina. Le alanine sono allineati in due forme: piastre rettangolari e fili amorfi. Le piastre rettangolari possono essere considerate come i corpi rigidi delle strutture tensegrity, invece il fili amorfi costituiscono le parti in trazione. Poiché le piastre non sono a contatto tra di loro, la ragnatela è stabilizzata dai fili amorfi in trazione.

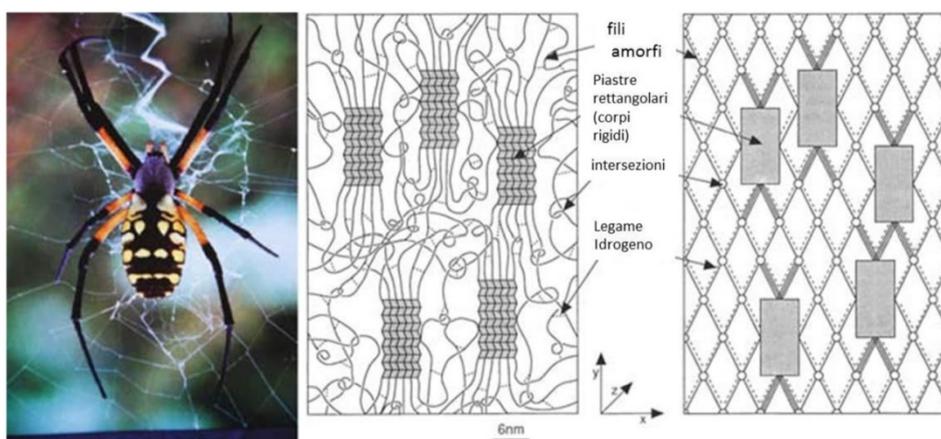


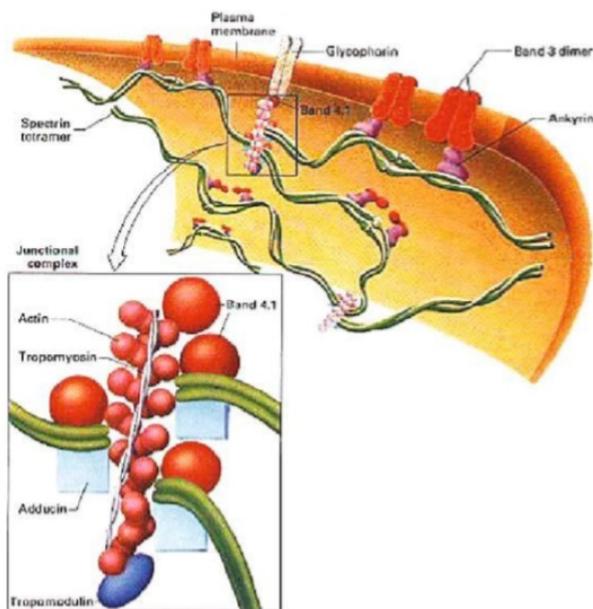
Fig. 1.40: Ragnatela del *Nephila Clavipes*: foto (sinistra) e struttura (destra)

Numerose proposte sono state avanzate da specialisti nel campo della biologia e della chimica. Il principale è un contributo di Donald E. Ingber<sup>8</sup>, professore di patologia presso la Harvard Medical School, nei primi anni '80. Egli elabora una teoria circa la struttura e le proprietà elastiche della cellula e l'applicazione del principio tensegrale per l'elaborazione delle informazioni, per la trasduzione mecano-chimica e per la regolamentazione morfogenetica. Nonostante il fatto che resta un'ipotesi preliminare basata su diversi lavori sperimentali, alcune nuove scoperte hanno dimostrato che la proposizione è formalmente e matematicamente

<sup>8</sup> Ingber, D.E., *The Architecture of Life*. Scientific American Jan 1998.

valida e prevede molti aspetti del comportamento cellulare. Ingber ha scoperto che non solo le cellule ma anche un'incredibile varietà di sistemi naturali sono costruiti secondo il modello tensegrity: atomi di carbonio, acqua, molecole, proteine, virus, tessuti, e altre creature viventi. L'unico disaccordo con la stabilità dei principi tensegrali è che, in contrasto con altri autori, Ingber accetta molle flessibili invece di elementi rigidi. Questa configurazione e l'uso di opportuni materiali conferiscono diverse elasticità e, quindi, differenti comportamenti in tensione o compressione.

Un ulteriore esempio di struttura tensegrity può essere la membratura dei globuli rossi: attaccato al lato inferiore di tale membrana (formato da un doppio strato lipidico), vi sono all'incirca 33000 unità che possono essere modellate come delle tensegrity. La membratura è composta da protofilamenti, i quali hanno un comportamento rigido e da spectrine, che, invece, hanno comportamenti di tipo elastico. Modellando i protofilamenti come corpi rigidi e la spectrina come connettori di trazione tra il doppio strato lipidico e i protofilamenti, si è notato che l'equilibrio e la geometria ottenuti da tale struttura si può ricondurre ad un modello di tensegrity.



**Fig. 1.41:** Struttura della membrana dei globuli rossi

Oltre al campo della biologia anche la chimica organica (cellule, virus, polline, le molecole di acqua, atomi di carbonio, vitamine, proteine, ecc.) è basata sui principi tensegrali. Anche se apparentemente le materie inorganiche non godono di questi principi fisici, è interessante sottolineare che, secondo alcune nuove scoperte, anche tali sostanze possono essere ricondotte a tali strutture.

Le strutture tensegrity vengono studiate nel campo dell'ingegneria civile ed edile perché presentano numerosi vantaggi dal punto di vista strutturale, ad esempio:

- ☑ la possibilità di integrare sistemi tensegrity con pannelli solari o acustici, che possono essere identificati con speciali elementi rigidi della struttura. Elementi che possono anche aprirsi e chiudersi in

modo automatico sfruttando la capacità di dispiegamento dei modelli tensegrity.

- la possibilità di acquisire energia da fonti rinnovabili, attraverso la conversione dell'energia meccanica immagazzinata nella struttura in energia elettrica;
- ☒ le strutture tensegrity forniscono configurazioni di minima massa strutturale in corrispondenza delle condizioni di carico di più frequente interesse per le applicazioni tecniche (compressione, flessione, torsione, ecc.);
- la possibilità di poter sfruttare le caratteristiche tensegrali nel campo dell'automazione degli edifici. Nei sistemi tensegrity il controllo e la meccanica strutturale possono naturalmente cooperare, attraverso semplici cambiamenti della configurazione di equilibrio della struttura. Questi sono prodotti da variazioni di lunghezza degli elementi tesi (allungamenti prodotti da attuatori di varia natura) e/o variazioni di lunghezza degli elementi compressi (barre telescopiche comandate da attuatori, ecc.);

Le peculiarità delle strutture tensegrity ha attratto l'interesse di molti studiosi, infatti tali strutture rispondono bene alle esigenze dell'ingegneria civile sia per la particolare abilità di questi sistemi ad operare come modelli controllabili, ma anche perché è stato provato che le architetture tensegrity assicurano configurazioni di minima massa per una serie di condizioni di carico significative (strutture a mensola, strutture appoggiate agli estremi, strutture soggette a condizioni di carico da compressione, trazione e torsione) senza che si verifichino collassi strutturali per snervamento o instabilità. In particolare, in ingegneria civile si può far riferimento a

strutture da ponte, per le quali la riduzione della massa riveste particolare importanza, soprattutto nel caso di strutture di grande luce.

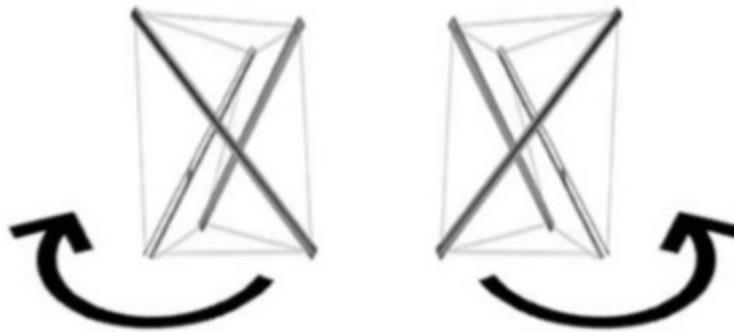
### **1.6.3 Proprietà**

Tra le proprietà delle strutture tensegrity ricordiamo:

- La leggerezza: rispetto ad altre strutture con una simile resistenza sono molto leggere, o se si preferisce, hanno un'elevata resistenza rispetto alle altre strutture con peso simile. Al contrario, alcuni autori sostengono che questa caratteristica non è sempre riscontrabile, perché, ad esempio nelle reti tensegrity i moduli sono più pesanti rispetto alle griglie strutturali convenzionali.
- Esse non dipendono dalla gravità grazie alla loro auto-stabilità, dunque non necessitano di ancoraggi e possono essere appoggiati su qualsiasi superficie. I sistemi sono stabili in qualsiasi posizione, quindi, la forza di gravità, fondamento dell'architettura convenzionale, è annullata.
- Essendo strutture reticolari non presentano taglio, momento flettente e momento torcente.
- Se l'auto-stress è maggiore in un sistema tensegrity, la sua capacità portante è superiore. Usando l'analogia del pallone, se un pallone è maggiormente gonfiato, le forze di tensione nella pelle sono maggiori ed è più difficile da deformare.
- Il grado di tensione dei componenti precompressi è proporzionale alla quantità di spazio che occupano.

- Possono essere progettate per essere modulari. Cellule tensegrity elementari possono essere unite per creare alberi, griglie o conglomerati fatti dalla loro unione o dall'unione di diverse figure.
- Le strutture suddivise in un maggior numero di triangoli sono più rigide.
- Si prestano ad essere assemblate a secco.
- Poiché i componenti in compressione sono discontinui, funzionano solo localmente. La compressione si trova a specifiche linee di azione, così non sono soggetti a carichi elevati di instabilità.
- Tali strutture hanno la proprietà di sinergia dove il comportamento dell'intero sistema non prevede il comportamento di uno dei loro componenti preso separatamente.
- La resilienza (flessibilità) o rigidità della struttura dipende dai materiali impiegati, e al loro metodo di assemblaggio. Possono essere molto flessibili o molto rigidi e molto forti.
- Grazie alla caratteristica precedente, sono molto sensibili alle vibrazioni sotto carichi dinamici.
- Possono essere ripiegabili e dispiegabili.
- Essi hanno la capacità di rispondere nel loro insieme, così le sollecitazioni locali sono trasmesse uniformemente e assorbite su tutta la struttura.
- La risposta ai carichi è non lineare. Essi sono più flessibili sotto carichi, ma la loro rigidità aumenta rapidamente se il carico è elevato, come un ponte sospeso.

- Alcuni tensegrity, sotto carico assiale, sono soggetti ad una rotazione intorno al loro asse. La direzione di questa rotazione dipende dal senso di rotazione del sistema. La maggior parte dei sistemi tensegrity sono enantiomorfi. Ciò significa che esistono coppie specularmente simmetriche e sovrapponibili, "destrorsa" (destrogiro) e "sinistrorsa" (levogiro).



**Fig. 1.42:** Esempio senso di rotazione del sistema, levogiro (a sinistra) e destrogiro (a destra).

I vantaggi delle strutture tensegrity sono di seguito elencati:

- Grazie alla capacità di rispondere staticamente nel suo insieme, è possibile utilizzare materiali in un modo molto economico, offrendo, quindi, una quantità massima di forza per una data quantità di materiale da costruzione. Fuller parla di effimerizzazione tensintegra, ovvero la capacità di fare di più con di meno (la tendenza ad ottenere rendimenti crescenti con sempre minori investimenti di energia).

- Essi non subiscono alcun tipo di coppia o di torsione, e l'instabilità è molto rara a causa della breve lunghezza dei loro componenti in compressione.
- La rete di tensione multidirezionale elimina i punti di debolezza locale.
- Il fatto che queste strutture vibrano prontamente significa che esse stanno trasferendo carichi molto rapidamente, in modo che questi ultimi non possono diventare locali. Ciò è molto utile nella applicazioni di strutture tensegrity in architettura in termini di assorbimento di urti e vibrazioni sismiche.
- La capacità spaziale dei singoli moduli tensegrity, che sono auto-stabili, consente un'eccezionale possibilità di creare sistemi attraverso il loro assemblaggio. Questa concezione implica la possibilità dell'estensione infinita del pezzo assemblato.
- Per le grandi costruzioni tensegrity, il processo sarebbe relativamente facile da eseguire, poiché la struttura funge da auto-ponteggio.

Gli svantaggi delle strutture tensegrity sono ugualmente elencati a seguire:

- I collegamenti tensegrity devono risolvere il problema della congestione delle barre in acciaio
- Anche se esteticamente affascinanti, tali strutture sono di scarsa utilità in applicazioni di ingegneria civile convenzionale.
- La complessità di fabbricazione è un ostacolo per lo sviluppo delle strutture galleggianti di compressione. In particolare le strutture sferiche e a cupola sono complesse e si possono riscontrare problemi di produzione.

- Fino ad ora l'inadeguatezza degli strumenti di progettazione ha comportato una certa limitazione.
- Al fine di sostenere carichi critici, le forze di precompressione dovrebbero essere abbastanza elevate, ma ciò potrebbe essere difficile in costruzioni di maggiori dimensioni.

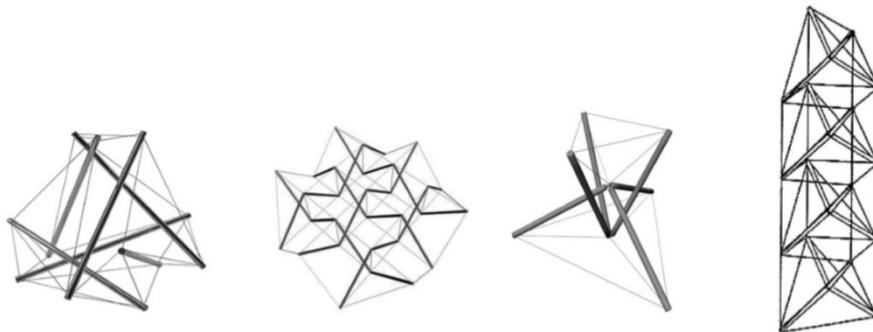
#### **1.6.4 Caratterizzazione**

Per molti secoli il principio alla base delle costruzioni è sempre stato lo stesso: l'equilibrio dell'edificio è garantito grazie al peso proprio della struttura, ovvero attraverso forze di compressione di elementi verticali che trasmettono il peso della costruzione a terra. Tuttavia, le strutture tensegrity si basano su un approccio completamente diverso: la stabilità strutturale è garantita dalla creazione di uno stato autonomo di equilibrio attraverso aste compresse e cavi in trazione e quindi non necessita del principio gravitazionale per essere in equilibrio. Il sistema di compressione discontinua/trazione continua è la caratteristica fondamentale di tali strutture e fornisce proprietà uniche rispetto alla maggior parte delle opere di ingegneria civile. Per comprendere meglio il principio tensegrity riportiamo di seguito alcune analogie meccaniche e strutturali. Diversi autori, in realtà, ammettono che le costruzioni gonfiabili sono tensegrity poiché sono sistemi auto-equilibrati composti da una componente di trazione esterna che abbraccia gli atomi di gas i quali si comportano come elementi discontinui in compressione. Un pallone, una volta gonfiato, si trova in una condizione in cui la membrana superficiale è presollecitata indipendentemente dalle sollecitazioni esterne. Questa pressione interna

che comporta un pre-stress garantisce una reazione del pallone alle azioni esterne e quindi la stabilità.

A seconda del tipo di puntoni impiegati dal sistema tensegrale, si identificano diverse classi di tensegrity, ognuna di questa è caratterizzata da una rigidità meccanica maggiore della precedente classe.

Sistemi che prevedono la presenza di un solo elemento compresso per nodo, vengono definiti strutture tensegrity di classe 1 (tensegrity puro), sistemi che prevedono la presenza di 2 elementi compressi convergenti in un unico nodo sono detti tensegrity di classe 2, sistemi di 3 elementi convergenti in un unico nodo sono detti tensegrity di classe 3 e così via. Lo stesso Fuller realizzò una torre classe 4, formata appunto da moduli composti da 4 aste rigide saldate fra di loro ad una estremità.



**Fig. 1.43:** Esempi di strutture tensegrity classe 1, 2, 3, 4.

La resistenza alle sollecitazioni esterne in un sistema tensegrity è principalmente dipendente da due fattori: la conformazione geometrica e topologica degli elementi ed il livello di pre-tensionamento. Essa è non lineare e varia, anche molto, a seconda del tipo di carico applicato; in generale si può affermare che tutte le strutture tensegrali presentano un

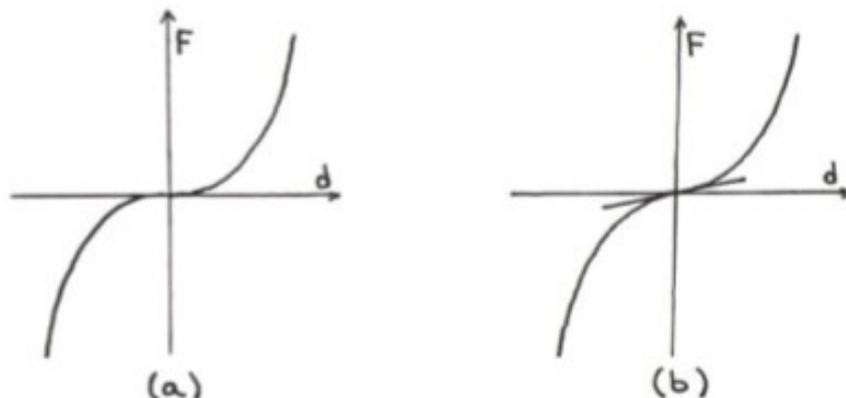
forte calo di resistenza nel momento in cui uno solo dei cavi che le compongono si allenta. Questo in certi casi rappresenta il collasso della struttura ed è quindi uno dei parametri da tenere in maggior conto durante le fasi di progettazione e dimensionamento. Se non è possibile agire sulla forma del sistema per contrastare l'effetto delle forze applicate allora si può agire sul pre-tensionamento. Questo concetto è fra i fondamentali per discernere i veri sistemi tensegrity da quello che non lo sono.

La proprietà più significativa delle strutture *tensegrity* è quella di appartenere alla classe dei meccanismi infinitesimi del primo ordine. Una struttura reticolare costituisce un meccanismo infinitesimo del primo ordine se la variazione di lunghezza degli elementi, associata agli spostamenti dei nodi, risulta essere infinitesima del secondo ordine negli spostamenti. In simboli, se  $d$  misura lo spostamento e  $\varepsilon$  la deformazione, si ha:

$$\varepsilon = cd^2 + o(d^2)$$

Questa proprietà è legata alla matrice di equilibrio della struttura o, equivalentemente, alla sua matrice di congruenza. Infatti, queste strutture sono sia staticamente che cinematicamente indeterminate; quindi, ad esse sono associati sia degli stati di sollecitazione autoequilibrati che dei cinematismi. Se una tale struttura è composta di elementi resistenti sia in trazione che in compressione inizialmente non sollecitati, allora la struttura è stabile, perché l'attivazione di un cinematismo causa un incremento dell'energia di deformazione e la nascita dello stato di autosollecitazione corrispondente. Una struttura composta di cavi e

puntoni risulta stabile se una perturbazione del sistema genera tensione nei cavi e compressione nei puntoni. Una struttura di questo genere non ha alcuna rigidità iniziale nei confronti di un'azione esterna che innesca il o i cinematismi, ma esibisce un incremento di rigidità fino a raggiungere l'equilibrio in una nuova posizione differente da quella iniziale. Il comportamento cambia se un meccanismo infinitesimo del primo ordine e stabile si trova in uno stato di autosollecitazione già nella configurazione iniziale. In questo caso la struttura, a causa delle forze presenti negli elementi, presenta una rigidità iniziale non nulla e del primo ordine negli spostamenti, che dipende essenzialmente dalla variazione di direzione degli elementi, e quindi delle forze presenti in essi, che realizzano l'equilibrio con i carichi esterni. La relazione forze-spostamenti ha un andamento che può essere ben approssimato da una cubica, con il flesso nell'origine, fig. 1.44. La curva mostra il comportamento, caratteristico dei meccanismi infinitesimi del primo ordine, rappresentato dall'aumento di pendenza della tangente all'aumentare dei carichi. Lo stato di autosollecitazione iniziale determina la pendenza della tangente nell'origine; la tangente è orizzontale nel caso di sollecitazione iniziale negli elementi nulla.



**Fig. 1.44:** Relazione forza-spostamento per un meccanismo infinitesimo del primo ordine, (a)senza presollecitazione, (b)con presollecitazione

Le strutture *tensegrity* costituiscono una categoria particolare di meccanismi infinitesimi del primo ordine. Esse possono assumere configurazioni anche molto diverse da quella iniziale, pur restando limitate le deformazioni degli elementi. La condizione di indeterminazione statica e cinematica non dipende direttamente dalla topologia del sistema, ma piuttosto dalla geometria di questo. Si consideri, ad esempio, un sistema bidimensionale costituito da due elementi e tre cerniere, fig. 1.45a, due esterne ed un'interna. Com'è noto, per posizioni qualsiasi dei nodi il sistema è staticamente determinato, ma nel caso in cui i nodi giacciono sulla stessa linea il rango della matrice decresce di un'unità, ed il sistema risulta sia staticamente che cinematicamente indeterminato. Analogamente il sistema di fig. 1.45b, costituito da tre elementi e quattro cerniere, due esterne e due interne, è cinematicamente indeterminato, ma nella configurazione in cui tutti i nodi sono allineati il sistema acquista un altro grado di libertà ed uno stato di autosollecitazione. Questi due semplici casi mostrano una importante differenza: per il primo la configurazione

speciale diminuisce la rigidità del sistema, mentre nel secondo caso la struttura acquista lo stato di autosollecitazione che conferisce una rigidità del primo ordine al sistema.



Fig. 1.45: Sistema di due aste (a) e di tre aste (b)

Si può notare come la condizione di indeterminazione di questi sistemi sia collegata alla condizione di minima o massima lunghezza di uno o più elementi. Infatti, con riferimento al primo dei due esempi illustrati, se si sceglie come parametro della geometria del sistema la lunghezza di un elemento, lasciando la lunghezza dell'altro costante, questa non può variare indefinitamente ma è vincolata ad essere compresa tra due estremi, come si comprende dalla fig. 1.46. Per le strutture tridimensionali accade esattamente la stessa cosa.

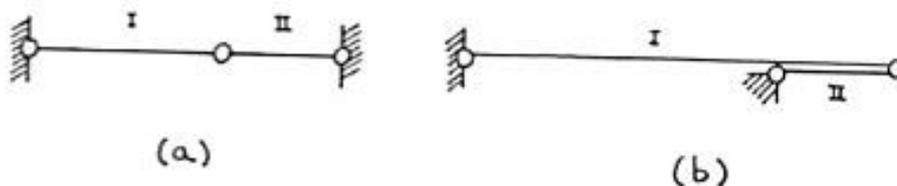


Fig. 1.46: Sistema di due aste (a) e di tre aste (b)

Una maggior comprensione di questi concetti si acquisisce quando si tenta di costruire uno di questi oggetti. Ad esempio, si consideri il sistema elementare tridimensionale costituito da tre aste rigide e nove cavi inestensibili. Si tratta di un sistema che nella configurazione *tensegrity*,

possiede un grado di indeterminazione, sia statica che cinematica, pari a uno. Se si fissano le lunghezze di tutti gli elementi, eccetto uno, si osserva come la lunghezza dell'ultimo sia univocamente determinata dalla scelta effettuata. Se si realizzano fisicamente tutte le connessioni degli 11 elementi di fissata lunghezza, l'insieme parziale ottenuto non ha alcuna rigidità o consistenza; la lunghezza dell'ultimo elemento viene determinata quando si tenta di avvicinare (nel caso di un cavo) o di allontanare (nel caso di un puntone) gli ultimi due nodi. A questo punto si nota che la distanza tra i due nodi può variare fino a raggiungere un minimo, od un massimo, per il quale la struttura raggiunge la sua consistenza ma ancora nessuna rigidità iniziale. Nel momento in cui si forzano i due punti ad un ulteriore avvicinamento, rispettivamente allontanamento, il sistema acquista una rigidità iniziale, funzione della geometria e proporzionale allo stato di sollecitazione impresso. Si vede come la lunghezza dell'ultimo elemento si adatti rispetto alle lunghezze fissate degli altri  $n - 1$  elementi. Il problema consiste quindi nella soddisfazione dei vincoli, formulati assegnando le  $n - 1$  lunghezze e imponendo la condizione di equilibrio. Un altro modo per descrivere il comportamento di questi sistemi si ottiene realizzando tutti o alcuni dei cavi della struttura con elastici molto deformabili. Si nota così, in maniera molto più evidente, come la lunghezza di un elemento vari in funzione di tutte le altre in modo che l'equilibrio sia soddisfatto. È per queste ragioni che ci si riferisce a queste strutture come a strutture che ricercano una posizione di equilibrio. Per le caratteristiche sopra esposte queste strutture appaiono interessanti per realizzare sistemi pieghevoli a geometria variabile. La semplice rimozione, o l'allungamento, di alcuni dei cavi

permette la compattazione in una maglia sciolta. Una variazione continua e controllata della lunghezza dei cavi consente al sistema di cambiare la propria configurazione. Poiché tali variazioni di lunghezza si possono ottenere agendo solamente sulla tensione dei cavi, si intuisce l'utilità della caratteristica di ricerca di forma. Infatti, la tecnologia di un dispositivo di questo tipo è, in genere, molto più semplice di quella richiesta per un dispositivo traslazionale bidirezionale. Inoltre si nota come, rispetto ad una struttura pieghevole del tipo di quelle descritte nel paragrafo precedente, la procedura di cambiamento di configurazione permette allo stesso tempo di stabilizzare e di rendere rigida la struttura.

Nonostante queste caratteristiche non convenzionali presentino molti aspetti positivi, lo studio di questi sistemi si complica rapidamente man mano che aumenta il numero di elementi che compongono il sistema. Vari sono i problemi nella concezione di una struttura di questo tipo. Per esempio, il problema della ricerca della posizione di equilibrio si esplicita nella riduzione del rango della matrice strutturale di equilibrio o di congruenza del sistema, o, equivalentemente, nella minimizzazione dell'energia potenziale elastica. Questo richiede, anche per i sistemi meno complicati l'utilizzo di metodi numerici iterativi. Analogamente lo studio della statica e della dinamica è complicato dalla non linearità del problema.

### ***1.6.5 Principali realizzazioni***

Oggigiorno la presenza di tipologie costruttive realizzate con il principio tensegrale è molto limitata, in quanto, escludendo le opere scultore di Snelson e Fuller, è difficile imbattersi nella visione di innesti architettonici

tensegrity. Nonostante le innumerevoli ricerche, dopo più di 60 anni dalla scoperta di questo innovativo sistema tecnologico-costruttivo, non esiste ancora una diffusione ordinaria di queste strutture. Una motivazione plausibile è da imputare all'intrinseca complessità di questo moderno sistema strutturale, alla bassa conoscenza da parte del progettista medio delle singolarità tecnologiche ed infine all'insufficienza nel mondo della ricerca di un approccio, schematico ed unitario, al problema.

La tecnologia tensegrity, basata su discontinua compressione/trazione continua, può avere una grande importanza per quanto concerne la realizzazione di strutture di copertura. Si può prevedere l'uso nelle costruzioni di tetti per ospitare grandi spazi sociali, vale a dire palestre, stadi, chiese, luoghi di eventi all'aperto ecc. I primi studi per la progettazione di griglie tensegrali sono stati eseguiti da Snelson, ma non hanno mai trovato applicazioni diverse dalle sculture.

Molti autori hanno analizzato la possibilità di progettare strutture edilizie tensegrali piatte, sostenendo anche che queste strutture potrebbero offrire una maggiore efficienza a flessione. In questo contesto, René Motro e il *Laboratoire Génie Civil* a Montpellier hanno focalizzato la ricerca sullo sviluppo di reti a doppio strato tensegrale che potrebbero essere particolarmente utili per la realizzazione di strutture di copertura.

La più grande applicazione di tensegrity in strutture di copertura è *La Plata Stadium* di Buenos Aires, in Argentina. Lo stadio ha una capacità di 53.000 posti a sedere ed è stato inaugurato nel 2003. La forma della copertura deriva dalla intersezione di due cerchi di 85 m di raggio, i cui centri sono distanziati di 48 m. Il progetto prevede una copertura completa impegnata

in un allestimento multi-funzionale che permetterà di ospitare eventi e concorsi in qualsiasi tipo di condizioni atmosferiche.



**Fig. 1.47:** Weidlinger Associates, *La Plata Stadium*, Buenos Aires, Argentina, 2003

Il tetto dello stadio è lungo 240 m per 180 m di larghezza, gli elementi principali sono alberi metallici sospesi in una rete triangolare di cavi d'acciaio ricoperta da una membrana traslucida composta da una fibra di vetro con un coperchio in Teflon. Un anello di compressione perimetrale, con una struttura a traliccio di tubi in acciaio, sostiene il peso degli appoggi della copertura. La membrana non ha alcuna funzione strutturale, serve solo a coprire e a proteggere gli occupanti dello stadio.

Il padiglione *Blur Building*, realizzato sul lago Neuchatel in occasione dell'Expò 2002 di Yverdon-les-Bains, in Svizzera, è una piattaforma sospesa avvolta in una perpetua nuvola di nebbia. La struttura fa uso di ottaedri

pseudo-tensegrali per reggere a sbalzo l'intero impalcato che consiste in una piattaforma, sollevata a 20 m dal livello dell'acqua, lunga circa 100 m e larga 60 m. Questo progetto, indipendentemente dalla veridicità del principio tensegrale, riveste un ruolo di notevole importanza nel campo della ricerca, in quanto utilizza tecnologie costruttive idonee alla realizzazione di opere tensegrali caratterizzate da notevoli sbalzi.



Fig. 1.48: Elizabeth Diller e Ricardo Scofidio, *Blur Building*, Yverdon-les-Bains, Svizzera, 2002

Le *cable domes*, o cupole di Geiger, dal nome dell'ingegnere e architetto David H. Geiger, sono una tipologia di coperture basate su sistema definibile come falso tensegrity. Geiger, facendo proprie le concezioni dei sistemi tensegrity promossi dai suoi precursori, brevetta un tipo di copertura fondato su una semplificazione della logica delle strutture tensegrali di Fuller che utilizza nella realizzazione di due grandi impianti sportivi, costruiti per le Olimpiadi di Seul in Corea nel 1989, e per la

*Suncoast Dome*, costruita a Saint Petersburg in Florida nello stesso periodo. Questa copertura si basa sul principio delle ruote della bicicletta, caratterizzata da una trave circolare di bordo in compressione, realizzata in cemento armato dalla quale vengono ancorati i cavi radiali. La presenza del bordo compresso non permette alle coperture di Geiger di essere annoverate tra quelle tensegrity. Nonostante tutto, ci sono numerose analogie con le strutture tensegrali a livello tecnologico e geometrico da considerare tali opere oggetto di ricerca. Il successo di queste coperture è dovuto principalmente alla sua funzionalità, in particolare alla capacità di coprire grandi superfici.



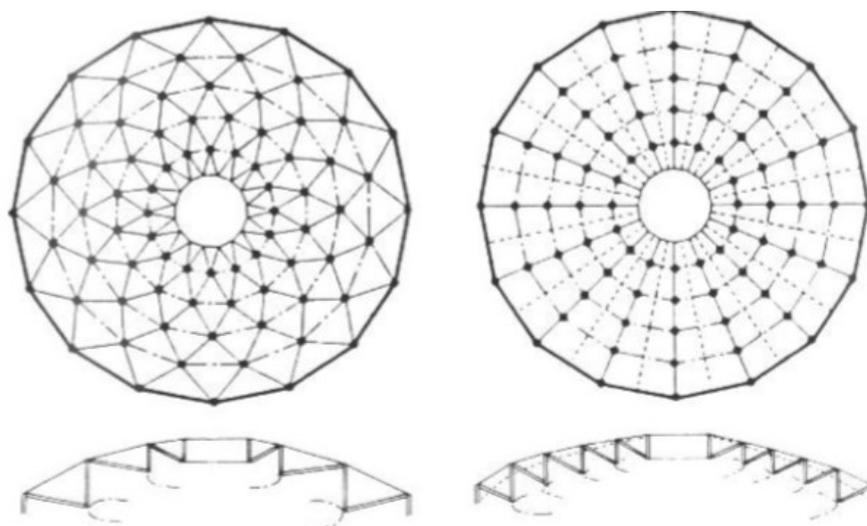
**Fig. 1.49:** David H. Geiger, *Georgia Dome*, Atlanta, Georgia, 1992

Nel 1992 completa la *Georgia Dome* ad Atlanta, in Georgia. La *Georgia Dome* ha un diametro massimo di 290 m ed è caratterizzata da una configurazione ellittica con un'area di 400.000 m<sup>2</sup> estendendosi per 193 m lungo l'asse minore e 240 m lungo l'asse maggiore. Nella letteratura tecnica viene definita come la prima cupola HyperTensegrity poiché la sua superficie comprende sezioni di un paraboloide iperbolico. Il corrente

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

inferiore della struttura è posizionato nell'ultimo anello di tensione e si erge verticalmente dando la sensazione che il traliccio sia galleggiante nello spazio come il resto della struttura. Questo traliccio, a causa della sua speciale condizione di carico è sollecitato in modo che la parte inferiore e i membri diagonali siano tutti in tensione mentre solo gli elementi verticali sono in compressione. Ogni cerchio porta 26 membri di compressione verticale (la metà delle 52 colonne a terra) che si estendono verticalmente da un cerchio all'altro. Tali elementi compressi sono poi stabilizzati da cavi diagonali e sono posizionati in modo che non si tocchino per dare l'illusione di fluttuare nello spazio. L'anello di compressione alla base della cupola è costituito da una struttura in cemento armato di 8 m di profondità sostenuta da 52 colonne. Il tetto è composto da una membrana tesa sopra la rete di cavi di acciaio, il materiale utilizzato è teflon rivestito di pannelli in fibra di vetro a forma di diamante lungo il profilo della superficie paraboloidale iperbolica.



**Fig. 1.50:** Confronto cupola di Fuller (sinistra) e la cable dome di Gieger (destra)

Oltre all'applicazione dei principi tensegrali alle coperture, è possibile estendere i concetti fondamentali a diverse tipologie di torri. Di seguito si elencano le principali tipologie di applicazioni e proposte:

- Parafulmini.
- Sostenitori di antenne, ricettori, radiotrasmittenti, trasmettitori di telefonia mobile, etc.
- Parchi eolici: la leggerezza di queste strutture può minimizzare l'impatto visivo di questi impianti energetici.
- Elementi estetici: sculture.

Una tra le più grandi strutture tensegrity mai realizzata è la Torre per la fiera di Rostock, in Germania, ultimata nel 2003. La torre alta 62,3 m è stata concepita come simbolo della nuova fiera di Rostock.

Si tratta di una torre tensegrity di classe 2, formata dall'addizione verticale di sei simplex con orientamenti alternati dell'altezza di 8,3 m ciascuno. Ogni simplex è composto da 3 tubi in acciaio Ø 273 mm. con uno spessore variabile fra i 12 e i 40 mm. e 6 cavi in acciaio ad alta resistenza, 3 orizzontali (Ø 30 e 50 mm.) e 3 verticali (Ø 50 e 75 mm.). Essendo un tensegrity di classe 2 presenta le aste della torre convergenti a due a due in un nodo e il giunto di collegamento è stato ottenuto con delle piastre di attacco imbullonate (più equivalenti ad un incastro che non ad una cerniera). L'intera struttura pesa circa 50 tonnellate. L'individuazione del valore di pre-tensionamento è stato fatto rispetto al carico di vento, in quanto la torre non ha altra funzione statica che portare il proprio peso. I cavi sono stati dimensionati imponendo che la forza di pre-tensione equivalesse al 30% della forza di rottura del cavo.

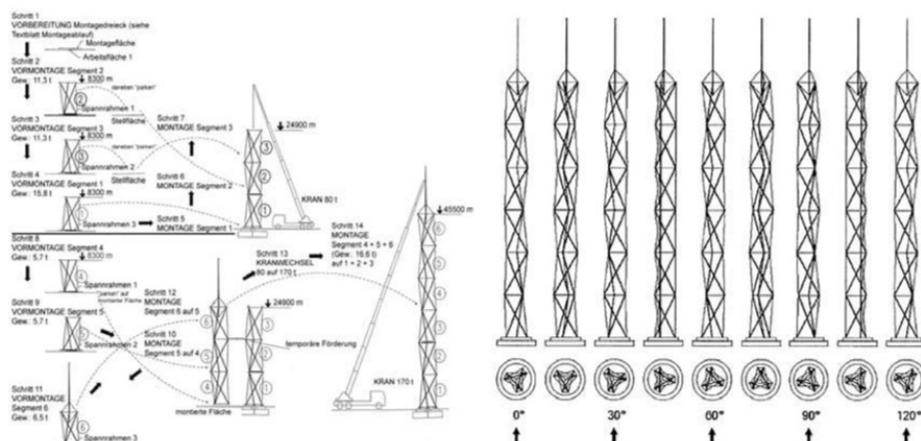


Fig. 1.51: Sezioni, Torre per la fiera di Rostock, Germania

La distanza di allungamento affinché i cavi diagonali raggiungano la dovuta tensione è di soli 20mm; questo si traduce nel fatto che, ad una variazione di lunghezza di 10mm si avrebbe una perdita di tensione pari al 50% da parte del cavo. Questo problema ha compromesso la fase realizzativa dell'opera, in quanto per motivi architettonici non si poteva realizzare uno dei tenditori, tale problema è stato risolto con una scrupolosa accuratezza in fare produttiva che tenesse sotto controllo la tensione di pre-tensionamento. Inoltre è stato preso in considerazione il ritiro dell'acciaio in fase di saldatura e ogni altra imperfezione, come il rilassamento dei cavi. Per questo motivo, per ovviare a tali problematiche i fori e le saldature dei giunti sono stati realizzati con le aste già nella loro posizione finale. Gli elementi compressi sono stati finemente modellati in tutti i loro dettagli ed imperfezioni, per tenere conto dei possibili problemi dovuti al carico di punta.



**Fig. 1.52:** Von Gerkan, Marg and partners, Torre per la fiera di Rostock, Germania, 2003

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

L'*Instant Skyscraper* è un progetto presentato all'edizione della Evolo Skyscraper Competition nel 2009, dagli architetti australiani Farzin Lirfijam e Jerome Frumer. Quest'idea riformula l'ambizione umana per l'espansione verticale basata sul concetto di massimo ritorno economico in termini commerciali e di opulenza. Si prevede un edificio in grado di poter essere utilizzato in zone colpite da calamità e situazioni d'emergenza, garantendo simultaneamente una realizzazione rapida, adattabile e stabile. L'idea progettuale dell'*Instant Skyscraper* si basa sui concetti visionari di Fuller, sottolineando la sinergia tra la struttura leggera e le geometrie. Il principio tensegrity è sfruttato per dar vita a progetti di necessità istantanea, strutture di lungo periodo in grado però di adattarsi al contesto in rapido cambiamento. Questo lavoro pone la sua attenzione sull'incredibile flessibilità e adattabilità delle strutture tensegrity. In particolare, il concetto di tensegrity è stato annoverato come un buon candidato per lo sviluppo di strutture architettoniche rapidamente realizzabili. Infatti, il sistema strutturale che è stato sviluppato per questa proposta è estremamente adattabile ed incredibilmente stabile. La struttura arriverebbe in loco ancora imballata ed una volta montata verrebbe aggiunta una forza di tensione ai cavi orizzontali che collegano i moduli. La natura modulare di questa struttura garantisce il suo utilizzo in diverse condizioni climatiche, ambientali e spaziali. Inoltre, ogni modulo può essere preprogrammato per includere i servizi essenziali come i locali riservati alla sanità, l'amministrazione e gli alloggi.

La facciata elastica aggiunge stabilità strutturale e comprende collettori solari collegati a celle di stoccaggio di energia e impianti di raccolta dell'acqua piovana. L'energia catturata e l'acqua viene distribuita ad ogni

livello del pavimento tramite una griglia di servizi di costruzione contenuta all'interno di ogni solaio.

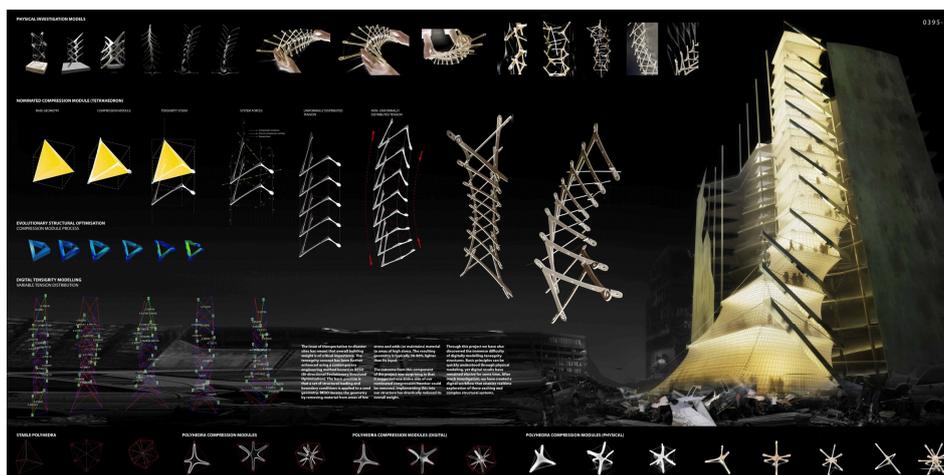


Fig. 1.53: Farzin Lirfi-jam e Jerome Frumer, *Instant Skyscraper*, 2009

L'unico esempio di un ponte tensegrale realmente realizzato è il *Kurilpa Bridge* a Brisbane, in Australia. Questo ponte, ciclabile e pedonale, ha una lunghezza complessiva di 470 m, e la campata più grande è di 128 m. Presenta due grandi piattaforme di osservazione e relax, due aree di sosta e una tettoia continua per tutta la lunghezza del ponte. La copertura è supportata da una struttura secondaria in tensegrity. Si stima che sono stati utilizzati circa 550 tonnellate di acciaio strutturale e 6,8 km di cavi.

Il complesso sistema di cablaggio dispone di 80 cavi principali di filamenti elicoidali mentre i cavi tensegrity sono 252 realizzati in acciaio inossidabile superduplex<sup>9</sup>

<sup>9</sup> Nel 1960 Langley Alloys ha elaborato la prima lega 25% Chromium Duplex commercialmente disponibile, Ferralium 255, e ha coniato la frase Super Duplex. Ha fatto da pioniere nell'uso di una aggiunta deliberata di azoto al fine di migliorare la duttilità e la resistenza alla corrosione. Leghe Super Duplex sono caratterizzate da un

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

La stabilità del ponte è garantita da una configurazione di un complesso di cavi in acciaio inox ad alta resistenza.



**Fig. 1.54:** Cox Rayner Architects e Arup Engineers, *Kurilpa Bridge*, Brisbane, Australia, 2009

---

maggior contenuto di cromo rispetto al duplex inox, duplex standard, solitamente intorno al 25% e a PREN 40 ( $PREN = Cr\% + 3.3Mo\% + 16N\%$ ) ed offre una migliorata resistenza alla corrosione nonché proprietà meccaniche ottimizzate.

---

*Dott. Ing. Maria Chiara Cimmino*

## CAPITOLO 2

### COSTRUZIONE DI APPARATI E CATEGORIE OPERATIVE

#### 2.1 Progetto dell'ombra

Una volta analizzato lo stato dell'arte degli ambiti relativi alla ricerca in oggetto (sistemi di schermature solari intelligenti e tecnologia *tensegrity*) si passa alla costruzione degli apparati e delle categorie operative, basi indispensabili per la strutturazione di un approccio progettuale per schermi solari intelligenti in tecnologia *tensegrity*. In letteratura è possibile reperire numerosi e differenti approcci alla progettazione di schermature solari tradizionali. Ci si può avvalere di modelli reali in scala, di strumenti di modellazione e simulazione software, maschere di ombreggiamento, o ancora metodi grafici. È possibile identificare tre fasi fondamentali comuni alle diverse metodologie di progettazione<sup>1</sup>

- identificazione del periodo dell'anno per il quale si richiede la schermatura dell'edificio dalla radiazione solare;
- determinazione delle prestazioni degli elementi schermanti (in quale periodo dell'anno devono risultare efficaci);

---

<sup>1</sup> Szokolay SV, PLEA Notes: Solar Geometry. PLEA (Passive and Low Energy Architecture) and University of Queensland, 1996

- progettazione delle caratteristiche geometriche dell'elemento schermante.

I paragrafi seguenti sono organizzati in modo da seguire queste semplici indicazioni progettuali, sviluppando infine gli strumenti matematici utili all'approccio progettuale della schermatura solare in tensesgrity.

## ***2.2 I raggi solari e le ombre generate dal movimento del Sole***

Preliminarmente è necessario definire alcune variabili indispensabili per stabilire criteri efficaci per la progettazione delle schermature. Innanzitutto si individuano le caratteristiche fisiche e geometriche dei raggi solari.

Sotto l'aspetto fisico, la radiazione solare, prima di impattare sulla superficie terrestre, deve attraversare il mezzo gassoso dell'atmosfera. La radiazione solare intercettata dalla Terra, inclusa l'atmosfera stessa, è pari a circa il 35% della radiazione proveniente dallo spazio. La riflessione dell'energia su di una superficie è chiamata albedo di tale superficie. L'albedo della Terra è nel suo insieme pari a 35-40%, dove la maggiore quota in tal senso è rappresentata dalla riflessione delle nubi atmosferiche e dal pulviscolo, ma non sono trascurabili le riflessioni che comunque si ottengono sulla superficie terrestre per mezzo di superfici come acqua, neve, sabbia, ecc. Parte della radiazione solare che attraversa l'atmosfera terrestre è poi diffranta in tutte le direzioni per l'interazione con le molecole dell'aria e per le particelle pulviscolari in sospensione nell'aria. Il risultato di tale diffrazione è che la radiazione solare giunge praticamente

da ogni direzione sulla superficie terrestre attraverso la volta celeste. Dopo che nubi e pulviscolo hanno rifratto e riflesso circa un terzo dell'energia incidente, un ulteriore 10-15% è assorbito dal vapore d'acqua e dall'anidride carbonica, in grado di assorbire la quota infrarossa, in bassa frequenza, e dall'ozono, che assorbe invece l'ultravioletto, ossia le onde in alta frequenza. Per poter valutare quale sia l'effettiva entità della radiazione solare incidente sulla superficie terrestre va tenuto in conto altresì lo spessore dell'atmosfera che la radiazione deve essere in grado di attraversare. Maggiore sarà lo strato da attraversare, maggiore sarà il contenuto energetico trattenuto dall'atmosfera prima che la radiazione solare possa giungere sulla superficie terrestre. Allo stesso modo, più si sale in quota sulla superficie terrestre (dal livello del mare alle zone più rilevanti montuose), dove si tende ad avvicinarsi a strati sempre minori di atmosfera, più il contenuto energetico della radiazione tende ad aumentare al suolo. Relativamente all'inclinazione dei raggi solari che impattano sulla superficie terrestre<sup>2</sup>, si ricorda che, in accordo con la legge di Lambert, da

---

<sup>2</sup> Si supponga un osservatore posto sulla Terra e la sfera celeste logicamente concentrica alla Terra. Ad un dato istante, l'osservatore presenterà una posizione nella volta celeste identificata dal suo zenit, ossia il punto corrispondente all'intersezione della volta celeste con la normale alla superficie terrestre ove è posto l'osservatore. Sulla sfera celeste, in posizione opposta allo zenit, c'è il nadir. L'orizzonte dell'osservatore è invece la circonferenza ricavata dall'intersezione della sfera celeste con il piano passante per il centro della Terra e ortogonale alla linea congiungente il centro stesso con lo zenit. L'angolo zenitale ( $\theta_z$ ) è l'angolo formato dalla direzione dello zenit con la congiungente l'osservatore con il Sole (praticamente l'angolo letto sulla sfera celeste congiungente lo zenit con il Sole). Questo angolo può al più variare tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$ . La posizione del Sole rispetto ad un punto sulla Terra è determinata dall'angolo di altezza solare,  $\alpha$ , e dall'angolo azimutale,  $\gamma$ . In particolare, l'altezza solare o altitudine solare  $\alpha$  è l'angolo formato dalla direzione dei raggi solari diretti verso la Terra con l'orizzonte, mentre l'angolo azimutale o azimut solare  $\gamma$  è l'angolo formato tra la proiezione sul piano orizzontale dei raggi solari e la direzione sud; è positivo se la proiezione cade

tale angolo dipende la quantità di energia che la superficie stessa riceve. Potendosi ritenere, infatti, che la radiazione solare incide sulla superficie terrestre con raggi tendenzialmente paralleli, si può constatare che una superficie ortogonale alla direzione dei raggi solari riceverà una quota energetica maggiore di una superficie che ne risulterà maggiormente e variamente inclinata.

Per le inclinazioni solari delle ore tendenti al tramonto, il calore percepito è minore rispetto ai raggi relativi ad inclinazioni in orari prossimi al mezzogiorno, quando il sole tende ad essere zenitale sull'orizzontale. La quantità totale dell'energia intercettata da una superficie comprende un'aliquota di radiazione direttamente intercettata e una di radiazione diffusa o riflessa. La cosiddetta radiazione diffusa, può arrivare a valere il 50% del totale quando il Sole è sull'orizzonte, il 100% per un cielo interamente coperto, mentre è un'aliquota trascurabile per giorni limpidi. L'intensità della radiazione che si riflette su una superficie dipende da diversi fattori, quali la finitura, il materiale e l'angolo di incidenza dei raggi. Per poter quindi impedire o disporre di una determinata quantità di energia solare, sarà necessario usufruire di un'adeguata schermatura intercettante, evenienza questa alla base dei sistemi di captazione solare.

---

verso est (prima del mezzogiorno solare) ed è negativa se la proiezione cade verso ovest (dopo il mezzogiorno). Esso può variare tra  $0^\circ$  e  $\pm 180^\circ$ . Questi due angoli dipendono a loro volta dalla declinazione  $\delta$ , dalla latitudine  $\phi$  e dall'angolo orario  $\omega$ , definito come la distanza angolare tra il Sole e la sua posizione a mezzogiorno lungo la sua traiettoria apparente sulla volta celeste. Definiti gli angoli di azimut e di declinazione, si può affermare che per una data località, quindi per data posizione geografica, in assenza di rifrazione dovuta all'atmosfera terrestre, la posizione del Sole in ogni istante dell'anno può essere ottenuta da relazioni trigonometriche che legano altezza solare, latitudine e ora solare.

Considerando esclusivamente la caratteristica vettoriale dei raggi solari, ci si può avvalere delle regole stabilite nell'ambito della geometria proiettiva e della teoria delle ombre ad essa correlata. Da questa constatazione si comprende che, nell'operare una valutazione degli effetti di ombreggiamento, per i quali può essere richiesto che una precisa porzione areale venga posta in ombra, il risultato può essere raggiunto, a parità di altre caratteristiche, secondo disposizioni e alternative molteplici del piano d'ombra.

Il medesimo risultato di una porzione precisa in ombra sul piano quadro del riferimento può, quindi, essere ottenuto non solo dall'interposizione tra quadro e sorgente luminosa di porzioni di superficie piana, ma anche utilizzando superfici complesse di ordine superiore (a semplice curvatura, a doppia curvatura ecc.) o piane composte.

L'ombra portata su di una superficie orizzontale può cambiare secondo due gradi di libertà, ossia possono cambiare due fattori tali per cui si ha una modificazione del risultato della proiezione:

- può variare l'inclinazione della direzione solare rispetto alla giacitura del piano quadro e tale inclinazione può in teoria assumere valori teorici compresi tra  $0^\circ$  e  $180^\circ$ , ma che trovano riscontro nella realtà vanno assunte nell'intervallo tra  $0^\circ$  e  $90^\circ$  e sono dipendenti dalla latitudine del sito oggetto dell'analisi.
- a parità di inclinazione assunta dal fascio di raggi proiettanti, può variare la direzione sul quadro della proiezione della direzione solare rispetto ad una direzione sul piano assunta quale riferimento. Nella realtà dei fatti essa viene assunta coincidente con la direzione del Sud e gli angoli utilizzabili per finalità di studio

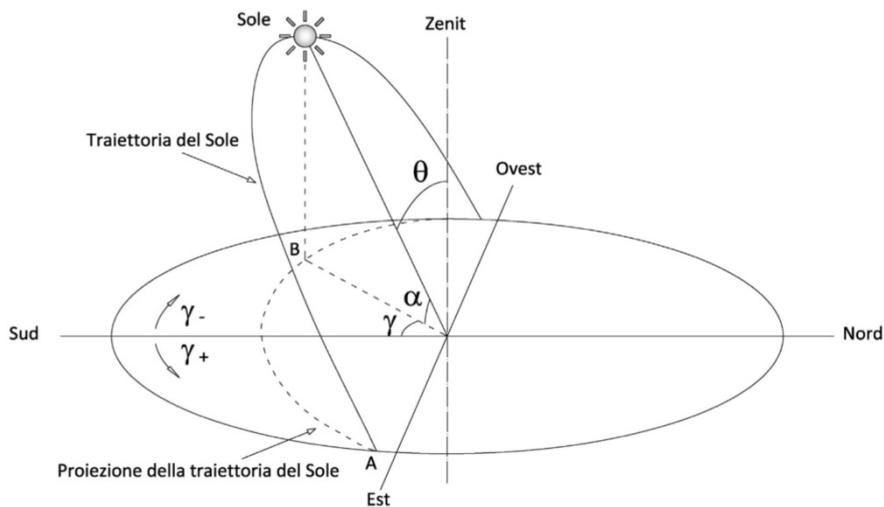
solare sono compresi circa in un mezzo di angolo giro, di cui  $45^\circ$  gradi in senso orario a partire dalla direzione assunta a riferimento e  $45^\circ$  nel verso opposto, cioè la traiettoria solare si discosta dalla direzione del Sud per angoli massimi rappresentativi dell'angolo di alba e dell'angolo di tramonto del Sole.

Lo scopo di un'adeguata ombreggiatura di un'opera civile attiene, tra gli altri requisiti richiesti, al rispetto del comfort nella fruizione degli ambienti. Pertanto è necessario, nelle diverse condizioni di controllo della radiazione solare di edifici, definire quali siano le parti dell'involucro colpite dal Sole, in modo da valutare le porzioni superficiali entro cui si ritiene che i raggi solari non comportino disagio psico-fisico nell'utenza. A tal fine, è possibile rappresentare graficamente il moto apparente del Sole nella volta celeste mediante dei cosiddetti diagrammi dei percorsi solari, ovvero delle carte solari proiettate sul piano orizzontale, *diagramma polare*, o sul piano verticale, *diagramma cilindrico*. Sono pertanto diagrammi che forniscono giorno per giorno e ora per ora la posizione del Sole. In questi diagrammi, tracciati per fissato valore della latitudine, si riportano l'altezza solare,  $\alpha$ , e l'angolo azimutale,  $\gamma$ , nei vari periodi dell'anno. Il valore degli angoli  $\alpha$  e  $\gamma$  dipende dall'ora del giorno, dal giorno dell'anno e dalla località in esame. Devono, dunque, essere noti, rispettivamente:

- la latitudine, cioè l'angolo misurato tra l'equatore terrestre e la località in esame (da  $0^\circ$  a  $90^\circ$  nord per l'emisfero settentrionale);
- la declinazione  $\delta$ , ovvero l'angolo tra la posizione del sole al mezzogiorno solare ed il piano equatoriale (da  $-23,45^\circ$  al solstizio d'inverno a  $+23,45^\circ$  al solstizio d'estate);

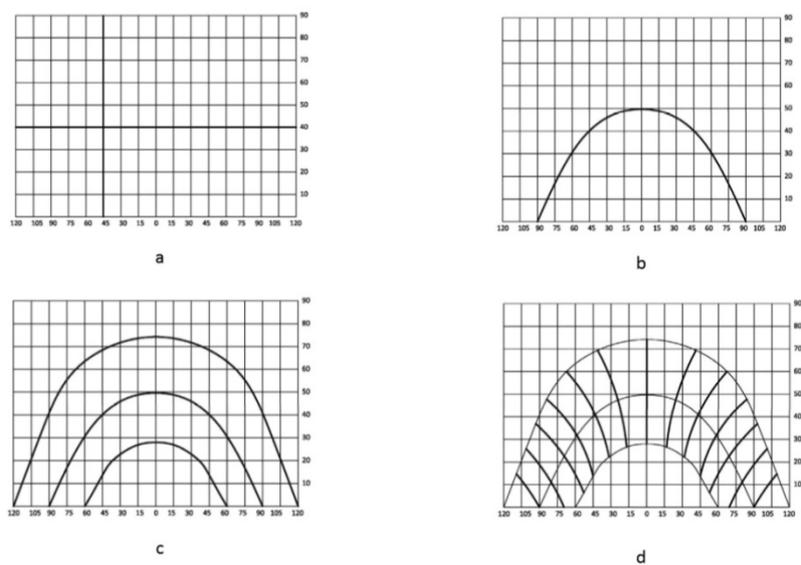
- l'angolo orario  $\omega$ , cioè l'angolo formato dal piano meridiano passante per l'osservatore con il piano meridiano passante per il sole.

Il *diagramma solare* polare è una proiezione delle traiettorie del Sole sul piano orizzontale, ottenibile riportando graficamente i valori dell'altezza solare e dell'azimut per la località considerata, in funzione del tempo solare vero e della declinazione. La proiezione della traiettoria solare di raggio unitario descrive sul piano orizzontale il percorso solare. Facendo riferimento alla fig. 2.1, possiamo notare il punto A ottenuto dall'azimut solare all'ora del sorgere del Sole e il punto B rappresentante qualsiasi ora del giorno dato dall'azimut solare e dal raggio in B uscente dall'origine del riferimento. Tale distanza coincide, per le ipotesi fatte, con il valore di  $\cos\alpha$ .



**Fig. 2.1:** Traiettoria solare e riferimento geocentrico.

I *diagrammi cilindrici* o in coordinate cartesiane danno una proiezione verticale del percorso solare così come sarebbe visto da un osservatore posto sulla Terra. Tale diagramma viene spesso usato nelle applicazioni pratiche per ottenere velocemente, in maniera grafica, l'altezza solare e l'azimut solare. Per il diagramma cilindrico le linee orizzontali rappresentano gli angoli di altezza solare sopra l'orizzonte, distanziati a passi di 10 gradi. Le linee verticali rappresentano gli angoli azimutali costanti, con incrementi di 15 gradi. Il reticolo del diagramma cilindrico rappresenta quindi gli angoli verticali e orizzontali dell'intera volta celeste e consente di trasferire la posizione del Sole dalla volta celeste alla carta solare. Nel concreto, ad esempio, qualora in un determinato momento l'altezza solare è pari a  $\alpha = 40^\circ$  e il Sole appaia, rispetto al punto di osservazione, ad un determinato azimut di 45 gradi, l'incrocio tra le due linee del riferimento relative corrisponde ad una coppia di  $\alpha$  e  $\gamma$  che indica la posizione del Sole nel momento dell'anno considerato. Noti gli angoli dell'altezza solare e dell'angolo azimutale si può stabilire la posizione del Sole nel cielo, e collegando i punti che rappresentano le posizioni del Sole nelle diverse ore del giorno, si può tracciare il percorso solare in quel giorno. Si può così tracciare il percorso del Sole per ogni giorno dell'anno. Anche in questo caso, le traiettorie solari sono tracciate al ventunesimo giorno di ogni mese.



**Fig. 2.2:** Genesi del diagramma cilindrico.

Infine, collegando tra loro i punti rispettivi della medesima ora del giorno su ciascun percorso solare, si ottengono delle isolinee relative ad una determinata ora. Il risultato grafico è una famiglia di curve univoche a parità di latitudine, ognuna relativa ad un mese dell'anno e nelle quali possono identificarsi delle linee di involuppo relative alle ore.

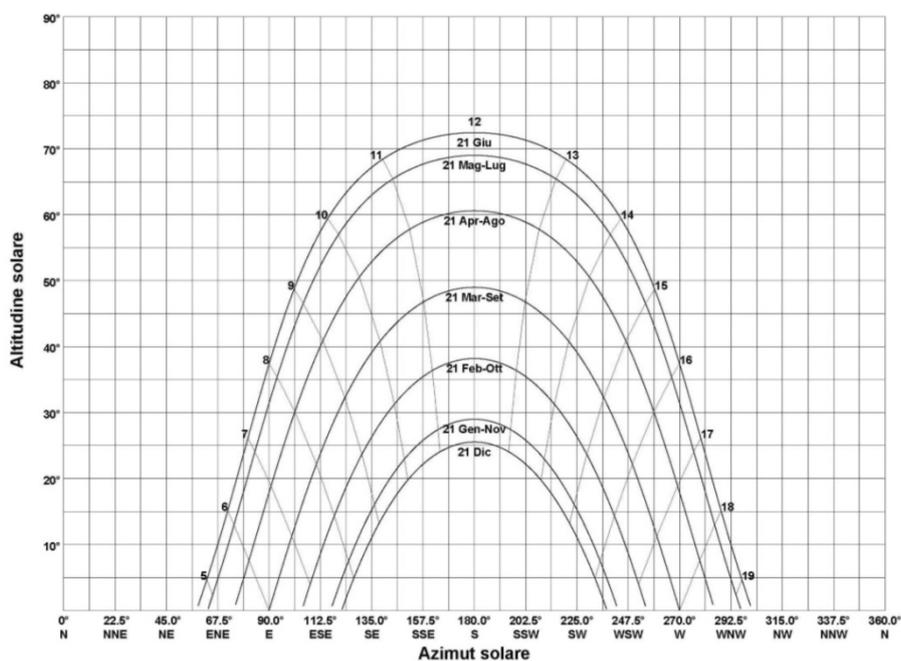


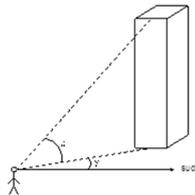
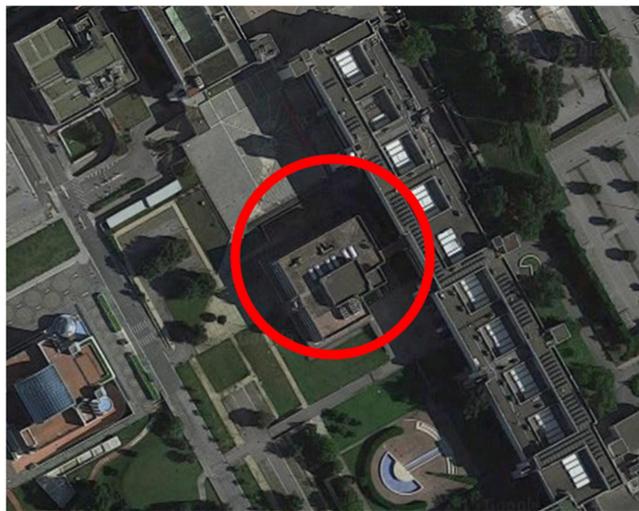
Fig. 2.3: Diagramma polare relativo ad una latitudine 41 Nord.

### 2.2.1 Caso studio

L'edificio dell'invariante 9C della facoltà di Ingegneria all'interno del campus dell'Università degli Studi di Salerno ben si presta come caso studio. Infatti, presenta due facciate esposte in maniera favorevole, cioè a Sud-Est e Sud-Ovest.

È stato realizzato il diagramma solare polare per verificare l'esposizione dell'edificio durante l'anno e per calcolare l'influenza delle ombre degli edifici circostanti rispetto a quello oggetto dello studio. Come si evince dal grafico, gli edifici circostanti (rappresentati dalle sagome gialle) non costituiscono ostacolo all'irraggiamento delle superfici.

Le fotografie e le riprese con la termocamera sono state effettuate nella seconda metà del mese di giugno alle ore 13:00. In questo orario entrambe le facciate sono illuminate completamente. Le termografie sono state fatte sia all'esterno che all'interno dell'edificio per poter valutare in maniera sommaria l'effetto dell'irraggiamento solare diretto sull'edificio.

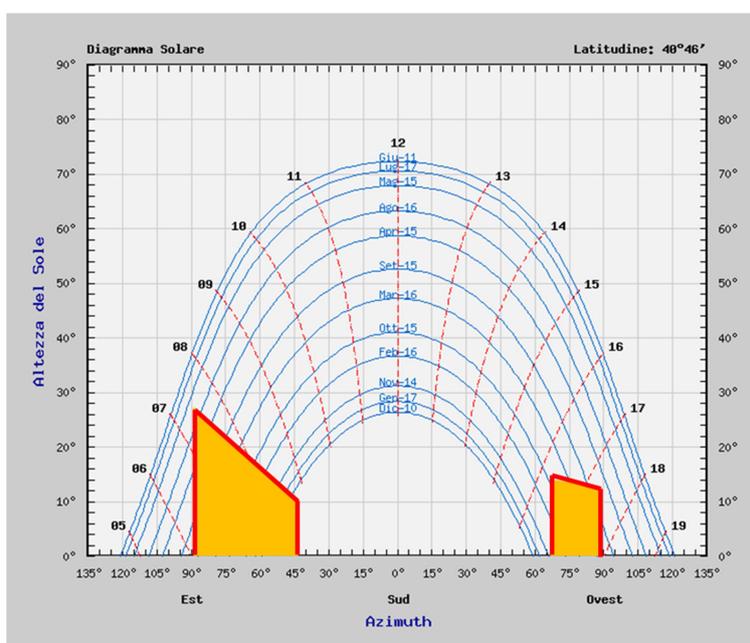


**Fig. 2.4:** Individuazione dell'edificio all'interno del campus dell'Università degli Studi di Salerno.

L'edificio è costituito da una struttura prefabbricata in conglomerato cementizio armato. Le chiusure verticali opache sono realizzate con pannelli prefabbricati in conglomerato cementizio armato stratificati, al cui interno è presente l'isolante termico. Le chiusure verticali trasparenti sono

realizzate con infissi in alluminio a taglio termico e vetrocamera riempita con argon.

Dalle termografie si può notare come l'irraggiamento diretto delle facciate determina l'innalzamento della temperatura superficiale esterna delle chiusure, in particolare di quelle trasparenti. Per i telai degli infissi si registra un incremento di temperatura di quasi dieci gradi centigradi rispetto alle chiusure opache.

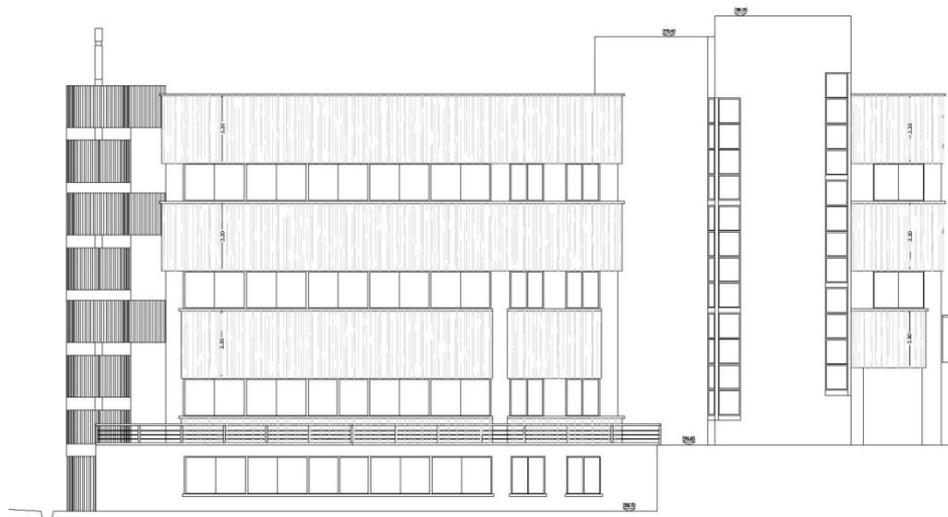


**Fig. 2.5:** Diagramma solare polare del sito dove sorge l'edificio con l'ingombro delle ombre degli edifici circostanti.

Osservando le termografie delle facciate interne si può osservare come l'incremento di temperatura superficiale si registri anche all'interno dell'edificio. La parete è ad una temperatura superiore rispetto a quella dell'aria interna agli ambienti e regolata dall'impianto HVAC. Ciò comporta

un incremento della temperatura dell'aria interna a contatto con la parete e un conseguente aggravio per l'impianto di raffrescamento. Inoltre si genera una sensazione di discomfort per chi si trova in prossimità della parete stessa avvertendo il calore irraggiato dalla parete riscaldata.

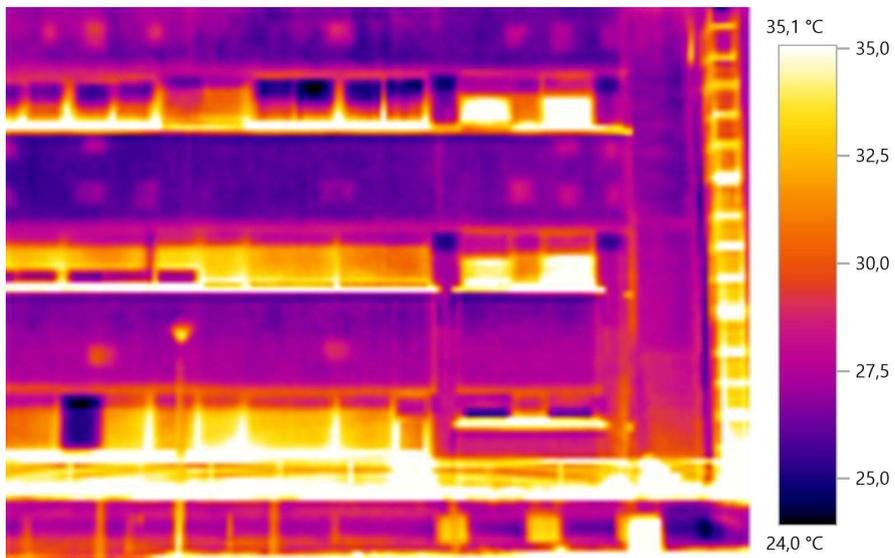
L'applicazione di schermature solari esterne permetterebbe di abbassare la temperatura superficiale delle chiusure verticali impedendo l'irraggiamento diretto delle stesse. Questo tipo di soluzione permetterebbe di migliorare energeticamente l'edificio senza prevedere interventi di ristrutturazione tali da necessitare l'interruzione delle attività all'interno dell'edificio.



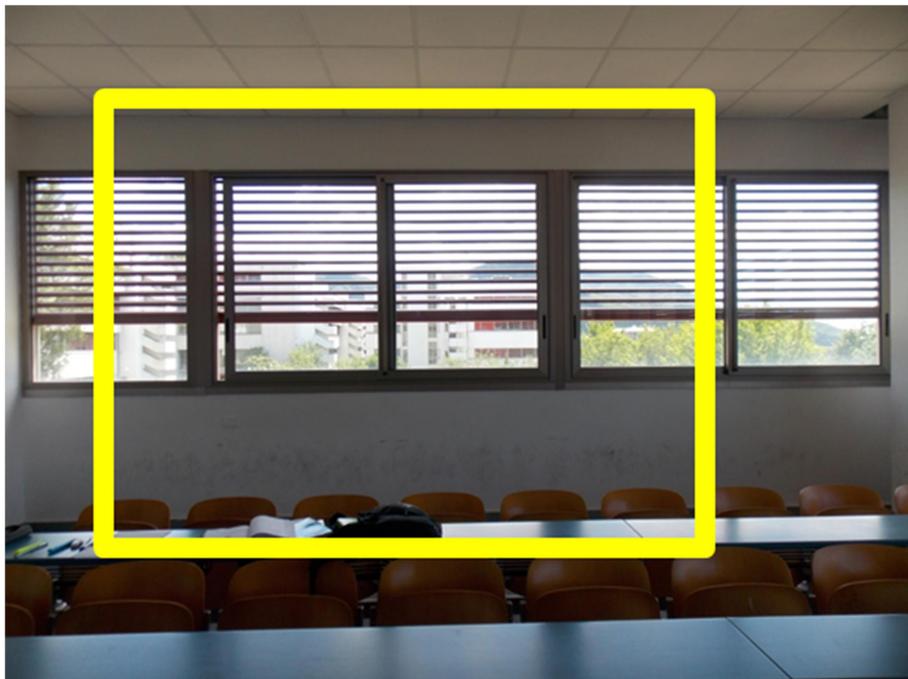
**Fig. 2.6:** Prospetto Sud-Est dell'edificio.



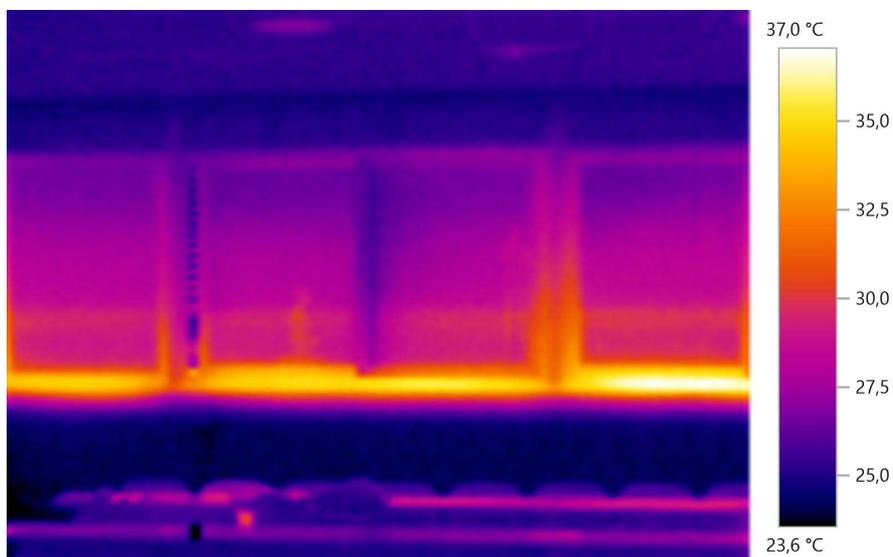
**Fig. 2.7:** Prospetto Sud-Est dell'edificio.



**Fig. 2.8:** Termografia del prospetto Sud-Est dell'edificio.

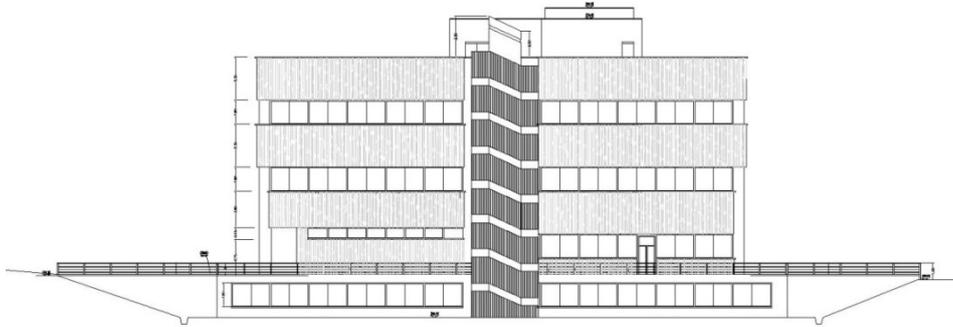


**Fig. 2.9:** Interno del prospetto Sud-Est dell'edificio.



**Fig. 2.10:** Termografia dell'interno del prospetto Sud-Est.

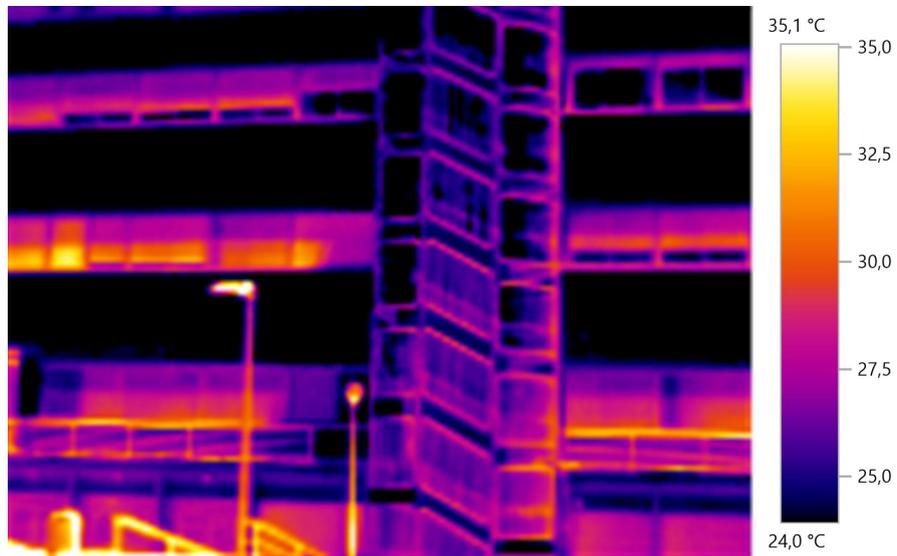
*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



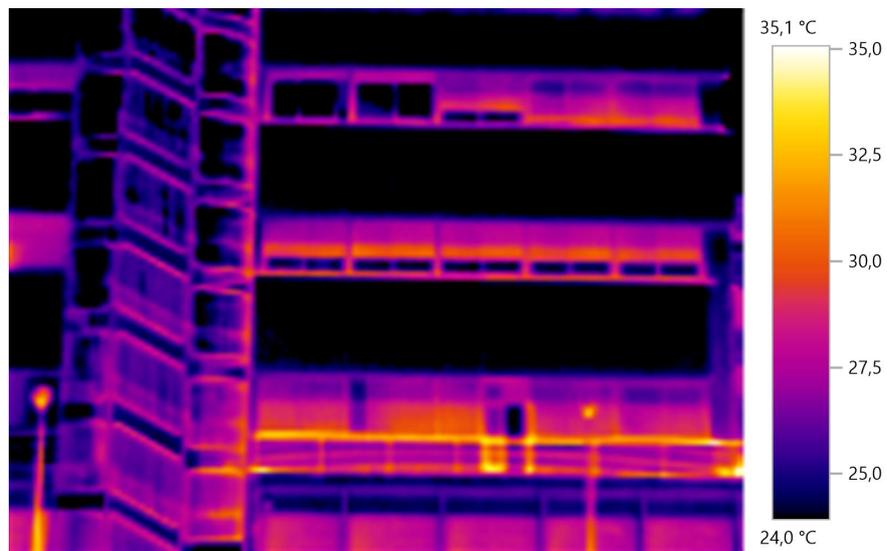
**Fig. 2.11:** Prospetto Sud-Ovest dell'edificio.



**Fig. 2.12:** Prospetto Sud-Ovest dell'edificio.



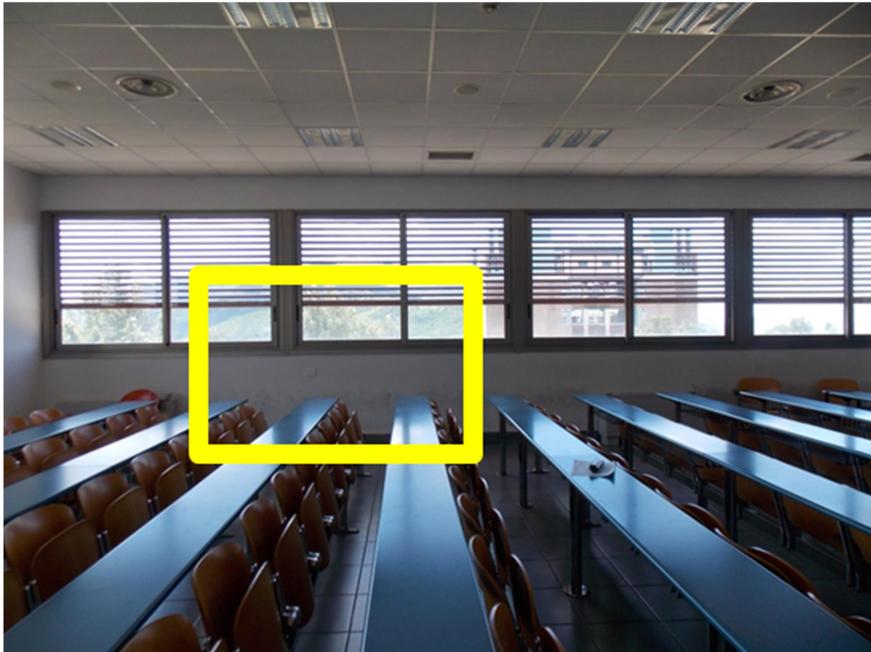
**Fig. 2.13:** Termografia del prospetto Sud-Ovest dell'edificio.



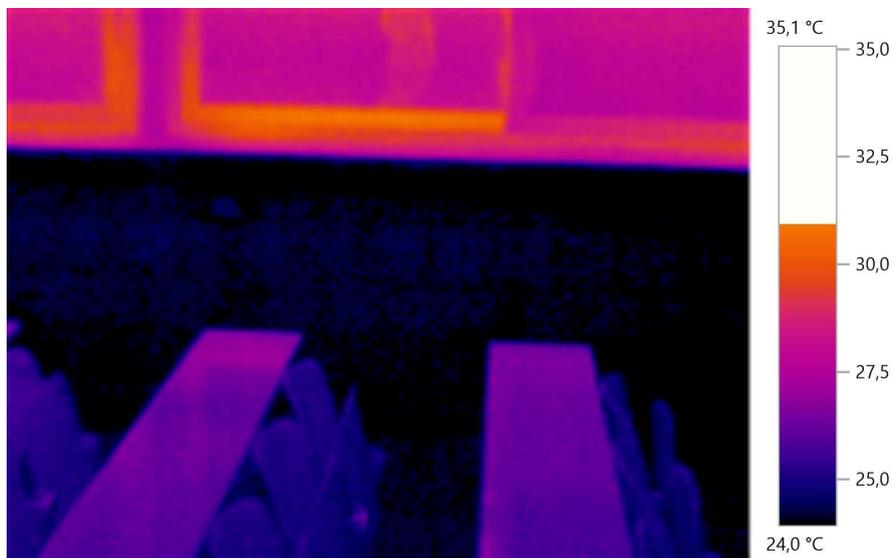
**Fig. 2.14:** Termografia del prospetto Sud-Est dell'edificio

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 2.15:** Interno del prospetto Sud-Ovest dell'edificio.



**Fig. 2.16:** Termografia dell'interno del prospetto Sud-Ovest.

## **2.3 Approccio alla progettazione Tensegrity**

Le *tensegrities* sono strutture pieghevoli, costituite da cavi e aste collegati da cerniere nodali soltanto, tali che, quando le si dispiega facendo loro assumere una configurazione spaziale pre-sollecitata, tutte le aste risultano compresse (puntoni) e tutti i cavi tesi, due puntoni qualunque non risultano mai contigui e i cavi formano un insieme connesso. Per la stessa topologia (cioè, per la stessa collezione strutturata di nodi corredati di cavi ed aste), possono darsi diverse configurazioni in cui una data struttura pieghevole si comporta come una *tensegrity*; è possibile passare dall'una all'altra di queste variando simultaneamente le lunghezze di due o più elementi.

Nei paragrafi seguenti si sono individuati gli strumenti matematici utili a definire i due approcci progettuali per le schermature solari, ovvero quello per forma e quello per minimizzazione di massa, tramite il *Force Density Method*.

### **2.3.1 Teoria generale delle strutture tensegrity**

In questo paragrafo verrà esposta brevemente la teoria generale delle strutture reticolari in tre dimensioni, costituite da aste e cerniere, caricate solo nei nodi, nell'ipotesi classica di piccoli spostamenti. Le equazioni di equilibrio sono scritte per la struttura soggetta ai carichi nella configurazione iniziale indeformata. Nel seguito verranno analizzati sistemi costituiti da fili o cavi e aste; bisognerà quindi verificare a posteriori l'effettivo stato di tensione in tali elementi, ma non sarà presa in considerazione l'instabilità delle aste per carico di punta.

Le proprietà di una struttura discendono dalle caratteristiche della matrice di equilibrio o, equivalentemente, dalla matrice di congruenza, più precisamente dai quattro sottospazi vettoriali associati a queste. Nel seguito si illustrerà il significato fisico di questi sottospazi e si individueranno le possibili tipologie di struttura. In particolare verranno analizzate le strutture indeterminate, sia staticamente che cinematicamente, e le condizioni sotto le quali sistemi possiedono una rigidità pur ammettendo dei cinematismi.

Si consideri un sistema costituito da  $n$  nodi connessi tra loro tramite  $b$  elementi rettilinei (aste) e vincolati a terra con  $c$  vincoli cinematici, mentre i vincoli tra le aste sono delle cerniere sferiche nei nodi. Nell'ipotesi di carichi esterni agenti solo sui nodi, lo stato di sollecitazione nelle aste è di puro sforzo normale. I parametri statici del sistema sono: gli sforzi  $N_b$ ,  $b$  in numero, positivi se di trazione; considerando i  $c$  vincoli sui nodi, le  $3n - c$  componenti cartesiane delle forze  $f_n$  agenti sui nodi. I parametri cinematici del sistema, duali di quelli statici, sono: gli allungamenti  $\Delta l_b$  delle aste; le  $3n - c$  componenti degli spostamenti dei nodi  $d_n$ . Nel seguito, per le grandezze riferite alle aste, si farà riferimento al pedice  $b$  per indicare l'asta generica e ai pedici  $ij$  insieme per indicare l'asta che connette i nodi  $i$  e  $j$ .

Le equazioni di equilibrio sono riferite ai nodi del sistema e si scrivono nel modo seguente:

$$\sum_i \frac{x_i - x_j}{l_{ij}} N_{ij} + f_{ix} = 0$$

Questa equazione rappresenta l'equilibrio del nodo  $j$ -esimo proiettata lungo l'asse  $x$ : la sommatoria è estesa a tutti i nodi connessi con il nodo  $j$ -esimo; il termine  $\frac{x_i - x_j}{l_{ij}}$  è il coseno direttore dell'asta  $ij$  rispetto all'asse  $x$ .  
Risulta conveniente includere nel vettore delle sollecitazioni nelle aste la lunghezza dell'asta stessa; si ottengono così i cosiddetti coefficienti di sollecitazione:

$$t_b = \frac{N_b}{l_b}$$

Si può quindi riscrivere l'equazione per il  $j$ -esimo nodo, in forma vettoriale si ha:

$$\sum_i (x_i - x_j) t_{ij} = f_j$$

Si ottengono in questo modo  $3n - c$  equazioni nelle  $b$  incognite  $t_{ij}$  le quali, scritte in forma compatta, danno il sistema:

$$\mathbf{A} \mathbf{t} = \mathbf{f}$$

la matrice  $\mathbf{A}$ , di dimensioni  $(3n - c) \times b$ , è la matrice di equilibrio della struttura. Le equazioni di congruenza dei piccoli spostamenti del sistema mettono in relazione l'allungamento delle aste con gli spostamenti dei nodi da esse collegati. Per l'asta generica si ha:

$$\frac{x_i - x_j}{l_{ij}} \cdot (\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j) = \Delta l_{ij}$$

dove il termine  $\frac{x_i - x_j}{l_{ij}}$  rappresenta il versore dell'asta  $ij$ ,  $\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j$  è lo spostamento del nodo  $i$  relativo al nodo  $j$ , il prodotto scalare fornisce l'allungamento dell'asta  $ij$ .

Come prima, conviene includere nel vettore degli allungamenti delle aste le lunghezze delle medesime. Si ottengono così i cosiddetti coefficienti di deformazione:

$$e_b = l_b \Delta l_b$$

e le equazioni si scrivono:

$$(\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j)(\mathbf{d}_i - \mathbf{d}_j) = e_{ij}$$

Si ottengono  $b$  equazioni nelle  $3n - c$  incognite  $\mathbf{d}_n$ ; scritte in forma compatta,

$$\mathbf{B}\mathbf{d} = \mathbf{e}$$

la matrice  $\mathbf{B}$ , di dimensioni  $b \times (3n - c)$ , è la matrice di congruenza della struttura. Si assumono quindi i parametri di sollecitazione e di deformazione generalizzati in funzione delle lunghezze degli elementi, questo metodo prende il nome di metodo dei coefficienti di densità di forza. Vale la relazione seguente:

$$\mathbf{B} = \mathbf{A}^T$$

che si dimostra facilmente applicando il principio dei lavori virtuali. Infatti, dato un sistema di forze e sollecitazioni equilibrato e un sistema di spostamenti e deformazioni congruente si ha:

$$f \cdot d = t \cdot e$$

ma, ricordando  $At = f$  e  $Bd = e$ :

$$f \cdot d = At \cdot d = t \cdot e = t \cdot Bd = B^T t \cdot d$$

si ottiene quindi  $B = A^T$ .

- I. Le caratterizzazioni della struttura si deducono dai quattro sottospazi vettoriali fondamentali associati alla matrice di equilibrio o, equivalentemente, alla matrice di congruenza. Questi sottospazi sono: lo spazio generato dalle colonne, o immagine di  $A$ ,
- II. lo spazio nullo, o nucleo di  $A$ ,
- III. lo spazio generato dalle righe, cioè l'immagine della trasposta di  $A$  e, infine,
- IV. lo spazio nullo a sinistra di  $A$ , cioè il nucleo della trasposta di  $A$ .

Se  $r$  è il rango di  $A$  matrice con  $b$  righe e  $3n - c$  colonne, allora la dimensione dei sottospazi è:

$$r = \text{Dim}(\text{Im}A) = \text{im}(\text{Im}A^T)$$

$$s = b - r = \text{Dim}(\text{Ker}A)$$

$$m = 3n - c - r = \text{Dim}(\text{Ker}A^T)$$

Eliminando  $r$  dalle ultime due relazioni si ricava la formula fondamentale

$$3n - c - b = m - s$$

generalizzazione della regola di Maxwell  $3n - c - b = 0$  affinché un sistema abbia un numero di equazioni pari al numero di incognite.

Le applicazioni lineari definite dalle matrici  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  mettono in relazione due spazi vettoriali: lo spazio dei nodi, di dimensione  $3n - c$ , e lo spazio degli elementi, di dimensione  $b$ .

La matrice  $\mathbf{A}$  è un'applicazione lineare tra lo spazio delle sollecitazioni nelle aste e lo spazio dei carichi esterni in equilibrio con esse. Analogamente, la matrice  $\mathbf{B}$  è un'applicazione lineare tra lo spazio degli spostamenti dei nodi e lo spazio degli allungamenti delle aste congruenti con essi. Il significato fisico dei sottospazi fondamentali è il seguente.

- I. Lo spazio generato dalle colonne di  $\mathbf{A}$  è lo spazio dei carichi (o meglio, dei vettori di carico) che possono essere equilibrati dalla struttura, i cosiddetti carichi compatibili; questo spazio, coincidendo con quello generato dalle righe di  $\mathbf{B}$ , rappresenta anche gli spostamenti dei nodi a cui è associata una variazione congruente di lunghezza delle aste, i cosiddetti spostamenti estensionali.
- II. Lo spazio nullo di  $\mathbf{A}$  è lo spazio delle sollecitazioni (dei vettori di sollecitazione) nelle aste in equilibrio con carichi esterni nulli, le cosiddette sollecitazioni autoequilibrate; in questo spazio, che coincide con lo spazio nullo a sinistra di  $\mathbf{B}$ , sono contenuti anche gli allungamenti incompatibili vale a dire quegli allungamenti che assegnati alle aste non permettono di preservare la connettività della struttura.
- III. Lo spazio generato dalle righe di  $\mathbf{A}$  rappresenta l'insieme delle sollecitazioni nelle aste che sono in equilibrio con i carichi

compatibili; inoltre questo spazio, essendo generato anche dalle colonne di  $\mathbf{B}$ , contiene gli allungamenti congruenti che assegnati alle aste preservano la connettività della struttura.

- IV. Infine lo spazio nullo a sinistra di  $\mathbf{A}$  contiene i carichi che non possono essere equilibrati dalla struttura, i cosiddetti carichi incompatibili; poiché questo spazio è anche il nucleo di  $\mathbf{B}$ , esso rappresenta gli spostamenti dei nodi che non provocano alcuna variazione di lunghezza nelle aste, i cosiddetti spostamenti inestensionali.

Com'è noto, i sottospazi fondamentali sono complementi ortogonali nei rispettivi spazi vettoriali dei nodi e degli elementi, in simboli:

$$Im(\mathbf{A}) \perp Ker(\mathbf{A}^T)$$

$$Ker(\mathbf{A}) \perp Im(\mathbf{A}^T)$$

La conoscenza di  $s$  e  $m$  fornisce informazioni sull'esistenza e l'unicità delle soluzioni dei sistemi prima visti. Si possono distinguere quattro casi a seconda che i valori di  $s$  e di  $m$  siano maggiori o uguali a zero.

- *Strutture isostatiche*,  $s = 0$ ,  $m = 0$ . In questo caso la matrice di equilibrio è quadrata di ordine massimo, vale a dire la soluzione dei sistemi  $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{f}$  e  $\mathbf{B}\mathbf{d} = \mathbf{e}$  esiste sempre ed è unica per qualsiasi condizione di carico e per qualsiasi valore degli allungamenti nelle aste. Si può affermare che: *le equazioni di equilibrio hanno una unica soluzione per qualsiasi condizione di carico se e solo se le equazioni di congruenza hanno una unica soluzione per qualsiasi valore degli*

*allungamenti delle aste* (dire che un sistema è staticamente determinato equivale a dire che esso è cinematicamente determinato).

- *Strutture staticamente indeterminate,  $s > 0, m = 0$* . In questo caso i vincoli sono sovrabbondanti e le equazioni di equilibrio ammettono più di una soluzione per qualsiasi condizione di carico; la struttura può possedere  $s$  stati di sollecitazione autoequilibrati indipendenti. Nel contempo, il sistema delle equazioni di congruenza è sovradeterminato e non ammette in generale soluzione; esistono però degli allungamenti delle aste per i quali la soluzione esiste ed è unica. Vale l'affermazione seguente: *esiste una condizione di carico per cui le equazioni di equilibrio hanno più di una soluzione se e solo se esistono allungamenti delle aste per cui le equazioni di congruenza non ammettono soluzione* (dire che un sistema è staticamente indeterminato equivale a dire che esso è cinematicamente sovradeterminato).
- *Strutture cinematicamente indeterminate,  $s = 0, m > 0$* . In questo caso i vincoli non sono sufficienti per rendere rigida la struttura, le equazioni di congruenza ammettono più di una soluzione per qualsiasi variazione di lunghezza nelle aste, esistono  $m$  cinematismi indipendenti. Contemporaneamente, il sistema delle equazioni di equilibrio è sovradeterminato, e non ammette soluzione eccetto per particolari condizioni di carico per cui la soluzione esiste ed è unica. In maniera del tutto analoga al caso precedente: *esiste una condizione di carico per cui le equazioni di equilibrio non ammettono soluzione se e solo se esistono allungamenti delle aste per cui le*

*equazioni di congruenza ammettono più di una soluzione* (dire che una struttura è cinematicamente indeterminata equivale a dire che essa è staticamente sovradeterminata).

- *Strutture indeterminate sia staticamente che cinematicamente,  $s > 0$ ,  $m > 0$* . In questo caso le affermazioni dei due casi precedenti valgono contemporaneamente, quindi queste strutture sono anche staticamente e cinematicamente sovradeterminate, presentano  $s$  stati di sollecitazione autoequilibrati e  $m$  cinematismi indipendenti.

Appartengono all'ultima tipologia alcune strutture che, in presenza di uno stato di sollecitazione autoequilibrato nella configurazione iniziale, presentano una rigidezza positiva, seppure di un ordine inferiore, anche nei confronti di quelle condizioni di carico cosiddette incompatibili. Le condizioni sotto le quali si osserva tale proprietà sono esposte di seguito.

Data la linearità dell'analisi esposta, è evidente che una struttura con  $m > 0$ , presenta dei cinematismi compatibili con variazione di lunghezza degli elementi nulla, purché si consideri una approssimazione al primo ordine negli spostamenti. Quindi se si individua un cinematismo con la teoria lineare, non si può stabilire di quale ordine sia la variazione di lunghezza degli elementi: essa può essere di un ordine uguale o maggiore al secondo, o anche esattamente nulla.

La proprietà di alcune strutture presollecitate appartenenti alla tipologia  $m > 0$ ,  $s > 0$  di possedere una rigidezza del primo ordine negli spostamenti può essere facilmente giustificata da un punto di vista energetico. Infatti se nella configurazione iniziale esiste uno stato di presollecitazione, la deformazione degli elementi sarà composta da una

quota costante, dovuta appunto alla presollecitazione, più una quota funzione dello spostamento. Questa funzione, nel caso in esame, è almeno quadratica nello spostamento. L'energia di deformazione del sistema, proporzionale al quadrato della deformazione, contiene quindi un termine anch'esso quadratico negli spostamenti a cui è associata una rigidezza del primo ordine.

Si consideri, come esempio, il semplice sistema piano costituito da due aste e tre cerniere allineate (fig. 2.17), la regola di Maxwell in due dimensioni si scrive:

$$2n - c - b = m - s$$

Risulta evidentemente  $m = s = 1$  quindi la struttura appartiene alla tipologia in esame. Essa ammette un cinematismo in cui il nodo centrale si sposta verticalmente di una quantità indefinita; allo stesso tempo è possibile uno stato di presollecitazione in cui le aste sono ambedue tese o compresse. Considerando la lunghezza naturale delle aste pari a  $l_N < l_0$  minore della lunghezza nella configurazione data, lo stato iniziale sarà di trazione con una forza pari a  $k(l_0 - l_N)$ , con  $k = \frac{EA}{l_N}$  rigidezza assiale nelle aste.

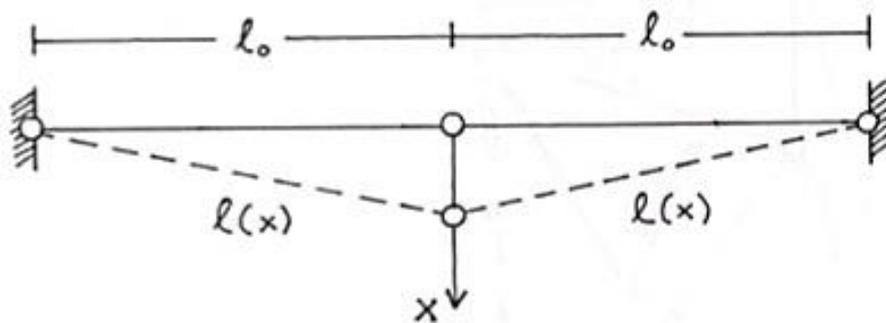


Fig. 2.17: Meccanismo infinitesimo del primo ordine.

La lunghezza  $l$  delle aste in funzione di un piccolo spostamento  $x$  del nodo centrale è data da:

$$l(x) = \sqrt{l_0^2 + x^2} = l_0 + \frac{x^2}{2l_0} + o(x^3)$$

la variazione di questa lunghezza è appunto del secondo ordine negli spostamenti. L'energia elastica del sistema è data da:

$$U(x) = k\Delta l^2 = k[l(x) - l_N]^2 = k\left[(l_0 - l_N)^2 + \frac{l_0 - l_N}{l_0} x^2 + o(x^3)\right]$$

La forza necessaria per spostare il nodo centrale verticalmente è la derivata dell'energia rispetto a  $x$ :

$$\frac{dU}{dx} = 2k\left(1 - \frac{l_N}{l_0}\right)x + o(x^2)$$

e contiene appunto un termine del primo ordine nello spostamento. La rigidezza propriamente detta del sistema, per una forza verticale applicata al nodo centrale è

$$K = 2k \left( 1 - \frac{l_N}{l_0} \right)$$

ed è direttamente proporzionale allo stato di presollecitazione iniziale  $k(l_0 - l_N)$  della struttura.

I meccanismi che presentano tale proprietà sono chiamati nella letteratura meccanismi infinitesimi del primo ordine. Presentano, se presollecitati, una rigidezza del primo ordine, a cui è associata una variazione di lunghezza degli elementi del secondo ordine negli spostamenti.

L'analisi lineare delle strutture consente l'identificazione di tali meccanismi.

La struttura dell'esempio precedente, al contrario di quanto dedotto dallo studio dei sottospazi fondamentali, è in grado di sopportare carichi incompatibili, che agiscono nella direzione del cinematismo. Il carico viene equilibrato geometricamente, in questo senso: pur restando costanti (al primo ordine) gli sforzi assiali nelle aste, la variazione di direzione di queste, con lo spostamento del nodo centrale, realizza con il carico stesso un triangolo di equilibrio.



Fig. 2.18: Equilibrio del meccanismo infinitesimo sottoposto ad una azione esterna.

Una struttura con  $s > 0$  e  $m > 0$ , in cui sono presenti  $s$  stati di presollecitazione e  $m$  cinematismi, è in equilibrio in assenza di carichi esterni. Se viene imposto il generico cinematismo, la geometria della struttura cambia, gli sforzi assiali negli elementi non sono più autoequilibrati. Nell'ipotesi di piccoli spostamenti, quando viene imposto il generico cinematismo, è possibile calcolare le forze associate alla variazione di direzione degli elementi, dalla conoscenza dei quattro sottospazi fondamentali. Queste forze vengono chiamate carichi geometrici. Si consideri una struttura in cui per semplicità si assume  $s = m = 1$ , e si supponga di aver calcolato il vettore delle sollecitazioni autoequilibrate  $\mathbf{t}_s$  e il vettore degli spostamenti  $d\mathbf{m}$  che descrive il cinematismo. Nella configurazione iniziale indeformata l'equazione di equilibrio per il  $j$ -esimo nodo per una forza esterna nulla è data dalla

$$\sum_i (\mathbf{x}_i - \mathbf{x}_j) t_{ij} = \mathbf{0}$$

Dopo aver imposto il cinematismo l'equazione di equilibrio dello stesso nodo diventa:

$$\sum_i [(x_j + d_j) - (x_i + d_i)] t_{ij} = f_j$$

Naturalmente la sommatoria è sempre estesa ai nodi  $i$  collegati con il nodo  $j$ ; bisogna notare inoltre che il vettore  $d_j$  ha tre componenti mentre il vettore  $d_m$  ha  $3n - c$  componenti.

Sottraendo queste due equazioni si ottiene l'espressione per il carico geometrico agente sul  $j$ -esimo nodo:

$$f_j = \sum_i (d_j - d_i) t_{ij}$$

Le  $3n - c$  componenti dei carichi geometrici sono assemblate nel vettore  $p_{ms}$ , il quale è associato con il cinematismo  $m$  e lo stato di presollecitazione  $s$ .

A questo punto due sono i casi possibili: il vettore dei carichi geometrici così determinato può appartenere o non appartenere all'immagine della matrice di equilibrio  $A$ .

Se il vettore  $p_{ms}$  non appartiene all'immagine di  $A$ , la struttura, oltre ai carichi compatibili (quelli generati dalle colonne di  $A$ ), può sostenere un'ulteriore condizione di carico, indipendente dai carichi compatibili, generata dal vettore  $p_{ms}$ : questa è una condizione necessaria affinché il sistema sia un meccanismo infinitesimo del primo ordine. Diversamente, se  $p_{ms}$  non appartiene all'immagine di  $A$ , lo stato di presollecitazione non aumenta la capacità della struttura di sostenere una generica condizione di carico.

Esistono casi in cui la struttura è instabile sotto lo stato di presollecitazione iniziale. Un esempio è fornito dal sistema considerato in precedenza quando gli elementi sono ambedue in compressione: è evidente che il sistema è instabile. Per questo sistema la stabilità dipende dal segno dello stato di presollecitazione e non costituisce un problema di grande rilevanza. Si possono dare invece esempi di sistemi instabili indipendentemente dal segno del vettore  $\mathbf{t}_s$ .

Per analizzare la stabilità dello stato di presollecitazione è sufficiente calcolare il lavoro compiuto dai carichi geometrici sugli spostamenti dovuti al cinematismo e controllarne il segno; per un sistema stabile sotto uno stato di presollecitazione questo lavoro è positivo. Nel caso in cui  $m = s = 1$ , si ha semplicemente:

$$\mathbf{p}_{ms} \cdot \mathbf{d}_m > 0$$

Per sistemi con  $s = 1$  e  $m > 1$  bisogna verificare che la condizione suddetta sia valida per il generico cinematismo. Sia  $\mathbf{t}$  è il vettore di autosollecitazione e siano  $\mathbf{d}_1, \dots, \mathbf{d}_m$  gli  $m$  cinematismi indipendenti del sistema, che possono essere assemblati nella matrice  $\mathbf{D}$  di dimensione  $(3n - c) \times m$ . Il generico cinematismo sarà dato da una combinazione lineare di questi:

$$\mathbf{d}_1\beta_1 + \dots + \mathbf{d}_m\beta_m = \mathbf{D}\boldsymbol{\beta}$$

Per ogni cinematismo è possibile calcolare i vettori dei carichi geometrici associati  $\mathbf{p}_1, \dots, \mathbf{p}_m$ , anche questi assemblati in una matrice  $\mathbf{P}$  di

dimensione  $(3n - c) \times m$ . Il carico geometrico associato con il generico cinematismo è dato da:

$$\mathbf{p}_1\beta_1 + \dots + \mathbf{p}_m\beta_m = \mathbf{P}\boldsymbol{\beta}$$

Quindi si ottiene:

$$\mathbf{P}\boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{D}\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\beta}^T \mathbf{P}^T \mathbf{D}\boldsymbol{\beta} > \mathbf{0} \quad \forall \boldsymbol{\beta} \neq \mathbf{0}$$

Poiché la matrice  $\mathbf{P}^T \mathbf{D}$  è simmetrica, allora questa relazione implica che questa matrice sia definita positiva. Per sistemi con  $s > 1$  e  $m > 1$ , esistono  $s$  stati di autosollecitazione  $\mathbf{t}_1, \dots, \mathbf{t}_s$  per ognuno dei quali è possibile calcolare la matrice dei carichi geometrici  $\mathbf{P}_i$ ,  $i = 1, \dots, s$ . Se il generico stato di sollecitazione è espresso dalla combinazione lineare  $\mathbf{t}_1\alpha_1, \dots, \mathbf{t}_s\alpha_s$ , allora il carico geometrico associato al generico cinematismo in oggetto è espresso da:

$$\left( \sum_{i=1}^s \mathbf{P}_i \alpha_i \right) \boldsymbol{\beta}$$

La condizione  $\mathbf{p}_{ms} \cdot \mathbf{d}_m > \mathbf{0}$  si scrive allora

$$\left( \sum_{i=1}^s \mathbf{P}_i \alpha_i \right) \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{D}\boldsymbol{\beta} = \boldsymbol{\beta}^T \left( \sum_{i=1}^s \mathbf{P}_i^T \mathbf{D} \alpha_i \right) \boldsymbol{\beta} \quad \forall \boldsymbol{\beta} \neq \mathbf{0}$$

Affinché questa condizione sia soddisfatta deve esistere una combinazione lineare delle matrici  $\mathbf{P}_i^T \mathbf{D}$  definita positiva; il vettore  $\boldsymbol{\alpha}$  definisce allora la

combinazione lineare degli stati di presollecitazione che rende stabile la struttura.

In questa parte verrà descritto il procedimento per la risoluzione di una generica struttura reticolare secondo il metodo dei coefficienti di densità di forza. Si vedrà l'estensione della teoria lineare classica alle strutture che appartengono alla terza e alla quarta tipologia descritte in precedenza, sistemi cinematicamente indeterminati o staticamente e cinematicamente indeterminati che sono in equilibrio nella configurazione iniziale, mantenendo l'ipotesi dei piccoli spostamenti.

In precedenza, si è visto come si arrivi alla scrittura delle equazioni di equilibrio e di congruenza del sistema:

$$\mathbf{A} \mathbf{t} = \mathbf{f}$$

$$\mathbf{B} \mathbf{d} = \mathbf{e}$$

a queste va aggiunta la relazione costitutiva che lega sollecitazioni e deformazioni degli elementi. L'allungamento del generico elemento  $b$  sarà dato da una parte non elastica  $\bar{e}_b$ , dovuta a deformazioni termiche o imposte, e una parte elastica  $c_b t_b$  proporzionale alla sollecitazione secondo il coefficiente di cedevolezza  $c_b$  dato da:

$$c_b = \frac{l_b^3}{E_b A_b}$$

in cui  $E_b$  e  $A_b$  sono il modulo di Young e l'area della sezione retta dell'elemento (si noti che la lunghezza a numeratore è elevata al cubo per

tenere conto delle dimensioni dei coefficienti di sollecitazione  $t_b$  e di deformazione  $e_b$ ). In forma vettoriale la relazione costitutiva diventa:

$$\mathbf{e} = \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C}\mathbf{t}$$

dove  $\mathbf{C}$  è la matrice diagonale  $b \times b$  che contiene i coefficienti di cedevolezza  $c_b$ .

Nel caso di strutture isostatiche ( $m = 0, s = 0$ ), le matrici  $\mathbf{A}$  e  $\mathbf{B}$  sono invertibili. Quindi, noti che siano i carichi  $\mathbf{f}$  e le deformazioni imposte  $\bar{\mathbf{e}}$ , si risolve prima il sistema  $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{f}$  ottenendo  $\mathbf{t}$ , si ricavano le deformazioni  $\mathbf{e}$  dalla  $\mathbf{e} = \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C}\mathbf{t}$ , infine si risolve il sistema  $\mathbf{B}\mathbf{d} = \mathbf{e}$  ottenendo gli spostamenti  $\mathbf{d}$ :

$$\mathbf{t} = \mathbf{A}^{-1}\mathbf{f} \rightarrow \mathbf{e} = \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C}\mathbf{t} \rightarrow \mathbf{d} = \mathbf{B}^{-1}\mathbf{e}$$

Nel caso di strutture staticamente indeterminate ( $m = 0, s > 0$ ) la matrice di equilibrio del sistema è rettangolare, con più righe che colonne. Indicando con  $\mathbf{S}$  la matrice di dimensioni  $b \times s$  che ha per colonne gli  $s$  stati di sollecitazione autoequilibrati della struttura, la soluzione generale del sistema  $\mathbf{A}\mathbf{t} = \mathbf{f}$  ha la forma:

$$\mathbf{t} = \mathbf{t}' + \mathbf{S}\boldsymbol{\alpha}$$

dove  $\mathbf{t}'$  è una soluzione particolare e  $\boldsymbol{\alpha}$  è un vettore incognito che contiene i coefficienti della combinazione lineare degli stati di autosollecitazione, il vettore delle incognite iperstatiche. Il metodo più semplice per calcolare  $\mathbf{S}$  e  $\mathbf{t}'$  è attraverso il procedimento di eliminazione di Gauss. Operando sulle righe della matrice  $\mathbf{A}|\mathbf{f}$  si ottiene la forma triangolare superiore  $\bar{\mathbf{A}}|\bar{\mathbf{f}}$ ; si

possono così individuare facilmente le colonne dipendenti della matrice  $\mathbf{A}$ , che corrispondono alle aste ridondanti della struttura. A questo punto, chiamando  $\mathbf{A}'$  la matrice ottenuta da  $\mathbf{A}$  eliminando le colonne corrispondenti alle aste ridondanti, la soluzione particolare si ottiene risolvendo il sistema  $\mathbf{A}'\mathbf{t} = \mathbf{f}$ , ovvero risolvendo il sistema  $\bar{\mathbf{A}}\mathbf{t} = \mathbf{f}$  dopo aver posto nulle le componenti di  $\mathbf{t}$  relative agli elementi ridondanti. Il generico stato di autosollecitazione si determina risolvendo il sistema  $\bar{\mathbf{A}}\mathbf{t} = \mathbf{0}$  in cui le componenti di  $\mathbf{t}$  relative agli elementi ridondanti sono poste tutte nulle eccetto una.

Per determinare le incognite iperstatiche  $\alpha$ , si impone la condizione di ortogonalità che il vettore delle deformazioni compatibili deve soddisfare. Infatti, come visto in precedenza, vale la relazione:

$$\text{Ker}(\mathbf{A}) \perp \text{Im}(\mathbf{A}^T) \equiv \text{Im}(\mathbf{B})$$

per cui il vettore delle deformazioni compatibili è ortogonale ai vettori degli stati di autosollecitazione. Il vettore delle deformazioni è dato dalla:

$$\mathbf{e} = \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C}(\mathbf{t}' + \mathbf{S}\alpha)$$

Imponendo le  $s$  relazioni di ortogonalità:

$$\mathbf{S}^T \mathbf{e} = \mathbf{0}$$

si ottiene:

$$\mathbf{S}^T [\bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C}(\mathbf{t}' + \mathbf{S}\alpha)] = \mathbf{0}$$

$$\Leftrightarrow \mathbf{S}^T \mathbf{C} \mathbf{S} \boldsymbol{\alpha} = -\mathbf{S}^T (\bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C} \mathbf{t}')$$

Poiché le colonne di  $\mathbf{S}$  sono indipendenti e  $\mathbf{C}$  è diagonale, la matrice prodotto  $\mathbf{S}^T \mathbf{C} \mathbf{S}$  è non singolare, si ricava così l'espressione per  $\boldsymbol{\alpha}$ :

$$\boldsymbol{\alpha} = (\mathbf{S}^T \mathbf{C} \mathbf{S})^{-1} (\mathbf{S}^T \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{S}^T \mathbf{C} \mathbf{t}')$$

Noto  $\boldsymbol{\alpha}$ , la soluzione generale  $\mathbf{t}$  è data dalla  $\mathbf{t} = \mathbf{t}' + \mathbf{S} \boldsymbol{\alpha}$ ; quindi si ottiene il vettore delle deformazioni  $\mathbf{e} = \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{C} \mathbf{t}$ , infine si ricavano gli spostamenti del sistema dalle equazioni di congruenza. Essendo il vettore delle deformazioni compatibile, si possono trascurare le componenti corrispondenti alle aste ridondanti, ottenendo il vettore ridotto  $\mathbf{e}^r$ ; analogamente si eliminano dalla matrice  $\mathbf{B}$  le righe corrispondenti, ottenendo la matrice  $\mathbf{B}^r$ . Si può così risolvere il sistema ridotto  $\mathbf{B}^r \mathbf{d} = \mathbf{e}^r$  E trovare gli spostamenti  $\mathbf{d}$ :

$$\mathbf{d} = \mathbf{B}^{r-1} \mathbf{e}^r$$

Nel caso dei meccanismi ( $m > 0$ ,  $s \geq 0$ ) si assume che il sistema sia in equilibrio sotto un carico iniziale  $\mathbf{f}_0$  e uno stato di presollecitazione  $\mathbf{t}_0$ , si assume inoltre, che la posizione di equilibrio sia stabile. Si ha quindi, nella posizione iniziale:

$$\mathbf{A} \mathbf{t}_0 = \mathbf{f}_0$$

Se il sistema è un meccanismo infinitesimo del primo ordine, le deformazioni imposte e possono causare uno stato di sollecitazione autoequilibrato anche in assenza di carichi esterni.

Dato un generico incremento di carico  $\delta \mathbf{f}$ , la risposta della struttura è data dalla combinazione di due comportamenti: un *comportamento deformativo*, in cui il carico è equilibrato da variazioni delle sollecitazioni negli elementi (carico estensionale), ed un *comportamento geometrico*, in cui si hanno spostamenti senza alcuna variazione delle lunghezze degli elementi ed il carico è equilibrato mediante il cambiamento di direzione degli elementi stessi (carico inestensionale). In seguito, si indicherà il primo comportamento come *modo 1* ed il secondo come *modo 2*. Poiché la generica condizione di carico può essere decomposta secondo i complementi ortogonali  $Im(\mathbf{A})$  e  $Ker(\mathbf{A}^T)$ , i due modi verranno trattati separatamente all'inizio, per giungere poi ad una formulazione della risposta combinata nei modi 1 e 2.

*Modo 1.* Sia  $\delta \mathbf{f}^{(1)}$  un vettore dei carichi nodali che appartiene all'immagine di  $\mathbf{A}$ . Si può ricavare una soluzione particolare delle equazioni di equilibrio risolvendo il sistema:

$$\mathbf{A}^r \delta \mathbf{t}^r = \delta \mathbf{f}^{(1)}$$

in cui la matrice  $\mathbf{A}^r$  e il vettore  $\mathbf{t}^r$  si ottengono come in precedenza. La soluzione particolare  $\mathbf{t}'$  si ottiene interponendo  $s$  zeri in corrispondenza delle aste ridondanti. La soluzione generale si ricava come in precedenza calcolando  $\alpha$  dalla  $\alpha = (\mathbf{S}^T \mathbf{C} \mathbf{S})^{-1} (\mathbf{S}^T \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{S}^T \mathbf{C} \mathbf{t}')$  e sostituendo nella

$\mathbf{t} = \mathbf{t}' + \mathbf{S}\boldsymbol{\alpha}$ . Lo stato iniziale  $\mathbf{f}_0$ ,  $\mathbf{t}_0$  del sistema si ricava nella stessa maniera.

*Modo 2.* Sia  $\delta\mathbf{f}^{(2)}$  un vettore di carichi nodali che non appartiene all'immagine di  $\mathbf{A}$ . Questi carichi sono equilibrati geometricamente attraverso gli  $m$  cinematismi che la struttura possiede. Se  $\mathbf{D}$  è la matrice che ha per colonne i vettori corrispondenti ai cinematismi, il generico vettore degli spostamenti sarà dato da:

$$\mathbf{d}^{(2)} = \mathbf{D}\boldsymbol{\beta}$$

Ad ognuno degli  $m$  cinematismi indipendenti corrisponde un vettore dei carichi geometrici. Il carico geometrico  $\mathbf{g}_m$  associato al cinematismo  $\mathbf{d}_m$  si calcola dal prodotto  $\mathbf{A}\mathbf{t}_0$  in cui nella matrice di equilibrio le coordinate dei nodi sono rimpiazzate dalle rispettive componenti degli spostamenti  $\mathbf{d}_m$  essendo  $\mathbf{t}_0$  lo stato di presollecitazione iniziale. Si ottiene in questo modo la matrice  $\mathbf{G}$  che ha per colonne i vettori dei carichi geometrici. Si ottiene così  $\boldsymbol{\beta}$  risolvendo il sistema:

$$\mathbf{G}\boldsymbol{\beta} = \delta\mathbf{f}^{(2)}$$

che ammette soluzione unica in quanto la matrice  $\mathbf{G}$ , di dimensioni  $(3n - c) \times m$ , ha rango  $m$  per ipotesi (equilibrio iniziale stabile) e il vettore  $\delta\mathbf{f}^{(2)}$  appartiene all'immagine di  $\mathbf{G}$ . Una volta noto  $\boldsymbol{\beta}$  si risale agli spostamenti dalla  $\mathbf{d}^{(2)} = \mathbf{D}\boldsymbol{\beta}$ .

*Risposta combinata nei modi 1 e 2.* Dato un generico incremento di carico  $\delta \mathbf{f} = \delta \mathbf{f}^{(1)} + \delta \mathbf{f}^{(2)}$  equilibrato dai due modi contemporaneamente, si può scrivere la somma delle equazioni  $\mathbf{A}^r \delta \mathbf{t}^r = \delta \mathbf{f}^{(1)}$  e  $\mathbf{G} \boldsymbol{\beta} = \delta \mathbf{f}^{(2)}$ :

$$\mathbf{A}^r \delta \mathbf{t}^r + \mathbf{G} \boldsymbol{\beta} = \delta \mathbf{f}^{(1)} + \delta \mathbf{f}^{(2)}$$

o anche in forma compatta:

$$[\mathbf{A}^r | \mathbf{G}] + \begin{bmatrix} \delta \mathbf{t}^r \\ \boldsymbol{\beta} \end{bmatrix} = \delta \mathbf{f}$$

La matrice  $\mathbf{A}^c = [\mathbf{A}^r | \mathbf{G}]$  è quadrata di ordine  $3n - c$  e ha rango massimo. Risolvendo il sistema seguendo il procedimento descritto per i modi 1 e 2, si ottengono i vettori  $\delta \mathbf{t}$ , incremento di sollecitazione, e  $\mathbf{d}^{(2)}$ , componente dello spostamento per cui la lunghezza delle aste rimane invariata.

Si nota che i carichi geometrici  $\mathbf{G}$  sono calcolati in base allo stato di presollecitazione iniziale  $\mathbf{t}_0$  con l'assunzione che l'incremento dello stato di sollecitazione  $\delta \mathbf{t}$  dovuto al modo 1 sia piccolo in confronto a  $\mathbf{t}_0$ . Nel caso in cui ciò non sia vero, bisogna calcolare la matrice  $\mathbf{G}$  sulla base dello stato di sollecitazione  $\mathbf{t}_0 + \delta \mathbf{t}$ .

A questo punto resta da calcolare la componente dello spostamento relativa al modo 1,  $\mathbf{d}^{(1)}$ , dovuta alle variazioni di lunghezza delle aste  $\delta \mathbf{e} = \delta \bar{\mathbf{e}} + \mathbf{F} \delta \mathbf{t}$ . Il vettore degli spostamenti  $\mathbf{d}^{(1)}$  deve soddisfare il sistema ridotto:

$$\mathbf{B}^r \mathbf{d}^{(1)} = \delta \mathbf{e}^r$$

in cui sono state eliminate le equazioni relative alle aste ridondanti. Essendo la matrice rettangolare, con meno righe ( $r$ ) che colonne ( $3n - c = r + m$ ) la soluzione si ricava imponendo l'ortogonalità del vettore degli spostamenti  $\mathbf{d}^{(1)}$  con i vettori relativi agli  $m$  cinematismi della struttura, cioè imponendo la condizione:

$$\mathbf{D}^T \mathbf{d}^{(1)} = \mathbf{0}$$

Si osserva come il sottospazio vettoriale generato dagli  $m$  cinematismi sia equivalente a quello generato dagli  $m$  carichi geometrici. Infatti, lo spostamento  $\mathbf{d}^{(1)}$  è ortogonale anche ai carichi geometrici, come si può vedere attraverso il principio dei lavori virtuali.

Si considerino i tre sistemi seguenti: un sistema di spostamenti e deformazioni  $\mathbf{d}^{(1)}$ ,  $\delta \mathbf{e}$  e due sistemi di forze e sollecitazioni  $\mathbf{f}_0$ ,  $\mathbf{t}_0$  e  $\mathbf{f}_0 + \mathbf{G}\boldsymbol{\beta}$ ,  $\mathbf{t}_0$ . Essi si riferiscono a due configurazioni della struttura, quella iniziale e quella ottenuta dalla prima attraverso un 'piccolo' spostamento  $\mathbf{D}\boldsymbol{\beta}$ , con  $\boldsymbol{\beta}$  arbitrario. Applicando il principio dei lavori virtuali per queste due configurazioni si ha:

$$\mathbf{f}_0^T \mathbf{d}^{(1)} = \mathbf{t}_0^T \delta \mathbf{e}$$

$$(\mathbf{f}_0 + \mathbf{G}\boldsymbol{\beta})^T \mathbf{d}^{(1)} = \mathbf{t}_0^T \delta \mathbf{e}$$

sottraendo la prima dalla seconda si ottiene:

$$\boldsymbol{\beta}^T \mathbf{G}^T \mathbf{d}^{(1)} = \mathbf{0}$$

Questa relazione di ortogonalità può sostituire la precedente nella determinazione di  $\mathbf{d}^{(1)}$ , si ottiene così l'espressione compatta seguente:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B}^r \\ \mathbf{G}^T \end{bmatrix} \mathbf{d}^{(1)} = \begin{bmatrix} \delta \mathbf{e}^r \\ \mathbf{0} \end{bmatrix}$$

in cui la matrice:

$$\mathbf{B}^C = \begin{bmatrix} \mathbf{B}^r \\ \mathbf{G}^T \end{bmatrix}$$

è la trasposta della matrice  $\mathbf{A}^C$  definita in precedenza.

### 2.3.2 Ricerca di forma

Il metodo dei coefficienti di densità di forza può essere usato efficacemente per impostare un procedimento di ricerca di forma per le strutture *tensegrity* e, più in generale, per trovare meccanismi infinitesimi del primo ordine a partire dalla topologia di una struttura<sup>3</sup>.

Si è visto in precedenza come scrivere il sistema delle equazioni di equilibrio di una struttura reticolare con  $n$  nodi collegati da  $b$  aste. Con le notazioni già utilizzate, l'equilibrio del  $j$ -esimo nodo lungo la direzione  $x$  si scrive:

$$\sum_i (x_j - x_i) t_{ij} = f_{jx}$$

---

<sup>3</sup> R.Motro and N.Vassart, Tensegrity Systems. Formfinding, Seminario sulle strutture pieghevoli, CISM, Udine 1999

dove la grandezza:

$$t_{ij} = \frac{N_{ij}}{l_{ij}}$$

rappresenta la forza per unità di lunghezza, o coefficiente di densità di forza, relativo all'elemento che connette i nodi  $ij$  della struttura. In forma compatta si ottiene il sistema:

$$\mathbf{At} = \mathbf{f}$$

Nel seguito si considereranno anche le equazioni relative ai nodi vincolati e si scriveranno separatamente le equazioni di equilibrio lungo le direzioni  $x, y, z$ .

Si introducono le seguenti matrici e vettori. La matrice delle connessioni  $\mathbf{C}$ , che definisce la topologia della struttura, come la matrice di dimensioni  $b \times n$ , che contiene nella riga relativa alla  $b$ -esima asta i valori  $-1$  e  $1$  in corrispondenza dei nodi  $i$  e  $j$  da essa collegati, e valori nulli nelle restanti posizioni. La matrice dei coefficienti di densità di forza  $\mathbf{T}$ , come la matrice diagonale di dimensioni  $b \times b$ , che contiene i suddetti coefficienti. I vettori  $\mathbf{x}$  e  $\mathbf{f}_x$  che contengono le  $n$  componenti secondo l'asse  $x$  delle coordinate dei nodi e delle forze esterne.

Con queste notazioni si possono riscrivere le equazioni di equilibrio lungo  $x$  nel modo seguente:

$$\mathbf{C}^T \mathbf{T} \mathbf{C} \mathbf{x} = \mathbf{f}_x$$

Considerando, ad esempio, l'equazione relativa al nodo  $j$ , il vettore  $T\mathbf{C}\mathbf{x}$ , che ha per componenti la differenza di coordinate degli estremi dell'asta per il coefficiente di tensione relativo, viene moltiplicato per la  $j$ -esima colonna di  $\mathbf{C}$ , relativa al nodo  $j$ , che contiene valori non nulli in corrispondenza delle aste collegate con il nodo stesso; si ottiene così l'equazione

$$\sum_i (x_j - x_i) t_{ij} = f_{jx}$$

I nodi della struttura sono divisi in due categorie: i nodi liberi, indicati con il pedice  $l$ , ed i nodi fissi, indicati con il pedice  $f$ . Ordinando i nodi in queste due categorie si ottiene una partizione del vettore delle coordinate  $\mathbf{x}$  e delle forze  $\mathbf{f}_x$ , la quale induce una partizione della matrice  $\mathbf{C}$ . In questo modo il sistema si scrive:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{C}_{lx}^T \\ \mathbf{C}_{fx}^T \end{bmatrix} [\mathbf{T}][\mathbf{C}_{lx}][\mathbf{C}_{fx}] \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{lx} \\ \mathbf{x}_{fx} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{f}_{lx} \\ \mathbf{f}_{fx} \end{bmatrix}$$

Prendendo in considerazione le equazioni relative ai nodi liberi si ha:

$$\mathbf{C}_{lx}^T \mathbf{C}_{lx} \mathbf{x}_l + \mathbf{C}_{lx}^T \mathbf{T} \mathbf{C}_{fx} \mathbf{x}_f = \mathbf{f}_{lx}$$

Ponendo

$$\mathbf{D}_x = \mathbf{C}_{lx}^T \mathbf{C}_{lx}$$

$$\mathbf{D}_{fx} = \mathbf{C}_{lx}^T \mathbf{T} \mathbf{C}_{fx}$$

il sistema diventa:

$$\mathbf{D}_x \mathbf{x}_l = \mathbf{f}_{lx} - \mathbf{D}_{fx} \mathbf{x}_f$$

Questo sistema di equazioni, insieme con quelli relativi alle coordinate  $y$  e  $z$  dei nodi, permette, una volta assegnati i coefficienti di tensione e la posizione dei nodi fissi, di ricavare la posizione dei nodi liberi in modo tale da soddisfare l'equilibrio.

Nel caso di un meccanismo infinitesimo del primo ordine il vettore delle forze esterne è identicamente nullo, e si può risolvere il sistema per la struttura vincolata a terra oppure libera. In quest'ultimo caso il sistema si riduce a:

$$\mathbf{D}_x \mathbf{x}_l = \mathbf{0}$$

Bisogna notare che le matrici  $\mathbf{D}_x$ ,  $\mathbf{D}_y$ ,  $\mathbf{D}_z$  sono sempre delle matrici singolari poiché per ogni riga o colonna la somma degli elementi è sempre uguale a zero. Una scelta qualsiasi dei coefficienti di tensione produce, in generale, matrici di rango  $n - 1$ . Il nucleo della matrice è generato dal vettore che ha tutte le componenti uguali; ne segue che i nodi della struttura corrispondente sono tutti coincidenti in un punto. Una scelta dei coefficienti di tensione per cui la matrice  $\mathbf{D}$  ha rango  $n - 2$  porta ad una soluzione in cui i nodi della struttura si trovano allineati su una retta; se invece il rango della matrice è uguale a  $n - 3$ , allora i nodi giacciono tutti sullo stesso piano. Per trovare una soluzione del sistema  $\mathbf{D}_x \mathbf{x}_l = \mathbf{0}$  tale che la geometria risultante sia tridimensionale, occorre trovare i coefficienti di tensione in modo che la matrice  $\mathbf{D}$  abbia rango pari a  $n - 4$ . Di conseguenza

una scelta arbitraria delle coordinate di 4 nodi della struttura determina univocamente le posizioni degli altri, attraverso le  $n - 4$  equazioni indipendenti del sistema. Quindi, il metodo dei coefficienti di tensione comprende i seguenti passi:

- A) determinazione dei coefficienti di tensione per cui la matrice  $D$  ha rango paria  $n - 4$ ;
- B) risoluzione del sistema lineare;
- C) scelta delle coordinate di 4 punti e identificazione della geometria risultante.

La difficoltà del metodo risiede nel primo passo. Nei casi più semplici di strutture con pochi nodi ed elementi si può procedere cercando di determinare analiticamente le condizioni che i coefficienti di tensione devono soddisfare. Per strutture con un gran numero di elementi si può ridurre la complessità del problema fissando i valori di alcuni dei coefficienti. Altrimenti è necessario utilizzare un metodo numerico iterativo.

### **2.3.3 Force Density Method**

Forma ed equilibrio sono saldamente legate l'una all'altra, e nelle strutture di funi questa condizione può andare fortemente in contrasto con le esigenze di carattere estetico. L'equilibrio, infatti, può non essere garantito sotto carico per certe configurazioni geometriche delle funi, come il suo raggiungimento per altre configurazioni può essere ottenuto solo mediante sforzi inaccettabili, per varie ragioni, dai cavi. Per determinare lo "stato 0" nei sistemi spaziali di funi, è richiesta un'elaborazione di dati iniziale

complessa, in campo non lineare, che manifesta problemi di convergenza} in funzione della configurazione topologica iniziale di tentativo. La definizione dello "stato 0", comporta la risoluzione di un problema non lineare, volto all'ottimizzazione matematica, che può essere ben rappresentato in linea generale dal sistema seguente, risolvibile; con programmi lineari:

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{variabili : } [x^f, y^f, z^f, S^f] \\ \text{vincoli : } g(x^f, y^f, z^f, S^f) = 0 : S > 0 \\ \text{funzione obiettivo :} \\ F = \sum_i^n iC1 [(x_i^f - x_i^0)^2 + (y_i^f - y_i^0)^2 + (z_i^f - z_i^0)^2] + \sum_i^m k_iC2 (S_i^f - S_i^0) \rightarrow \min \end{array} \right.$$

$S^f$  = coordinate variabili

$x^f, y^f, z^f$  = coordinate variabili

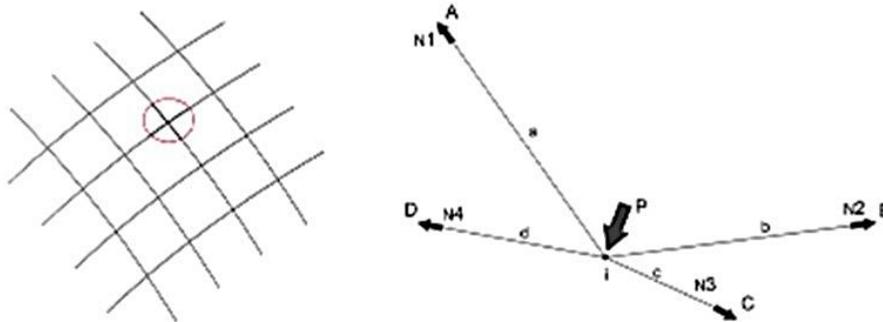
$x^0_k, y^0_k, z^0_k$  = coordinate volute per il nodo

$S_{kj}^0$  = sforzo desiderato nell'asta  $K_j$  generica

$C1, C2$  = Coefficienti di penalizzazione, il loro peso varia in funzione della volontà di privilegiare la componente geometrica o quella tensionale.

Per superare la complessità del sistema soprascritto con il fine della realizzazione delle coperture a superficie minima dello stadio olimpico di Monaco del 1972 progettate da Frei, Linkwitz e Schek introdussero il *Force Density Method* o *FDM* (metodo della densità di forze). L'innovazione introdotta dal *FDM* risiede nel fatto che, permette di trattare i problemi non lineari della ricerca di forma, come quelli prodotti dalle reti di funi e dalle membrane pretensionate, attraverso un sistema di equazioni lineari. Si noti

che, i sistemi di equazioni lineari vengono impiegati per definire le condizioni di equilibrio statico dei nodi di una travatura reticolare spaziale, soggetta a condizioni di carico e di vincolo generiche. Per capire la forza del *FDM*, bisogna tenere in considerazione che nelle travature spaziali reticolari, sia le geometrie del sistema che i carichi agenti su di essa sono noti, pertanto il sistema di equazioni serve a determinare gli sforzi assiali nelle aste e le reazioni vincolari, essendo la travatura staticamente determinata. Nelle reti di funi invece, le incognite sono costituite dalle coordinate dei nodi del sistema, che determinano la lunghezza delle aste e dei valori degli sforzi assiali nei diversi tratti di fune. Considerando una generica porzione di una rete spaziale di funi (fig.2.18), l'equilibrio del generico nodo I è soggetto ad un carico esterno P, si ipotizza che tale nodo sia collegato ai nodi adiacenti A, B, C, D, tramite le aste a, b, c, d.



**Fig. 2.19:** Schema di carico applicato ad una rete di funi.

L'equilibrio nel nodo tra le forze interne e quelle esterne è dato dalla relazione:

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

$$N_1 n_1 + N_2 n_2 + N_3 n_3 + N_4 n_4 + P_1 = 0$$

$N_1, N_2, N_3, N_4$  = sforzi assiali, positivi se uscenti dal nodo

$n_1, n_2, n_3, n_4$  = versori

Proiettando l'equazione precedente sugli assi  $x$ ,  $y$  e  $z$  del riferimento globale, si ottengono le seguenti equazioni scalari valide per ciascun nodo del sistema strutturale:

$$\begin{cases} N_1 \left( \frac{x_A - x_I}{L_{AI}} \right) + N_2 \left( \frac{x_B - x_I}{L_{BI}} \right) + N_3 \left( \frac{x_C - x_I}{L_{CI}} \right) + N_4 \left( \frac{x_D - x_I}{L_{DI}} \right) + P_{Ix} = 0 \\ N_1 \left( \frac{y_A - y_I}{L_{AI}} \right) + N_2 \left( \frac{y_B - y_I}{L_{BI}} \right) + N_3 \left( \frac{y_C - y_I}{L_{CI}} \right) + N_4 \left( \frac{y_D - y_I}{L_{DI}} \right) + P_{Iy} = 0 \\ N_1 \left( \frac{z_A - z_I}{L_{AI}} \right) + N_2 \left( \frac{z_B - z_I}{L_{BI}} \right) + N_3 \left( \frac{z_C - z_I}{L_{CI}} \right) + N_4 \left( \frac{z_D - z_I}{L_{DI}} \right) + P_{Iz} = 0 \end{cases}$$

$L_{AI}, L_{BI}, L_{CI}, L_{DI}$  = lunghezze attuali dei tratti che collegano il nodo I ai nodi circostanti

$P_{Ix}, P_{Iy}, P_{Iz}$  = componenti del carico  $P_1$  nel sistema di riferimento globale ( $O, x, y, z$ )

Scrivendo le equazioni per tutti gli  $N$  nodi della rete di funi, si ottiene un sistema di  $3 \times N$  equazioni che definiscono le condizioni di equilibrio dell'intero sistema. Il *FDM* assume costanti e noti i valori dei rapporti  $q_k = N_k/L_k$  fra lo sforzo assiale  $N_k$  e a lunghezza  $L_k$  del tratto di fune  $k$  -esimo cui si riferiscono, pertanto il sistema precedente può essere scritto come:

$$\begin{cases} q_1(x_A - x_I) + q_2(x_B - x_I) + q_3(x_C - x_I) + q_4(x_D - x_I) + P_{Ix} = 0 \\ q_1(y_A - y_I) + q_2(y_B - y_I) + q_3(y_C - y_I) + q_4(y_D - y_I) + P_{Iy} = 0 \\ q_1(z_A - z_I) + q_2(z_B - z_I) + q_3(z_C - z_I) + q_4(z_D - z_I) + P_{Iz} = 0 \end{cases}$$

$q_1, q_2, q_3, q_4$ , = densità di forza nei tratti di fune considerati.

Scrivendo le equazioni per tutti i nodi della rete, si ottiene un sistema di  $3 \times N$  equazioni lineari, facilmente risolvibili per via numerica, nelle  $3 \times N$  incognite  $x_i, y_i, z_i, i = 1, \dots, N$  costituite dalle coordinate dei nodi del sistema. All'inizio del calcolo dello "stato 0", non è necessario conoscere i valori della densità di forza, per ogni singolo tratto di fune è sufficiente conoscerne solo i rapporti. Risolto il sistema di equazioni, la geometria della struttura diventa nota, ed è quindi possibile calcolare le lunghezze delle funi tratto per tratto. Se si vuole che il tratto  $k$  -esimo nello "stato 0" sia soggetto allo sforzo di pretensione  $N_k$ , nell'ipotesi di comportamento lineare del materiale ed ipotizzando che le deformazioni siano infinitesime, è sufficiente assegnare al tratto stesso la lunghezza iniziale.

$$L_k^0 = \frac{1}{1/l_k + q_k/EA_k}$$

$EA_k$ =rigidezza estensionale della fune.

La scelta dei valori delle densità di sforzo di ciascun tratto di fune gioca un ruolo fondamentale nella generazione della forma poiché rappresenta il rapporto tra lo sforzo assiale presente nella situazione di esercizio nella singola asta e la lunghezza dell'asta stessa.

### **2.3.4 Applicazione della tecnologia tensegrity alle schermature solari dinamiche**

Un recente studio ha valutato l'uso di strutture *tensegrity* per la realizzazione di schermature solari per Edifici Energeticamente Efficienti (EEB - *Energy Efficient Buildings*)<sup>4</sup>. Alcuni dei principali vantaggi derivanti dall'utilizzo di architetture *tensegrity* solari per edifici energeticamente efficienti sono i seguenti:

- È stato dimostrato che l'architettura *tensegrity* permette di realizzare strutture con minima massa per una varietà di condizioni di carico: carico di flessione su strutture a sbalzo, carico di compressione; carico di trazione (con vincoli di rigidità assegnati); carico di torsione; trave semplicemente appoggiata (ad esempio un ponte) senza cedimenti e deformazioni<sup>5</sup>;
- Le architetture *tensegrity* ben si prestano all'integrazione di funzioni di controllo all'interno della struttura: in sistemi *tensegrity* controllati le meccaniche del sistema di controllo e della struttura possono naturalmente cooperare, attraverso il cambiamento della configurazione d'equilibrio della struttura, novità rispetto ai

---

<sup>4</sup> Fraternali F, De Chiara E, Skelton RE. On the use of morphing and wind stable *tensegrity* structures for shading facades of smart buildings. *Smart Mater Struct* 2015; 24, 105032 (10pp).

<sup>5</sup> Skelton RE, Fraternali F, Carpentieri G, Micheletti A. Minimum mass design of *tensegrity* bridges with parametric architecture and multiscale complexity. *Mech Res Commun* 2014; 58: 124-132.

<sup>6</sup> Carpentieri G, Skelton RE, Fraternali F. Minimum mass and optimal complexity of planar *tensegrity* bridges. *International Journal Space Structure* 2015; 30(3-4):221-244.

tradizionali sistemi di controllo che forzano la struttura contro il suo equilibrio<sup>7</sup>;

- La possibilità di guardare un edificio *tensegrity* come un insieme di sensori e attuatori multi-scala, che in particolare presentano un comportamento dinamico fortemente non lineare<sup>8,9,10,11</sup>;
- La possibilità di ottenere energia dall'ambiente (come, ad esempio, l'energia eolica e sismica), attraverso la conversione dell'energia meccanica immagazzinata nella struttura in energia elettrica<sup>12,13</sup>;
- La possibilità di costruire facciate *tensegrity* dinamiche intorno all'edificio;
- La facilità d'integrazione di strutture *tensegrity* con pannelli solari e acustici, che possono essere speciali elementi compositi rigidi o deformabili della struttura<sup>14,15,16,17,18</sup>.

---

<sup>7</sup> Skelton RE. Structural systems: a marriage of structural engineering and system science. *J Struct Contr* 2002; 9:113-133.

<sup>8</sup> Amendola A, Carpentieri G, De Oliveira M, Skelton, R.E., Fraternali, F. Experimental investigation of the softening-stiffening response of *tensegrity* prisms under compressive loading. *Compos Struct* 2014;117:234-243.

<sup>9</sup> Fraternali F, Carpentieri G, Amendola A. On the mechanical modeling of the extreme softening/stiffening response of axially loaded *tensegrity* prisms. *J Mech Phys Solids* 2014; 74:136-157.

<sup>10</sup> Fraternali F, Senatore L, Daraio C. Solitary waves on *tensegrity* lattices. *J Mech Phys Solids* 2012; 60:1137-1144.

<sup>11</sup> Fraternali F, Carpentieri G, Amendola A, Skelton RE, Nesterenko VF. Multiscale tunability of solitary wave dynamics in *tensegrity* metamaterials. *Appl Phys Lett* 2014;105:201903

<sup>12</sup> Dinh Quy V, Van Sy N, Tan Hung D, Quoc Huy V. Wind tunnel and initial field tests of a micro generator powered by fluid-induced flutter. *Energy for Sustainable Development* 2016; 33:75-83.

<sup>13</sup> Arroyo E, Foong S, Wood KL. Modeling and experimental characterization of a fluttering windbelt for energy harvesting. *Journal of Physics: Conference Series* 2014; 557 (1), art. no. 012089.

Il presente lavoro propone una metodologia che preveda lo sviluppo di un processo di progettazione e costruzione di un nuovo componente di schermatura solare in *tensegrity* secondo l'approccio della ricerca di forma sia attraverso la minimizzazione della massa che la definizione a priori della posizione dei nodi della struttura.

---

<sup>14</sup> Shin KB, Kim CG, Hong CS, Lee HH. Thermal distortion analysis of orbiting solar array including degradation effects of composite materials. *Compos Part B-Eng* 2001; 32(4): 271-285.

<sup>15</sup> Groenewolt, A., Bakker, J., Hofer, J., Nagy, Z., Schlüter, A. Methods for modelling and analysis of bendable photovoltaic modules on irregularly curved surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2016, pp 1-11. (Article in Press).

<sup>16</sup> Jackson EM, Laibinis PE, Collins WE, Ueda A, Wingard CD, Penn B. Development and thermal properties of carbon nanotube-polymer. *Compos Part B-Eng* 2016; 89:362-373.

<sup>17</sup> Gan, L., Shang, S., Yuen, C.W.M., Jiang, S.-X., Luo, N.M. Facile preparation of graphene nanoribbon filled silicone rubber nanocomposite with improved thermal and mechanical properties. *Compos Part B-Eng* 2015; 69:237-242.

<sup>18</sup> Malpede, S., Baraldi, A. A fully integrated method for optimising fiber-membrane sails (2008) 3rd High Performance Yacht Design Conference 2008, HPYD 2008, . 47-56.

### **CAPITOLO 3**

## **CONCEPT DI NUOVE SCHERMATURE SOLARI IN TECNOLOGIA TENSEGRITY**

La necessità di sviluppare un sistema di schermatura solare capace di garantire prestazioni energetiche flessibili e adeguate alle condizioni climatiche mediterranee, ha condotto ad indagare la tematica delle schermature solari cercando di sviluppare un nuovo componente di facciata caratterizzato dalla possibilità di variare la sua configurazione nell'arco dell'anno in corrispondenza del passare delle stagioni. I principi ordinatori che hanno accompagnato lo sviluppo del *concept* del componente di facciata dinamico possono essere identificati come risposta ai seguenti temi di ricerca:

- Definizione di nuove soluzioni di involucro attivo, capaci di favorire la riduzione dell'impatto ambientale dei sistemi legati al mondo delle costruzioni attraverso la scelta di materiali durevoli e con un ciclo di vita sostenibile;
- Integrazione architettonica di uno schermo avanzato capace di garantire buona illuminazione, regolazione termica, produzione di energia, ecc, oltre naturalmente alle funzioni basilari di protezione dall'acqua e di controllo della temperatura;

- Sviluppo di sistemi modulari che permettano soluzioni estetico-architettoniche accattivanti e variabili in relazione alle necessità del progettista e garantisca una continuità geometrica alla facciata;
- Possibilità di integrare tecnologie per la produzione di energia rinnovabile negli elementi d'involucro;
- Capacità di garantire prestazioni variabili in relazione al clima esterno.

I componenti di facciata proposti possono essere integrati con pannelli fotovoltaici, pannelli solari termici capaci di incrementare le prestazioni dell'intero componente.

Le soluzioni proposte garantiscono una riduzione della temperatura della superficie di facciata impedendone l'irraggiamento diretto e favorendo la ventilazione verticale delle superfici. Il sistema di schermatura riduce i carichi termici nei mesi estivi, garantendo comunque una buona illuminazione dello spazio interno grazie alla possibilità di regolare la geometria della schermatura. L'idea iniziale è stata quella di sviluppare un sistema variabile che, connesso ad un impianto di automazione, diventi parzialmente indipendente dalla gestione dell'utenza, garantendo la riduzione dei consumi energetici dovuti a riscaldamento-raffrescamento dell'edificio. La fase operativa della ricerca è stata sviluppata attraverso:

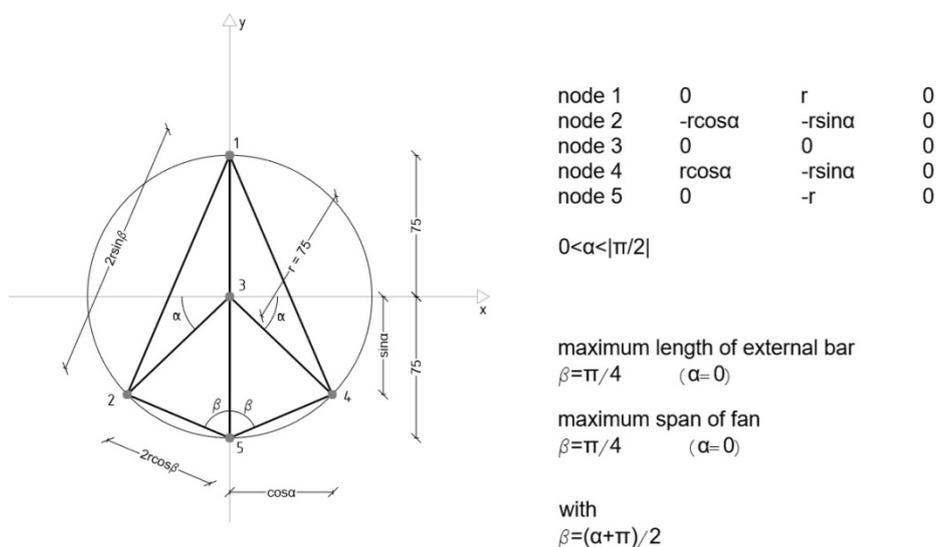
- Sviluppo del *concept* dei componenti di facciata;
- Analisi delle soluzioni tecnologiche adottate;
- Valutazione delle caratteristiche funzionali del componente;

La progettazione di sistemi di facciata integrati con il manufatto edilizio ed il sistema impiantistico, orientata a proporre elementi montabili a secco

posteriormente alla realizzazione della parte strutturale dell'edificio, diventa una delle sfide del settore legato alla progettazione degli involucri architettonici per i prossimi anni.

### 3.1 Il concept

Il design dei due componenti di facciata parte dalla stessa struttura geometrica, differenziandosi per i due diversi meccanismi di attivazione. Per facilitare la descrizione della geometria dell'elemento si introduce un sistema di assi cartesiani x-y.



**Fig. 3.1:** Geometria del modello e definizione delle relazioni trigonometriche utili all'individuazione della posizione dei punti durante il meccanismo.

La geometria prevede cinque nodi, di cui uno, il nodo 3, posto al centro di una circonferenza di raggio 75 cm, coincidente con l'origine della coppia d'assi del riferimento, e quattro disposti lungo il perimetro della

circonferenza stessa: i nodi 1 e 5 sono fissi e hanno entrambi ascissa nulla e ordinata opposta e pari al raggio; i nodi 2 e 4 sono vincolati a muoversi lungo un quarto di circonferenza secondo le relazioni trigonometriche indicate in fig. 2.1.

I cinque nodi sono collegati tra loro da otto aste di lunghezza variabile a seconda della posizione dei nodi e con comportamento variabile a seconda del cinematismo.

Attraverso l'impostazione delle matrici statiche caratterizzanti i due differenti design e l'utilizzo di codici di calcolo ad hoc (*Tensop3*<sup>1</sup> - codice Matlab) per applicare l'algoritmo di minimizzazione della massa, si è ottimizzato il sistema strutturale *tensegrity* ottenendo la soluzione che garantisca la minor massa possibile, al fine di rendere effettivamente ed economicamente vantaggiosa la scelta di una facciata *tensegrity*. In particolare si è elaborato un procedimento di predimensionamento della struttura, in modo da ottenere dei valori di input per il programma di calcolo che portassero a dei risultati fisici sufficientemente vicini alla realtà, in particolare alle esigenze costruttive dell'oggetto.

---

<sup>1</sup> *Tensopt* è un codice Matlab che esegue l'ottimizzazione della topologia di una struttura *tensegrity* collegando tra loro un insieme dato di nodi (struttura di fondo). Il codice *Tensopt* esamina l'insieme di connessioni sotto forma di elementi compressi (barre o puntoni) e/o elementi tesi (stringhe o cavi). La matrice ottimale delle connessioni è determinata attraverso un algoritmo di minimizzazione massa, che prende in considerazione più condizioni di carico, i limiti di snervamento, i vincoli di instabilità locale negli elementi compressi e un vincolo globale di stabilità correlato all'entità dell'autovalore minimo della matrice di rigidità globale della struttura (*eigmin*). I vincoli di instabilità vengono applicati ricorrendo ad un algoritmo di programmazione lineare iterativo. Il vincolo di stabilità globale è invece applicato penalizzando la massa delle soluzioni che esibiscono *eigmin* inferiori ad una data tolleranza.

Il codice di calcolo *Mathematica* è stato utilizzato per l'analisi dei possibili cinematismi che il sistema *tensegrity* ipotizzato è in grado di generare. Tale codice si basa su algoritmi di analisi cinematica per la ricerca del meccanismo di attuazione (dispiegamento/ripiegamento del modulo base). L'utilizzo della tecnologia *tensegrity* permette di controllare e gestire luce e calore garantendo un clima ottimale e conferendo un'immagine architettonica significativa unica e variabile, ottenendo sistemi di facciata leggeri e facilmente movimentabili con un bassissimo impiego di energia, per altro reperibile dai pannelli solari applicati sui componenti.

### 3.2 Blinking Sail Façade System

Il primo progetto di componente, *Blinking Sail Solar Façade System*, si ispira al progetto di una boa stazionaria realizzata in architettura *tensegrity* alimentata dall'energia delle onde e ad un recente brevetto statunitense consistente in un mulino a vento realizzato con delle vele mobili<sup>23</sup>.

Il modulo di questa struttura prevede una geometria romboidale costituita da cinque nodi, sei barre (membri in compressione) e due cavi (membri in trazione).

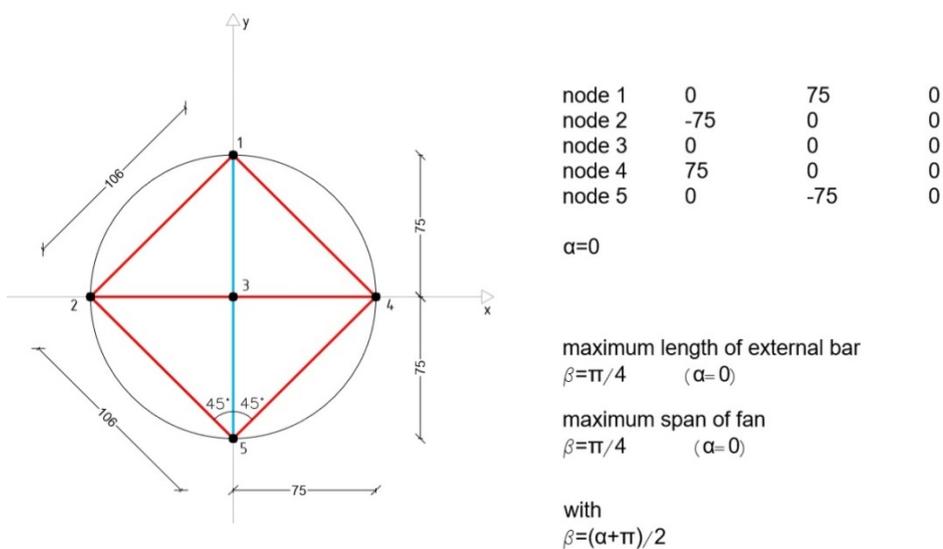
Il nodo 1 è fissato alla sotto-struttura, i nodi 2 e 4 sono vincolati a muoversi nel piano x-y (parallelo alla facciata dell'edificio), il nodo 5 può muoversi esclusivamente lungo l'asse z (perpendicolare alla facciata dell'edificio) e il nodo 3 è libero di muoversi nello spazio.

---

<sup>2</sup> Skelton RE, de Oliveira MC. *Tensegrity Systems*. New York: Springer Science+Business Media, 2009.

<sup>3</sup> Al-Azzawi, J.S, *Blinking sail windmill*, Google Patents, 2010, <https://www.google.com/patents/US7780416>

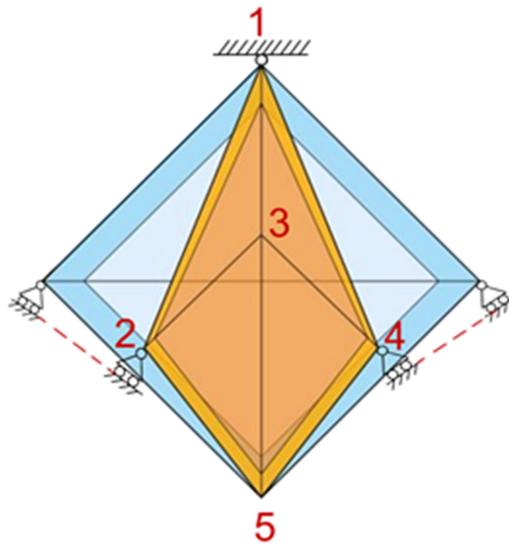
Il progetto del modello elementare dipende dagli angoli  $\alpha$  e  $\beta$ , che definiscono, tramite le funzioni trigonometriche, le coordinate dei nodi 2 e 4 come mostrato in fig. 2.2. Nello sviluppo di questo modello si assumono  $\alpha = 0$  e  $\beta = 45^\circ$  nella configurazione indeformata (planare) del modulo di *Blinking Sail*.



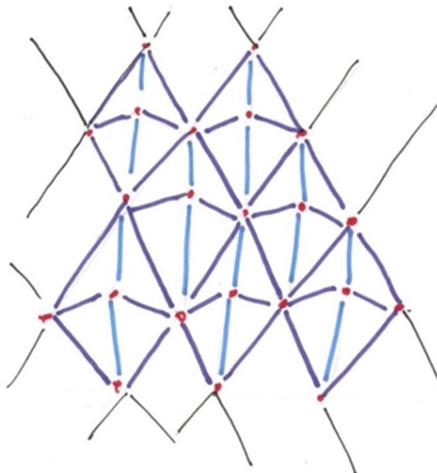
**Fig. 3.2:** Geometria del modello elementare del *Blinking Sail Façade System*

L'attuazione avviene tramite il controllo dell'allungamento dei due cavi verticali che permettono al componente di chiudersi uscendo dal piano di facciata.

I moduli possono essere assemblati tra loro in modo da ottenere estese superfici schermate caratterizzate esteticamente dall'aggettare delle vele. La schermatura così progettata può essere utilizzata come collettore sia di energia solare che di energia eolica, nel primo caso applicando le celle solari e nel secondo sfruttando l'allungamento indotto dal vento nei cavi.



**Fig. 3.3:** Modello meccanico del *Blinking Sail Façade System*



**Fig. 3.4:** Modello concettuale del *Blinking Sail Façade System*

### 3.2.1 Meccanismo di attivazione

Esaminiamo il movimento del modulo elementare *Blinking Sail* descritto nella sezione precedente, che è generato dall'opportuno allungamento dei cavi 1-3 e 3-5.

Al tempo  $t$ , l'aliquota di allungamento dell'elemento  $m$ -esimo che collega i nodi  $i$  e  $j$  è data dall'equazione di compatibilità

$$\dot{e}_m = (\dot{\mathbf{u}}_j - \dot{\mathbf{u}}_i) \cdot \mathbf{a}_m$$

Dove:

$\dot{\mathbf{u}}_i$  e  $\dot{\mathbf{u}}_j$  denotano rispettivamente i vettori di velocità dei nodi  $i$  e  $j$ ;

$\mathbf{a}_m$  è il vettore unitario parallelo al segmento che collega i nodi  $i$  e  $j$  (indirizzato verso il nodo  $j$ );

$\ell_m$  è la lunghezza dell'elemento al tempo  $t$ .

Assemblando le componenti cartesiane libere (cioè non vincolate) della velocità di tutti i nodi in un unico vettore globale di velocità  $\dot{\mathbf{q}}$ , e le aliquote di allungamento di tutte le barre e i cavi in un vettore di variabili di controllo  $\mathbf{e}$ , possiamo riscrivere le equazioni di compatibilità dell'intera struttura nella seguente forma matriciale<sup>4</sup>

$$\mathbf{B}\dot{\mathbf{q}} = \dot{\mathbf{e}}$$

dove  $\mathbf{B}$  indica la matrice cinematica istantanea (o di compatibilità).

---

<sup>4</sup> Fraternali F, De Chiara E, Skelton RE. On the use of morphing and wind stable tensegrity structures for shading facades of smart buildings. *Smart Mater Struct* 2015; 24, 105032 (10pp).

Consideriamo ora una *time history* assegnata  $\dot{\mathbf{e}} = (\dot{\mathbf{e}})$  delle variabili di controllo. Il movimento generato da tale strategia di azionamento della struttura è calcolato a partire dall'equazione integrale

$$\mathbf{q} = \int_0^t \dot{\mathbf{q}} dt = \int_0^t \mathbf{B}^{-1} \dot{\mathbf{e}} dt$$

dove  $\mathbf{B}^{-1}$  è l'inversa della matrice cinematica  $\mathbf{B}$  corrispondente alla configurazione corrente della struttura, che si presume esista.

Il meccanismo di attuazione del modulo *Blinking Sail* preso in esame è illustrato in fig. 2.5.

Tale meccanismo è generato azionando i cavi 1-3 e 3-5, attraverso l'applicazione di storie d'allungamento indicate sui diversi pannelli di fig. 2.5. I restanti membri del modulo restano indeformati durante il movimento della struttura in fig. 2.5. Variando opportunamente la tensione nei cavi 1-3 e 3-5, si evince dalla figura che i nodi 3 e 5 si muovono fuori dal piano parallelo alla superficie dell'edificio, mentre i nodi 2 e 4 si muovono nel piano x-y innescando la piegatura del modulo, la cui configurazione assomiglia a quella di una vela gonfiata dal vento. Gli angoli del modulo inizialmente assumono i valori  $\alpha = 0$  e  $\beta = 45^\circ$  (configurazione in alto a sinistra in fig. 2.5) e assumono i valori  $\alpha = 45^\circ$  e  $\beta = 38^\circ$  nella configurazione totalmente ripiegata.

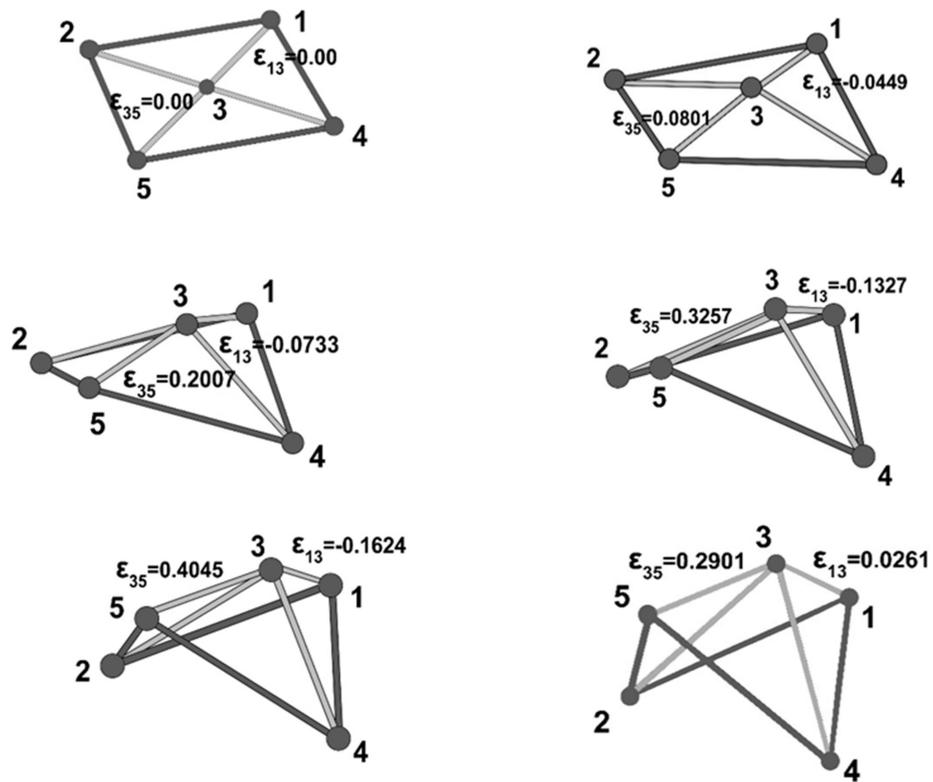


Fig. 3.5: Meccanismo di attivazione del *Blinking Sail Façade System*

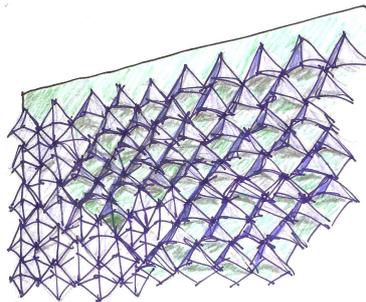
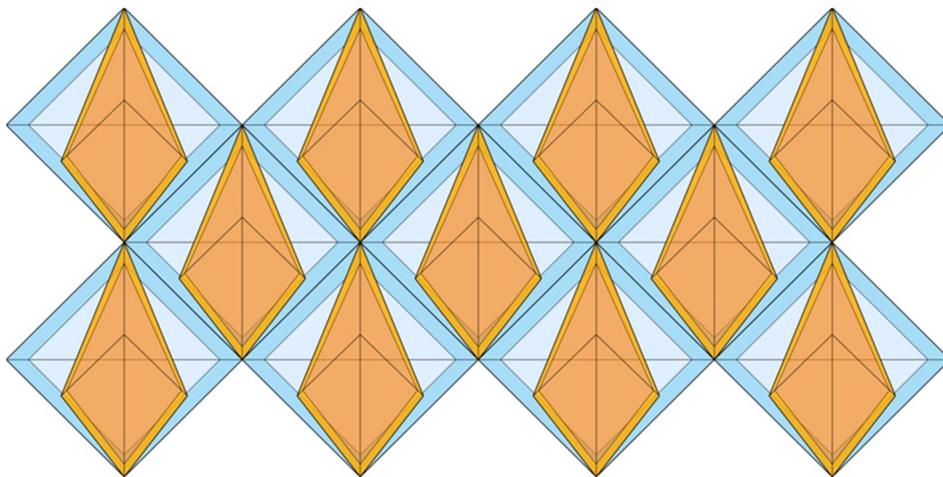


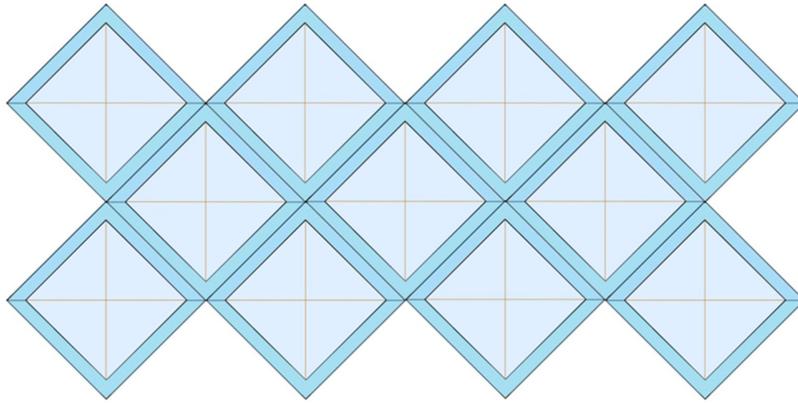
Fig. 3.6: Schizzo del *Blinking Sail Façade System*

### 3.2.2 *Blinking Sail Solar Façade System*

Il meccanismo di attuazione illustrato nella fig. 2.5 è alla base del sistema di facciata solare illustrato nelle figg. 2.7-2.8. Tale schermatura intelligente, pensata per un edificio energeticamente efficiente (EEB), è composto da diversi moduli elementari romboidali assemblati assieme. I moduli sono dinamici e possono cambiare configurazione secondo il meccanismo di attuazione illustrato, modificando l'aspetto formale dell'involucro. In fig. 2.9 è mostrata la configurazione di completa chiusura del *Blinking Sail Solar Façade System*, mentre in fig. 2.10 è presentata la configurazione parzialmente aperta.



**Fig. 3.7:** Prospetto frontale della configurazione parzialmente aperta del *Blinking Sail Solar Façade System*



**Fig. 3.8:** Prospetto frontale della configurazione completamente chiusa del *Blinking Sail Solar Façade System*



**Fig. 3.9:** Configurazione completamente chiusa del *Blinking Sail Solar Façade System*



Fig. 3.10: Configurazione parzialmente aperta del *Blinking Sail Solar Façade System*

Gli schermi *Blinking Sail* sono costituiti da un insieme di occhi (moduli romboidali) pieghevoli (origami) integrati con moduli fotovoltaici flessibili in materiale composito applicati in corrispondenza degli elementi compressi (barre) perimetrali<sup>5678</sup>. Tali moduli sono aperti (cioè estroflessi

---

<sup>5</sup> Shin KB, Kim CG, Hong CS, Lee HH. Thermal distortion analysis of orbiting solar array including degradation effects of composite materials. *Compos Part B-Eng* 2001; 32(4): 271-285.

<sup>6</sup> Groenewolt, A., Bakker, J., Hofer, J., Nagy, Z., Schlüter, A. Methods for modelling and analysis of bendable photovoltaic modules on irregularly curved surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2016, pp 1-11. (Article in Press).

<sup>7</sup> Jackson EM, Laibinis PE, Collins WE, Ueda A, Wingard CD, Penn B. Development and thermal properties of carbon nanotube-polymer. *Compos Part B-Eng* 2016; 89:362-373.

<sup>8</sup> Gan, L., Shang, S., Yuen, C.W.M., Jiang, S.-X., Luo, N.M. Facile preparation of graphene nanoribbon filled silicone rubber nanocomposite with improved thermal and mechanical properties. *Compos Part B-Eng* 2015; 69:237-242.

rispetto alla facciata) durante la notte e sono progressivamente chiusi durante le ore diurne, attraverso le modalità di attuazione precedentemente illustrate. Le schermature sono progettate per ridurre l'irraggiamento solare della superficie del fabbricato servito e quindi indurre una sostanziale diminuzione del consumo di aria condizionata. I foto-inserimenti delle figg. 2.9 e 2.10 mostrano la potenziale applicazione degli schermi *Blinking Sail Solar Façade System* nel campus dell'Università di Salerno (Fisciano, Salerno).

### ***3.2.3 Blinking Sail Wind Energy Harvester***

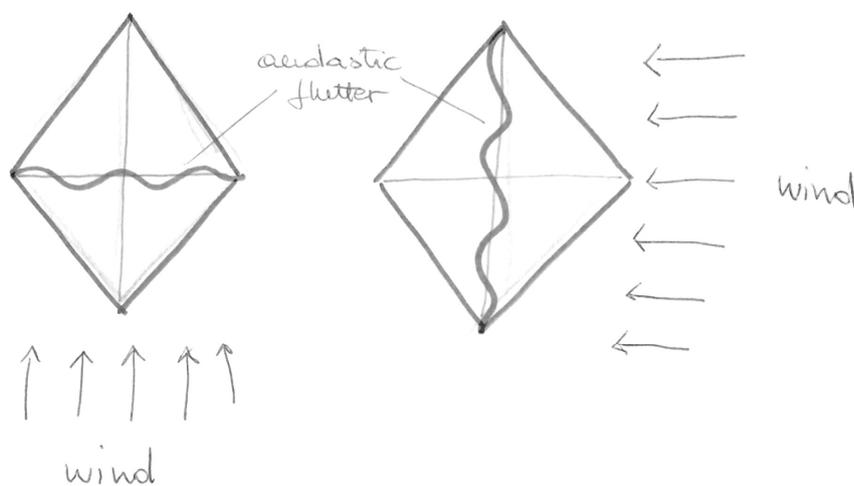
Il *Blinking Sail Wind Energy Harvester* è composto da un sistema di moduli pieghevoli simile a quello presentato nel paragrafo precedente. Questa tipologia di facciata è, però, progettata per convertire il movimento indotto del vento in energia elettrica.

La membrana della vela<sup>9</sup>, ancorata a ciascun modulo, è gonfiata dal vento ed è collegata ai cavi estensibili che sporgono dal profilo dell'edificio (o da una struttura rigida) e si avvolgono intorno ad un rotore - generatore. L'allungamento indotto dal flusso del vento a tali cavi fa ruotare il generatore, producendo energia immediatamente utilizzabile dal fabbricato servito. Inoltre, la vibrazione aeroelastica (*flutter*) della membrana sollecitata dal vento, eventualmente dotata di attuatori piezoelettrici o elettromagnetici, può essere convertita in ulteriore energia

---

<sup>9</sup> Malpede, S., Baraldi, A. A fully integrated method for optimising fiber-membrane sails (2008) 3rd High Performance Yacht Design Conference 2008, HPYD 2008,. 47-56.

che può essere raccolta<sup>1011</sup>. In fig. 2.12. è mostrato lo schema funzionale del modulo elementare della facciata eolica, che si ispira alla boa stazionaria alimentata dall'energia delle onde<sup>12</sup>. In figg. 2.13 - 2.14 sono, invece, illustrate le potenziali applicazioni del *Blinking Sail Wind Energy Harvester* in corrispondenza di facciate cieche di edifici residenziali che servono il campus dell'Università di Salerno (Fisciano, Salerno).

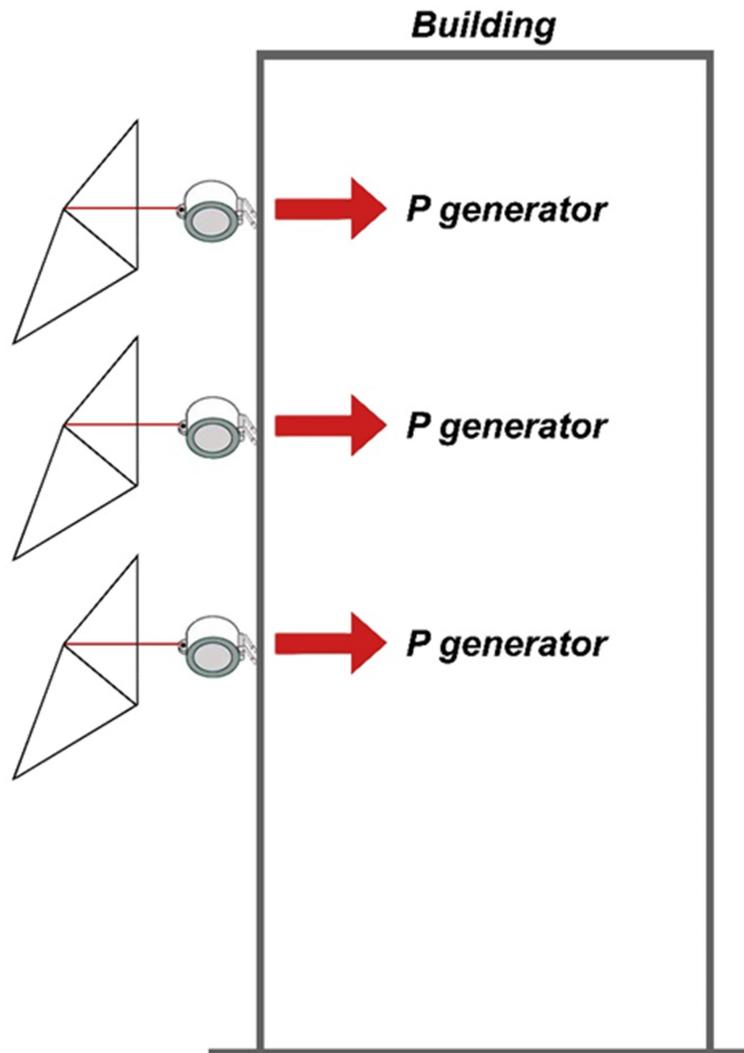


**Fig. 3.11:** Sollecitazione del vento sulla membrana del modulo *Blinking Sail Wind Energy Harvester*

<sup>10</sup> Dinh Quy V, Van Sy N, Tan Hung D, Quoc Huy V. Wind tunnel and initial field tests of a micro generator powered by fluid-induced flutter. *Energy for Sustainable Development* 2016; 33:75-83.

<sup>11</sup> Arroyo E, Foong S, Wood KL. Modeling and experimental characterization of a fluttering windbelt for energy harvesting. *Journal of Physics: Conference Series* 2014; 557 (1), art. no. 012089.

<sup>12</sup> Skelton RE, de Oliveira MC. *Tensegrity Systems*. New York: Springer Science+Business Media, 2009.



**Fig. 3.12:** Diagramma funzionale del modulo *Blinking Sail Wind Energy Harvester*



**Figg. 3.13 - 3.14:** Applicazione di moduli *Blinking Sail Wind Energy Harvester* in corrispondenza di facciate cieche

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

### 3.3 Fan-Fish Solar Façade System

Il secondo progetto di componente è il *Fun Fish solar Façade System*. Prendendo spunto dalla zoologia, in cui la scaglia è una piccola lamella rigida che origina dalla pelle di alcuni animali a scopo protettivo, si è pensato ad un componente di facciata che avesse caratteristiche strutturali simili alle scaglie dei pesci. Queste ultime conferiscono protezione al pesce, mantenendo la necessaria elasticità dei movimenti, e sono embricate, sovrappongono cioè la parte posteriore a quella anteriore della scaglia successiva.



**Fig. 3.15:** Concept del *Fan-Fish Solar Façade System* - scaglie di pesce, ventaglio e sovrapposizione di ventagli

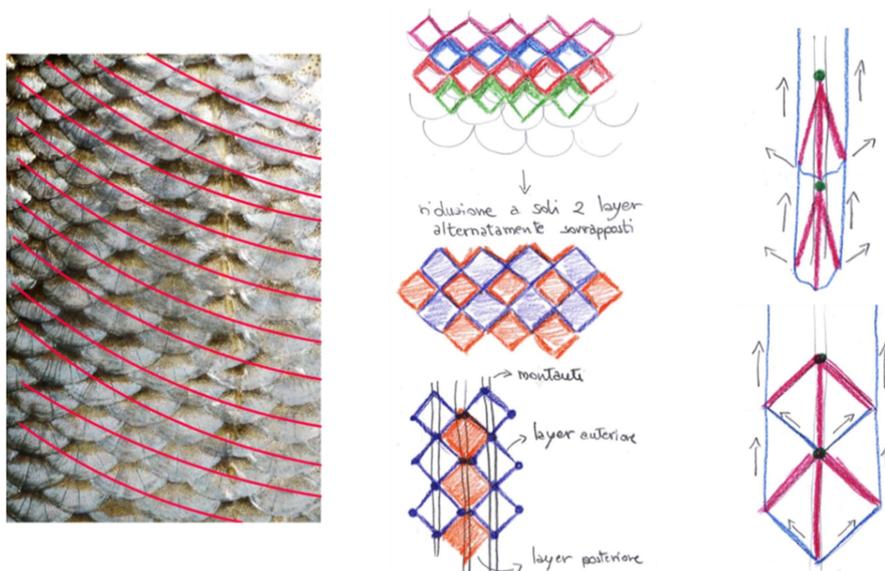
La struttura a scaglie si presta molto bene per la realizzazione di schermature solari che possano essere sovrapposte alle facciate. La singola scaglia è stata pensata come un ventaglio, in modo da poter cambiare la configurazione del pannello da aperto a chiuso, rendendo il sistema adattivo. Inoltre sulle stecche dei ventagli è possibile porre dei pannelli solari di ultima generazione.



Fig. 3.16: Schizzo del *Fan-Fish Solar Façade System* applicato ad un edificio

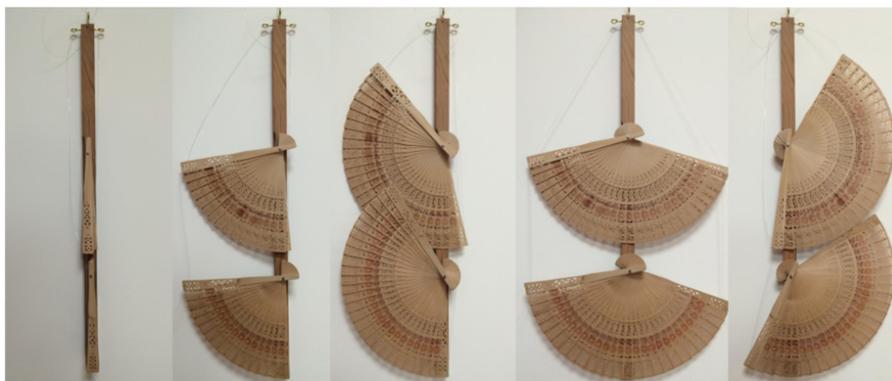
### ***3.3.1 Dal concept al modello fisico***

Il pattern di distribuzione delle scaglie sul corpo del pesce ha una disposizione elicoidale a layer di scaglie sovrapposti. Questa configurazione è stata ridotta a soli due layer alternatamente sovrapposti disposti lungo montanti verticali.

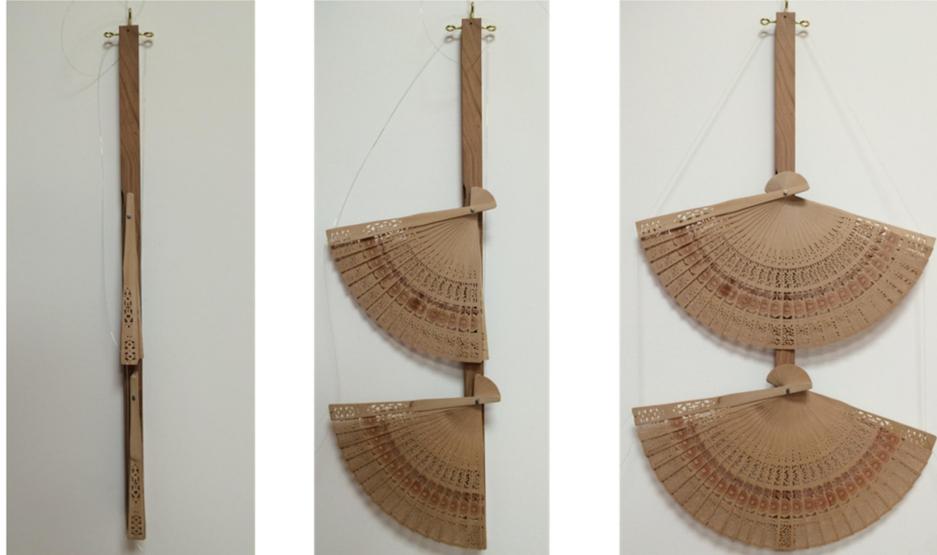


**Fig. 3.17:** Pattern con disposizione elicoidale a layer di scaglie sovrapposti, sua riduzione a modello astratto con ipotesi di funzionamento modulo

Dal *concept* si è poi passati alla realizzazione di un modello fisico del modulo, realizzato con un montante in legno, due ventagli e due cavi di nylon. Successivamente si sono assemblati tre montanti, realizzando un pannello più grande.



**Fig. 3.18:** Sequenza di apertura del modulo.



**Fig. 3.19:** Singolo modulo completamente chiuso, parzialmente aperto, completamente aperto.



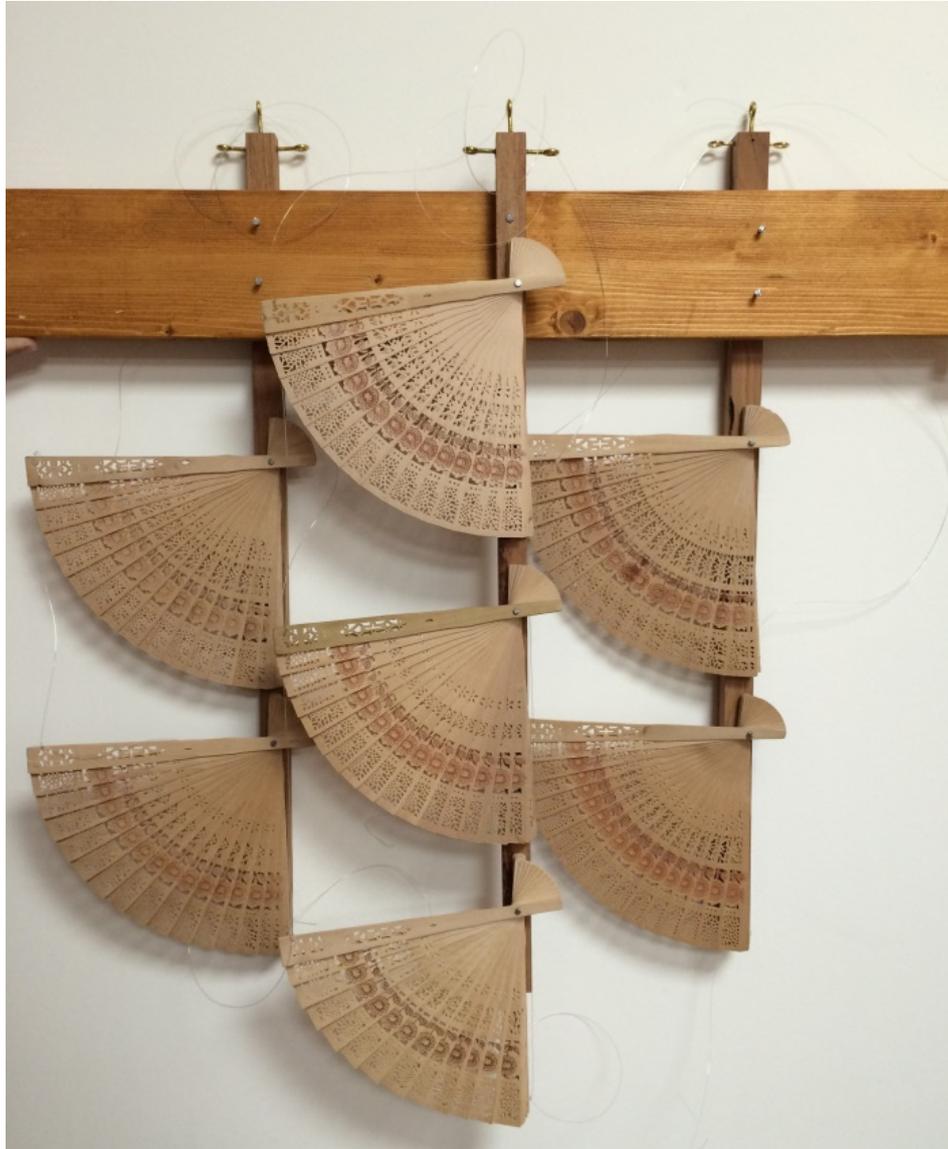
**Fig. 3.20:** Singolo modulo aperto e ruotato verso sinistra, aperto e ruotato verso destra.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 3.21:** Pannello costituito da tre montanti completamente chiuso.



**Fig. 3.22:** Pannello costituito da tre montanti parzialmente aperto.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 3.23:** Pannello costituito da tre montanti completamente aperto.



**Fig. 3.24:** Pannello costituito da tre montanti completamente aperto e ruotato verso sinistra.

---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*



**Fig. 3.25:** Pannello costituito da tre montanti completamente aperto e ruotato verso destra.



Fig. 3.26: Sequenza di apertura del pannello.

### 3.3.2 Predimensionamento del modulo

Una volta realizzato il modello fisico si è proceduto alla riduzione dello stesso ad uno schema utile per il predimensionamento degli elementi.

Il modello prevede una struttura caratterizzata da cinque nodi, quattro barre e quattro cavi.

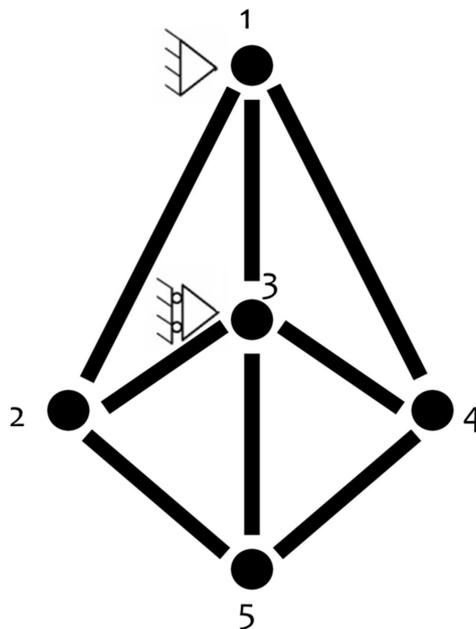


Fig.3.27: Schematizzazione del modulo *Fan Fish System*.

I gradi di vincolo esterni sono tre e dunque non vi è iperstaticità esterna.

$$s = a + s_e$$

indicando con  $a$  il numero delle aste,  $n$  il numero nodi e  $s_e$  la molteplicità vincoli esterni.

Il numero delle aste addizionato alla molteplicità dei vincoli esterni supera il doppio del numero dei nodi. Infatti per  $a = 8$  e  $n = 5$ :

$$a + s_e > 2n \rightarrow 11 > 10$$

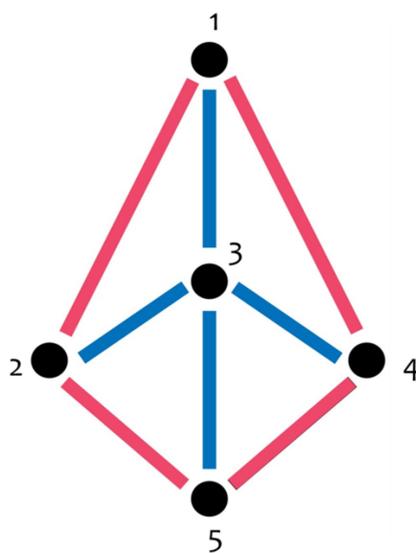
In altri termini il numero dei gradi di vincolo supera di un'unità il numero dei gradi di libertà e la travatura reticolare si dice una volta iperstatica internamente.

Risolvendo sia con il metodo dei nodi che con il metodo grafico la struttura, si individuano le aste tese 1-2, 1-4, 2-5 e 4-5 e le aste compresse 1-3, 3-2, 3-4 e 3-5, confermando quanto ipotizzato osservando il modello fisico.

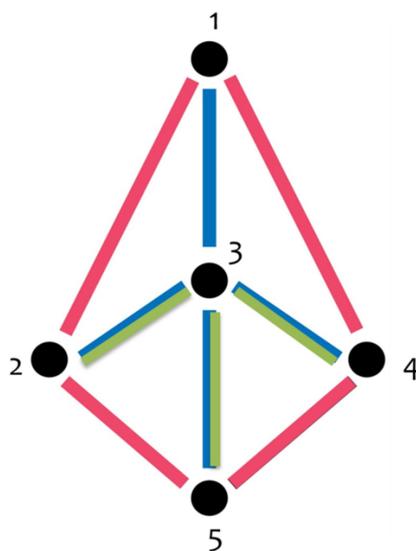
Gli sforzi nelle aste risultano essere tutti proporzionali all'incognita iperstatica, che non è altro che lo sforzo di pretensione che si applica al sistema *tensegrity* per mantenerlo nella posizione di equilibrio.

Risolvendo il problema cinematico ad esso duale, è possibile determinare lo spostamento dei nodi al variare dello sforzo di pretensione nei cavi tesi e al variare della lunghezza degli stessi.

La progettazione del modulo prevede che questo soddisfi i criteri di design di minima massa e che sia in grado di sopportare le sollecitazioni ortogonali al piano del meccanismo.



**Fig. 3.28:** Schematizzazione del modulo - aste compresse in blu e tese in rosa.



**Fig. 3.29:** Schematizzazione del modulo - aste considerate come mensole incastrate nel nodo 3.

Per il predimensionamento degli elementi si sono considerate le sole aste costituenti la struttura principale e le aste 2-3, 3-5 e 3-4 sono state considerate come mensole incastrate nel nodo 3. Quindi il carico da vento applicato sulla superficie del ventaglio dispiegato è stato ripartito sulle aste indicate e queste ultime sono state studiate come semplici mensole.

È stata valutata l'azione del vento secondo le Norme Tecniche del DM 14/01/2008.

$$p = q_0 + c_e + c_p + c_d$$

con

$$q_0 = 1960 \text{ N/m}^2$$

$$c_e = 1,63$$

$$c_{p+} = 0,8 \text{ e } c_{p-} = -0,4$$

$$c_d = 1$$

$$p_+ = 2556 \text{ N/m}^2$$

$$p_- = 1278 \text{ N/m}^2$$

Per calcolare il momento  $M$  e il taglio  $T$  sulle mensole si considererà la pressione  $p_+$  essendo la condizione più gravosa.

$$A_{max} = 0,8831 \text{ m}^2$$

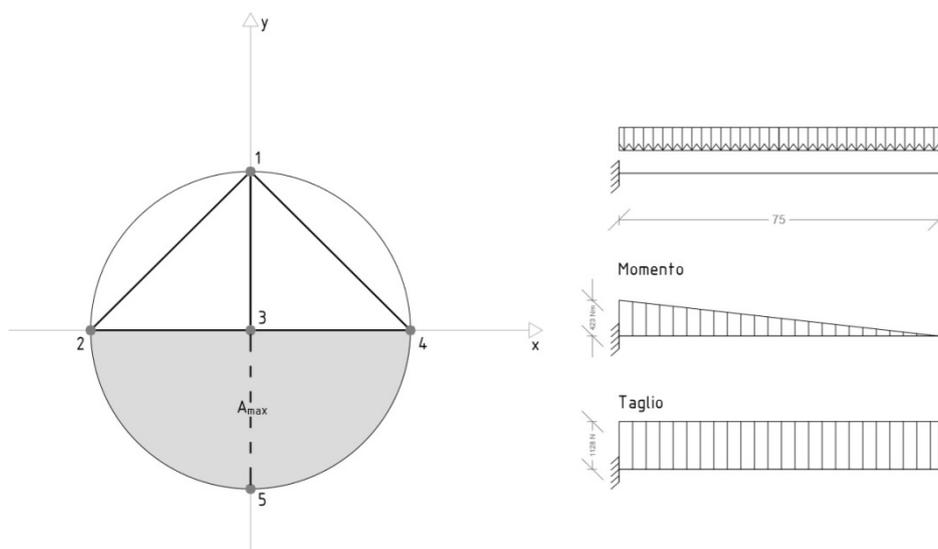
$$F = A_{max} \cdot p_+ = 2257 \text{ N}$$

$$\frac{F}{2} = 1128 \text{ N}$$

$$q_f = \frac{F}{2 \cdot l \cdot 1} = 1504 \text{ N/m}^2$$

$$M = \frac{q_f \cdot l^2}{2} = 423 \text{ Nm}$$

$$T = q_f \cdot l = 1128 \text{ N}$$



**Fig. 3.30:** Analisi delle sollecitazioni.

Si è scelto di realizzare il modulo in alluminio. È possibile riconoscere che le leghe di alluminio presentano le seguenti peculiarità

- Ampia gamma di proprietà meccaniche, che copre quell'offerta dagli ordinari acciai da carpenteria, essendo le leghe una grande famiglia di materiali da costruzione.

- Ottima resistenza alla corrosione che non richiede, in genere, alcuna protezione delle strutture in alluminio, anche in ambienti aggressivi.
- Vantaggi in termini di riduzione di peso dovuti alla leggerezza del materiale (il peso specifico è circa un terzo di quello dell'acciaio). Tali vantaggi possono tuttavia essere parzialmente ridotti dalla necessità di contenere l'elevata deformabilità degli elementi strutturali dovuta al basso modulo elastico del materiale (circa un terzo dell'acciaio), che provoca inoltre una spiccata sensibilità ai fenomeni di instabilità.
- Scarsa tendenza alla rottura fragile, anche se particolare attenzione dovrebbe essere prestata ai problemi in cui è richiesta un'elevata duttilità.
- Produzione industriale tramite il processo di fabbricazione per estrusione, che permette di progettare qualsiasi sezione strutturale con forma personalizzata.
- Impiego di svariate tipologie di collegamenti (bullonatura, rivettatura e saldatura).

Dopo queste considerazioni preliminari, è possibile affermare che l'impiego delle leghe di alluminio può diventare economico, e quindi competitivo, in tutte quelle applicazioni in cui si può trarre pienamente beneficio delle caratteristiche sopra elencate.

La leggerezza consente di:

- Semplificare le fasi di montaggio;
- Trasportare facilmente elementi prefabbricati;

- Ridurre i carichi trasmessi alle fondazioni;
- Risparmiare energia sia durante la fase di montaggio che in quella di servizio;
- Ridurre il lavoro fisico.

La resistenza alla corrosione permette di:

- Ridurre le spese di manutenzione;
- Fornire buone prestazioni in ambienti corrosivi.

La funzionalità delle forme strutturali, ottenuta dal processo di estrusione, permette di:

- Migliorare l'efficienza della sezione trasversale, consentendo di ottenere il massimo rendimento strutturale;
- Ottenere direttamente forme irrigidite, senza utilizzare sezioni composte mediante saldatura o bullonatura di elementi accessori;
- Semplificare i sistemi di collegamento tra le diverse componenti;
- Produrre profili più economici perché più razionali.

Il predimensionamento delle sezioni è stato effettuato in base a quanto indicato nelle *Istruzioni per la Progettazione, l'Esecuzione ed il Controllo di Strutture di Alluminio*<sup>13</sup>. Il valore di progetto del momento flettente  $M_{Ed}$  in ogni sezione trasversale deve soddisfare la seguente relazione:

$$\frac{M_{Ed}}{M_{Rd}} \leq 1.0$$

La resistenza di progetto per flessione intorno ad un asse principale della sezione  $M_{Rd}$  deve essere assunta pari al minimo tra  $M_{u,Rd}$  e  $M_{c,Rd}$ , essendo

---

<sup>13</sup> Consiglio nazionale delle ricerche - Commissione di studio per la predisposizione e l'analisi di norme tecniche relative alle costruzioni  
CNR-DT 208/2011 - ROMA – CNR 8 Novembre 2011 – rev. 31 Dicembre 2013

$M_{u,Rd}$  la resistenza di progetto delle sezioni forate e  $M_{c,Rd}$  la resistenza di progetto per le altre sezioni, date da:

$$M_{u,Rd} = \frac{W_{net} \cdot f_u}{\gamma_{M1}}$$

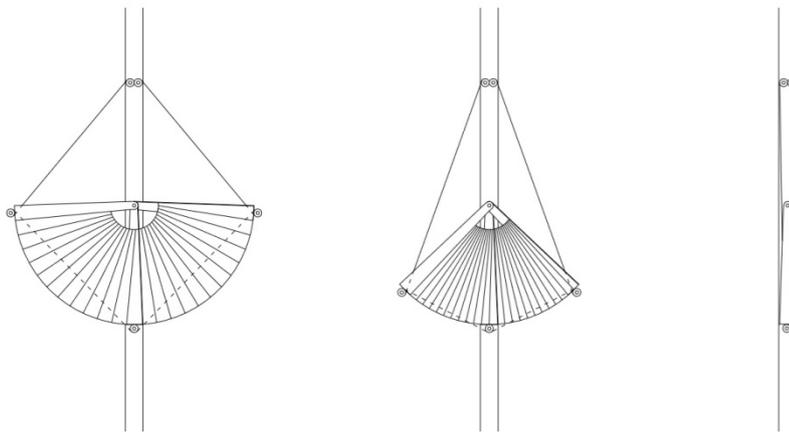
$$M_{c,Rd} = \frac{\alpha \cdot W_{el} \cdot f_0}{\gamma_{M1}}$$

Il valore di progetto della sollecitazione di taglio  $V_{Ed}$  in ogni sezione trasversale deve soddisfare la relazione seguente:

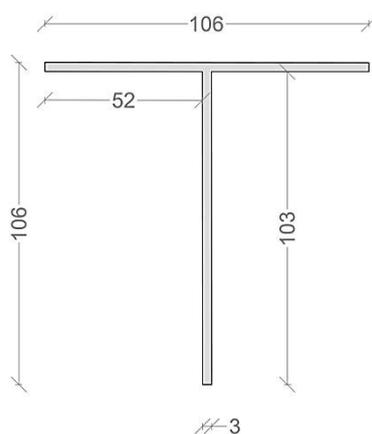
$$\frac{V_{Ed}}{V_{Rd}} \leq 1.0$$

dove  $V_{Rd}$  è la resistenza di progetto a taglio della sezione trasversale.

La struttura è costituita da elementi verticali continui in alluminio dello spessore di 3 mm con sezione a T di dimensione 106x106 mm.

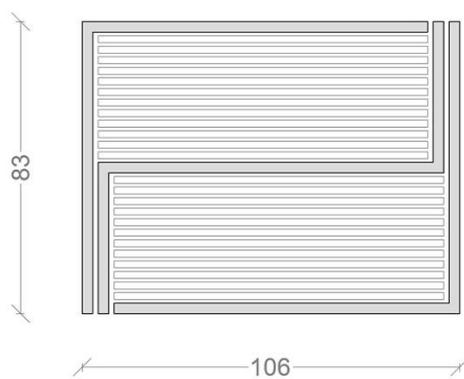


**Fig. 3.31:** Sequenza chiusura ventaglio.

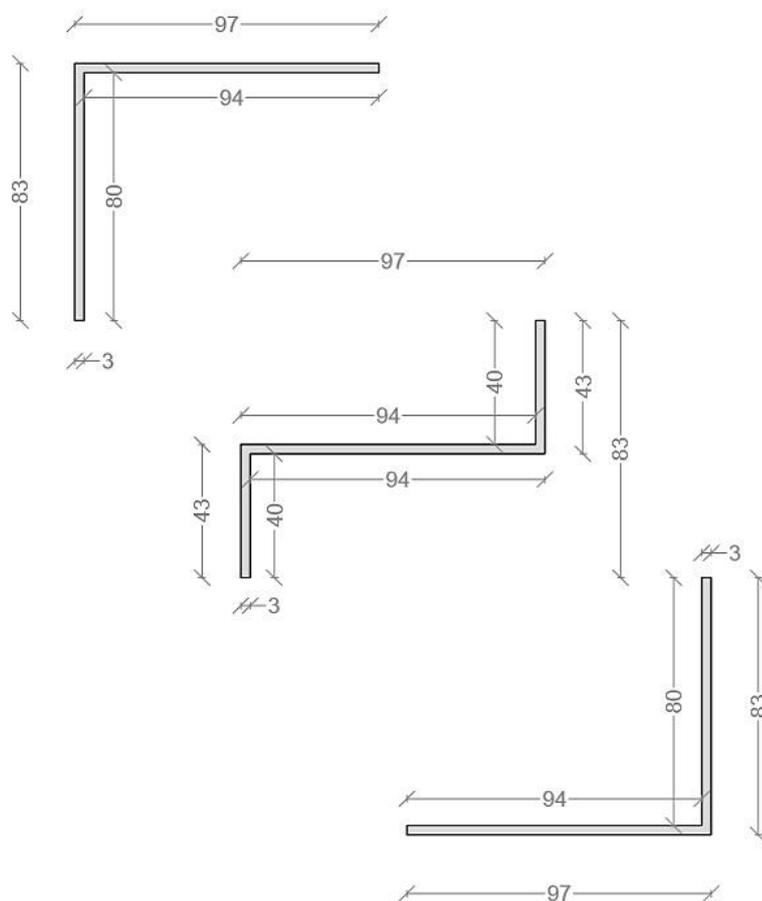


**Fig. 3.32:** Sezione montante.

Le aste portanti del ventaglio sono realizzate con profili in alluminio dello spessore di 3 millimetri, due di forma ad L e uno ad S, di dimensione 97x83 mm.



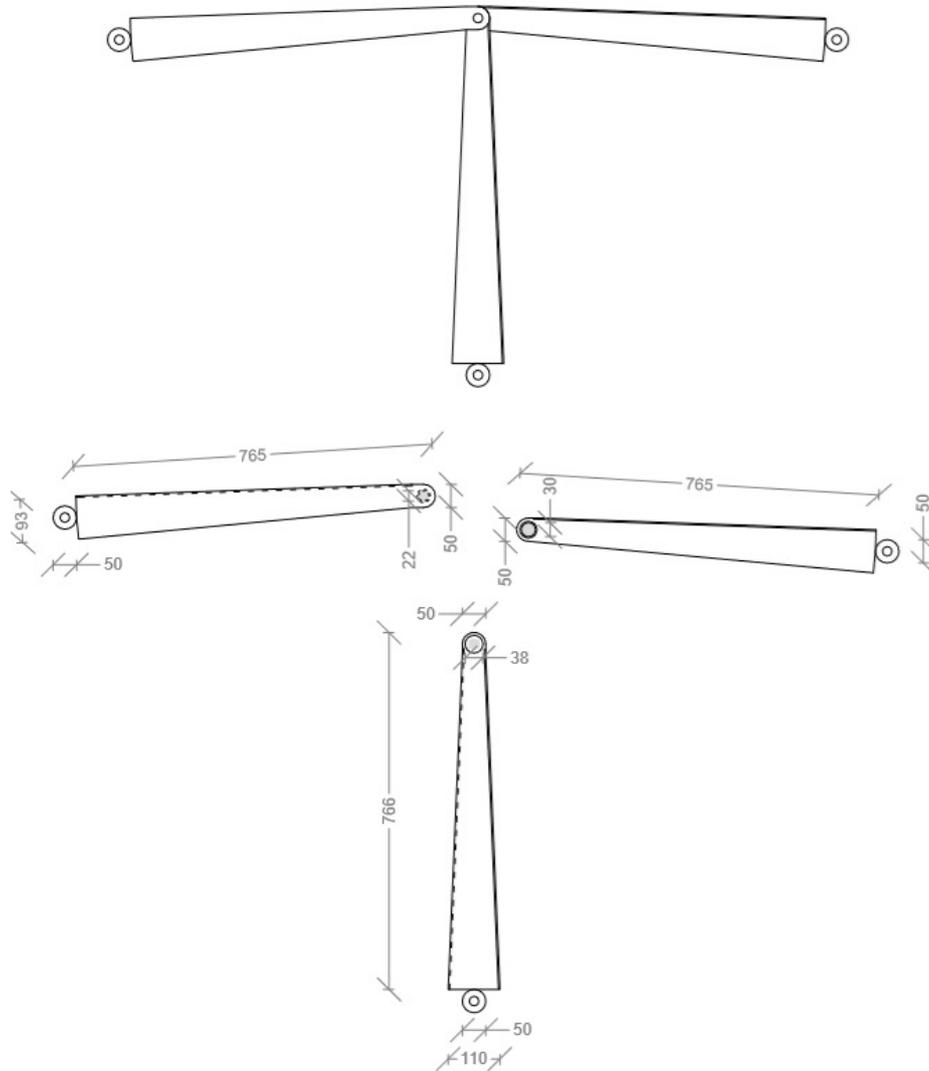
**Fig. 3.33:** Sezione delle aste del ventaglio.



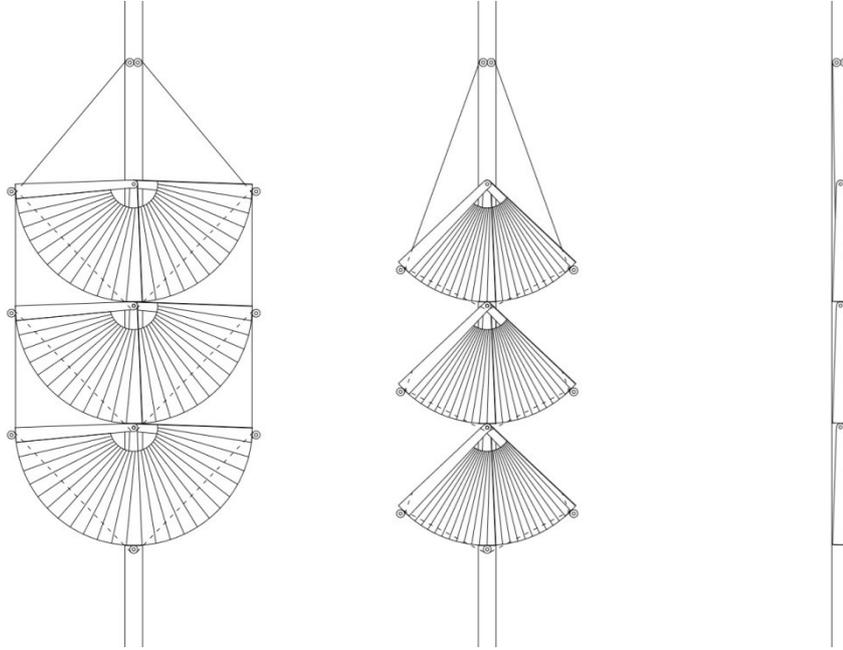
**Fig. 3.34:** Carpenteria delle aste del ventaglio.

I profili così articolati permettono di alloggiare le lamelle del ventaglio nella posizione di chiusura, in modo che possano essere protette dagli agenti atmosferici.

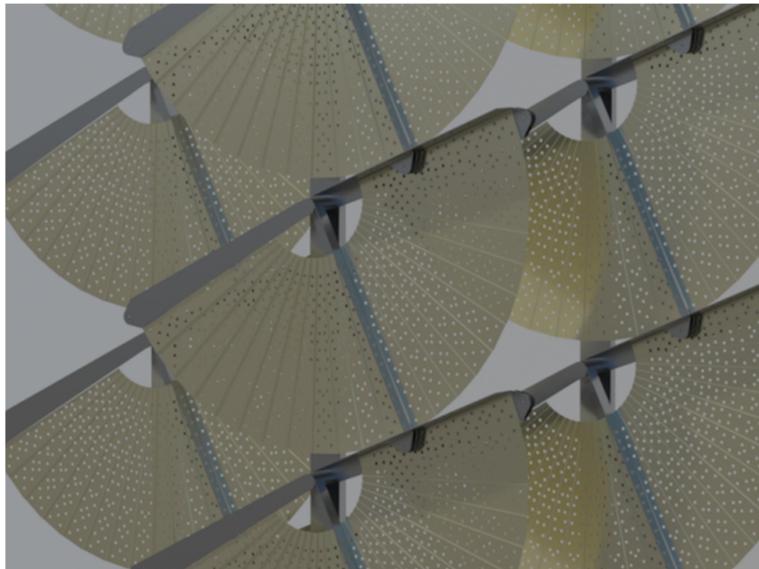
Le aste del ventaglio sono sagomate in modo da garantire la resistenza richiesta e da riuscire a soddisfare le esigenze dell'articolazione del ventaglio, come si può vedere da fig. 2.35.



**Fig. 3.35:** Particolare costruttivo aste.



**Fig. 3.36:** Sequenza chiusura di più moduli assemblati.



**Fig. 3.37:** Render del dettaglio dei ventagli



Fig. 3.38: Render del sistema di schermatura solare *Fun Fish*.

### 3.4 Osservazioni

I principali vantaggi delle architetture *tensegrity* negli edifici energeticamente efficienti sono:

- Strutture con massa minima per una grande varietà di condizioni di carico e vincolo, senza fenomeni di *yielding* e *buckling*;
- Cooperazione della meccanica di controllo e della struttura nel cambio della configurazione di equilibrio;
- Possibilità di raccogliere energia dall'ambiente;
- Possibilità di costruire facciate *tensegrity* controllabili intorno all'edificio;

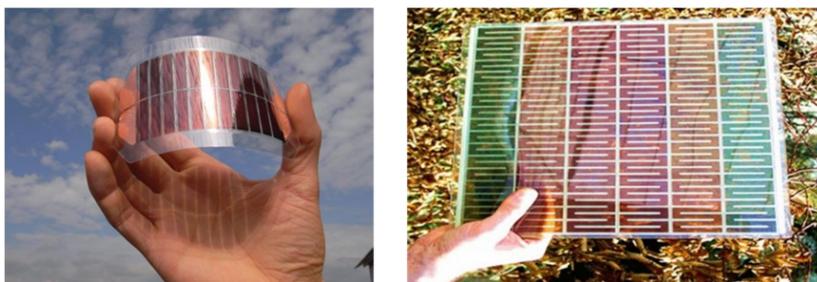
---

*Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di schermature solari intelligenti e innovative in tecnologia tensegrity.*

- Facilità di integrazione tra le strutture *tensegrity* con pannelli fotovoltaici e acustici.

Progettare edifici che sfruttino sistemi di Automazione (BACS/HBES) permette di massimizzare l'efficienza energetica degli impianti dell'edificio in relazione alle condizioni ambientali esterne e ai differenti e variabili scenari di utilizzo e occupazione dei singoli ambienti dell'edificio stesso, fornendo nel contempo i massimi livelli di comfort, sicurezza e qualità. L'impiego esteso dei sistemi BACS / HBES, educa parallelamente ad apprezzare ed apprendere i criteri di risparmio energetico e di rispetto dell'ambiente, correggendo le cattive abitudini dell'utente. L'utente può intervenire nella gestione di tutti gli impianti in modalità Wireless. Reti di sensori di rilevamento wireless controllano la qualità indoor. Essi sono controllati attraverso applicazioni di tecnologia touch, sensori biometrici e computer intervenendo sulla gestione di tutti gli impianti. Stazioni di controllo intervengono sugli impianti dell'edificio gestendo illuminazione, temperatura, livelli di umidità, trasporto persone, merci e comunicazione, sicurezza.

Gli schermi solari progettati possono essere integrati con celle solari di terza generazione. Le celle solari Dssc ("dye sensitized solar cell", sensibilizzate a colorante) sono flessibili, semitrasparenti e colorate.



**Fig. 3.39:** Celle solari Dssc - Dye sensitized solar cell, sensibilizzate a colorante.

La radiazione solare è catturata da una tintura organica o metallorganica. Le pareti degli edifici e i vetri possono diventare pannelli solari grazie all'integrazione con

queste celle, contribuendo alla produzione di energia elettrica nelle abitazioni. Inoltre, rispetto ai moduli in silicio, funzionano anche con il cielo nuvoloso (in condizione di luce diffusa) e su pareti verticali (mentre gli impianti fotovoltaici in commercio hanno bisogno di un preciso angolo di inclinazione).

## CAPITOLO 4

### CONCLUSIONI

#### 4.1 Conclusioni e impatti attesi

La ricerca si è posta come obiettivo l'individuazione di criteri di progettazione di schermature solari in *tensegrity* da applicarsi sulle facciate di edifici di nuova costruzione o esistenti, cercando di coniugare innovazione e architettura, perseguendo un design moderno e ponendo una particolare attenzione all'efficientamento delle prestazioni energetiche degli edifici.

L'utilizzo della tecnologia *tensegrity* permette di controllare e gestire luce e calore garantendo un clima ottimale e conferendo un'immagine architettonica significativa unica e variabile, ottenendo sistemi di facciata leggeri e facilmente movimentabili con un bassissimo impiego di energia, per altro reperibile dai pannelli solari applicati sui moduli stessi.

Il primo progetto di componente, Blinking Sail Solar Façade System, si ispira al progetto di una boa stazionaria realizzata in architettura *tensegrity* alimentata dall'energia delle onde e ad un recente brevetto statunitense consistente in un mulino a vento realizzato con delle vele mobili. Il secondo progetto di componente è il Fun Fish solar Façade System. Prendendo spunto dalla zoologia, in cui la scaglia è una piccola lamella rigida che origina dalla pelle di alcuni animali a scopo protettivo, si

è pensato ad un componente di facciata che avesse caratteristiche strutturali simili alle scaglie dei pesci. La singola scaglia è stata pensata come un ventaglio, in modo da poter cambiare la configurazione del pannello da aperto a chiuso, rendendo il sistema adattivo. Inoltre sulle stecche dei ventagli è possibile porre dei pannelli solari di ultima generazione.

Le soluzioni proposte garantiscono una riduzione della temperatura della superficie di facciata impedendone l'irraggiamento diretto e favorendo la ventilazione verticale delle superfici. Il sistema di schermatura riduce i carichi termici nei mesi estivi, garantendo comunque una buona illuminazione dello spazio interno grazie alla possibilità di regolare la geometria della schermatura. L'idea è stata quella di sviluppare un sistema variabile che, connesso ad un impianto di automazione, diventi parzialmente indipendente dalla gestione dell'utenza, garantendo la riduzione dei consumi energetici dovuti a riscaldamento-raffrescamento dell'edificio.

I principali vantaggi, quindi, dell'applicazione delle architetture *tensegrity* alle schermature solari sono:

- La possibilità di ottenere strutture con massa minima per una grande varietà di condizioni di carico e vincolo, senza fenomeni di *yielding* e *buckling*;
- Cooperazione della meccanica di controllo e della struttura nel cambio della configurazione di equilibrio;
- Possibilità di raccogliere energia dall'ambiente grazie alla facilità di integrazione tra le strutture *tensegrity* con pannelli fotovoltaici ed eolici.
- Possibilità di costruire facciate *tensegrity* controllabili dall'interno dell'edificio in base alle condizioni esterne e le necessità di comfort

interno, perseguendo l'obiettivo di rendere l'edificio energeticamente efficiente;

Le possibili criticità, legate maggiormente alla tecnologia tensegrity, sono costituite dai seguenti limiti:

- I collegamenti tensegrity devono risolvere il problema della congestione delle barre in acciaio
- La complessità delle strutture richiede che gli operatori che assemblano gli elementi siano altamente qualificati.
- Al fine di sostenere carichi critici, le forze di precompressione potrebbero essere abbastanza elevate, ma solo in caso di moduli di maggiori dimensioni.
- Gli oneri di realizzazione potrebbero essere elevati, in quanto sebbene la minimizzazione di massa permette un risparmio sulle materie prime, la manodopera specializzata risulterebbe più costosa.

L'indagine scientifica condotta sulle schermature solari dinamiche in tecnologia *tensegrity* e la sua applicazione nel complesso sistema edificio apre numerose linee di ricerca.

Tra gli sviluppi futuri della ricerca possiamo individuare ambiti di approfondimento riferiti ai seguenti punti:

- La possibilità di progettare ulteriori schemi di dispiegamento per schermature solari dinamiche in tecnologia *tensegrity*, combinando l'approccio progettuale parametrico con le tecniche di ottimizzazione energetica;

- La possibilità di sviluppare componenti di involucro intelligente che possano essere applicati anche negli interventi di retrofitting energetico degli edifici esistenti;
- L'analisi dei sistemi di automazione e controllo delle performance dell'edificio;
- L'analisi economica, in termini di costi e benefici, relativa alla valutazione e quantificazione dei costi di progettazione, esecuzione, messa in opera e manutenzione a fronte dei vantaggi acquisibili in termini di risparmio energetico e riduzione dell'impatto ambientale;

Inoltre è possibile pensare ad ulteriori sviluppi della ricerca verso ambiti di ampliamento della tematica, come ad esempio quello della prevenzione incendi. Infatti, ai fini della sicurezza degli potrà essere effettuata una specifica valutazione del rischio di propagazione dell'incendio dal generatore fotovoltaico al fabbricato nel quale è incorporato, nel caso di edifici per i quali sono state pensate soluzioni integrate di schermi solari con celle solari.

## BIBLIOGRAFIA

Aa Vv, (2008), *Edifici ed energia*, «Arketipo», 24/Giugno 2008, Il Sole 24 ore, Milano

AA. VV., (2008), *Manuale illustrato per l'impianto domotico*, Tecniche Nuove Ed.

Aa Vv., (2011), «ilProgettoSostenibile», 30/Dicembre 2011, Edicom Edizioni, Milano.

Aa Vv, (2012), *Lezioni di architettura*, CUES Edizioni, Salerno, pp.105-152.

Aa Vv, (2009), *Manuale d'ausilio alla progettazione termotecnica*, AICARR Edizioni, Milano.

Aa Vv, (2008), *Nuovi involucri*, «Arketipo», 21/Marzo 2008, Il Sole 24 ore, Milano

AA. VV., (1994), *Ove Arup & partners*, Arup, London.

Alfano G., V. Betta, F.R. D'Ambrosio, Riccio G., (2008), *Lezioni di Fisica Tecnica*, Liguori Editore, Napoli.

Al-Azzawi, J.S, Blinking sail windmill, Google Patents, 2010, <https://www.google.com/patents/US7780416>

Altomonte S., *L'involucro architettonico come interfaccia dinamica. Strumenti e criteri per un'architettura sostenibile*, prefazione di Giorgio Peguiron, Editrice Alinea, Firenze 2004

Amendola A, Nava EH, Goodall R, Todd I, Skelton RE, Fraternali F. On the additive manufacturing and testing of tensegrity structures. *Compos Struct* 2015;131:66-71.

Amendola A, Smith CJ, Goodall R, Auricchio F, Feo L, Benzoni G, Fraternali F. Experimental response of additively manufactured metallic pentamode materials confined between stiffening plates. *Compos Struct* 2016;142:254-262

Amendola A, Carpentieri G, De Oliveira M, Skelton, R.E., Fraternali, F.. Experimental investigation of the softening-stiffening response of tensegrity prisms under compressive loading. *Compos Struct* 2014;117:234-243.

Archetti G., (2009), *Involucri evoluti e comportamento dinamico: tecnologie e modelli applicativi nel contesto geografico, normativo e imprenditoriale della Regione Emilia Romagna*, Università degli Studi di Ferrara.

Arroyo E, Foong S, Wood KL. Modeling and experimental characterization of a fluttering windbelt for energy harvesting. *Journal of Physics: Conference Series* 2014; 557 (1), art. no. 012089.

Asdrubali F, Baldinelli G, Bianchi F, Sambuco S. A comparison between environmental sustainability rating systems LEED and ITACA for residential buildings. *Build and Environ* 2015; 86: 98-108.

Aste, N., *Il fotovoltaico in architettura*, Esselibri Simone, Napoli 2005.

Baldinelli G., Double skin façades for warm climate regions: Analysis of a solution with an integrated movable shading system. *Build and Environ* 2009; 44: 11071118.

Benham R., *The Architecture of the Well – Tempered Environment*, Architectural Press, Londra, 1969

Bianco JM, Buruaga A, Roji E, Cuadado J, Pelaz B. Energy assessment and optimization of perforated metal sheet double skin façades through Design Builder; A case study in Spain. *Energ Buildings* 2016; 111: 326-336.

Boparai KS, Singh R, Fabbrocino F, Fraternali F. Thermal characterization of recycled polymer for additive manufacturing

applications. Compos Part B-Eng, Online first (2016): DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.009.

Carpentieri G, Skelton RE, Fraternali F. Minimum mass and optimal complexity of planar tensegrity bridges. International Journal Space Structure 2015; 30(3-4):221- 244.

Carpentieri G, Skelton RE, Fraternali F. A minimal mass deployable structure for solar energy harvesting on water canals. Struct Multidiscip O, Online First: DOI:10.1017/s00158-016-1503-5.

CIMMINO M. (2015), Evaluation of sustainability and energy optimization of existing buildings: the development of new technologies for Zero Energy buildings, TEMA. TEMPO MATERIA ARCHITETTURA, vol. 1, doi: <http://dx.doi.org/10.17410/tema.v1i1.29>

Cimmino M. (2015). Valutazione di sostenibilità e ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di nuove tecnologie per edifici ad Energia Zero. In: (a cura di): E. Di Giuseppe, C. Mazzoli, «L'orizzonte del sapere tecnico in Architettura» p. 197-201, Sant'Arcangelo di Romagna (RN), Maggioli editore, ISBN: 978-88-916-1384-4

Cimmino M, Sicignano E (2015). Dalla carpenteria strutturale alla carpenteria dell'involucro. In: «Le giornate italiane della costruzione in acciaio» vol. 2, p. 717-720, Varese, Fva S.r.l., ISBN: 978-88-940089-4-4, Salerno, 1-3 ottobre 2015

Cimmino M, Enrico Sicignano (2016), Ottimizzazione energetica degli edifici esistenti: lo sviluppo di nuove tecnologie per schermature solari intelligenti, In: «Colloqui.AT.e 2015 Bologna», vol. 1, p. 42-46, Bologna, 26-28/11/2015

CIMMINO M., Primicerio F., Sicignano E. (2016). Alloggi temporanei: ospiti per un anno accademico. In «Residences and services for University students», p. 219-326, Tesis, Lory S.r.l. Firenze, ISBN 978-88-941518-2-4, Firenze, 1 ottobre 2016.

Cimmino M., R. Miranda, E. Sicignano, A.J.M. Ferreira, R. Skelton, F. Fraternali. (2016) Composite solar façades and wind generators with tensegrity architecture. Articolo in «Composites Part B Engineering» September 2016 DOI: 10.1016/j.compositesb.2016.09.077

D'Agostino P., Il progetto dell'ombra. Geometria e tecnologia delle schermature solari, CUES Fisciano, 2012

Del Corno B., Mottura G., (2013), *L'integrazione architettonica dei sistemi solari e fotovoltaici*, Maggioli editori.

De Paoli O., "L'involucro vetrato nella progettazione ambientale" in I percorsi della progettazione per la sostenibilità ambientale, a cura di Sala M., Alinea editrice, 2004

Dinh Quy V, Van Sy N, Tan Hung D, Quoc Huy V. Wind tunnel and initial field tests of a micro generator powered by fluid-induced flutter. *Energy for Sustainable Development* 2016; 33:75-83. dell'Architettura e dell'Ambiente, Politecnico di Milano.

Directive 2002/91/EC of the European Parliament and of the Council of 16 December 2002 on the energy performance of buildings.

Directive 2012/27/EU of the European Parliament and of the Council of 25 October 2012 on energy efficiency, amending Directives 2009/125/EC and 2010/30/EU and repealing Directives 2004/8/EC and 2006/32/EC

Di Ruocco G., Oltre la facciata. L'evoluzione tecnologica dell'involucro edilizio tra tradizione e innovazione. CUES Fisciano, 2012

European Commission, HORIZON 2020 Work Programme 2014-2015, PART 5.ii, p. 98, 2014.

Farina I, Fabbrocino F, Colangelo F, Feo L, Fraternali F, Surface roughness effects on the reinforcement of cement mortars through 3D printed metallic fibers. *Compos Part B-Eng* 2016; 99: 305-311.

Farina I, Fabbrocino F, Carpentieri G, Modano M, Amendola A, Goodall R, Feo L, Fraternali F, On the reinforcement of cement mortars through 3D printed polymeric and metallic fibers. *Compos Part B-Eng* 2016; 90: 76-85.

Frampton K, *Tettonica e Architettura. Poetica della forma architettonica nel XIX e XX secolo*, Skira, Milano, 2007  
Fraternali F, De Chiara E, Skelton RE. On the use of morphing and wind stable tensegrity structures for shading facades of smart buildings. *Smart Mater Struct* 2015; 24, 105032 (10pp).

Fraternali F, Carpentieri G, Amendola A. On the mechanical modeling of the extreme softening/stiffening response of axially loaded tensegrity prisms. *J Mech Phys Solids* 2014; 74:136-157.

Fraternali F, Senatore L, Daraio C. Solitary waves on tensegrity lattices. *J Mech Phys Solids* 2012; 60:1137-1144.

Fraternali F, Farina I, Polzone C, Pagliuca E, Feo L. On the use of R-PET strips for the reinforcement of cement mortars. *Compos Part B-Eng* 2013; 46: 207-210.

Fraternali F, Carpentieri G, Amendola A, Skelton RE, Nesterenko VF. Multiscale tunability of solitary wave dynamics in tensegrity metamaterials. *Appl Phys Lett* 2014;105:201903

Gan, L., Shang, S., Yuen, C.W.M., Jiang, S.-X., Luo, N.M. Facile preparation of graphene nanoribbon filled silicone rubber nanocomposite with improved thermal and mechanical properties. *Compos Part B-Eng* 2015; 69:237-242.

Genovese D., *Metodi di analisi e ricerca di forma*, Dipartimento di Ingegneria Civile, Università delle Marche, 2008.

Green Building Council Italia, U.S. Green Building Council. *Green Building Nuove Costruzioni & Ristrutturazioni - ristampa 2011*. Rovereto: Green Building Council, 2010. (in Italian)

Groenewolt, A., Bakker, J., Hofer, J., Nagy, Z., Schlüter, A. Methods for modelling and analysis of bendable photovoltaic modules on irregularly curved surfaces. *International Journal of Energy and Environmental Engineering* 2016, pp 1-11. (Article in Press).

Harrison A., Loe E., Read J., *Intelligent Building in South East Asia*, Ed. E&FN SPON, London & NewYork

Jackson EM, Laibinis PE, Collins WE, Ueda A, Wingard CD, Penn B. Development and thermal properties of carbon nanotube-polymer. *Compos Part BEng* 2016; 89:362-373.

Lombard LP, Ortiz J, Pout C. A review on buildings energy consumption information. *Energ Buildings* 2010; 40:394-398.

Magrini A, D'Ambrosio Alfano FR, Magnani L, Perneti R. Various approaches to the evaluation of the energy performance of buildings in Italy-some results of calculation procedures application on residential buildings. In: *Proceedings of CESB 2010 Prague - Central Europe towards Sustainable Building 'From Theory to Practice'*. Prague; June-July 2010. Code 105800. pp. 1-8.

Mainini AG, Poli T, Zinzi M, Speroni A, Spectral light transmission measure of metal screens for glass façades and assessment of their shading potential, SHC 2013, In: *Proceedings of International Conference on Solar Heating and Cooling for Buildings and Industry*. Freiburg, September, 2013.

Malpede, S., Baraldi, A. A fully integrated method for optimising fiber-membrane sails (2008) 3rd High Performance Yacht Design Conference 2008, HPYD 2008, 47-56.

Mammoli A, Vorobieff P, Barsun H, Burnett R, Fisher D. Energetic, economic and environmental performance of a solar-thermal- assisted HVAC system. *Energ Buildings* 2010; 42: 1524-1535.

Micheletti A., *Strutture pieghevoli che ricercano una forma di equilibrio*, tesi di laurea, in *Ingegneria Civile*, Roma, Università di "Tor Vergata", 1999.

Motro R., (1992), *Tensegrity Systems: State of Art*, International Journal of Space Structures (Special Issue on Tensegrity Systems), Guest Editor, Vol. 7, n. 2.

Motro R., (2003), *Tensegrity, Structural Systems for the Future*, Kogan Page Science, London.

Olgyay V., *Progettare con il clima. Un approccio bioclimatico al regionalismo architettonico*, Franco Muzzio Editore, Padova, 1981

Pizzi E, Iannaccone G, Ruttico P. Innovative strategies for adaptive buildings in large cities. *Int J Housing Sci* 2012; 36:99-107.

Raji B, Tenpierik MJ, van den Dobbelsteen A. A comparative study: Design strategies for energy-efficiency of high-rise office buildings. *J Green Build* 2016; 11:134-158.

Romano R., (2011), *Smart Skin Envelope, integrazione architettonica di tecnologie dinamiche e innovative per il risparmio energetico*, University Press, Firenze.

Rudofsky B., *Le meraviglie dell'architettura spontanea*, Laterza, Bari, 1979

Russell S., (2014), *Artificial Intelligence: A Modern Approach* (3rd Edition), Peter Norvig Pearson New International Edition.

Saggio A., (2007), *Introduzione alla Rivoluzione Informatica*, Carocci Editore Roma

Schittich C. In *Detail: Solar Architecture*. Birkhäuser: Edition Detail, 2003.

Shin KB, Kim CG, Hong CS, Lee HH. Thermal distortion analysis of orbiting solar array including degradation effects of composite materials. *Compos Part B-Eng* 2001; 32(4): 271-285.

Skelton RE. Structural systems: a marriage of structural engineering and system science. *J Struct Contr* 2002; 9:113-133.

Skelton RE, de Oliveira MC. Tensegrity Systems. New York: Springer Science+Business Media, 2009.

Skelton RE, Fraternali F, Carpentieri G, Micheletti A. Minimum mass design of tensegrity bridges with parametric architecture and multiscale complexity. *Mech Res Commun* 2014; 58: 124-132.

Singh R, Kumar R, Feo L, Fraternali F. Friction welding of dissimilar plastic/polymer materials with metal powder reinforcement. *Compos Part B-Eng* 2016; 101: 77-86.

Singh R, Singh S, Fraternali F. Development of in-house composite wire based feed stock filaments of fused deposition modelling for wear-resistant materials and structures. *Compos Part B-Eng* 2016; 98: 244-249.

Singh R, Singh N, Fabbrocino F, Fraternali F, Ahuja I. Waste management by recycling of polymers with reinforcement of metal powder. *Compos Part B-Eng* 2016;105: 23-29.

Szokolay SV, PLEA Notes: Solar Geometry. PLEA Passive and Low Energy Architecture and University of Queensland, 1996

Tronconi O., (1990), *L'edificio intelligente*, ETAS Ed.

Tronconi O., Ciaramella A., (2014) *Facility Management. Progettare, misurare, gestire e remunerare i servizi*, Franco Angeli editori.

William S., (2010), *Architettura e organizzazione dei calcolatori. Progetto e prestazioni*, Ed. Pearson

Zanelli A., (2008), *Membrane e scocche*, «Arketipo», 27/Ottobre 2008, Il Sole 24 ore, Milano, pp.58-69.

Zimbelli, P., (1994), *L'involucro architettonico tra forma e tecnologia*, Tesi di dottorato di ricerca in Tecnologia dell'Architettura e dell'Ambiente, Politecnico di Milano.

## **SITOGRAFIA**

<https://www.aedas.com/>

<http://www.arup.com>

[http://www.building\\_integrated.it](http://www.building_integrated.it)

<http://buildingskins.blogspot.com/>

<http://www.ecobuild-project.org>

<http://www.facciateventilate.it>

<http://www.jeannouvel.com/>

<http://www.ongreening.com/en>

<http://www.usgbc.org/leed>

<http://www.fernandofraternaliresearch.com/>