

Le strutture reticolari

Storia, definizioni e metodi di analisi

Esempi significativi in architettura

di Gabriele Rossini

Definizioni

« Una struttura reticolare è un particolare sistema strutturale in cui tutte le travi (**aste**) sono collegate tra loro alle estremità da cerniere interne (**nodi**) e sono vincolate a terra tramite cerniere o carrelli esterni applicati ai nodi. Se i vincoli (esterni ed interni) sono perfetti, cioè senza attrito, e le forze esterne sono applicate solo nei nodi, allora le aste risultano soggette solo a sforzi assiali di trazione o compressione. »

Casini P., Vasta M., *Scienza delle costruzioni*, 2016, Città Studi Edizioni

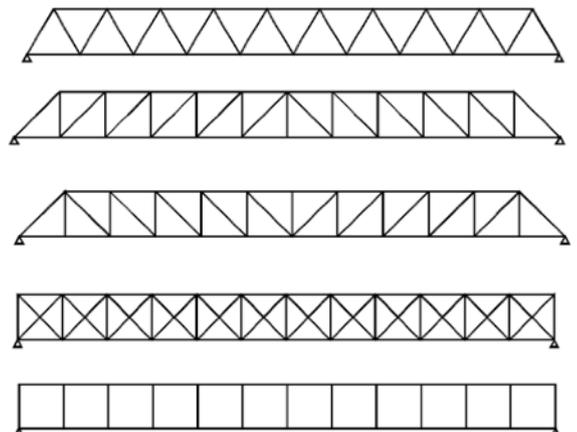
Una struttura reticolare è quindi una struttura rigida e leggera costruita per mezzo dell'incastro di montanti secondo opportuni schemi geometrici che permette di coprire ampie luci campate, con una soluzione affidabile dal punto di vista strutturale e di peso e costo ridotto rispetto alle alternative.

Si viene così a creare il sistema reticolare spaziale (*Space Frame*), che si rivela per molte ragioni il più adeguato fra i vari sistemi esistenti per lo sviluppo di strutture portanti di copertura in quanto consente anche una produzione altamente standardizzata e di qualità interamente prefabbricata in officina e inoltre garantisce un'elevata precisione in cantiere, grazie alle ridottissime tolleranze di fabbricazione. Il materiale di uso più comune è l'acciaio, per le sue caratteristiche di resistenza (sia a trazione che a compressione), di leggerezza e di semplicità di giunzione mediante chiodatura o saldatura.

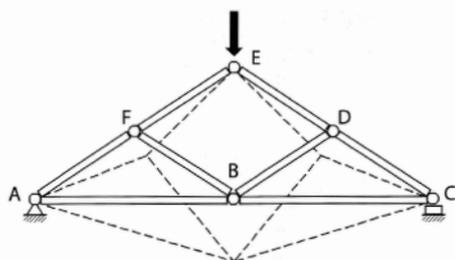
Le strutture reticolari spaziali in acciaio si caratterizzano quindi per la grande libertà di espressione e di composizione e per la possibilità di ripartire in modo uniforme i carichi sulle singole aste e sui vincoli esterni, e permettono così di realizzare geometrie impossibili da realizzare in altro modo.

La **travatura reticolare** è una struttura composta da un insieme di aste complanari, vincolate ai nodi in modo da costituire un elemento resistente e indeformabile. È formata da due elementi continui chiamati correnti, e da un'anima scomposta in elementi lineari. Di questi ultimi, alcuni sono disposti in verticale e altri appaiono inclinati. Gli elementi verticali vengono denominati *montanti*, quelli inclinati vengono chiamati *diagonali*; il comportamento di queste due categorie di elementi è assimilabile a quello di una struttura sottoposta a soli sforzi di trazione e compressione. Esistono numerosi esempi di travature reticolari, differenti tra di loro per la geometria della travatura:

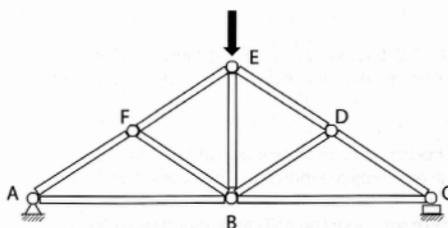
- *Travatura Warren*, con diagonali tesi e compressi, ma nessun montante
- *Travatura Howe*, con montanti tesi e diagonali compresse
- *Travatura Pratt* (o *Mohriè*), avente montanti compressi e diagonali tese.
- *Travatura Long*
- *Travatura Vierendeel*



Le travi reticolari possono essere classificate secondo le caratteristiche statiche in tre tipi a seconda della loro conformazione geometrica: *labile* (a), *isostatica* (b e c), *iperstatica* (d).



(a) Traviatura instabile: l'area centrale non formata da triangoli verrebbe molto distorta sotto l'effetto di un carico applicato alla traviatura, al punto da portarla al collasso.



(b) Traviatura stabile: la disposizione delle barre è tale da formare solo triangoli aventi un lato in comune.

a = numero delle aste
 n = numero dei nodi
 v = grado dei vincoli esterni

Trave labile

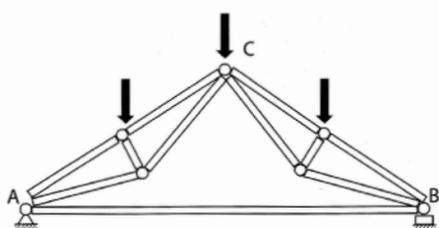
$a + v < 2n$

Trave isostatica

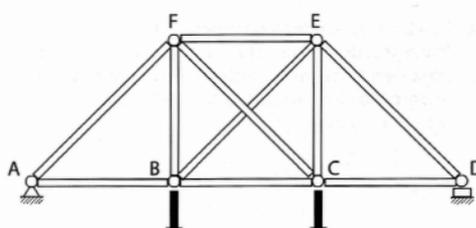
$a + v = 2n$

Trave iperstatica

$a + v > 2n$



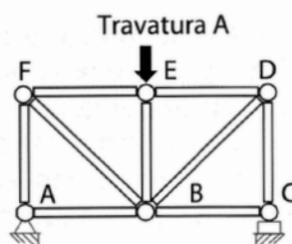
(c) Disposizione delle barre tale da non individuare solo semplici triangoli con un lato in comune, ma ancora in grado di condurre ad una traviatura stabile.



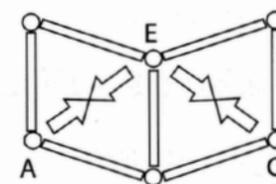
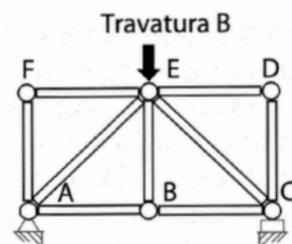
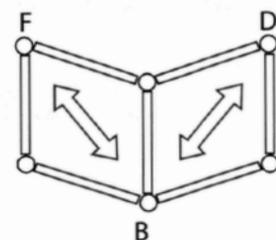
(d) Traviatura stabile con un numero di barre maggiore di quello minimo necessario per la stabilità.

- Metodo rapido per valutare i versi delle forze interne

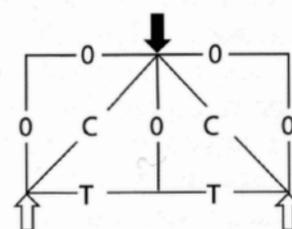
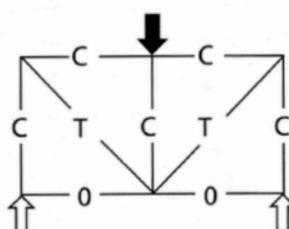
(a) Composizione di traviature semplici.



(b) Il verso delle forze nelle diagonali può essere determinato immaginando dapprima di rimuovere le diagonali e determinando il loro ruolo nell'impedire la possibile deformazione. In questo modo una diagonale posta tra B e F, nella traviatura A, deve essere in trazione dato che, come indicato, la sua presenza previene l'allontanamento dei punti B e D.



(c) Distribuzione finale delle forze nelle traviature:
 C, compressione; T, trazione.



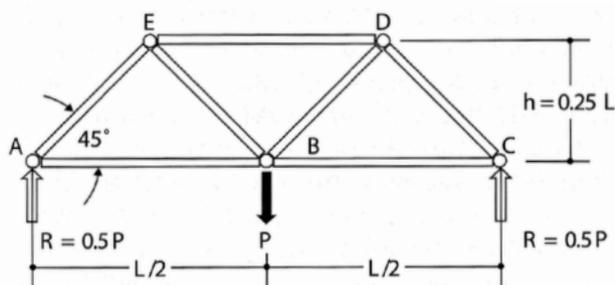
Dal punto di vista statico-cinematico le strutture reticolari possono essere viste come un insieme di punti materiali (le cerniere interne) dotati di tre gradi di libertà (due nel piano) collegati da aste che ne controllano la mutua distanza e costituiscono quindi ciascuna un vincolo di pendolo interno. I vincoli esterni impediscono poi il movimento del sistema considerato come un unico corpo rigido. Si può dire allora che un sistema reticolare è isostatico (cinematicamente determinato) se il numero di gradi di libertà, pari a tre volte il numero dei nodi (due nel piano), è uguale al numero delle aste più il numero dei vincoli esterni. Detto n_n il numero dei nodi, n_a il numero delle aste e n_{ve} il numero dei vincoli esterni di molteplicità uno, un sistema reticolare è isostatico se valgono le seguenti uguaglianze nello spazio e nel piano, rispettivamente:

$$3n_n = n_a + n_{ve}$$

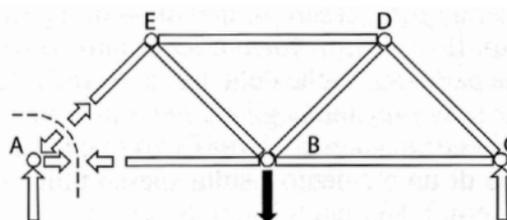
$$2n_n = n_a + n_{ve}$$

- Metodo dei nodi per il calcolo degli sforzi interni delle aste

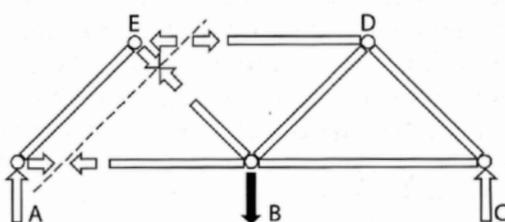
Nel metodo dei nodi, gli sforzi normali nelle aste e le reazioni vincolari sono determinati imponendo l'equilibrio dei nodi. Poiché ogni nodo ha due gradi di libertà traslazionali nel piano, è possibile scrivere in tutto $2n_n$ equazioni di equilibrio, si tratta naturalmente di equazioni di equilibrio alla traslazione. Il numero delle incognite è pari a $n_a + n_{ve}$, che, nei sistemi isostatici, è proprio pari al numero delle equazioni.



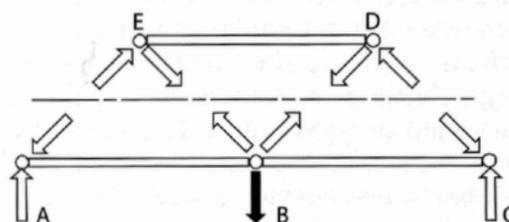
(a) Traliccio di partenza.



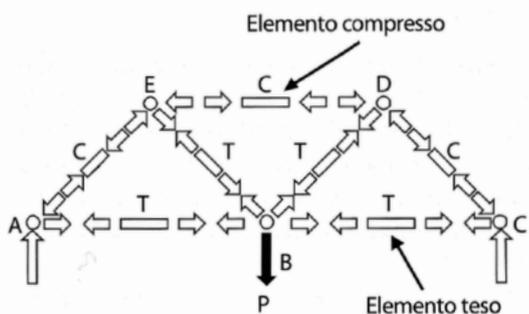
(b) Schema di equilibrio del nodo A.



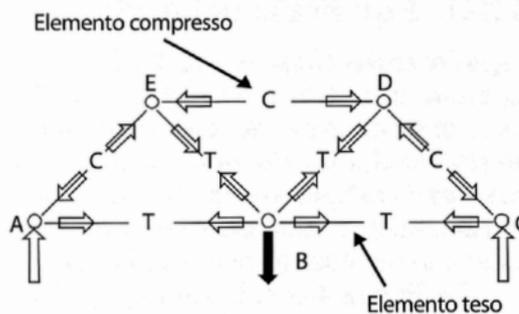
(c) Schema di equilibrio dell'asta AE.



(d) Schemi di equilibrio degli elementi ED e AC.



(e) Il traliccio scomposto in nodi ed aste.



(f) Diagramma semplificato mostrante le forze che agiscono su ogni nodo.

- Le capriate

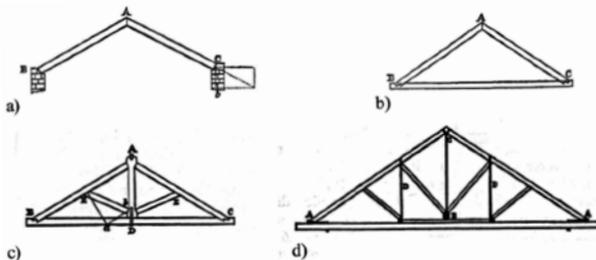
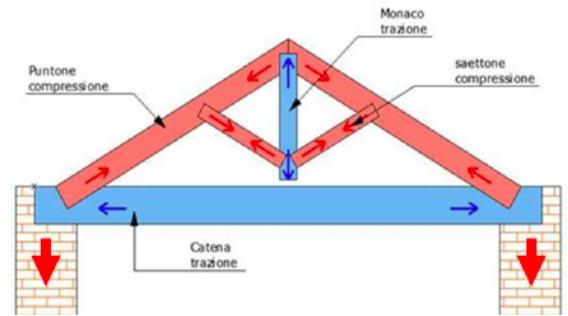
La nascita e lo sviluppo delle strutture reticolari sono legati all'esigenza di coprire luci di grandi dimensioni. Le capriate in legno dal IV sec d.C. ne rappresentano un primo esempio; tali strutture, infatti, sono una delle più antiche soluzioni al problema delle grandi coperture. Ovviamente in caso di luci elevate l'utilizzo di travi orizzontali non era applicabile tanto per questioni statico-cinematiche che per motivi di natura costruttiva.

Il primo tentativo di ovviare a tali problemi prevedeva l'uso di *due puntoni inclinati* in luogo di un'unica trave orizzontale (a). Tuttavia, data la spinta sui muri, anche questa soluzione non era sempre accettabile.

Da qui l'esigenza di ricorrere a un elemento orizzontale soggetto a trazione (**catena**) per assorbire le spinte (b). Anche questa soluzione presentava però un inconveniente: la catena doveva essere abbastanza robusta da resistere alla trazione ma, nello stesso tempo, abbastanza leggera da non inflettersi eccessivamente sotto il peso proprio.

Viene allora introdotto un elemento di sostegno verticale (**monaco o colonnello**) per contrastare l'inflessione della catena (c). Il monaco, messo in tensione dall'inflessione della catena, accresce la pressione nei puntoni e, di conseguenza, la trazione nella catena, aumentando così la connessione tra i diversi elementi. Infine, due ulteriori puntoni inclinati (**saettoni**) possono essere utilizzati per limitare l'inflessione dei puntoni principali.

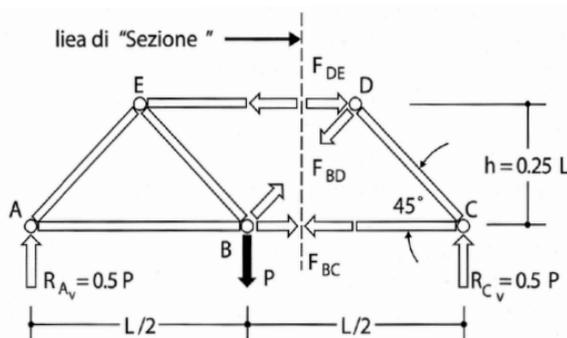
L'inventiva dei costruttori ha portato poi a forme più articolate e all'utilizzo di materiali diversi come ad esempio nella *capriata inglese* (d), che prevedeva l'uso del ferro per la realizzazione dei tiranti.



- a) Puntoni inclinati;
- b) inserimento della catena;
- c) inserimento del monaco;
- d) capriata inglese

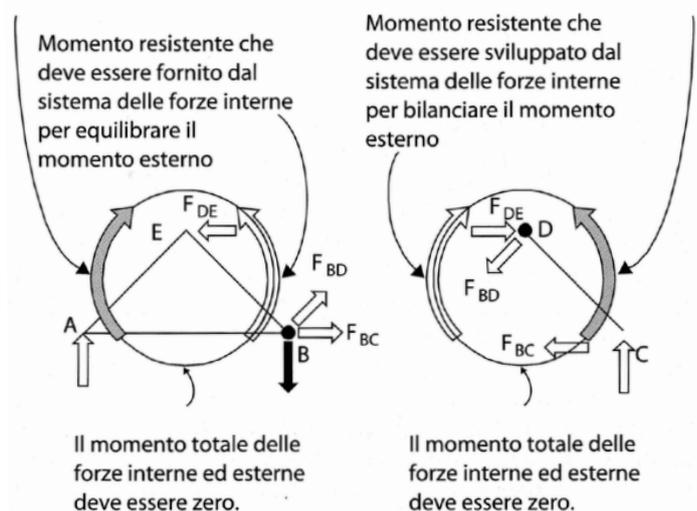
- Metodo delle sezioni di Ritter per il calcolo degli sforzi interni delle aste

Il metodo delle sezioni si applica alle travature canoniche, quelle cioè in cui le aste possono essere tagliate da sezioni che dividono in due parti la struttura tagliando tre aste non concorrenti in un punto.

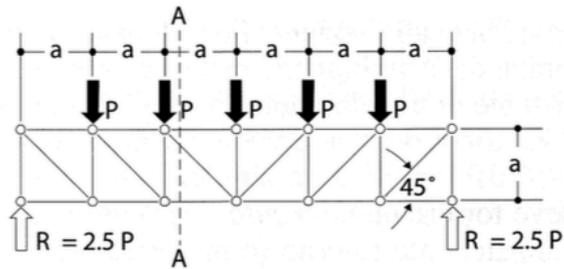


Momento rotazionale sul sottoassemblaggio di sinistra prodotto dal sistema delle forze esterne

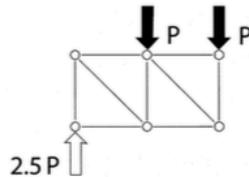
Momento rotazionale su sottoassemblaggio di destra prodotto dal sistema delle forze esterne



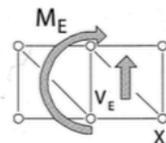
(a) Trave reticolare.



(b) Sistema di forze esterne agente sul sottoassemblaggio di sinistra.



(c) Momento flettente esterno e forza di taglio equivalenti (equipollenti) al sistema di forze esterne agenti sul sottoassemblaggio di sinistra.



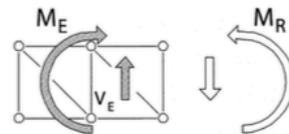
$$\Sigma F_y: -P - P + 2.5P = 0.5P$$

Taglio esterno (V_E)

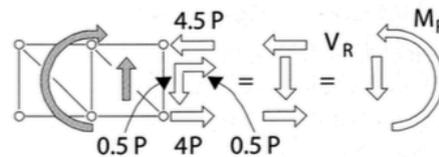
$$\Sigma M_x: +2a(2.5P) - a(P) = 4Pa$$

Momento esterno (M_E)

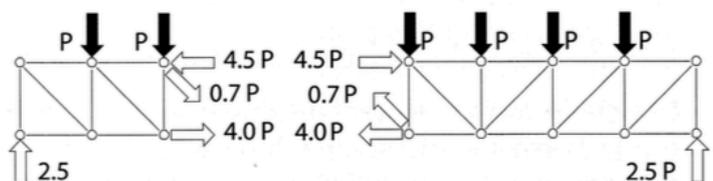
(d) Diagramma di equilibrio per il sottoassemblaggio di sinistra: per equilibrio si sviluppano nella struttura un taglio resistente interno (V_R) ed un momento resistente interno (M_R).



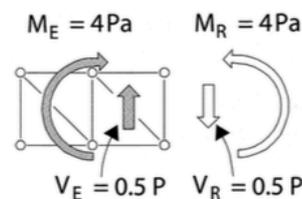
(e) La forza di taglio resistente interno (V_R) ed il momento resistente interno (M_R) nascono dall'azione delle forze nelle barre.



(f) Diagramma di equilibrio dei sottoassemblaggi di destra e di sinistra in termini dei sistemi di forze interne ed esterne.



(g) Diagramma di equilibrio del sottoassemblaggio di sinistra in termini di momenti e tagli interni ed esterni equivalenti. La somma dei tagli e dei momenti su ciascun sotto assemblaggio deve essere nulla.



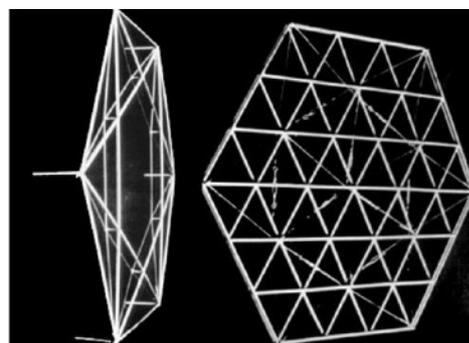
Storia dell'evoluzione della struttura reticolare

L'innovazione tecnologica che portò alla creazione di questi sistemi strutturali si deve alla necessità di realizzare coperture di grande luce, che fossero resistenti senza essere eccessivamente pesanti.

Nell'ambito di questa necessità, se per molto tempo si sono utilizzati due soli sistemi strutturali, quelli sollecitati a compressione semplice (arco) e quelli sollecitati prevalentemente a flessione (trilite e poi telaio), il passare dei secoli porta a individuare nella riduzione di peso e nella leggerezza il segreto della maggiore resistenza delle strutture; ma il materiale sottratto va compensato con l'esatta collocazione nello spazio del materiale che resta e quindi con lo studio della forma più giusta per le membrature resistenti.

Nel '900 si approfondiscono gli studi sulle strutture che imitano il comportamento delle strutture presenti in natura, indagando in maniera accurata le strutture reticolari a partire dalle conosciute capriate. Le acquisizioni della scienza delle costruzioni e l'interesse per le discipline naturalistiche caratterizzerà le strutture che saranno sperimentate e promosse per « imitare la nervosa e coriacea resistenza delle zampe di alcuni insetti, in cui forza e resistenza si coniugano magnificamente con l'estrema leggerezza necessaria per consentire di spiccare il volo. » (*Mies Van Der Rohe*).

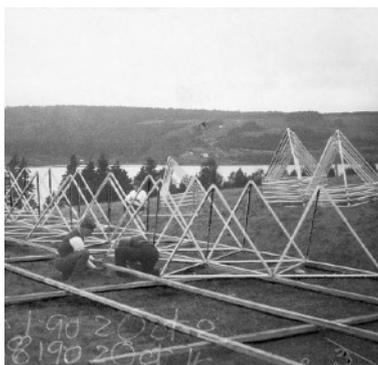
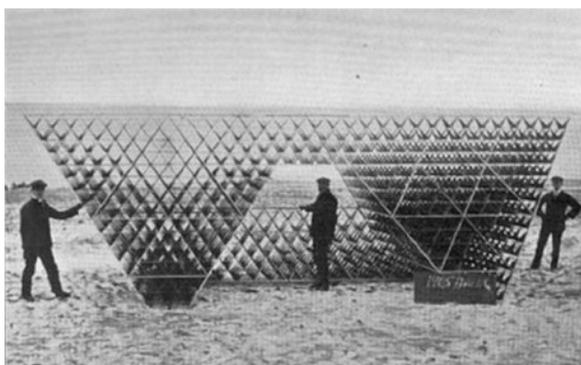
Quando poi l'effetto reticolare è esteso alla terza dimensione, si va oltre il campo della statica, avvicinandosi alla comprensione dell'organizzazione della materia, dei suoi modi di aggregazione molecolare. A proporre per primo tale ragionamento interdisciplinare è stato infatti **Robert Le Ricolais**, atipica figura di ingegnere, studioso di forme innovative e di strutture della materia organica e inorganica, di biologia e fisica. L'effetto reticolare esteso alla terza dimensione ispira strutture di grandi prestazioni.



« La struttura spaziale può essere considerata come un'estensione nello spazio dei sistemi a traliccio tradizionali solo fino ad un certo punto. In essa le linee d'azione delle forze si ripartiscono, si diramano nello spazio. La maggior parte delle tensioni si eguaglia costituendo un campo di forze omogeneo, senza punte di carico marcate, conferendo alla struttura una grande resistenza alle sollecitazioni esterne. Diminuiscono sia le tensioni interne sia le sezioni necessarie degli elementi tesi e compressi, realizzando un'apprezzabile economia di materiale. »

Makowski Zigmunt Stanislaw, *Strutture spaziali in acciaio* (1963), tr. it. Cisia, Milano, 1977

I primi pionieristici tentativi di innescare l'effetto reticolare caricando i nodi, assimilati a cerniere sferiche, e riducendo al minimo gli sforzi non assiali, vanno probabilmente attribuiti al fisico americano **Alexander Graham Bell**; nel corso delle sue sperimentazioni sul funzionamento delle macchine volanti, Bell concepisce nel 1902 una trave tridimensionale formata da un'aggregazione di tetraedri che utilizza per costruire un gigantesco aquilone. Nel 1904 costruisce con l'ingegnere Casey Baldwin una torre d'osservazione smontabile, alta più di 20 mt, composta da un'aggregazione di tetraedri standardizzati, costituiti da tubi metallici.



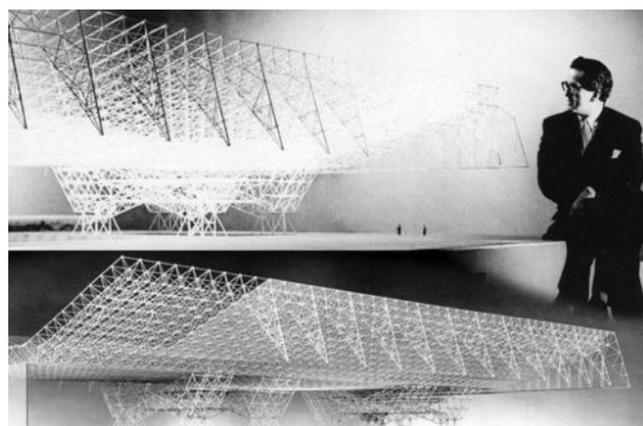
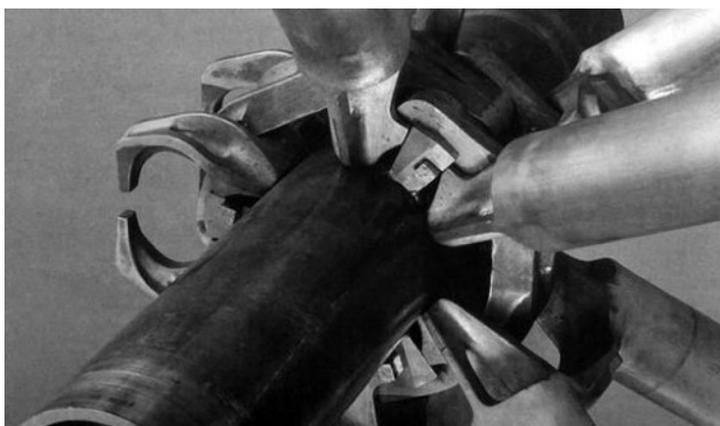
Il **graticcio** costituisce una significativa variante delle strutture reticolari, fondata su una relativa semplificazione strutturale. L'utilizzo di questo metodo è vincolato alla sostanziale equivalenza tra le travi appartenenti ai due sistemi ortogonali e, quindi, condiziona la forma del campo strutturale da realizzarsi.

La prima applicazione del graticcio si deve a **Konrad Wachsmann**, il quale inizia gli studi sulle strutture spaziali di grande dimensione negli anni '30 in Francia e riceve, a metà degli anni '40, il primo incarico americano dalla Atlas Aircraft Corporation per la progettazione di una tettoia per il ricovero degli aeroplani. Il sistema messo a punto, poi noto con il nome di *Mobilar Structure*, è un graticcio derivante dall'incrocio di due famiglie di travi ortogonali tra loro. Per realizzare delle aste utilizza un tubolare metallico.

Il nodo è articolato in « un paio di piastre forate di differente spessore, saldate eccentricamente rispetto all'asse di un tubo ad entrambe le sue estremità con saldatura elettrica a punti. Attraverso i fori delle piastre viene introdotto uno spinotto che, orientato perpendicolarmente all'asse del tubo, forma il centro di congiunzione nel punto nodale. Mentre nelle costruzioni convenzionali in certi punti viene ad accumularsi molto materiale a causa delle piastre nodali, questa congiunzione rimane libera e aperta. I tubi stessi non vengono a contatto, ma rimangono ad appropriata distanza dal centro del nodo, la cui funzione di mediazione e contemporaneamente di divisione non è tuttavia compromessa. È quindi possibile ogni combinazione di giunzioni, naturalmente solo nell'ambito bidimensionale. »

Wachsmann Konrad, *Una svolta nelle costruzioni* (1959), tr. it. Il Saggiatore, Milano, 1965

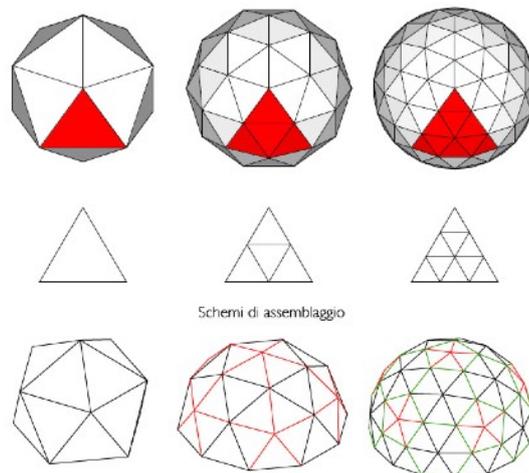
Nel 1951, ancora per l'Aviazione U.S.A., Wachsmann realizza un modulo di partenza il cui protagonista è il nodo, mentre l'asta diviene solo un distanziatore tra i nodi. Il procedimento costruttivo consta di due soli tipi diversi di aste a sezione tubolare e di un nodo composto dall'aggregazione di una serie di elementi in acciaio sagomato, fissati tra loro attraverso cunei in ferro dolce martellato, che accoglie fino a 20 aste.



Meritano poi una trattazione a parte le grandi cupole, in cui i due principali metodi per attribuire rigidezza per forma a una struttura sono utilizzati contemporaneamente: da un lato si ricorre alla scomposizione degli elementi resistenti in un sistema di aste e nodi, mentre dall'altro si utilizzano le superfici a doppia curvatura; si ottiene così una resistenza impressionante, connessa forse alla stabilità intrinseca alla forma sferica.

Le **cupole geodetiche** introdussero tuttavia la vera rivoluzione, in quanto si fondano sull'unificazione degli elementi che, pertanto, possono essere prefabbricati dall'industria. Tale principio costruttivo si traduce nell'uniforme ripartizione degli sforzi all'interno delle aste in modo da realizzare un'ulteriore ottimizzazione dei comportamenti strutturali.

Brevettate nel 1954, furono inventate dallo studioso statunitense Buckminster Fuller, che disegna la complessa geometria della sua cupola a partire dalla proiezione sulla sfera dei vertici di un icosaedro, il solido platonico formato da 20 facce a forma di triangolo equilatero. Aumentando il numero delle facce è possibile far crescere il diametro dello sferoide a condizione di accettare piccole variazioni dei

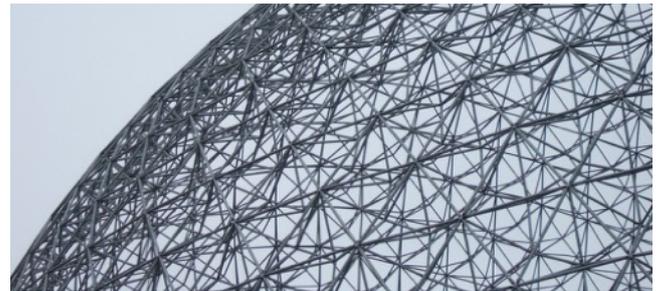
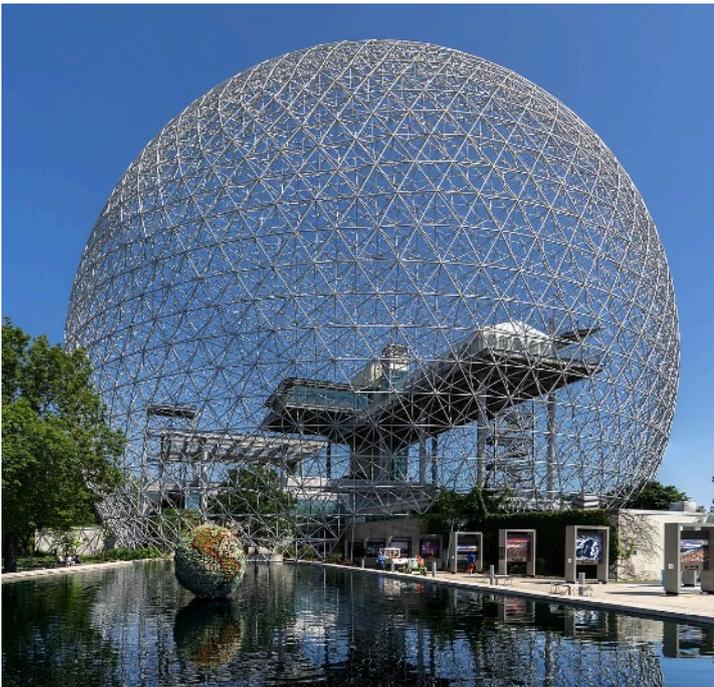


segmenti costituenti i triangoli che così determinano un'alternanza di isosceli ed equilateri.

La cupola più grande da lui realizzata è la **Cupola della Union Tank Car Company** a Baton Rouge, del diametro di 118 mt; per rispondere alle deformazioni dovute all'effetto del vento, il sistema prima descritto passerà da uno a due reticoli di aste e la statica complessiva della cupola guadagnerà così molti gradi di rigidità, mentre la geometria diverrà enormemente più complessa. In questo caso « i due reticoli (quello esterno, costituito dal traliccio a maglie esagonali e quello interno costituito dai pannelli di lamiera d'acciaio) essendo collegati e irrigiditi da aste oblique e verticali, formano un sistema le cui parti collaborano alla stabilità della cupola. Un siffatto sistema si può considerare come una trave spaziale (foggiata ad arco, con lo spessore di m 1,20) nella quale il reticolo interno (formato dalle lamiere d'acciaio curve e saldate) lavora come elemento teso; quello esterno (formato dagli esagoni tubolari) lavora come elemento compresso ».

Carbonara Pasquale, *Architettura pratica*, Utet, Torino, 1980, volume quinto, tomo secondo

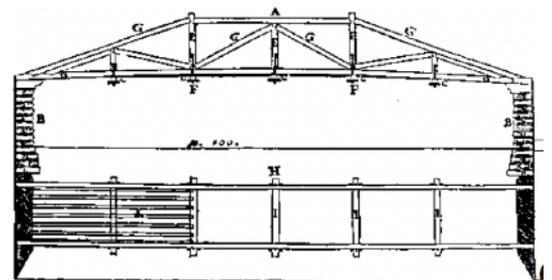
Tuttavia la cupola che gli valse la notorietà fu quella del **Padiglione degli Stati Uniti all'Esposizione Universale di Montréal** in Canada nel 1967. Di solo 76 mt di diametro, si caratterizza per la quota sensibilmente più bassa alla quale viene effettuata la sezione della sfera; questa diversa forma geometrica dà luogo a una diversa distribuzione degli sforzi, con la prima fascia sollecitata prevalentemente a compressione e solamente la calotta più alta sollecitata a flessione. La cupola è completata con delle vere e proprie lenti di forma esagonale, realizzate in plastica acrilica, quasi tutte dotate di un sistema di regolazione dell'ingresso della luce meccanizzato e connesso a un operatore centrale, sensibile alle condizioni climatiche presenti all'interno della struttura.



Esempi significativi nell'architettura

Nella storia dell'architettura le strutture reticolari sono usate sin dall'epoca medievale, in cui le coperture per i grandi edifici religiosi (monasteri e cattedrali) venivano spesso realizzate attraverso l'uso di capriate. In quest'ottica si può notare come Andrea Palladio già nel 1570 nel suo *Terzo Libro* aveva individuato e studiato la capriata come elemento strutturale.

Proseguendo nei secoli, l'evoluzione delle strutture reticolari permette di ottenere risultati notevoli in modi diversi.



Basilica di Santa Croce, Arnolfo di Cambio - Firenze, 1294

Per quanto riguarda le architetture con copertura a capriata, un esempio rilevante è sicuramente Santa Croce. La chiesa progettata tra gotico e romanico presenta infatti un soffitto a capriate che richiese un complicato congegno strutturale data l'enorme luce libera e il peso che rischiava di soverchiare le sottili murature su cui poggia la copertura; si tratta di un vero e proprio caso limite.



Forth Rail Bridge, Sir John Fowler e Sir Benjamin Baker - Edimburgo, 1883-1890

Il Forth Bridge è un ponte ferroviario a sbalzo sulla costa orientale della Scozia, 14 km a ovest di Edimburgo. Considerato ancora oggi una meraviglia ingegneristica, è pesante 64800 tonnellate; lungo 2,5 km, è costituito da una doppia linea si eleva a 46 m sul livello del mare; è formato da due campate principali di circa 520 m e due laterali di 200 m. La struttura reticolare permette di ottenere ampie campate e di minimizzare gli effetti del vento.



Ponte Maria Pia, Gustave Eiffel - Dauro, Portogallo, 1877

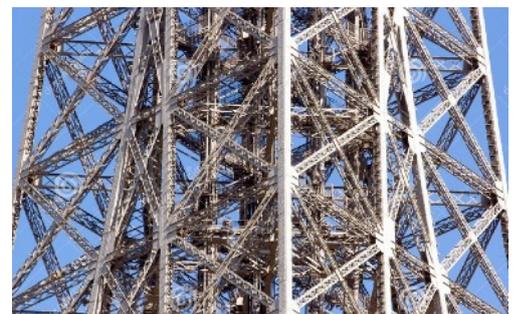
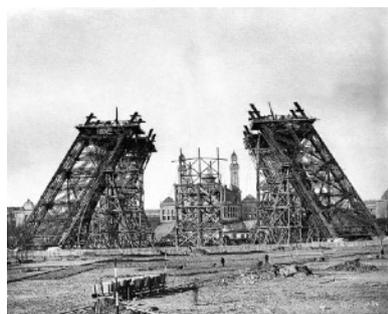
Il ponte Maria Pia, attualmente inutilizzato, è un ardito ponte ad arco in ferro, che varca il fiume Douro alla periferia della città portoghese di Porto. Progettato forse da Eiffel, presenta una struttura basata su travi reticolari che grazie alla leggerezza e alla resistenza permettono di coprire la luce di 160 m con un ponte di oltre 350 m di lunghezza.



Torre Eiffel, Gustave Eiffel - Parigi, 1890

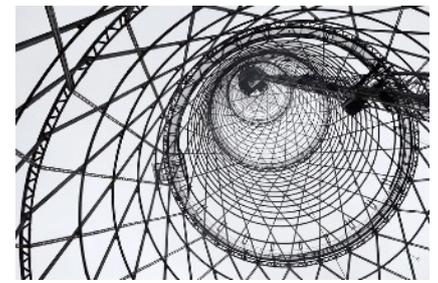
Il famoso simbolo di Parigi altro non è che una grande struttura reticolare: la Torre è formata da una robusta travatura metallica a maglie triangolari, la quale riduce l'area esposta al vento che, dunque, non ha a disposizione molto spazio per esercitare la sua pressione.

La progettazione avvenne secondo attente considerazioni di carattere fisico e geometrico-matematico destinate a ottimizzare gli sforzi a cui la torre era sottoposta. Lo stesso Eiffel afferma che « [Si tratta di] eliminare dalle superfici verticali le grandi sbarre dei tralicci destinate a resistere all'azione del vento. Ecco perché il pilone è disposto in modo che lo sforzo di taglio dovuto al vento passi all'interno dei montanti degli spigoli [...] Le tangenti ai montanti in punti situati alla medesima altezza finiscono sempre per incontrarsi nel punto di passaggio della risultante delle azioni che il vento esercita sulla parte di pilone sovrastante i punti considerati [...] Prima di riunirsi in vetta a un'altezza così elevata, i montanti sembrano scaturire dalla terra e, in qualche maniera, fondersi sotto l'azione stessa del vento ».



Torre di Šuchov, Vladimir Šuchov - Mosca, 1922

Monumento edificato nel sobborgo di Šabolovka a Mosca, è una torre alta 160 metri la cui struttura è costituita da un traliccio d'acciaio della forma di un iperboloide di rotazione, costruito con il sistema reticolare spaziale. Il montaggio si ebbe sovrapponendo 6 segmenti separati.



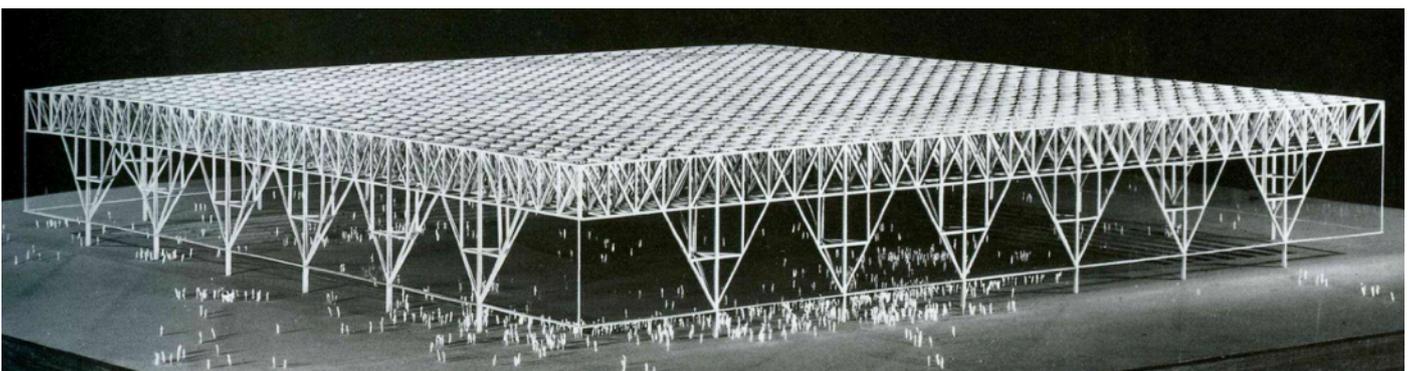
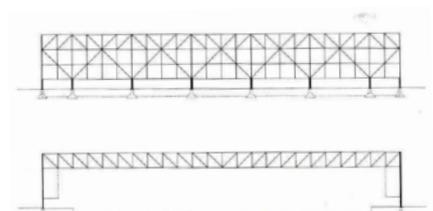
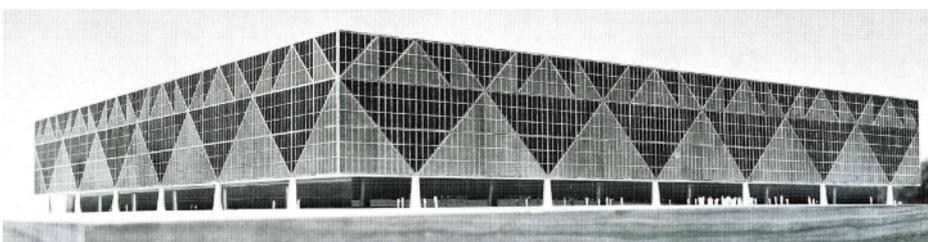
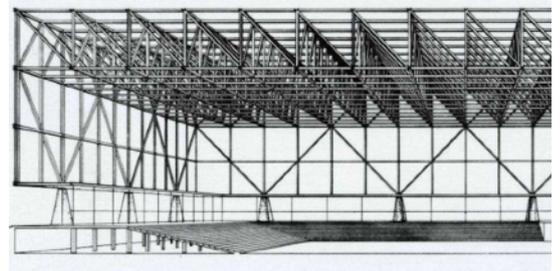
Teatro Nazionale, Mies Van der Rohe - Mannheim, 1953

Mies, sostenitore del "Less is more", sfruttò spesso le strutture reticolari per la loro efficacia e la loro funzionalità. In questo progetto prevede una struttura basata su travi reticolari di tipo Pratt, molto evidenti nel modello da lui creato, che dividono l'intero edificio in moduli ripetibili e quindi producibili in serie.



Convention Hall, Mies Van der Rohe - Chicago, 1954

L'esempio forse più esemplificativo della consapevolezza di Mies delle possibilità date dalla struttura reticolare si ha nella sua Convention hall: immagina un edificio completamente costituito secondo travi reticolari (quasi totalmente di tipo Pratt) che permette così di ottenere uno spazio di 220 x 220 mt e alto 30 mt, un'area enorme capace di ospitare fino a 50000 posti a sedere. Si viene così a coniugare la struttura con la necessità di creare un grande luogo di scambio e condivisione.



Neue Nationalgalerie, Mies Van der Rohe - Berlino, 1968

Passando a qualcosa di realizzato, la Neue Nationalgalerie si erge nei pressi del Tiergarten, a Berlino, ed è un museo costruito interamente in acciaio e vetro: l'acciaio nel tetto e nei supporti che lo sorreggono e il vetro nelle pareti; si ha così l'impressione che il tetto galleggi nell'aria. Per il soffitto, Mies sperimenta infatti un sistema a graticcio, basato su una piastra grigliata di copertura formata da due serie di 19 travi incrociate a formare un grande quadrato di 18 moduli di lato, sorretto da 8 pilastri situati in corrispondenza della quinta e della tredicesima trave.

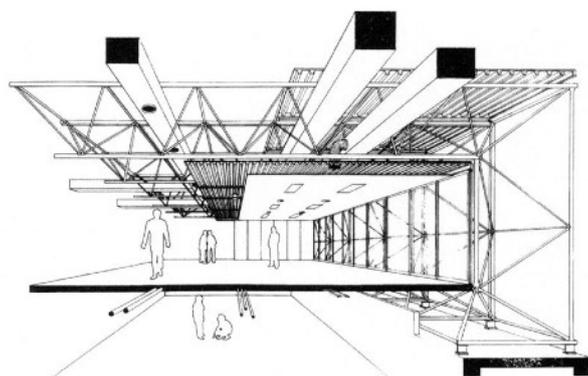


Sede di B & B Italia, Renzo Piano e Richard Rogers - Novedrate, 1973

La sede di B & B Italia a Novedrate, a pochi km da Como, si presenta come uno spazio vitale "sospeso" tra strutture di tubi in acciaio esterni: caratterizzato dalla trasparenza tra spazio interno e esterno e dall'essenzialità degli elementi utilizzati per la costruzione, si basa proprio sulla struttura reticolare che permette di avere 40 metri di campata con elementi autoportanti leggerissimi. Tale sistema ammette l'uso di grandi superfici verticali trasparenti (le pareti non assolvono ad alcuna funzione portante), liberando lo spazio interno aumentando contemporaneamente la sua flessibilità e adattamento alle diverse funzioni lavorative; gli operatori e l'edificio stesso sono messi in un dialogo con il verde circostante.

« La nostra idea era di ridurre tutto a qualcosa di molto sottile, a una specie di filigrana: una ricerca stilistica e plastica fatta con i componenti della struttura metallica portante. Tutti sono capaci di costruire una struttura solida: basta abbondare nei materiali. Se fai un muro spesso un metro, è chiaro che sta su. Togliere peso alle cose, invece, ti insegna a far lavorare la forma, a conoscere i limiti di resistenza dei componenti, a sostituire la rigidità con l'elasticità. Togliere è una scommessa, un gioco. Quando hai finito di togliere, sai che cosa è realmente necessario; e allora il re è nudo, perché tutto quello che c'era in più sai che in fondo era superfluo. »

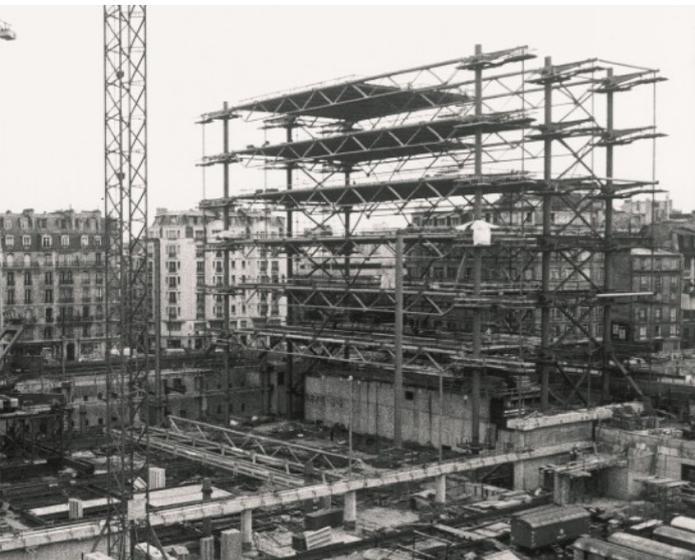
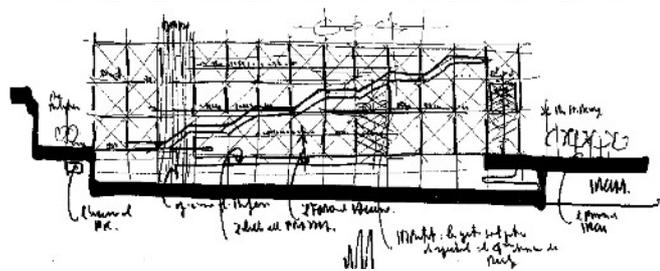
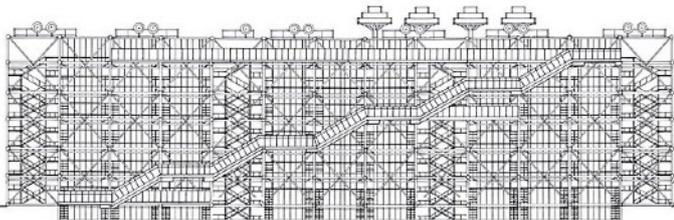
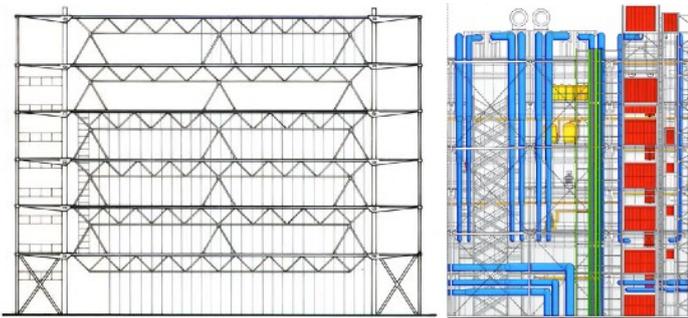
Piano Renzo, *Giornale di bordo*, Passigli, 2016



Centro Pompidou, Renzo Piano e Richard Rogers - Parigi, 1977

Gli stessi architetti della sede B&B in Italia progettano con la stessa tecnica e contemporaneamente (entrambi i progetti sono del '71) un museo da 100000 mq di esposizione: un grande parallelepipedo alto 42 metri, lungo 166 metri e largo 60, sostenuto da una struttura in acciaio a forti colori e da pareti in vetro. Grazie alla sua struttura reticolare, è costituito da elementi in acciaio autoportanti che permettono di creare ad ogni piano una superficie libera di 7500 mq; tutti i servizi infatti sono volutamente messi all'esterno ed evidenziati: in rosso vi sono gli impianti di circolazione (scale, ascensori, scale mobili, gallerie di circolazione), in blu l'impianto di circolazione e climatizzazione dell'aria, in verde l'impianto legato alla circolazione dei liquidi, mentre in giallo quello elettrico.

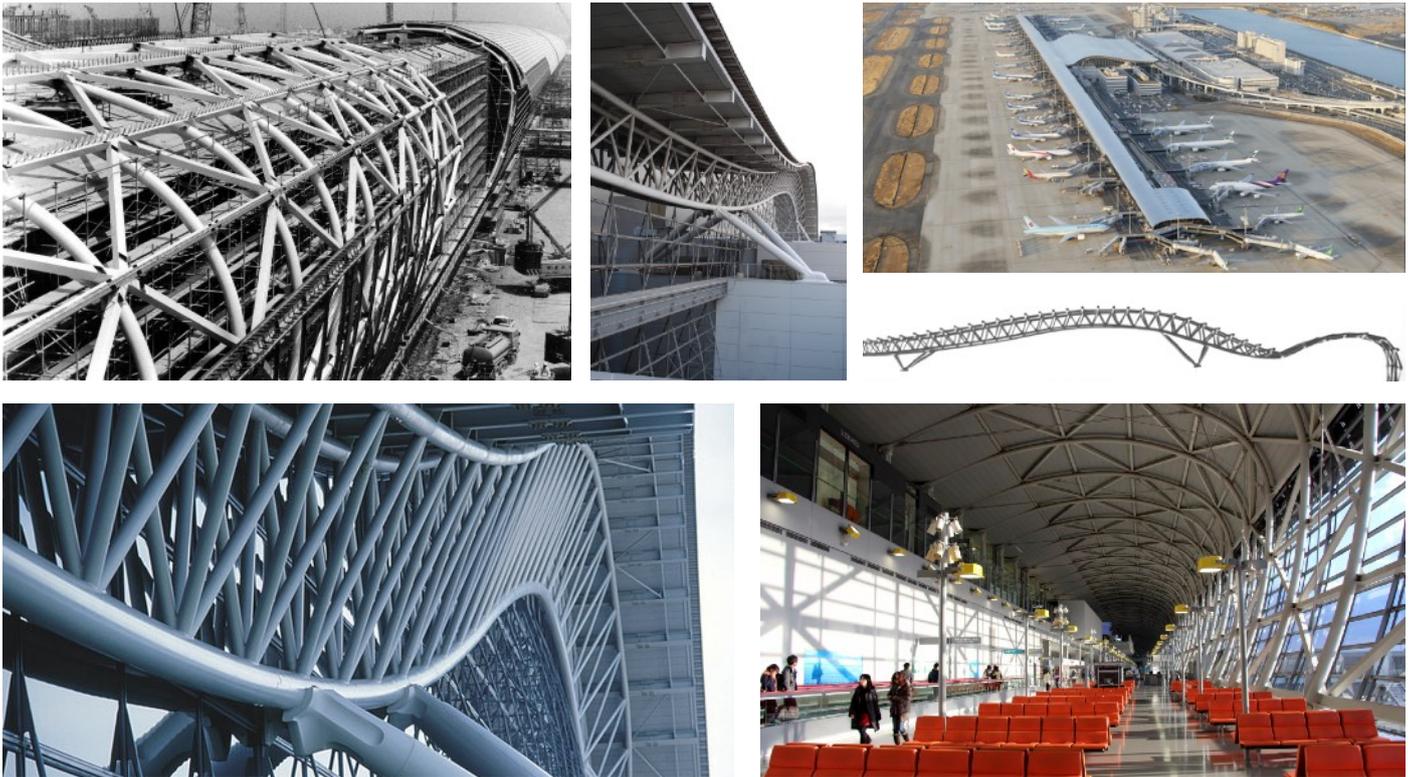
Per Piano progettare è appunto un'esperienza interdisciplinare, che prevede ripensamenti e correzioni. « La progettazione non è una esperienza lineare, cioè hai un'idea, la metti su carta, poi la esegui e buona notte. È un processo circolare: la tua idea viene disegnata, provata, ripensata, ridisegnata tornando infinite volte sullo stesso punto. Sembra un metodo così empirico, poi se vai a vedere scopri che è tipico di tantissime altre discipline: in musica è così, in fisica è così, in astrofisica anche. »



Terminal dell'aeroporto di Kansai, Renzo Piano - Osaka, 1988

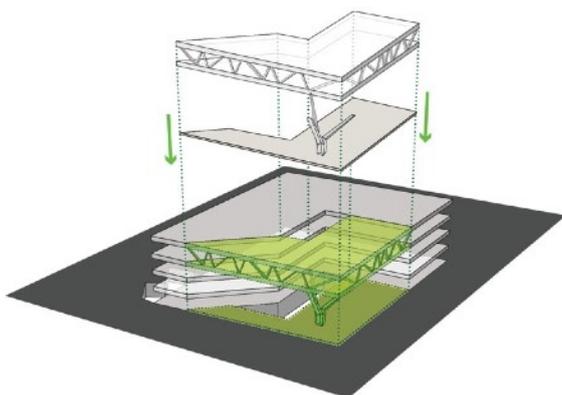
Anche se Renzo Piano usò la struttura reticolare per molte delle sue opere, data la sua ricerca nello sfruttamento delle nuove tecnologie e nella sua caratteristica leggerezza che permette una luminosità sempre fortemente presente, la struttura che più simboleggia questa sua tendenza è il terminal per l'aeroporto di Osaka. Si tratta infatti di una struttura lunga 1700 mt e composta da 82000 pannelli identici di acciaio inossidabile (1 mm di spessore l'uno), che grazie a travi reticolari lunghe da 80 a 150 mt collocate a 14,4 mt l'una dall'altra, permette una forma sinuosa e asimmetrica legata alla necessità di creare un ricircolo naturale di aria all'interno, e al tempo stesso di resistere ai terremoti (che ci sono stati, senza danni) nonostante la sua caratteristica leggerezza e fragilità apparente.

« Abbiamo disciplinato i movimenti dell'aria creando un soffitto che è aerodinamico "al rovescio", perché i flussione ci interessano sono all'interno, e non all'esterno. »



Centra at Metropark, KPF - New Jersey, 2011

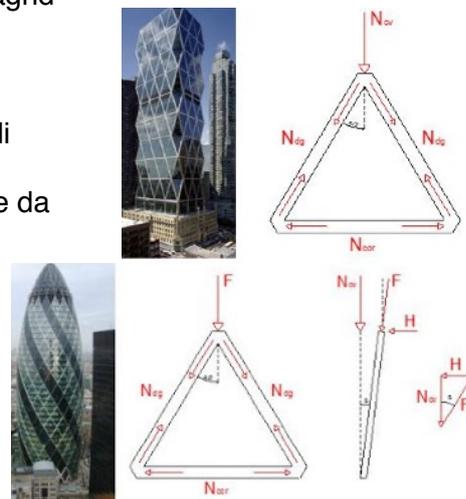
Questo edificio, progettato dal gruppo KPF su una superficie di 10000 mq, prevede edifici per uffici basati sulla contrapposizione tra elementi trasparenti in vetro che fanno passare la luce e elementi opachi in grigio scuro che la riflettono e creano un contrasto notevole con gli elementi in legno con cui sono messi in relazione. Questa struttura è proprio resa possibile dalla struttura reticolare, che rende l'intero ultimo piano di copertura una gigantesca trave in cui le pareti non sono portanti e quindi del tutto vetrate.



L'innovazione delle strutture *diagrid*: The Gherkin e Hearst Tower

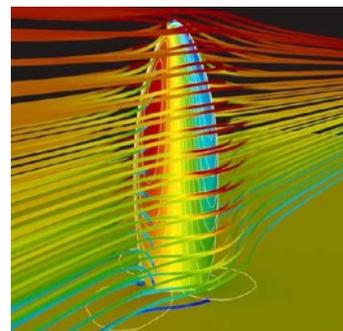
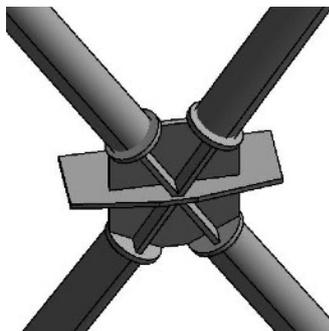
Le strutture *diagrid*, grazie alla possibilità di poter variare gli angoli tra i suoi elementi, hanno la potenzialità di generare una varietà di forme, anche irregolari, e permettono la realizzazione di strutture per edifici alti di forma complessa. In un sistema strutturale *diagrid* la maggior parte dei carichi verticali e laterali dell'edificio, grazie alla configurazione triangolare dei suoi elementi, sono presi dalle diagonali esterne della *diagrid*. Questo permette, rispetto alle tradizionali strutture a telaio controventato, di eliminare quasi tutte le colonne interne. Rispetto alle tradizionali strutture a tubo intelaiato senza diagonali, le strutture *diagrid* sono molto più efficaci nel ridurre al minimo la deformazione da taglio perché loro portano il taglio per sforzo assiale degli elementi diagonali. Nelle strutture *diagrid* tutto il taglio può essere portato dalle diagonali poste sul perimetro; garantiscono quindi un'adeguata rigidità tagliante e flessionale.

Dal punto di vista comportamentale, nella Hearst Tower il carico verticale N_{cv} , data la maglia verticale, si ripartisce tra le due diagonali (comprese); nel progetto del Gherkin invece la maglia elementare presenta un'inclinazione, per cui ogni nodo sarà caratterizzato anche da azioni orizzontali. Queste forze orizzontali possono determinare lo spanciamento della *diagrid*, da qui la soluzione di adottare degli anelli orizzontali per contrastare quest'azione. Questa inclinazione si ripercuote anche nella progettazione dei nodi in quanto la loro geometria e le sollecitazioni agenti variano ad ogni livello. Dal punto di vista geometrico acquista importanza l'angolo delle diagonali della *diagrid*, che influenza la rigidità laterale della struttura, il cui valore ottimale è circa 35 gradi.



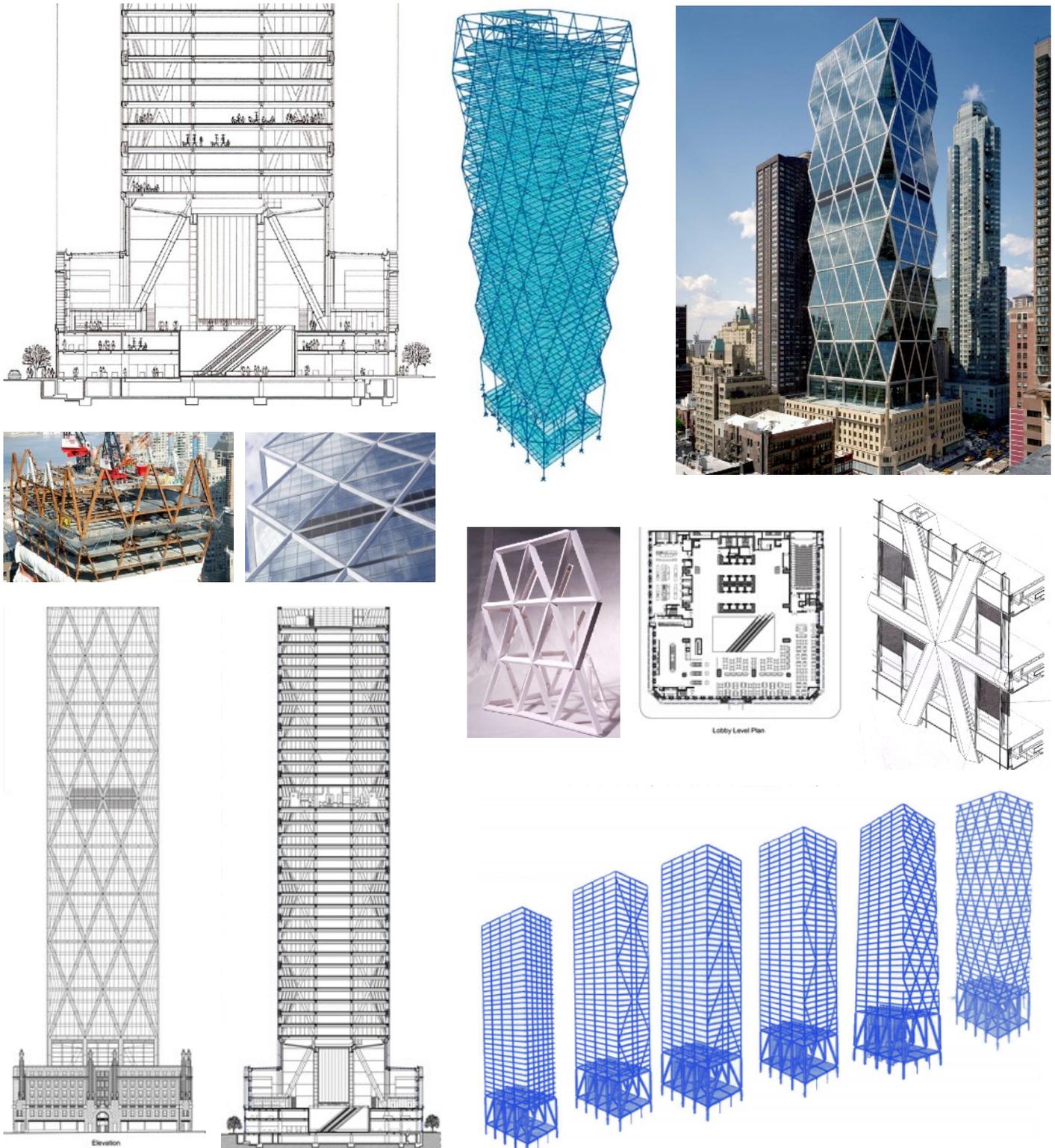
The Gherkin (30 St Mary Axe), Norman Foster - Londra, 2004

Gli architetti, dello studio Foster and Partners, creano una caratteristica forma a cono per ridurre le turbolenze intorno al grattacielo. Se nella maggior parte degli edifici alti la stabilità laterale è assicurata da un pilone centrale o da una struttura perimetrale, con l'aiuto di ingegneri strutturali è stato sviluppato un perimetro di strutture reticolari triangolari che rendono l'edificio sufficientemente solido anche senza rinforzi extra e contrappesi. Nonostante la forma curvilinea, c'è solo un pezzo di vetro curvato sull'edificio: una copertura a lente sulla sommità. L'edificio usa inoltre metodi di risparmio energetico che gli consentono di usare la metà dell'energia normalmente necessaria per un edificio simile: si crea anche un gigantesco effetto di doppio vetro, e l'aria è quindi incanalata attraverso due strati di cristalli e isolando lo spazio degli uffici all'interno.



Hearst Tower, Norman Foster - New York, 2006

Grattacielo di 182 mt per 46 piani in vetro e acciaio destinato ad ospitare gli uffici del gruppo editoriale Hearst, sorge sopra un edificio Art Déco di sei piani progettato negli anni '20 in previsione di un grattacielo come sede. Concepito nel massimo rispetto per l'ambiente, presenta un'ossatura metallica realizzata utilizzando l'85% di acciaio riciclato; la struttura reticolare triangolare delle travi in acciaio, che incorniciano diagonalmente le grandi porzioni di vetrata, disegna un modulo a forma di diamante che ha consentito un risparmio di acciaio del 20% in meno rispetto alle quantità utilizzate per una tradizionale struttura. La torre Hearst consuma il 25% di energia in meno rispetto ai tradizionali grattacieli newyorkesi; il vetro a bassa emissione scelto per il rivestimento esterno consente la penetrazione della luce naturale e protegge al tempo stesso l'edificio dall'eccessivo riscaldamento.

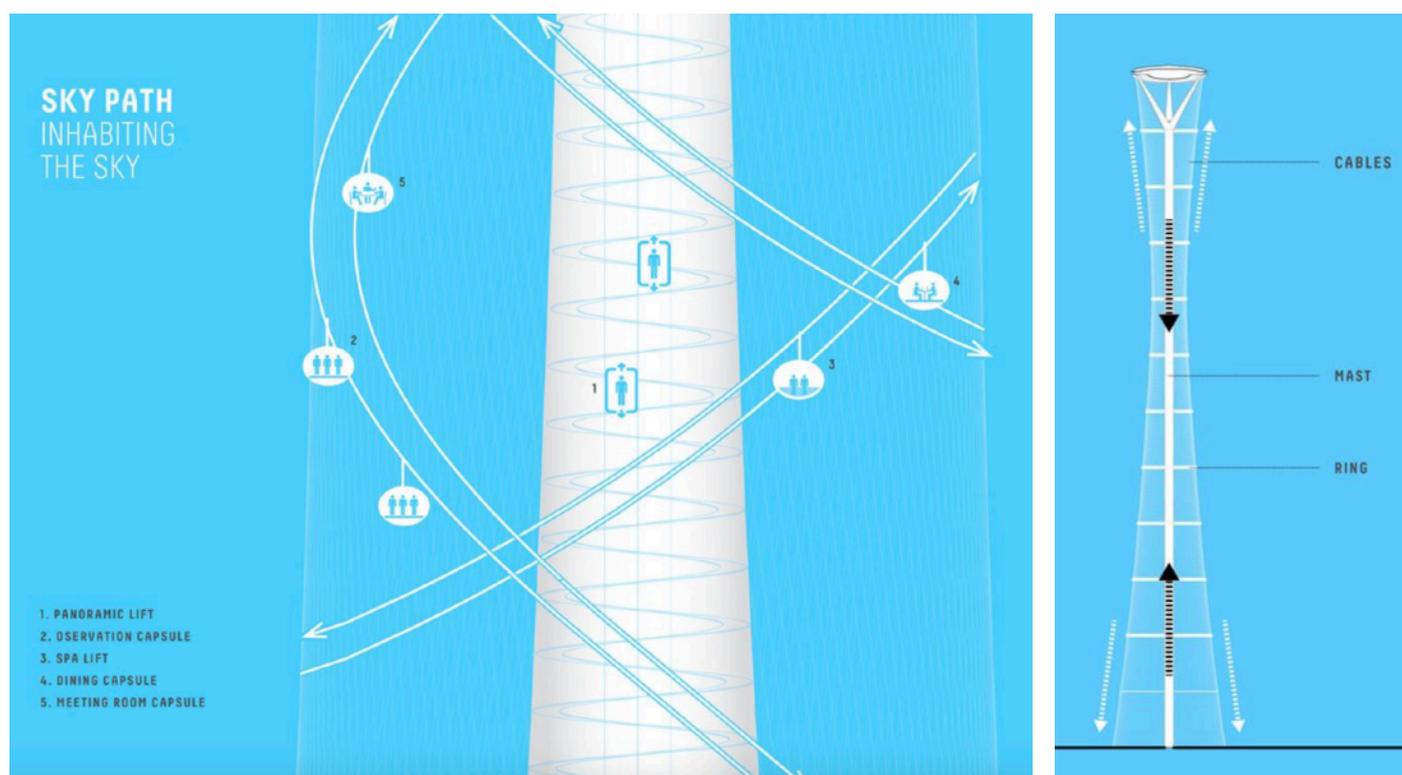


Possibili implicazioni future tra sfide e sostenibilità energetica

Le strutture reticolari permettono una notevole libertà dal punto di vista costruttivo e ingegneristico e quindi architettonico e energetico; ciò permette sia di realizzare strutture quasi assurde, sia di soddisfare necessità energetiche in maniera intelligente.

Infatti, nella tendenza degli ultimi anni di realizzare architetture a basso impatto ambientale, le strutture reticolari si inseriscono prepotentemente come soluzione a una necessità di una notevole finestrata anche per realizzare impianti fotovoltaici. Per esempio, vi è un progetto del 2010 di **Matteo Ruzza** di un complesso sciistico la cui copertura è costituita da una maglia strutturale in cui sono inserite lastre di vetro temperato e celle fotovoltaiche. Il progetto di questa struttura ricettiva a S. Martino in Badia (Bolzano), vincitore del premio "Tecnologie solari e qualità del progetto: l'integrazione del fotovoltaico in architettura", integra così armoniosamente l'impianto fotovoltaico e la caratterizzante geometria a spirale del progetto, con un'estrema cura dei dettagli e delle soluzioni costruttive con l'introduzione di moduli speciali, e anche un'attento e gradevole inserimento paesaggistico. Tutto ciò è stato possibile solo grazie alla libertà creativa che permette di avere la struttura a "rete".

La stessa libertà permette poi di concepire un'architettura come "**The Mile**" ("Il Miglio"), un giardino verticale che dovrebbe essere alto 1609 m, equivalenti appunto a un miglio, distruggendo così ogni record riguardante l'altezza massima di un edificio; il progetto della Carlo Ratti Associati infatti prevede l'utilizzo di una struttura reticolare larga solamente 20 m che si sviluppa verticalmente in modo elicoidale, riducendo al minimo il peso della struttura e permettendo di raggiungere altezze inimmaginabili, con una terrazza panoramica in cima e un'ascesa tra ascensori futuristici e contatto con la natura attraverso l'ecosistema che percorre la struttura dalla base all'apice. "Immaginate di prendere il Central Park di New York, posizionarlo in verticale e avvolgerlo su se stesso: questo è The Mile", afferma Carlo Ratti, che è stato molto influenzato dalle idee di Buckminster Fuller; "The Mile" vuole infatti essere "una piattaforma per scoprire la realtà da una prospettiva diversa. Per osservare dall'alto la Navicella Terra (Spaceship Earth), come amava definirla il grande inventore americano Buckminster Fuller. E da lassù, riflettere con ironia sulla vanità del celolunghismo terreno". Il progetto ha incontrato varie difficoltà, tra cui la necessità di un'efficace resistenza al vento e la scelta del posto adatto dove costruirlo, ma non si esclude che in un futuro piuttosto prossimo si possa trasformare il progetto in realtà.



Bibliografia di riferimento

- AA. VV. *Enciclopedia dell'architettura*, Garzanti, Milano, 1996
- Benevolo Leonardo, *L'architettura del nuovo millennio*, Laterza, Roma-Bari, 2006
- Carbonara Pasquale, *Architettura pratica*, Utet, Torino, 1980
- Casini Paolo, Vasta Marcello, *Scienza delle costruzioni*, Città Studi Edizioni, 2016
- Makowski Zigmunt Stanislaw, *Strutture spaziali in acciaio* (1963), Cisia, Milano, 1977
- Muntoni Alessandra, *Lineamenti di storia dell'architettura contemporanea*, Editori Laterza, 2005
- Piano Renzo, *Giornale di bordo, autobiografia per progetti 1966 - 2016*, Passigli Editori, 2016
- Wachsmann Konrad, *Una svolta nelle costruzioni* (1959), Il Saggiatore, Milano, 1965

Sitografia di riferimento

- www.archdaily.com
- www.federica.unina.it
- www.unicam.it
- www.unirc.it
- ingegneriae.blogspot.it