



1.TECNOLOGIA

1.1.REQUISITI

L'insieme facciata/copertura rappresenta l'interfaccia tra il nuovo edificio e la parte esistente, e per questo motivo deve rispondere a diversi requisiti riassunti in questa tabella

Componente	Gestione della luce	Vento/Pioggia	Altri requisiti
Facciata	<ul style="list-style-type: none"> - Riflesso del lato conservato, in modo da ricreare l'immagine dell'arena intera - Trasparenza sufficiente per lasciare libera la vista dall'edificio nuovo verso la parte conservata - Controllo per evitare il surriscaldamento dello spazio coperto 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistenza alla pioggia e al vento 	<ul style="list-style-type: none"> - Duttilità dell'elemento che si raffronta con la parte esistente come uno schermo per la visione di film o spettacoli - Permettere il passaggio da un lato all'altro del piano terra
Copertura	<ul style="list-style-type: none"> - Sufficiente trasparenza per fornire luce agli spazi interni - Controllo per evitare il surriscaldamento dello spazio coperto 	<ul style="list-style-type: none"> - Resistenza alla pioggia e al vento - Sistema di gestione delle acque meteoriche - Aperture per la ventilazione naturale 	<ul style="list-style-type: none"> - Apporto energetico solare/fotovoltaico

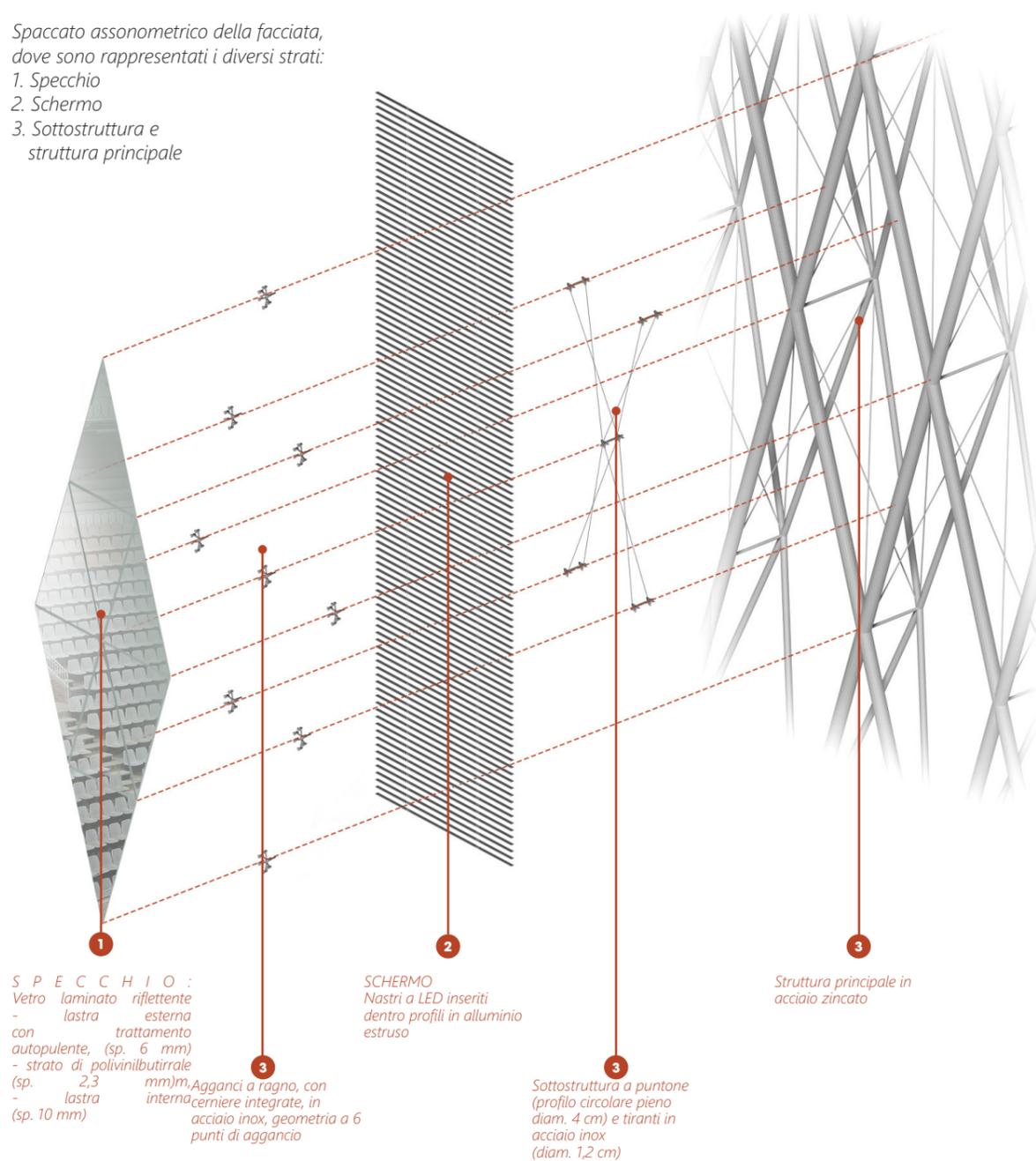
Vista dei trecadis, importante riferimento per l'idea di riflesso dell'esistente, e anche l'aspetto a triangoli della facciata specchio

1.2.STRATIGRAFIA

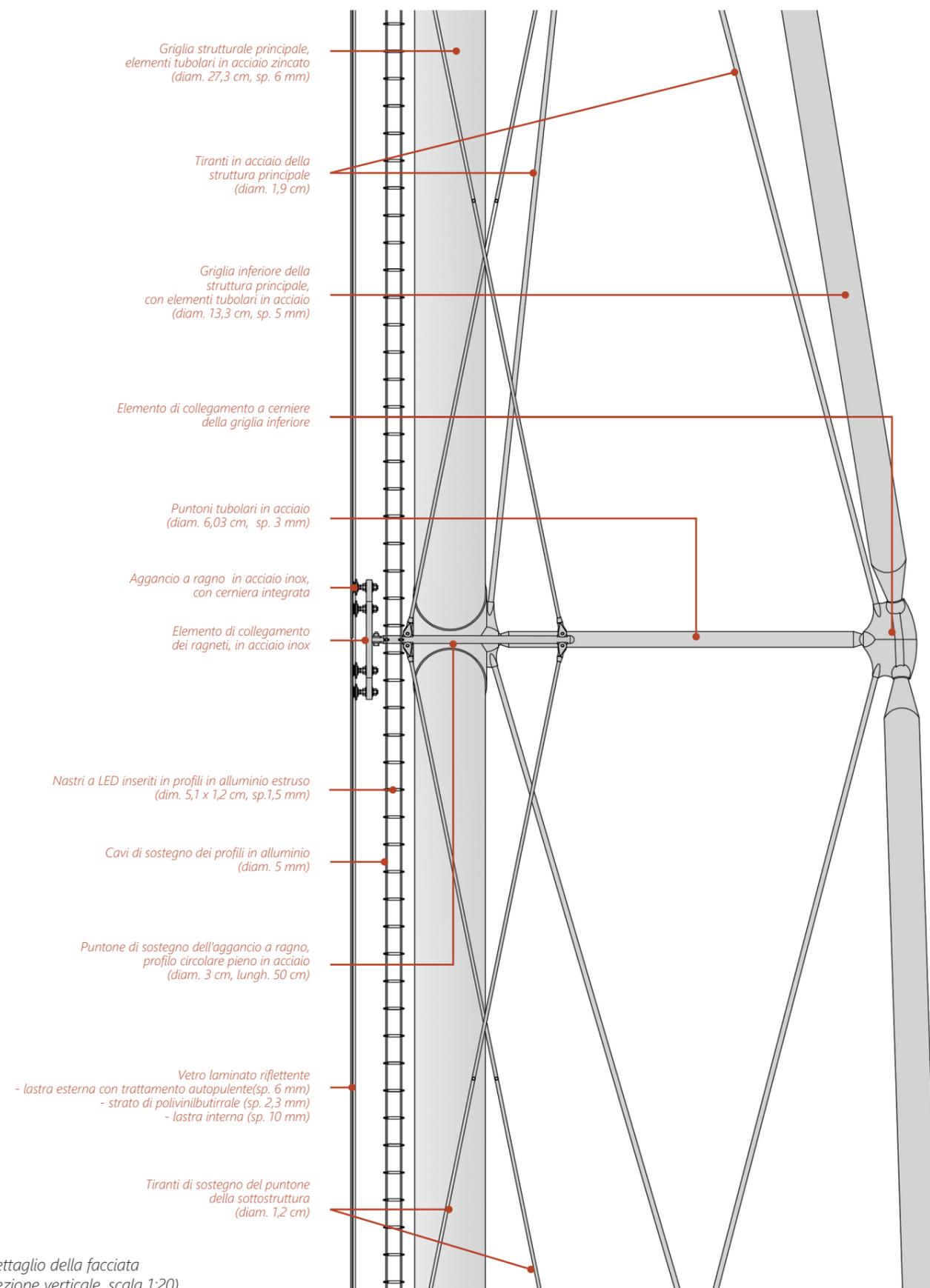
E' stata scelta una stratificazione della facciata, nella quale ogni strato corrisponde a un requisito particolare da soddisfare. L'ordine dei diversi strati risulta dall'importanza dei diversi requisiti. Per soddisfare il requisito di riflesso, si è disposto il strato riflettente all'esterno (verso la parte sud conservata). Si è cercato di renderlo il più pulito possibile, grazie a una struttura di sostegno disposta unicamente a nord, con un sistema di agganci puntuali. La componente schermo è disposta dietro il vetro, e prima della struttura principale, e si comporta anche come una schermatura che aiuta al comfort termico nella piazza interna.

Spaccato assometrico della facciata, dove sono rappresentati i diversi strati:

1. Specchio
2. Schermo
3. Sottostruttura e struttura principale



Dettaglio della facciata (sezione verticale, scala 1:20)



1.2.1. Lo specchio

La principale caratteristica di questo strato è quella di riflettere l'immagine del lato sud preesistente, pertanto si è scelta una facciata vetrata, in grado di restituire un riflesso chiaro, ma che al tempo stesso permettesse una trasmissione luminosa sufficiente ad illuminare anche l'edificio nuovo nella parte nord. Per non distorcere il riflesso, la struttura è stata nascosta dietro il vetro, grazie ad agganci puntuali a ragno.

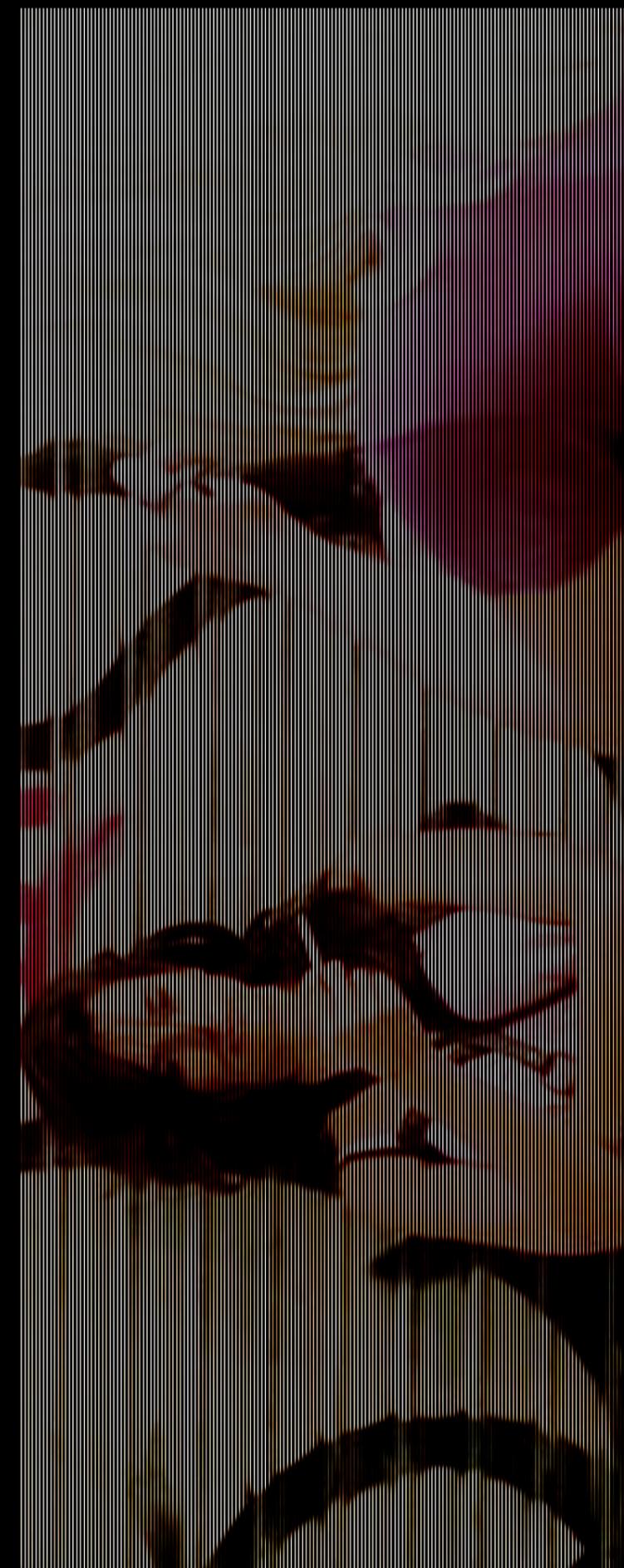
I vetri scelti sono laminati, con un trattamento superficiale pirolitico autopulente; questo permette di ridurre la pulizia, e mantenere la superficie chiara per non rovinare l'effetto riflettente. Gli agganci a ragno sono stati collocati all'interno della parete vetrata, come già detto in precedenza per non disturbare il riflesso dell'esistente.

1.2.2. Lo schermo

La difficoltà risiedeva nel trovare una risoluzione di schermatura sufficiente per offrire una qualità d'immagine buona, senza diventare troppo opaca per lasciare quindi la visione dall'edificio nuovo verso l'arena. Per rispondere in modo esaustivo a queste richieste, verranno usati dei nastri LED 2R2G2B un insieme di led di diversi colori: 2 rossi, 2 verdi e 2 blu. Questi nastri sono inseriti in profilati orizzontali d'alluminio estruso, distanziati tra loro di circa 10,4 cm. Questo passo è stato appositamente adottato per non avere i nastri LED nascosti dietro gli agganci a ragno di sostegno del vetro.

Le dimensioni dello schermo sono rispettivamente: 44 m di larghezza e 17,6 m di altezza con un rapporto di 1: 2,5 che corrisponde al formato cinemascope. La risoluzione ottenuta per un osservatore situato nei gradoni a 43m dello schermo corrisponde a quella indicata dallo schema nella pagina seguente, a un osservatore posto a 26 cm.

*Immagine da guardare ad una distanza di 26 cm:
la risoluzione allora osservata è la stessa da quella
dello schermo nel progetto*



I profili in alluminio di sostegno hanno anche lo scopo di evitare il surriscaldamento della piazza interna in estate; infatti queste lamelle si assimilano a dei frangisole orizzontali, che sono in grado di controllare la quantità di luce che attraversa la facciata. La radiazione luminosa è riflessa in parte dalla facciata specchio, mentre la parte restante di luce filtrante viene intercettata da questi profili prima di raggiungere le persone nella piazza. Gli apporti solari diretti sono ridotti nella piazza mentre sono i profili, più lontani dalle persone, che sono interessati da un surriscaldamento; c'è da aggiungere però, che questi sono situati nella diagonale tagliata dell'arena, un corridoio di ventilazione naturale, che è in grado di dissipare l'energia accumulata da questi frangisole.

Dalle temperature esterne di Barcellona riportate nel grafico seguente, sono visibili casi di surriscaldamento dal mese di maggio fino alla fine del mese di agosto, considerando come situazione di comfort l'intervallo tra i 20° e 25° centigradi.

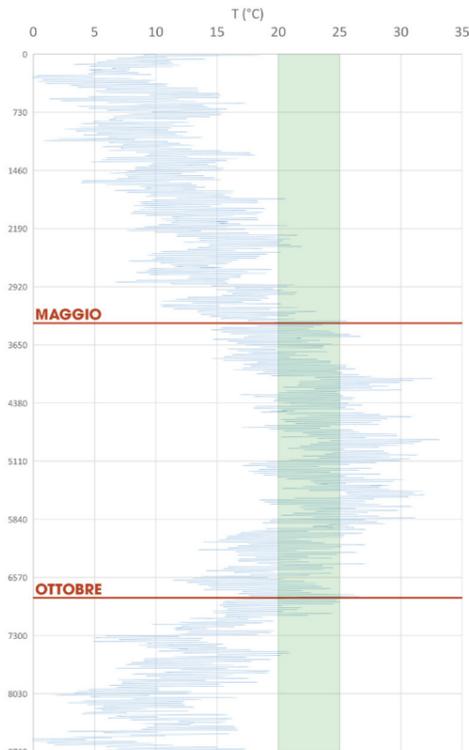
L'obiettivo è diventato pertanto quello di schermare al 100% la luce diretta a mezzogiorno durante questi mesi; una volta deciso ciò, era necessario valutare la percentuale di oscuramento durante l'intera giornata, in particolare quando i raggi solari non sono più perpendicolari alla facciata, e durante l'anno, quando la posizione del sole è notevolmente più bassa.

Dal diagramma solare di Barcellona si determina che l'angolo dei raggi solari a mezzogiorno per i mesi di maggio a agosto varia dai 60°, ottenuti nel mese di agosto, ai 73°, valore massimo sull'anno che si raggiunge il 21 giugno. Considerato il passo degli oscuramenti, pari a $p = 10,4$ cm definito precedentemente, con uno spessore dei profili pari a $s = 1,2$ cm, il valore di 100% di oscuramento si raggiunge con una larghezza di profilo minima data semplicemente dalla seguente relazione:

$$d_{min} = \frac{(p-e)}{\tan(\alpha_{\perp})}$$

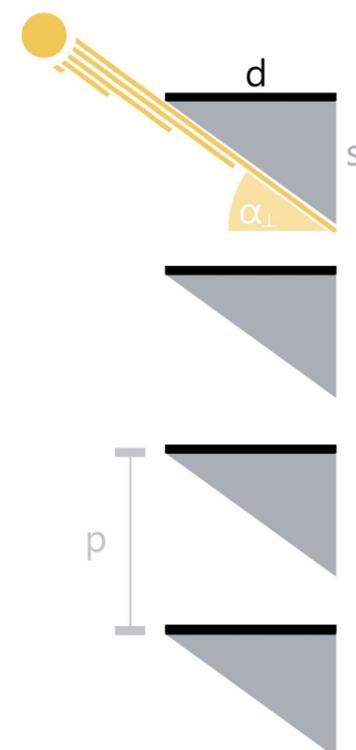
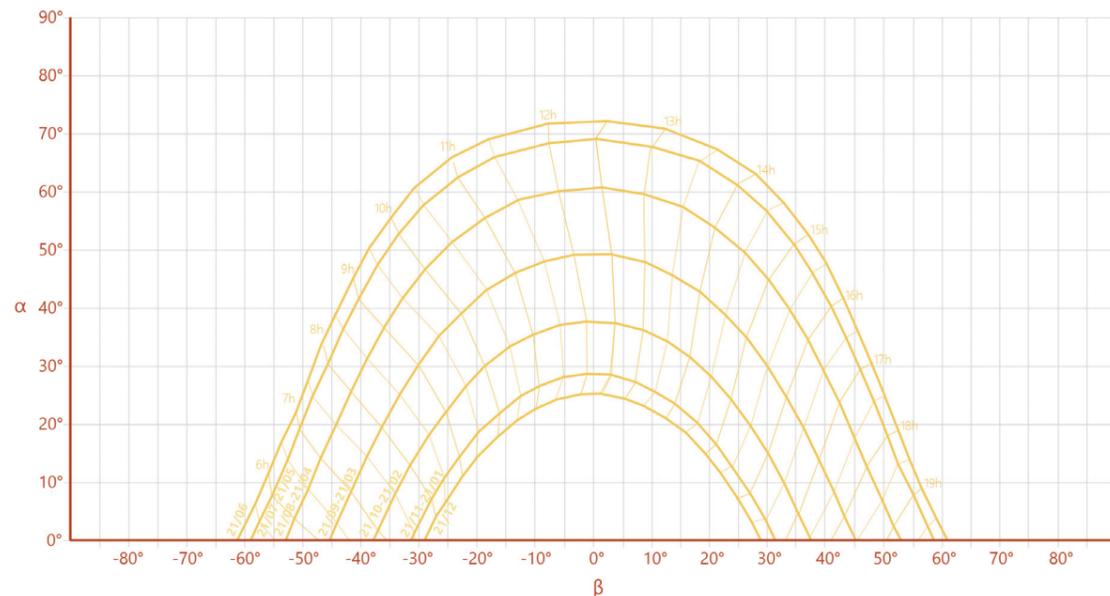
Dove:

- $p=10,4$ cm è il passo determinato precedentemente
- $e=1,2$ cm è lo spessore del profilo
- $\alpha_{\perp} = 60^{\circ}$ è l'angolo minimo allo zenit nei mesi considerati



Temperature orarie a Barcellona (anno 2009), limite di comfort in verde

Diagramma Solare a Barcellona (lat: 41°39'/lon: 2°17')
 α = elevazione
 β = azimut



Schema del shading per un azimut di $\beta = 0^{\circ}$ (visto in pianta: sole perpendicolare alla facciata)

Si ottiene quindi il valore:

$$d_{min} = 5,1 \text{ cm}$$

Questa dimensione determinata, risulta importante anche per determinare la percentuale di oscuramento che si ottiene con la medesima tipologia di frangisole durante l'anno e durante il giorno. Questa valutazione è stata effettuata in modo analitico grazie a considerazioni geometriche, per ottenere le curve indicatrici di oscuramento sull'anno per questo montaggio particolare di frangisole.

La percentuale di oscuramento è direttamente proporzionale alla distanza s indicata sullo schema riportato a lato, essendo data da s/p , dove p rappresenta sempre il passo della struttura. Quando il sole è perpendicolare alla facciata, con schermature di larghezza d fissa, il valore s dipende solo dall'angolo α_{\perp} dei raggi solari rispetto all'orizzontale:

$$s = d \times \tan(\alpha_{\perp})$$

Invece quando si considerano raggi solari che arrivano sulla facciata con un angolo β qualunque rispetto alla normale (riferirsi allo schema riportato di seguito), la formula per s diventa:

$$s = d' \cdot \tan(\alpha)$$

Con:

$$d' = \frac{d}{\cos(\beta)}$$

Quindi:

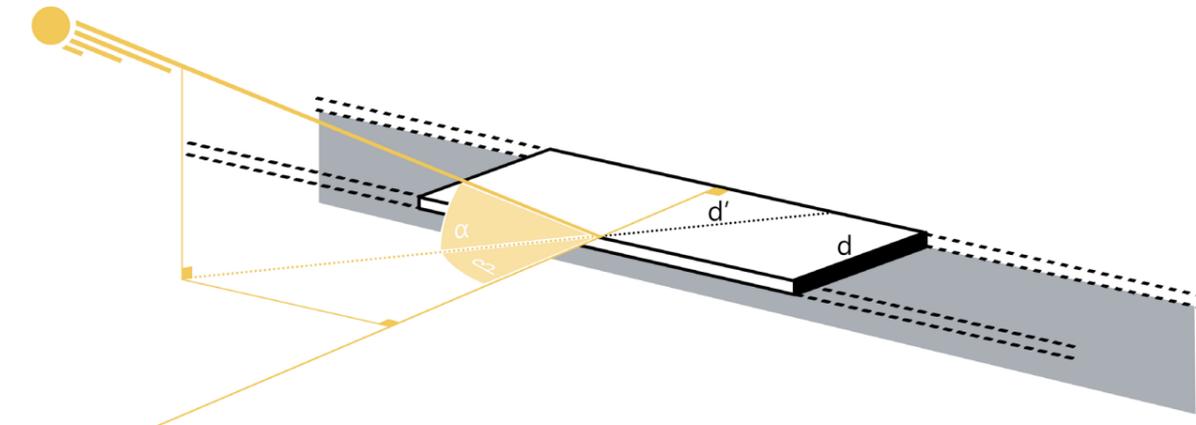
$$s = \frac{d \cdot \tan(\alpha)}{\cos(\beta)}$$

Considerando invece α come la variabile, la formula diventa:

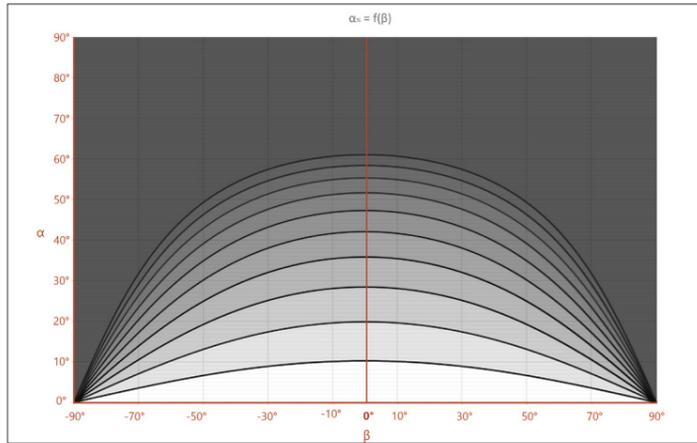
$$\alpha = \arctan\left[\frac{s}{d} \cdot \cos(\beta)\right]$$

Questa formula indica, per ogni angolo β dei raggi solari rispetto alla normale della facciata, corrisponde un angolo α rispetto all'orizzontale che permette di raggiungere il livello di oscuramento s ottenuto per l'angolo α_{\perp} , e infatti la formula si può semplificare in:

$$\alpha = \arctan[\tan(\alpha_{\perp}) \cdot \cos(\beta)]$$



Il vantaggio di questa formula è che la si può sovrapporre al diagramma solare di Barcellona per capire l'effetto delle schermature durante l'anno e il giorno; in un primo momento, vengono determinati gli angoli $\alpha_{1\%}$ che corrispondono a diverse percentuali d'oscuramento, riportati nella tabella a lato. Per questi valori determinati, si considerano le curve



% oscuramento	$\alpha_{1\%}$
100 %	61,0 °
90 %	58,3 °
80 %	55,2 °
70 %	51,6 °
60 %	47,3 °
50 %	42,0 °
40 %	35,8 °
30 %	28,4 °
20 %	19,8 °
10 %	10,2 °

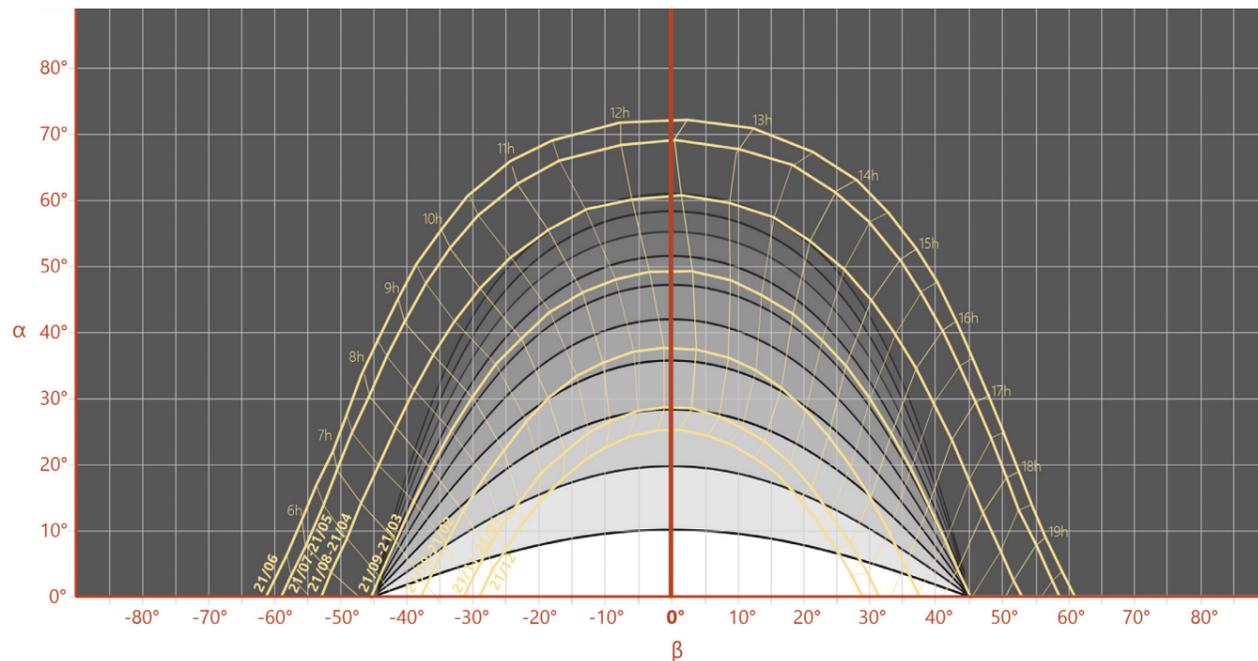
Tavola dei valori di $\alpha_{1\%}$, e curve di $\alpha_{1\%}$ con variazione dell'angolo β (indicatore di oscuramento)

le $\alpha_{1\%} = f(\beta)$ corrispondenti, rappresentate nel grafico seguente:

Sovrapponendo queste curve al diagramma solare, si ottiene finalmente la percentuale di oscuramento che interessa tutto l'anno e secondo l'ora del giorno.

Si scopre che, scegliendo un oscuramento pari al 100% allo zenit per i mesi da maggio a agosto, questo valore è mantenuto per tutta la durata del giorno durante questi mesi. Per quello che riguarda i mesi più freddi invece, da settembre ad aprile, i raggi più ortogonali alla facciata e più bassi sono meno schermati dalla facciata. Per esempio da novembre a gennaio la percentuale di oscuramento è sempre minore al 30%. Questa scelta di dimensioni risulta quindi adatta per assicurare apporti solari maggiori d'inverno nella piazza, e evitare il flusso diretto nella stessa piazza d'estate.

Sovrapposizione dell'indicatore di oscuramento e del diagramma solare



1.2.3. Struttura di sostegno

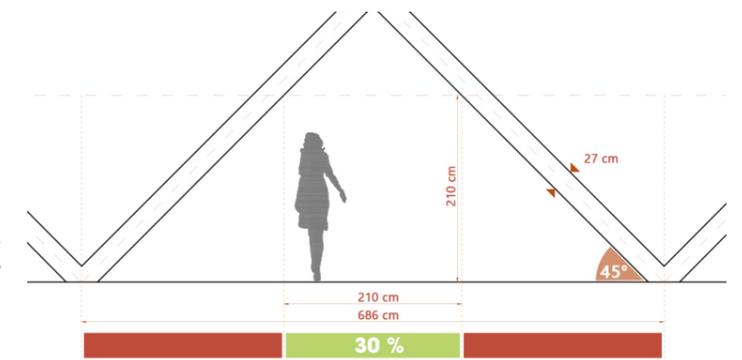
La struttura è suddivisa in due parti: la struttura principale e quella secondaria con gli agganci a ragno e cavi di sostegno.

La struttura principale:

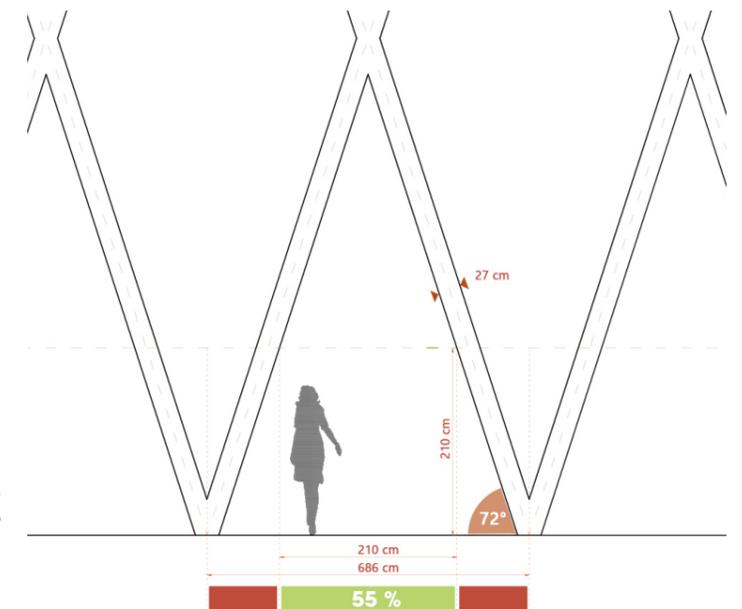
La struttura principale consiste in una maglia esterna di elementi tubolari incrociati, rinforzata con degli elementi aggiunti disposti nella parte inferiore. Il calcolo di questa struttura è dettagliato nella parte seguente 5.2. In un primo approccio si era scelta una maglia con elementi perpendicolari tra essi, ma infine sono stati scelti elementi più verticali, con un angolo di 72° rispetto all'asse orizzontale. Questo permette di lasciare molto più spazio per il passaggio delle persone al piano terra, come mostrano i diagrammi riportati a lato; il valore di 72° corrisponde anche all'angolo del taglio nel nuovo edificio rispetto alla diagonale creata nell'arena.

Gli elementi della griglia si raccordano a terra in nodi puntuali, in modo da diminuire maggiormente l'impatto al suolo; il passo tra questi è di 380 cm, ed è stato scelto in modo che corrispondesse con l'edificio esistente al livello del corridoio perimetrale. Infatti l'ultimo nodo arriva a terra un po' prima della facciata esterna, lasciando così il passaggio libero per entrare in questo corridoio.

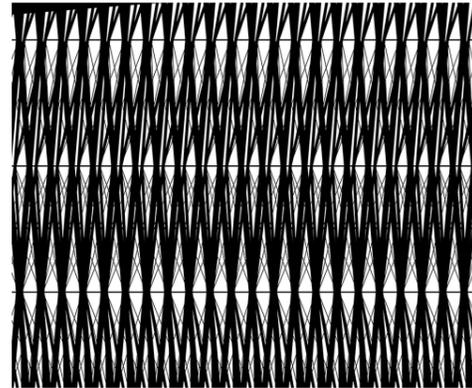
Soluzione iniziale pensata: struttura principale angolata a 45°



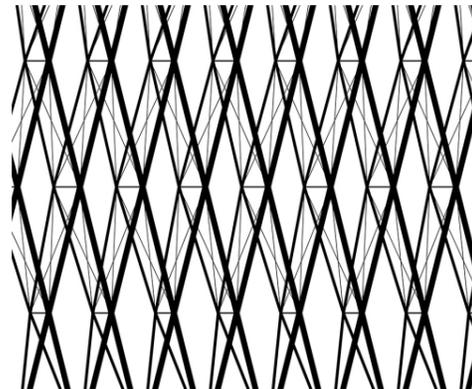
Soluzione finale scelta: struttura principale angolata a 72°



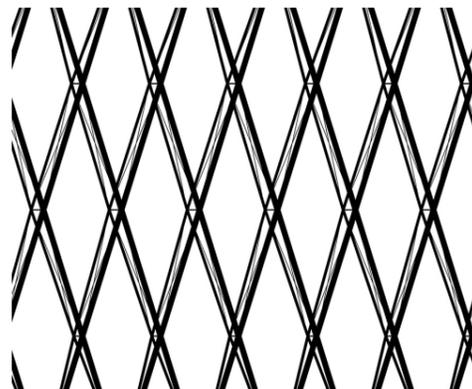
A causa delle importanti luci strutturali della copertura, si pensava che l'edificio si sarebbe caratterizzato per una struttura di dimensioni considerevoli, ma invece, si è scelto per limitare l'impatto visivo, di allineare tutti gli elementi di rinforzo con la griglia esterna. In questo modo, l'osservazione dal nuovo edificio verso la parte preesistente, perpendicolare alla facciata, è lasciata abbastanza libera.



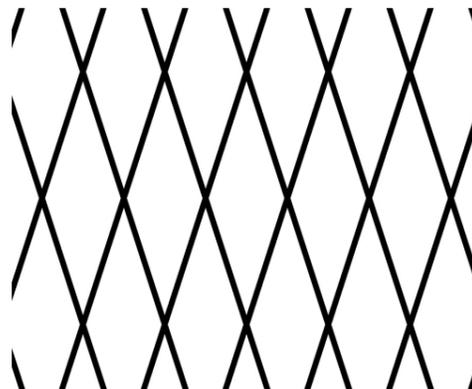
Angolo di vista: 15°



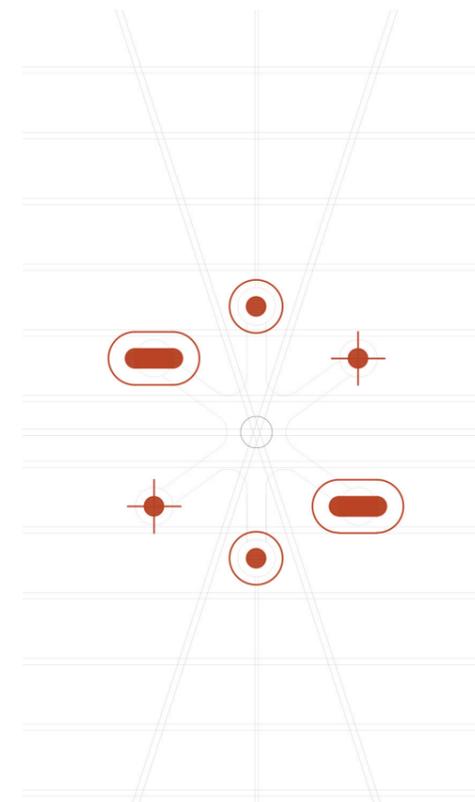
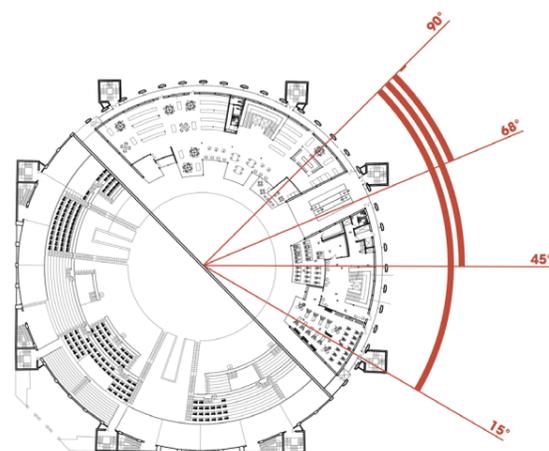
Angolo di vista: 45°



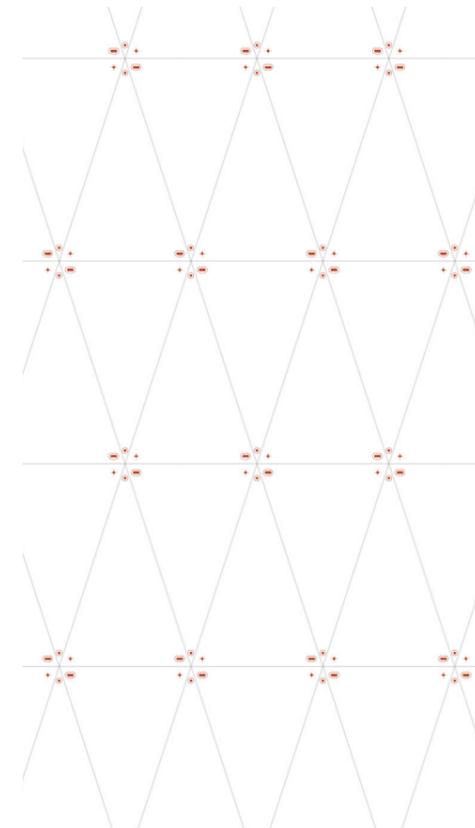
Angolo di vista: 65°



Angolo di vista: 90°



Tipi di attacchi: dettaglio dell'aggancio a ragno



Tipi di attacchi: montaggio generale

La sottostruttura di sostegno:

Gli agganci a ragno

Considerando la geometria della struttura principale, sono state usate lastre di vetro triangolari, che necessitano agganci a ragno con sei bracci. Questi agganci sono disposti in diversi modi sul modulo:

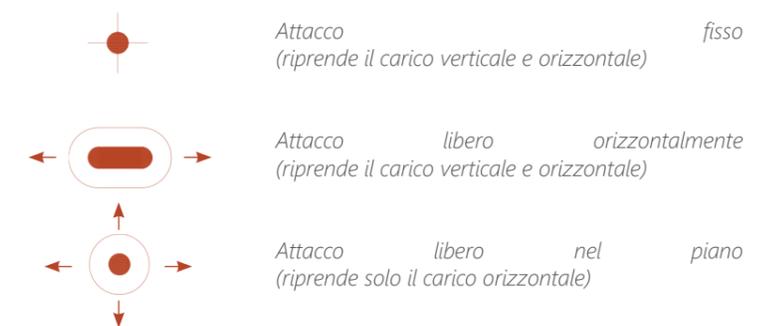
- 4 sono attaccati ai nodi della struttura
- 4 sono attaccati al centro dei profili tubolari perimetrali del modulo
- 1 è al centro del modulo, con un puntone sostenuto da tiranti

Gli agganci scelti dispongono di cerniere integrate, che si adattano alle deformazioni del vetro; gli sforzi nel vetro vengono di fatto ridotti. Per ogni vetro, i tre agganci devono anche presentare gradi di libertà diversi, per non creare sforzi che potrebbero danneggiare la lastra di vetro in caso di piccole deformazioni o dilatazioni della struttura principale. Un aggancio infatti, deve essere fisso, uno deve permettere gli spostamenti orizzontali ed infine l'ultimo deve permettere gli spostamenti secondo i due assi, verticale e orizzontale. Questi gradi di libertà sono garantiti dall'aggancio stesso, che deve quindi essere scelto e installato appositamente.

Il montaggio a puntone e tiranti

Per gli agganci al centro del modulo, i soli non allineati con la struttura principale, l'opzione di un montaggio a tiranti e puntone è quella che permette di garantire una trasparenza massima. I cavi sono collegati ai quattro nodi del modulo strutturale principale: 2 verticali, con una geometria che permette di sostenere i carichi del vento in pressione e in depressione, e 2 orizzontali, che funzionano nel stesso modo; questo montaggio a cavi, offre maggiore flessibilità ai vetri, che vengono dissociati dalla struttura in questo nodo.

Diversi tipi di attacchi del vetro:



2. PROGETTO STRUTTURALE DELLA COPERTURA

2.1. SCHEMA GENERALE

La struttura è stata concepita come una griglia regolare e piegata che copre l'insieme dell'edificio; dal punto di vista architettonico permette di dare una continuità a questo elemento protettivo. Al contrario di una soluzione strutturale centrata, con un elemento portante dominante al centro dell'edificio, questa griglia lascia la facciata/specchio più neutra verso il parco, in modo da non distorcere il riflesso dell'esistente, che deve rimanere il personaggio principale della scena.

Dal punto di vista della normativa antincendio spagnola, un spazio coperto come questo può essere considerato come uno spazio esterno sicuro solo se la struttura della copertura è indipendente da quella dell'edificio. Per questo motivo, erano possibili due soluzioni:

- Struttura di sostegno interna alla piazza coperta
- Struttura di sostegno esterna all'edificio

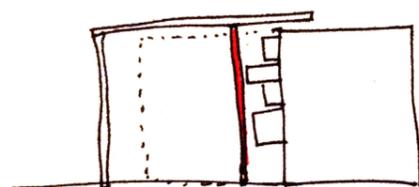
È stata scelta la seconda soluzione, in quanto meno invasiva per il prospetto interno, anche se così facendo aumenta in modo considerevole la luce della struttura in copertura.

La struttura è stata suddivisa in due parti distinte:

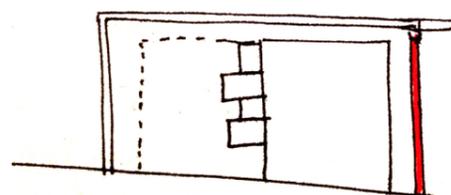
1. L'insieme facciata/copertura
2. L'elemento di sostegno sul retro dell'edificio

L'insieme facciata/copertura (1) è stato concepito come un elemento solido, dove gli elementi sono incastrati tra loro per garantire una rigidità maggiore, ed evitare che si comportasse come una rete, con spostamenti eccessivi. Questa parte (1) si collega a terra e l'elemento di sostegno (2), collocato sul retro dell'edificio, con dei collegamenti a cerniere.

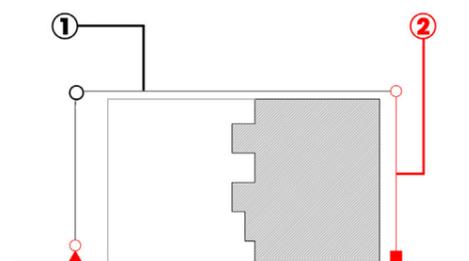
Il studio strutturale si è concentrato sull'elemento (1), più impattante visualmente rispetto alla parte (2) di sostegno, nascosta tra il nuovo edificio è la facciata preesistente conservata nella meta Nord.



Soluzione 1:
Struttura di sostegno nella piazza interna

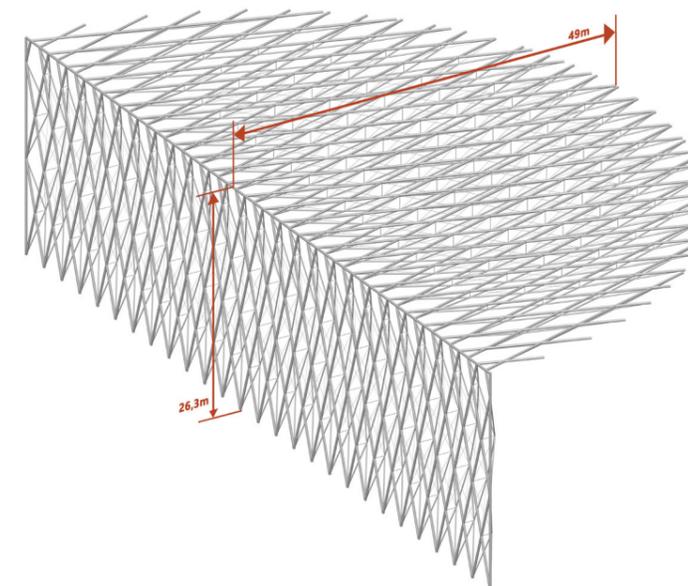


Soluzione 2 (finale):
Struttura di sostegno dietro l'edificio

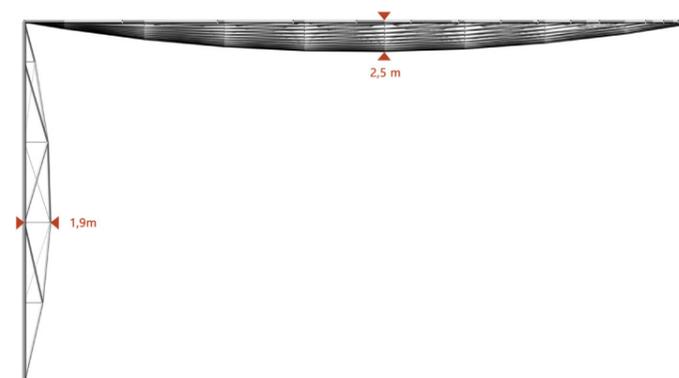


Schema generale della struttura

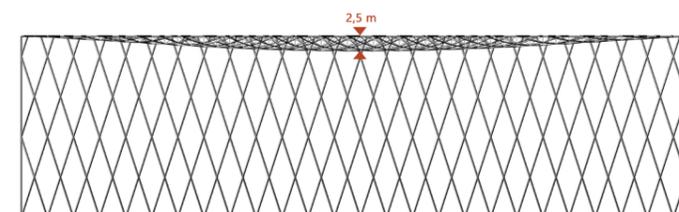
Vista assonometrica della facciata/copertura



Vista laterale della facciata/copertura



Vista da Nord (retro della facciata/copertura)



2.2.DEFINIZIONE DEI CARICHI

2.2.1.Carichi permanenti

Peso proprio degli elementi strutturali G1

Il peso proprio viene calcolato in modo automatico dal software. Per la griglia esterna, sono stati considerati elementi tubolari in acciaio, materiale scelto anche per tutti gli elementi di rinforzo sottostanti. Quindi il parametro determinante del peso è la densità dell'acciaio, pari a:

$$\rho = 7850 \text{ kg/m}^3$$

Carichi permanenti non strutturali G2

I diversi carichi sono stati calcolati in base al modulo di facciata, per essere poi semplificati per le successive analisi in un carico uniformemente ripartito equivalente, nonostante i appoggi "ragno" puntuali. Questa semplificazione si giustifica con la presenza dei tiranti di sostegno dei ragnetti, che vengono a ripartire i sforzi sui diversi nodi.

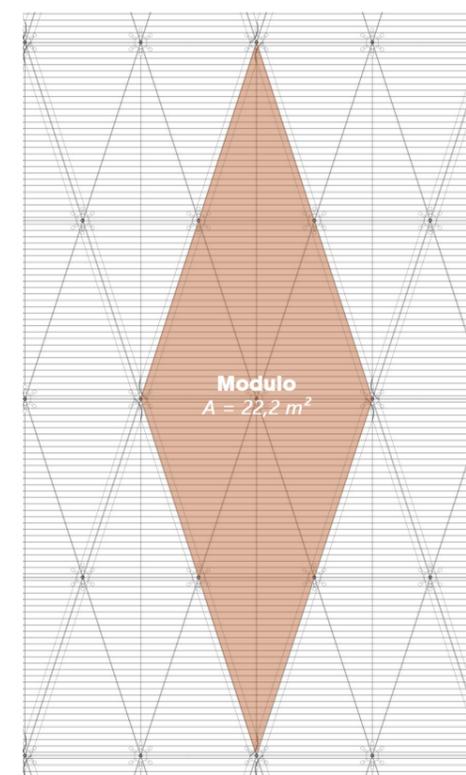
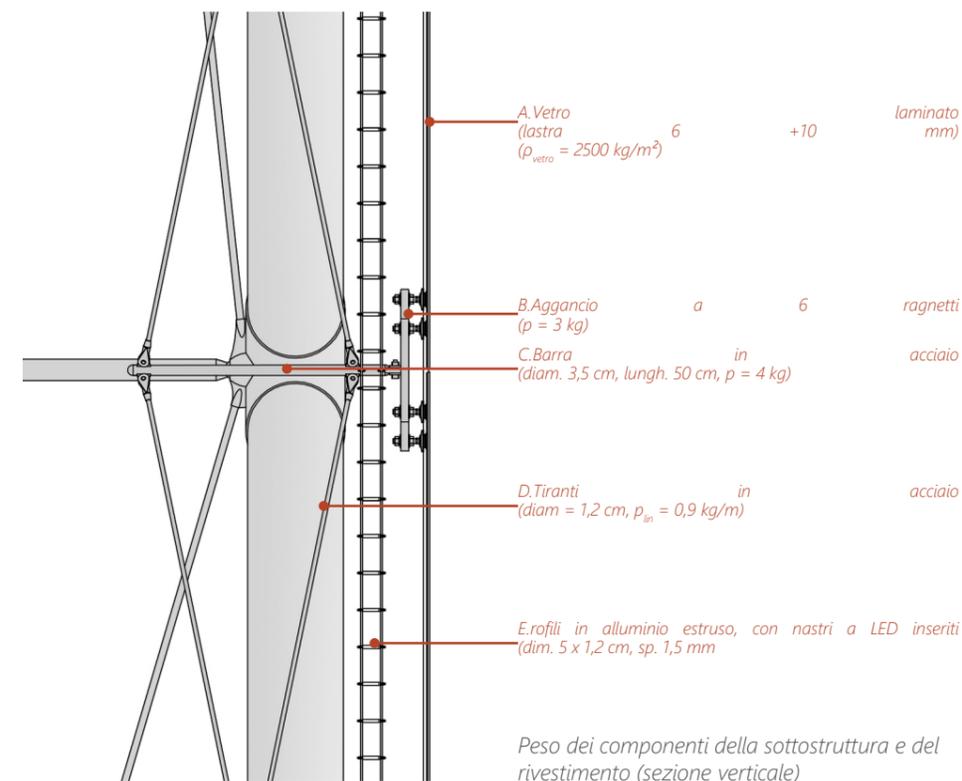
Per il calcolo del numero degli elementi puntuali, sono stati considerati coefficienti secondo il numero di moduli ai quali ogni elemento appartiene:

- 1 per gli elementi all'interno di un solo modulo
- 1/2 per gli elementi sui lati, tra due moduli
- 1/4 per gli elementi agli angoli, tra 4 moduli

Per esempio, il calcolo per il numero dei ancoraggi "ragno" si legge:

$$1 \text{ spider centrale} + \frac{1}{2} \times 4 \text{ spider sui lati} + \frac{1}{4} \times 4 \text{ spider ai angoli} = 4 \text{ elementi}$$

Stratto 2D	Densità [kg/m³]	Spessore [cm]	Carico [kN/m²]
A - Vetro	2500	1,6	0,4
Elemento puntuale	Peso [kg]	Numero di elementi	
B - Spider	4	4	0,007
C - Barre	8,8	4	0,016
Elemento lineare	Peso lineare [kg/m]	Lunghezza [m]	
D - Cavi	0,89	31	0,012
E - Profili	0,16	212	0,018
TOTALE (G₂)			0,45



Definizione del modulo della facciata

2.2.2. Carichi variabili

Carico di uso Q_{manu}

La copertura essendo non praticabile, rientra nella categoria H1, e il suo carico d'uso considera unicamente le possibili opere di manutenzione, con un valore:

$$Q_{manu} = 0,5 \text{ kN/m}^2$$

Carico neve

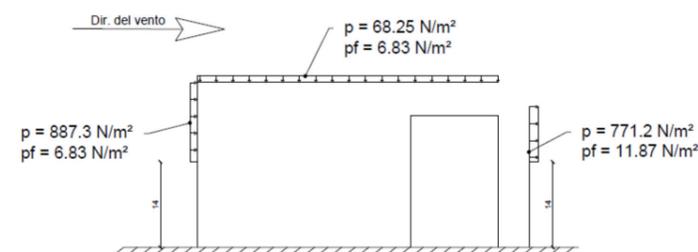
Il carico neve viene calcolato nello stesso modo della copertura del nuovo edificio, e quindi si adotta per i calcoli lo stesso valore:

$$Q_{neve} = 0,32 \text{ kN/m}^2$$

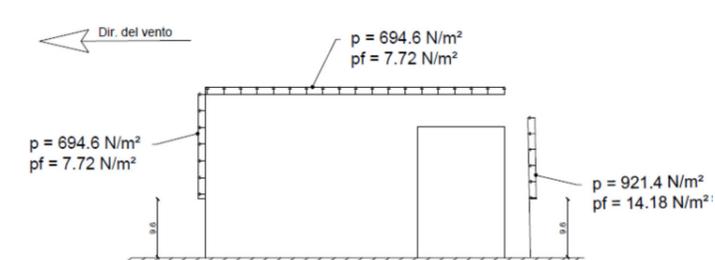
Carico del vento

Il metodo di calcolo per determinare i carichi del vento è già stato spiegato nella parte precedente, sul progetto strutturale del nuovo edificio. Le due situazioni di carico che consideriamo sono il vento proveniente da Sud in direzione della facciata specchio (vento1), e il vento da Nord (vento2). Per questo ultimo caso, si è considerato il caso peggiore senza considerare la protezione del nuovo edificio. Questi due casi di vento sono riassunti negli schemi seguenti:

Vento 1



Vento 2



Caso di vento	Carico in facciata [kN/m²] (positiva verso Nord)	Carico in copertura [kN/m²] (positiva verso l'alto)
Q_{vento1}	0,9	-0,07
Q_{vento2}	-0,7	0,7

2.3. ANALISI INIZIALE SU UNA STRUTTURA DI BASE SEMPLIFICATA

2.3.1. Impostazioni del modello ai elementi finiti

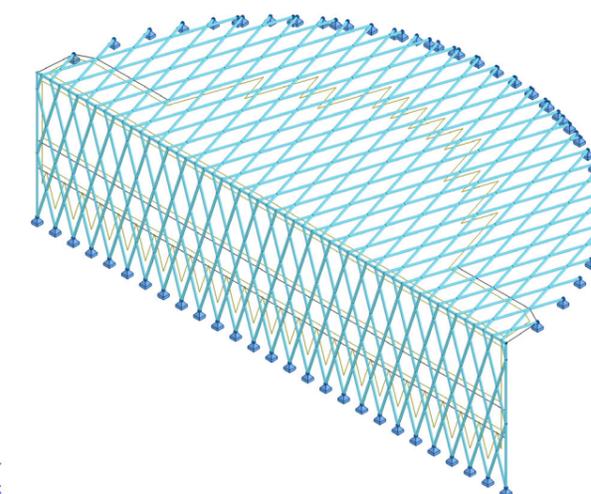
In una prima fase è stata studiata una struttura semplice, con l'obiettivo di capire il comportamento generale della struttura a griglia, prima l'aggiunta di elementi di rinforzi. Per questi analisi qualitative, non importava il tipo di sezione, e quindi si è scelto una sezione tubolare qualunque:

Materiale	Acciaio S235	
	f_y	235.10³ kN/m²
	f_u	360.10³ kN/m²
Geometria	Tubolare	
	d_{est}	40,6 cm
	t	0,6 cm

La modellazione nel software Robot Structural Analysis comincia con il tipo di struttura, che impone il numero di gradi di libertà ai nodi. La copertura lavora in 3D, quindi è stato scelto il tipo *Shell*, che definisce 6 gradi di libertà per ogni nodo. È stato importato un background filare da, suddiviso e convertito in elementi *Bars*, elemento monodimensionale standard, considerate di default incastrate tra di loro. In un secondo momento, la sezione definita nella tabella precedente è stata definita, e applicata ai elementi *Bars*.

Si sono poi aggiunti i appoggi, modellati come semplice appoggi, che permettono le rotazioni nelle 3 direzioni, e bloccano le traslazioni. Sono posizionati sia all'attacco al suolo che alla giunzione con la parte di supporto 2, situata sul retro del nuovo edificio.

In fine, sono stati aggiunti i diversi carichi. Il peso proprio della struttura è calcolato in automatico dal programma. Per i altri carichi ripartiti, sono stati modellati nel software grazie a dei elementi *Cladding*, elementi 2D senza peso, che trasmettono il carico sulla loro superficie ai elementi *Bars* sottostanti. Questi *Cladding* corrispondono quindi alla posizione del rivestimento in vetro, e sono stati anche modellati diversi *Cladding* in facciata per rispondere ai diversi casi di vento.



Modello della struttura nel software Robot Structural Analysis:

- Nodi: 513
- Bars : 703
- Appoggi: 79
- Claddings: 4
- Gradi di libertà statici: 2193

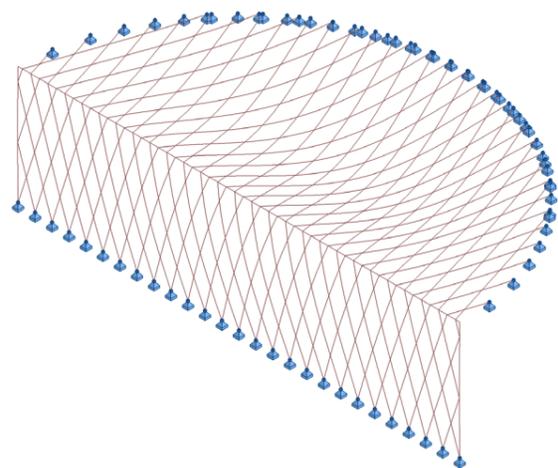


2.3.2. Comportamento qualitativo

Sono stati osservati in modo qualitativo le deformazioni della struttura secondo i diversi carichi; si osservano due comportamenti principali: la flessione della copertura e il rischio d'instabilità della facciata.

Flessione in copertura

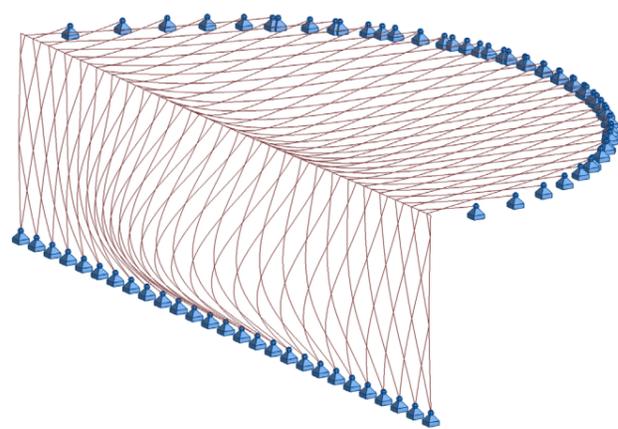
Questo caso avviene a causa del carico verticale in copertura. Per otte-



Rappresentazione fuori scala delle deformazioni sotto il solo peso del rivestimento

tere la deformazione sopra riportata, si è calcolato l'impatto del solo carico del rivestimento. Lo spostamento più importante appare al centro della copertura; si può anche notare lo spostamento in facciata che proviene dalla giunzione dell'angolo, considerato come un incastro, e quindi che trasmette il momento dalla copertura alla facciata.

Instabilità in facciata



Rappresentazione fuori scala delle deformazioni per il primo modo d'instabilità

A causa del carico verticale trasmesso alla copertura, si osserva un potenziale rischio d'instabilità della facciata. Questo fenomeno si concentra soprattutto nella parte centrale, più lontana dagli appoggi laterali, e quindi dove che il carico ripreso dagli elementi in facciata è maggiore.

2.3.3. Approccio analitico: analogia con una piastra

Data la geometria a griglia della struttura, si è cercato una possibile analogia con un comportamento a piastra, che avrebbe risultato in una ricerca analitica del dimensionamento dei vari elementi. Il riferimento che è stato usato è il libro *Theory of Plates and Shells*, di Stephen P. Timochenko.

Nel caso della copertura si tratta di un semicerchio, appoggiato sul lato curvo e incastrato sul diametro. Per semplificare, è stato considerato il caso di un semicerchio caricato in modo uniforme, e appoggiato sul diametro (caso determinato analiticamente da S.P. Timochenko). Infatti, questo caso ha il vantaggio che si può assimilare al caso di una piastra circolare appoggiata sul perimetro, che sia caricata in modo antisimmetrico come descritto sullo schema riportato a lato.

Per una piastra circolare sollecitata con questo carico, lo spostamento verticale ω è dato da:

$$\omega = \alpha \frac{qa^4}{D}$$

Dove:

- D è la rigidità flessionale della piastra, assimilabile alla quantità EI per una trave, e data da:

$$D = \frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$$

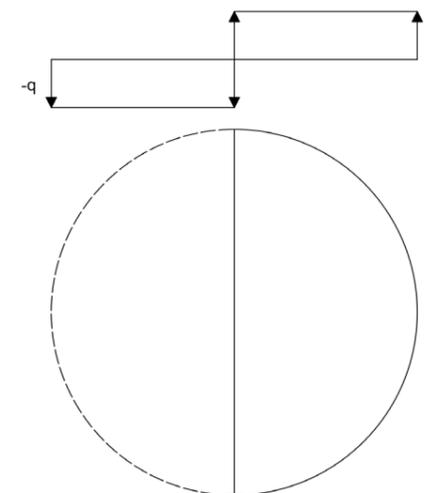
- a è il raggio del cerchio
- α è funzione dell'angolo del settore di cerchio (qui π), e della posizione considerata su questo settore. Alcuni valori lungo l'asse di simmetria del settore, dove lo spostamento è maggiore, sono riportati nel libro *Theory of Plates and Shells*

Per provare la similarità di questo modello analitico con il metodo a elementi finiti, si è provato a calcolare il caso semplificato della copertura a griglia sola, con solo cerniere sui lati, e soggetta a un carico unitario $q = 1 \text{ kN}$. Gli elementi scelti per questa analisi sono dei profili tubolari in acciaio S235, di diametro esterno 40 cm e di spessore 5 mm. Usando questi parametri si osserva dal calcolo una freccia massima pari a:

$$f = 454 \text{ cm}$$

Dalla formula precedente dello spostamento per una piastra, questo valore corrisponderebbe al comportamento di una piastra con una rigidità flessionale pari a: $D=8717 \text{ cm}^3$, con i relativi parametri riportati nella tabella seguente:

Parametri	Valori
α	0,00811
q	1 kN
a	47 m
ω	454 cm
D	$8,7 \cdot 10^3 \text{ kN/m}$



Schema del carico su una piastra circolare, che si comporterebbe in modo equivalente alla piastra semi-circolare caricata uniformemente

Per confrontare questo risultato di piastra alla griglia modellata a elementi finiti, si è cercato nel caso della griglia un'inerzia equivalente alla rigidità flessionale D di una piastra. La difficoltà risolta nella non omogeneità della griglia rispetto a una piastra. Infatti, la successione di pieni e vuoti rappresenta una differenza maggiore rispetto a una piastra. Oltre quello, nelle griglia scelta per il progetto, si aggiunge un carattere anisotropo che risulta dall'angolo scelto tra i elementi, di 36° . Questo angolo essendo diverso da 90° , la griglia presenta un'inerzia diversa secondo gli assi 1 e 2 considerati nello schema riportato a lato.

La rigidità flessionale è equivalente per una trave al parametro EI che rappresenta la rigidità a flessione dell'elemento. Nel caso considerato, questo valore si deve rapportare alla distanza, considerando il numero di elementi su la larghezza di un modulo, secondo gli assi 1 e 2.

In un primo metodo di calcolo, si è considerato l'inerzia paragonata a quella di tubi sezionati in modo perpendicolare, e quindi considerando l'inerzia dei profili circolari, secondo la formula:

$$I = \frac{\pi d^4}{64}$$

Dove d è il diametro del cerchio considerato.

Un secondo metodo per determinare questa rigidità flessionale equivalente è stato quello di considerare l'attuale geometria dei tubi sezionati secondo gli assi 1 e 2, e quindi di usare la formula dell'inerzia relativa agli ellissoidi:

$$I = \frac{\pi ab^3}{4}$$

Dove a è il semi-diametro più largo e b il più piccolo nel nostro caso.

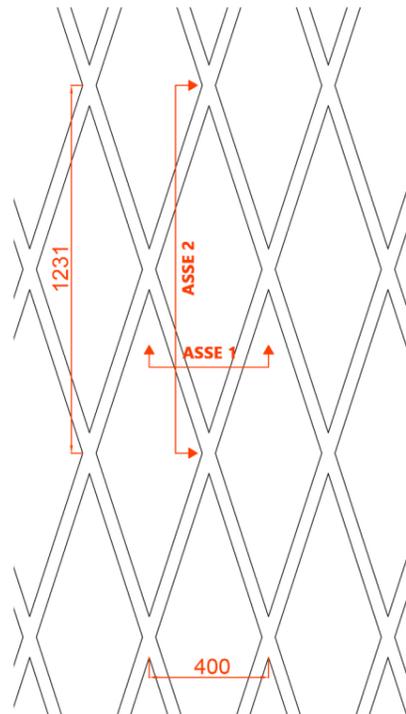
I risultati per i due metodi di calcolo sono riportati nella tabella seguente, dove si è considerato il Modulo di Young dell'acciaio pari a

$E = 210 \text{ GPa}$

	Inerzia elemento I [cm ⁴]	Larghezza modulo L [cm]	Inerzia Equivalente D'	$= 2.E.I/L$ [kN/m]	D'/D
Metodo di calcolo 1					
Asse 1	12102	400	$D'_{1,1}$	12708	1,46
Asse 2	12102	1231	$D'_{1,2}$	4129	0,47
Metodo di calcolo 2					
Asse 1	12725	400	$D'_{2,1}$	13362	1,53
Asse 2	39165	1231	$D'_{2,2}$	13362	1,53

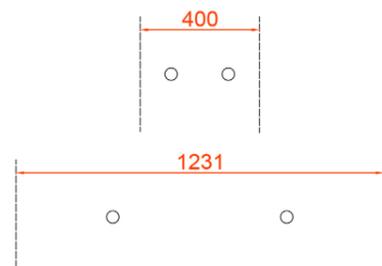
Qualunque sia il metodo, i risultati d'inerzia flessionale equivalente sono troppo lontani dal valore D ottenuto con la piastra. I parametri che motivano questa osservazione sono la non omogeneità del materiale, e l'anisotropia della geometria. Si deve ricordare che anche gli appoggi sono discretizzati in questa opzione geometrica.

Considerate le difficoltà di determinare un'equivalenza tra funzionamento a piastra e a griglia, si è deciso che questo approccio analitico non era adatto all'analisi della struttura considerata.

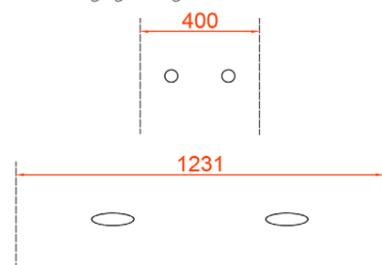


La griglia, con i due assi di calcolo

Metodo di calcolo 1: griglia tagliata con sezioni circolari



Metodo di calcolo 2: griglia tagliata con sezioni circolari



2.4. ANALISI DELLA STRUTTURA FINALE

2.4.1. Descrizione degli elementi

La struttura di base a griglia composta dagli elementi tubolari incastrati è stata rinforzata con elementi di sostegno nella parte interna. Questi elementi interni sono stati scelti e impostati nel software come elementi *Truss*, che lavorano solo a trazione o compressione, e nel caso di tiranti solo a trazione.

Tutti gli elementi interni seguono la geometria della griglia esterna. Quindi è stata aggiunta una griglia inferiore, sia in copertura che in facciata, in modo da aumentare l'inerzia delle due parti, per resistere meglio ai carichi normali. Nel caso della facciata, permette anche aumentare la resistenza ai carichi verticali trasferiti dalla copertura. Per collegare le due griglie sono stati usati puntoni perpendicolari e tiranti in diagonale.

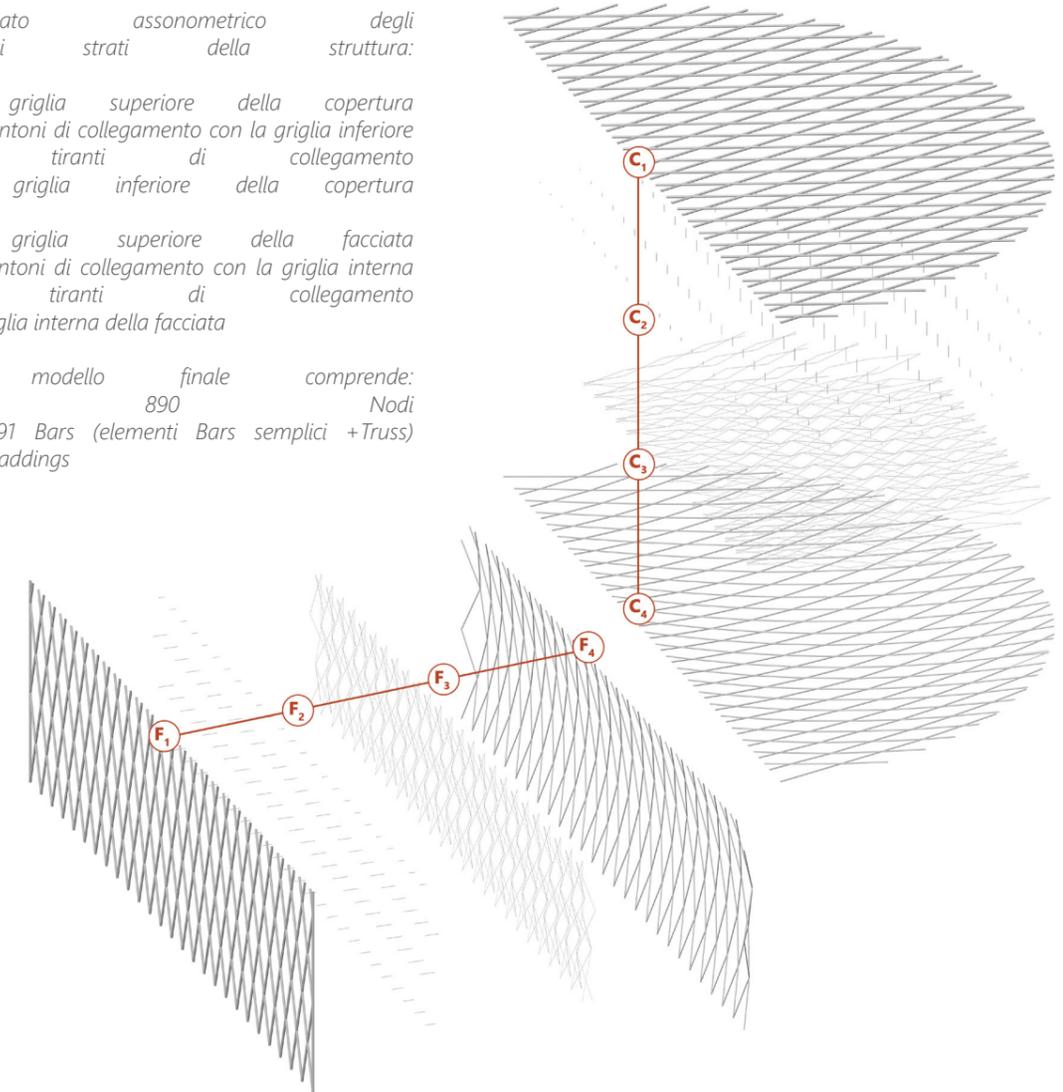
Infine, il collegamento tra facciata e copertura è stato modificato, adottando cerniere invece di incastri, per ridurre il momento troppo importante alla giunzione, maggiore nelle prime analisi a quello al centro della copertura. Questa modifica è stata integrata nel modello.

Spaccato diversi assonometrico degli strati della struttura:

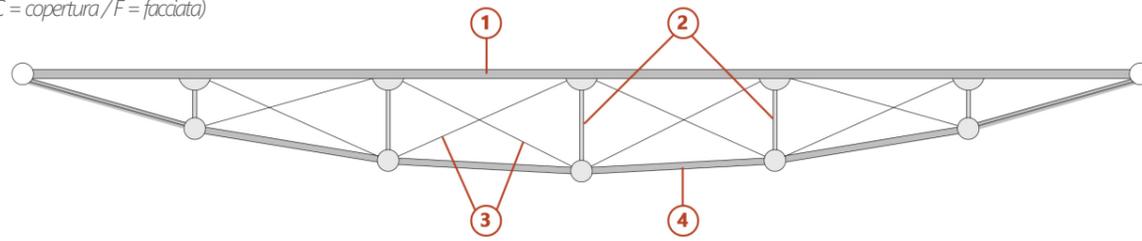
- C_1 griglia superiore della copertura
- C_2 puntoni di collegamento con la griglia inferiore
- C_3 tiranti di collegamento
- C_4 griglia inferiore della copertura
- F_1 griglia superiore della facciata
- F_2 puntoni di collegamento con la griglia interna
- F_3 tiranti di collegamento
- F_4 griglia interna della facciata

Il modello finale comprende:

- 890 Nodi
- 2391 Bars (elementi Bars semplici + Truss)
- 4 Claddings



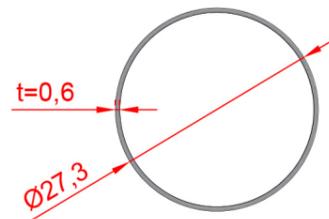
Schema semplificato della struttura
(C = copertura / F = facciata)



C1/F1: Elementi della griglia esterna

La griglia esterna è composta di elementi tubolari incastrati tra di loro, con le caratteristiche seguenti:

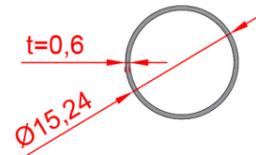
Materiale	Acciaio S275
f_y	275000 kN/m ²
$f_{t,c}$	410000 kN/m ²
Geometria	Tubolare
d_{est}	27,3 cm
t	0,6 cm
A	50,3 cm ²
W_{pl}	427,8 cm ³
I	4484,8 cm ⁴



C4: Elementi della griglia inferiore in copertura

La griglia inferiore è composta da elementi *Truss*, collegati da cerniere, che lavorano solo a trazione/compressione, con le seguenti caratteristiche:

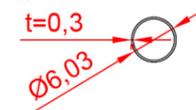
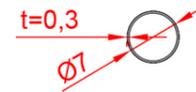
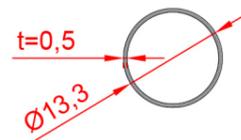
Materiale	Acciaio S235
f_y	235000 kN/m ²
$f_{t,c}$	360000 kN/m ²
Geometria	Tubolare
d_{est}	15,24 cm
t	0,6 cm
A	27,6 cm ²
W_{pl}	427,8 cm ³
I	741 cm ⁴



F4: Elementi della griglia inferiore in facciata

Questa griglia inferiore in facciata è simile a quella di copertura, ma lavora in modo leggermente diverso da quello della copertura, perché riprende anche per parte gli sforzi verticali, e quindi lavorano maggiormente a compressione.

Materiale	Acciaio S235
f_y	235000 kN/m ²
$f_{t,c}$	360000 kN/m ²
Geometria	Tubolare
d_{est}	13,3 cm
t	0,5 cm
A	20,1 cm ²
W_{pl}	82 cm ³
I	412 cm ⁴



C2: Puntoni in copertura

I puntoni in copertura hanno la finalità di collegare le due griglie superiori e inferiori, e definiscono la distanza tra le due. Sono collegati alle due griglie grazie a delle cerniere, e lavorano solo a compressione/trazione.

Materiale	Acciaio S235
f_y	235000 kN/m ²
$f_{t,c}$	360000 kN/m ²
Geometria	Tubolare
d_{est}	7 cm
t	0,3 cm
A	6,1 cm ²
W_{pl}	13,1 cm ³
I	34,5 cm ⁴

F2: Puntoni in facciata

I puntoni in facciata lavorano nel stesso modo di quelli in copertura, e hanno le seguenti proprietà:

Materiale	Acciaio S235
f_y	235000 kN/m ²
$f_{t,c}$	360000 kN/m ²
Geometria	Tubolare
d_{est}	6,03 cm
t	0,3 cm
A	5,2 cm ²
W_{pl}	9,56 cm ³
I	21,6 cm ⁴

C3: Tiranti in copertura

I tiranti in copertura sono disposti a Croce di Sant'Andrea, per irrigidire l'insieme costituito dalle due griglie e puntoni, e hanno le seguenti proprietà:

Materiale	Acciaio S235
f_y	235000 kN/m ²
$f_{t,c}$	360000 kN/m ²
Geometria	Circolare pieno
d	2,8 cm
A	6,15 cm ²

F3: Tiranti in facciata

I tiranti in facciata sono disposti nel stesso modo a Croci di Sant'Andrea, per irrigidire l'insieme costituito dalle due griglie e puntoni, e hanno le seguenti proprietà:

Materiale	Acciaio S235
f_y	235000 kN/m ²
$f_{t,c}$	360000 kN/m ²
Geometria	Circolare pieno
d	1,9 cm
A	2,83 cm ²

2.4.2. Verifica della struttura ai stati limiti

STATI LIMITE DI ESERCIZIO (SLE)

I requisiti sono dettagliati nel Codice Tecnico de la Edificacion (CTE), nella parte Documento Basico DB SE Seguridad Estructural. Si verificano quindi i valori massimi di spostamenti e deformazioni sotto le diverse combinazioni di azioni: caratteristiche, frequenti, e quasi permanenti.

Le combinazioni sono state impostate nel software Robot Structural Analysis, in accordo con i valori dei coefficienti di simultaneità per i diversi carichi:

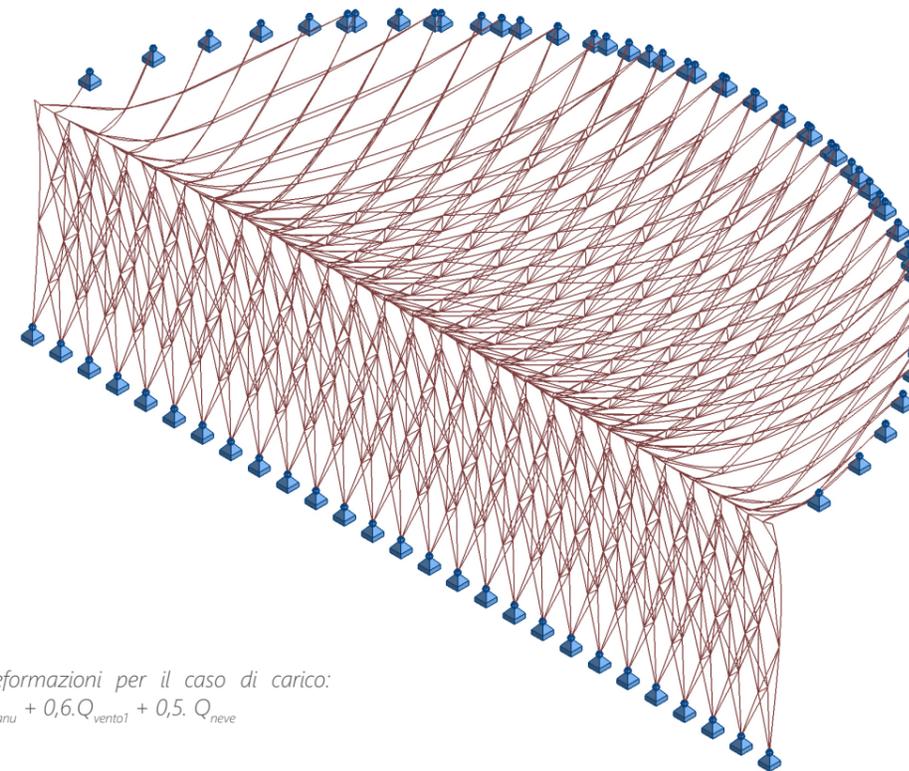
Tipo di combinazine	Combinazione
Caratteristica	G1 + G2
"	G1 + G2 + Q _{vento2}
"	G1 + G2 + Q _{vento2} + 0,5.Q _{neve}
"	G1 + G2 + Q _{vento1}
"	G1 + G2 + Q _{vento1} + 0,5.Q _{neve}
"	G1 + G2 + Q _{neve}
"	G1 + G2 + Q _{neve} + 0,6.Q _{vento1}
"	G1 + G2 + Q _{neve} + 0,6.Q _{vento2}
"	G1 + G2 + Q _{manu}
"	G1 + G2 + Q _{manu} + 0,6.Q _{vento1}
"	G1 + G2 + Q _{manu} + 0,6.Q _{vento1} + 0,5. Q _{neve}
"	G1 + G2 + Q _{manu} + 0,6.Q _{vento2}
"	G1 + G2 + Q _{manu}
"	G1 + G2 + Q _{manu} + 0,6.Q _{vento2} + 0,5. Q _{neve}
"	G1 + G2
"	G1 + G2 + Q _{manu} + 0,6.Q _{vento2} + 0,5. Q _{neve}
Frequente	G1 + G2
"	G1 + G2 + 0,2 Q _{vento1}
"	G1 + G2 + 0,2 Q _{vento2}
"	G1 + G2 + 0,2 Q _{neve}
Quasi permanente	G1 + G2

Sotto tali combinazioni di azioni, la struttura deve rispondere ai requisiti seguenti che riguardano le deformazioni, e in particolare la freccia massima accettabile.

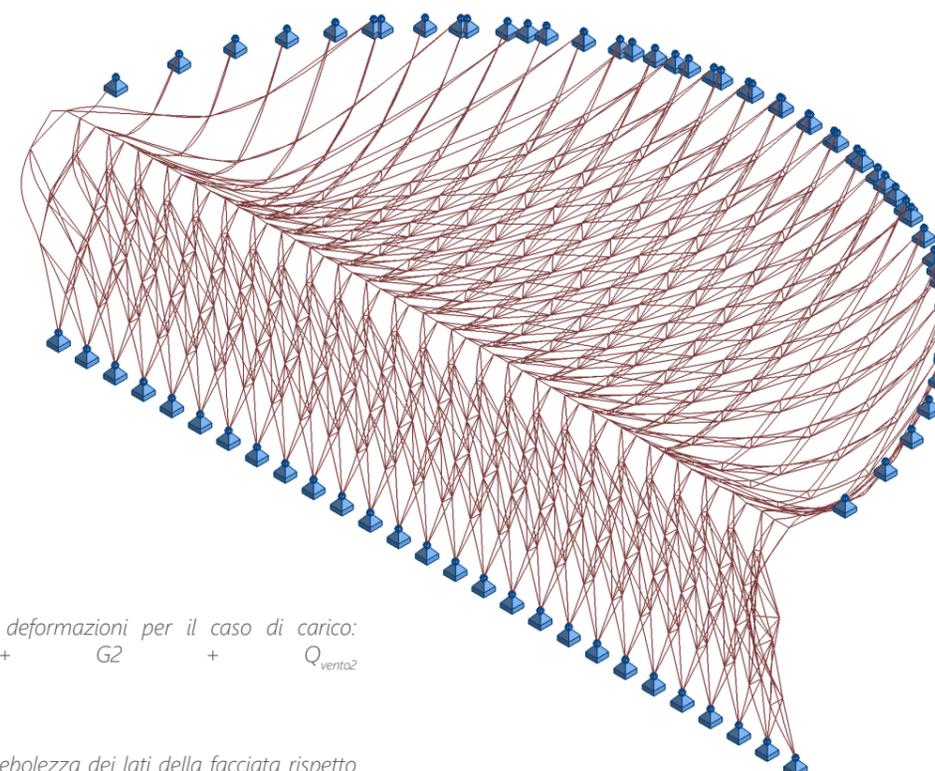
Parte Considerata	Freccia rispetto alla Luce	Luce massima (m)	Freccia massima ammissibile (cm)
Copertura <i>(che non è accessibile e non si appoggia su partizioni)</i>	L/150	49	32,6
Facciata	L/250	26,3	10,5

Dopo il calcolo della struttura ad elementi finiti su Robot Structural Analysis, si sono ottenuti i risultati seguenti:

Parte Considerata	Freccia massima (cm)	Combinazione associata	Verifica
Copertura	21,6	G1 + G2 + Q _{manu} + 0,6.Q _{vento1} + 0,5. Q _{neve}	21,7 cm < fmax OK
Facciata	3,9	G1 + G2 + Q _{vento2}	4,3 cm < fmax OK



Vista delle deformazioni per il caso di carico:
 $G1 + G2 + Q_{manu} + 0,6.Q_{vento1} + 0,5. Q_{neve}$
 (fuori scala)



Vista delle deformazioni per il caso di carico:
 $G1 + G2 + Q_{vento2}$
 (fuori scala)
 Si nota la debolezza dei lati della facciata rispetto alla griglia che costituisce la sua parte centrale.

STATI LIMITE ULTIMI (SLU)

Si verifica la resistenza dei elementi strutturali, secondo i principi dettagliati nel Codice Tecnico della Edificazione (CTE). La struttura deve essere in grado di resistere alle combinazioni:

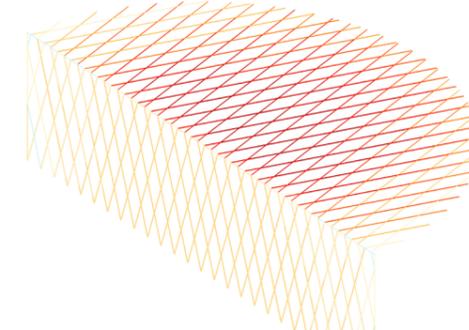
$$\sum_{j \geq 1} \gamma_{G,j} G_{k,j} + \gamma_P P + \gamma_{Q,1} Q_{k,1} + \sum_{i > 1} \gamma_{Q,i} \psi_{0,i} Q_{k,i}$$

Nel programma sono quindi state inserite le combinazioni relative ai nostri carichi.

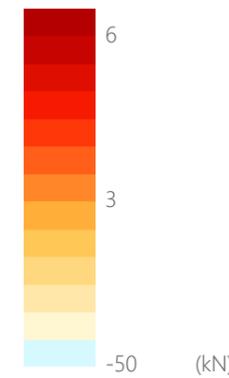
- 1,35.(G1+G2)
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{vento1}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{vento2}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{vento2} + 0,75.Q_{neve}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{neve}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{neve} + 0,9.Q_{vento1}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{neve} + 0,9.Q_{vento2}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento2}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento2} + 0,75.Q_{neve}
- 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,75.Q_{neve}
- (G1+G2)
- (G1+G2) + 1,5.Q_{vento1}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{vento2}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{vento2} + 0,75.Q_{neve}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{neve}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{neve} + 0,9.Q_{vento1}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{neve} + 0,9.Q_{vento2}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{manu}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento2}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento2} + 0,75.Q_{neve}
- (G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,75.Q_{neve}

Le condizioni riguardano la resistenza dei diversi elementi impiegati nella struttura, secondo diversi parametri: resistenza a trazione, a compressione, al taglio, e al momento flettente. In fine, si deve verificare, per gli elementi in compressione, il rischio riguardante l'instabilità laterale. Il materiale scelto per l'insieme di questa struttura è l'acciaio, con i parametri caratteristici seguenti:

Materiale: Acciaio	
Modulo di Young	E = 210 MPa
Coefficiente di Poisson	v = 0.3
Modulo di taglio	G = 8,1.10 ⁷ kN/m ²
Massa volumica	ρ = 7850 kg/m



Forze negli elementi della griglia assiali per la combinazione: 1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}



C1/F1: Elementi della griglia esterna

Classe della sezione

Innanzitutto si deve verificare la classe della sezione considerata. Il fattore di riduzione è dato da:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 0,92$$

Nel caso speciale di una sezione tubolare, si deve comparare questo valore con il valore d/t :

$$\frac{d}{t} = 45,5 < 59,8 = 70\varepsilon^2 \rightarrow \text{CLASSE 2}$$

Resistenza a Trazione / Compressione

Dal CTE (Código Técnico de la Edificación), si ottiene il criterio di forza assiale massima a compressione e trazione, per una sezione di classe 1:

$$N_{t,Rd} = N_{c,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 1318 kN$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -116 kN \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 9\%$$

$$N_{c,max} = 650 kN \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{c,Rd}} = 49\%$$

Resistenza al Taglio

In assenza di torsione, la resistenza al taglio è data da:

$$V_{pl,Rd} = A_V \frac{f_y}{\sqrt{3} \cdot \gamma_{M0}} = 485 kN$$

Dove: $A_V = 2 \cdot A / \pi$ per una sezione tubolare.

Il programma da valori massimi e minimi di sforzi F_y e F_z , perpendicolari all'asse del profilo tubolare (asse X), dati per l'insieme dei elementi tubolari:

- $F_{y,max} = 15,2 kN$
- $F_{y,min} = -15,1 kN$
- $F_{z,max} = 37,7 kN$
- $F_{z,min} = -26,1 kN$

$$\text{Quindi: } V_{max} \leq \sqrt{F_{y,max}^2 + F_{z,max}^2} = 40,6 kN \rightarrow \frac{V_{max}}{V_{pl,Rd}} = 8\%$$

Resistenza a flessione

Per una sezione di classe 2, la resistenza a flessione è data da:

$$M_{pl,Rd} = W_{pl} \cdot \frac{f_{yd}}{\gamma_{M0}} = 112 \text{ kN.m}$$

Il momento flettente massimo ottenuto dopo calcolo è:

$$M_{max} = 102 \text{ kN.m} \rightarrow \frac{M_{max}}{M_{pl,Rd}} = 91\%$$

Instabilità

La forza di resistenza al carico di punta è data da:

$$N_{b,Rd} = \chi \cdot A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M1}}$$

Dove:

- $\gamma_{M1} = 1$ è il fattore parziale da considerare per i problemi d'instabilità
- χ è il coefficiente di riduzione riguardante l'instabilità

Il calcolo di χ richiede prima il calcolo della lunghezza ridotta λ , che per un elemento a sezione e asse costanti, è definita come:

$$\lambda = \sqrt{\frac{A \cdot f_y}{N_{cr}}}$$

Con $N_{cr} = \left(\frac{\pi}{L_k}\right)^2 \cdot E \cdot I$, dove:

- $L_{k1} = 0,5 \cdot L$ per un elemento tra due incastri, quindi tutte le barre contenute all'interno della griglia
- $L_{k2} = 0,7 \cdot L$ per un elemento tra incastro e cerniera, come sono considerati gli elementi all'attacco della facciata a terra, per gli elementi legati all'angolo tra facciata e copertura, e in fine per i elementi sul bordo esterno della copertura

$$N_{cr1} = 9830 \text{ kN} \rightarrow \lambda_1 = 0,36$$

$$N_{cr2} = 5016 \text{ kN} \rightarrow \lambda_2 = 0,50$$

Tali valori di λ sono collegati ai valori di χ grazie alle curve rappresentate nel grafico a lato. Per gli elementi tubolari finiti a freddo, deve essere considerata la curva c.

$$\lambda_1 = 0,36 \rightarrow \chi_1 = 0,94 \rightarrow N_{b,Rd1} = 1182 \text{ kN}$$

$$\lambda_2 = 0,50 \rightarrow \chi_2 = 0,84 \rightarrow N_{b,Rd2} = 1056 \text{ kN}$$

Si verifica quindi che:

$$\frac{N_{c,max}}{N_{b,Rd2}} = 61\%$$

Curve di instabilità per diverse tipologie di profili

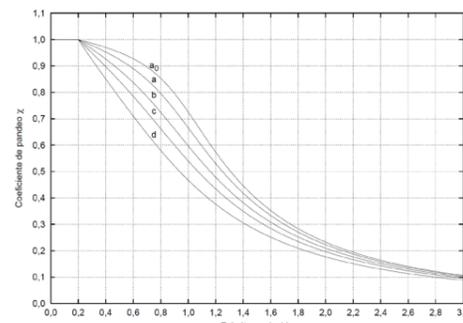
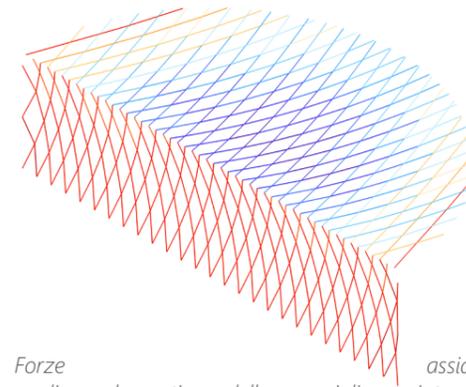
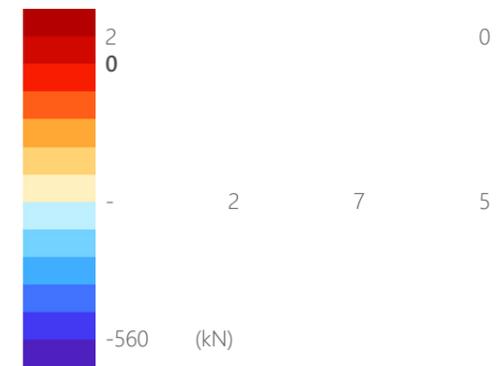


Figura 6.3 Curvas de pandeo



Forze negli elementi della griglia interna per la combinazione: $1,35 \cdot (G1+G2) + 1,5 \cdot Q_{manu} + 0,9 \cdot Q_{vento1} + 0,75 \cdot Q_{neve}$



C4: Elementi della griglia inferiore in copertura

Questi elementi sono collegati con delle cerniere, e lavorano esclusivamente a compressione/trazione, quindi si concentra la verifica su questi aspetti, con l'aggiunta del rischio di instabilità, legato alla compressione.

Classe della sezione

Come per gli elementi della griglia esterna, si deve verificare la classe della sezione considerata. Il fattore di riduzione è dato da:

$$\epsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

Nel caso speciale di una sezione tubolare, si deve comparare questo valore con il valore d/t :

$$\frac{d}{t} = 25,4 < 50 \epsilon^2 \rightarrow \text{CLASSE 1}$$

Resistenza a compressione/trazione

Come nel caso precedente, per una sezione in classe 1, si considera:

$$N_{t,Rd} = N_{c,Rd} = A \cdot \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 618 \text{ kN}$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -567 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 92\%$$

$$N_{c,max} = 24,7 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{c,Rd}} = 4\%$$

Instabilità

Il procedimento è simile a quello illustrato precedentemente per gli elementi della griglia esterna. La differenza emerge dal valore di L_k che corrisponde qui a: $L_k = 1 \cdot L$ per elementi tra due cerniere. I valori corrispondenti sono quindi:

$$L_{k,max} = 6,16 \text{ m} \rightarrow N_{cr} = 405 \text{ kN} \rightarrow \lambda = 1,2$$

E poi dalle curve già rappresentate della pagina precedente:

$$\chi = 0,44 \rightarrow N_{b,Rd} = 265 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{b,Rd}} = 9\%$$

F4: Elementi della griglia interna in facciata

Le verifiche sono le stesse di quelle realizzate per la griglia inferiore in copertura.

Classe della sezione

Il fattore di riduzione è dato da:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

Nel caso specifico di una sezione tubolare, si deve comparare questo valore con il valore d/t :

$$\frac{d}{t} = 26,6 < 50\varepsilon^2 \rightarrow \text{CLASSE 1}$$

Resistenza a compressione/trazione

La resistenza a trazione e compressione è data da:

$$N_{t,Rd} = N_{c,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 450 \text{ kN}$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -147 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 32\%$$

$$N_{c,max} = 123 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{c,Rd}} = 27\%$$

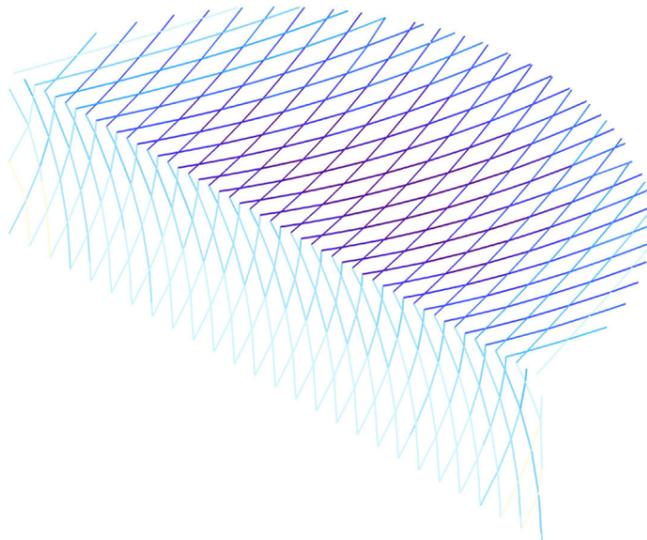
Instabilità

Come per gli elementi della griglia inferiore in copertura qui si ha: $L_k = 1.L$ per elementi tra due cerniere. I valori corrispondenti sono quindi:

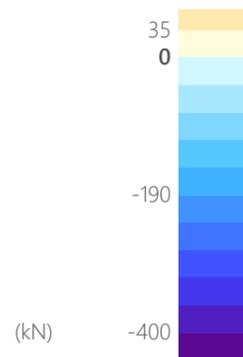
$$L_{k,max} = 6,24 \text{ m} \rightarrow N_{cr} = 219 \text{ kN} \rightarrow \lambda = 1,4$$

E poi dalle curve già utilizzate nei casi precedenti:

$$\chi = 0,35 \rightarrow N_{b,Rd} = 150 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{b,Rd}} = 81\%$$



Forze assiali per gli elementi della griglia interna per la combinazione: $1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}$ (caso di tensione maggiore per i elementi in facciata)



C2: Puntoni in copertura

Si tratta di elementi che lavorano solo a compressione/trazione.

Classe della sezione

Il fattore di riduzione è dato da:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

Un'altra volta, nel caso specifico di una sezione tubolare, si deve comparare questo valore con il valore d/t :

$$\frac{d}{t} = 24,1 < 50\varepsilon^2 \rightarrow \text{CLASSE 1}$$

Resistenza a compressione/trazione

Si ha che:

$$N_{t,Rd} = N_{c,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 137 \text{ kN}$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -5,74 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 4\%$$

$$N_{c,max} = 90,3 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{c,Rd}} = 66\%$$

Instabilità

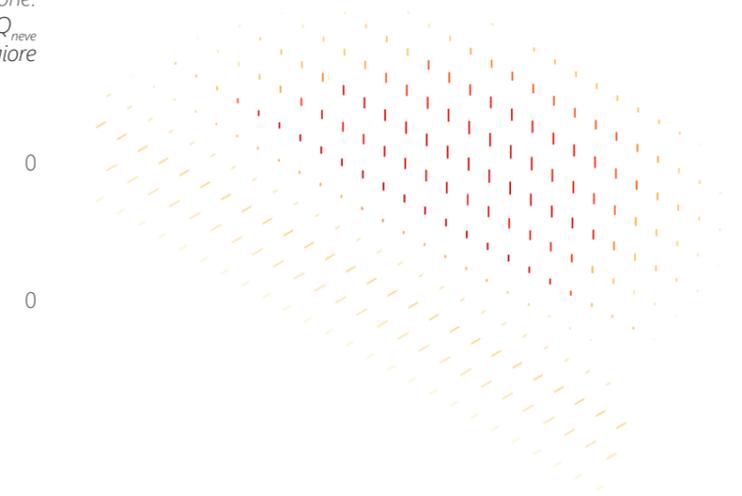
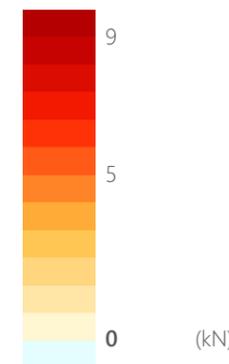
Seguendo lo stesso ragionamento da prima:

$$L_{k,max} = 2,1 \text{ m} \rightarrow N_{cr} = 324 \text{ kN} \rightarrow \lambda = 0,63$$

Che da come risultato:

$$\chi = 0,77 \rightarrow N_{b,Rd} = 100 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{b,Rd}} = 90\%$$

Forze assiali nei puntoni per la combinazione: $1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}$ (caso di compressione maggiore per i puntoni in copertura)



F2: Puntoni in facciata

Si tratta di elementi che lavorano solo a compressione e trazione..

Classe della sezione

Il fattore di riduzione è dato da:

$$\varepsilon = \sqrt{\frac{235}{f_y}} = 1$$

UNel caso specifico di una sezione tubolare, si deve comparare questo valore con il valore d / t :

$$\frac{d}{t} = 20,8 < 50\varepsilon^2 \rightarrow \text{CLASSE1}$$

Resistenza a compressione/trazione

Come nel caso precedente, si ha che:

$$N_{t,Rd} = N_{c,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 117 \text{ kN}$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -17 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 15\%$$

$$N_{c,max} = 40,8 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{c,Rd}} = 35\%$$

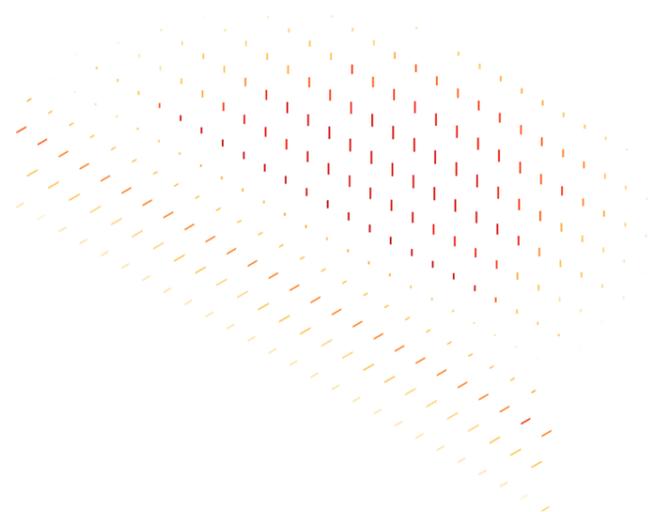
Instabilità a carico di punta

Seguendo sempre lo stesso procedimento da prima:

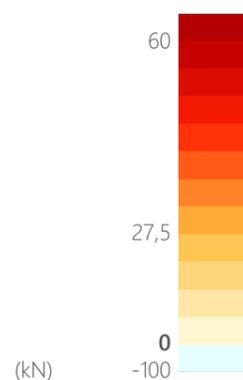
$$L_{k,max} = 1,9 \text{ m} \rightarrow N_{cr} = 324 \text{ kN} \rightarrow \lambda = 0,95$$

E leggendo sulle curve già illustrate precedentemente:

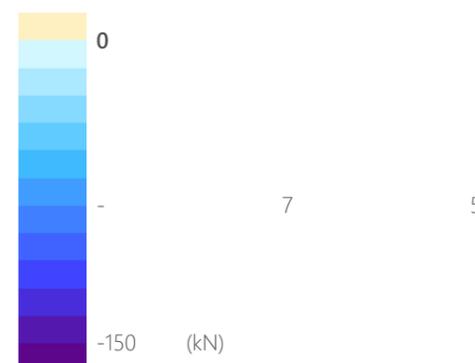
$$\chi = 0,55 \rightarrow N_{b,Rd} = 61,4 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{c,max}}{N_{b,Rd}} = 66\%$$



Forze assiali nei puntoni per la combinazione: $1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}$ (caso di compressione maggiore per i puntoni in facciata)



Forze assiali nei tiranti per la combinazione: $1,35.(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,9.Q_{vento1} + 0,75.Q_{neve}$ (caso di tensione maggiore per i tiranti in copertura)



C3: Tiranti in copertura

Si tratta di tiranti, degli elementi che lavorano solo a trazione.

Resistenza a trazione

Si considera:

$$N_{t,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = -138 \text{ kN}$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -132 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 95\%$$

B3: Tiranti in facciata

In facciata, la verifica prosegue nel stesso modo, con la sola verifica a trazione:

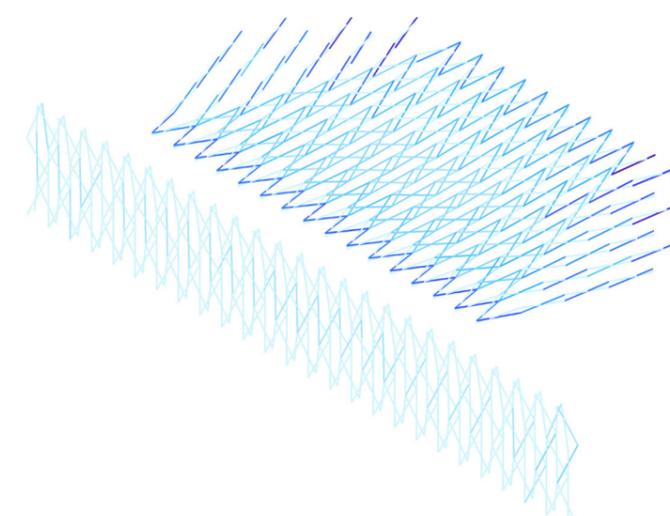
Resistenza a trazione

Si considera:

$$N_{t,Rd} = A \frac{f_y}{\gamma_{M0}} = 63 \text{ kN}$$

Dai calcoli effettuati dal software si ottiene:

$$N_{t,max} = -58 \text{ kN} \rightarrow \frac{N_{t,max}}{N_{t,Rd}} = 91\%$$



RESISTENZA GLOBALE DELLA STRUTTURA
CONSIDERANDO L'INSTABILITÀ

Inoltre l'instabilità locale già calcolata in precedenza per gli elementi separati, si deve valutare la resistenza della struttura in relazione a problemi d'instabilità globale. La verifica richiede il calcolo dei diversi modi d'instabilità, per ogni combinazione agli Stati Limite Ultimi.

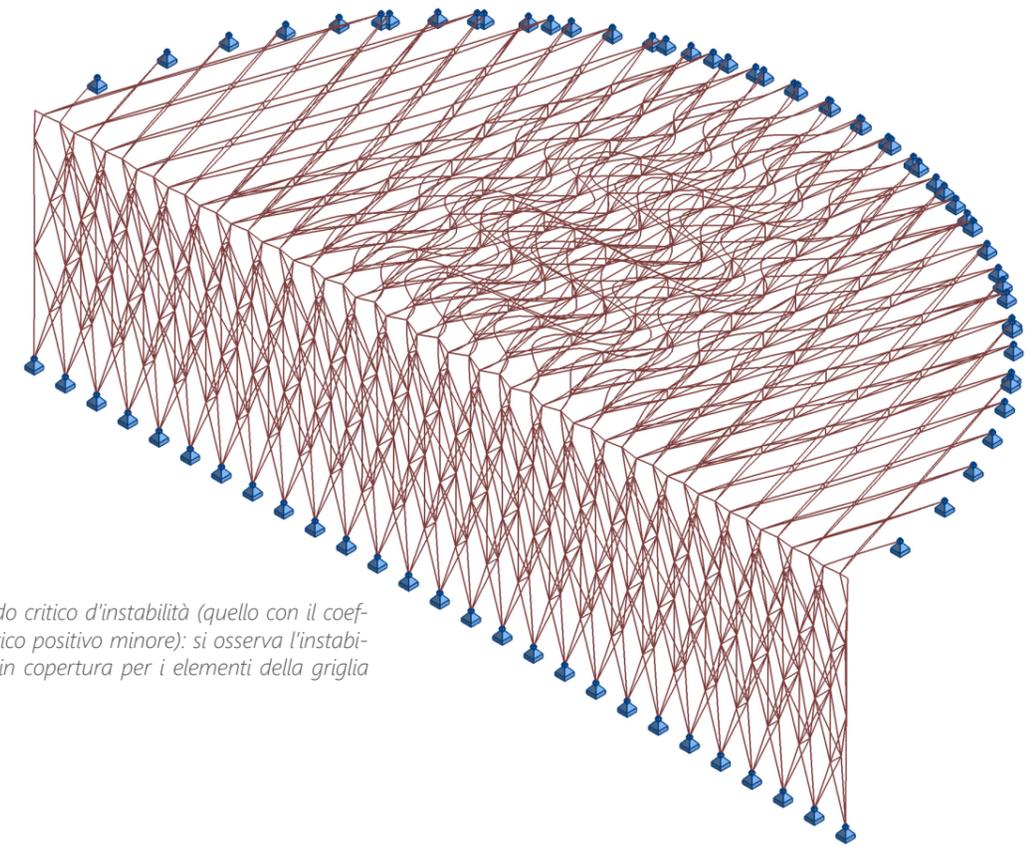
Vista la geometria dell'edificio, ci si aspetta un rischio di instabilità della facciata con i carichi verticali, com'è stato dimostrato durante l'analisi preliminare. Considerato quello, è stato effettuato il calcolo per la combinazione di azioni più sfavorevole rispetto a questo comportamento:

$$(G1+G2) + 1,5.Q_{manu} + 0,75.Q_{neve}$$

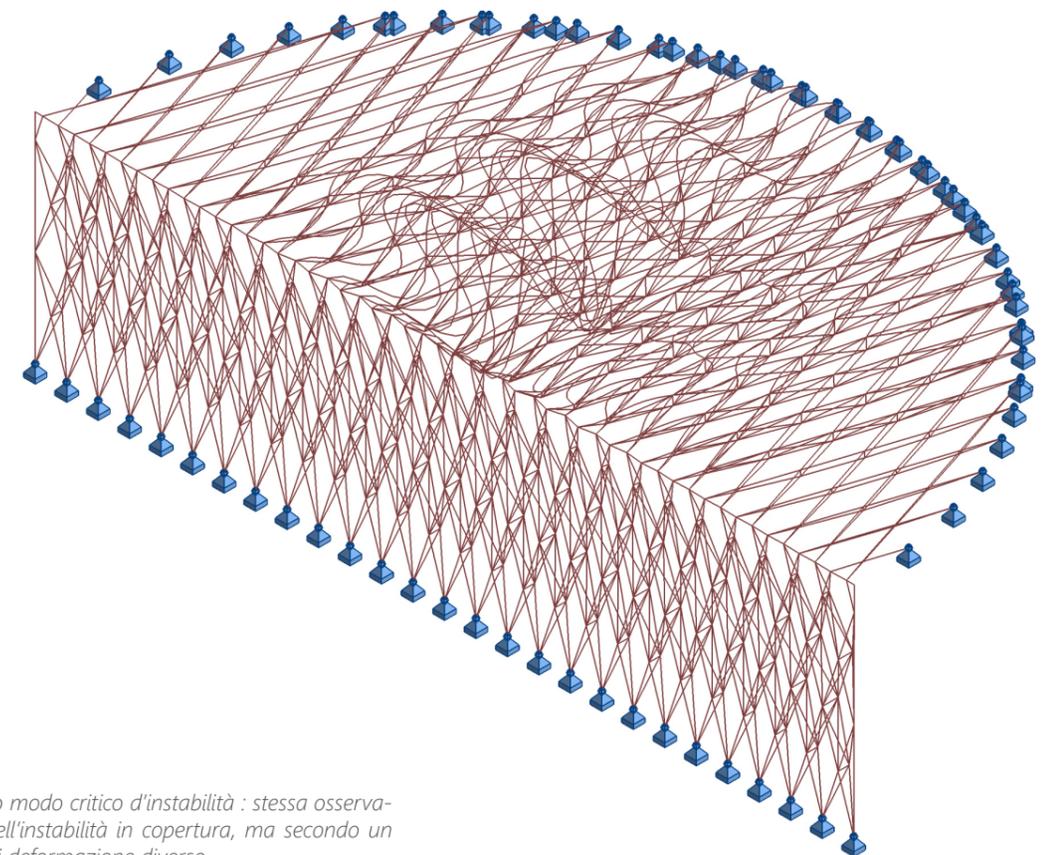
Infatti, è questa combinazione che causa i carichi verticali maggiori sulla facciata, insieme al momento massimo in copertura, e quindi i sforzi di compressioni maggiori.

Dai risultati del calcolo dal software Robot Structural Analysis, si è verificato che con il rinforzo della facciata e della copertura, il primo modo che si osserva non è più un modo d'instabilità globale in facciata, ma invece un modo d'instabilità locale dei elementi in copertura.

Questo primo modo d'instabilità presenta un coefficiente critico $c_f = 5,6$, con una precisione $\alpha_f = 1,4$. Significa che l'instabilità si incontra quando i carichi sono moltiplicati da almeno un fattore $c_f - \alpha_f = 4,2$. La struttura risulta quindi resistente di fronte al rischio di instabilità globale.



Primo modo critico d'instabilità (quello con il coefficiente critico positivo minore): si osserva l'instabilità locale in copertura per i elementi della griglia esterna.



Secondo modo critico d'instabilità: stessa osservazione dell'instabilità in copertura, ma secondo un modo di deformazione diverso