

## Metodi per la concezione strutturale

### Concezione spaziale dell'organismo strutturale:

#### STRUTTURE CONTROVENTANTI

Concezione strutturale degli elementi che chiamiamo controventi

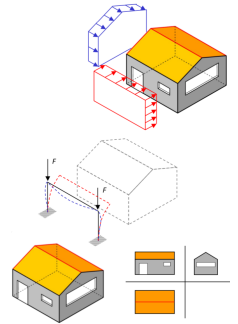
Gli elementi controventanti assolvono funzione importantissima tanto dal punto di vista meccanico (riportare a terra carichi orizzontali) tanto da un punto di vista architettonico (caratterizza aspetti figurativi dell'architettura)

Come concepire un dispositivo di controvento

Perché i controventi?

Le strutture di controvento sono elemento essenziale nella concezione strutturale al fine di:

1. assicurare prestazioni strutturali idonee a fronte di azioni orizzontali (vento, sisma, collisioni);
2. assicurare la stabilità di elementi strutturali compressi a fronte di azioni verticali e orizzontali;
3. concepire l'organismo strutturale (e architettonico) nello spazio, benché modellato, analizzato (rappresentato) in più sottostrutture piane con schemi statici (proiezioni ortogonali).



Le prime attengono alla nostra disciplina (comportamento meccanico)

La terza coinvolge tutto il progetto di architettura

Le strutture di controvento da un punto di vista meccanica devono assicurare adeguate prestazioni meccaniche (equilibrio) a fronte di azioni orizzontali (vento, sisma, collisioni)

Sempre dal punto di vista meccanico, non assicurano prestazioni solamente a fronte di azioni orizzontali.

In caso limiti sono importantissimi nel garantire prestazione meccanica anche ai carichi verticali.

La prestazione meccanica che ci preoccupiamo di garantire non è più l'equilibrio ma la stabilità della struttura. I controventi sono soluzione ottimale per presidiare l'instabilità dell'organismo architettonico.

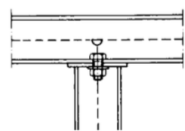
La resa figurativa e funzionale di un architettura dipende dal volume architettonico.

#### Funzione dei controventi

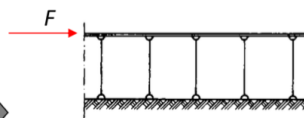
##### 1) risposta all'azione orizzontale

- Ricondurre i carichi orizzontali in fondazione (equilibrio)

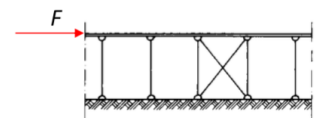
Unione bullonata  $\approx$  cerniera



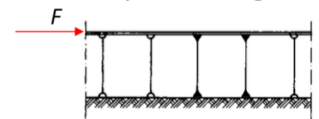
Schema pendolare labile



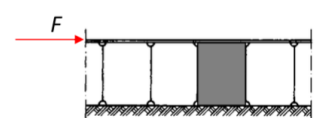
Schemi non labili



campo con diagonali



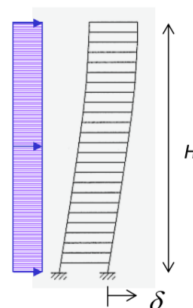
telaio



setto

- Limitare gli spostamenti nel piano orizzontale (rigidezza)

$$\frac{\delta}{H} \leq \frac{1}{500}$$



Es. Edificio monopiano multicampata in acciaio

Composta da n ritto e un trasverso.

Unione tra ritto e trasverso che attraversa in continuità la testata del ritto, con un bullone, la cui asse della vita coincide con l'asse del pilastro.

Unione bullonata che in buona approssimazione esprime vincolo reale interno che può essere modellato come vincolo ideale di semi cerniera interna. Nella misura in cui la cerniera interna elimina traslazione orizzontale e verticale, lasciando libera la rotazione della trave rispetto al pilastro.

Se replichiamo la semicerniera interna a tutti i pilastri e a tutti i piedi otteniamo schema pendolare (tutti i pilastri possono avere cinematico analogo a pendolo inverso, struttura labile: non garantisce l'equilibrio)

Alcune soluzioni progettuali per garantire l'equilibrio: campo con diagonali (croce di Sant'Andrea), telaio e setto in muratura/calcestruzzo armato, quindi un corpo rigido.

Progettare soluzioni che rendano almeno isostatica la struttura a fronte di carichi orizzontali.

L'equilibrio però è solo una delle prestazioni meccaniche che ci attendiamo sotto carico orizzontale. (Della rigidità ce ne occuperemo prossimamente: l'equilibrio non deve indurre spostamenti eccessivi, quindi incompatibili con l'esercizio della nostra architettura).

#### TIPI DI CONTROVENTI

##### a) Strutture di controvento puntiformi

(generalmente utilizzate in edifici monopiano, es. pilastri incastrati al piede).



##### b) Strutture di controvento piane (generalmente utilizzate in edifici multipiano):

- telai
- setti murari o in c.a.
- portali pendolari con diagonali.



##### c) Strutture di controvento spaziali

(generalmente utilizzate in edifici alti, es. nuclei di controvento).



#### A) Edificio industriali con serie di pilastri incastrati al piede

In caso di carichi orizzontali non particolarmente gravosi (numero di piani limitati)

Possiamo fare affidamento sugli stessi pilastri considerati come elementi strutturali isolati dalle travi

Se vogliamo che il pilastro sia un dispositivo efficace di controventi dovremmo preoccuparci di eliminarne tutti i gradi di libertà al piede (fonderlo con vincolo reale traducibile con un incastro)

Se vincolo con un incastro il piede del pilastro, la testa del pilastro non avrà anch'essa gradi di libertà.

#### B) Strutture di controvento piane (generalmente utilizzate negli edifici multipiano)

- Telai
- Setti murari o in c.a.
- Portali pendolari con diagonali

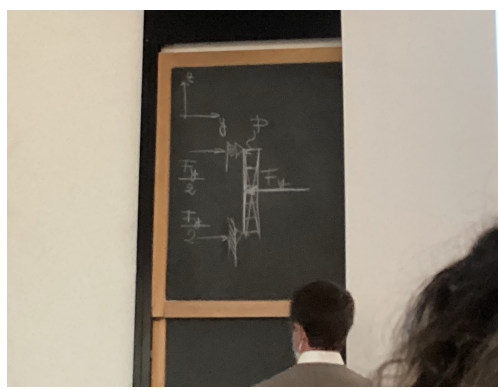
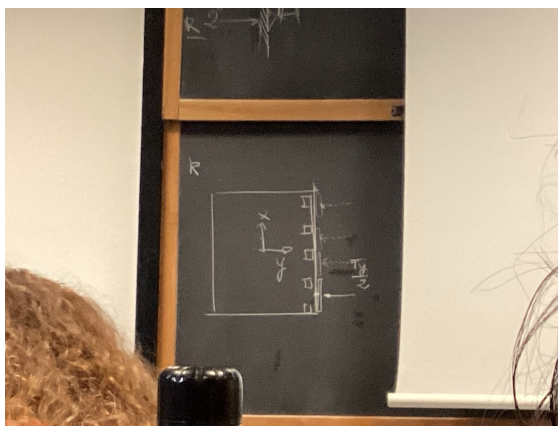
#### C) strutture di controvento spaziali

Occupano una parte del volume architettonico, sono essi stessi dei volumi

Abitualmente diventano necessari quando l'entità/modulo del carico da vento è molto importante (generalmente utilizzate in edifici alti es. nuclei di controvento)

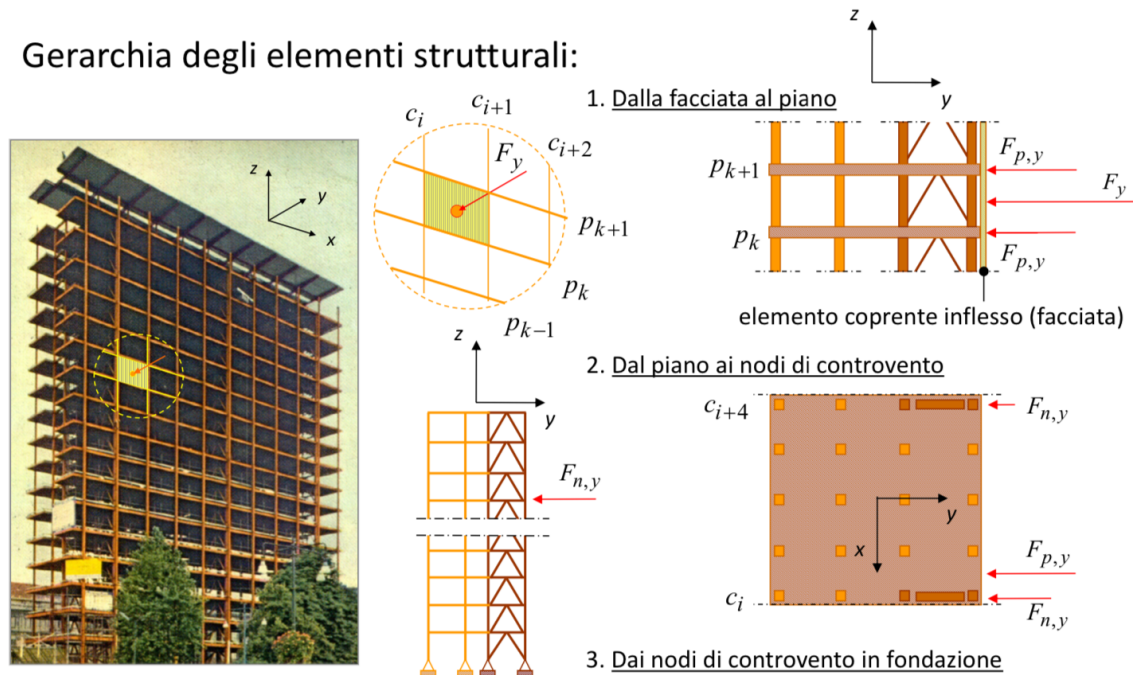
In figura vano dei servizi. Il controvento occupa funzioni distributive, e nel suo complesso è una sorta di tubo. Gli oggetti sono le strutture di piano (solai) prefabbricati a terra e issati attraverso cavi di una gru singolarmente a realizzare la rimanente impronta in pianta dell'edificio che una volta completato avrà un valore maggiore del nucleo di controvento.

Al crescere dell'azione possiamo usare "armi strutturali differenti"



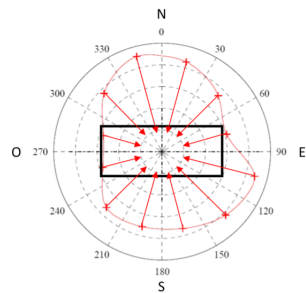
**Modellazione dei controventi**

- Gerarchia strutturale a fronte di carichi orizzontali
- L'azione orizzontale
- Traduzione dei controventi in termini di vincoli ideali

**GERARCHIA DEGLI ELEMENTI STRUTTURALI****Gerarchia degli elementi strutturali:**

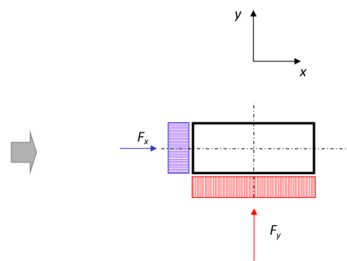
Edificio RAI Porta Susa

Architettura che vive nello spazio, denominato con assi cartesiani XYZ

**Modellazione dell'azione orizzontale:**

Nella realtà:

vento e carichi da ogni settore della rosa dei venti



Nel modello semplificato:

vento e carichi lungo gli assi principali della costruzione in pianta

Consideriamo un pannello generico (perché i pannelli esterni, solo i primi contro cui si dirige il carico orizzontale)

Parete sopravento.

In cosa si traduce il carico da vento? P: pressione (carico distribuito diretto perpendicolarmente alla superficie) dobbiamo figurarci che sul pannello giallo agisca carico uniformemente distribuito, la cui direzione è perpendicolare al pannello, e che sia entrante nella superficie.

$F_y$ : forza risultante del carico distribuito P

Il pannello da cosa è vincolato? È a discrezione del progettista (vincolabile al solaio o ai pilastri)

In questo caso il pannello è vincolato alle travi dei solai, che sono arretrati, rispetto ai pilastri che avanzano.

Il pannello si trova nel piano Zx

Per descrivere come il pannello è vincolato alle travi di bordo, ci posizioniamo nel piano ZY (contiene la direzione della forza (Y) e la direzione del pannello verticale di facciata (Z))

**2. Dal piano ai nodi di controvento**

Solaio su piano XY

Quali forze trasferisce il pannello alla trave di bordo (del solaio)?

$F_y/2$  reazione vincolare cambiata di segno

Chi evita che la struttura di piano trasli ad adempimento nella direzione Y?

Quali sono le strutture che vincolano il solaio?

Come possiamo modellare la struttura di piano?

Avevamo carico verticale nel piano in direzione Y, applicato a struttura di facciata nel piano ZX che modellavamo nel piano ZY e che a sua volta era portata da una struttura di piano nel piano XY (che non sappiamo ancora modellare) e che trasmetterà il carico alle strutture di controvento verticale che stanno, in questo caso, nel piano ZY.

Come sarà caricata la struttura di controvento verticale?

Forza/reazione vincolare espressa dai due controventi, ancora una volta cambiata di segno e applicata al piano k-esimo che sto considerando

Gerarchia strutturale:

Pannello di facciata, portato da solaio, che trasmette la forza al controvento verticale

In termini quantitativi possiamo realizzare schema statico piano per il pannello di facciata, lo stesso per la struttura verticale di controvento insieme, e di travi in parte a realizzare stilate verticali, in parte a travi reticolari verticali)

Per il momento non riusciamo a realizzare schema statico della struttura di piano.

I carichi

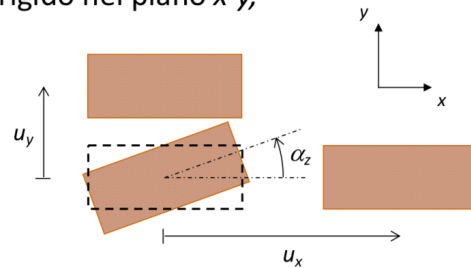
Per la zona di Torino 25m/s (modulo pressione del vento)

La normativa non ci fornisce la direzione (il carico da vento si dice adirezionale, senza direzione e tocca al progettista stabilire la direzione del vento)

Conviene adottare la velocità di riferimento della normativa considerando due direzioni arbitrarie che fanno riferimento alla geometria dell'architettura in pianta. Una direzione sarà quella longitudinale, lungo la quale l'edificio ha la maggiore dimensione, l'altro è ortogonale a questa. Adottiamo velocità di riferimento adirezionale a Torino.

Modellazione dei piani (ipotesi):

- ogni orizzontamento è un corpo rigido nel piano x-y, provvisto di 3 gdl:



- i carichi di piano (ovunque siano applicati) sono trasferiti dal loro punto di applicazione attraverso l'orizzontamento rigido al nodo tra questo e le strutture di controvento (ovunque siano collocate)
- ogni orizzontamento è isostaticamente vincolato nel proprio piano x-y da 3 gradi di vincolo di controvento (a meno di mal disposizione dei controventi).

Dobbiamo modellare la struttura di piano.

I pannelli di facciata trasmettono alla struttura di piano in vari punti forze agenti.

Ad equilibrare queste forze saranno forze reagenti in punti specifici.

Ipotizziamo che la struttura di piano nel suo complesso sia in prima approssimazione un corpo rigido nel piano orizzontale.

Questo corpo rigido (struttura di piano) immaginiamo che non possa staccarsi dal piano orizzontale che lo contiene. I gradi di libertà che inducano lo "scollamento" siano già eliminati dagli elementi strutturali che riportano a terra i carichi orizzontali.

In assenza di controventi, cosa potrebbe fare il corpo rigido? Traslazione secondo asse X, secondo y, è l'unica rotazione che può fare, ovvero intorno all'asse Z verticale.

Quanti gradi di libertà ha il mio corpo rigido dato che non può vivere nel suo piano orizzontale? 3 ( $U_x$ ,  $u_y$  e  $\alpha_z$ )

Se riuscissimo a tradurre ogni tipo di struttura controventante in vincoli ideali a noi noti, noi potremmo progettare strutture controventi in termini di numero, posizione e orientamento.

Conversione tra dispositivo di controvento pilastro e vincolo ideale a cui possiamo sostituirlo nella modellazione della struttura di piano/corpo infinitamente rigido.

Pilastro freestanding, è efficace elemento di controvento quando è incastrato al piede, con plinto a bicchiere (che elimina i tre gradi di libertà del piede del pilastro).

Posso fare affidamento ad un unico pilastro per controventare un edificio? No, è labile

Un solo pilastro elimina traslazione verso X e Y

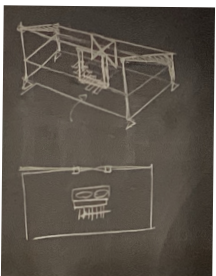
Figuriamoci che il pilastro non sia a base quadrata ma rettangolare

Se lo consideriamo come corpo rigido, sarà impedita la rotazione intorno ad y e x e le traslazioni intorno ad x z e y

Forza diretta secondo la direzione maggiore: non subisce deformazione (considerato corpo rigido)

Forza diretta secondo la direzione minore: subisce deformazione (da questo punto di vista, il pilastro non è in grado di annullare i due gradi di vincolo che annullava precedentemente)

La testa del pilastro la posso equivalere con una cerniera (piano di scorrimento ortogonale alla direzione lunga/dimensione maggiore della sezione)





## Modellazione dei controventi in pianta

Ad ogni tipo di controvento è lecito associare un vincolo ideale rigido con gdv equivalenti.

### Strutture di controvento puntiformi

Primo caso: il pilastro a base quadrata annulla due gradi di libertà (traducibili in due carrelli o una cerniera)

Il pilastro a base rettangolare (piano di scorrimento verticale perpendicolare alla di, menzione maggiore)

3 gradi di vincolo

Le rette (tratteggiate) delle reazioni vincolari si incontrano in un unico punto C (centro di istantanea rotazione) (maldisposta vincolarmente, quindi labile)

Secondo caso

Il pilastro a base rettangolare (piano di scorrimento verticale perpendicolare alla di, menzione maggiore)

3 gradi di vincolo

In questo caso, le rette tratteggiate non si incontrano mai

Non c'è quindi centro di istantanea rotazione (caso accettabile)

### Strutture di controvento piane

#### Strutture di controvento spaziali

Possiamo assimilare il controvento spaziale come l'unione di due controventi piani

Caso controvento a L

Esprime due gradi di vincolo (risultato di due carrelli o una cerniera)

Caso controvento a C (esempio nucleo del vano scala)

Risultato di tre controventi piani

(Tre carrelli, una cerniera e un carrello, un incastro, un doppio pendolo e un carrello) condizione che permette di eliminare tutti e tre i gradi di libertà

### MALDISPOSIZIONE DEI CONTROVENTI

Figuriamoci di progettare edificio con controvento a croce di sant'andrea

L'edificio in pianta è semplicemente rettangolare e poi collocato non lontano da un fiume (Dora)

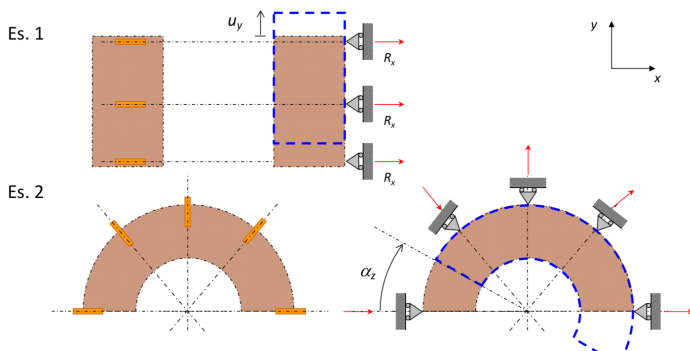
Parco fluviale con alberi e strada lungo Dora

L'edificio prospetta sul parco fluviale

Sulla base di questa idea possiamo figurarci di progettare l'edificio mono falda immaginando che l'altezza maggiore sia orientata verso il parco fluviale

Orizzontamento che voglio controventare (separa piano terra da primo piano)

Corpo rigido dotato di tre gradi di libertà



Es. 1 immaginare controventi disposti nel piano trasversale dell'edificio e realizzati con portale a tre cerniere sotto l'effetto di un'azione orizzontale un elemento sarà compresso, gli altri due inflessi (aumentano l'ingombro strutturale su retro e davanti lascio il pilastro snello)

Tre dispositivi di controventi piani. Sono sufficienti?

Disegno in pianta la struttura di piano

Ora posso sostituire al controvento piano il vincolo ideale (per ogni dispositivo di controvento un carrello con piano di scorrimento perpendicolare alla dimensione prevalente del mio controvento piano).

Tipico esempio di maldisposizione dei controventi verticali (le rette di scorrimento si incontrano in un punto)

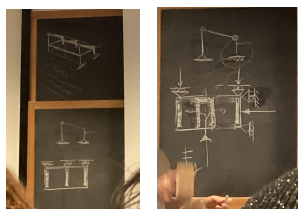
Es 2 esempio di edificio a pianta anulare

Tanti setti pieni in calcestruzzo armato che faccio uscire sulla superficie esterna

Possiamo fare in modo che il settore anulare abbia più raggi di curvatura (e quindi non esista un centro di istantanea rotazione che la renderebbe maldisposta).

Strumento modellistico consente di concepire il numero dei controventi verticali e come orientarli affinché siano efficaci.

Siamo anche in grado di capire dove metterli, quindi la loro posizione in pianta



### Collocazione dei controventi

Criteri che permettono di capire come collocare i controventi

Linee guida per la collocazione dei controventi (attengono alle azioni dirette e all'equilibrio) + criterio che fa riferimento alle azioni indirette

Linee guida progettuali:

- i. elementi di controvento giacenti sulla retta d'azione della forza orizzontale risultante a cui fanno equilibrio, o simmetrici rispetto a tale retta:
  - minimizzare (al più annullare) l'eccentricità  $E$  e quindi il braccio del momento sollecitante;
- ii. elementi di controvento paralleli posti al massimo interasse (al più la dimensione in pianta dell'edificio in direzione trasversale ai controventi):
  - massimizzare il braccio  $B$  della coppia resistente.

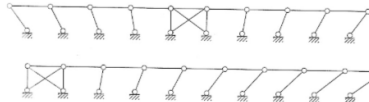


minimizzare il rapporto  $E/B$ .

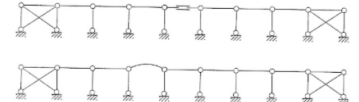
- iii. ridurre gli effetti dell'azione termica:

- spostamenti (strutture isostatiche)
- stato di sollecitazione e relativa instabilità (strutture iperstatiche)

Collocazione favorevole



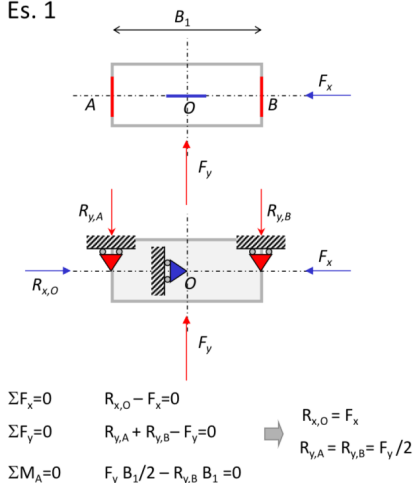
Collocazione sfavorevole



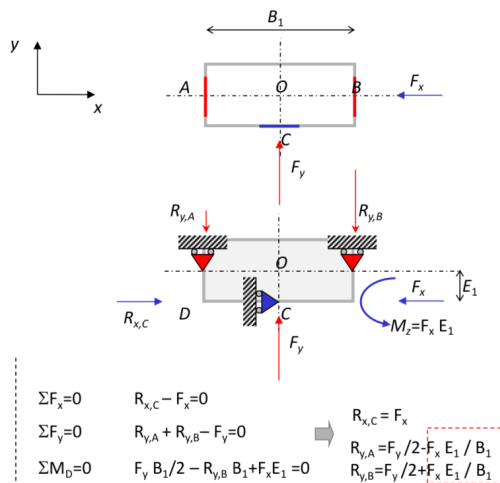
Un problema progettuale e due soluzioni alternative di disposizione dei controventi

Collocazione favorevole

Es. 1



Collocazione sfavorevole



Collocazione favorevole

Collocazione sfavorevole perché  $B_1$  (distanza dei due controventi rossi) l'ho resa massima tanto quanto è lungo il mio edificio. Sarebbe stata ancora più sfavorevole una soluzione che veda  $B_1$  ridotta

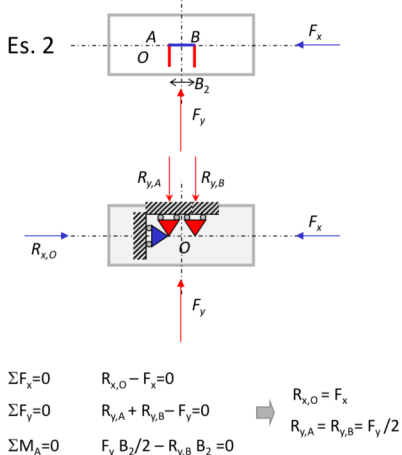
$F_x$  contribuisce a determinare tanto la reazione vincolare  $R_x$  quando  $R_y$

I) Tanto più i controventi sono o direttamente collocati lungo la retta d'azione della forzante da vento, o disposti simmetricamente rispetto retta d'azione della forzante da vento, tanto meglio è.

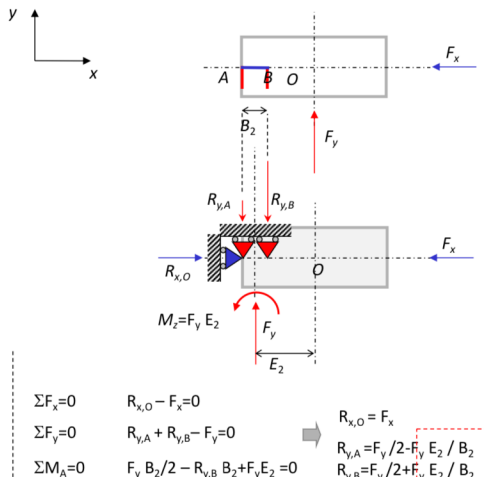
Perché in questa maniera riduciamo  $E$

Collocazione favorevole

Es. 2



Collocazione sfavorevole



Ogni solaio era da intendersi come corpo infinitamente rigido nel piano orizzontale  
 Associare ad ogni struttura di controvento verticale un equivalente vincolo ideale da applicarsi alla struttura di piano  
 Le due ipotesi (di corpo rigido e equivalenza tra tipo di controvento verticale e vincolo ideale, permettono al progettista di conoscere senza dubbio il numero di controventi verticali da disporre in pianta affinché ogni piano sia isostatico e vincolato.  
 Permettono di definire la posizione in pianta degli elementi strutturali di controvento  
 Riduce entità delle reazioni vincolari richieste alle disposizioni di controvento per fare fronte all'equilibrio, dati dei carichi da vento costanti.

Come valutiamo la soluzione migliore dal punto di vista meccanico  
 Traduciamo solaio come corpo rigido, e ogni dispositivo di controvento rigido in un carrello (vincolo ideale)  
 Ipotizzo le reazioni vincolari che ogni vincolo potrà esprimere

La reazione vincolare blu non cambia di modulo e in entrambi i casi il carrello blu è quello che si fa carico di equilibrare il carico in direzione x  
 Le reazioni vincolari rosse hanno una parte in comune  
 ...

Ridurre eccentricità E1: portare controvento blu in direzione x sempre più vicino all'asse di simmetria della pianta architettonica (retta d'azione del carico  $F_x$ ): caso di sinistra migliore

Altra alternativa: aumentare B1: distanza tra controventi rossi in pianta (non possibile perché sono già all'estremo della pianta)

### Esempio 3

Edificio a pianta rettangolare dove il dispositivo di controvento non è più realizzato con controventi di tipo piano, ma di tipo spaziale (vano scala)

Collocata in maniera che i due setti andatori rossi sono simmetrici rispetto alla retta d'azione della forza  $F_Y$  e il setto andatore blu in corrispondenza della retta d'azione della forza  $F_x$  (vano scala centrale, collocato al centro della pianta)

Viceversa a destra: variante progettuale che prevede che il vano scala sia spostato verso uno dei muri di testata

Ognuno dei setti può essere modellato come vincolo reale di carrello (vediamo traslitterazione in schema statico della pianta di pianta) condizione dei carichi prevede forze  $F_x$ /retta d'azione che coincide con quella della retta d'azione blu e  $F_Y$ (retta d'azione eccentricità E rispetto all'asse di simmetria dei due setti rossi)

Riscrivo equazioni cardinali della statica

Otengo modulo reazioni vincolari

Otengo termine di aggravo in rosso tratteggiato, che se voglio ridurre, devo ridurre eccentricità E o aumentare braccio B2

Ridurre E: il vano scala lo devo spostare verso la retta d'azione della forza  $F_Y$

Se voglio annullare E2 e quindi complessivamente, ricadrò nel caso sulla sinistra.

Altra soluzione: aumentare il braccio B2: fare sì che i controventi rossi siano sempre più distanziati (al limite, collocabili sulle pareti d'ambito).

Se B2 diventasse molto grande, funzionalmente non potremmo più chiamarlo vano scala, dobbiamo connotarlo in maniera differente.

Considerazioni architettoniche:

- Se l'idea è quella di massimizzare il braccio B2, potremmo portarlo sul perimetro dell'edificio. Vuol dire che tutto l'edificio è diventato un grosso tubo con almeno tre pareti completamente controventanti.

(Concezione strutturale dei grandi edifici alti)

- la collocazione favorevole è quella sinistra, e sarebbe altrettanto favorevole farla diventare un tubo (ottimo meccanico ma non necessariamente ottimo distributivo): implicazioni distributive

Da un punto di vista meccanico potremmo dire che il migliore sistema di controvento prevede controventi o in corrispondenza delle forze agenti o simmetricamente alle rette d'azione delle forze agenti (ottimo se massimizza la distanza tra dispositivi di controvento ordinati nella medesima disposizione: minimizzo E e massimizzo B)

Relazione controventi/composizione

Se massimizziamo B dobbiamo portare i controventi in facciata, connotandolo in senso negativo, limitando ad esempio apertura di finestre

È anche vero che il medesimo controvento portato in facciata potrebbe diventare elemento compositiva qualificante

Se i controventi li teniamo all'interno della pianta possono limitare la distribuzione ad esempio orizzontale (controventi a V rovescia per consentire distribuzione orizzontale)

È evidente che la scelta progettuale più naturale sia quella di fare coincidere il nucleo di controvento con il vano scala: implica relazione fortissima tra il controvento e la distribuzione verticale.

Ipotesi: Struttura di piano infinitamente rigida

Quali sono gli accorgimenti con i quali possiamo rendere reale questa ipotesi (non solo speculazione intellettuale): attraverso progettazione di elemento complementare al controvento verticale: il controvento di piano.

La struttura di piano deve essere in grado di stabilire connessione rigida tra punto di applicazione forza orizzontale e punto di applicazione della forza reagente espressa dal controvento.

Figuriamoci di progettare il reticolo viario di un tessuto urbano, di una città perimetrale da una tangenziale. Le uscite sono molteplici ma devo essere in grado con viabilità locale di raggiungere punti limitati: devo avere rete viaria che mi porti dalle tantissime reti stradali in quei punti particolari.

Punti di applicazione trasmesse dalle facciate corrispondono io alle molteplici uscite della tangenziali.

Controventi verticali sono i luoghi raggiungibili

Elementi struttura di piano che consentono alle forze agenti di essere in connessione con le forze reagenti (metaforicamente le connessioni stradali)

Esempio

Grigio: collocazione strutture verticali di controvento

Blu: Applicazione di una delle forze di controvento

Solaio realizzato con ordito di travi longitudinali e trasversali in linea tratteggiata nera.

Considerato che i dispositivi sono tre carrelli, da un punto di vista cinematico il solaio rimarrà rigido?

L'ordigno di travi dobbiamo intenderle come unite da vincoli interni di cerniera (in prima approssimazione) ogni quadro può perdere la sua forma e diventare parallelogramma.

Sotto la forza  $F_x$  in blu cinematicismo della pianta

Accorgimenti progettuali per far sì che la tradotta nei fatti l'ipotesi di corpo rigido

Se il solaio è in laterocemento gettato in opera, la monoliticità è garantita dal fatto che travi, travetti e la soletta superiore (bianca puntinata) sono unico pezzo. Soletta superiore deformabile fuori dal piano, ma infinitamente rigida nel suo piano. I travetti e le travi sono connessi con la soletta superiore, non possono traslare indipendentemente dalla soletta. L'ipotesi di corpo rigido in questo caso è soddisfatta.

Cosa succede in edificio a struttura in acciaio (caso Porta Susa)

Ordito di travi longitudinali e trasversali incernierata, + lamiera grecata + getto calcestruzzo (infinitamente rigide nel loro piano)

La lamiera è connessa efficacemente con l'ala superiore delle travi?

In questo caso nn, viene posata sull'ala della trave con punti di saldatura detti di cucitura.

Soluzione: provvedere introdurre diagonali nei campi quadrangolari pendolari affinché questi non perdano la loro forma.

L'insieme degli elementi diagonali e delle travi che lui perimetro costituiscono controvento di piano che fa sì che il piano complessivamente sia indeformabile, sia infinitamente rigido.

Come progettiamo i controventi di piano?

Come gli urbanisti progettano rete viaria locale.

La progettazione della struttura di controventi di piano deve essere integrata alla progettazione di strutture di controvento verticali.

Devo progettare la struttura di controvento orizzontale, nota la collocazione delle strutture di controvento verticali. Mentre non sarà nota la posizione dei punti di applicazione delle forze che la facciata trasmette al solaio.

## Controventi di piano

Problem setting:

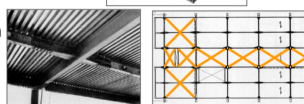
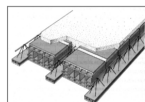
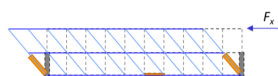
- assicurare il trasferimento delle forze dal piano ai nodi di controvento;
- assicurare che l'ipotesi modellistica di corpo rigido per il piano sia soddisfatta;



realizzare elementi rigidi e resistenti nel piano del solaio

Problem solving:

- l'ordito di travi dell'orizzontamento è insufficientemente rigido;
- in strutture in c.a. completamente o parzialmente gettate in opera: soletta monolitica e collaborante;
- in strutture in acciaio o legno: solaio in lamiera grecata non collaborante, controventi di piano *ad hoc*.



## Relazione controventi/composizione

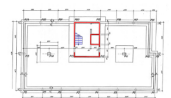
Strutture controventanti in facciata:

- ingombro strutturale, compatibilità con le aperture;
- contributo al disegno e alla figuratività del prospetto.



Strutture controventanti in interno pianta:

- ingombro strutturale, compatibilità con la distribuzione orizzontale;
- integrazione con la distribuzione verticale (es. vani scala e nuclei centrali di controvento) e le altre funzioni assolute.



Esempio edificio a 12 piani fuori terra a tetto piano



Dispositivi di controvento verticali collocati sulle facciate di testata in direzione XZ

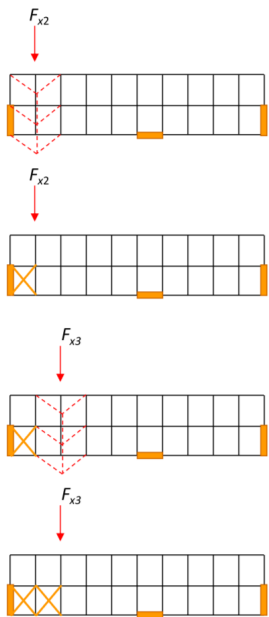
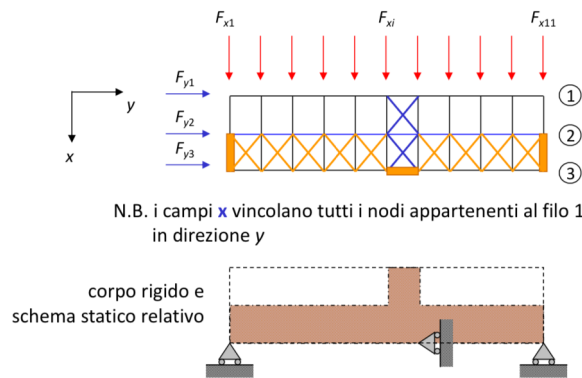
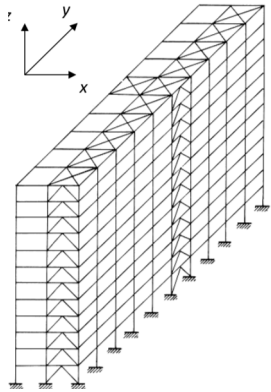
E dispositivi o di controvento verticale su facciata longitudinale nel piano ZY

Ad ogni piano (12) dovrò progettare una struttura di controvento di piano per far sì che ognuno di essi sia un corpo rigido.

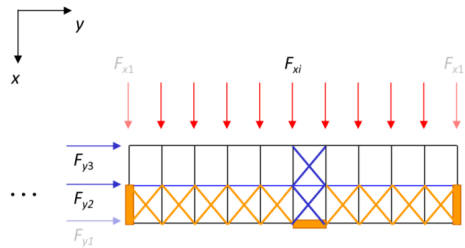
## Disposizione controventi di piano

Obiettivo: il controvento di piano nel suo insieme deve essere in grado di ricevere delle forze esterne sia in direzione  $x$  che  $y$  e trasmetterle ai controventi verticali

progettazione integrata di controventi di piano e verticali



## Disposizione iterativa



### Procedimento

Nota la posizione dei controventi verticali in pianta (arancione) considero delle forze esplorative orizzontali in direzione  $X$  e  $Y$ .

Comincio con direzione  $X$

Forza esplorativa in direzione  $X$ :  $F_{x1}$

Tra il punto di applicazione della forza  $f_{x1}$  E IL Punto di applicazione della reazione vincolare espressa in direzione  $X$ , c'è un corpo rigido? Sì, ce la trave di bordo (assialmente definibile infinitamente rigida)

Tra la retta d'azione di  $f_{x2}$  e la reazione vincolare espressa dal carrello che sostituisce il controvento all'estradosso sinistra, sono sulla stessa retta d'azione? No. Tra questi due punti c'è un corpo rigido? No

C'è un campo quadrangolare pendolare che cinematicamente individuo con il tratteggio rosso. Progetto un campo della struttura di controvento orizzontale che connette punto di applicazione  $f_{x2}$  e della reazione vincolare che esprimerà il controvento verticale (prima croce di san'andrea)

$F_{x3}$ : pongo altro campo controventanti fino alla  $f_{x10}$

Poi la  $f_{x11}$  non ha bisogno di controvento di piano perché agisce su retta d'azione che coincide con quella della reazione vincolare.

Forze orizzontali

$F_{y1}$ : il suo punto vincolare è connesso con quello di una reazione vincolare espressa in direzione  $Y$ ?

C'è corpo rigido?

...

$F_{y2}$  ce ne sono 10

$F_{y3}$ : nel suo punto di applicazione, è connesso con punto di applicazione della forza reagente del dispositivo di controvento verticale?

Per estensione anche le parti bianche sono rigide perché connesse con trave (non ci sono spostamenti relativi): Possibile perché le travi

sono assialmente rigide

Si preferisce concentrare controventi di piano lungo allineamenti particolari, ad un dato livello e replicato a tutti i piani tipo, non perché influisce sull'esito figurativo, perché disposti tra piano calpestio e soffitto, ma per facilità di montaggio, e perché i controventi di piano limitano la collocazione della distribuzione verticale. Posso eleggere il campo come vano scala? No perché l'orizzontamento è bucato

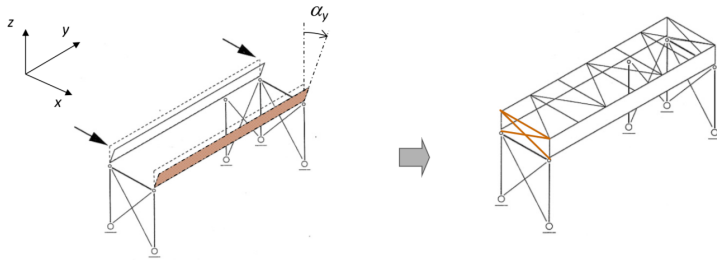
Agire assumendo forze esplorative in tutti i modi di bordo, nota la collocazione dei controventi verticali.

Se la copertura è a falde, anche per le falde ci vorrà controvento nel piano della falda  
La falda non è un corpo rigido

## Controventi di falda

### Problem setting:

- assicurare il trasferimento delle forze dal piano ai nodi di controvento;
- assicurare che l'ipotesi modellistica di corpo rigido per la falda sia soddisfatta;
- assicurare la staticità degli elementi strutturali principali della copertura fuori dal loro piano.



Assolvono alle medesime funzione dei controventi di piano, ma avremo più controventi di piano che giacciono nei piani della falda, a seconda della quantità delle falde. Ma hanno funzione ulteriore: di stabilizzare degli elementi orizzontali particolarmente alti (dimensione verticale della sezione trasversale).  
Quandessi siano isostatica all'interno del piano, ma labili al di fuori del piano.

Edificio mono piano, mono manica e mono campata  
Ci sono controventi verticali sufficienti al suo controventamento nell'ipotesi che questo piano orizzontale sia un corpo rigido? Sì: 3 carrelli  
Questa trave supera luce importante, ha una altezza della z sezione resistente molto grande+la trave trova appoggio sulla testata dei pilastri.  
Questa trave nel suo piano ZY è labile o isostatica?

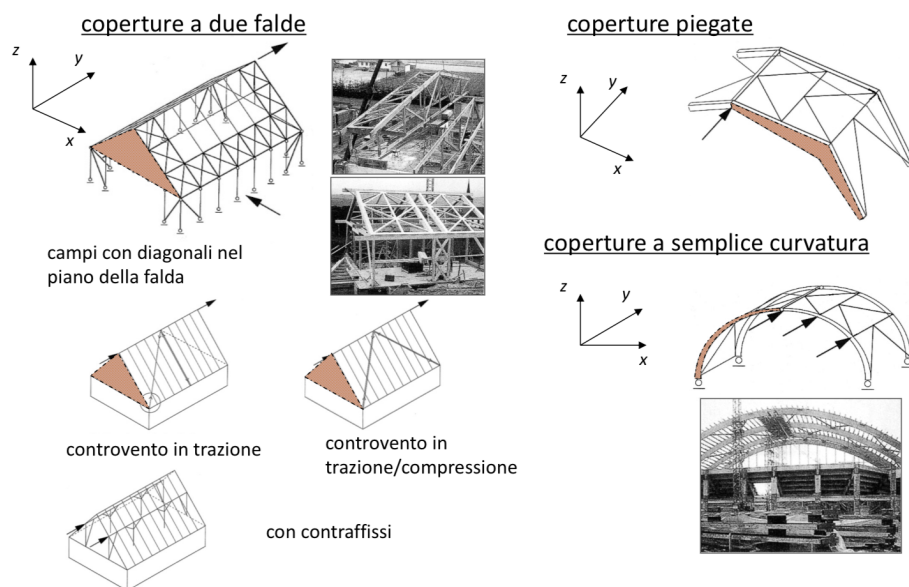


Controvento in arancione non è più vertical e dispetto del fatto che giaccia nel piano verticale, perché non ho interpiano. Piuttosto dobbiamo vederlo come controvento di falda di un tetto a tre falde. Oltre che assicurare che il piano sia infinitamente rigido, assicura anche che lestradosso della trave alta, non possa traslare lungo X relativamente all'intradosso (ruotare intorno a Y)

Esempio NuovoBorgo centro commerciale

Ritti con travi in legno lamellare molto alte, vincolate al loro intradosso in testa pilastro  
Collocati controventi di falda, di cui messo in evidenza uno

Esempio tetti falda:



Serie di tetti dove la copertura è un tetto alla lombarda (capriata) che occupa nel piano verticale la porzione aranciata.  
Portata in testa a due pilastri.  
A fronte i azioni orizzontali siano in direzione X o Y ma comunque applicati alla quota del piano grondaia, l'edificio è sufficientemente controventato da controventi verticali? Sì  
Cosa succede se il carico orizzontale è applicato alla quota del piano di colmo? Chi impedisce alla capriata di ruotare intorno all'asse della catena? Nessuno: necessita di introdurre controventi di falda.

Utili non solo in fase di architettura completa ma anche in fase di montaggio.

Le capriate di assieme a piè d'opera in orizzontale.

La gru la prende per il colmo, la solleva e la posiziona sui due pilastri.

A piè d'opera di costruiscono due capriate e si montano già i controventi di falda. Così si sollevano insieme e sono già isostatica e nel loro e fuori dal piano.

Soluzione analoga con controvento di falda molto più grande

Soluzione evitando controvento di falda nella falda e si introducono contraffissi a realizzare telai: altri dispositivi di controvento verticali (attualmente utilizzati prevalentemente nelle case balloon frame)

I controventi di falda possono essere utili anche quando l'edificio è voltato (copertura voltata)

Che sia una copertura a semplice curvatura o copertura piegata, ci affidiamo all'arco a tre cerniere.

Fuori dal suo piano l'arco è labile

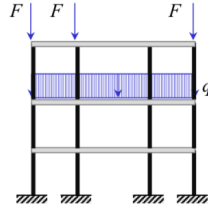
Controvento v rovescia

### I controventi: stabilità delle strutture

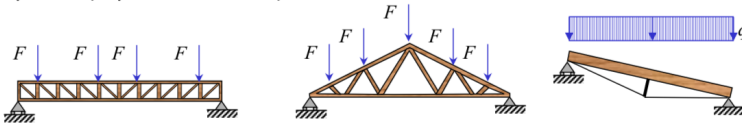
I dispositivi di controvento non assicurano solo prestazione dell'equilibrio a fronte di carichi orizzontali, ma anche a fronte di carichi verticali (controgravità) e lo fanno nel caso in cui il nostro organismo architettonico includa elementi strutturali che sotto l'azione di carichi verticali risultino essere compressi.

#### Elementi compressi

- Gli elementi strutturali verticali risultano abitualmente compressi (o presso-inflessi) sotto l'azione di carichi verticali.



- Alcuni elementi di strutture reticolari (travi, capriate) e travi armate impiegate per la realizzazione di orizzontamenti o coperture risultano compressi (o presso-inflessi) sotto l'azione di carichi verticali.



Se i pilastri e travi realizzano filo pendolare, i pilastri risulteranno esclusivamente compressi.

Anche nel caso in cui realizzino dei telai il pilastro non sarà solo compresso ma anche inflesso (anche se principalmente compresso)

Se le strutture saranno realizzate con travi reticolari, oppure saranno tra reticolari ad altezza variabile, assimilabile ad una capriata o tipo strutturale della trave armata.

Alcune delle aste di queste strutture, sotto l'effetto di carichi gravitazionali risulteranno essere compresse. Corrente superiore della trave reticolare e i puntoni della capriata saranno soggetti a compressione. A fronte di carichi verticali ci possono essere elementi strutturali compressi tanto verticali come i pilastri, tanto orizzontali come il puntone di una capriata.

Qual è la questione specifica degli elementi strutturali compressi?

Questione dell'instabilità dell'equilibrio elastico.

Resistenza aumentata del materiale consentiva di ridurre l'ingombro strutturale: elementi strutturali con dimensione longitudinale molto maggiore delle dimensioni caratteristiche della sezione trasversale, in prima approssimazione come ferri da calza.

#### Disegno

Come possiamo modellare l'elettrodo strutturale?

In prima approssimazione è un elemento trave incernierato al piede e in testata caricato da una forza peso. Struttura labile (permessa rotazione intorno ad A).

#### Resa isostatica

Forza reagente  $V_a$  con modulo  $P$  e tutta la trave soggetta ad uno sforzo normale di compressione  $N$  costante e pari a  $P$ .

E eccentricità

Momento coppia inflette la trave

La trave aumenta la sua curvatura, quindi l'eccentricità, e quindi il momento reagente della coppia (diverge, la trave smetterà la sua configurazione rettilinea e sbanda lateralmente) l'elasticità di questo sbandamento può crescere all'infinito, fino al momento in cui si spezza.

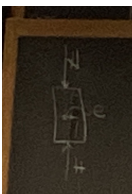
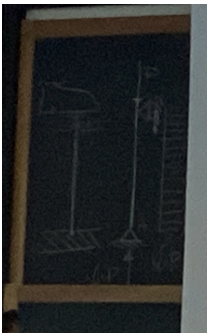
La deformata che assume l'asta quando ha luogo questa instabilità si chiama deformata di instabilità.

Fenomeno negativo perché questa divergenza della risposta strutturale avviene in pochissimo tempo, nell'ordine del secondo. Un occupante della struttura non la percepisce.

Meccanismo di collasso fragile

Instabilità dell'equilibrio elastico avviene anche con asta perfettamente rettilinea e Eulero dimostra che esiste carico  $P$  per cui si destabilizza

...



**Determinare forma della deformata di instabilità**

E' possibile garantire la stabilità di questi elementi contenendone la snellezza  $\lambda$  entro limiti definiti

$$\lambda = \frac{l_0}{i_{\min}}$$

$$\lambda < \lambda_{\lim} \quad (\lambda_{\lim}=200 \text{ membrature strutturali principali in acciaio})$$

$$\lambda < \lambda_{\lim} \quad (\lambda_{\lim}=250 \text{ membrature strutturali secondarie in acciaio})$$

dove:  $l_0$  lunghezza libera di inflessione

$i_{\min}$  minimo raggio di inerzia della sezione (nell'ambito di questo corso, ottenuto dai sagomari o da espressioni date)

Questo fenomeno è reale

Due esempi:

In alto a destra due pilastri realizzati con sezione circolare cava sormontati da grande trave in calcestruzzo armato.

Rimane deformazione residua nel pilastro

A sinistra comportamento ancora più singolare: instabilità elemento strutturale orizzontale

Vecchia capriata lignea ammalorata, per sostituirla è stata realizzata una capriata metallica

Ne vediamo il puntone, non rettilineo perché sotto l'effetto della compressione è andato per "carico di punta" (instabilità)

Questo succedeva soprattutto per elementi strutturali snelli

Questo fenomeno è condizionato dalla geometria dell'elemento strutturale: sono più suscettibili gli elementi snelli rispetto a quelli tozzi.

Accezione ingegneristica della snellezza indicato con lettera greca lamda: rapporto tra una quantità geometrica che parla dell'estensione longitudinale dell'elemento strutturale e una quantità, al denominatore (imin) che racconta di una dimensione caratteristica della sezione trasversale. (ad esempio diametro del ferro da calza)

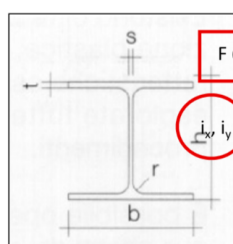
Riferimento a  $l_0$  Luce libera di inflessione e  $i$  raggio libero di inerzia

La stessa normativa offre linee guida di progetto.

Profilato a doppio T ad ali larghe laminato a caldo (serie HEA, alleggerito), secondo la norma DIN 1025														
Abbreviazione	Dimensione in mm					Sezione nominale	Massa lineare <sup>1</sup>	Superficie del mantello	Per l'asse neutro					
HE-A (IPB)	h	b	s	t	r	F	G	U	J <sub>x</sub>	W <sub>x</sub>	i <sub>x</sub>	J <sub>y</sub>	W <sub>y</sub>	i <sub>y</sub>
						cm <sup>2</sup>	kg/m	m <sup>2</sup> /m	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm	cm <sup>4</sup>	cm <sup>3</sup>	cm
200	190	200	6,5	10	18	53,8	42,3	1,14	3690	389	8,28	1340	134	4,98
1) 7,85 kg/dm <sup>3</sup>														

1) 7,85 kg/dm<sup>3</sup>

→ densità dell'acciaio



$F(A)$  area della sezione senza forature

$i_x, i_y$  raggi di inerzia della sezione

caratteristiche inerziali della sezione (geometria delle aree)

Sezione rettangolare



$$b \leq h$$

$$i_{\min} = \frac{b}{\sqrt{12}}$$

Sezione circolare



$$i = \frac{d}{4}$$



Sufficiente eliminare la snellezza  $\lambda$  ad un valore inferiore a valore soglia pari **200** per membrature in acciaio e 250 se elemento strutturale è secondario.  
Senza unità di misura (dividiamo una lunghezza per una lunghezza)

Valori riferimento  $i_{min}$

Per tutte le sezioni di elementi in acciaio profilati (che escono da impianto siderurgico) il produttore fornisce tabelle con proprietà geometriche della sezione (sagomari)

Es. Sezione HEA200 a doppio T ad ali parallele dove T è uguale ad H

Troviamo raggio di inerzia intorno a X e intorno ad Y. Dobbiamo prendere il numero più piccolo, in questo caso 5cm

Se la sezione non è standard siderurgica, il raggio minimo deve essere calcolato.

Espressione raggio minimo di inerzia per due sezioni la cui geometria è ricorrente: sezione circolare con raggio di inerzia pari ad  $1/4$  del diametro

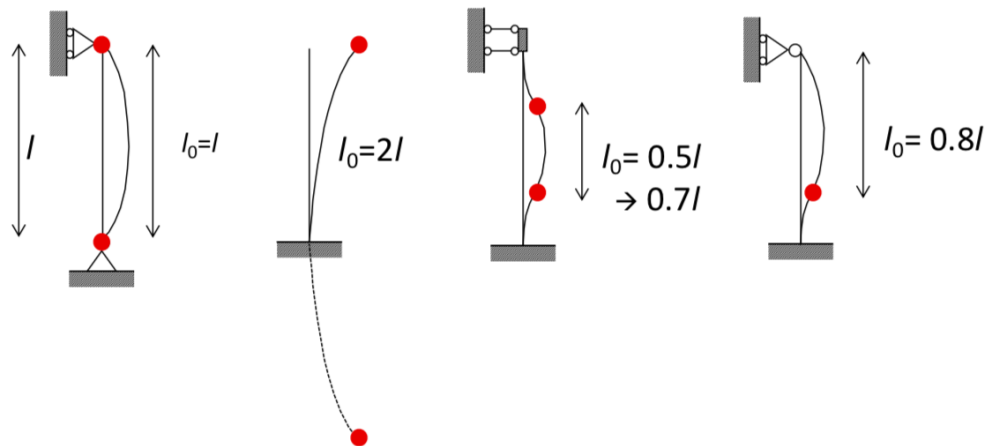
Sezione rettangolare raggio minimo di inerzia: lato minore  $b$  diviso la radice di 12

### La lunghezza libera di inflessione

Lunghezza libera di inflessione  $l_0$ :

distanza tra due punti di flesso nella deformata di instabilità

→ dipende dalla lunghezza della membratura e dalle condizioni di vincolo



- $l_0$  deve essere valutata in tutti i piani in cui l'elemento strutturale può instabilizzarsi;
- $l_0$  può essere contenuta con l'inserimento di vincoli opportuni, attraverso controventi di pia o di falda.

Facciamo riferimento non alla configurazione indeformata dell'elemento compresso ma alla deformata di instabilità

Esempi

La deformata di instabilità da che cosa dipende?

Dalla lunghezza dell'elemento strutturale, ma anche dai gradi di libertà lasciati in corrispondenza dei vincoli.

Cerniera in A lascia libera la rotazione (immagina disegno alla lavagna)

Carrello lascia libera rotazione e abbassamento  $\Delta Z$  nel sistema di rif locale

Possiamo condizionare la deformata ai gradi di libertà che possono compiere ai gradi deformati...

3) Se ho una trave incastrata al piede e doppio pendolo in testa, gli estremi della trave non possono ruotare. L'unico grado di libertà consentito è l'abbassamento della testa.

4) Se trave incastrata al piede e incernellata in punta

...

Punti di rosso sono punti di flesso: punto a curvatura nulla della deformata corrispondono ai punti in cui il momento flettente è 0

La lunghezza libera di inflessione è la distanza misurata sulla configurazione deformata che separa due punti di flesso consecutivi (distanza lungo la quale l'elemento strutturale è libero di inflettersi passando tra due punti di flesso consecutivi)

Primo caso coincide con la lunghezza dell'elemento strutturale

Terzo caso è la metà

Quarto caso 0.8

Secondo caso faccio fatica a definirla, così costruisco la simmetrica della curva di instabilità, è anch'essa avrà punto di inflessione, definibile come due volte la lunghezza dell'elemento strutturale (il secondo punto di flesso è virtuale)

La luce libera di inflessione non dipende solo dalla lunghezza dell'elemento strutturale.

Dipende dalla geometria e dalla condizione di vincolo

Aumentando  $I_{min}$  (esempio) aumento il diametro

Posso cambiare i vincoli del pilastro affinché cambi  $l_0$  senza cambiare  $I$

Il controvento verticale è utile perché riduce luce libera di inflessione

Progetto il controvento per ridurre forze orizzontali ma nel frattempo sto riducendo la snellezza degli elementi compressi

Edificio sinistrata privo di controventi

Ogni pilastro incastrato al piede (dispositivo di controvento)

Qual è la sua luce libera di inflessione? Doppio di 36m: 72 metri

Raggio di inerzia minimo:  $7200\text{cm}/200$ : 36cm

Sezione circolare cava in acciaio: tubo di diametro 1m e 7cm e spessore 1 cm di lamiera (troppo grande)

Se adotto i controventi come si potrà instabilizzare il pilastro?

Tutte le volte che incontro un solaio posso al più ruotare, quindi la deformata di instabilità è segmento rosso (luce libera di inflessione passa a 3m)

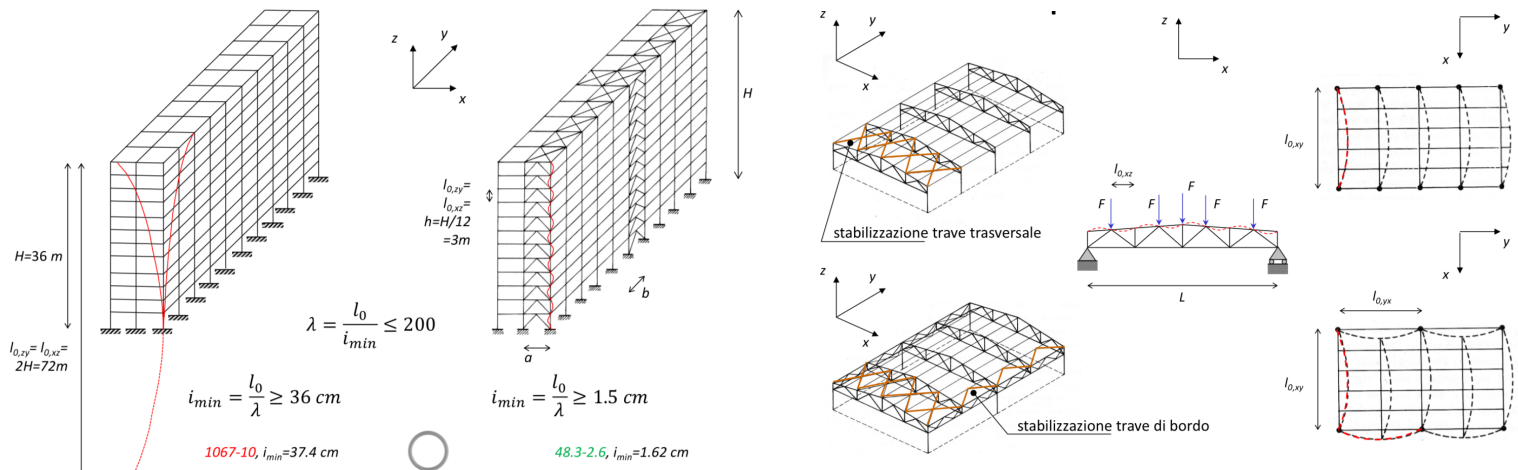
Raggio minimo di inerzia  $300\text{cm}/200$ : 1,5cm

Abbiamo ridotto di 20 volte il raggio minimo di inerzia grazie ai controventi

Tubo di 5cm di diametro e 0,26cm spessore

Come facciamo a ridurre la snellezza degli elementi compressi orizzontali?

### Esempio di stabilizzazione



Luce coperta di trave reticolare

Edificio monomanica 16m di lunghezza

Multicampata

La mancia è superata d attraversatura reticolare

A fronte di carichi verticali il corrente compresso è quello superiore

Come si può instabilizzare? Con quale deformata di instabilità si può instabilizzare?

I nodi della struttura reticolare sono punti fissi (può solo ruotare)

Serpenterò tratteggiato è la deformazione superiore

Luce libera di inflessione: 2 metri (16 diviso 8)

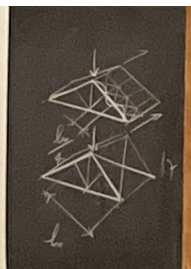
...

Inseriamo i controventi di falda

I punti dove convergono i diagonaloni dei controventi di falda non si spostano nel piano libero della falda, e la luce di inflessione diventa di 4m

...

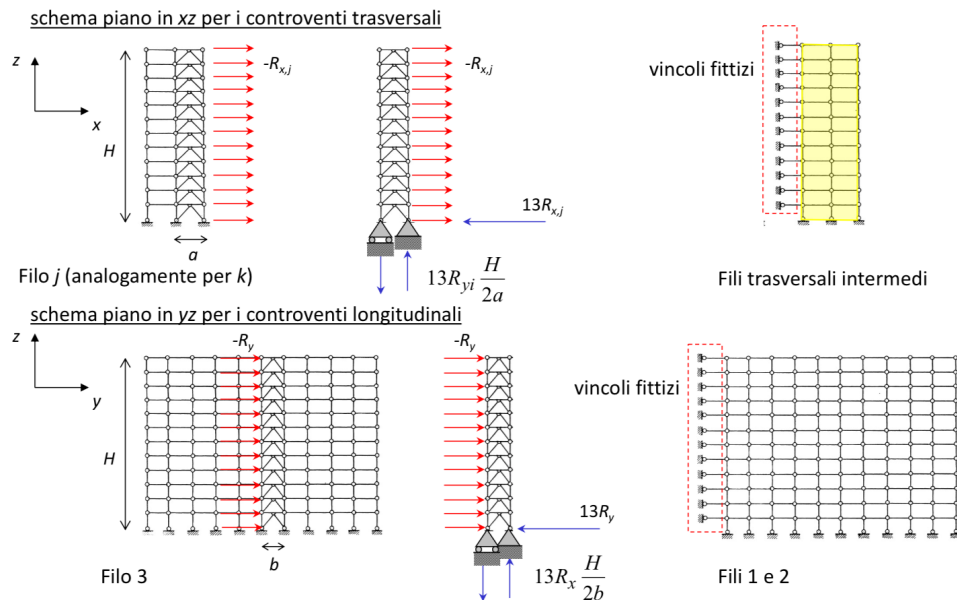
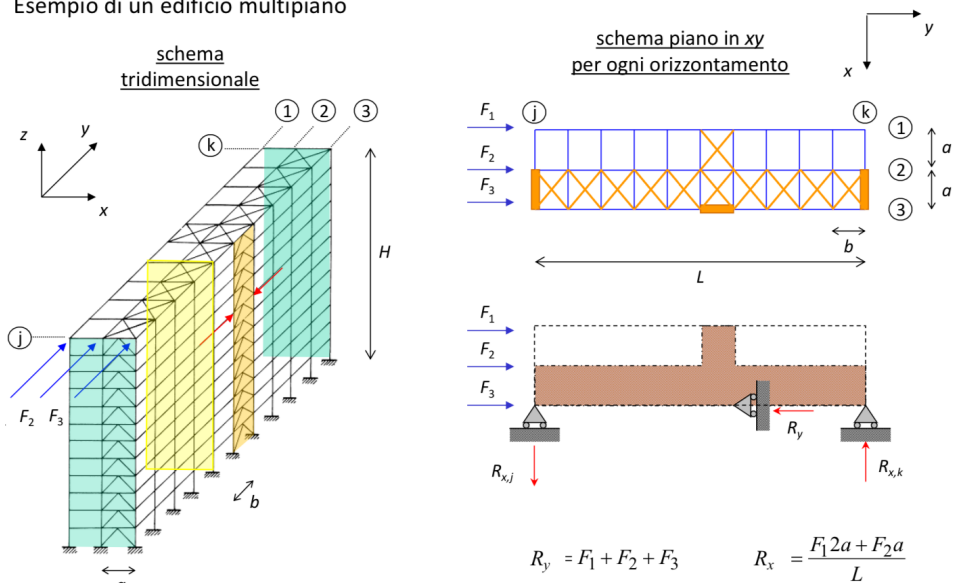
Il controvento ci forza a progettare nello spazio



## I controventi: concezione, rappresentazione e analisi dell'organismo strutturale

### Dalla struttura spaziale a schemi piani

Esempio di un edificio multipiano



## AZIONI DI PROGETTO

### CONCEZIONE DEI DISPOSITIVI DI CONTROVENTO NELLO SPAZIO

#### RIASSUNTO

Dalla struttura spaziale a schemi piani1

Abbiamo cominciato a modellare l'edificio nel piano orizzontale XY concependo controventi di piano e nello spazio per ottenere schema statico piano nel piano orizzontale per valutare le forze reagenti che devono esprimere controventi verticali per non far muovere il generico piano.

Tre forze reagenti orizzontali le cambio di verso e le applico in corrispondenza del piano che sto studiando  $-R_{x,j}$  è la reazione  $R_x$  al  $j$  esimo piano che riporto sull'ios Chema statico della struttura di controvento verticale nel piano verticale trasversale  $xz$ . E non piu XY

Filo strutturale, stilata controventatata, altra pendolare che posso escludere dal mio schema statico 8dove ho sostituito i vincoli esterni) riconducibile a struttura reticolare. E ripeto per l'altra testata.

Considero forza  $R_y$  la cambio di verso e la metto ad ogni piano sulla stilata longitudinale composta da stilata di controvento e moltitudine di campate pendolare. Rimane schema statico reticolare che non giace nel piano orizzontale XY e ne verticale  $zx$  ma nel piano verticale  $zy$ .

Gli altri fili che non contengono i controventi (trasversali e longitudinali) come quello trasversale giallo Lo schema statico sarà fatto con tuti campi pendolari e bielle (perimetrare in figura da linea tratteggiata) sono tanti carrelli ideali che indicano che nella relata in un piano trasversale diverso da quello ci saranno i dispositivi di controvento.