

Scienza delle Costruzioni

stud. -----

Docente: Mario Fagone



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Architettura
Corso di Laurea Magistrale quinquennale c.u.



Modellazione strutturale



Introduzione ai problemi strutturali

Lo scopo dei sistemi strutturali

I sistemi strutturali sono realizzati per assolvere ad una ben determinata funzione e quindi per soddisfare uno scopo specifico

- collegare due punti (ponti, passerelle, ascensori)
- contrastare spinte (dighe, paratie)
- racchiudere e coprire spazi
 - edifici per civile abitazione
 - edifici industriali
 - palazzetti dello sport
 - ...
- ...

I problemi strutturali

Tipici problemi strutturali sono:

- problemi di “**resistenza**”

In questi tipi di problemi si analizza un sistema strutturale al quale (sia nel suo complesso sia localmente nelle singole parti che lo compongono) è richiesto di essere “abbastanza resistente” da poter assolvere ad una determinata funzione.

- Es. - struttura civile capace di resistere *in sicurezza* alle azioni sismiche;
- catena in grado di assorbire la spinta di un arco;
- ...

- problemi di “**rigidezza**”

In questi tipi di problemi si analizza un sistema strutturale al quale è richiesto di essere “abbastanza rigido” (ossia di presentare deformazioni e spostamenti abbastanza piccoli) da renderlo compatibile con una specifica necessità

- Es. - limitazione degli spostamenti (derive) di piano sotto azioni sismiche per evitare fenomeni di martellamento fra edifici adiacenti e danni ad elementi secondari;
- ...

Altri tipici problemi strutturali

- stabilità dell’equilibrio
- incertezza
- ...

L'analisi strutturale

è un processo mediante il quale, **assegnate alcune entità** del problema strutturale, è **richiesto di determinarne delle altre**. Essa può essere di due tipi:

- **verifica**

dati: il sistema strutturale, la geometria, i materiali e le azioni

si determini: il comportamento del sistema rispetto alle assegnate condizioni di carico ed il “livello di sicurezza” rispetto al tipo di problema in esame (resistenza, rigidezza)

- **progetto**

dati: i carichi e le azioni applicate, il criterio di efficienza (economicità, leggerezza, facilità di realizzazione o produzione)

si determini: le caratteristiche geometriche ed i materiali costituenti il sistema strutturale

Verifiche e valutazione della sicurezza

NTC 2018

- Stati limite
 - SLU (perdita di equilibrio della struttura o di una sua parte; ...)
 - SLE (danneggiamenti locali; spostamenti e deformazioni che possano limitare l'uso della costruzione; ...)

- Valutazione della sicurezza

$$R_d \geq E_d$$

R_d = resistenza di progetto

E_d = valore di progetto dell'effetto delle azioni

(Caratteristiche della sollecitazione)

- N.B. Per le azioni sismiche sono definiti stati limite specifici

Il problema statico

Data una struttura, caricata da azioni generiche, determinare

- in che modo tali azioni percorrono la struttura, sollecitandola e deformandola;
- in che misura tali azioni giungano al “mondo esterno” (esterno al dominio di analisi).



Introduzione alla modellazione strutturale

La modellazione strutturale

Corso di Laurea: Magistrale Architettura e.u.
Insegnamento: Scienza delle Costruzioni
Docente: Mario Fagone

Scuola di Architettura

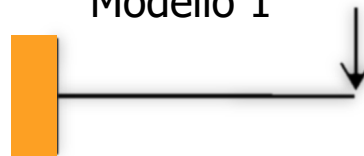
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE



Introduzione alla modellazione strutturale



Modello 1

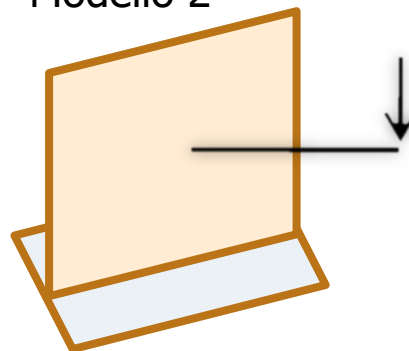


1. dominio: si analizza solo la trave "ABCD";
2. geometria: la trave "ABCD" si schematizza come monodimensionale;
3. il sistema strutturale è composto da un solo elemento; si ipotizza che l'estremo sinistro sia bloccato;
4. l'effetto del peso "E" si schematizza come una forza concentrata in corrispondenza dell'estremo destro della trave;
5. materiale: legno

Introduzione alla modellazione strutturale



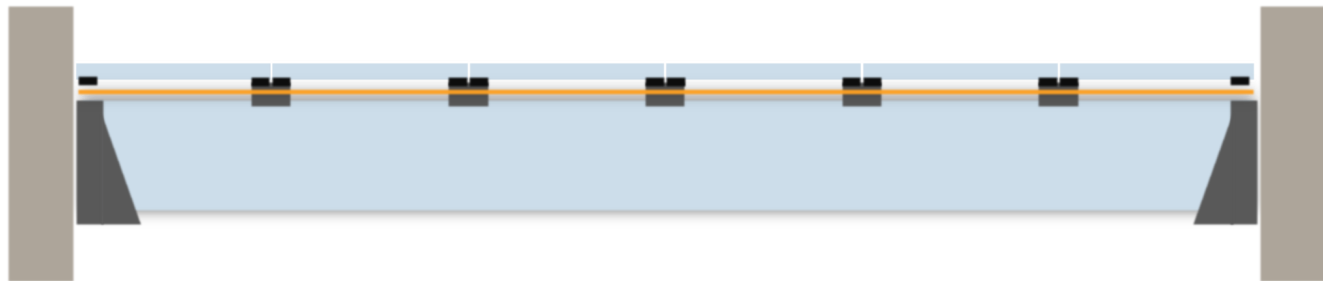
Modello 2



1. dominio: si analizza la trave "ABCD" e la parete ad essa collegata;
2. geometria: la trave "ABCD" si schematizza come monodimensionale; la parete come bidimensionale;
3. il sistema strutturale è composto da due elementi fissati (incastrati) l'uno all'altro; condizioni al contorno: si ipotizza che la parte inferiore della parete sia bloccata;
4. l'effetto del peso "E" si schematizza come una forza concentrata in corrispondenza dell'estremo destro della trave;
5. materiale: legno per la trave, muratura per la parete

Introduzione alla modellazione strutturale

Andersen Consulting, 1995 Parigi, Wilmotte & Granger



Introduzione alla modellazione strutturale

Yurakucho Canopy, 1995-1996, Tokyo, R. Vinoly

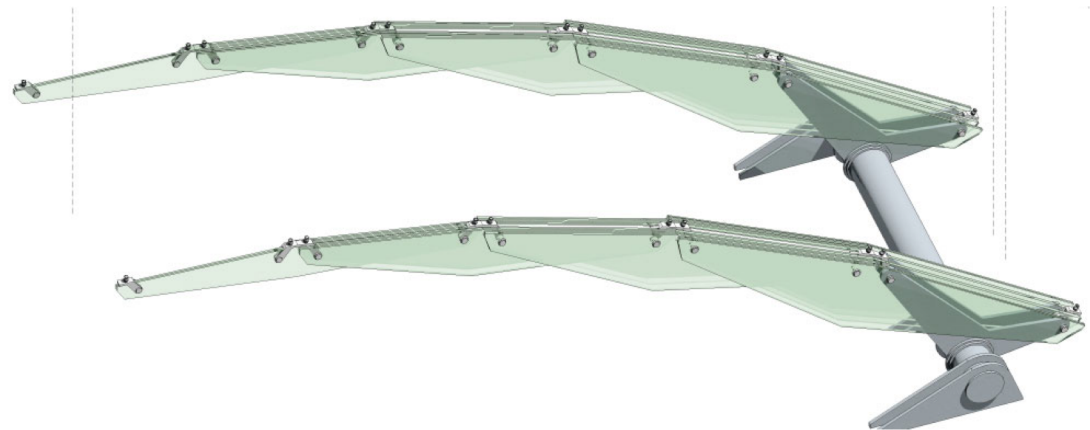


<http://www.lusas.com/case/civil/cantilevered.html>

Introduzione alla modellazione strutturale

Yurakucho Canopy, 1995-1996, Tokyo, R. Vinoly:

- sistema **isostatico** (aggetto: 10,6 m);

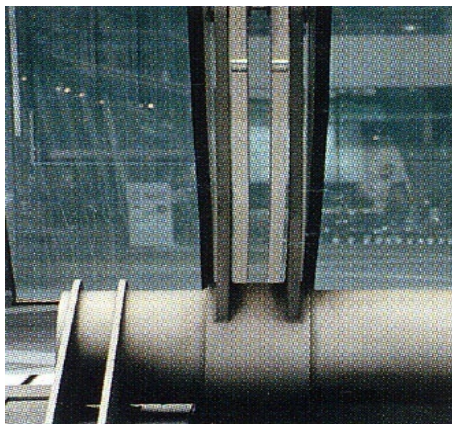
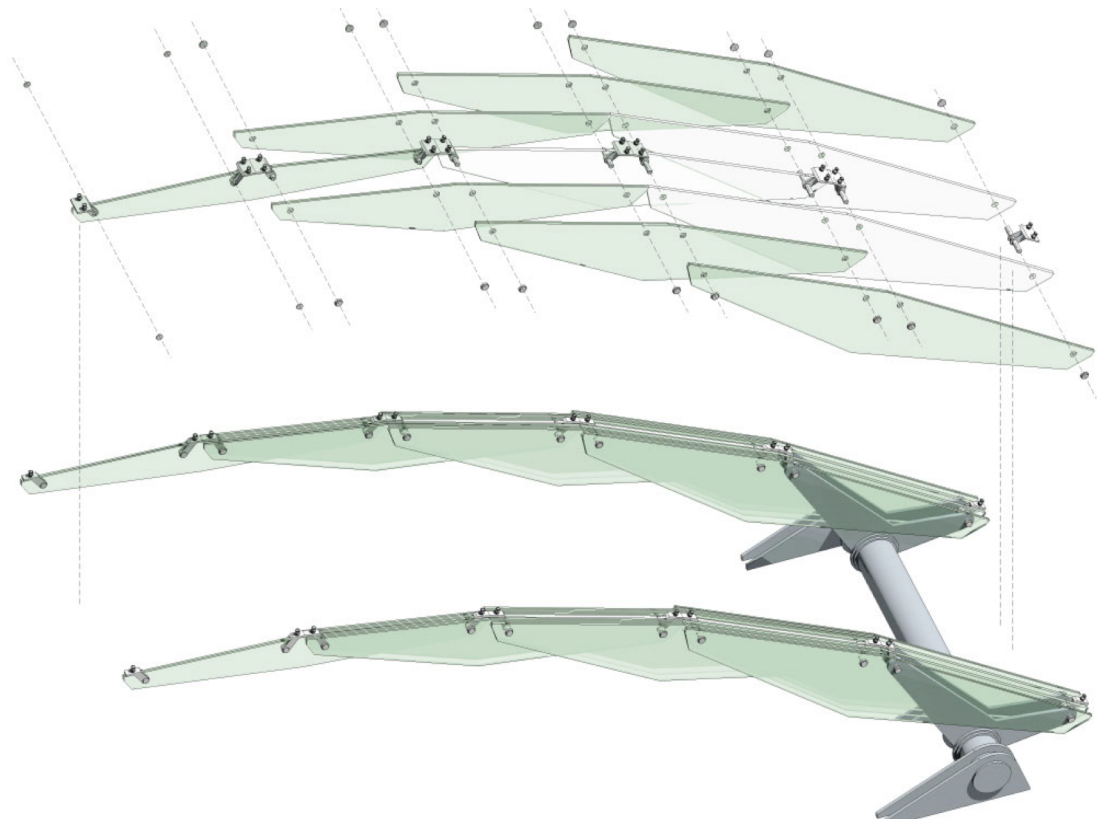


<http://www.ryan-hughes.net/ArchDetailsCanopyFrameset.htm>

Introduzione alla modellazione strutturale

Yurakucho Canopy, 1995-1996, Tokyo, R. Vinoly:

- sistema **isostatico** (aggetto: 10,6 m);
- ridondanza di sezione ottenuta mediante l'inserimento di elementi aggiuntivi in polimetil-metacrilato (deformabile).

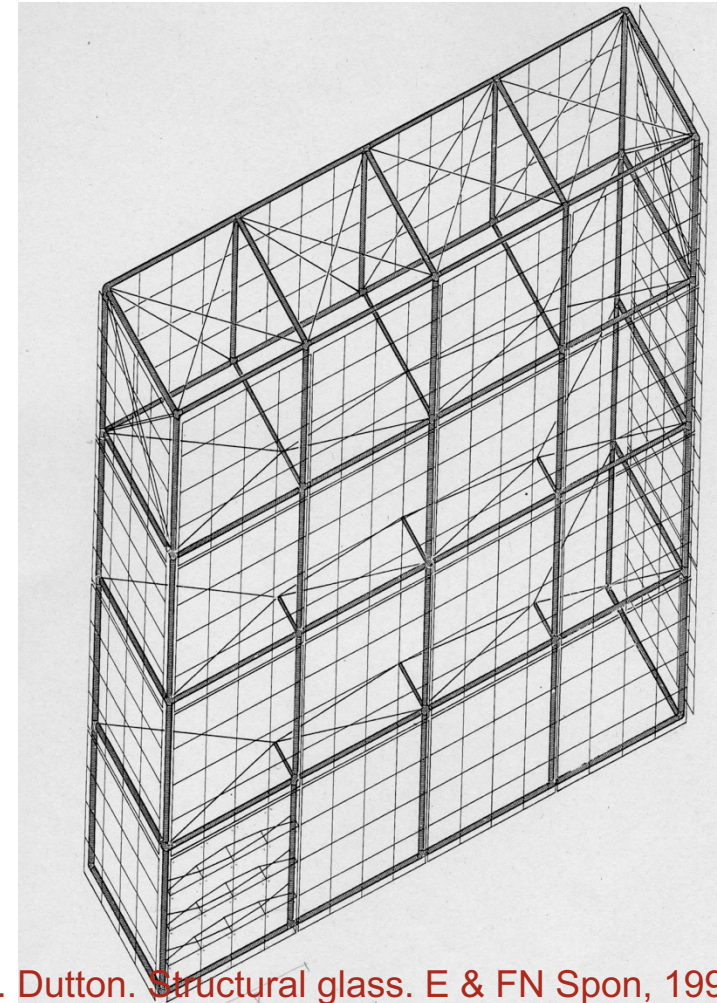
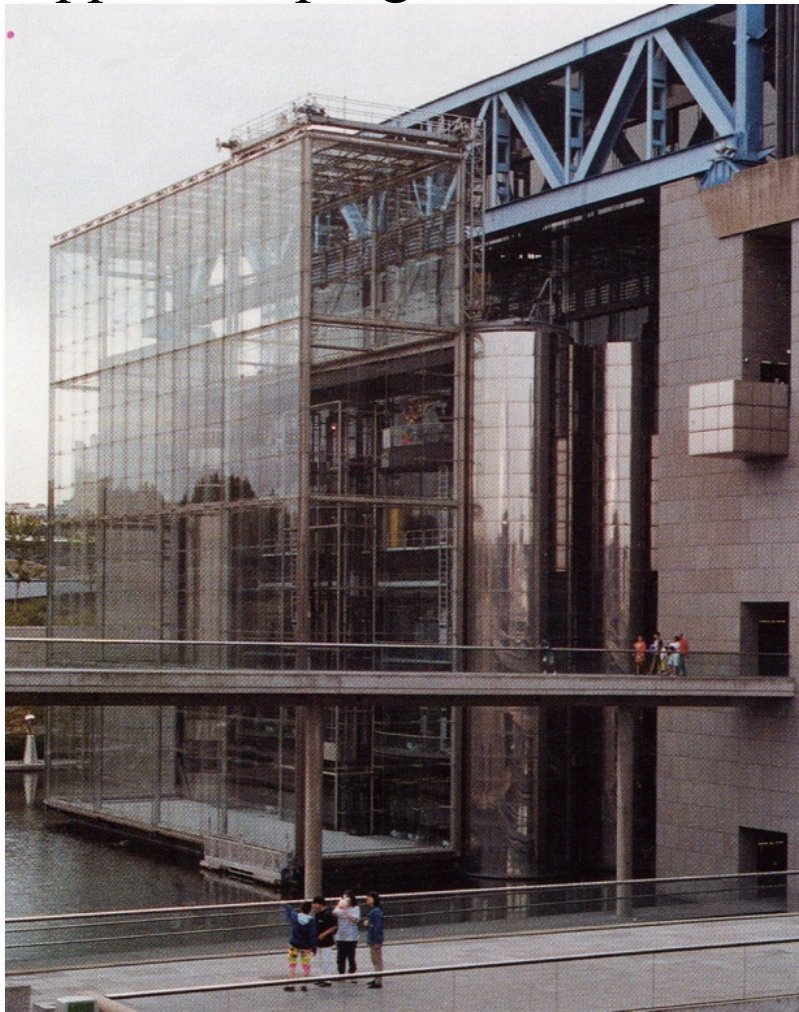


<http://www.ryan-hughes.net/ArchDetailsCanopyFrameset.htm>

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:



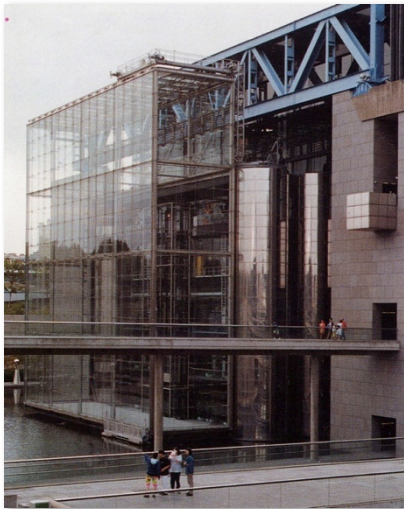
Prof. P. Rice, H. Dutton. *Structural glass*. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

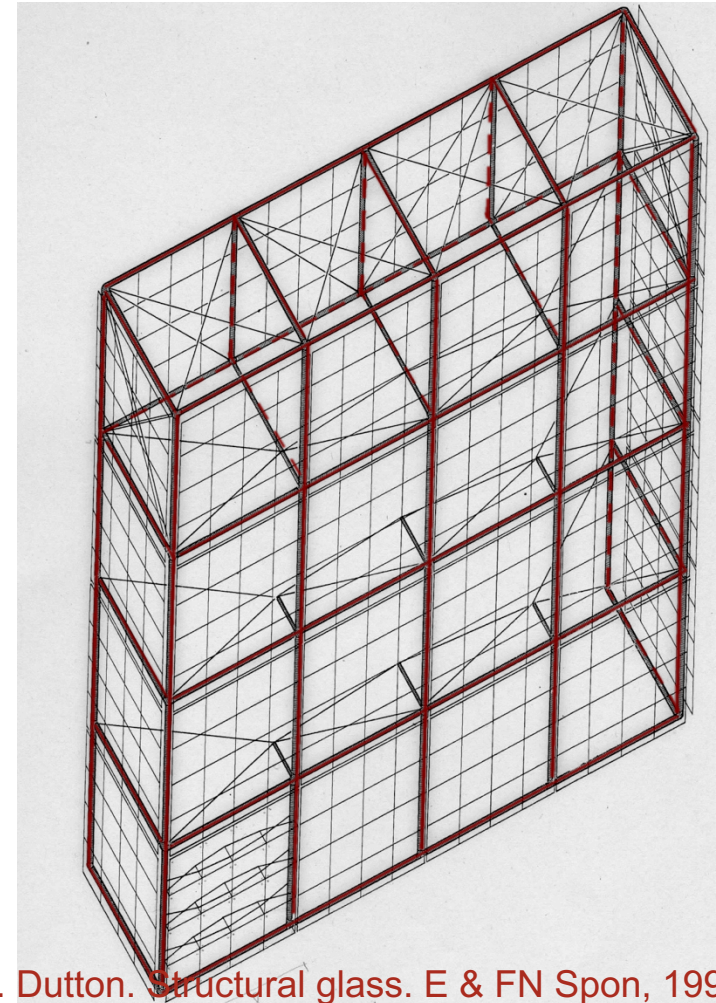
Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
 - telaio tubolare principale
 - reticolari a cavi pre-tesi
 - sistema di sospensione



diversi vincoli



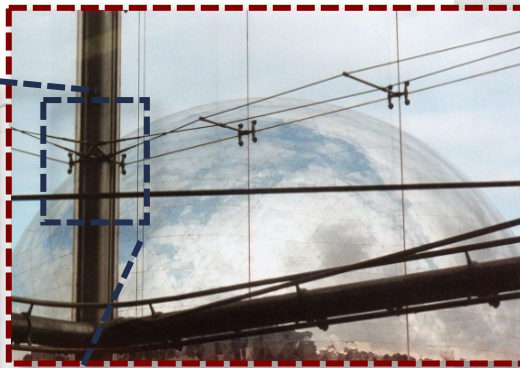
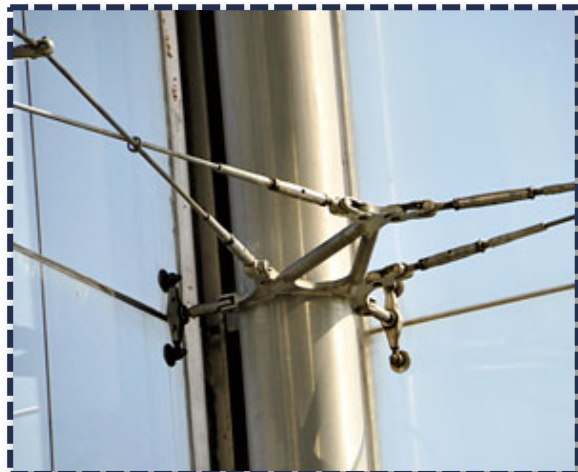
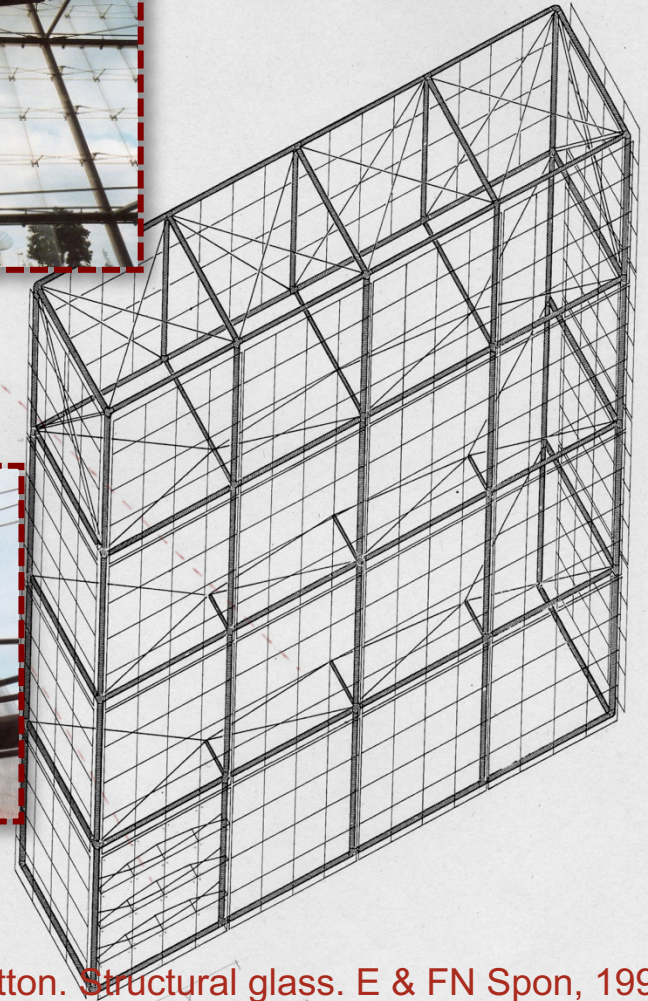
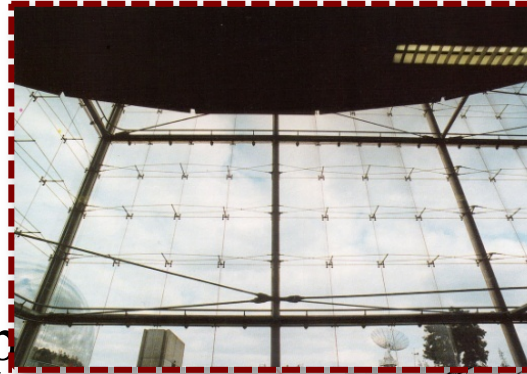
Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
 - telaio tubolare princip
 - reticolari a cavi pre-tesi
 - sistema di sospensione dei vetri



Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

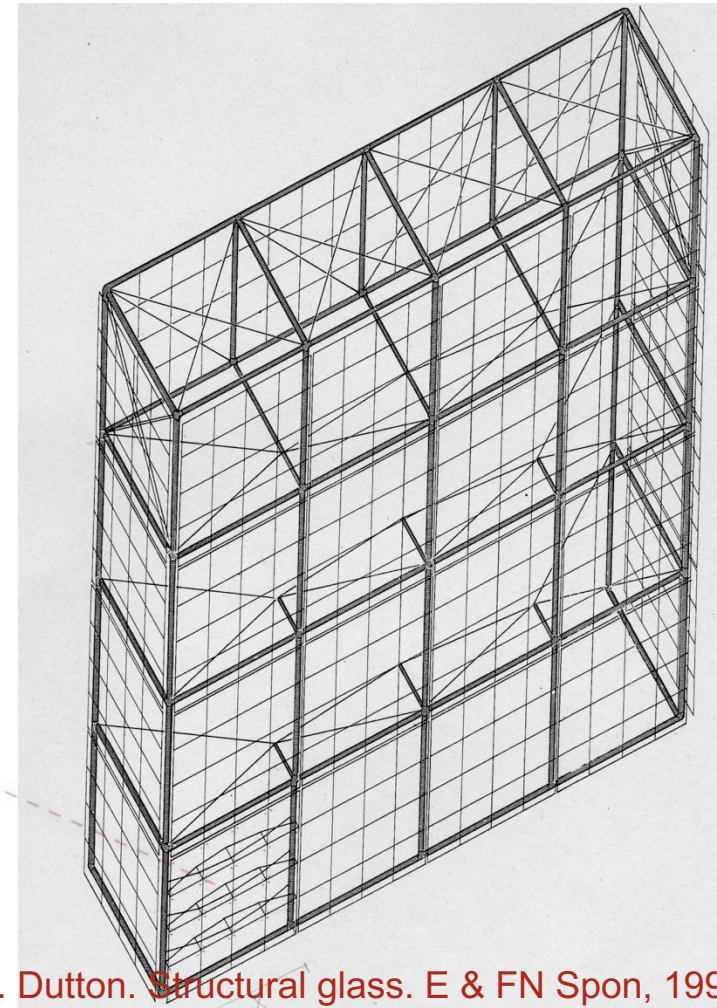
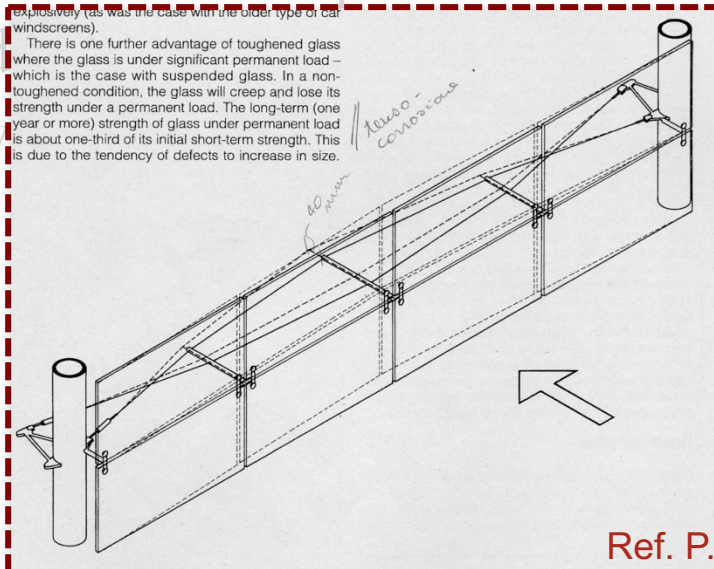
Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
 - telaio tubolare principale
 - reticolari a cavi pre-tesi

• sistema di sospensione



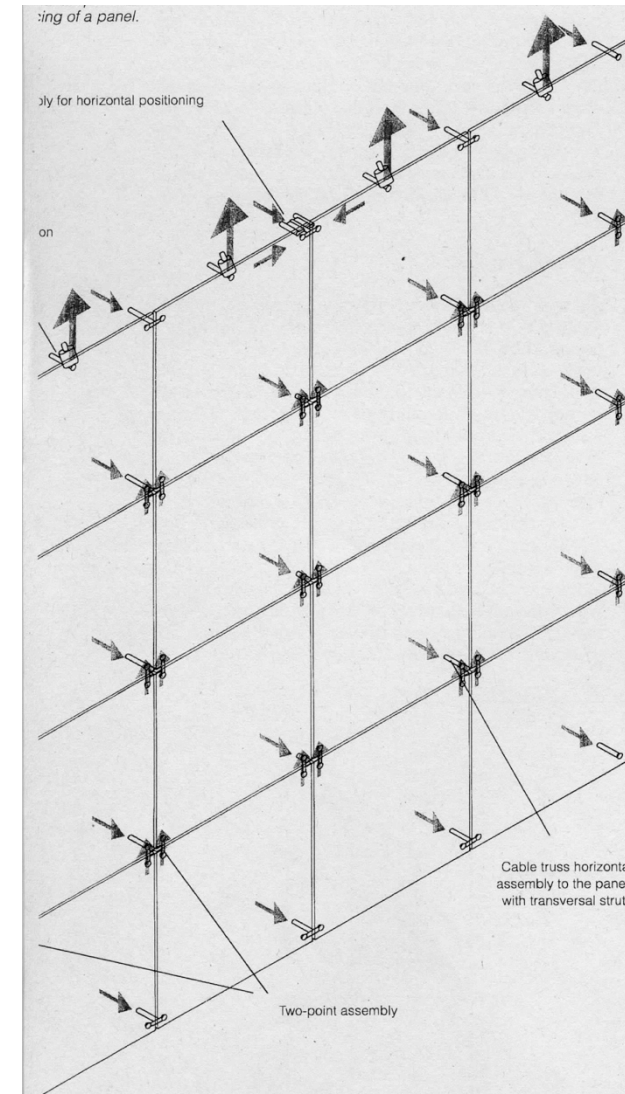
Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis
e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
 - telaio tubolare principale
 - reticolari a cavi pre-tesi
 - sistema di sospensione dei vetri
 - vetri e relativi vincoli

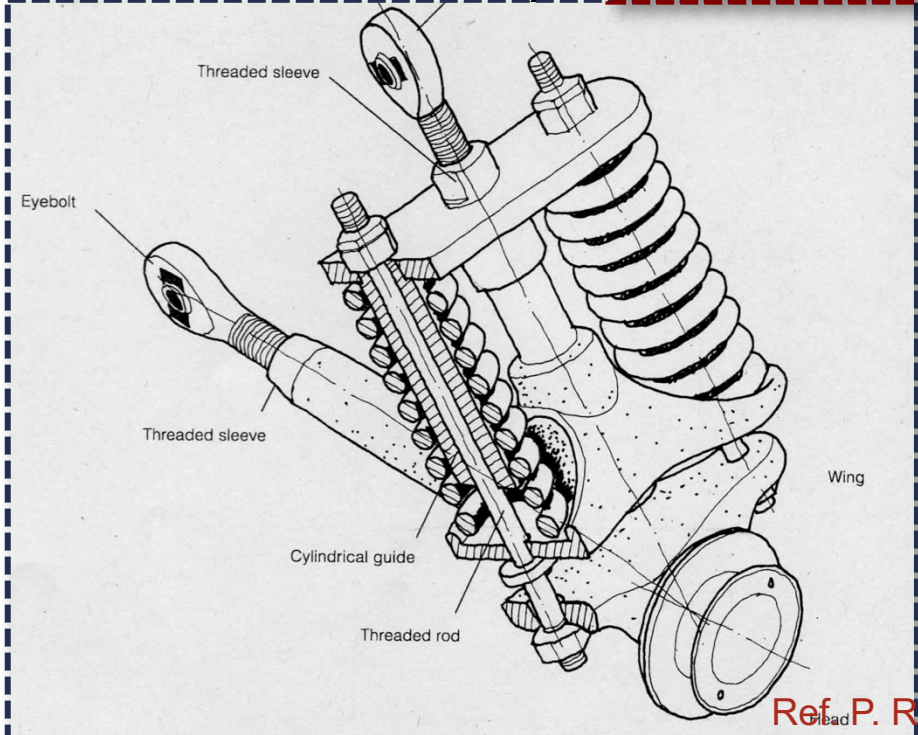
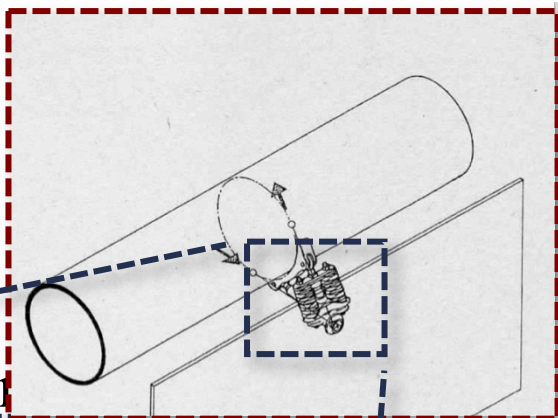


Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

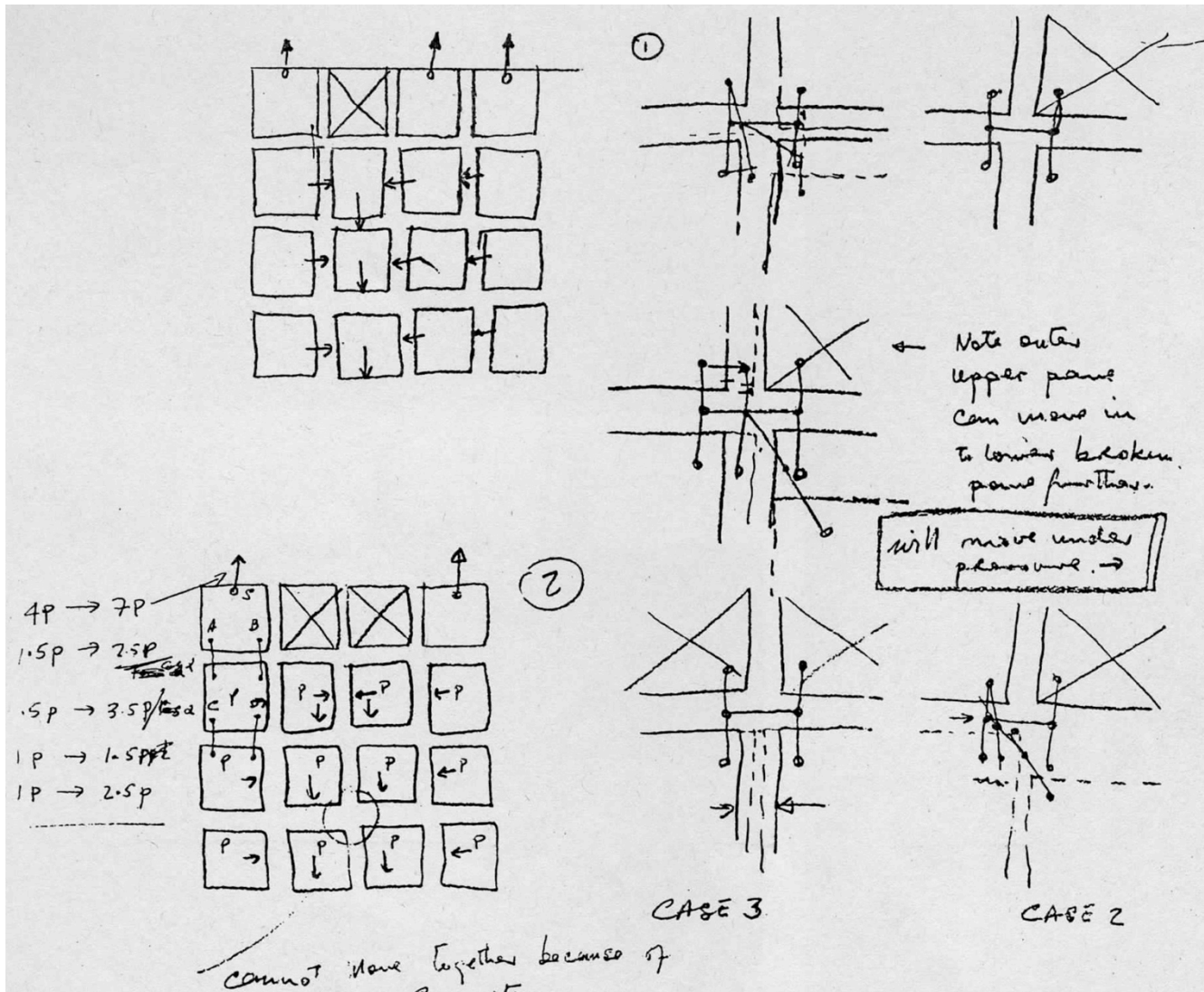
- prevedibilità;
- gerarchia strutturale;
- telaio tubolare primario



Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie



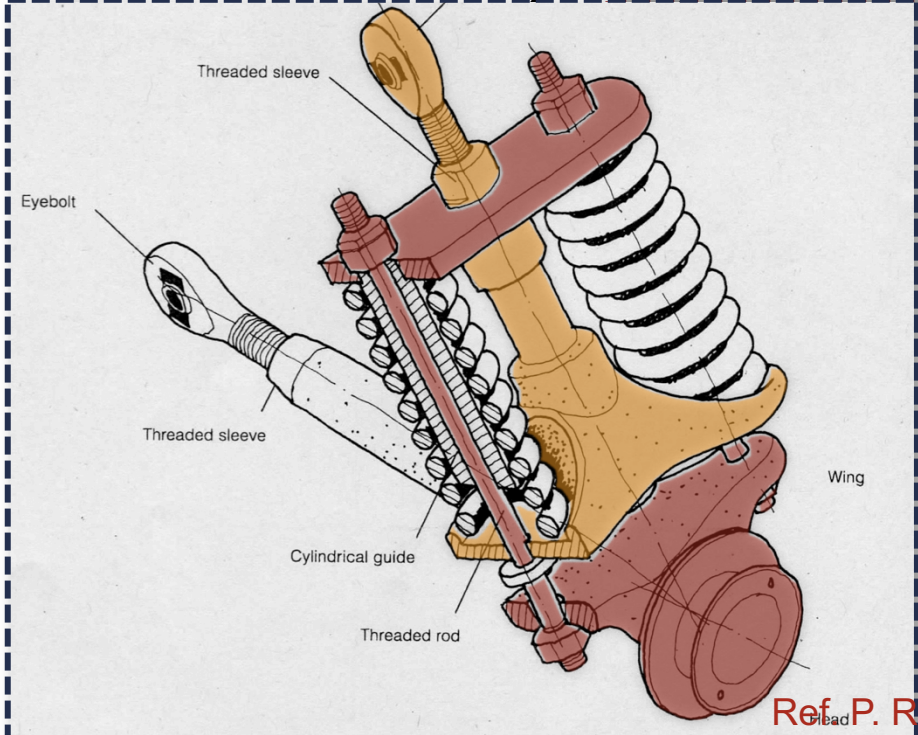
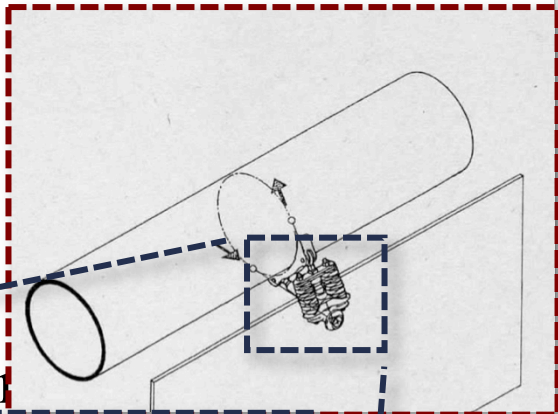
Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
- telaio tubolare primario



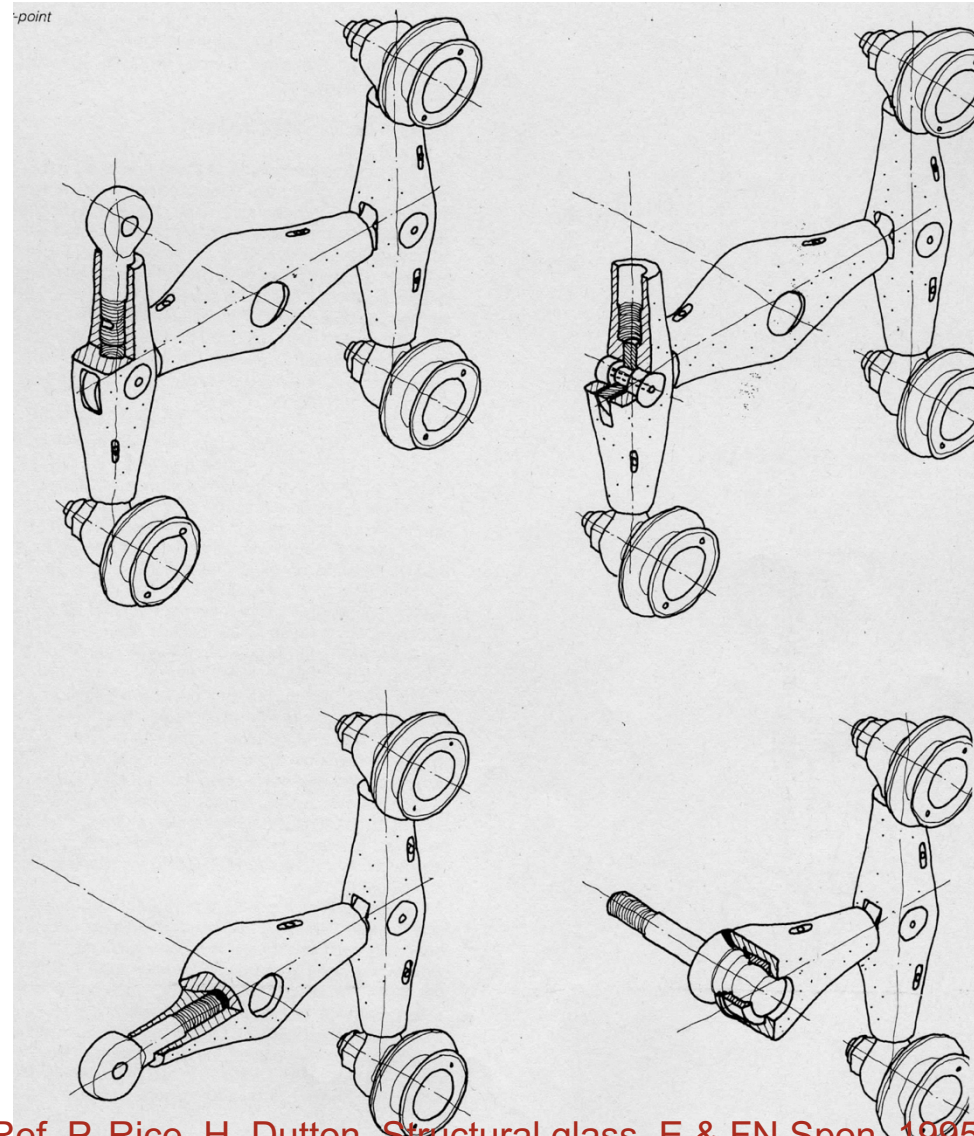
Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
 - telaio tubolare principale
 - reticolari a cavi pre-tesi
 - sistema di sospensione dei vetri
 - vetri e relativi vincoli



Ref. P. Rice, H. Dutton. Structural glass. E & FN Spon, 1995

Ridondanza di sistema

Grandes Serres - La Villette, 1983-1986, Parigi, P. Rice, M. Francis e I. Ritchie

Approccio progettuale:

- prevedibilità;
- gerarchia strutturale:
 - telaio tubolare principale
 - reticolari a cavi pre-tesi
 - sistema di sospensione dei vetri
 - vetri e relativi vincoli



La modellazione strutturale

Modelli (matematici, concettuali) che colgono le caratteristiche salienti dei sistemi strutturali (e che trascurino gli aspetti giudicati inessenziali).

I modelli strutturali vengono definiti schematizzando:

1. l'ambito (dominio) di analisi: ogni sistema è collegato al mondo circostante e con esso interagisce; il dominio di analisi deve essere abbastanza esteso da poter ritenere trascurabili gli effetti di ciò che viene escluso e abbastanza piccolo da poter essere agevolmente schematizzato;
2. la geometria: (elementi monodimensionali, bidimensionali, tridimensionali);
3. i collegamenti tra gli elementi che compongono il sistema strutturale (vincoli interni) e tra il sistema strutturale ed il mondo esterno (condizioni al contorno, vincoli esterni);
4. le azioni (peso proprio, sovraccarichi, cedimenti, distorsioni, vento, sisma, ...);
5. il comportamento del materiale.

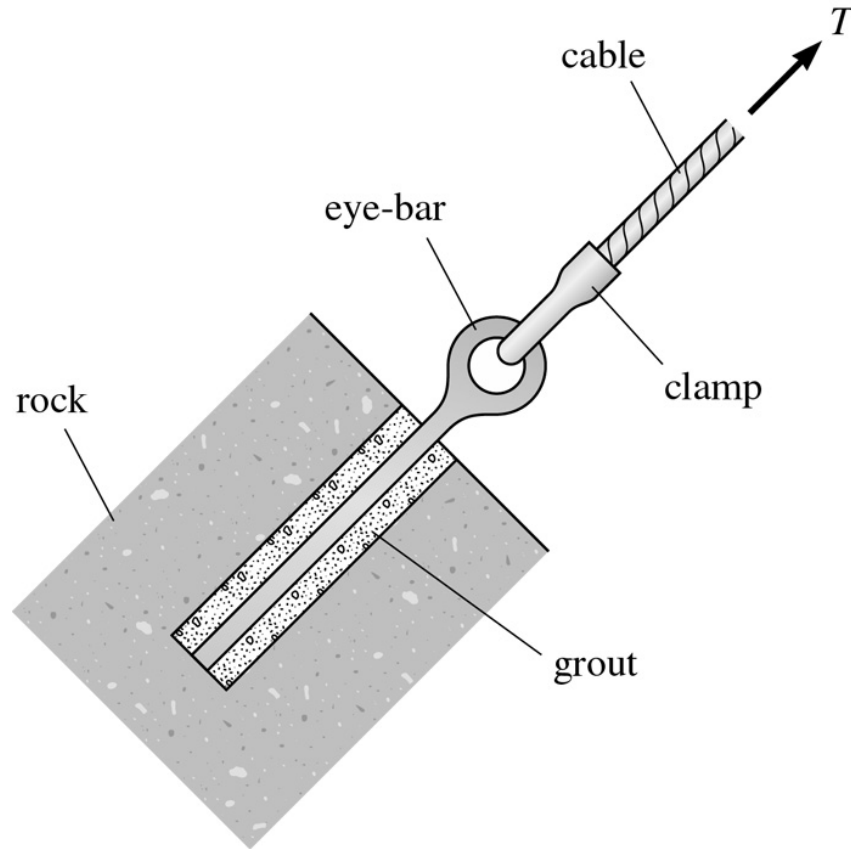


Geometria

elementi monodimensionali

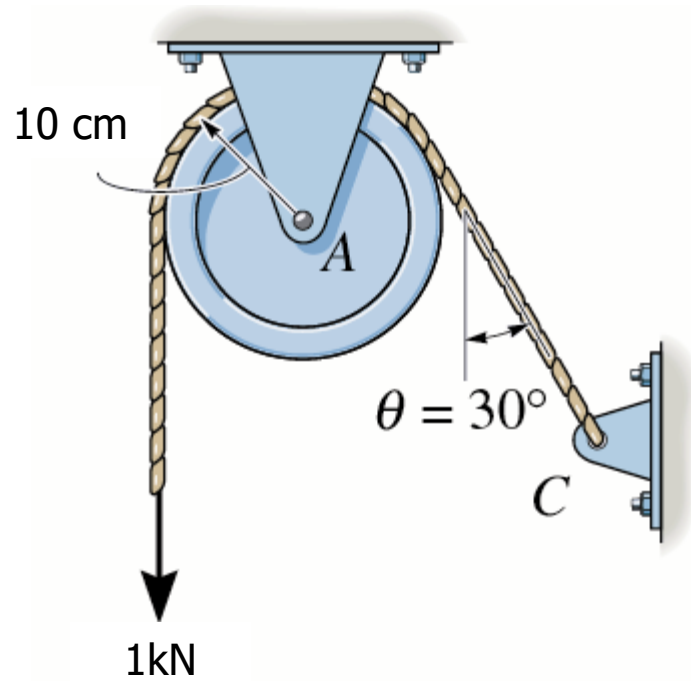
Elementi strutturali monodimensionali

- Funi – Cavi



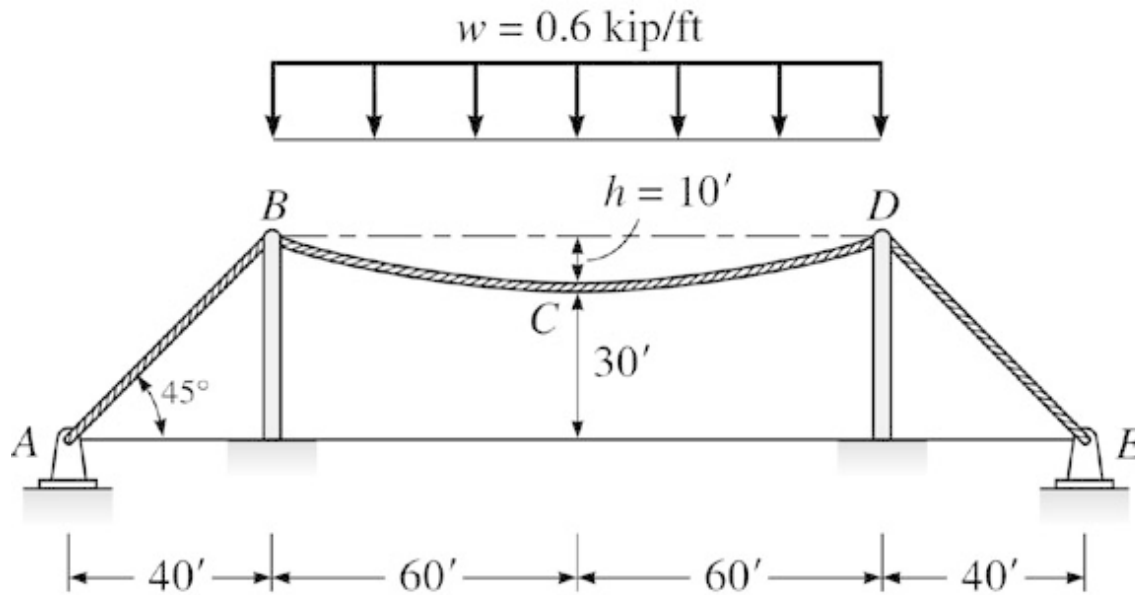
Elementi strutturali monodimensionali

- Funi – Cavi



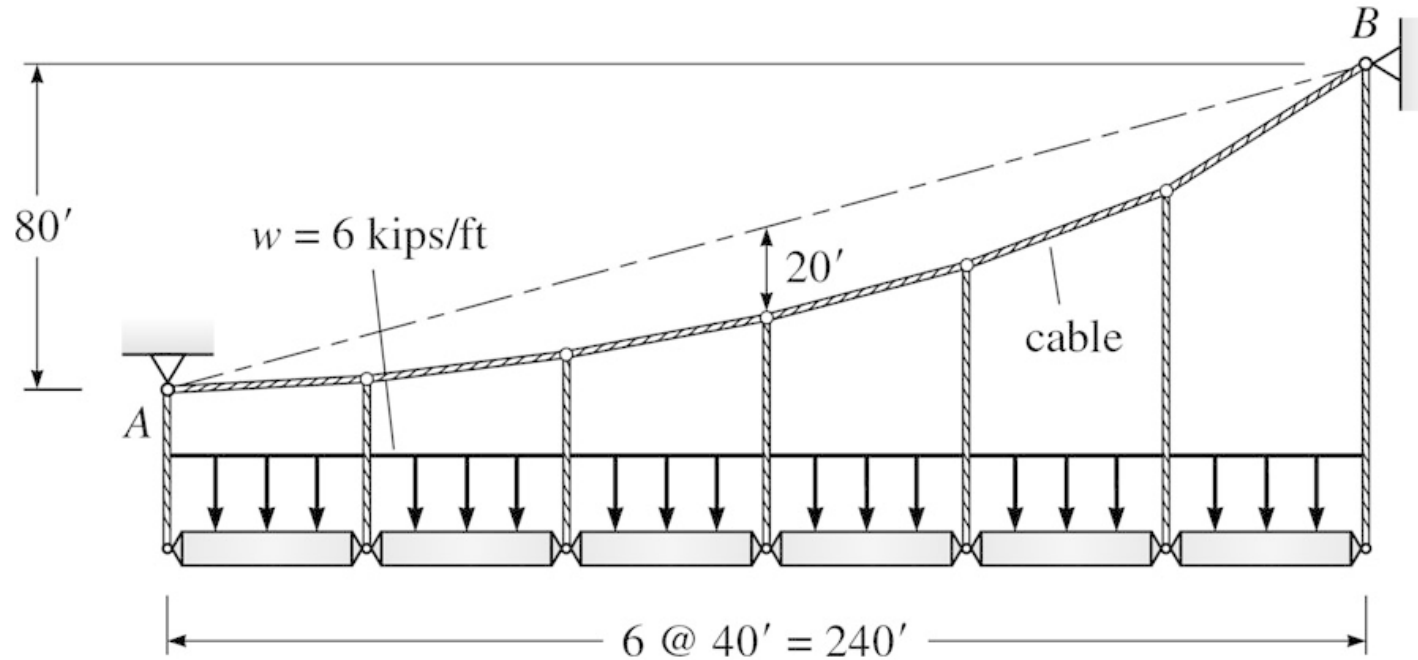
Elementi strutturali monodimensionali

- Funi sospese



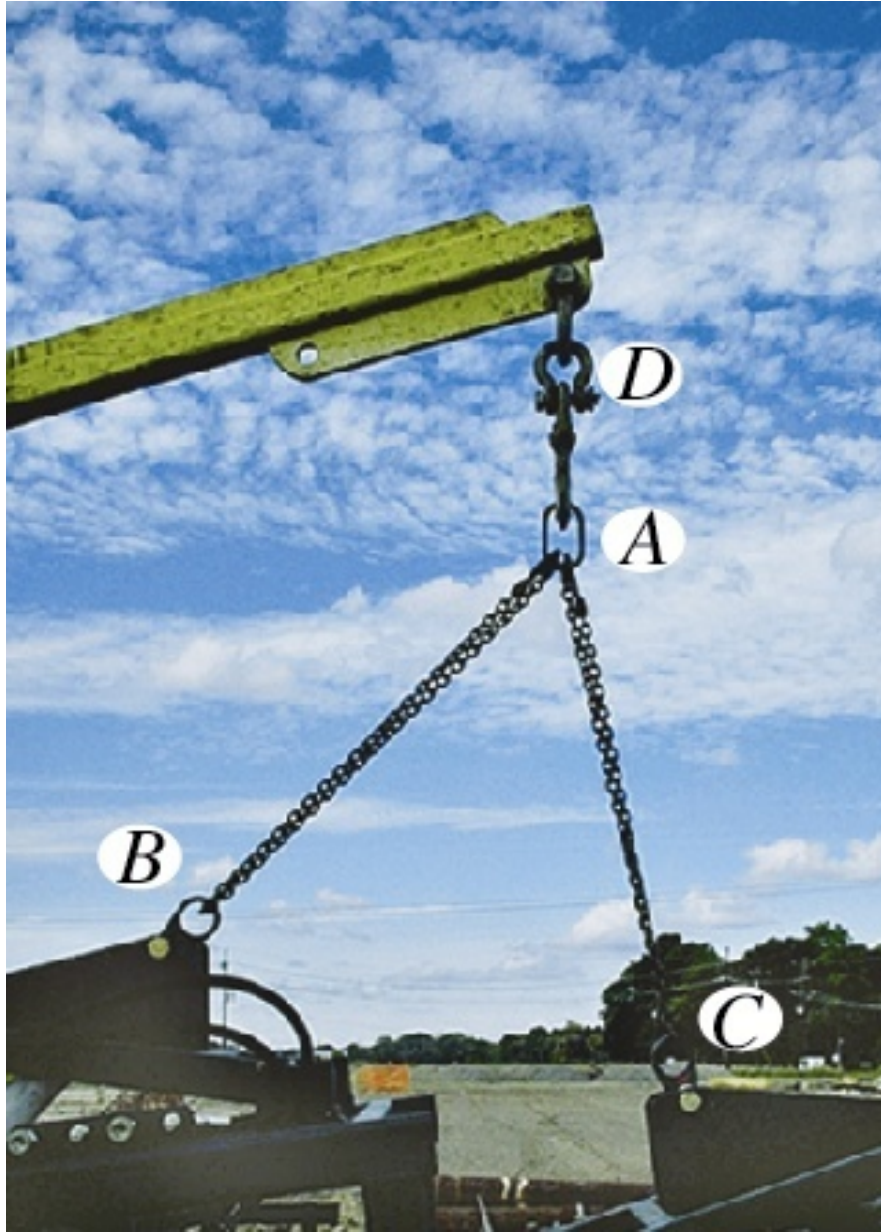
Elementi strutturali monodimensionali

- Funi sospese



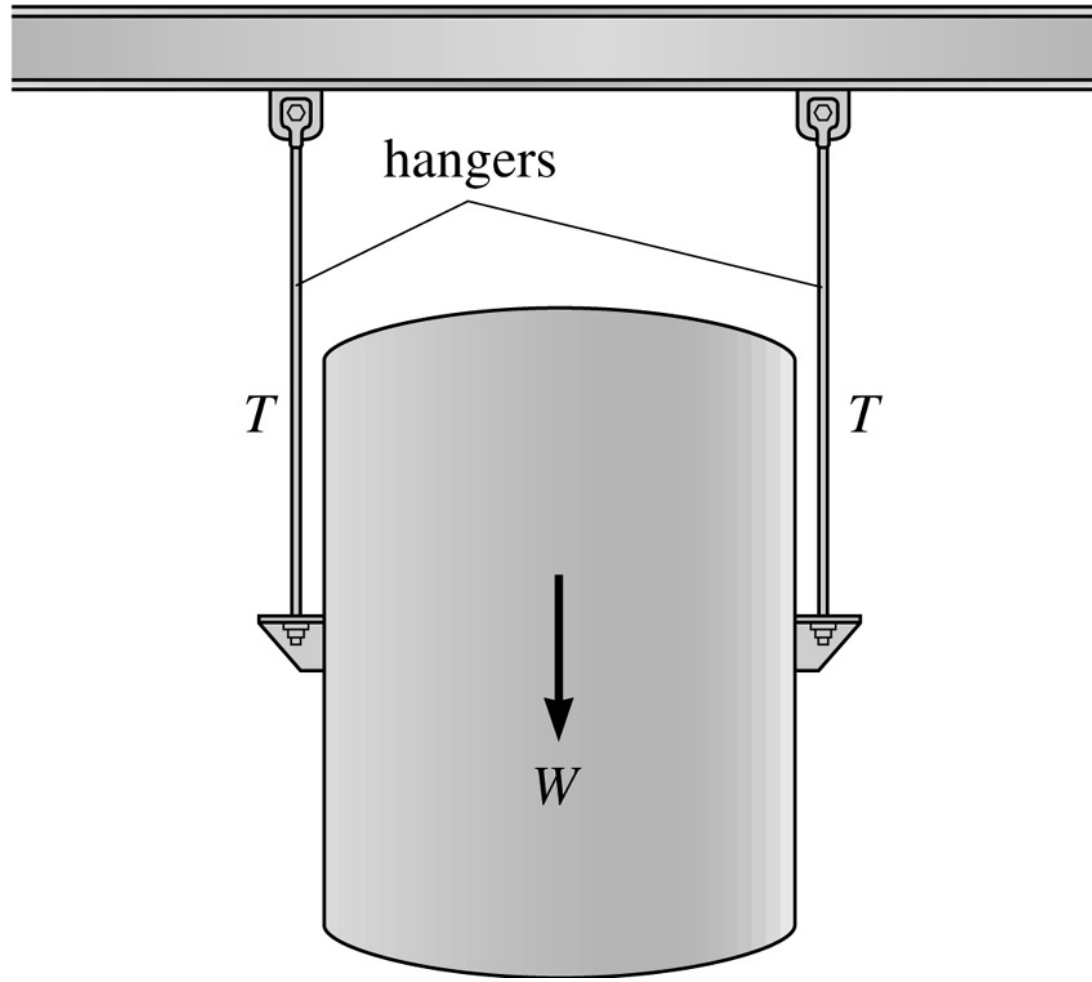
Elementi strutturali monodimensionali

- Catene



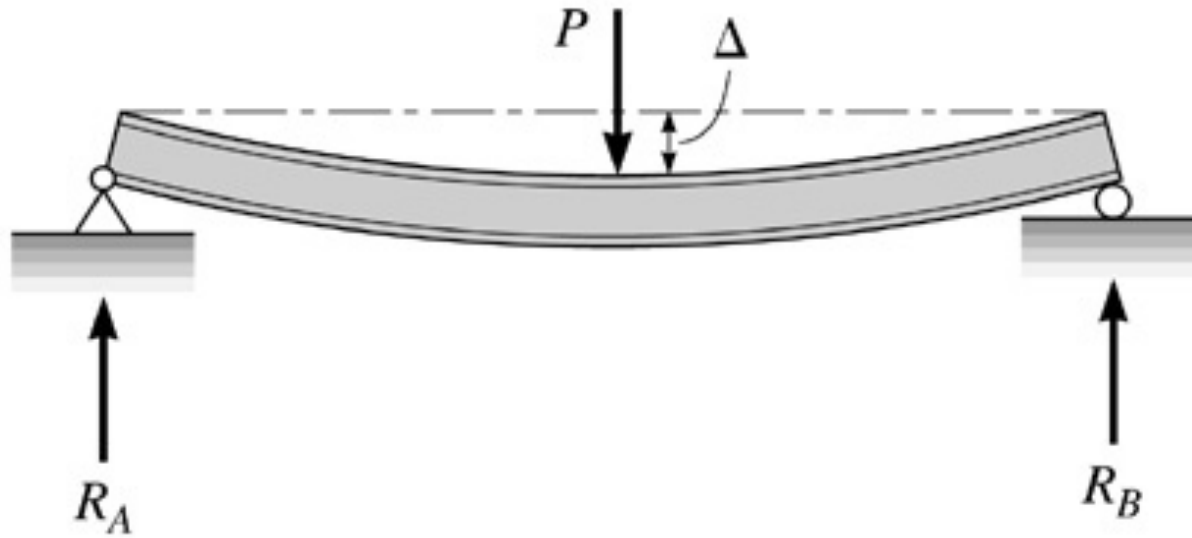
Elementi strutturali monodimensionali

- Aste



Elementi strutturali monodimensionali

- Travi



Elementi strutturali monodimensionali

Gli elementi strutturali monodimensionali presentano una dimensione prevalente rispetto alle altre. Tali elementi si distinguono in:

- Aste

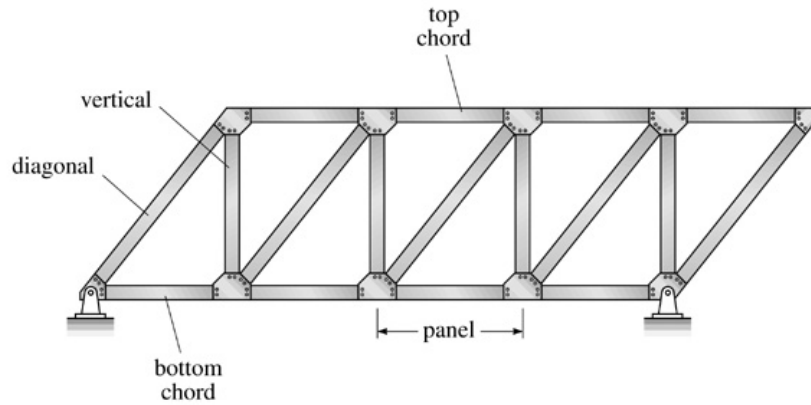
sono sollecitate solo nel senso parallelo al loro asse (a trazione o a compressione) e quindi sono globalmente soggette solo ad allungamenti o accorciamenti;

- Travi

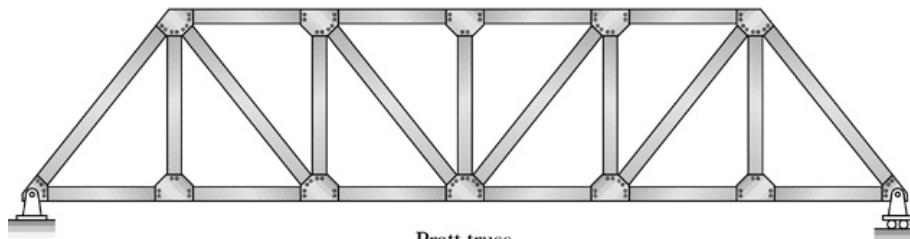
sono sollecitate anche in direzione ortogonale al loro asse e quindi si inflettono (oltre eventualmente ad allungarsi o accorciarsi se sollecitate anche a trazione o compressione).

Elementi strutturali monodimensionali

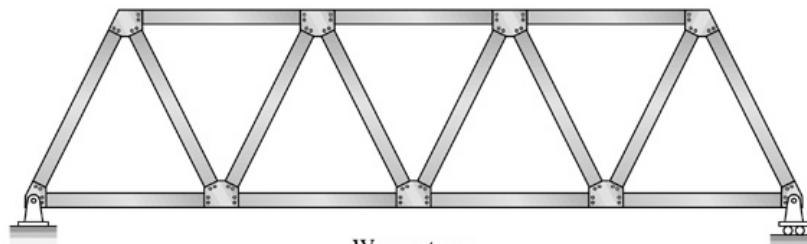
- Sistemi reticolari



(a)



Pratt truss



Warren truss

(b)

Elementi strutturali monodimensionali

- Sistemi reticolari



Elementi strutturali monodimensionali

- Sistemi di aste e travi

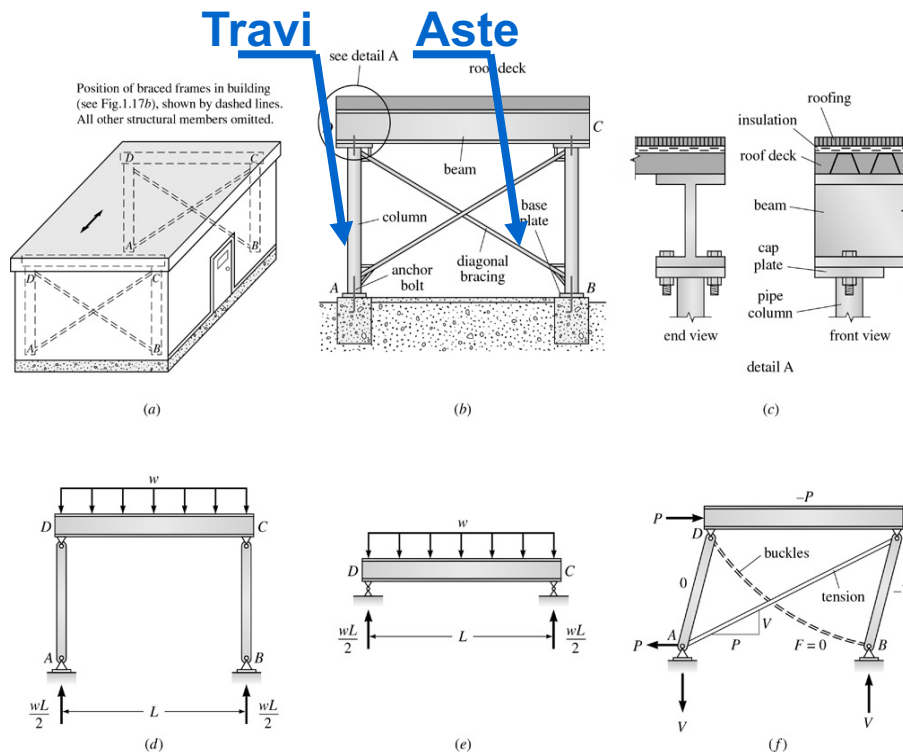


Elementi strutturali monodimensionali

- Sistemi di aste e travi

Molti sistemi strutturali reali sono modellabili come assemblaggi di elementi monodimensionali.

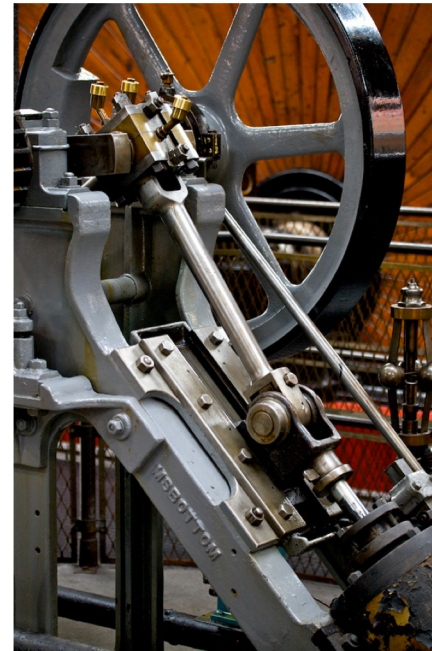
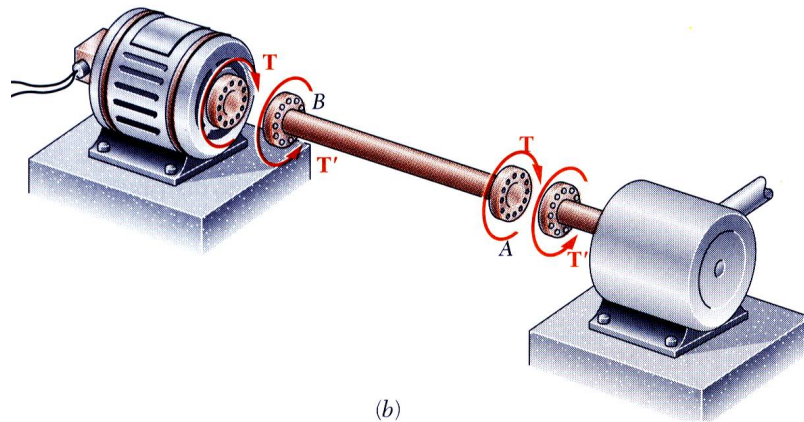
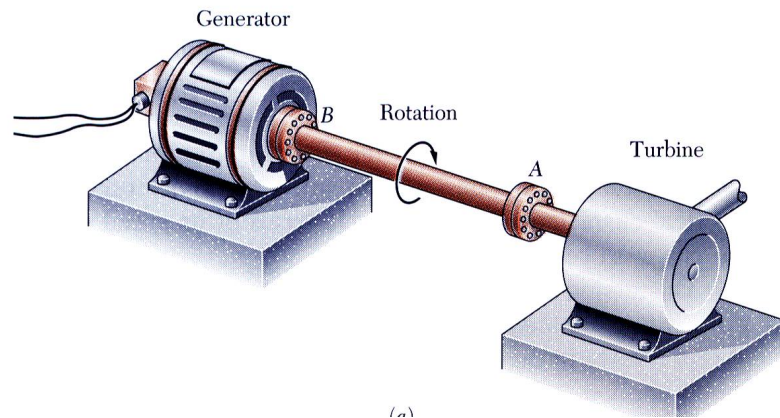
Un sistema strutturale composto da aste e travi è detto telaio.



Elementi strutturali monodimensionali

- Alberi

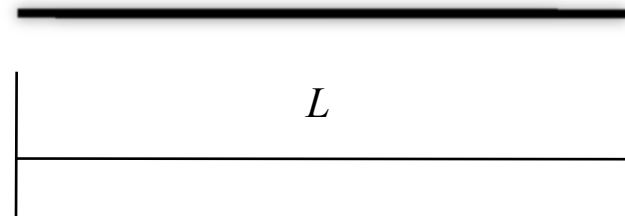
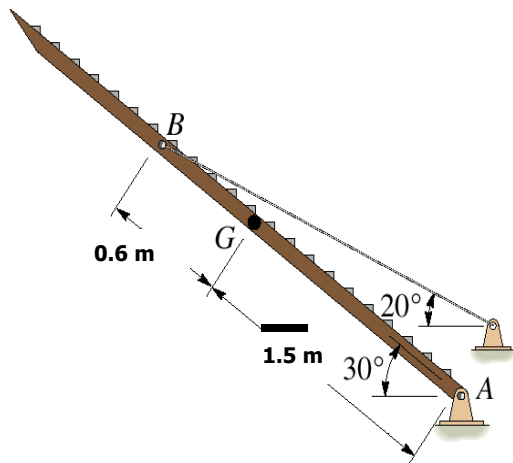
Gli alberi sono elementi monodimensionali (una dimensione prevalente rispetto alle altre) sollecitati da *coppie torcenti*.



Elementi strutturali monodimensionali

La modellazione strutturale è una operazione necessaria che permette di analizzare i sistemi REALI. L'oggetto del nostro studio è allora la realtà fisica; gli schemi ed i modelli fanno parte di strumenti utilizzabili per la sua analisi.

Negli schemi strutturali utilizzati in questo corso, gli elementi monodimensionali saranno rappresentati come segmenti di lunghezza "L" proporzionale (in scala) alla dimensione longitudinale dell'elemento che rappresentano

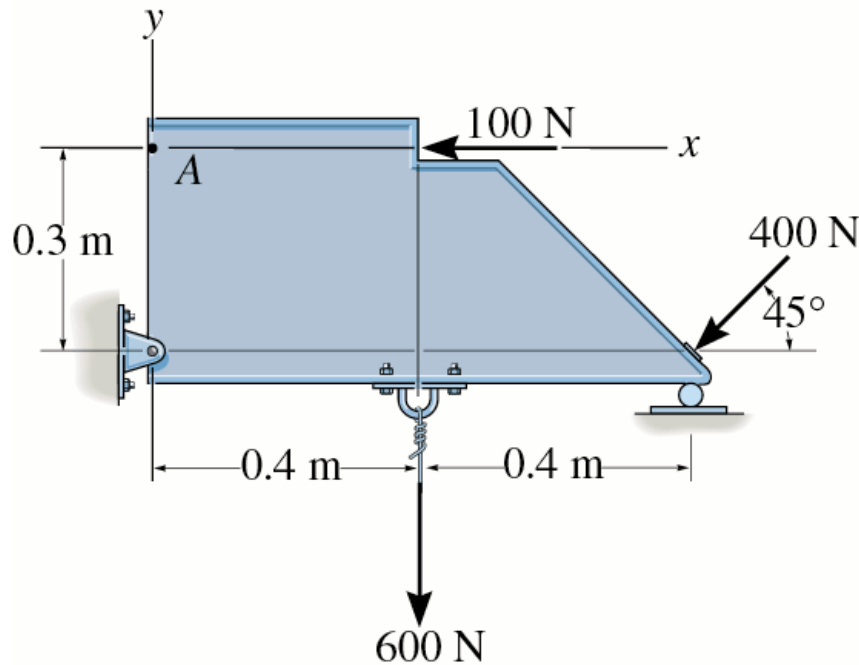




Geometria

elementi bidimensionali

Elementi strutturali bidimensionali



- Lastre

Le lastre sono elementi bidimensionali piani (la superficie media è contenuta in un piano) carichi “nel piano” (tutti i carichi sono contenuti nel piano medio). Gli spostamenti di tutti i punti materiali che stanno sul piano di simmetria del sistema hanno componente trasversale (parallela allo spessore) nulla. Lo schema a lato è quello di una lastra.

- Piastre

Le piastre sono elementi bidimensionali piani carichi anche “fuori piano”. I punti materiali che la costituiscono possono avere spostamenti trasversali non nulli.

Elementi strutturali bidimensionali



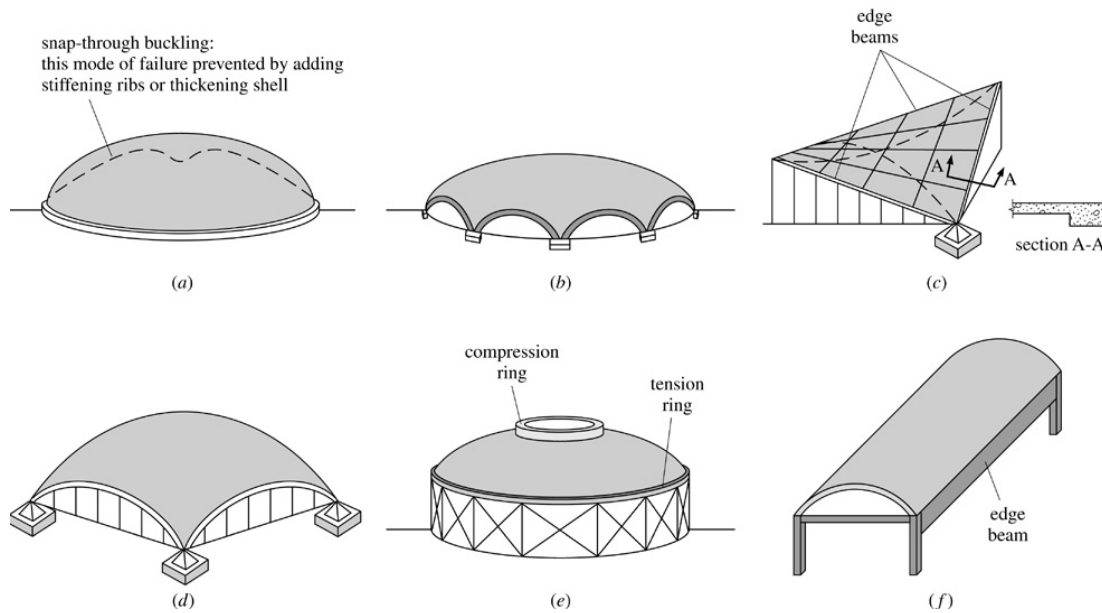
- Gusci

I gusci rappresentano elementi strutturali aventi spessore molto più piccolo delle altre dimensioni e superficie media non contenuta in un piano. In figura sono riportate delle strutture schematizzabili come gusci sferici o cilindrici.



Elementi strutturali bidimensionali

Molte parti di strutture reali sono schematizzabili con elementi bidimensionali. Negli schemi strutturali essi si rappresentano con una linea continua chiusa che ne rappresenta, in scala, il contorno.





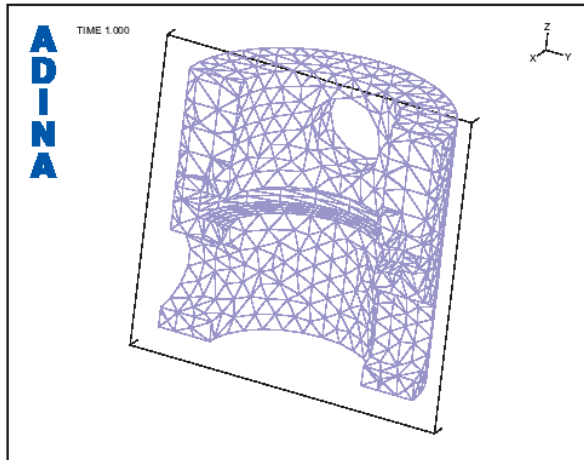
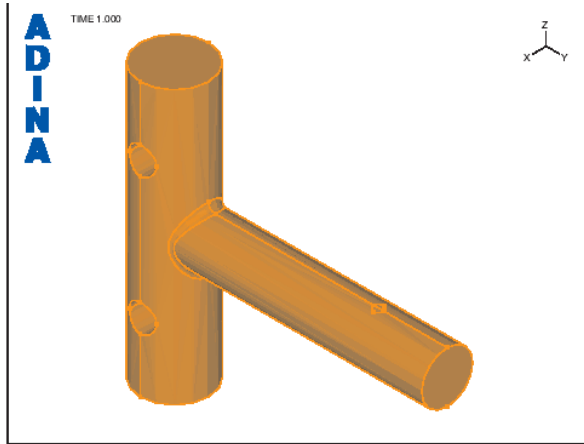
Geometria

elementi tridimensionali

Elementi strutturali tridimensionali

Gli elementi strutturali che non rientrano nelle precedenti categorie devono essere schematizzate nelle loro dimensioni reali.

La loro analisi viene effettuata con metodi (elementi finiti, elementi di contorno, ...) che non rientrano nei contenuti del presente corso.



La modellazione strutturale

Modelli (matematici, concettuali) che colgono le caratteristiche salienti dei sistemi strutturali (e che trascurino gli aspetti giudicati inessenziali).

I modelli strutturali vengono definiti schematizzando:

1. l'ambito (dominio) di analisi: ogni sistema è collegato al mondo circostante e con esso interagisce; il dominio di analisi deve essere abbastanza esteso da poter ritenere trascurabili gli effetti di ciò che viene escluso e abbastanza piccolo da poter essere agevolmente schematizzato;
2. la geometria: (elementi monodimensionali, bidimensionali, tridimensionali);
3. i collegamenti tra gli elementi che compongono il sistema strutturale (vincoli interni) e tra il sistema strutturale ed il mondo esterno (condizioni al contorno, vincoli esterni);
4. le azioni (peso proprio, sovraccarichi, cedimenti, distorsioni, vento, sisma, ...);
5. il comportamento del materiale.

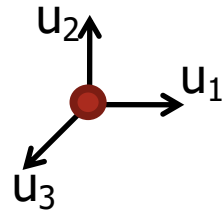


Schematizzazione dei collegamenti

Vincoli interni e vincoli esterni

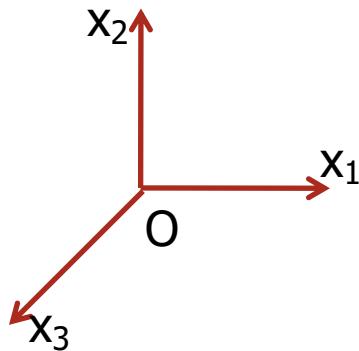
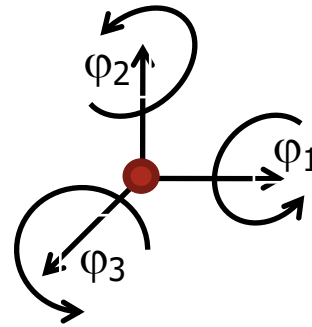
I gradi di libertà di un corpo rigido

3 g.d.l. traslazionali



+

3 g.d.l. rotazionali



$$(\underline{X}_i(t) - \underline{X}_1(t)) \cdot (d\underline{X}_i - d\underline{X}_1) = 0$$

$$d\underline{X}_i = d\underline{X}_1 + d\underline{\varphi} \wedge (\underline{X}_i(t) - \underline{X}_1(t))$$

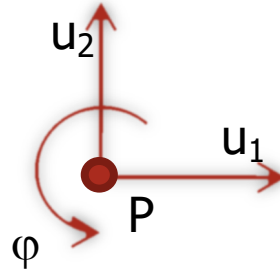
$$\forall d\underline{\varphi} : |d\underline{\varphi}| \ll 1$$

Un elemento strutturale nello **spazio tridimensionale**, libero (e quindi non collegato a nessun'altro oggetto) ha la possibilità di traslare e di ruotare. Fissato un sistema di riferimento cartesiano ortogonale destrorso (O, x_1, x_2, x_3) , è possibile rappresentarne la traslazione \mathbf{u} e la rotazione $\boldsymbol{\varphi}$ del corpo in esame attraverso le componenti dei vettori \mathbf{u} e $\boldsymbol{\varphi}$ rispetto al sistema di riferimento fissato (3 componenti di traslazione + 3 componenti di rotazione = 6 possibilità di movimento indipendenti). Per tale motivo si dice che un corpo, nello spazio ha **6 gradi di libertà (g.d.l.)** corrispondenti alle componenti di moto sopra descritte.

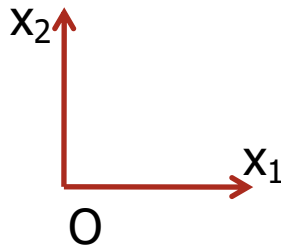
I gradi di libertà di un punto materiale

2 g.d.l. traslazionali

+



1 g.d.l. rotazionale



$$\begin{cases} dx_i = dx_1 - d\varphi_z (y_i - y_1) \\ dy_i = dy_1 + d\varphi_z (x_i - x_1) \end{cases}$$

Per la maggior parte delle analisi che verranno effettuate nell'ambito del presente corso ci riferiremo ad uno spazio di lavoro ridotto, ossia bidimensionale. Analizzeremo corpi formati da punti materiali giacenti su un piano ed assumeremo che il moto (rigido) del corpo sia tale da mantenerne tutti i punti materiali su tale piano. In tale condizione ogni punto materiale può avere al più due componenti di spostamento e una componente di rotazione. Per tale motivo si dice che un corpo rigido ha, nel piano, **3 gradi di libertà** corrispondenti alle componenti di moto sopra descritte e schematizzate nella figura a fianco.

I vincoli strutturali

I vincoli sono dispositivi che limitano alcuni gradi di libertà di un punto. In maniera duale possono essere visti come dispositivi che consentono i gradi di libertà che non limitano. I gradi di libertà non limitati da un vincolo sono detti **sconnessioni**. Per i vincoli di sistemi piani vale quanto indicato nella seguente tabella

Tipo di vincolo	Grado di vincolo	Grado di sconnessione
semplice	1	2
doppio	2	1
triplo	3	0

Definizione 1.7 *Si definisce vincolo un dispositivo che limita le posizioni e le velocità dei punti del sistema materiale e risulta esprimibile analiticamente mediante una relazione fra le posizioni e le velocità dei punti del sistema stesso.*

Bilaterale	Unilaterale
Scleronomo	Reonomo
Olonomo	Anolonomo
Puntuale	Continuo
Liscio	Scabro



Modellazione dei collegamenti

Vincoli semplici

ogni vincolo semplice si traduce in
una uguaglianza sulle componenti di spostamento

Vincoli semplici

- Pendolo esterno

$$v_A = 0$$



Vincoli semplici

- Contatto senza attrito

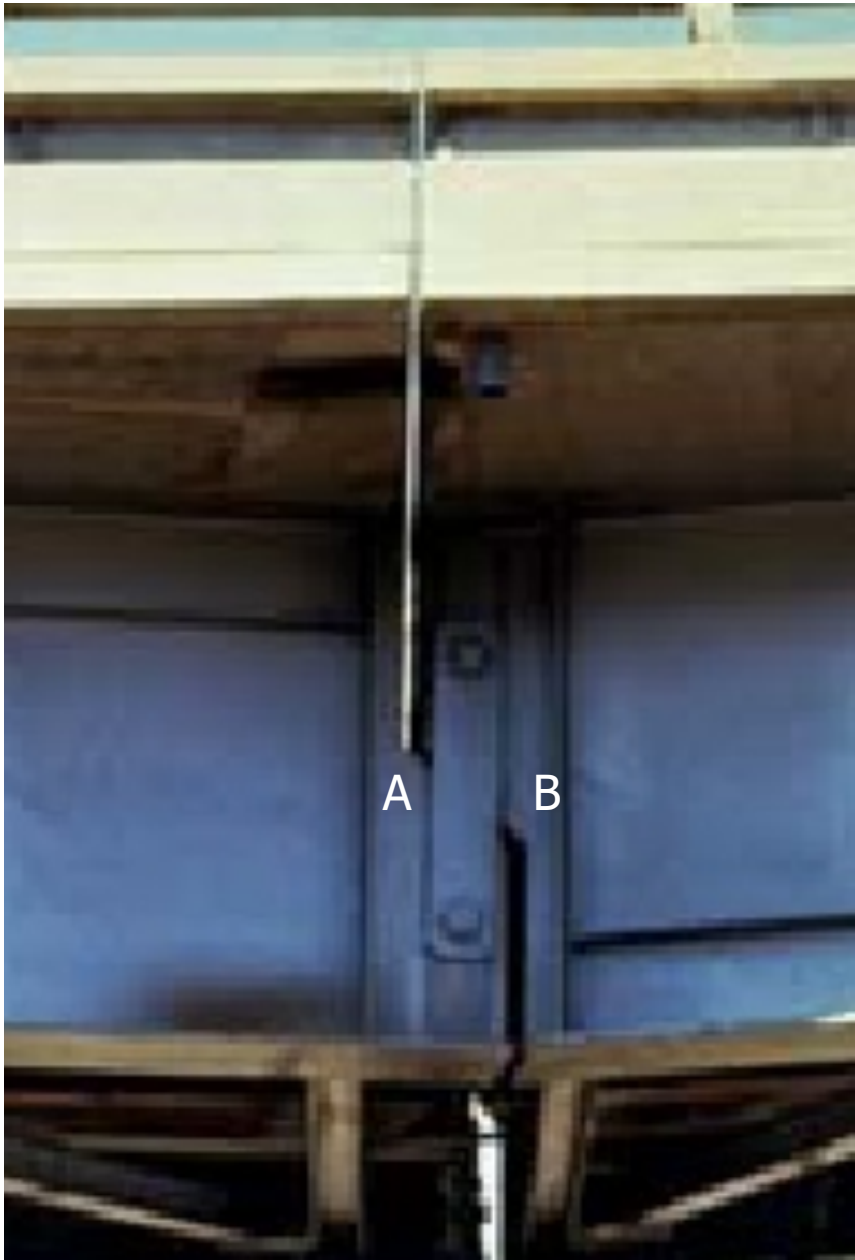
$$v_A = 0$$



Vincoli semplici

- Pendolo interno

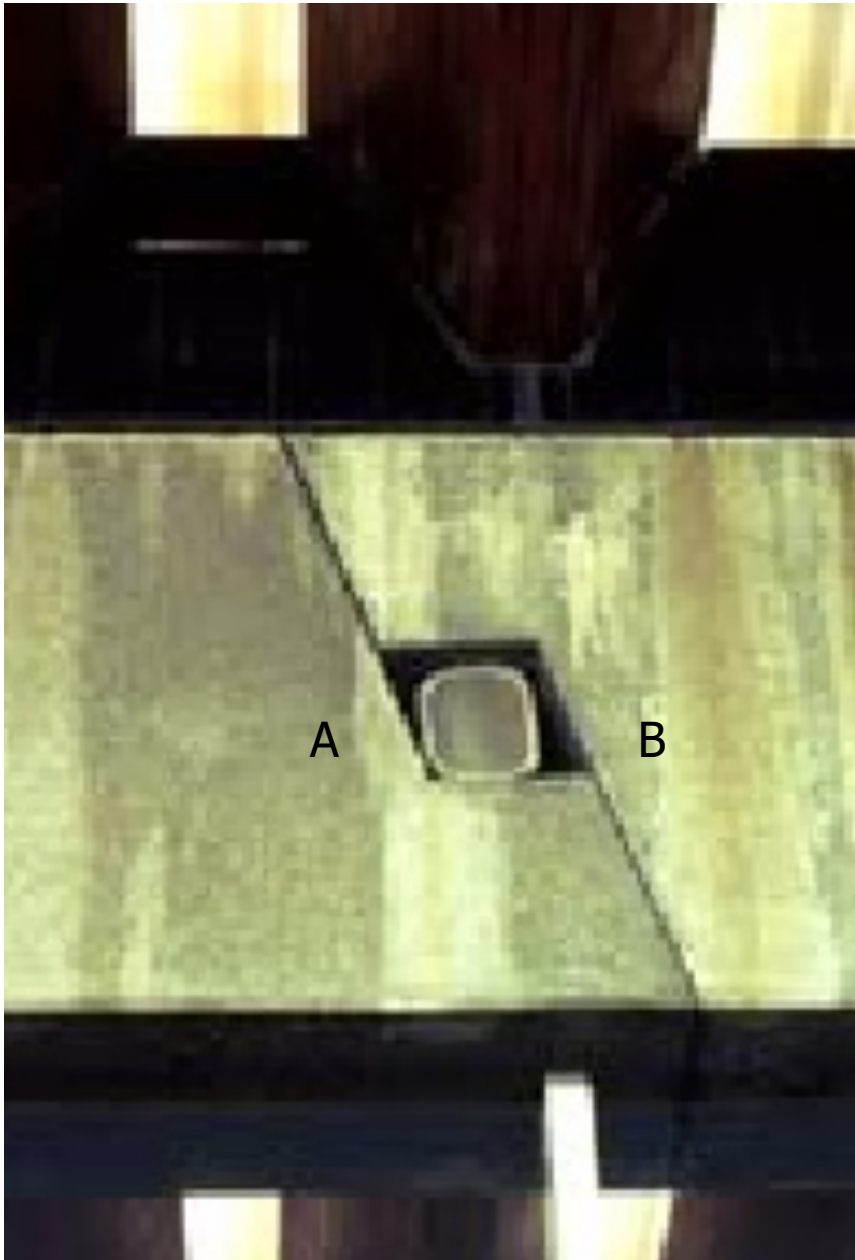
$$v_A = v_B$$



Vincoli semplici

- Pendolo interno

$$v_A = v_B$$



Vincoli semplici





Modellazione dei collegamenti

Vincoli doppi

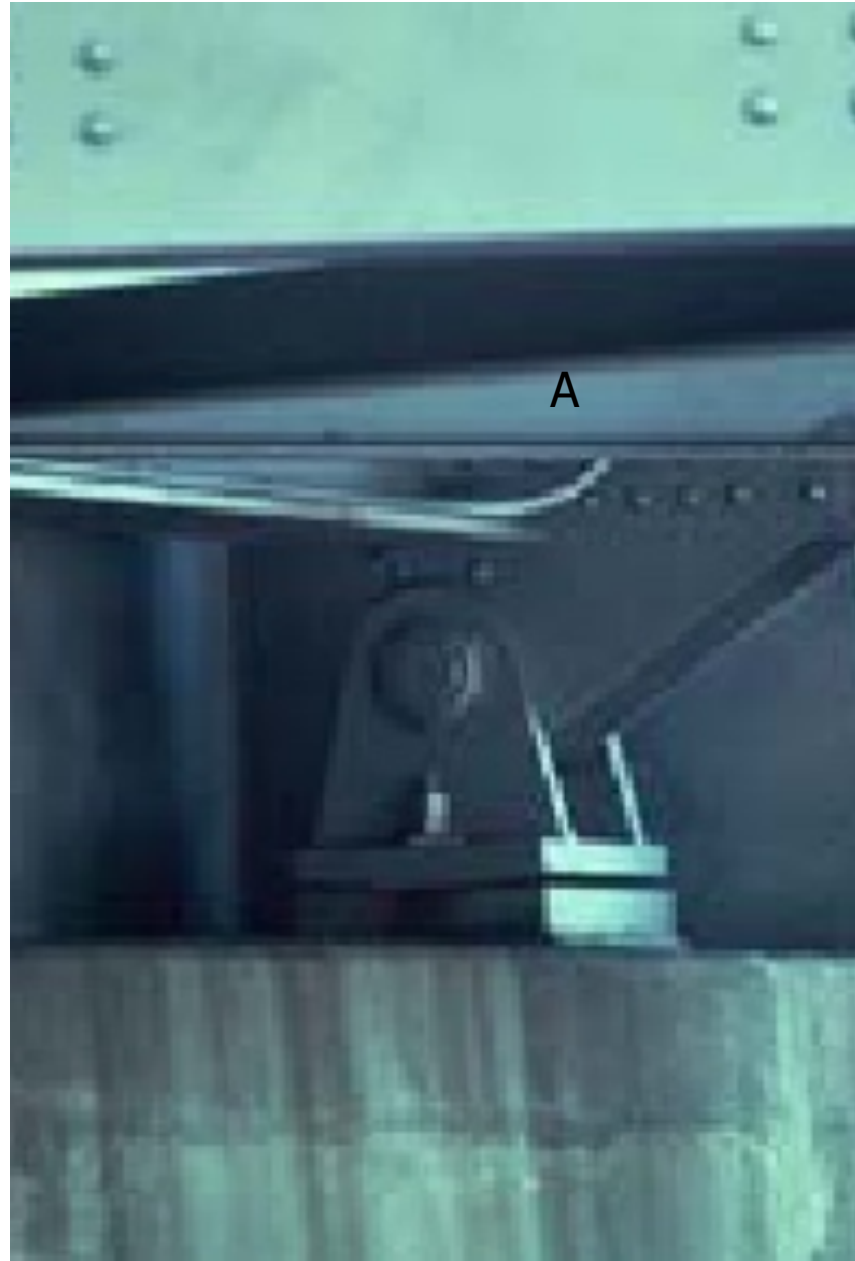
ogni vincolo doppio si traduce in
due uguaglianze sulle componenti di spostamento

Vincoli doppi

- Cerniera esterna

$$u_A=0$$

$$v_A=0$$



Vincoli doppi

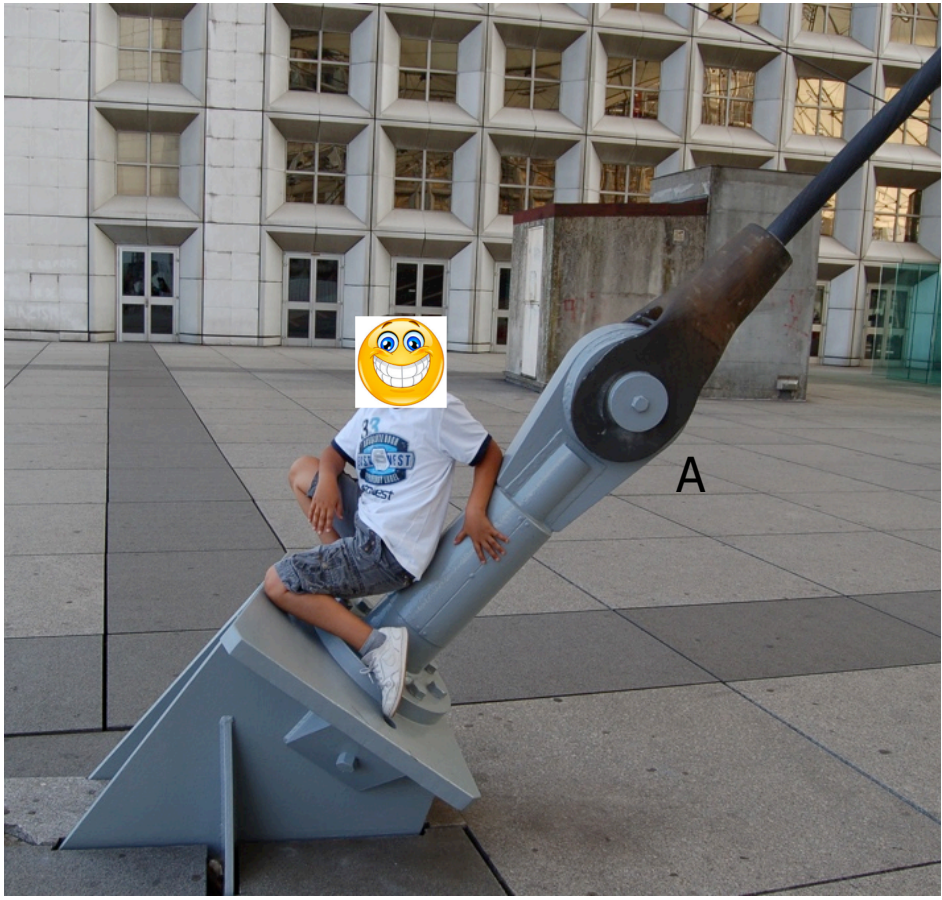
- Cerniera esterna

$$u_A = 0$$

$$v_A = 0$$



Vincoli doppi



- Cerniera esterna

$$u_A = 0$$

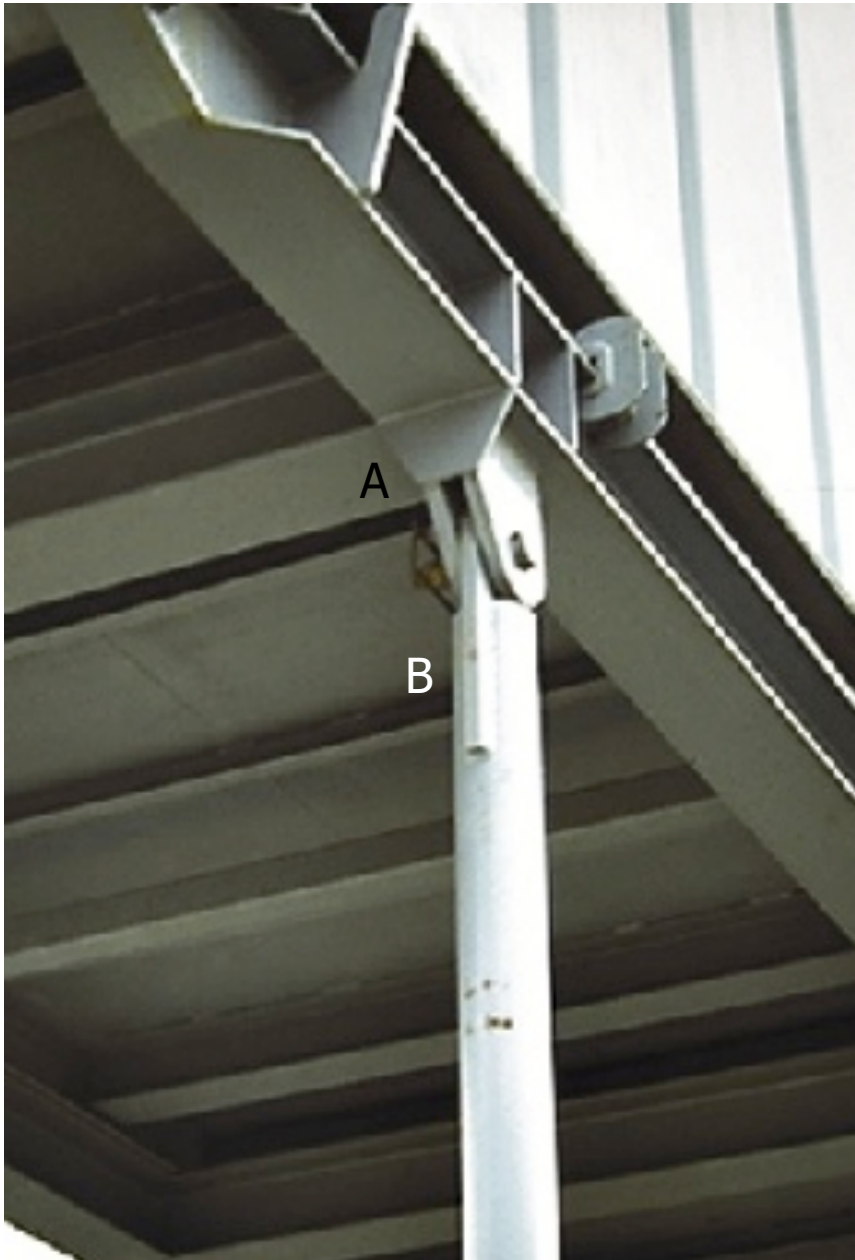
$$v_A = 0$$

Vincoli doppi

- Cerniera intermedia

$$u_A = u_B$$

$$v_A = v_B$$



Vincoli doppi



- Cerniere interne

$$u_A = u_B = u_C = u_D = u_E = u_F$$

$$v_A = v_B = v_C = v_D = v_E = v_F$$

Il grado del vincolo è pari al numero di restrizioni (uguaglianze linearmente indipendenti) che impone.

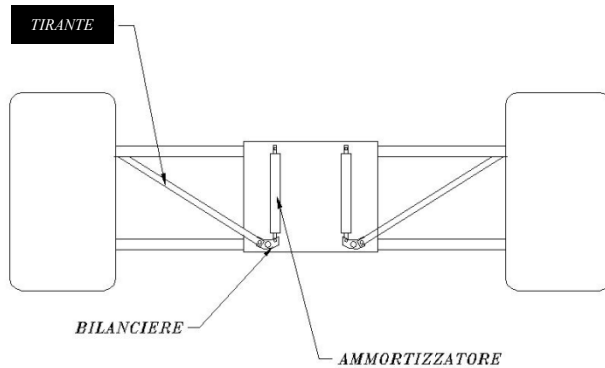
$$g.d.v. = 2(n-1)$$

Vincoli doppi

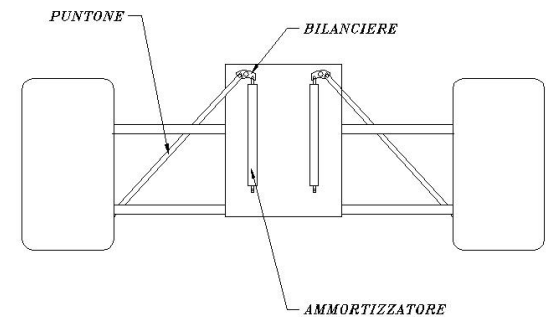
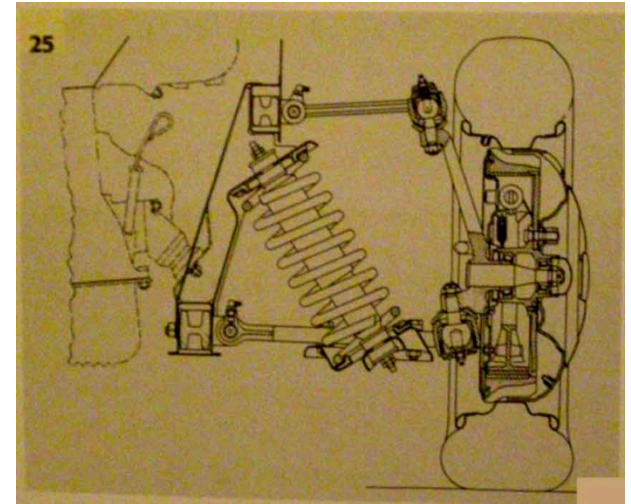
Corso di Laurea: Magistrale Architettura c.u.
Insegnamento: Scienza delle Costruzioni
Docente: Mario Fagone



Vincoli doppi



Pull-rod



Push-rod



Modellazione dei collegamenti

Vincoli tripli

ogni vincolo triplo si traduce in
tre uguaglianze sulle componenti di spostamento

Vincoli tripli

- Incastro



Vincoli tripli

- Incastro

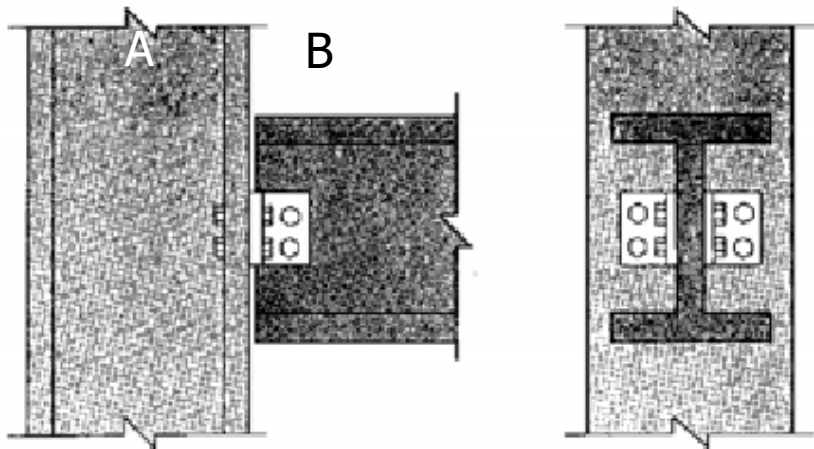




Modellazione dei collegamenti

Schematizzazione

Vincoli doppi



- Cerniera

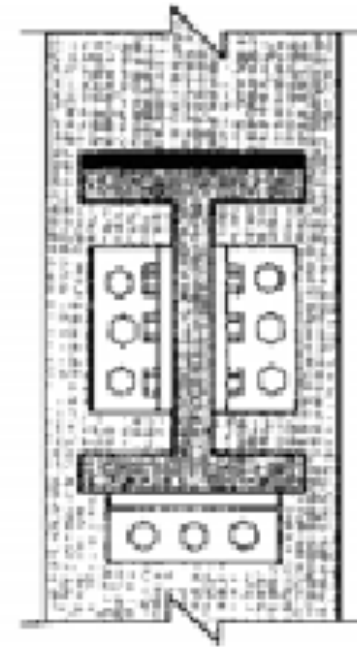
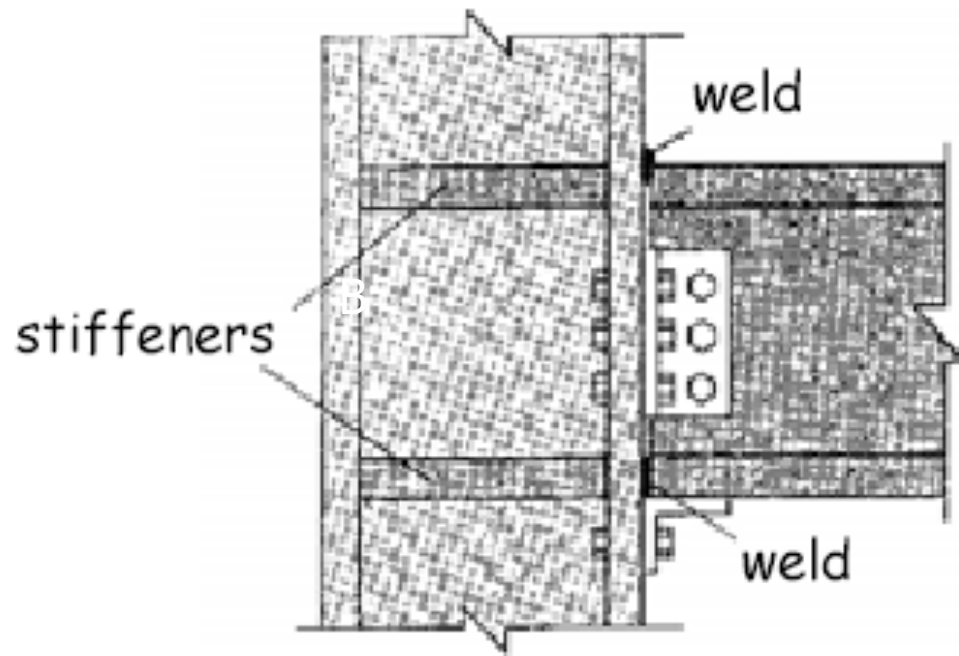
Le condizioni vincolari e le uguaglianze che si impongono agli spostamenti negli schemi strutturali, rappresentano una *astrazione* ed una *approssimazione* della realtà. Nelle strutture reali difficilmente sono presenti vincoli perfetti, ossia che impongono in maniera esatta le condizioni vincolari che stiamo introducendo.

$$U_A = U_B$$

$$V_A = V_B$$

Vincoli tripli

- Incastro

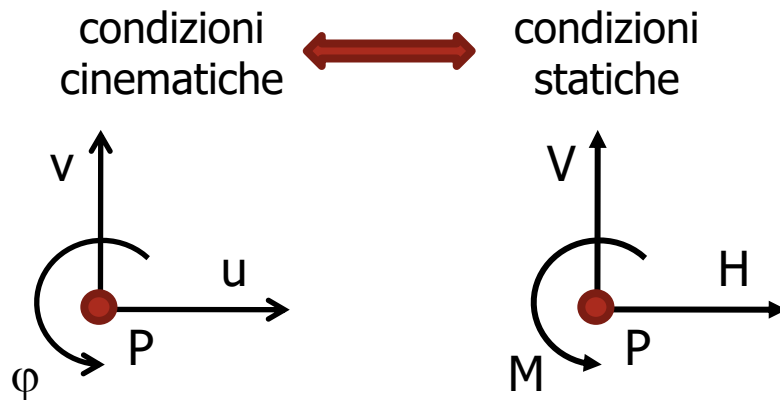


$$U_A = U_B$$

$$V_A = V_B$$

$$\varphi_A = \varphi_B$$

Dualità statico-cinematica



- Le reazioni dei vincoli sono duali ai gradi di libertà condizionati (dualità statico-cinematica, postulato fondamentale della meccanica o delle reazioni vincolari).
- Inoltre, in un punto in cui sono assegnati gli spostamenti non è possibile assegnare anche le forze (principio di mutua esclusione). La reazione di un vincolo dipende, infatti, dalle azioni che deve contrastare ed il loro valore non può essere imposto a priori.

Analisi dei vincoli

VINCOLI

PUNTUALI

impongono delle condizioni sulle componenti di spostamento di un punto materiale del sistema strutturale

CONTINUI

impongono delle condizioni sulle componenti di spostamento di un insieme continuo di punti materiali

LISCI

privi di effetti dissipativi (es. attrito)

SCABRI

presentano effetti dissipativi

RIGIDI

le componenti di spostamento sono condizionate in modo assoluto

CEDEVOLI

il valore delle componenti di spostamento è legato alla reazione del vincolo

BILATERI

UNILATERI

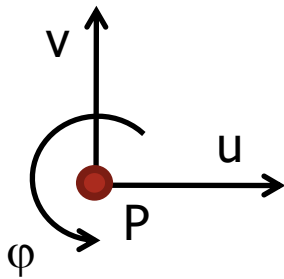
OLONOMI

NON OLONOMI

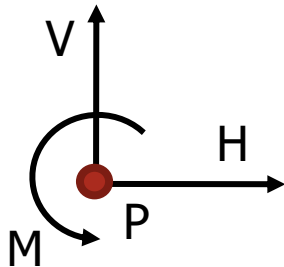
La rappresentazione dei vincoli nei sistemi piani

- Vincoli semplici

Gradi di libertà



Reazioni vincolari

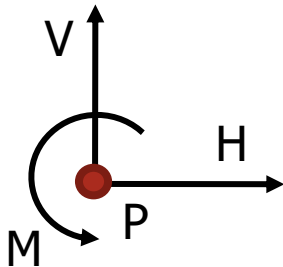
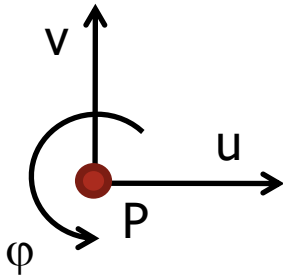


SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI	
		cinematiche	statiche
	carrello	$u \neq 0$ $v = 0$ $j \neq 0$	$H = 0$ $V \neq 0$ $M = 0$
	pendolo	$u \neq 0$ $v = 0$ $j \neq 0$	$H = 0$ $V \neq 0$ $M = 0$
	quadri-pendolo	$u \neq 0$ $v \neq 0$ $j = 0$	$H = 0$ $V = 0$ $M \neq 0$

La rappresentazione dei vincoli nei sistemi piani

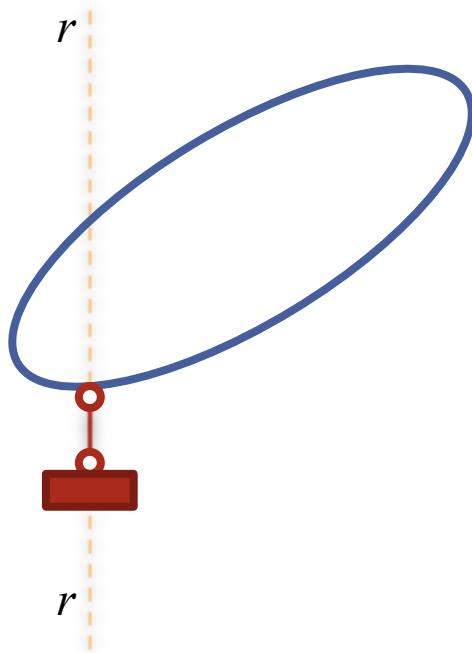
- Vincoli semplici

Reazioni vincolari \longleftrightarrow Gradi di libertà

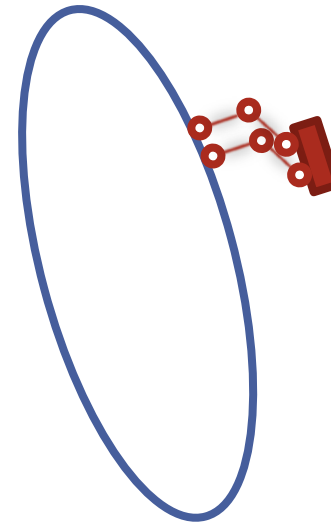


SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI	
		cinematiche	statiche
	carrello	$u \neq 0$ $v = 0$ $j \neq 0$	$H = 0$ $V \neq 0$ $M = 0$
	cavo	$d_A = 0$ (componente di spostamento nella direzione della fune)	$F_A \neq 0$

Corpo rigido piano vincolato da vincoli semplici



C.i.r.: $\forall P \in r$



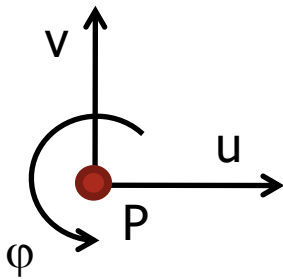
C.i.r.: $\forall P \in$ *retta impropria*
(atto di moto di traslazione)

Il centro di istantanea rotazione definisce, se esiste, un generico atto di moto rigido compatibile con le condizioni cinematiche imposte dai vincoli.

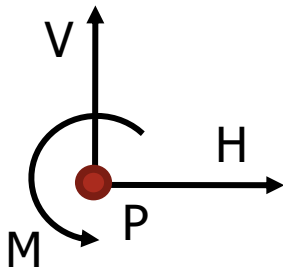
La rappresentazione dei vincoli nei sistemi piani

- Vincoli doppi

Gradi di libertà



Reazioni vincolari



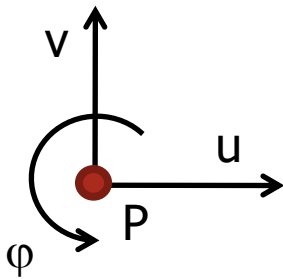
SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI	
		cinematiche	statiche
	appoggio o cerniera	$u=0$ $v=0$ $j \neq 0$	$H \neq 0$ $V \neq 0$ $M=0$
	doppio- pendolo	$u \neq 0$ $v=0$ $j=0$	$H=0$ $V \neq 0$ $M \neq 0$
	pattino	$u \neq 0$ $v=0$ $j=0$	$H=0$ $V \neq 0$ $M \neq 0$

La rappresentazione dei vincoli nei sistemi piani

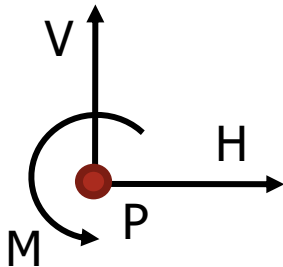
- Vincoli doppi

SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI	
		cinematiche	statiche
	appoggio o cerniera	$u=0$ $v=0$ $j \neq 0$	$H \neq 0$ $V \neq 0$ $M=0$

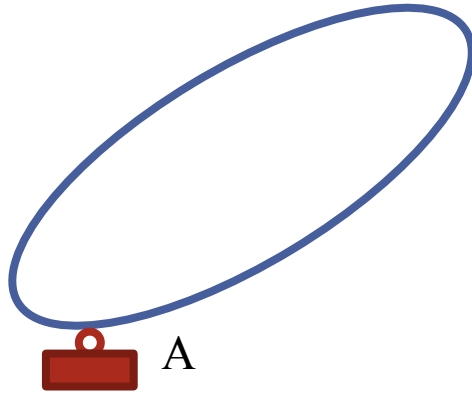
Gradi di libertà



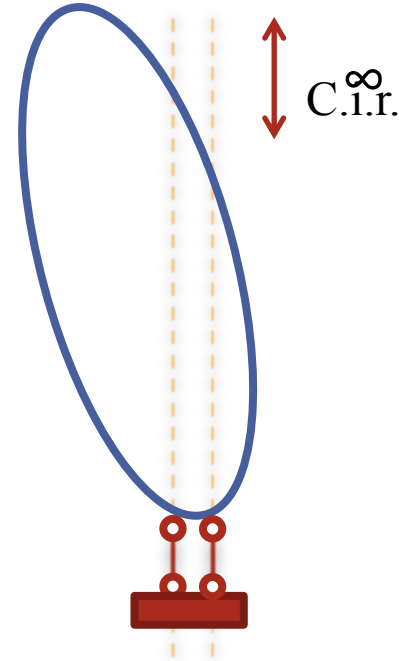
Reazioni vincolari



Corpo rigido piano vincolato da vincoli doppi



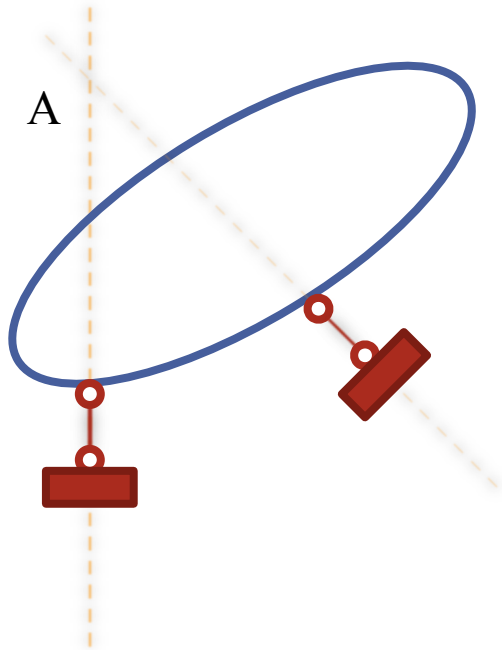
$C.i.r \equiv A$



C.i.r.: punto improprio delle rette
parallele all'asse dei due pendoli
(atto di moto di traslazione orizzontale)
Due pendoli paralleli \rightarrow cerniera impropria

Il centro di istantanea rotazione definisce, se esiste, un generico atto di moto rigido compatibile con le condizioni cinematiche imposte dai vincoli.

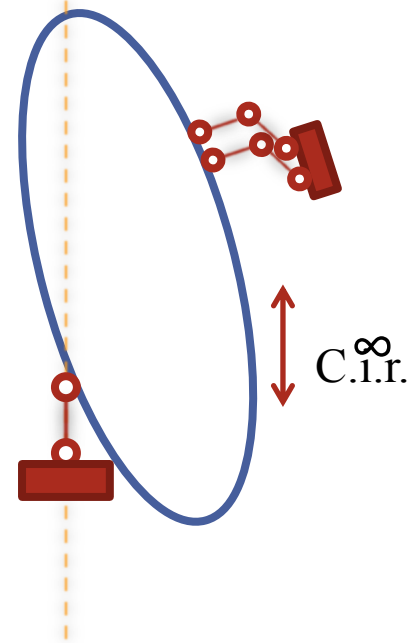
Corpo rigido piano vincolato da due vincoli semplici



$C.i.r \equiv A$

Due pendoli non paralleli

→ cerniera ideale



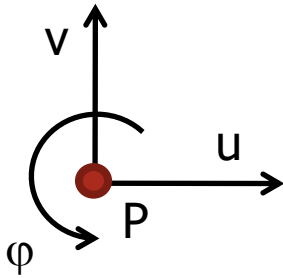
C.i.r.: punto improprio delle rette
parallele all'asse del pendolo

Il centro di istantanea rotazione definisce, se esiste, un generico atto di moto rigido compatibile con le condizioni cinematiche imposte dai vincoli.

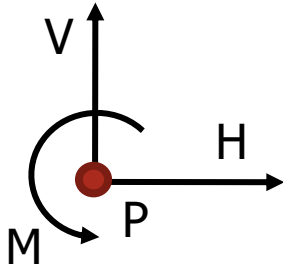
La rappresentazione dei vincoli nei sistemi piani

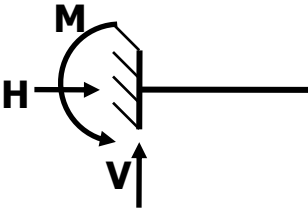
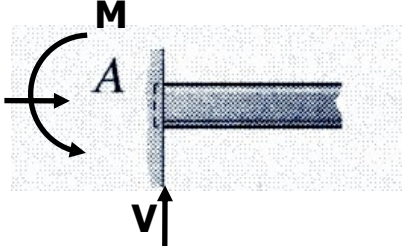
- Vincoli tripli

Gradi di libertà

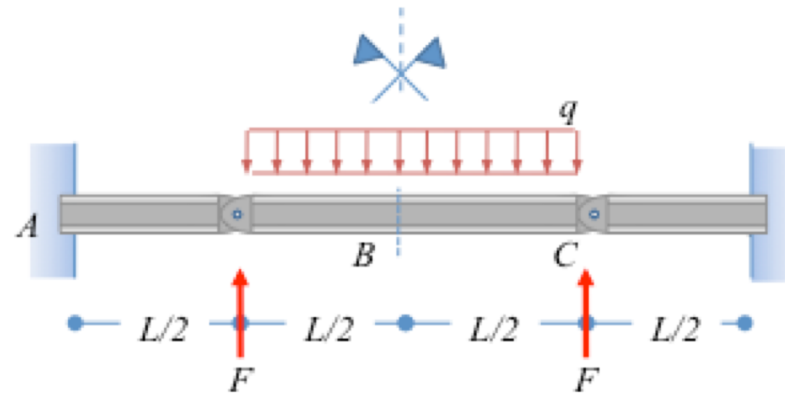
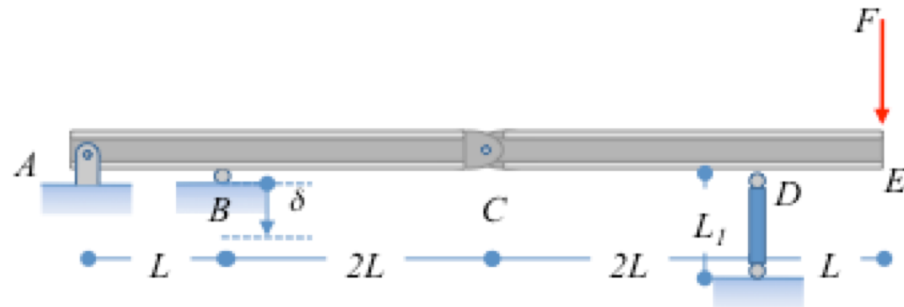


Reazioni vincolari



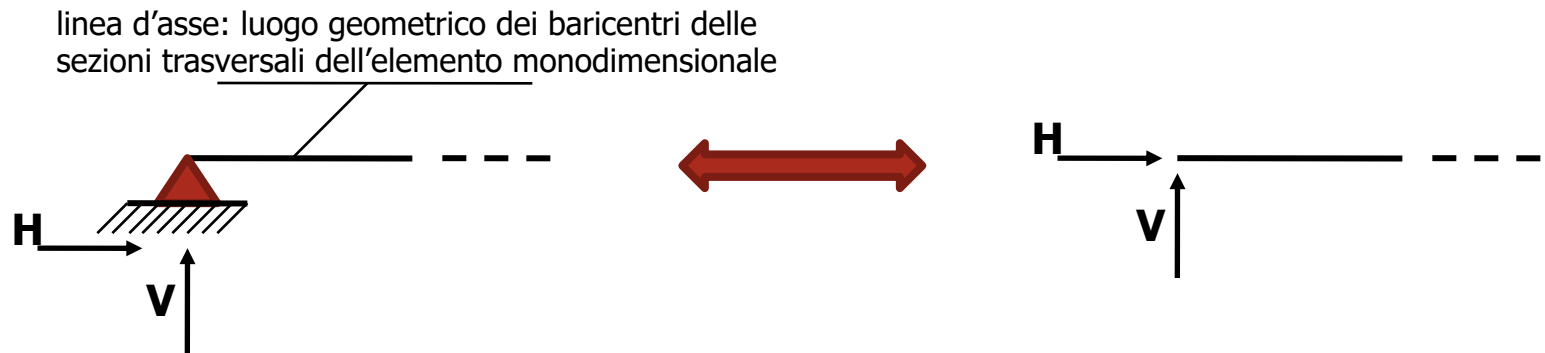
SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI	
		cinematiche	statiche
	incastro	$u=0$ $v=0$ $j=0$	$H \neq 0$ $V \neq 0$ $M \neq 0$
	incastro	$u=0$ $v=0$ $j=0$	$H \neq 0$ $V \neq 0$ $M \neq 0$

La rappresentazione dei vincoli nei sistemi piani



Analisi dei sistemi vincolari

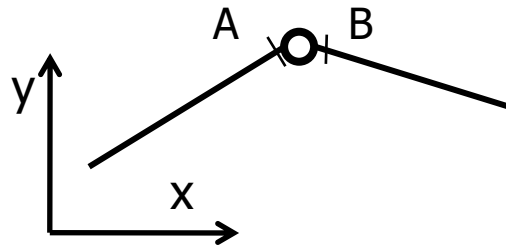
N.B. Di norma le dimensioni (fisiche, reali) dei vincoli sono piccole rispetto al sistema strutturale. Dove non diversamente specificato si assume che le reazioni vincolari siano applicate in corrispondenza del baricentro della sezione vincolata.



Analisi dei sistemi vincolari

Il principio di azione e reazione vale anche quando i vincoli collegano due elementi strutturali (vincoli interni): le azioni che un vincolo interno esercita su un tratto sono uguali ed opposte a quelle esercitate sull'altro tratto

Es. Cerniera interna



Condizioni cinematiche

$$v_A = v_B$$

$$u_A = u_B$$

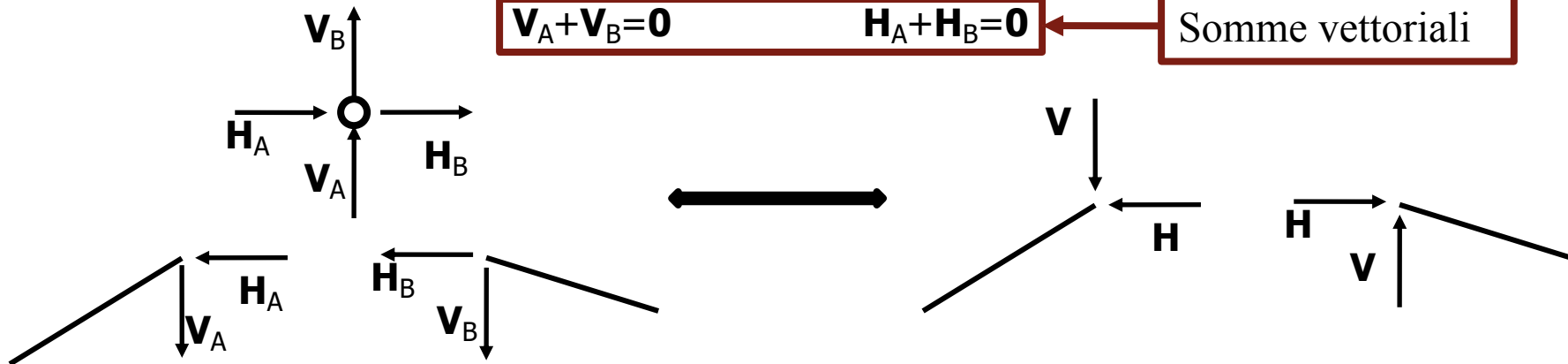
Condizioni statiche

(equilibrio della cerniera intermedia)

$$\mathbf{V}_A + \mathbf{V}_B = \mathbf{0}$$


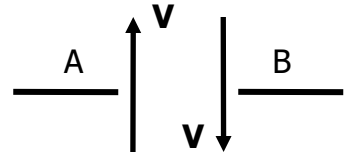
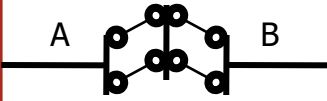
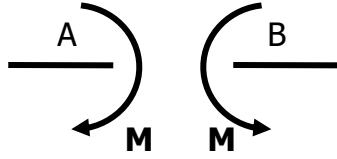
$$\mathbf{H}_A + \mathbf{H}_B = \mathbf{0}$$

Somme vettoriali



La rappresentazione dei vincoli interni nei sistemi piani

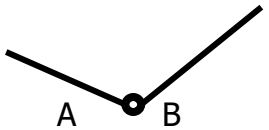
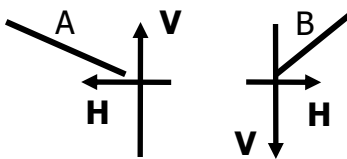
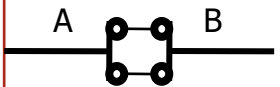
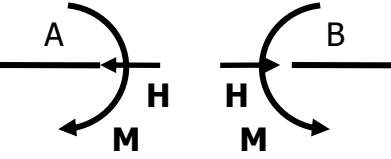
- Vincoli semplici

SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI		REAZIONI VINCOLARI
		cinematiche	statiche	
	carrello	$v_A = v_B$	$ \begin{aligned} H_A &= H_B = 0 \\ V_A + V_B &= 0 \\ M_A &= M_B = 0 \end{aligned} $	
	quardi- pendolo	$j_A = j_B$	$ \begin{aligned} H_A &= H_B = 0 \\ V_A &= V_B = 0 \\ M_A + M_B &= 0 \end{aligned} $	

Somme vettoriali

La rappresentazione dei vincoli interni nei sistemi piani

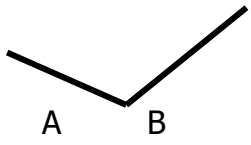
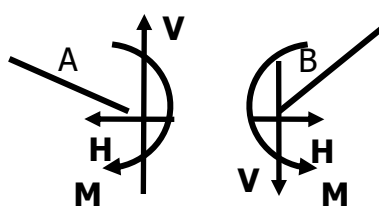
- Vincoli doppi

SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI		REAZIONI VINCOLARI
		cinematiche	statiche	
	cerniera	$u_A = u_B$ $v_A = v_B$	$H_A + H_B = 0$ $V_A + V_B = 0$ $M_A = M_B = 0$	
	doppio- pendolo	$u_A = u_B$ $j_A = j_B$	$H_A + H_B = 0$ $V_A = V_B = 0$ $M_A + M_B = 0$	

Somme vettoriali

La rappresentazione dei vincoli interni nei sistemi piani

- Vincoli tripli

SIMBOLO	DENOM.	PRESTAZIONI		REAZIONI VINCOLARI
		cinematiche	statiche	
	incastro interno	$u_A = u_B$ $v_A = v_B$ $j_A = j_B$	<div style="border: 2px solid red; padding: 5px; display: inline-block;"> $H_A + H_B = 0$ $V_A + V_B = 0$ $M_A + M_B = 0$ </div>	

Somme vettoriali

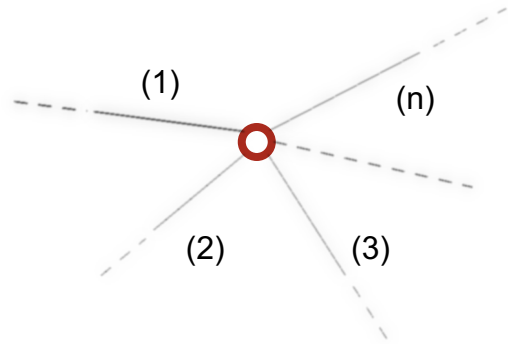
N.B. Ogni nodo interno del materiale in cui non sono presenti sconnessioni è schematizzabile come incastro interno.

Vincoli doppi – cerniere multiple

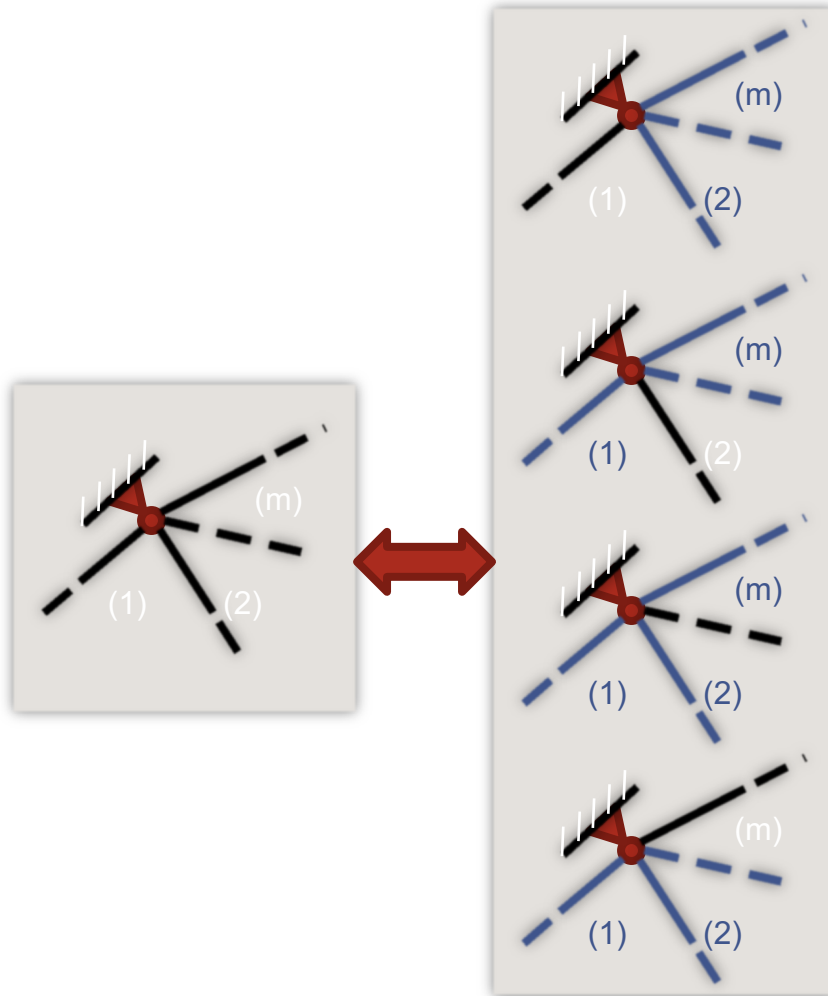
- Cerniere interne

Per quanto detto nella trattazione generale (slide n.16) in un nodo a cerniera interna nel quale confluiscono n aste, per ogni componente di spostamento si possono scrivere $n-1$ uguaglianze linearmente indipendenti. Per tale motivo il grado di vincolo di tale nodo è pari a

$$2x(n-1)$$



Vincoli doppi – cerniere multiple



- Cerniere interne ed esterne
Un nodo a cerniera esterna in cui confluiscano m aste come schematizzato in figura, equivale ad m cerniere esterne, per cui il suo grado di vincolo è pari a

$$2xm$$

Allo stesso risultato si perviene applicando quando descritto nella slide precedente: considerando infatti il mondo esterno come un semplice elemento strutturale, sulla cerniera in figura confluiscano in totale $n=m+1$ elementi. Il suo grado di vincolo si può allora calcolare come segue

$$2x(n-1)=2xm$$

Vincoli doppi – cerniere caricate

Nei sistemi strutturali reali è possibile che sia applicato un carico puntuale in corrispondenza di un vincolo interno. Le azioni trasferite dal vincolo interno ai tratti che collega sono comunque tali da garantire anche l'equilibrio locale del vincolo.

Es. Cerniera interna

Condizioni cinematiche

$$v_A = v_B$$

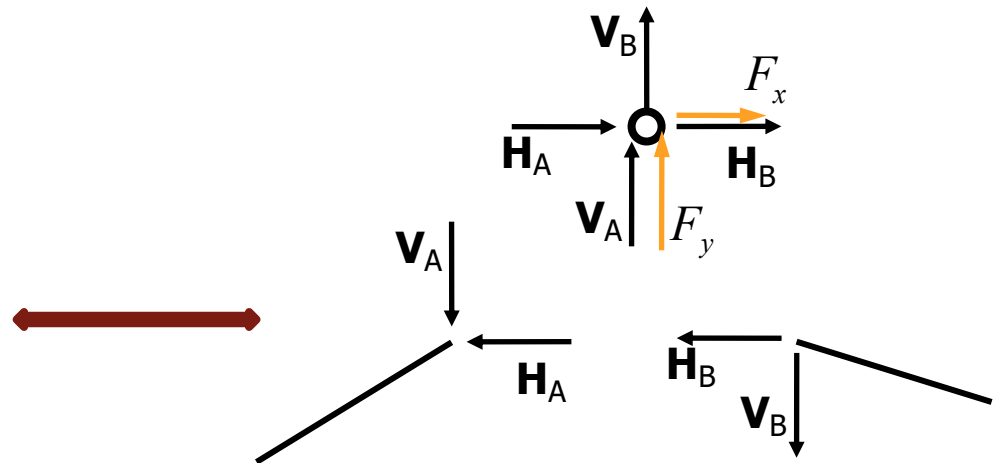
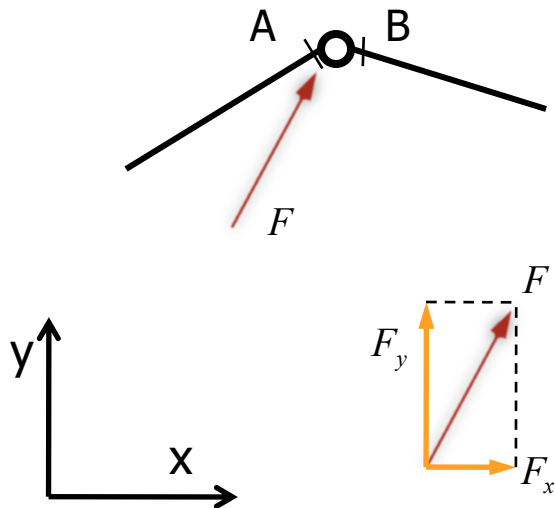
$$u_A = u_B$$

Condizioni statiche

(equilibrio della cerniera intermedia)

$$\mathbf{V}_A + \mathbf{V}_B + \mathbf{F}_y = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{H}_A + \mathbf{H}_B + \mathbf{F}_x = \mathbf{0}$$



Vincoli doppi – cerniere caricate

Nei sistemi strutturali reali è possibile che sia applicato un carico puntuale in corrispondenza di un vincolo interno. Le azioni trasferite dal vincolo interno ai tratti che collega sono comunque tali da garantire anche l'equilibrio locale del vincolo.

Es. Cerniera interna

Condizioni cinematiche

$$V_A = V_B$$

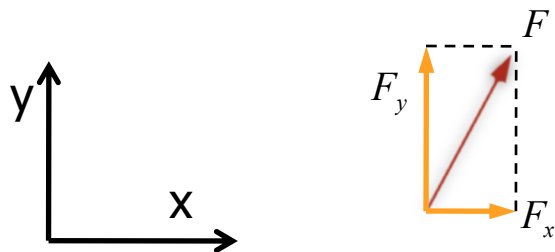
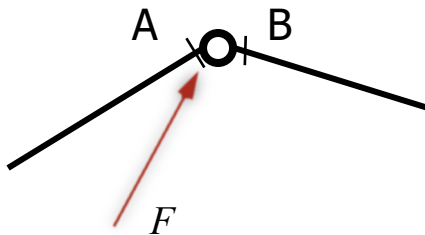
$$u_A = u_B$$

Condizioni statiche

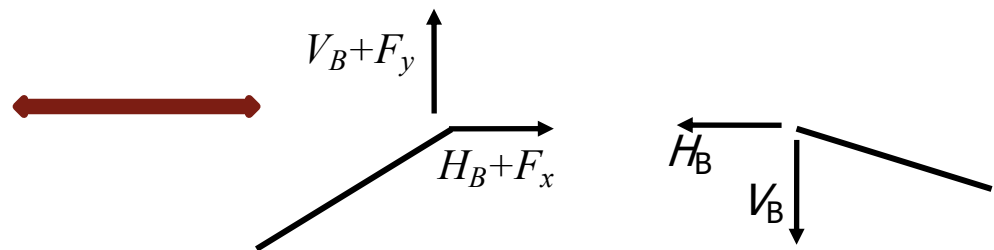
(equilibrio della cerniera intermedia)

$$\mathbf{V}_A + \mathbf{V}_B + \mathbf{F}_y = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{H}_A + \mathbf{H}_B + \mathbf{F}_x = \mathbf{0}$$



in componenti si ha



Vincoli doppi – cerniere caricate

Nei sistemi strutturali reali è possibile che sia applicato un carico puntuale in corrispondenza di un vincolo interno. Le azioni trasferite dal vincolo interno ai tratti che collega sono comunque tali da garantire anche l'equilibrio locale del vincolo.

Es. Cerniera interna

Condizioni cinematiche

$$V_A = V_B$$

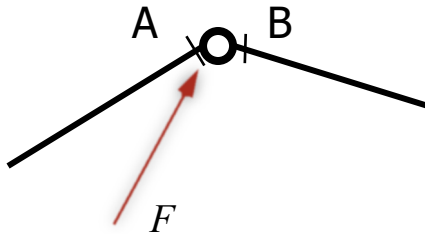
$$u_A = u_B$$

Condizioni statiche

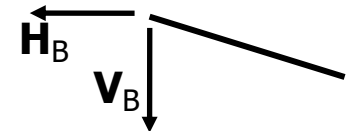
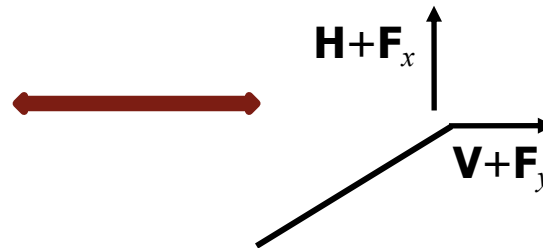
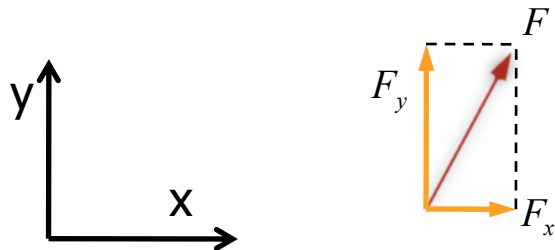
(equilibrio della cerniera intermedia)

$$\mathbf{V}_A + \mathbf{V}_B + \mathbf{F}_y = \mathbf{0}$$

$$\mathbf{H}_A + \mathbf{H}_B + \mathbf{F}_x = \mathbf{0}$$



Che equivale alla seguente condizione





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

Scuola di Architettura

Corso di Laurea: Magistrale Architettura c.u.
Insegnamento: Scienza delle Costruzioni
Docente: Mario Fagone



Azioni sulle strutture

La modellazione strutturale

Modelli (matematici, concettuali) che colgono le caratteristiche salienti dei sistemi strutturali (e che trascurino gli aspetti giudicati inessenziali).

I modelli strutturali vengono definiti schematizzando:

1. l'ambito (dominio) di analisi: ogni sistema è collegato al mondo circostante e con esso interagisce; il dominio di analisi deve essere abbastanza esteso da poter ritenere trascurabili gli effetti di ciò che viene escluso e abbastanza piccolo da poter essere agevolmente schematizzato;
2. la geometria: (elementi monodimensionali, bidimensionali, tridimensionali);
3. i collegamenti tra gli elementi che compongono il sistema strutturale (vincoli interni) e tra il sistema strutturale ed il mondo esterno (condizioni al contorno, vincoli esterni);
4. le azioni (peso proprio, sovraccarichi, cedimenti, distorsioni, vento, sisma, ...);
5. il comportamento del materiale.

Le azioni sulle strutture

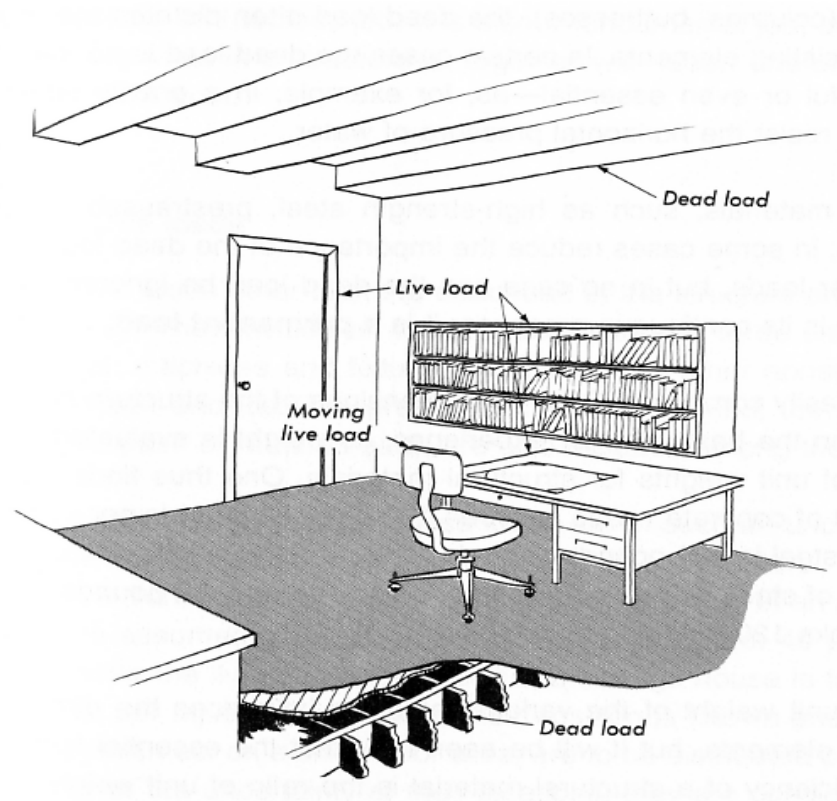


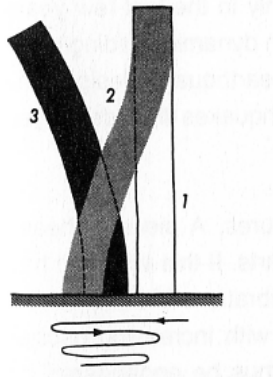
Figura tratta da M. Salvadori, R. Heller. "Structure in architecture"

- Sui sistemi strutturali possono essere applicati diversi tipi di carichi. Fra questi i più comuni sono:
 - *carichi permanenti* che rappresentano azioni sempre presenti sulla struttura (es. peso proprio)
 - *carichi variabili* che rappresentano delle azioni che *possono* essere presenti sulla struttura (elementi di arredo, persone, ...).
- Fra le tipologie di azioni si distinguono:
 - *azioni statiche*: si mantengono fisse e costanti nel tempo.
 - *azioni dinamiche*: il loro valore (vettoriale) può variare nel tempo

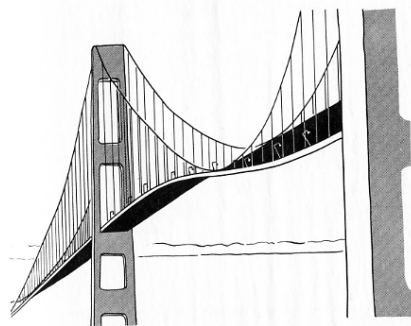
Le azioni sulle strutture



Wind Load.



2.15 Earthquake motions.



2.17 Aerodynamic oscillations.

Es. Tacoma Narrows Bridge

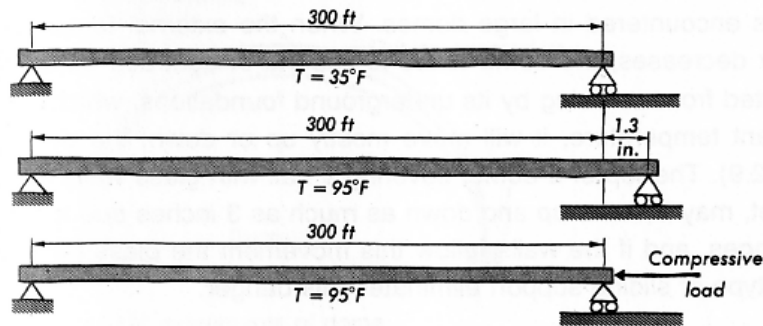
<http://it.youtube.com/watch?v=3mclp9QmCGs>

- Esempi di azioni dinamiche
 - Vento
 - Sisma
 - ...

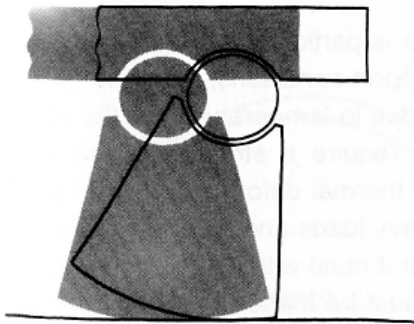
Sono azioni la cui intensità direzione e verso può variare nel tempo.

Entro certi limiti le norme italiane prevedono la possibilità di sostituire le azioni dinamiche di vento e sisma con una distribuzione di azioni “statiche equivalenti”.

Le azioni sulle strutture



2.7 Thermal load.



- **Azioni termiche**

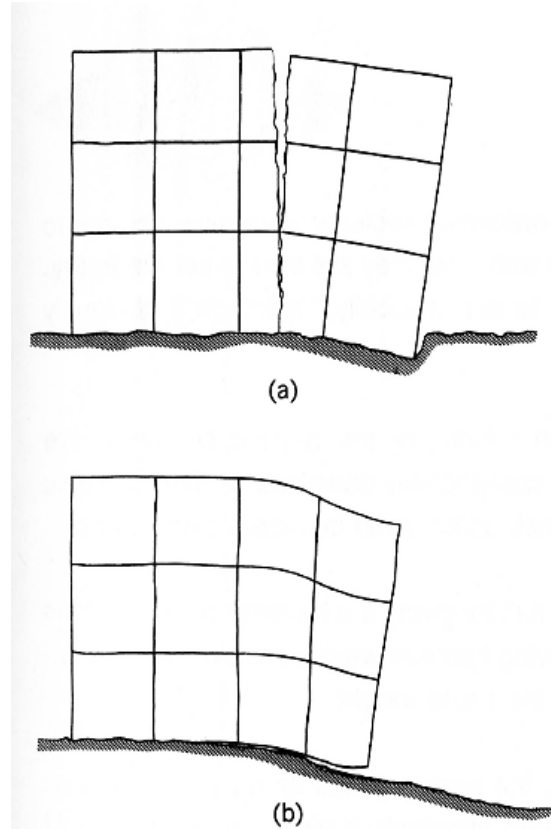
Le variazioni di temperatura possono indurre sollecitazioni nelle strutture.

Se, ad esempio, il sistema rappresentato a lato viene riscaldato, esso tende ad aumentare di volume, e quindi anche ad allungarsi. Se uno degli appoggi permette traslazioni orizzontali, tale allungamento non provoca nessuna sollecitazione nella struttura. Se invece entrambi gli appoggi impediscono traslazioni orizzontali, essi contrastano la tendenza del sistema ad allungarsi applicando delle forze reattive (reazioni vincolari) che sollecitano la struttura.

Le azioni sulle strutture

- Cedimenti

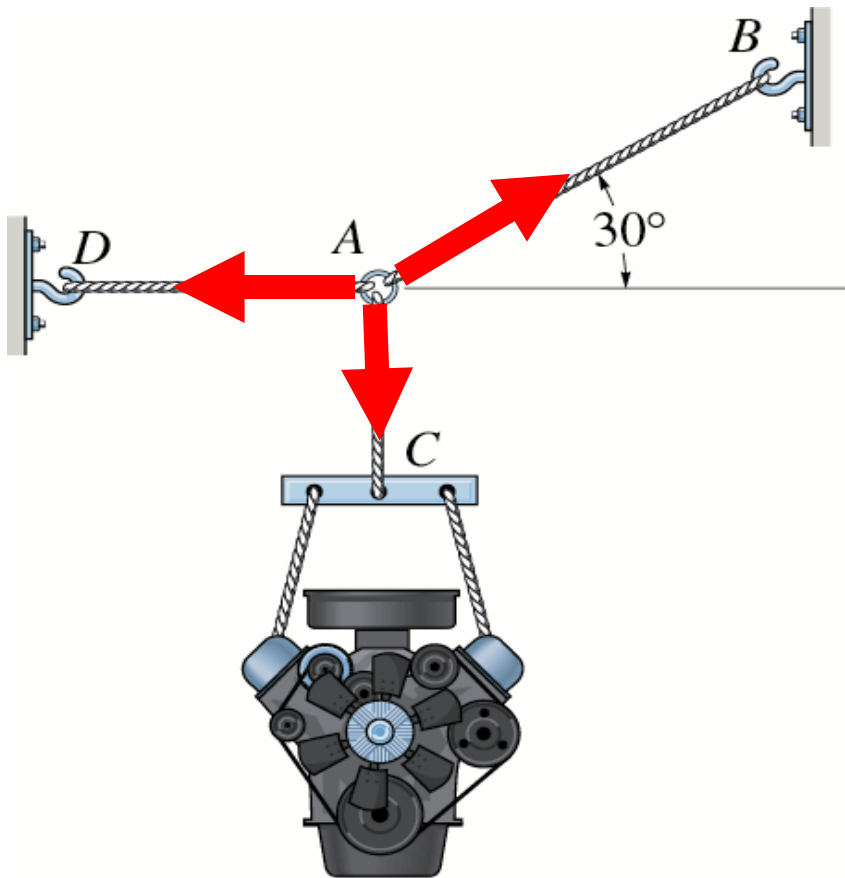
I cedimenti, che eventualmente possono verificarsi ad esempio nelle zone di collegamento della struttura al mondo esterno (vincoli esterni) possono produrre nel sistema strutturale delle sollecitazioni interne. Ad esempio nel sistema schematizzato in figura, un cedimento *differenziato* del terreno provoca deformazioni (e quindi sollecitazioni) negli elementi strutturali che compongono il sistema in esame.



2.11 Uneven settlements of foundation.

Figura tratta da M. Salvadori, R. Heller. "Structure in architecture"

Le azioni sulle strutture

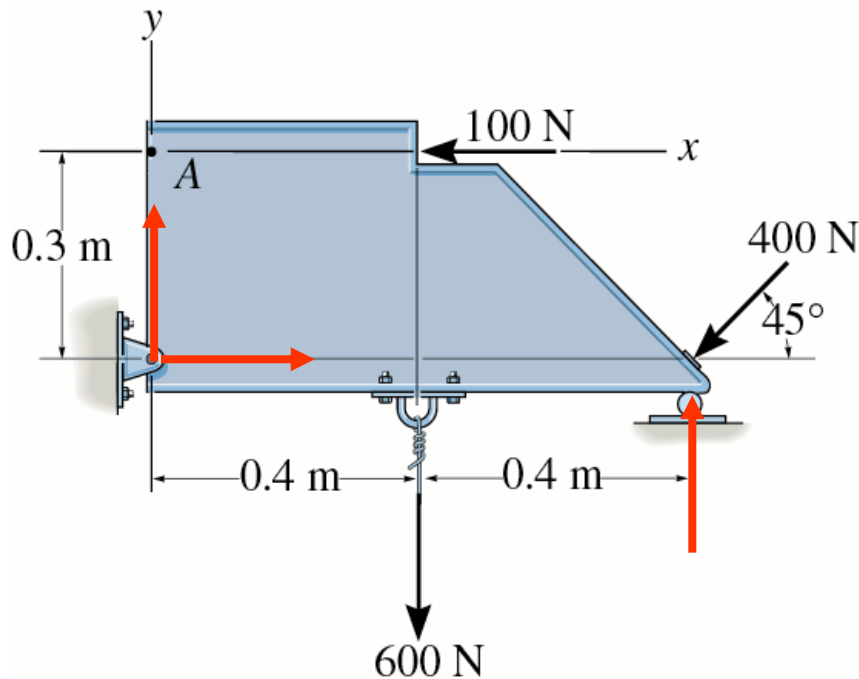


La schematizzazione delle azioni sulle strutture varia in funzione dell'estensione della superficie sulle quali esse sono applicate. Si schematizzano come

- **azioni puntuali** (concentrate), quelle applicate su una porzione di superficie “piccola” rispetto al *dominio* ed al *problema in esame*.
- **azioni distribuite**, quelle applicate su una superficie di dimensioni non trascurabili rispetto al *dominio* ed al *problema in esame*.

Per l'esempio riportato in figura, se il problema in esame è quello dell'equilibrio globale, si può considerare che le corde trasferiscano all'anello “A” delle azioni puntuali.

Le azioni sulle strutture

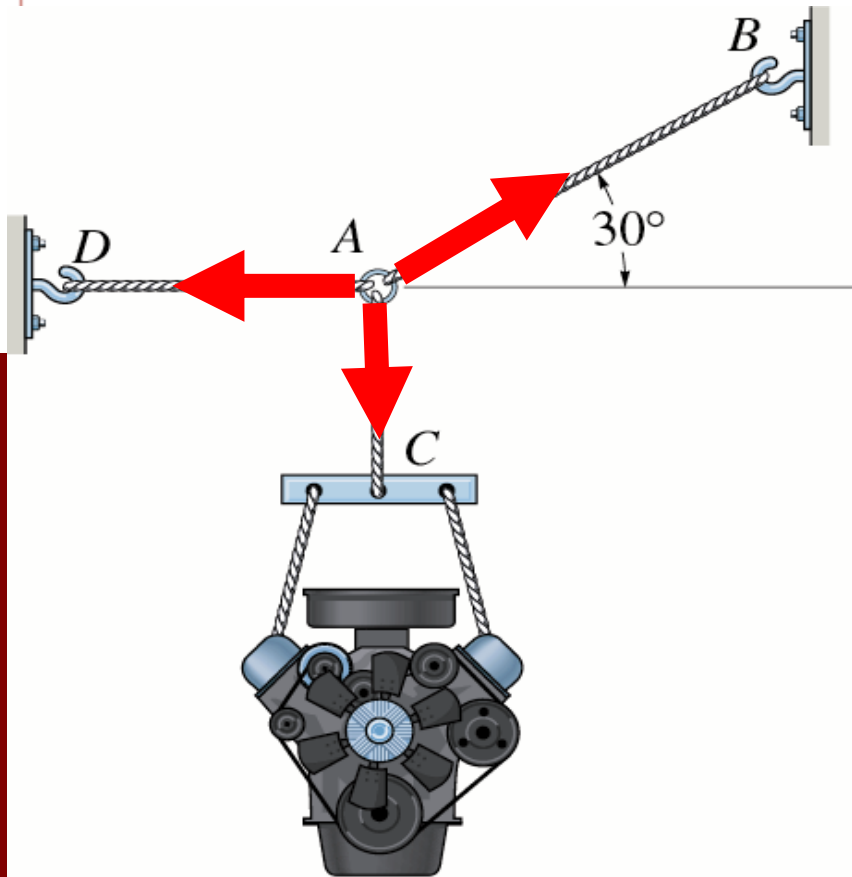


Nello schema riportato in figura, l'estensione della superficie di contatto tra l'elemento strutturale in esame ed i **vincoli** esterni è "piccola". Pertanto, le forze reattive di tali vincoli, ossia le reazioni vincolari (indicate in rosso nello schema), possono essere schematizzare come azioni puntuali.

Forze: vettori applicati

- Attive
- Concentrate
- Esterne
- ...
- Reattive
- Distribuite
- Interne
- ...

Calcolo delle reazioni di vincolo



Azioni sulle strutture (NTC)

In base al modo di esplicitarsi:

- *dirette*: forze concentrate, carichi distribuiti, fissi o mobili;
- *indirette*: spostamenti impressi, variazioni di temperatura e di umidità, ritiro, precompressione, cedimenti di vincolo, ecc.
- *degrado*: endogeno (alterazione naturale del materiale di cui è composta l'opera strutturale); esogeno (alterazione delle caratteristiche dei materiali costituenti l'opera strutturale, a seguito di agenti esterni).

Secondo la risposta strutturale:

- statiche: azioni applicate alla struttura che non provocano accelerazioni significative della stessa o di alcune sue parti;
- pseudo statiche: azioni dinamiche rappresentabili mediante una azione statica equivalente;
- dinamiche: azioni che causano significative accelerazioni della struttura o dei suoi componenti.

Azioni sulle strutture (NTC)

Secondo la variazione della loro intensità nel tempo:

- *permanenti (G)*: azioni che agiscono durante tutta la vita nominale della costruzione, la cui variazione di intensità nel tempo è così piccola e lenta da poterle considerare con sufficiente approssimazione costanti nel tempo
- *variabili (Q)*: azioni sulla struttura o sull'elemento strutturale con valori istantanei che possono risultare sensibilmente diversi fra loro nel tempo (folla, arredi, neve, vento, ...)
- *eccezionali (A)*: azioni che si verificano solo eccezionalmente nel corso della vita nominale della struttura (incendi, esplosioni, urti ed impatti)
- *sismiche (S)*: azioni derivanti dai terremoti

Le azioni sulle strutture (NTC)

Sovracc. accidentali

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
A	Ambienti ad uso residenziale. Sono compresi in questa categoria i locali di abitazione e relativi servizi, gli alberghi. (ad esclusione delle aree suscettibili di affollamento)	2,00	2,00	1,00
B	Uffici. Cat. B1 Uffici non aperti al pubblico Cat. B2 Uffici aperti al pubblico	2,00 3,00	2,00 2,00	1,00 1,00
C	Ambienti suscettibili di affollamento Cat. C1 Ospedali, ristoranti, caffè, banche, scuole Cat. C2 Balconi, ballatoi e scale comuni, sale convegni, cinema, teatri, chiese, tribune con posti fissi Cat. C3 Ambienti privi di ostacoli per il libero movimento delle persone, quali musei, sale per esposizioni, stazioni ferroviarie, sale da ballo, palestre, tribune libere, edifici per eventi pubblici, sale da concerto, palazzetti per lo sport e relative tribune	3,00 4,00 5,00	2,00 4,00 5,00	1,00 2,00 3,00
D	Ambienti ad uso commerciale. Cat. D1 Negozi Cat. D2 Centri commerciali, mercati, grandi magazzini, librerie...	4,00 5,00	4,00 5,00	2,00 2,00

Le azioni sulle strutture (NTC)

Sovracc. accidentali

Cat.	Ambienti	q_k [kN/m ²]	Q_k [kN]	H_k [kN/m]
E	Biblioteche, archivi, magazzini e ambienti ad uso industriale.			
	Cat. E1 Biblioteche, archivi, magazzini, depositi, laboratori manifatturieri	$\geq 6,00$	6,00	1,00*
	Cat. E2 Ambienti ad uso industriale, da valutarsi caso per caso	—	—	—
F-G	Rimesse e parcheggi.			
	Cat. F Rimesse e parcheggi per il transito di automezzi di peso a pieno carico fino a 30 kN	2,50	2 x 10,00	1,00**
	Cat. G Rimesse e parcheggi per transito di automezzi di peso a pieno carico superiore a 30 kN: da valutarsi caso per caso	—	—	—
H	Coperture e sottotetti			
	Cat. H1 Coperture e sottotetti accessibili per sola manutenzione	0,50	1,20	1,00
	Cat. H2 Coperture praticabili	secondo categoria di appartenenza		
	Cat. H3 Coperture speciali (impianti, eliporti, altri) da valutarsi caso per caso	—	—	—

* non comprende le azioni orizzontali eventualmente esercitate dai materiali immagazzinati

** per i soli parapetti o partizioni nelle zone pedonali. Le azioni sulle barriere esercitate dagli automezzi dovranno essere valutate caso per caso

Combinazione delle azioni (NTC)

2.5.3 COMBINAZIONI DELLE AZIONI

Ai fini delle verifiche degli stati limite si definiscono le seguenti combinazioni delle azioni.

- Combinazione fondamentale, generalmente impiegata per gli stati limite ultimi (SLU):

$$\gamma_{G1} \cdot G_1 + \gamma_{G2} \cdot G_2 + \gamma_P \cdot P + \gamma_{Q1} \cdot Q_{k1} + \gamma_{Q2} \cdot \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \gamma_{Q3} \cdot \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.1)$$

- Combinazione caratteristica (rara), generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) irreversibili, da utilizzarsi nelle verifiche alle tensioni ammissibili di cui al § 2.7:

$$G_1 + G_2 + P + Q_{k1} + \psi_{02} \cdot Q_{k2} + \psi_{03} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.2)$$

- Combinazione frequente, generalmente impiegata per gli stati limite di esercizio (SLE) reversibili:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{11} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.3)$$

- Combinazione quasi permanente (SLE), generalmente impiegata per gli effetti a lungo termine:

$$G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \psi_{23} \cdot Q_{k3} + \dots \quad (2.5.4)$$

- Combinazione sismica, impiegata per gli stati limite ultimi e di esercizio connessi all'azione sismica E (v. § 3.2):

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.5)$$

- Combinazione eccezionale, impiegata per gli stati limite ultimi connessi alle azioni eccezionali di progetto A_d (v. § 3.6):

$$G_1 + G_2 + P + A_d + \psi_{21} \cdot Q_{k1} + \psi_{22} \cdot Q_{k2} + \dots \quad (2.5.6)$$

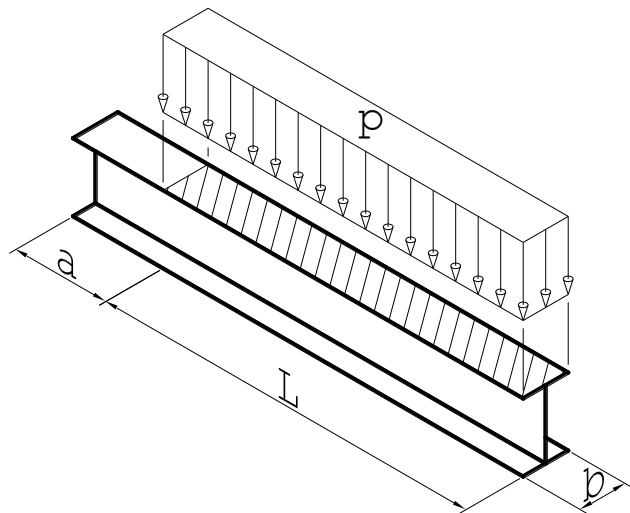
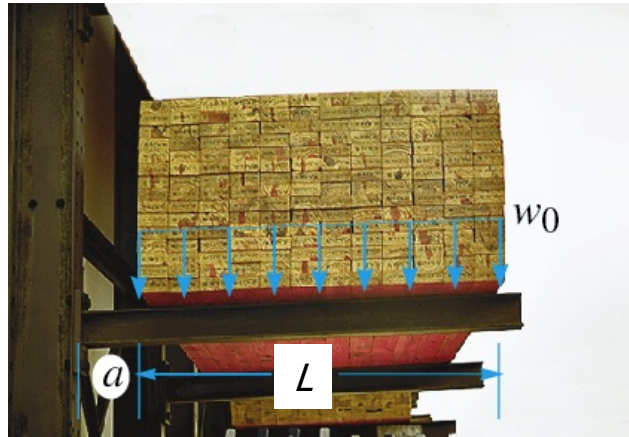
Nelle combinazioni per SLE, si intende che vengono omissi i carichi Q_{kj} che danno un contributo favorevole ai fini delle verifiche e, se del caso, i carichi G_2 .



Azioni sulle strutture

Carichi distribuiti

Le azioni sulle strutture



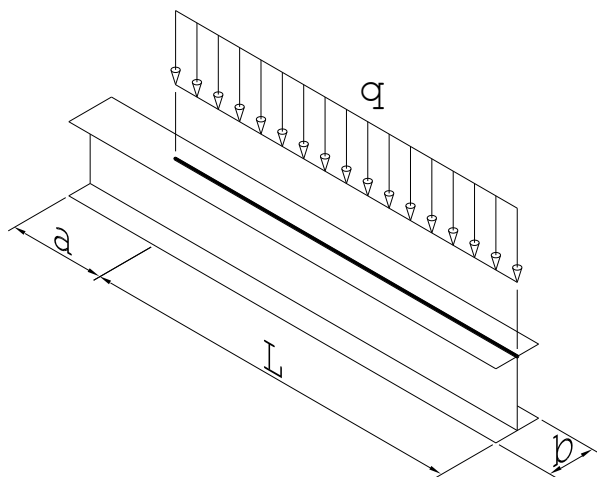
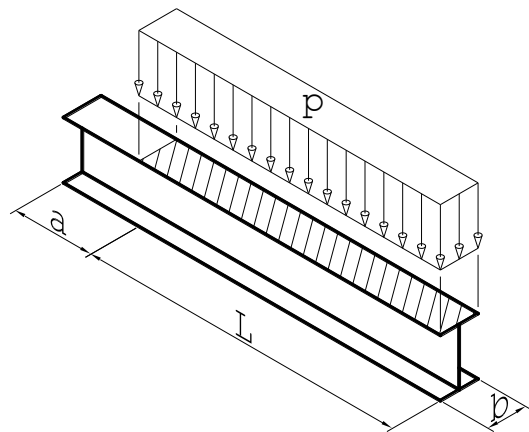
Nello schema di cui alla figura a fianco, il peso proprio F delle assi in legno è trasferito alle mensole in acciaio di supporto attraverso la superficie di contatto fra i due materiali. È evidente che l'estensione di tale superficie ha dimensioni non trascurabili rispetto alle dimensioni totali delle mensole. Per tale motivo, e visto che l'altezza delle assi è costante sulla lunghezza L , l'azione equivalente al peso F può essere schematizzata come una pressione costante applicata sulla superficie di contatto e pari a

$$p = F / (L * b)$$

p ha la dimensione di una forza su una lunghezza al quadrato

$$[p] = [F/L^2]$$

Le azioni sulle strutture



Nelle precedenti lezioni si è visto che, dal punto di vista geometrico, la mensola in figura è schematizzabile come un elemento monodimensionale (elemento trave) e può essere rappresentato con un segmento coincidente con la sua linea d'asse. La distribuzione di carico q equivalente al peso F delle assi in legno ed agente su tale elemento trave, è schematizzabile come una forza distribuita su una lunghezza. Tale distribuzione di carico può essere calcolata come segue

$$q = F / L$$

Le azioni sulle strutture

È immediato verificare che le due distribuzioni di carico q e p sono legate dalla seguente relazione

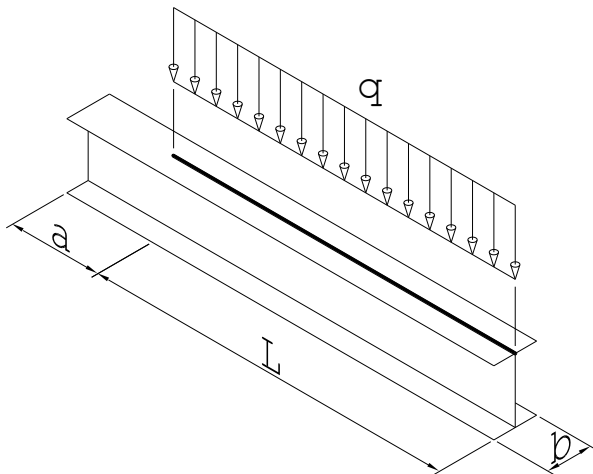
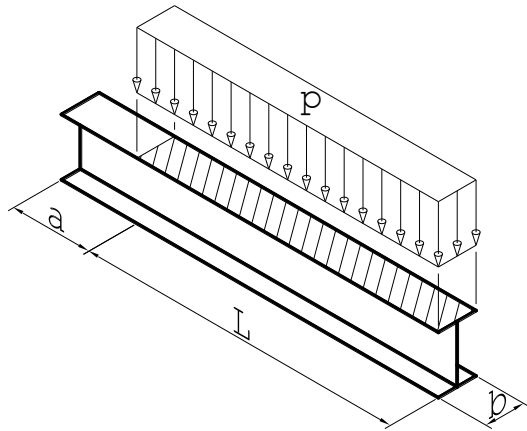
$$q = p b$$

ed hanno la stessa risultante, pari al peso delle travi che esse simulano

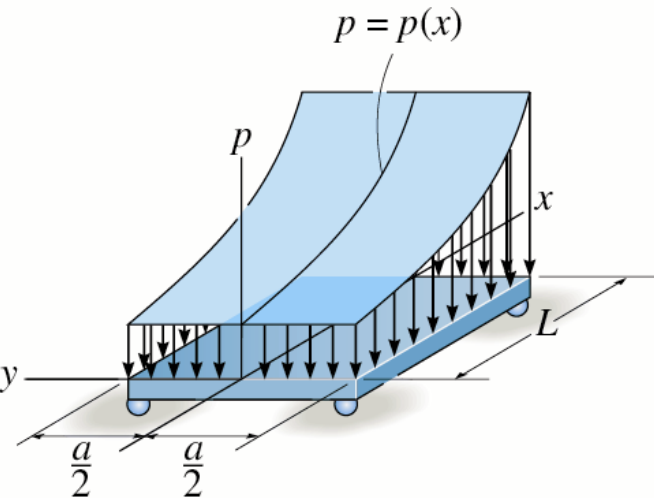
$$R_1 = p b L = F$$

$$R_2 = q L = F$$

Di seguito si descrive una procedura generica per il calcolo della risultante di una distribuzione di pressioni.



Risultante di una distribuzione di forze parallele



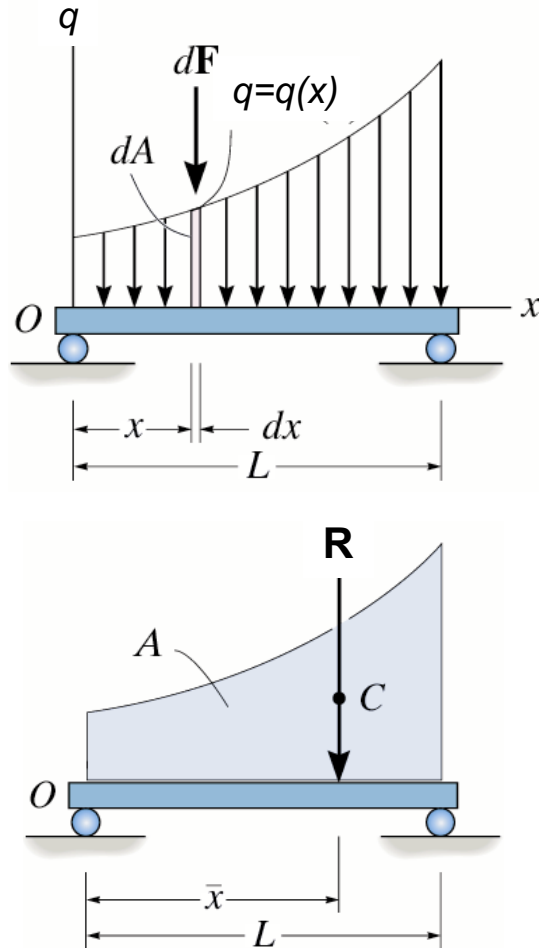
Sia p una distribuzione di pressioni applicate su una superficie di forma rettangolare A . Fissato il sistema di riferimento in figura, si assume che tale distribuzione sia costante lungo l'asse y . Il piano p - x , di simmetria per la distribuzione in esame, ne contiene la risultante \mathbf{R} che ha direzione e verso concordi con quelli della pressione in esame. Il modulo della risultante si può calcolare come l'integrale della pressione sul dominio superficiale su cui essa agisce come segue:

$$R = \iint_A p(x, y) dA = \int_0^L \int_{-a/2}^{a/2} p(x, y) dy dx = \int_0^L p(x) a dx = \int_0^L q(x) dx$$

il termine $q(x) = p(x) a$ ha le dimensioni di una forza su una lunghezza e può essere inteso come la condensazione della pressione $p(x)$ sul piano di simmetria della distribuzione

$$[p] = \left[\frac{F}{L^2} \right] \quad [q] = \left[\frac{F}{L} \right]$$

Risultante di una distribuzione di forze parallele



In tal modo, il problema del calcolo della risultante della distribuzione di pressioni su una superficie è stato ridotto a quello del calcolo della risultante di una distribuzione di carichi su una lunghezza.

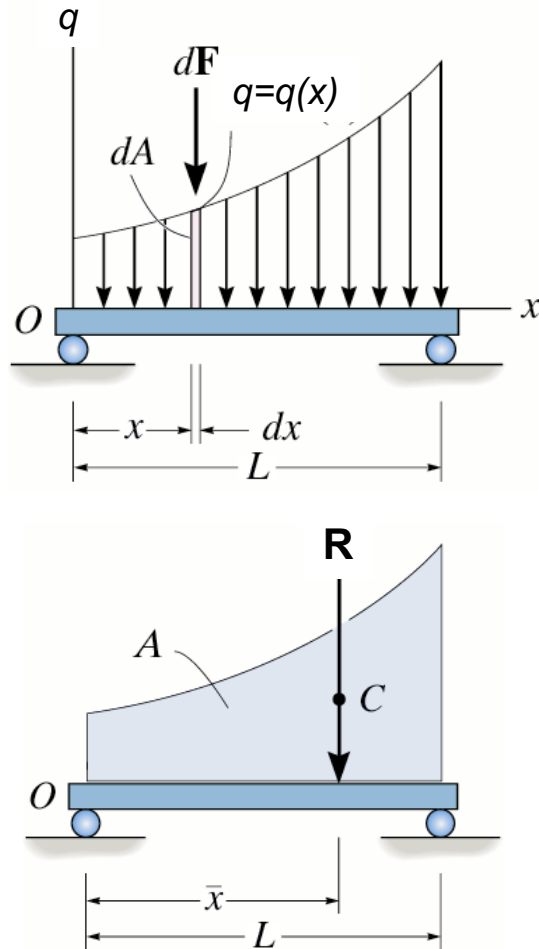
Per quanto detto alla slide precedente, il modulo R della risultante si calcola come segue

$$R = \int_0^L q(x) dx$$

Essa avrà inoltre direzione e verso concordi con quelli di q ed apparterrà al piano $x-q$ di cui allo schema in figura. Resta da determinarne la posizione. Per le proprietà di cui gode la risultante \mathbf{R} , il suo momento rispetto ad un generico polo (es. O) deve essere pari al momento M_O della distribuzione q rispetto allo stesso polo

$$R \bar{x} = M_O$$

Risultante di una distribuzione di forze parallele



essendo

$$dF = q(x) dx \rightarrow dM_O = x dF = x q(x) dx$$

si ha

$$M_O = \int dM_O = \int_0^L x q(x) dx$$

per cui la distanza che intercorre tra la direzione della risultante ed il polo O è pari a

$$\bar{x} = \frac{M_O}{R} = \frac{\int_0^L x q(x) dx}{\int_0^L q(x) dx}$$

La risultante \mathbf{R} passa allora per il baricentro della distribuzione q .

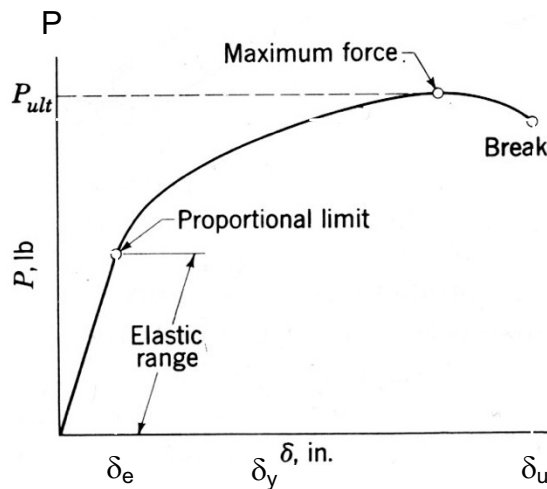
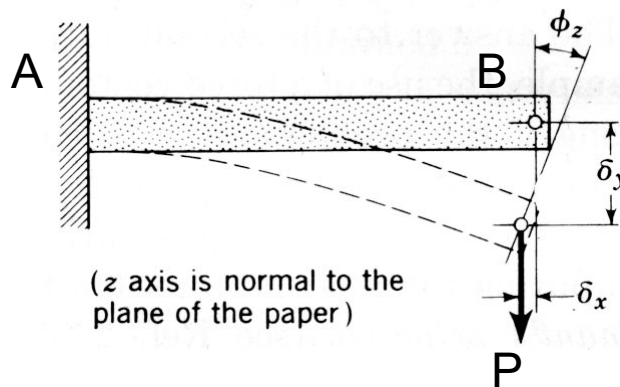
La modellazione strutturale

Modelli (matematici, concettuali) che colgono le caratteristiche salienti dei sistemi strutturali (e che trascurino gli aspetti giudicati inessenziali).

I modelli strutturali vengono definiti schematizzando:

1. l'ambito (dominio) di analisi: ogni sistema è collegato al mondo circostante e con esso interagisce; il dominio di analisi deve essere abbastanza esteso da poter ritenere trascurabili gli effetti di ciò che viene escluso e abbastanza piccolo da poter essere agevolmente schematizzato;
2. la geometria: (elementi monodimensionali, bidimensionali, tridimensionali);
3. i collegamenti tra gli elementi che compongono il sistema strutturale (vincoli interni) e tra il sistema strutturale ed il mondo esterno (condizioni al contorno, vincoli esterni);
4. le azioni (peso proprio, sovraccarichi, cedimenti, distorsioni, vento, sisma, ...);
5. il comportamento del materiale.

Caratterizzazione della risposta strutturale



La risposta meccanica di un sistema strutturale è caratterizzata dalle seguenti entità:

- **rigidezza**: rapporto tra la forza applicata e lo spostamento misurato; rigidezza maggiore implica un maggiore carico da applicare per avere lo stesso valore di spostamento;
- **resistenza**: massimo carico sopportabile; può non corrispondere al carico a rottura;
- **duttilità**: misura la capacità della struttura di subire deformazioni oltre il limite elastico; si misura mediante il rapporto fra spostamento ultimo e spostamento al limite elastico.