

# Calcolo strutturale assistito dall'elaboratore

*Problemi di modellazione  
limiti e metodologie di calcolo  
interpretazione e validazione  
dei risultati*

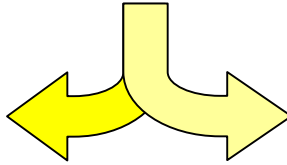
## Sommario

- Generalità sui software di calcolo strutturale
- Schema del processo di progettazione strutturale assistita
- Limiti ed inesattezze nella modellazione della struttura
- Schemi errati e corretti di modellazione di particolari strutturali
- Esempi “concreti” di modellazione

# Generalità sui software di calcolo

a seconda dell'input

## Input ELEMENTI FINITI



## Input ELEMENTI STRUTTURALI

Il progettista inserisce un modello agli **elementi finiti** della struttura (per esempio le aste saranno "segmenti" interconnessi tramite i nodi agli estremi, gli elementi shell saranno rettangoli, o nei programmi più evoluti, poligoni forabili)

- Massima libertà di modellazione
- Si può progettare un edificio così come un pezzo meccanico
- **Indispensabile progettista competente**
- **Processo di progettazione delle armature poco "automatizzato".**

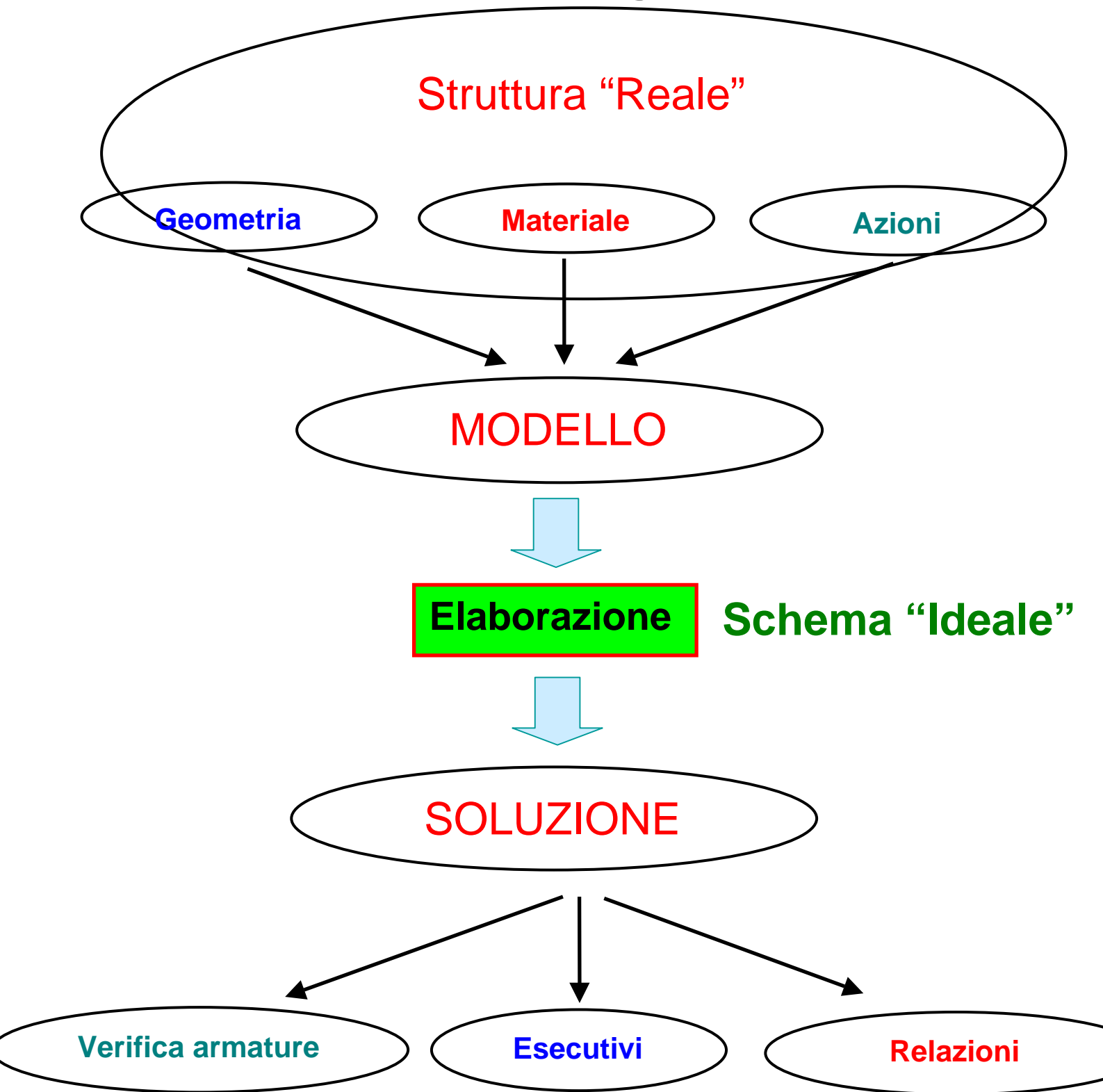
Il progettista inserisce direttamente degli **elementi strutturali** (i.e. travi, pilastri, setti) (aste e shell non "esisteranno" in quanto tali; al loro posto si inseriranno direttamente travi, pilastri, pareti armate, solai, cioè delle ben precise categorie strutturali)

- **Ridotta libertà di modellazione, input "ingessato"**
- **Solo edifici, "salti mortali" per strutture un po' fuori dall'ordinario**
- **Anche progettisti meno qualificati possono usarlo**
- **Progettazione delle armature semi-automatica occorre però controllare attentamente il risultato**

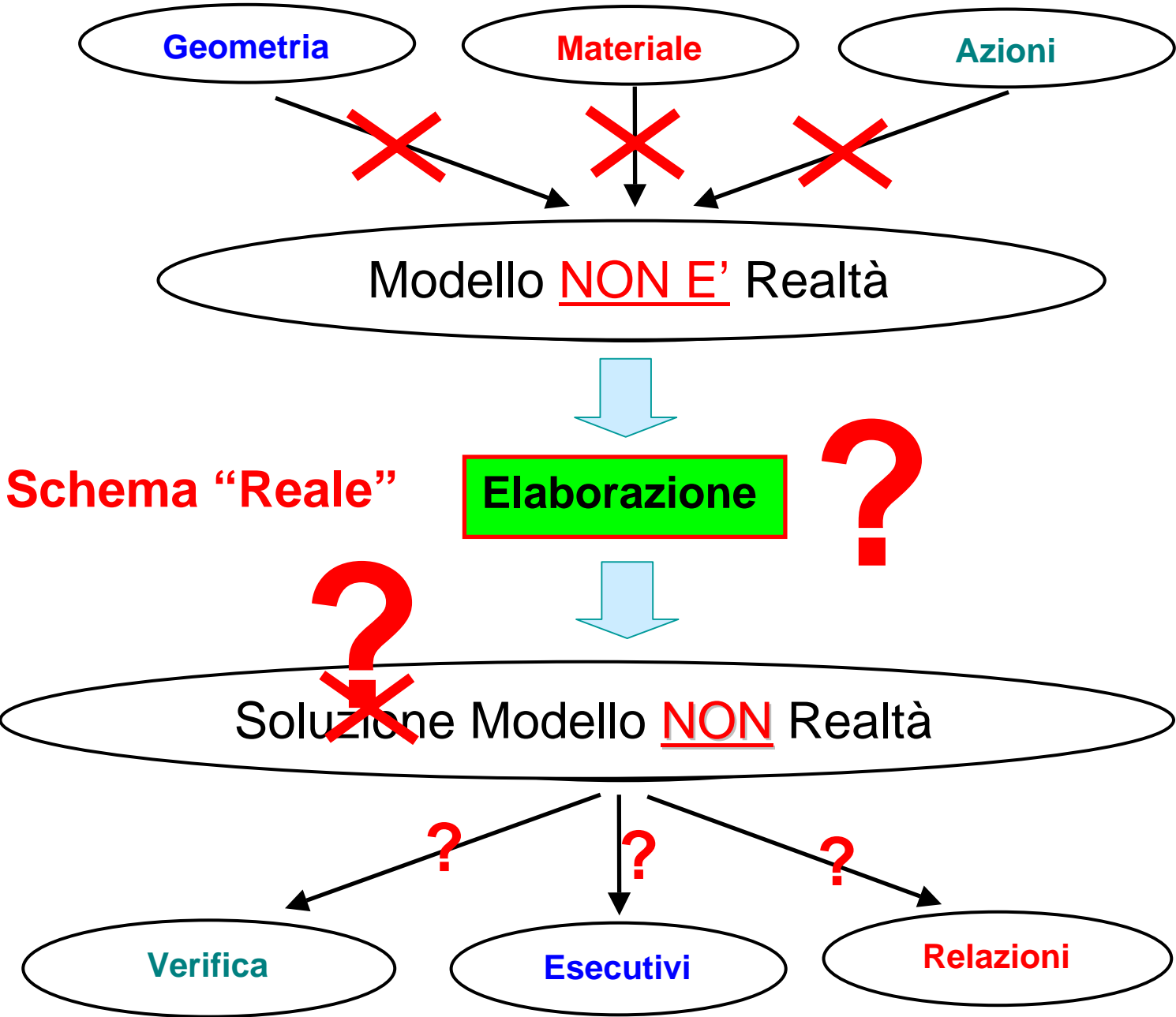
**E' il progettista che "guida" dunque deve conoscere la strada**

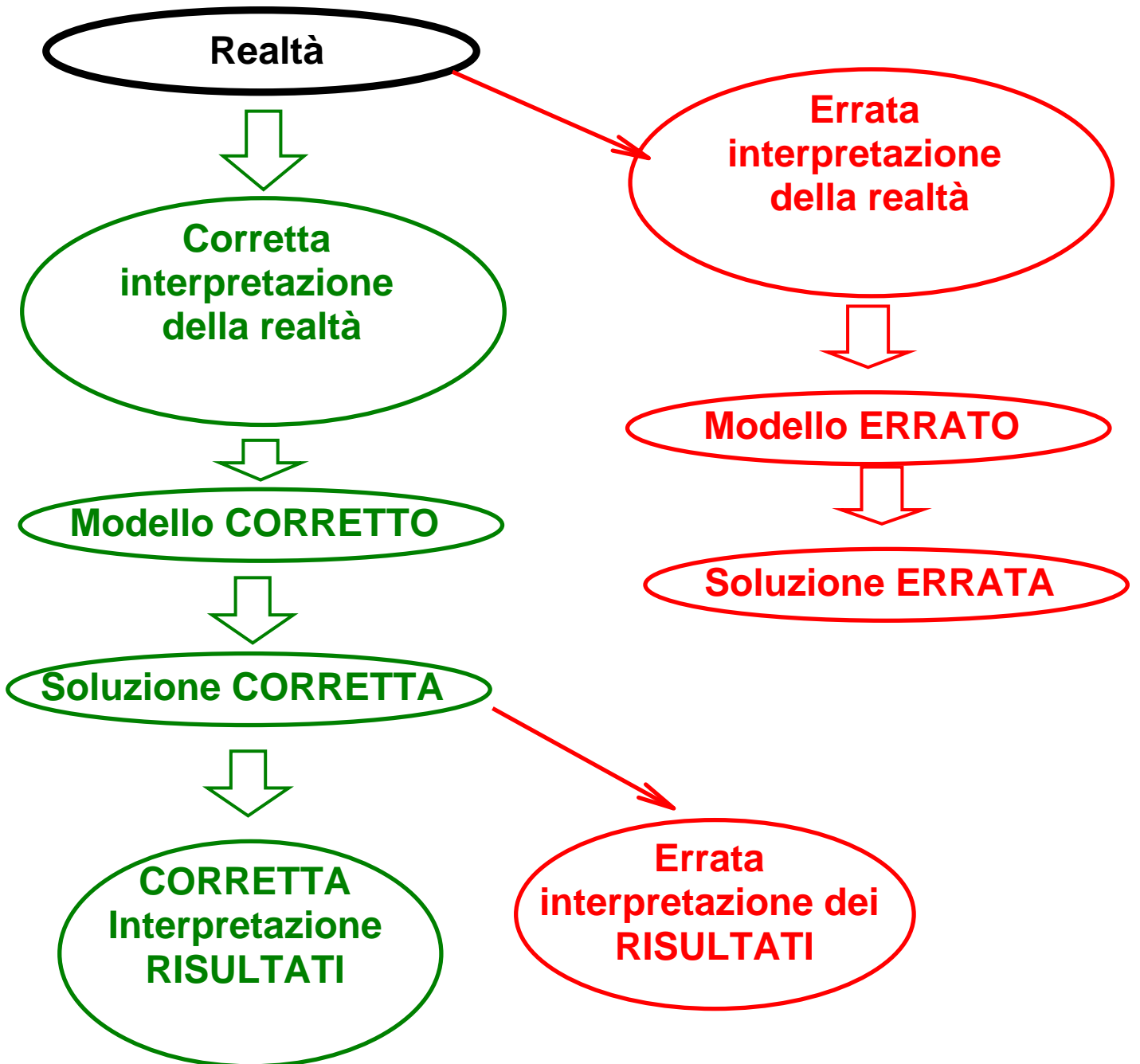
**E' il programma a tracciare la strada dunque il progettista deve adeguarsi**

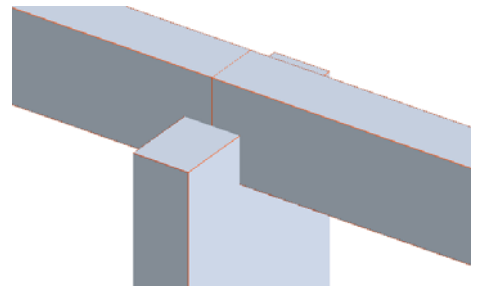
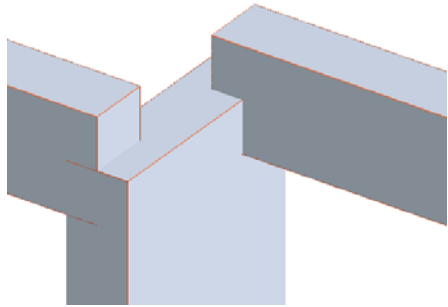
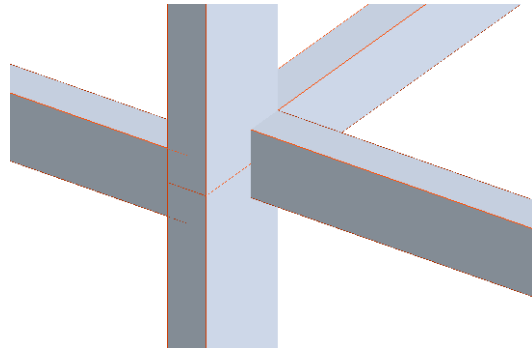
# Processo di progettazione



# Processo di progettazione



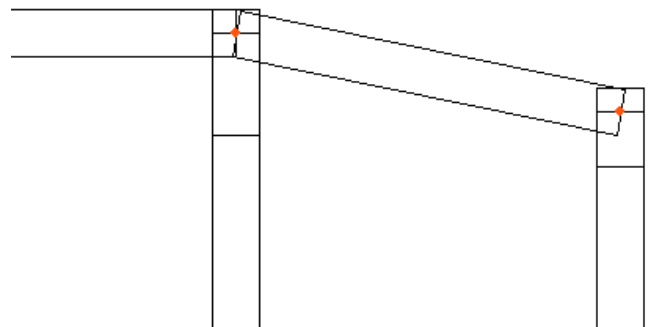
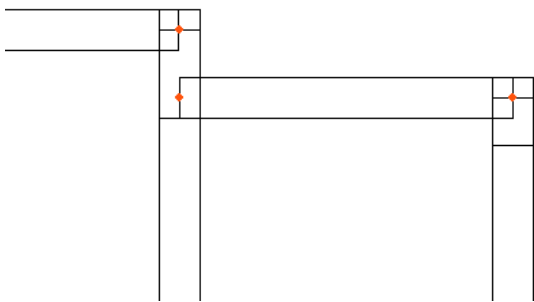
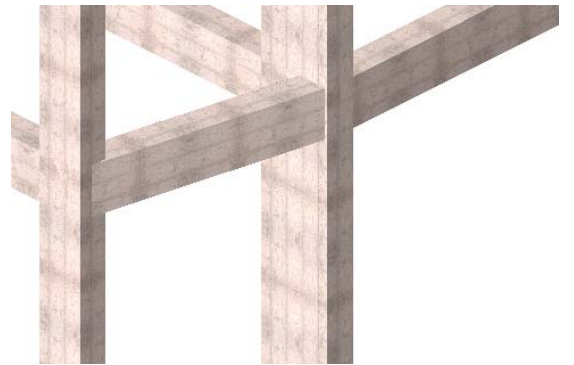
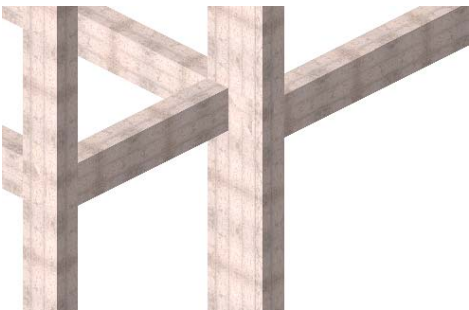


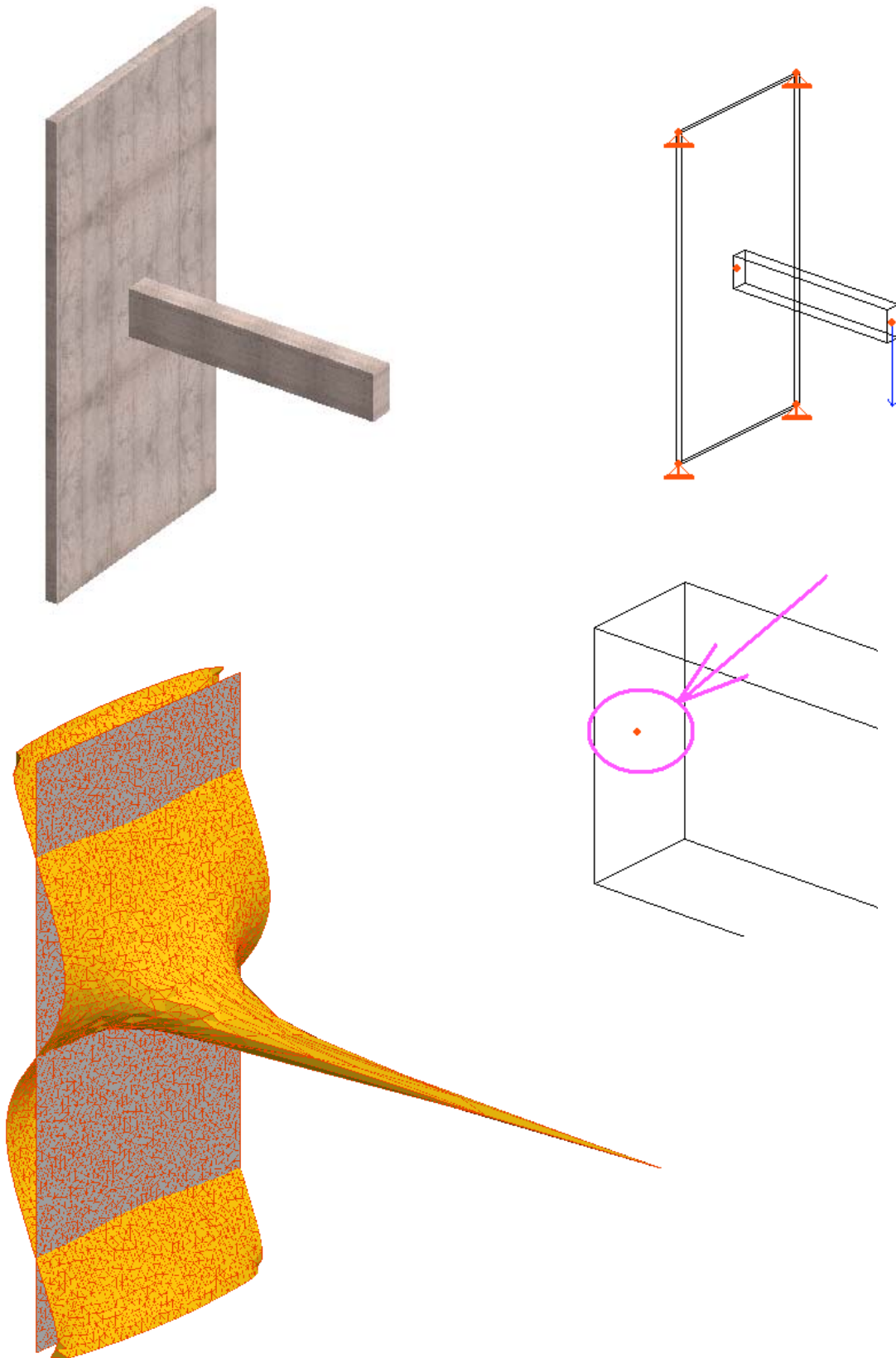


**Realtà**

***DIVERSA***

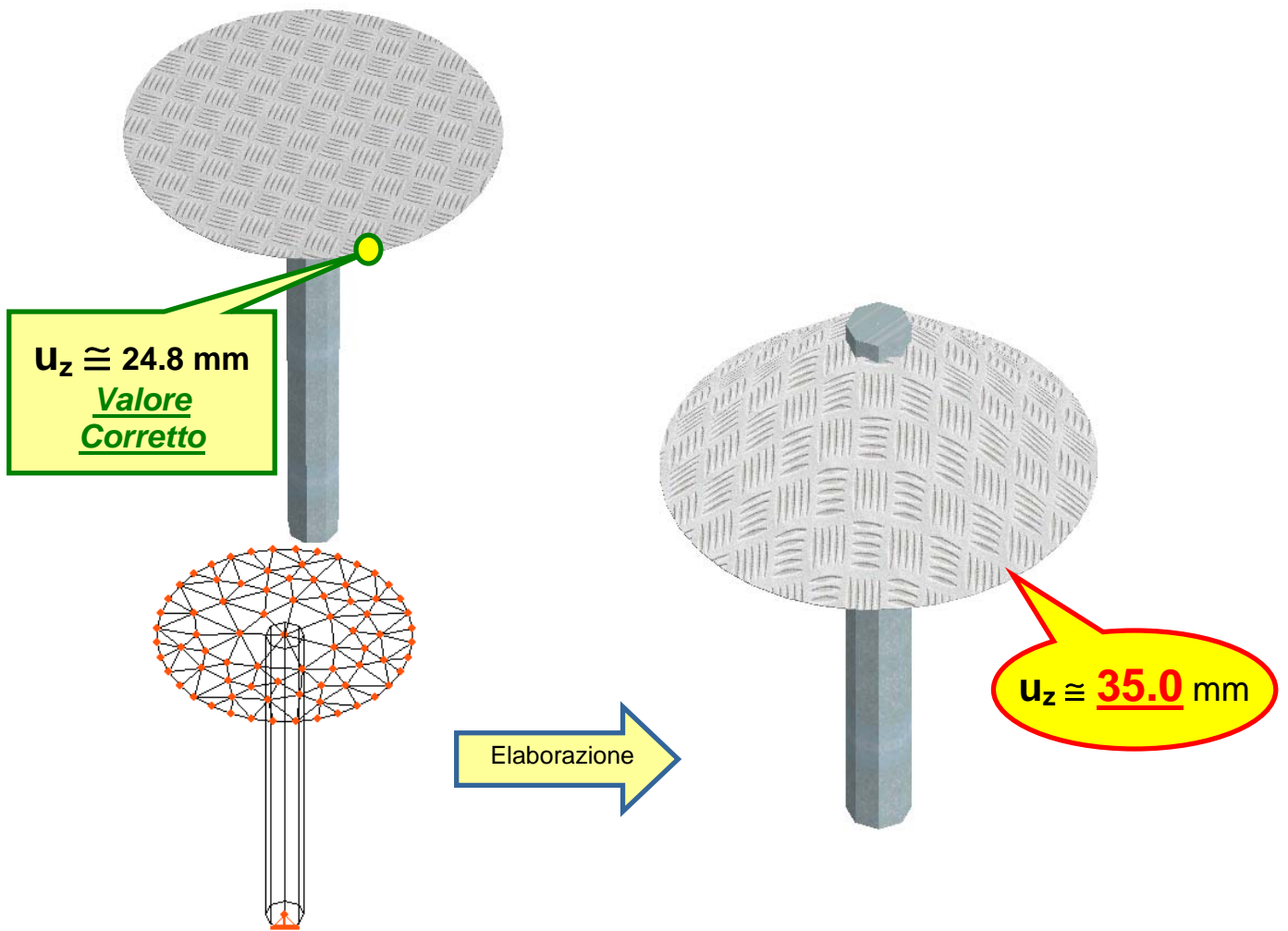
**Modello**





Effetto di **CONCENTRAZIONE DELLO SFORZO** nel nodo di collegamento **Trave-Shell**

- Errata valutazione delle sollecitazioni nell'elemento shell (effetto locale)
- Sottovalutazione della rigidità del collegamento Trave-Shell
- Errata valutazione di sollecitazioni e spostamenti nella Trave



**Concentrazione dello  
sforzo**

Attenzione, il fenomeno di concentrazione dello sforzo non è un errore, un evento da evitare...

...è piuttosto, un indicatore che, **in certi casi**, ci fa capire che il modello è sbagliato  
...**in altri invece** è la prova che il modello è attinente!

Se sottoponiamo la lastra ad una trazione agli estremi...

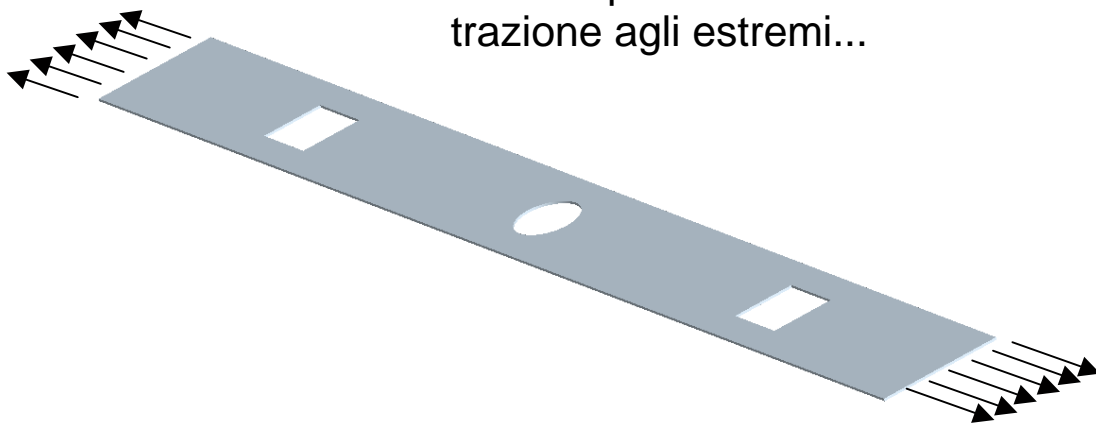
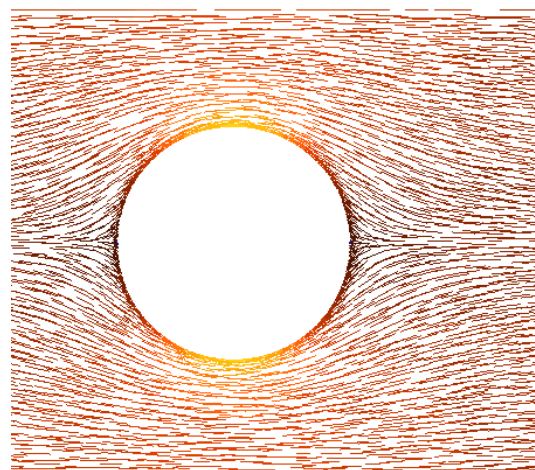
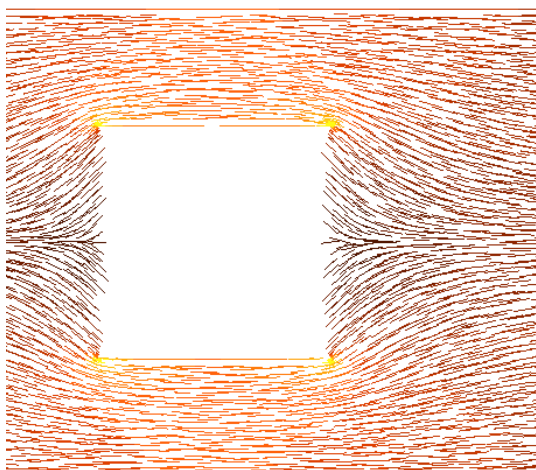
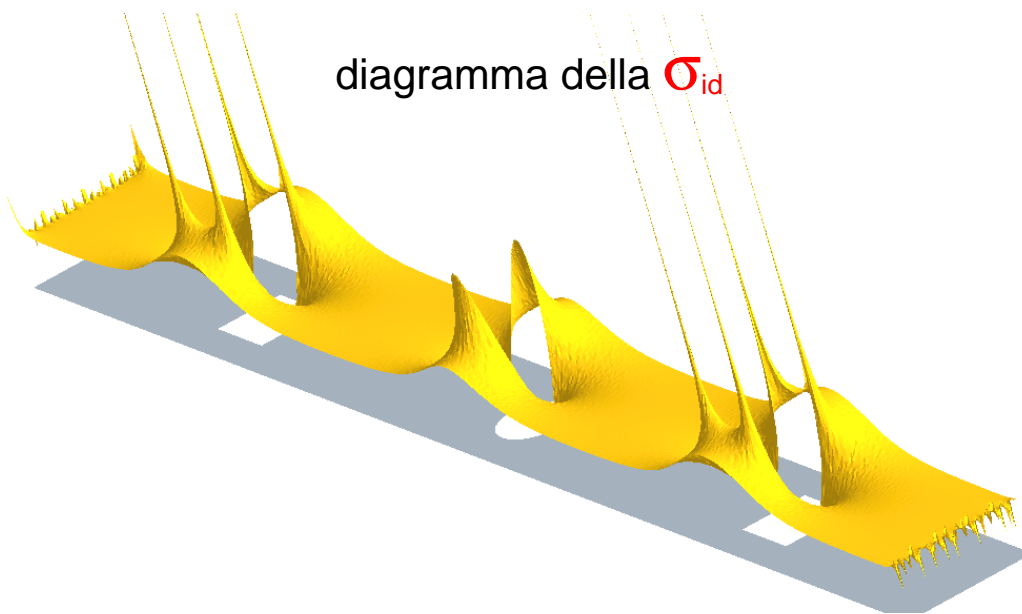
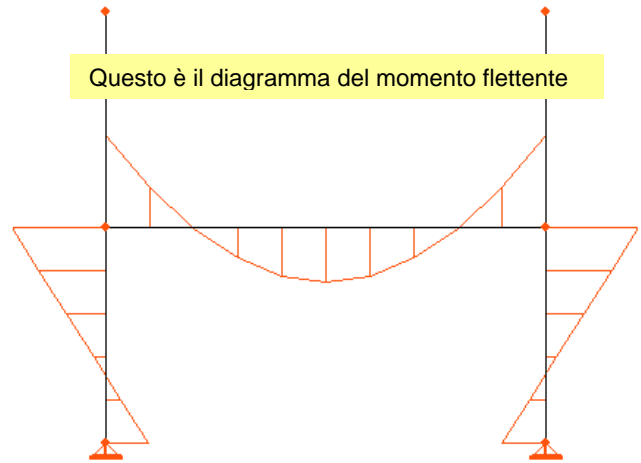
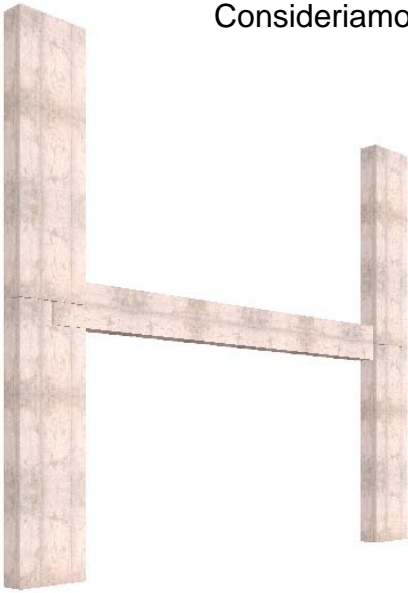


diagramma della  $\sigma_{id}$

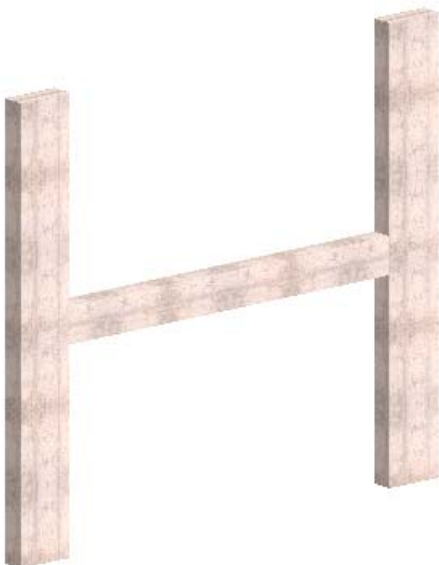
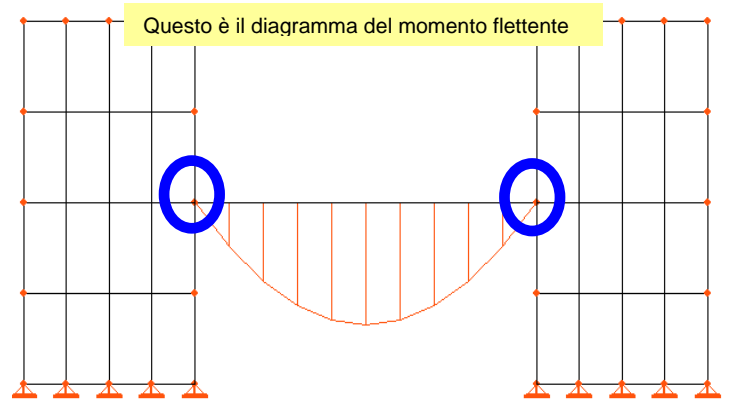
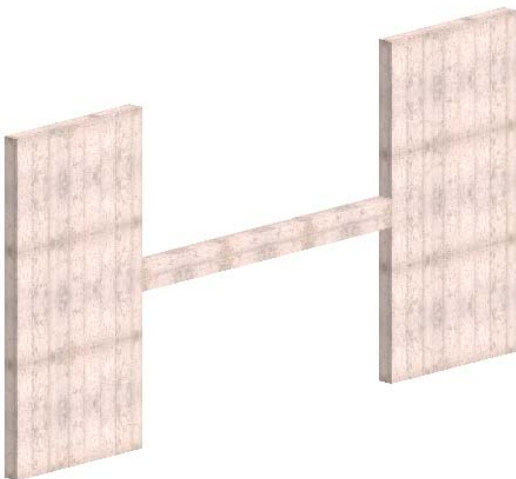


Direzioni principali di trazione

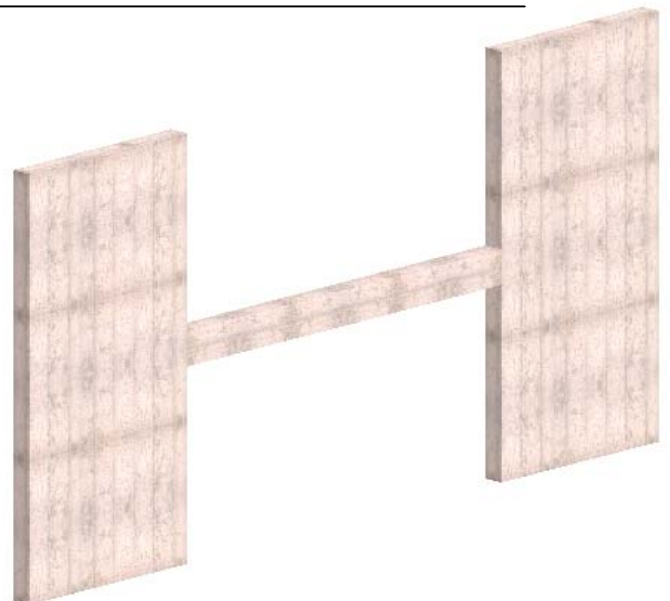
Consideriamo due pilastri e una trave caricata con con carico ripartito



Consideriamo adesso invece che due pilastri, due pareti armate...



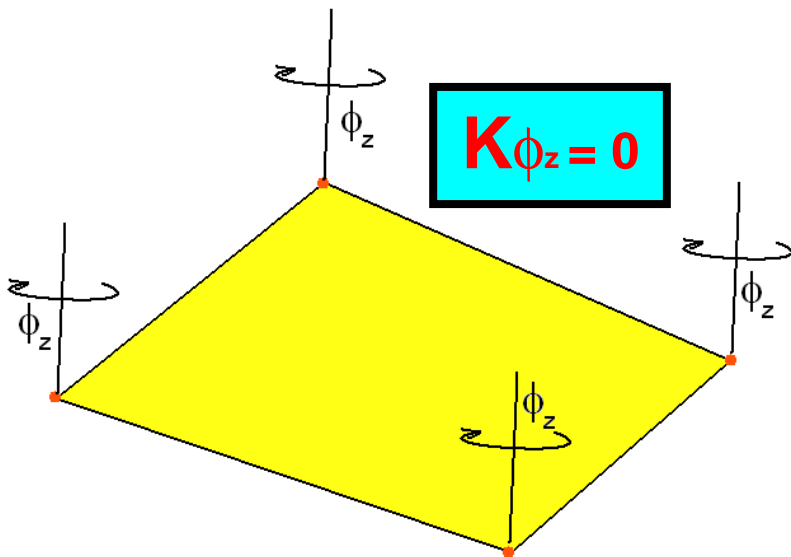
**incastro quasi "perfetto"**



**equivalente a vincolo cerniera ?**

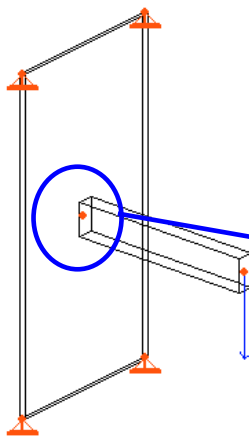
## L'errore di modellazione, in questo caso è dovuto al particolare funzionamento degli elementi shell

che hanno **Rigidezza nulla** alla rotazione attorno all'asse **NORMALE ai LORO PIANO MEDIO**

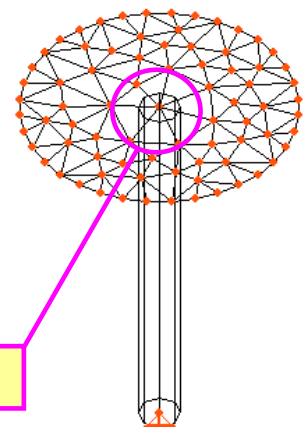


Con elementi shell, non è possibile quindi (senza utilizzare particolari accorgimenti che vedremo) trasmettere momenti con asse perpendicolare al loro piano medio

Inoltre, alla luce di quanto detto, anche le strutture dei due esempi precedenti presentavano delle labilità!



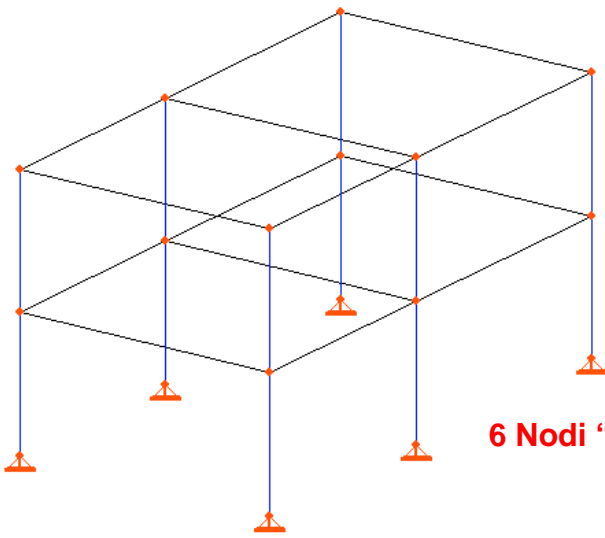
La trave era libera di ruotare intorno al proprio asse...



e il disco di ruotare attorno all'asse del pilastro come una ruota!

# Introduzione ai legami di dipendenza

Questo sistema strutturale ha:



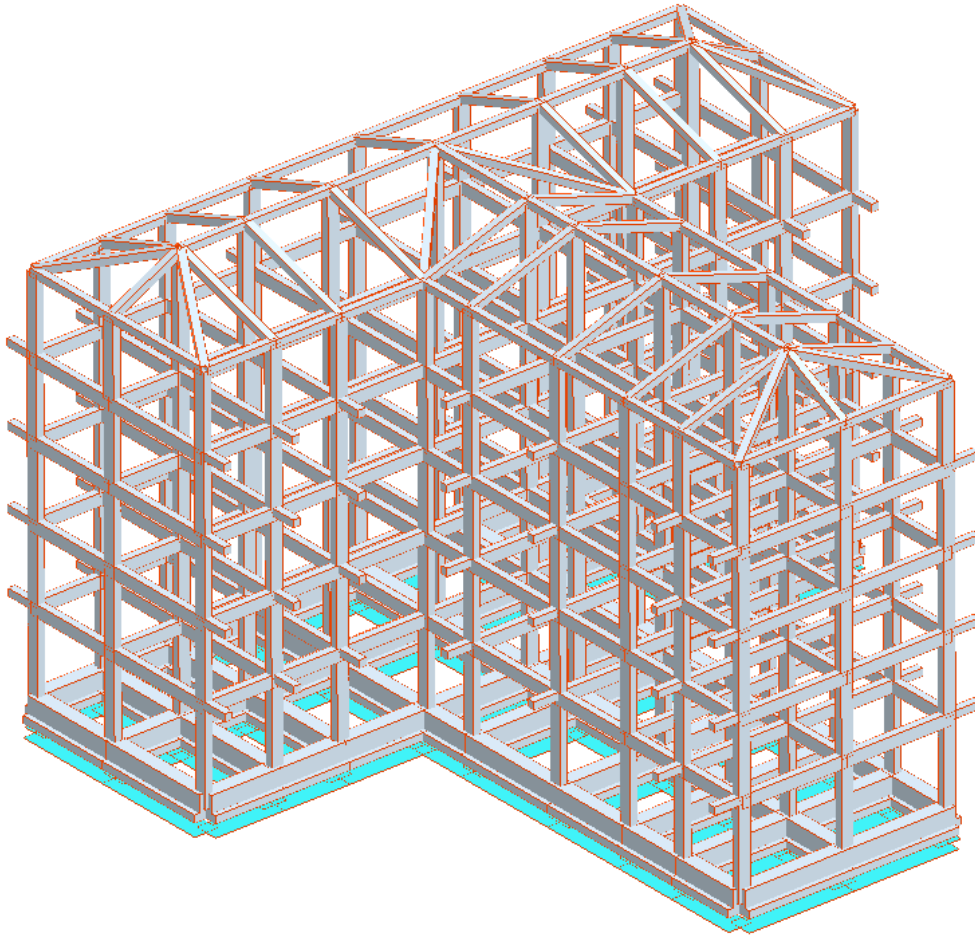
**12 Nodi liberi** -  $12 \times 6 = 72$  gdl indipendenti

**6 Nodi "incastri"** -  $6 \times 6 = 36$  gdl vincolati (o assegnati)

$\underline{u}_v$  36 g.d.l. vincolati (6 x ciascuno dei 6 incastri)

$\underline{u}_i$  72 g.d.l. indipendenti (6 x 12 nodi liberi)

$\underline{u}^*$  36 g.d.l. significativi per l'analisi modale  
sismica (3 spostamenti x ciascun nodo libero)



$\underline{u}_v$  84 g.d.l. vincolati (2 x 42 nodi di fondazione)

$\underline{u}_i$  1932 g.d.l. indipendenti (4 x 42 nodi fondazione  
+ 6 x 294 nodi liberi)

$\underline{u}^*$  924 g.d.l. significativi per l'analisi modale  
sismica

Questo valore, destinato a crescere se aggiungiamo per esempio un vano scala o una o più pareti armate, è oneroso in termini computazionali

Al fine di limitare il numero di gdl da considerare nell'analisi sismica, ma anche per modellare correttamente alcuni aspetti della struttura è, a volte utile, altre volte indispensabile, imporre delle **leggi di dipendenza** fra diversi gdl

una legge di dipendenza è una **Relazione** che lega due gruppi di gdl

$$\underline{u}_s = \underline{H} \times \underline{u}_m$$

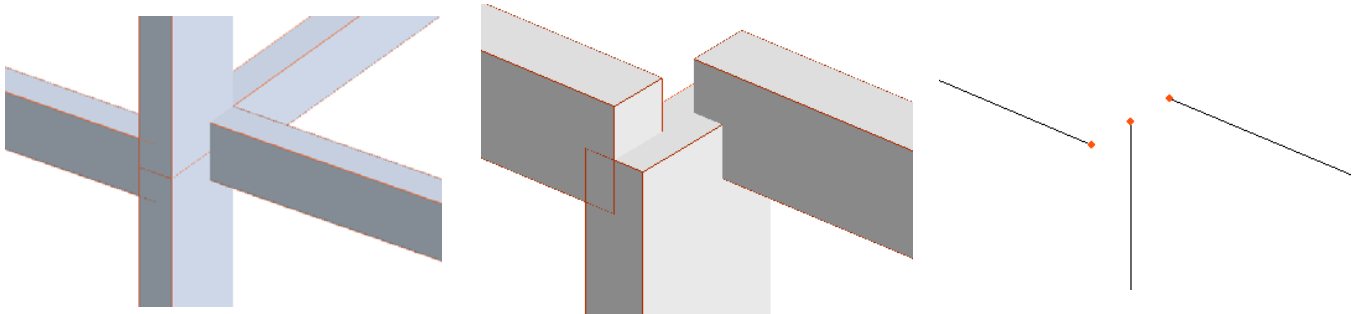
- $\underline{u}_m$  gradi di libertà **MASTER**, indipendenti
- $\underline{u}_s$  gradi di libertà **SLAVE**, legati al master tramite la relazione (lineare)  $\underline{H}$
- $\underline{H}$  legge o relazione di **DIPENDENZA** (matrice  $\underline{u}_m$  colonne x  $\underline{u}_s$  righe)

Il concetto appena esposto di Relazione di Dipendenza è comunemente usato nei software di calcolo, in particolare, per la modellazione di solai

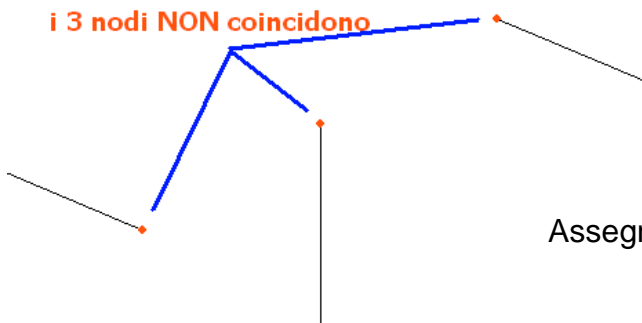
Nei programmi orientati agli **elementi strutturali** l'operazione di assegnamento gdl master e slave e la scelta della legge di dipendenza da adottare è in genere "*nascosta*" all'utente, al quale viene semplicemente chiesto di identificare i cosiddetti "**piani sismici**"

Nei programmi orientati agli **elementi finiti** sarà invece il progettista ad assegnare i nodi master e gli slave e a scegliere di volta in volta, la legge di dipendenza più adatta.

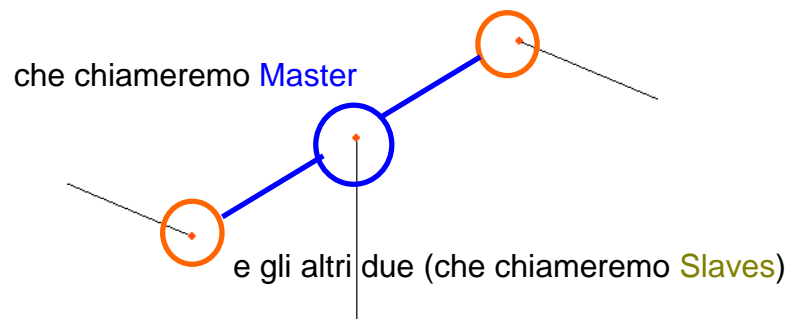
Rivediamo ora gli esempi precedenti per vedere come vanno modellati...



Iniziamo dal nodo "sfalsato"



Assegnamo adesso una legge di dipendenza tra un nodo

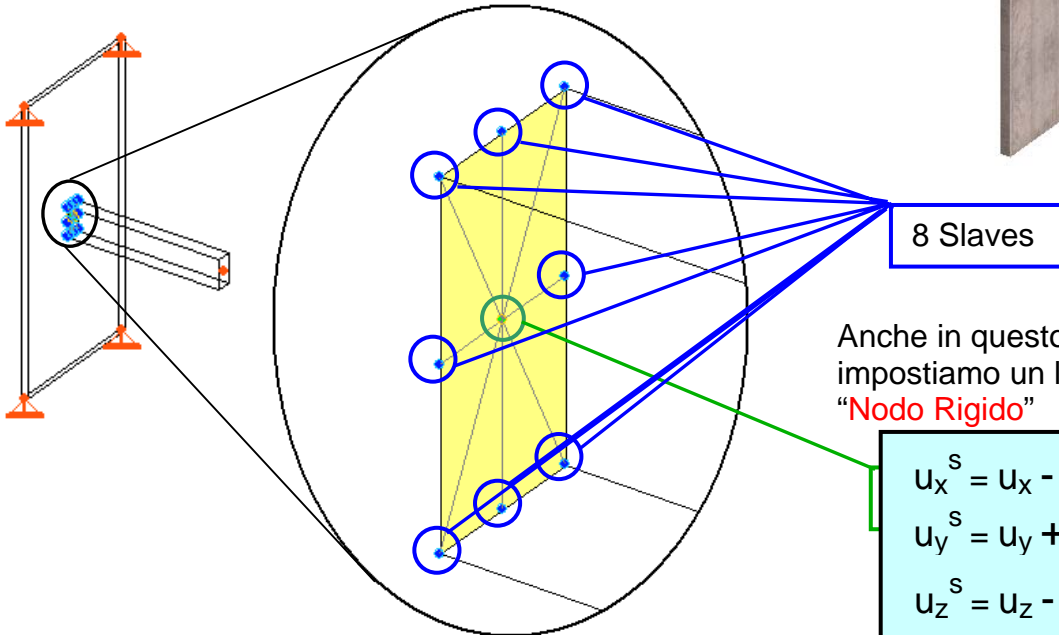


La legge di dipendenza sia di "Nodo Rigido" ossia:

$$\begin{aligned}
 u_x^s &= u_x - \phi_{zx}(y^s - y) + \phi_{yx}(z^s - z) \\
 u_y^s &= u_y + \phi_{zx}(x^s - x) - \phi_{xx}(z^s - z) \\
 u_z^s &= u_z - \phi_{yx}(x^s - x) + \phi_{xx}(y^s - y) \\
 \phi_x^s &= \phi_x \\
 \phi_y^s &= \phi_y \\
 \phi_z^s &= \phi_z
 \end{aligned}$$

Adesso i tre nodi non sono più "pendenti" perchè legati da una relazione che coinvolge TUTTI I 6 GDL di ogni nodo

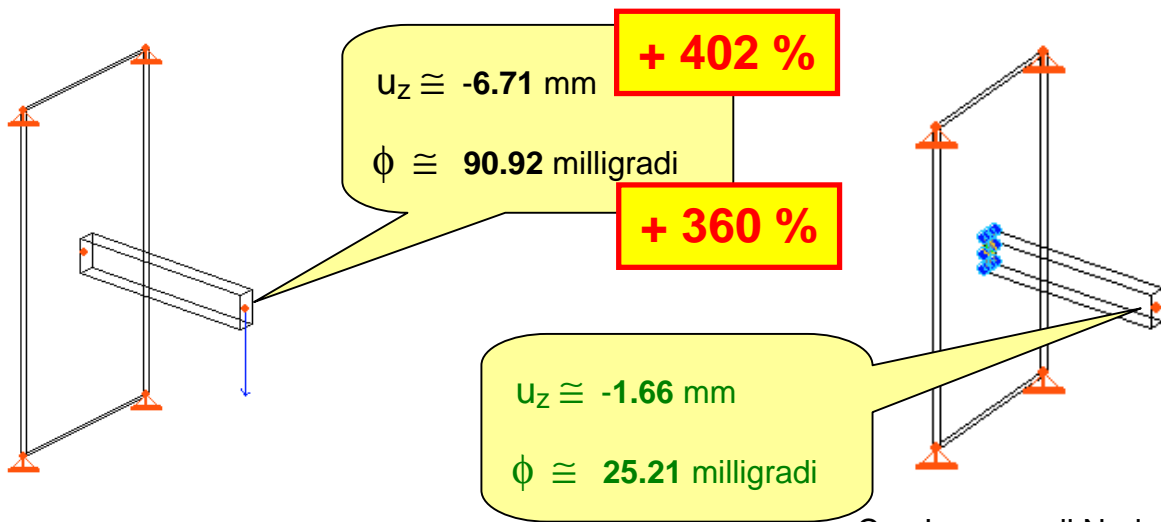
Anche nel caso della mensola incastrata nella parete armata l'utilizzo del legame di **Nodo Rigido** consente una più corretta modellazione.



Anche in questo caso impostiamo un legame di tipo **"Nodo Rigido"**

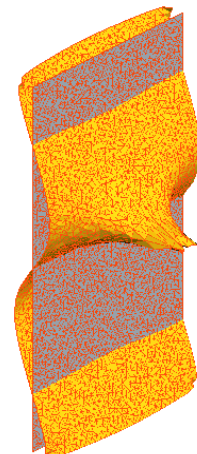
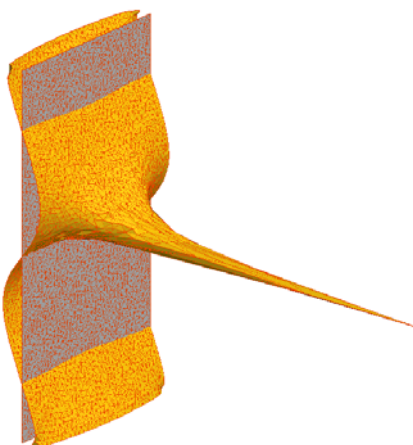
$$\begin{aligned}
 u_x^s &= u_x - \phi_{zx}(y^s - y) + \phi_{yx}(z^s - z) \\
 u_y^s &= u_y + \phi_{zx}(x^s - x) - \phi_{xx}(z^s - z) \\
 u_z^s &= u_z - \phi_{yx}(x^s - x) + \phi_{xx}(y^s - y) \\
 \phi_x^s &= \phi_x \quad \phi_y^s = \phi_y \quad \phi_z^s = \phi_z
 \end{aligned}$$

Riportiamo, a titolo d'esempio, i valori di deformazione all'estremo libero della mensola nei due casi (senza e con legame):

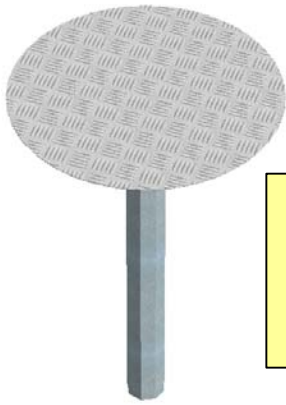


Senza Legame di Nodo Rigido

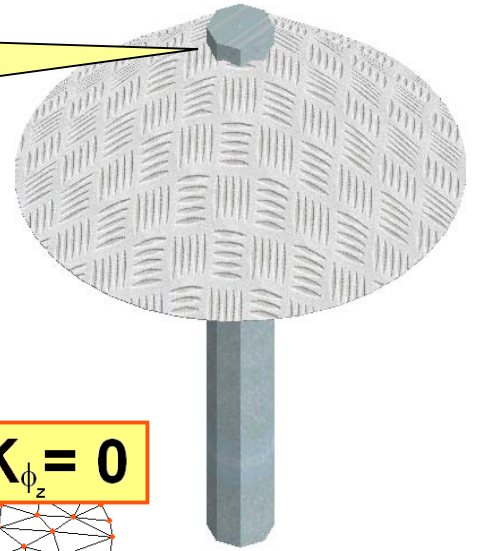
Con Legame di Nodo Rigido



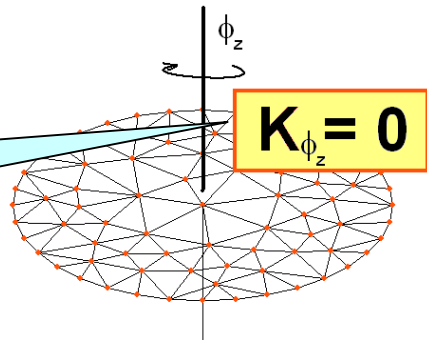
Nel caso del pilastro sormontato da un disco in acciaio, abbiamo visto che vi sono due errori



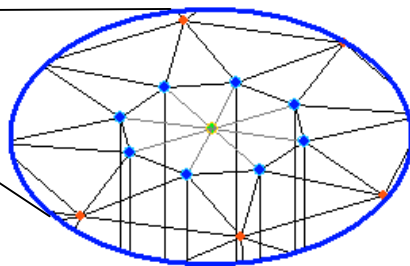
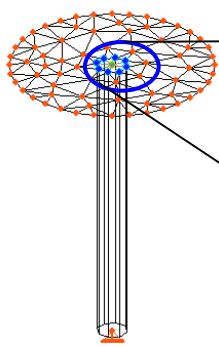
Eccessivo abbassamento del contorno unitamente ad una forma "strana" delle deformazioni in corrispondenza al centro del disco



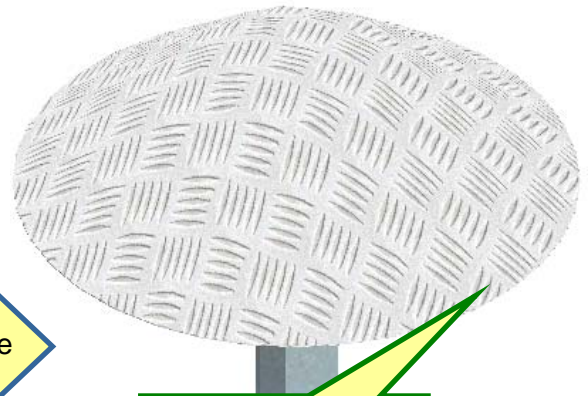
Mancanza di rigidezza alla rotazione attorno all'asse normale al piano (caratteristica degli elementi shell)



Anche in questo caso la modellazione corretta fa ricorso all'uso di un legame di nodo rigido



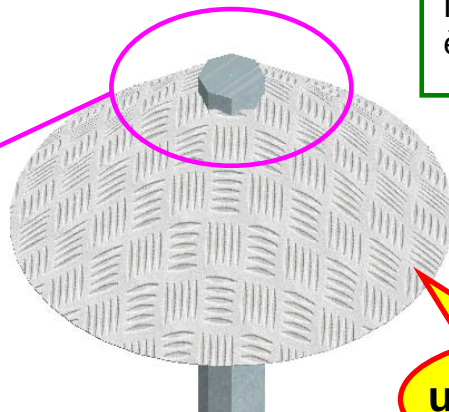
Elaborazione



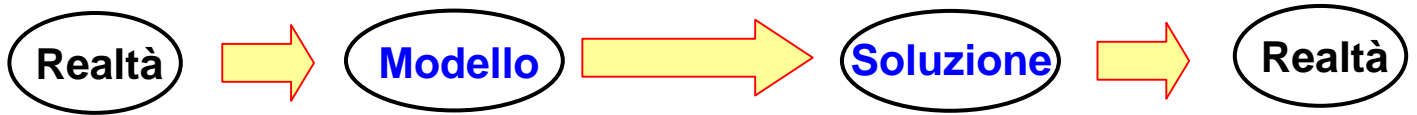
$u_z \cong 24.8$

Il valore dell'abbassamento è adesso corretto

La deformata non presenta più quella strana forma al centro del disco



$u_z \cong 35.0$  mm



## Cosa ci può far sospettare di aver commesso un errore ?



- Aspetti insoliti o inprevisti dei diagrammi di sollecitazione (concentrazione dello sforzo)



- Raffigurazioni “strane” delle deformate (compatibilmente con i limiti grafici del software)

- Forme modali “disarmoniche”, prime forme modali che coinvolgono parti minime della struttura
- Comportamento globale, troppo diverso da risultati di analisi semplificate ( $T_0 \gg / \ll 0.1 H / B^{1/2}$ )
- Mancanza di simmetria, discontinuità, disarmonia negli spostamenti (errori nella soluzione)

Quello che si vuole sottolineare, a conclusione di questa “chiaccherata” è che nessun programma di calcolo, per quanto avanzato, può sostituire la competenza e l’intelligenza del progettista, il quale è a tra l’altro, l’unico responsabile legale e “morale” delle proprie “affermazioni progettuali”.

Il giorno in cui vedrà la luce un software così elaborato da compiere da solo la scelta giusta in ogni situazione, sarà anche quello in cui la figura dell’ingegnere non sarà più necessaria.