

Università di Catania
Corso di laurea in ingegneria civile strutturale e geotecnica

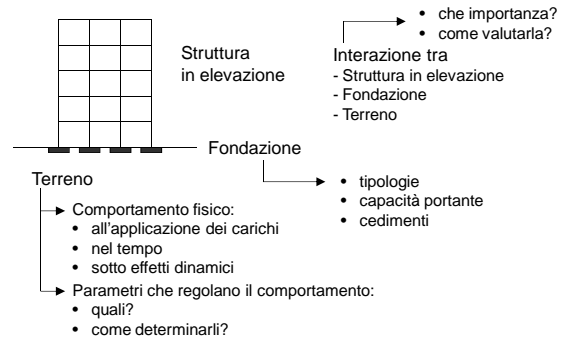
Costruzioni in zona sismica

Problematiche strutturali e geotecniche
nel progetto delle fondazioni

17-18 gennaio 2012

Aurelio Ghersi

Alcune problematiche



Incertezze e approcci per la sicurezza

Approccio generale all'analisi strutturale e geotecnica

- Incertezze sulle azioni applicate alla struttura
- Incertezze sulla proprietà meccaniche (es. resistenza) dei materiali e del terreno



- Necessità di scegliere opportuni valori di riferimento
- Necessità di adottare opportuni coefficienti di sicurezza

Quali valori di riferimento per i materiali strutturali ?

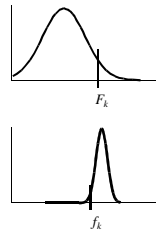
- Quello che succede in un singolo punto ha poca importanza
 - Quello che succede in una zona un po' più ampia (ad esempio un concio di trave) può condizionare il comportamento o causare il collasso dell'intera struttura
- ↓
- Il riferimento base deve essere una resistenza al di sotto della quale si può scendere solo raramente (solo nel 5% dei casi: f_k valore caratteristico)
 - Quando si esamina il comportamento globale, a volte si usa come riferimento il valore medio f_m (edifici esistenti in zona sismica, comportamento duttile)

Quali valori di riferimento per il terreno ?

- Quello che succede in un singolo punto o in zone un po' più ampie ha spesso poca importanza
- ↓
- Il riferimento base devono essere le proprietà medie del terreno
 - Il terreno è spesso costituito da strati diversi, ma di solito si può far riferimento alle proprietà medie dei diversi strati
 - Attenzione: in certi casi diventa importante diversificare correttamente i terreni (es. cedimenti differenziali dovuti a terreni diversi in verticali distinte)

Nel passato: strutture metodo delle tensioni ammissibili (TA)

- Per i carichi: valore di riferimento corrispondente ad un carico che solo raramente può essere superato (es. nel 5% dei casi, per tutta la vita della struttura)
- Per le resistenze: valore di riferimento corrispondente ad una resistenza al di sotto della quale si può scendere solo raramente (es. nel 5% dei casi)
- Applicazione di un coefficiente di sicurezza alle resistenze



$$\bar{\sigma}_c \cong \frac{f_{ck}}{3} \quad \bar{\sigma}_s \cong \frac{f_{yk}}{1.5}$$

Nel passato: terreno calcolo "a rottura" (anche se il termine non è usato)

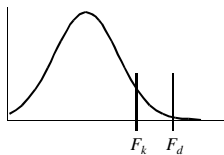
- Per i carichi: valore di riferimento corrispondente ad un carico che solo raramente può essere superato (es. nel 5% dei casi, per tutta la vita della struttura)
- Per le proprietà del terreno: valore di riferimento corrispondente a quello medio
- Applicazione di un coefficiente di sicurezza ai carichi limite

$$Q_{amm} \cong \frac{Q_{lim}}{3}$$

Oggi: strutture verifica allo stato limite ultimo (SLU)

- Per i carichi: valore di riferimento corrispondente ad un carico che può essere superato solo in casi estremamente rari (es. nel 0.1% circa dei casi, per tutta la vita della struttura; oppure terremoto con $T_r=475$ anni)
 - da valore caratteristico a valore di calcolo:

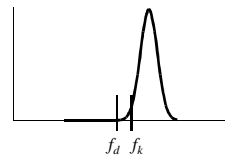
$$F_d = \gamma_F F_k \quad \gamma_F \text{ coefficiente di sicurezza parziale } (>1)$$



Oggi: strutture verifica allo stato limite ultimo (SLU)

- Per le resistenze: valore di riferimento corrispondente ad una resistenza al di sotto della quale si può scendere solo in casi estremamente rari (es. nel 0.1% dei casi)
 - da valore caratteristico a valore di calcolo:

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad \gamma_M \text{ coefficiente di sicurezza parziale } (>1)$$



Oggi: terreno come dovrebbe essere ...

- Per i carichi: come per strutture, valore di riferimento corrispondente ad un carico che può essere superato solo in casi estremamente rari
 - da valore caratteristico a valore di calcolo:
- Per le proprietà del terreno: valore di riferimento corrispondente a situazioni al di sotto della quale si può scendere solo in casi estremamente rari (es. nel ??? dei casi)
 - da valore caratteristico (o medio?) a valore di calcolo:

$$F_d = \gamma_F F_k \quad \gamma_F \text{ coefficiente di sicurezza parziale}$$

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad \gamma_M \text{ coefficiente di sicurezza parziale}$$

Oggi: terreno Perché è difficile fare così ?

- C'è carenza di studi sperimentali che valutino la dispersione dei dati geotecnici e l'effetto di tale dispersione sul comportamento delle strutture
- Quasi tutte le formule che si usano nascono da dati sperimentali, tarati sul calcolo "a rottura"
- Le formule sono in molti casi fortemente non lineari al variare dei parametri geotecnici



Occorrerebbe "rifondare" la geotecnica, cioè riorganizzarla fin dall'inizio secondo i nuovi approcci ... ma per questo ci vuole molto tempo

Oggi: terreno ... e come invece è

- Due distinti approcci (approccio 1 e approccio 2)

Notare:

- i risultati possono essere diversi
- tranne casi particolari, possiamo scegliere liberamente quale dei due usare

E la garanzia di uguale sicurezza dov'è finita?

- ... e vengono messe in mezzo pure le strutture
- ma per le strutture non cambia niente nei due approcci

Era meglio non parlarne proprio

Oggi: terreno In generale

- Per le proprietà del terreno: valore di riferimento determinato mediante un coefficiente di sicurezza parziale

$$f_d = \frac{f_k}{\gamma_M} \quad \gamma_M \text{ coefficiente di sicurezza parziale}$$

- E poi, contemporaneamente, applicazione di un coefficiente di sicurezza ai carichi limite

$$q_{Rd} = \frac{q_{lim}}{R} \quad R \text{ ulteriore coefficiente di sicurezza}$$

Approccio misto, tra SLU e calcolo a rottura

Oggi: terreno In particolare

Approccio 1

- Per i carichi: valore di riferimento corrispondente ad un carico (A2) che può essere superato solo in casi molto (ma non estremamente) rari

$$g_d = g_k \quad q_d = 1.3 q_k$$

- Si applicano i coefficienti M2 alle proprietà del terreno (es. $\gamma_\phi=1.25$, $\gamma_{cu}=1.4$)
- Si applicano i coefficienti R2 ai carichi limite (es. capacità portante fondazioni dirette R=1.8)

NTC 08, punti 2.6.1 e 6.4.2.1

Nota: questo ha senso solo in assenza di sisma

Oggi: terreno In particolare

Approccio 2

- Per i carichi: valore di riferimento corrispondente ad un carico (A1) che può essere superato solo in casi estremamente rari

$$g_d = 1.3 g_k \quad q_d = 1.5 q_k$$

- Si applicano i coefficienti M1 alle proprietà del terreno (sempre unitari)
- Si applicano i coefficienti R3 ai carichi limite (es. capacità portante fondazioni dirette R=2.3)

È un modo per operare così come si faceva nel passato

Approcci

Le verifiche devono essere effettuate almeno nei confronti dei seguenti stati limite:

- SLU di tipo geotecnico (GEO)
 - collasso per carico limite dell'insieme fondazione-terreno
 - collasso per scorrimento sul piano di posa
- SLU di tipo strutturale (STR)
 - raggiungimento della resistenza negli elementi strutturali,

Approccio 1:

- Combinazione 1: (A1 | M1 | R1)
- Combinazione 2: (A2+M2+R2)

Approccio 2:

$$(A1 | M1 | R3).$$

Coefficienti A

Tabella 2.6.1 – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni nelle verifiche SLL

Tabella 6.2.1 – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

CARICHI	EFFETTO	Coefficiente Parziale γ_i (γ_F)	EQU	(A1) STR	(A2) GEO
Permanenti	Favorevole	γ_G	0.9	1.0	1.0
	Sfavorevole		1.1	1.3	1.0
Permanenti non strutturali ⁽¹⁾	Favorevole	γ_Q	0.0	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.5	1.3
Variabili	Favorevole	γ_Q	0.0	0.0	0.0
	Sfavorevole		1.5	1.5	1.3

⁽¹⁾ Nel caso in cui i carichi permanenti non strutturali (ad es. i carichi permanenti portati) siano computazionalmente definiti, si potranno adottare gli stessi coefficienti validi per le azioni permanenti.

Coefficienti M

Tabella 6.2.II - Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

PARAMETRO	GRANDEZZA ALLA QUALE APPLICARE IL COEFFICIENTE PARZIALE	COEFFICIENTE PARZIALE	(M1)	(M2)
	$\tan \phi'_k$	γ_ϕ	1,0	1,25
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio				
Coestione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	s_{uk}	γ_{su}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ	γ_t	1,0	1,0

Coefficienti R

Tabella 6.4.I - Coefficienti parziali γ_R per le verifiche agli stati limite ultimi di fondazioni superficiali

VERIFICA	COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
Capacità portante	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 2,3$
Scorrimento	$\gamma_R = 1,0$	$\gamma_R = 1,1$	$\gamma_R = 1,1$

Tabella 6.4.II - Coefficienti parziali γ_R da applicare alle resistenze caratteristiche

Resistenza	Simbolo	Pali infissi			Pali trivellati			Pali ad elica continua		
	γ_R	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)	(R1)	(R2)	(R3)
Raso	γ_R	1,0	1,45	1,15	1,0	1,7	1,35	1,0	1,6	1,3
Laterale in compressione	γ_s	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15	1,0	1,45	1,15
Totale γ_t	γ_t	1,0	1,45	1,15	1,0	1,6	1,30	1,0	1,55	1,25
Laterale in trazione	γ_{st}	1,0	1,0	1,25	1,0	1,0	1,25	1,0	1,0	1,25

^(*) da applicare alle resistenze caratteristiche dedotte dai risultati di prove di carico di progetto.

Tabella 6.4.VI - Coefficienti parziali γ_t per le verifiche agli stati limite ultimi di pali soggetti a carichi trasversali

COEFFICIENTE PARZIALE (R1)	COEFFICIENTE PARZIALE (R2)	COEFFICIENTE PARZIALE (R3)
$\gamma_t = 1,0$	$\gamma_t = 1,6$	$\gamma_t = 1,3$

Approcci per verifica SLU

Normativa:

- Approccio 1
 - Combinazione 1: (A1+M1+R1)
 - Combinazione 2: (A2+M2+R2)
- Approccio 2
 - (A1+M1+R3)

Nota:

A = coefficienti per azioni
M = coefficienti per materiali (calcestruzzo, acciaio, terreno)
R = coefficienti per resistenza sistema

Approcci per verifica SLU per tutti gli elementi strutturali

Normativa:

- Approccio 1
 - Combinazione 1: (A1+M1+R1)
 - Combinazione 2: (A2+M2+R2)
- Approccio 2
 - (A1+M1+R3)

→ incluso fondazioni

Secondo me è proprio inutile citare questi approcci quando si parla di struttura

Per calcestruzzo e acciaio coefficienti γ_c e γ_s

Per il terreno coefficienti = 1

I coefficienti R in realtà non intervengono proprio

Quindi non sono due approcci diversi

Approcci per verifica SLU per le verifiche geotecniche

Normativa:

- Approccio 1
 - Combinazione 1: (A1+M1+R1)
 - Combinazione 2: (A2+M2+R2)
- Approccio 2
 - (A1+M1+R3)

... in definitiva

Per gli elementi strutturali, incluse le fondazioni, esiste un unico approccio

A1 + M1

come si è sempre visto nei corsi precedenti

cioè con

- azioni incrementate dai coefficienti γ_F (γ_{G1} γ_{G2} γ_{Q}) della tabella 2.6.I, colonna A1
- proprietà dei materiali strutturali ridotte dei coefficienti γ_M riportati per ogni materiale nel capitolo 4
- proprietà del terreno (ove occorrono) nominali, non ridotte

... in definitiva

Per le verifiche geotecniche d'ora in poi parlerò di

- Approccio 1 (A2+M2+R2)
- Approccio 2 (A1+M1+R3)

senza più citare le combinazioni

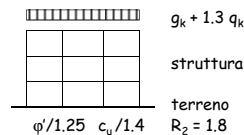
Approcci per verifica SLU per le verifiche geotecniche

Per soli carichi verticali (senza sisma):

di sisma parlerò dopo

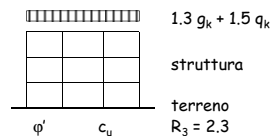
Approccio 1

Carichi più piccoli
Parametri terreno
ridotti
Resistenza ridotta



Approccio 2

Carichi incrementati
Parametri terreno
non ridotti
Resistenza più ridotta

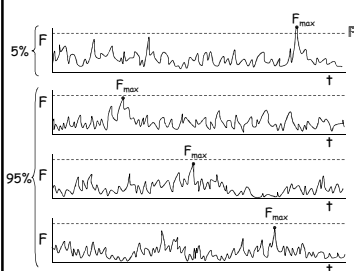


Verifica SLE per le verifiche geotecniche

- Analogamente al caso delle strutture, non bisogna apportare modifiche ai parametri meccanici. Quindi per il terreno si usano i soliti valori, senza coefficienti per modificarli.
 - Si fa riferimento alle combinazioni di carico per SLE (rara, frequente, quasi permanente) $G_k + \psi Q_k$.
 - Si valutano i cedimenti del terreno sotto tali carichi e se ne controlla l'accettabilità.
- Sono importanti soprattutto gli abbassamenti relativi, che possono pregiudicare l'uso dell'edificio ma anche il funzionamento della struttura.

Nelle combinazioni di carico SLE azioni variabili

Valore caratteristico F_k

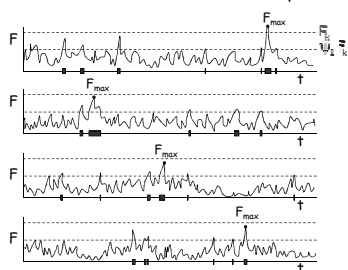


È il frattile 95% dei valori massimi che si hanno in un periodo di riferimento

Cioè è superato durante il periodo di riferimento solo nel 5% degli edifici

Nelle combinazioni di carico SLE azioni variabili

Valore frequente $\psi_1 F_k$



È il frattile 95% della distribuzione temporale in un periodo di riferimento

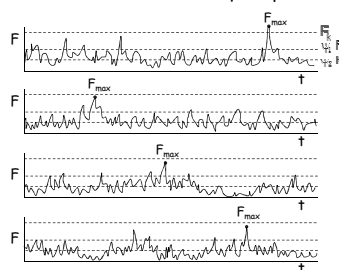
Cioè è superato solo nel 5% del periodo di riferimento

ψ_1 dipende dal tipo di carico

$\psi_1 = 0.5$ carico variabile per abitazione
 0.2 per vento

Nelle combinazioni di carico SLE azioni variabili

Valore quasi permanente $\psi_2 F_k$



È la media della distribuzione temporale in un periodo di riferimento

ψ_2 dipende dal tipo di carico

$\psi_2 = 0.3$ c. var. per abitazione
 0 per vento

Verifica SLE per le verifiche geotecniche

Quali combinazioni di carico usare?

- Non mi risultano particolari indicazioni di normativa
- La logica suggerisce:
 - per terreni a grana grossa, per i quali i cedimenti avvengono in breve tempo:
usare i valori frequenti del carico variabile
 - per terreni a grana fine, per i quali i cedimenti avvengono solo dopo parecchio tempo:
usare i valori quasi permanenti del carico variabile

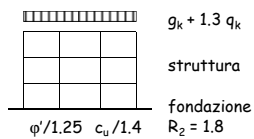
Problematiche sismiche: verifica di struttura e fondazioni

Approcci per verifica SLU per le verifiche geotecniche

Per soli carichi verticali (senza sisma):

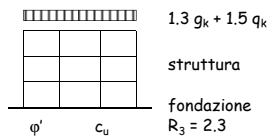
Approccio 1, combinazione 2

Carichi più piccoli
Parametri terreno
ridotti
Resistenza ridotta



Approccio 2

Carichi incrementati
Parametri terreno
non ridotti
Resistenza più ridotta

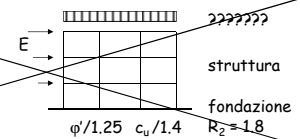


Approcci per verifica SLU per le verifiche geotecniche

In presenza di sisma:

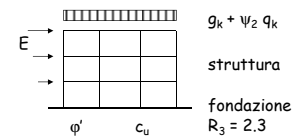
Approccio 1, combinazione 2

Carichi più piccoli
Parametri terreno
ridotti
Resistenza ridotta



Approccio 2

Carichi incrementati
Parametri terreno
non ridotti
Resistenza più ridotta



Problematiche sismiche: modellazione

Struttura, fondazione e terreno

Effetto della deformabilità della fondazione:

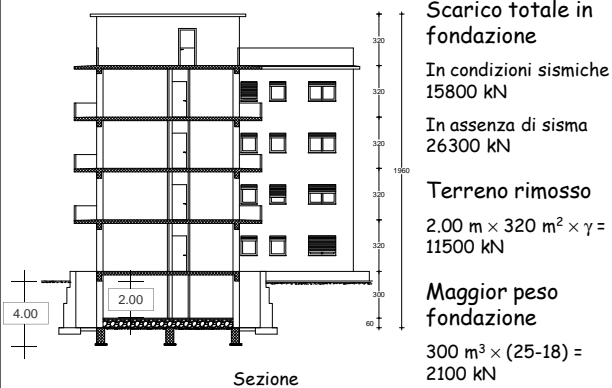
- cedimenti verticali differenziali
- rotazioni al piede dei pilastri del primo ordine



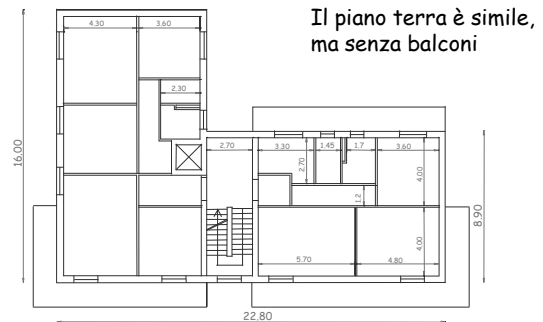
variazione della rigidità relativa dei diversi pilastri e quindi diversa distribuzione delle azioni sismiche

attenzione in particolare agli elementi molto rigidi, come le pareti, la cui rigidità può essere vanificata dalla rotazione al piede

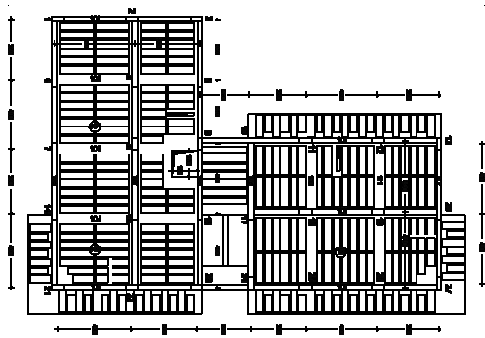
Edificio analizzato



Piano tipo



Carpenteria del piano tipo



Stima del carico limite (molto approssimata)

$$Q_{lim} = \cancel{N_c} + 0.5 N_q B \gamma + N_q q$$

$$N_q = e^{\pi \tan \phi'} \tan^2(\pi/4 + \phi'/2) = 29.44$$

$$N_q = 2(N_q - 1) \tan \phi' = 38.37$$

$$q = 2.00 \times 18.0 = 36 \text{ kPa}$$

se $B=1.50 \text{ m}$ (ipotizzo striscia indefinita)

$$Q_{lim} = 0.5 \times 38.37 \times 1.50 \times 18.0 + 29.44 \times 36 = 518.0 + 1059.8 = 1577.8 \text{ kPa} = 1.58 \text{ MPa}$$

$$Q_{Rd} = \frac{1577.8}{2.3} = 686 \text{ kPa} = 0.69 \text{ MPa}$$

Un ottimo valore. Fin troppo alto ?

Dimensionamento fondazione: area di impronta

- Area di impronta complessiva

$$A = \frac{N_{Ed}}{Q_{Rd}} = \frac{26300}{686} = 38.3 \text{ m}^2$$

- Voglio realizzare un reticolo di travi di fondazione
- La lunghezza totale delle travi è oltre 100 m: basterebbe una larghezza $B = 0.40 \text{ m}$

Io però avevo previsto una larghezza 1.50 m

Dimensionamento fondazione: sezione

- Il massimo scarico in fondazione è circa 1200 kN
- Essendo un reticolo, sulla singola trave prevedo circa 700 kN
- Il taglio massimo sarà circa $V_{Ed} = 400 \text{ kN}$
- Il taglio resistente è $V_{Rd} = \frac{0.5 f_{cd} b z \cot \theta}{1 + \cot^2 \theta}$
e usando $\cot \theta = 2$ posso calcolare $b z$
 $b d = \frac{1}{0.9} \frac{V_{Ed}}{0.2 f_{cd}} = \frac{400 \times 10}{0.18 \times 14.17} = 1568 \text{ cm}^2$
Basterebbe una sezione piccola ...
... ma occorre fornire una elevata rigidezza

Verifica delle fondazioni 4 - fondazioni su pali

- Tener conto, se occorre, dell'interazione cinematica
- Disporre un'armatura longitudinale non inferiore allo 0.3% della sezione

NTC 08, punto 7.2.5

Verifica delle fondazioni 5 - spostamenti relativi

- Tener conto degli effetti che possono essere indotti da spostamenti relativi
- Non occorre calcolo specifico di tali effetti se si collegano le fondazioni con un reticolo di travi o con una piastra in grado di sopportare azioni assiali:

$$0.3 N_{sd} a_{max}/g \quad \text{per suolo tipo B}$$

$$0.4 N_{sd} a_{max}/g \quad \text{per suolo tipo C}$$

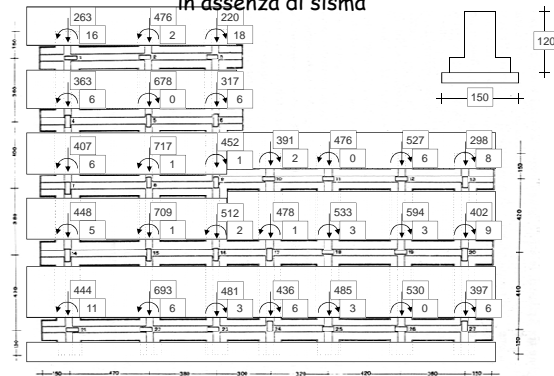
$$0.6 N_{sd} a_{max}/g \quad \text{per suolo tipo D}$$

N_{sd} = valore medio delle forze verticali sugli elementi collegati

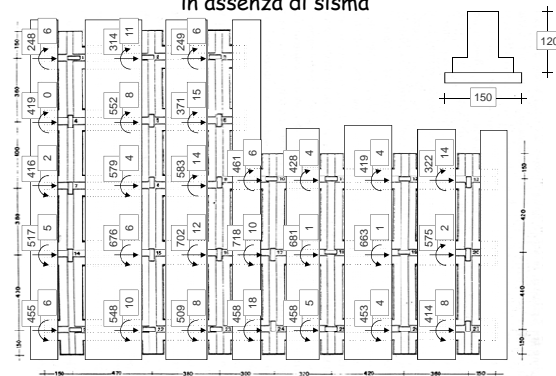
$$a_{max} = a_g S$$

NTC 08, punto 7.2.5

Azioni sulle travi in direzione x in assenza di sisma



Azioni sulle travi in direzione y in assenza di sisma



Azioni sulle travi in direzione x carichi verticali in presenza di sisma



Azioni sulle travi in direzione x effetto del sisma x



