



Associazione Italiana

Calcestruzzo armato e Precompresso

LA PROGETTAZIONE STRUTTURALE
SECONDO IL D.M. 14.01.08 E
CIRCOLARE APPLICATIVA

(Catanzaro, 15-16 Aprile 2010)

FONDAZIONI SUPERFICIALI

Alberto Burghignoli
Ordinario di Meccanica delle Terre



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

LA SICUREZZA

Nelle NTC, in accordo con gli Eurocodici, la sicurezza è espressa dalla
condizione fondamentale

$$E_d \leq R_d$$

E_d : valore di progetto dell'azione o dell'effetto dell'azione (**DOMANDA**)

R_d : valore di progetto della resistenza del sistema geotecnico (**CAPACITA'**)



LA SICUREZZA

$$E_d = f\left(\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\right)$$

$$E_d = \gamma_E \cdot f'\left(F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\right)$$

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} g\left(\gamma_F F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d\right)$$

Coefficienti di sicurezza parziali:

$\gamma_F = \gamma_E$: riguardo alla **domanda**

γ_M : riguardo ai **materiali**

γ_R : riguardo alla **capacità**

Si introducono coefficienti di sicurezza parziali, specializzati e differenziati, nella definizione sia della domanda sia della capacità.

I valori dei coefficienti parziali di sicurezza dipendono dal particolare stato limite esaminato



LA SICUREZZA

Coefficienti parziali sulle azioni γ_F oppure γ_E

carichi		γ_F (γ_E)	EQU	A1 STR	A2 GEO
permanenti	favorevoli	γ_{G1}	0.9	1.0	1.0
	sfavorevoli		1.1	1.3	1.0
permanenti non strutturali	favorevoli	γ_{G2}	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3
variabili	favorevoli	γ_{G3}	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3



LA SICUREZZA

Coefficienti parziali sulle proprietà meccaniche (parametri di resistenza)

grandezza	γ_M	M1 (STR)	M2 (GEO)
$\tan \varphi'_k$	$\gamma_{\varphi'}$	1.0	1.25
c'_k	$\gamma_{c'}$	1.0	1.25
C_{uk}	γ_{Cu}	1.0	1.4
γ_γ	γ_γ	1.0	1.0



LA SICUREZZA

Approcci di progetto e coefficienti parziali

appr.	azioni permanenti	azioni variabili	proprietà $c', \varphi' (C_u)$	resistenze
AP1 - C1	1.3	1.5	1.0	1.0
AP1 - C2	1.0	1.3	1.25 (1.4)	γ_R
AP2	1.3	1.5	1.0	γ_R

γ_R dipende dal tipo di opera



LA SICUREZZA

AP1–C2 (GEO)

IN CONDIZIONI STATICHE:

A2+M2+R2

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.3$$

$$\gamma_{c'} = 1.25 \quad \gamma_{cu} = 1.4 \quad \gamma_{\phi'} = 1.25$$

$$\gamma_R = 1.8 \text{ (carico limite)}$$

$$\gamma_R = 1.1 \text{ (scorrimento)}$$

IN CONDIZIONI SISMICHE:

Valori caratteristici **+M2+R2**

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.0$$

$$\gamma_{c'} = 1.25 \quad \gamma_{cu} = 1.4 \quad \gamma_{\phi'} = 1.25$$

$$\gamma_R = 1.8 \text{ (carico limite)}$$

$$\gamma_R = 1.1 \text{ (scorrimento)}$$

AP1–C1 (STR)

IN CONDIZIONI STATICHE:

A1+M1+R1

$$\gamma_{G1} = 1.3 \quad \gamma_Q = 1.5$$

IN CONDIZIONI SISMICHE:

Valori caratteristici **+M1+R1**

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.0$$



LA SICUREZZA

AP2

IN CONDIZIONI STATICHE:

A1+M1+R3

$$\gamma_{G1} = 1.3 \quad \gamma_Q = 1.5$$

$$\gamma_{c'} = 1.0 \quad \gamma_{cu} = 1.0 \quad \gamma_{\phi'} = 1.0$$

$$\gamma_R = 2.3 \text{ (carico limite)}$$

$$\gamma_R = 1.1 \text{ (scorrimento)}$$

IN CONDIZIONI SISMICHE:

$$\gamma_{G1} = 1.0 \quad \gamma_Q = 1.0$$

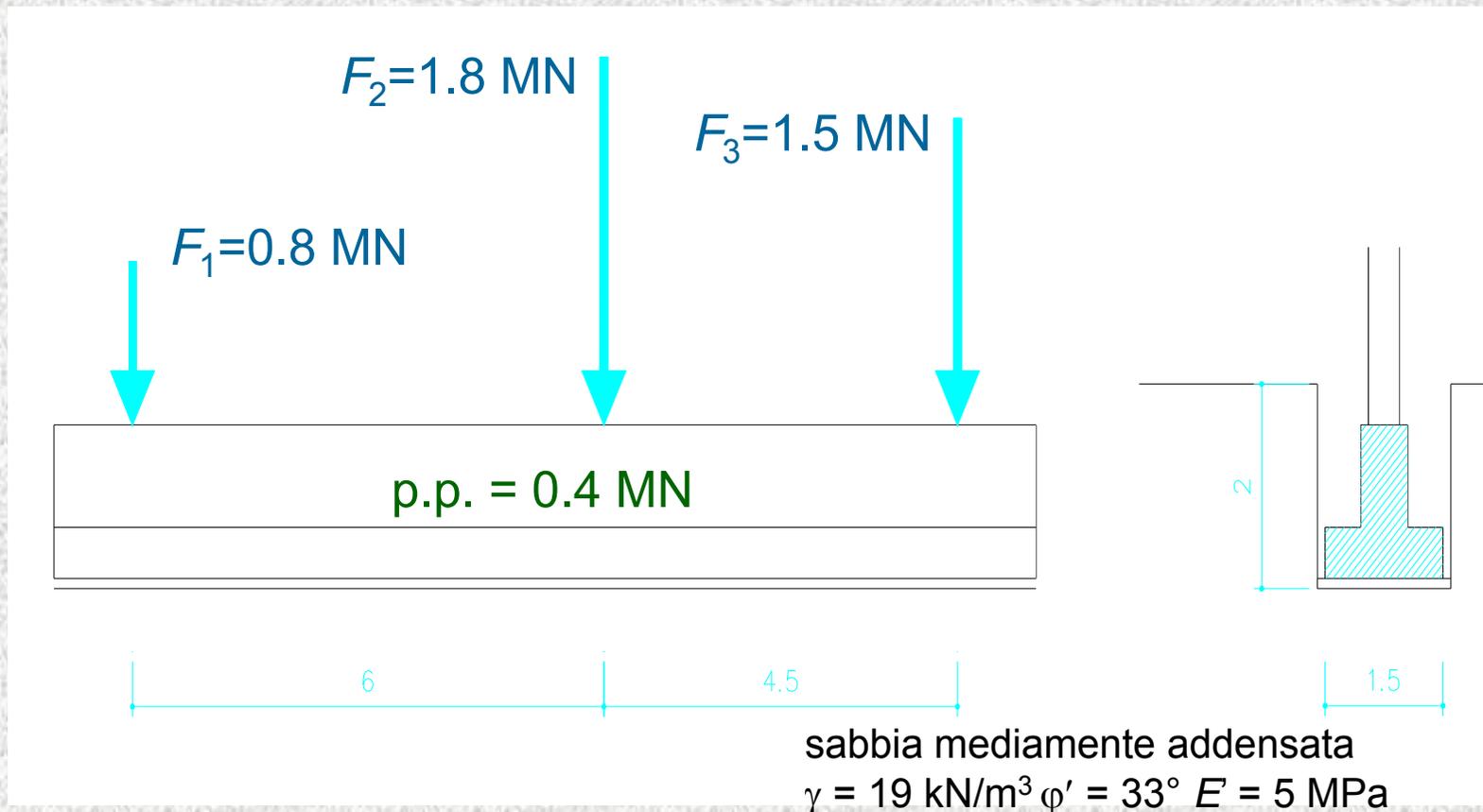
$$\gamma_R = 2.3 \text{ (carico limite)}$$

$$\gamma_R = 1.1 \text{ (scorrimento)}$$



Verifiche SLU

Esempio: trave di fondazione

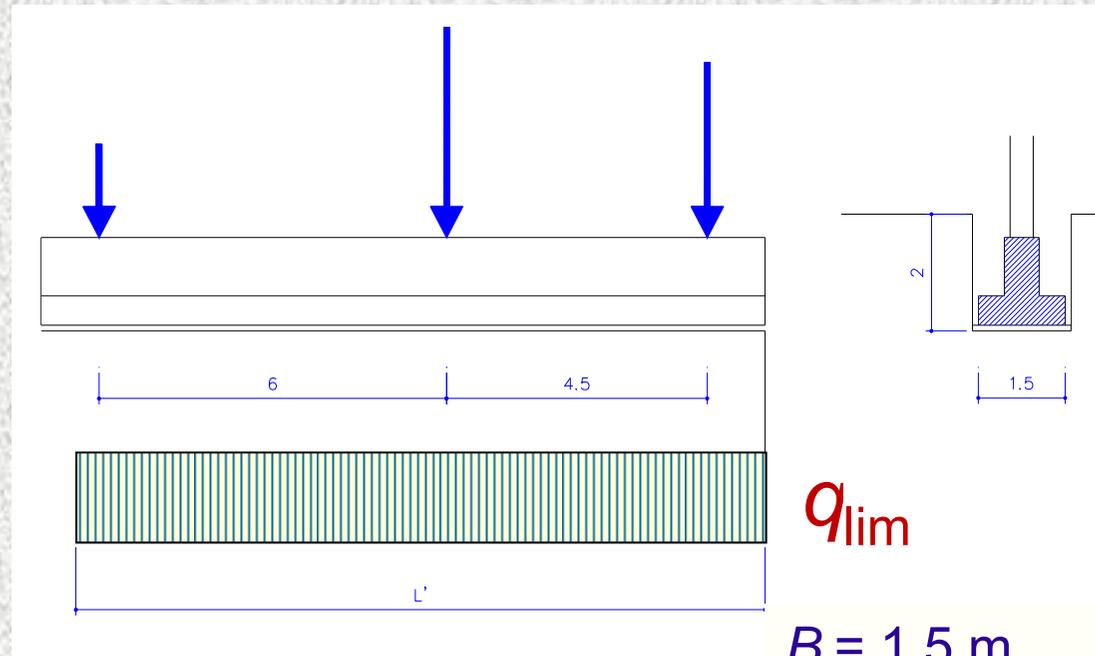


F : azioni permanenti derivanti da valori caratteristici dei carichi (non amplificati)



Approccio tradizionale (GEO)

$$\varphi' = 33^\circ$$



$$B = 1.5 \text{ m}$$
$$L' = 11.9 \text{ m}$$

Analisi di un meccanismo di collasso (rottura generale)

$$q_{lim} = 1230 \text{ kPa}$$

$$Q_{lim} = R_d = 22 \text{ MN}$$

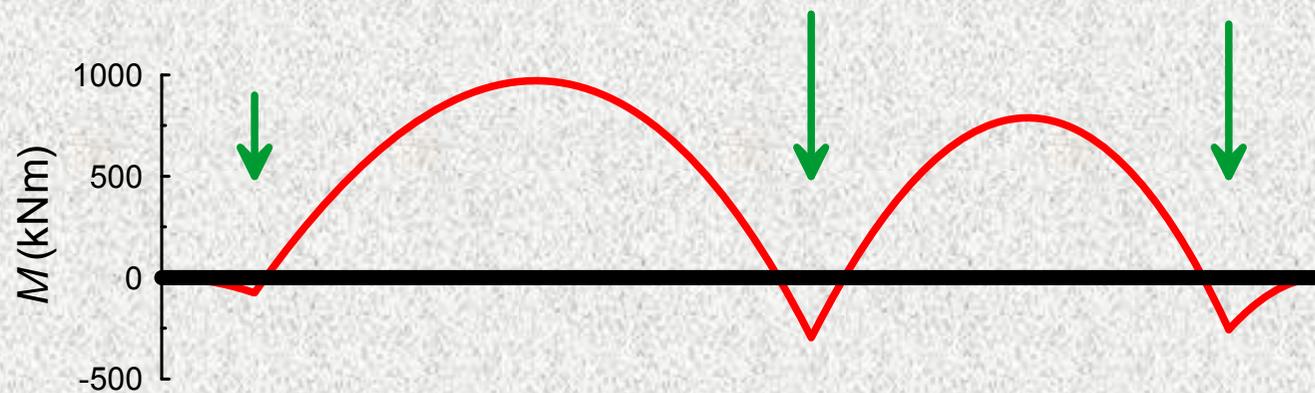
$$Q_{es} = E_d = 4.5 \text{ MN}$$

$$FS = R_d/E_d = 4.8$$



Approccio tradizionale (STR)

Winkler – $k = 3.0 \text{ MN/m}^3$



Rigidezza \equiv Costante di sottofondo

$M_{\max} = 1 \text{ MNm} \rightarrow$ tensioni ammissibili



azioni non amplificate

AP1-C2 (GEO)

$$\gamma_G = 1.0$$

$$\gamma_{\phi'} = 1.25$$

$$\gamma_R = 1.8$$

$$\phi_k' = 33^\circ \quad \phi_d' = 27.4^\circ$$

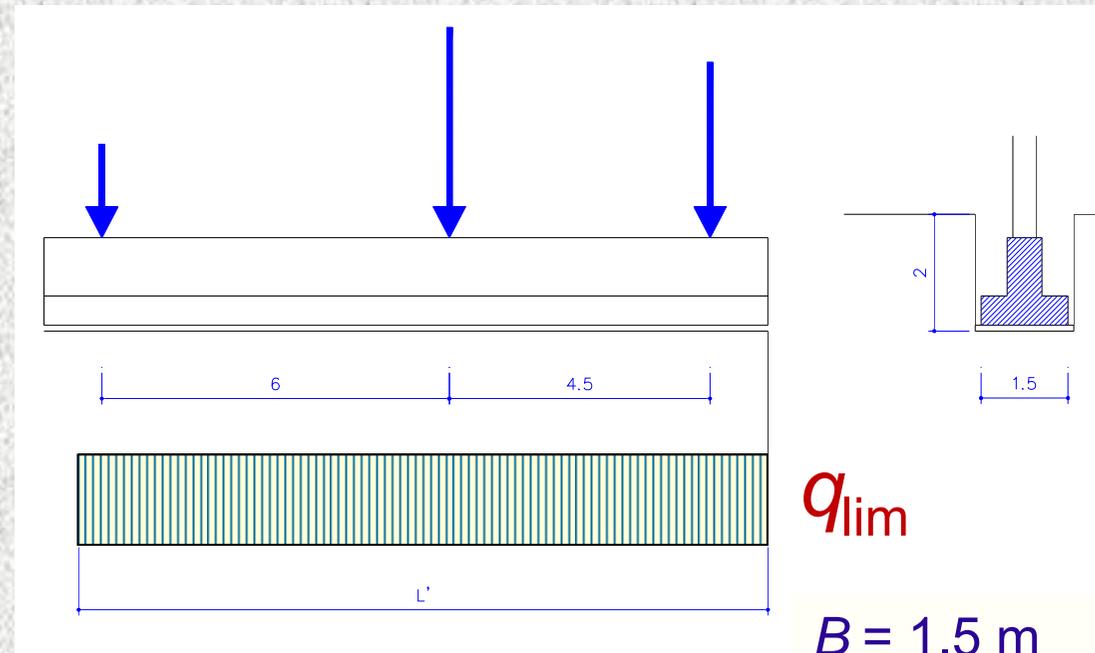
Analisi di un meccanismo di collasso
(rottura generale)

$$q_{lim} = 632 \text{ kPa}$$

$$Q_{lim} = R = 11 \text{ MN}$$

$$R_d = R / \gamma_R = 6 \text{ MN}$$

$$E_d = Q_{es} \cdot 1.0 = 4.5 \text{ MN}$$



q_{lim}

$$B = 1.5 \text{ m}$$

$$L' = 11.9 \text{ m}$$

$$R_d / E_d = 1.4$$

$$[\text{oppure: } \gamma_{\phi} = 1.88 \rightarrow R_d = E_d]$$



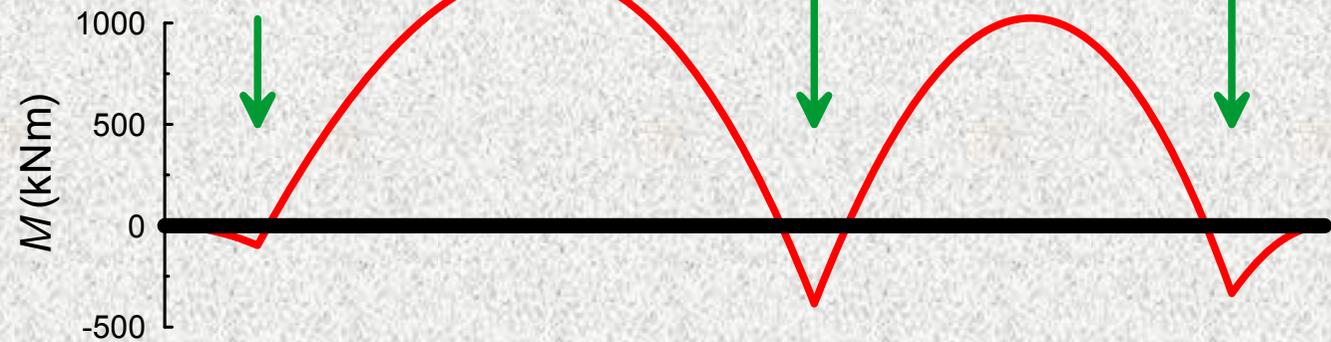
AP1-C1 (STR)

$$\gamma_G = 1.3$$

$$\gamma_{\phi'} = 1.0$$

$$\gamma_R = 1.0$$

azioni amplificate
analisi strutt. usuale



il modello costitutivo non include parametri di resistenza

~~AP1-C2~~

Analisi lineare:

amplificazione azioni $F_i \leftrightarrow$ effetti delle azioni M, T

$$M_{\max} = 1.3 \text{ MNm} (= 1 \times 1.3) = M_{\text{Ed}} < M_{\text{Rd}}$$



azioni amplificate - analisi strutt. usuale

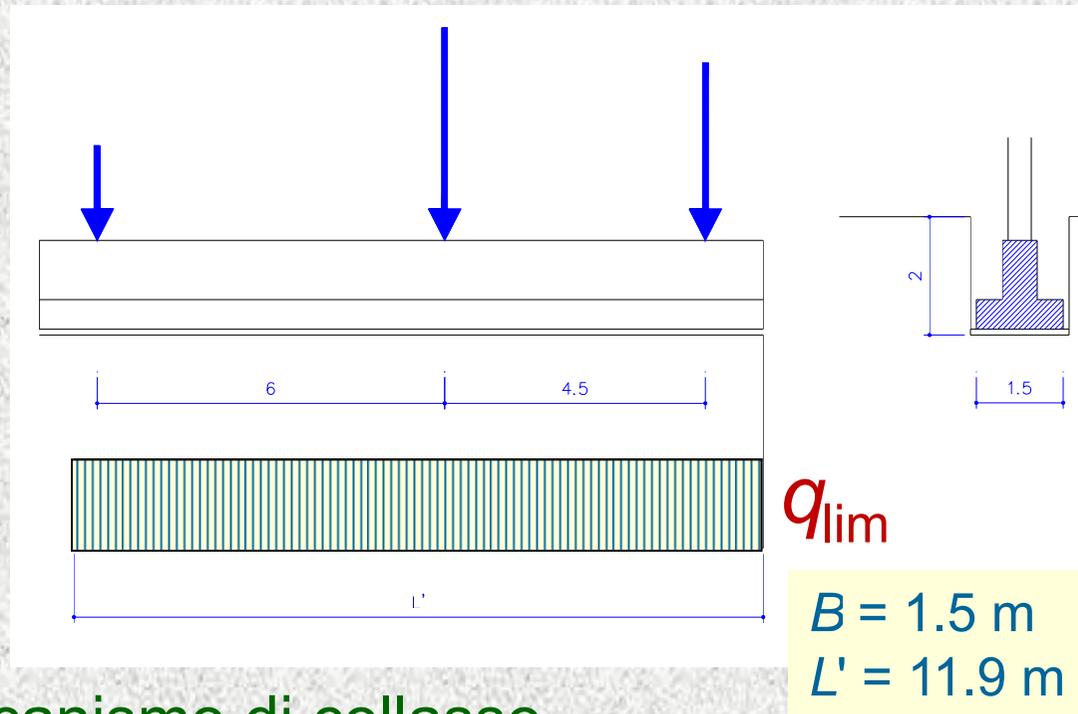
AP2 (GEO)

$$\gamma_G = 1.3$$

$$\gamma_{\phi'} = 1.0$$

$$\gamma_R = 2.3$$

$$\phi_k' = \phi_d' = 33^\circ$$



Analisi di un meccanismo di collasso
(rottura generale)

$$q_{lim} = 1230 \text{ kPa}$$

$$Q_{lim} = R = 22 \text{ MN}$$

$$R_d = R/\gamma_R = 9.6 \text{ MN}$$

$$E_d = Q_{es} \cdot 1.3 = 5.9 \text{ MN}$$

$$R_d / E_d = 1.6$$

$$[1.3 \times 2.3 \times 1.6 = 4.8]$$



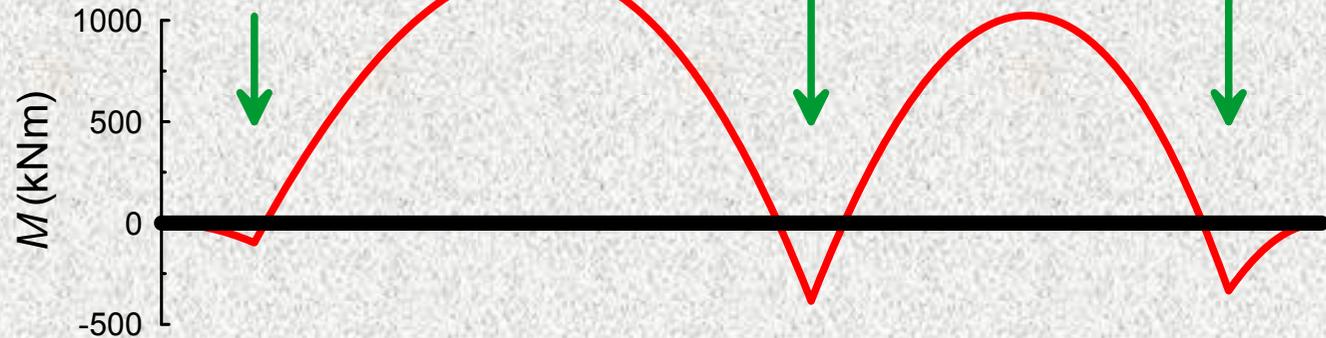
AP2 (STR)

$$\gamma_G = 1.3$$

$$\gamma_{\phi'} = 1.0$$

$$\gamma_R = 2.3$$

azioni amplificate
analisi strutt. usuale



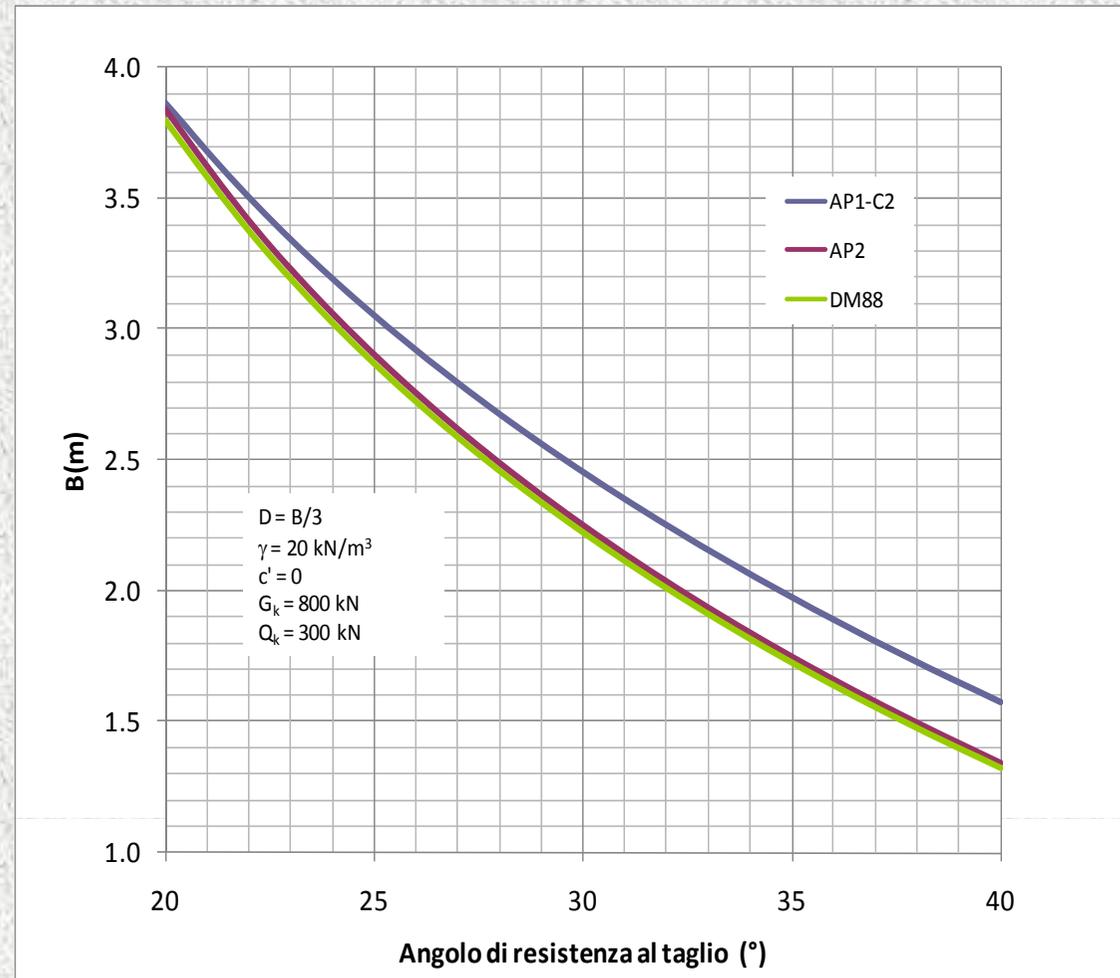
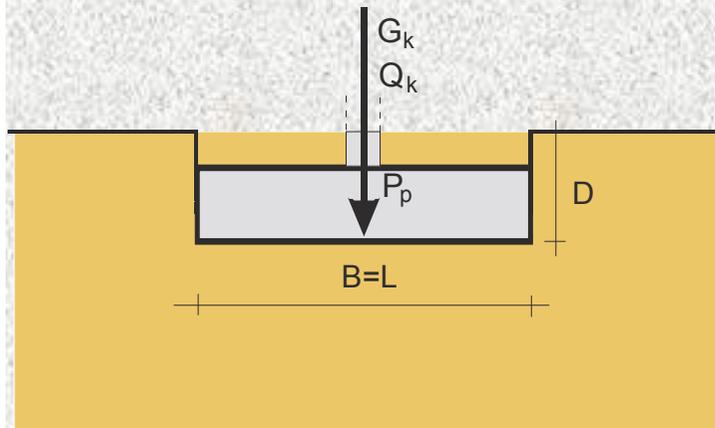
γ_R non compare nell'analisi \rightarrow come AP1-C1

$$M_{\max} = 1.3 \text{ MNm} (= 1 \times 1.3) = M_{Ed} < M_{Rd}$$



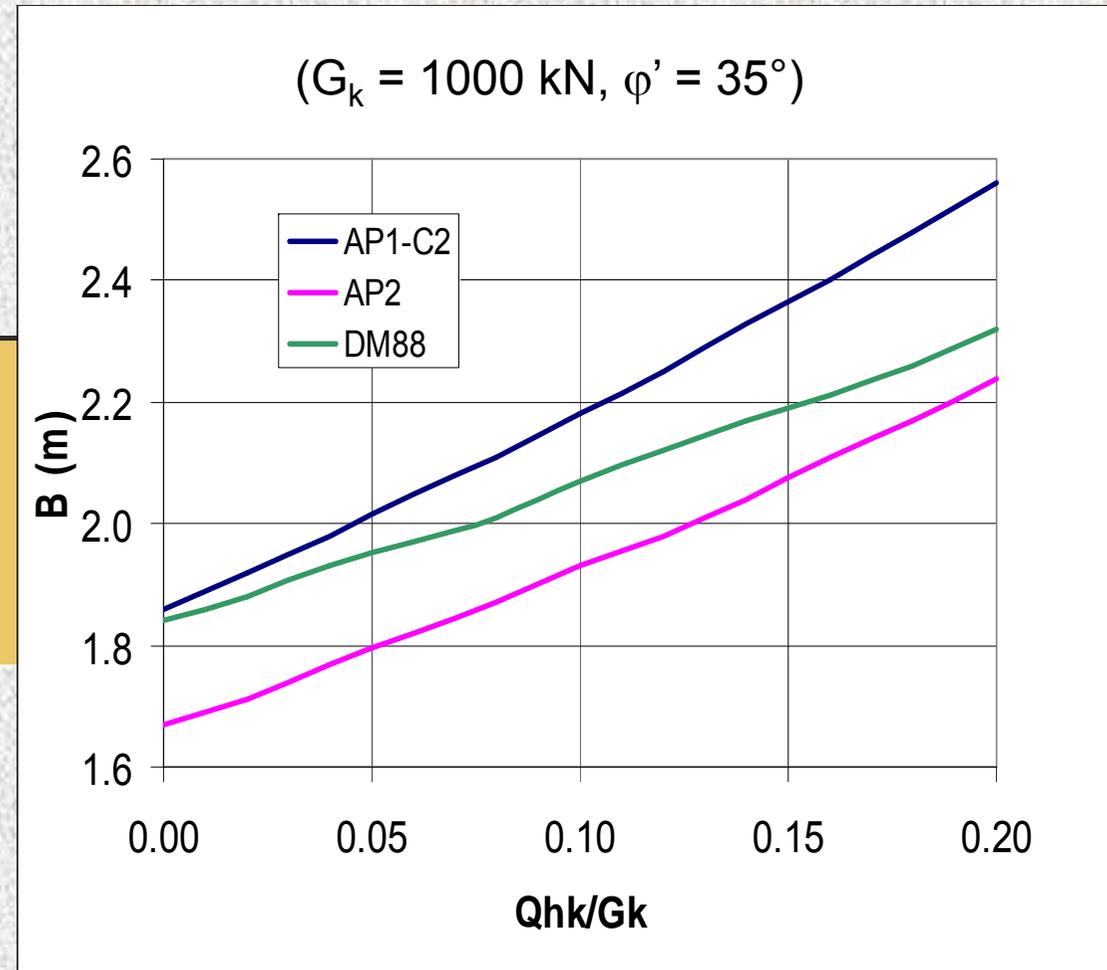
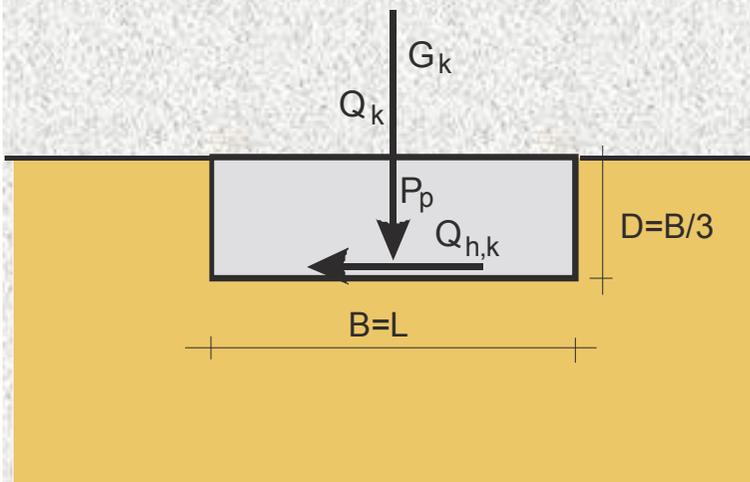
Verifiche SLU

PLINTO QUADRATO



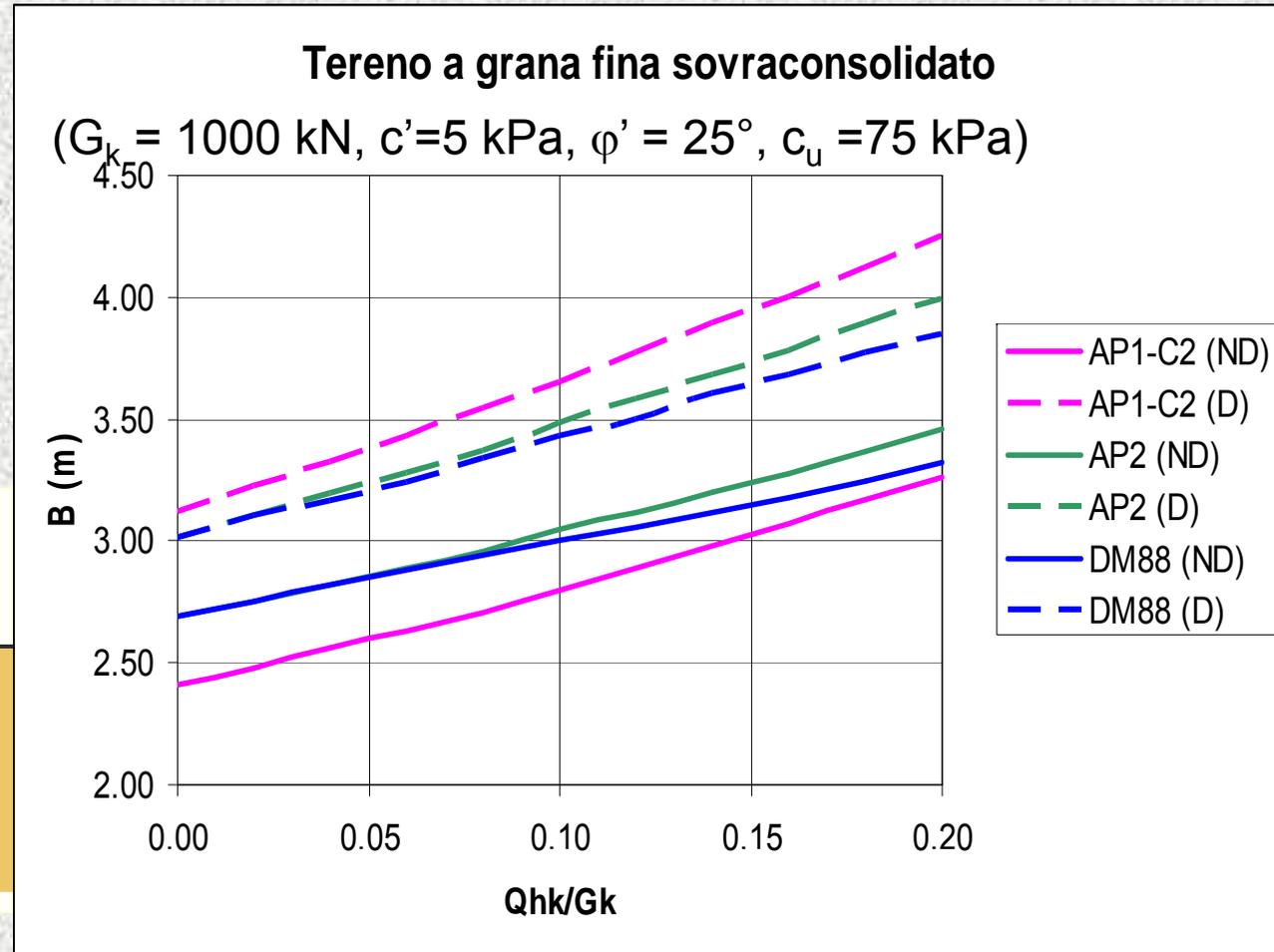
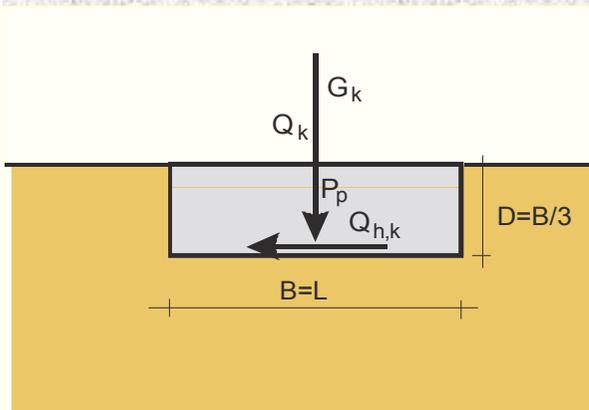
Verifiche SLU

PLINTO QUADRATO



Verifiche SLU

PLINTO QUADRATO



I VALORI DEI PARAMETRI GEOTECNICI

Valori **rappresentativi**



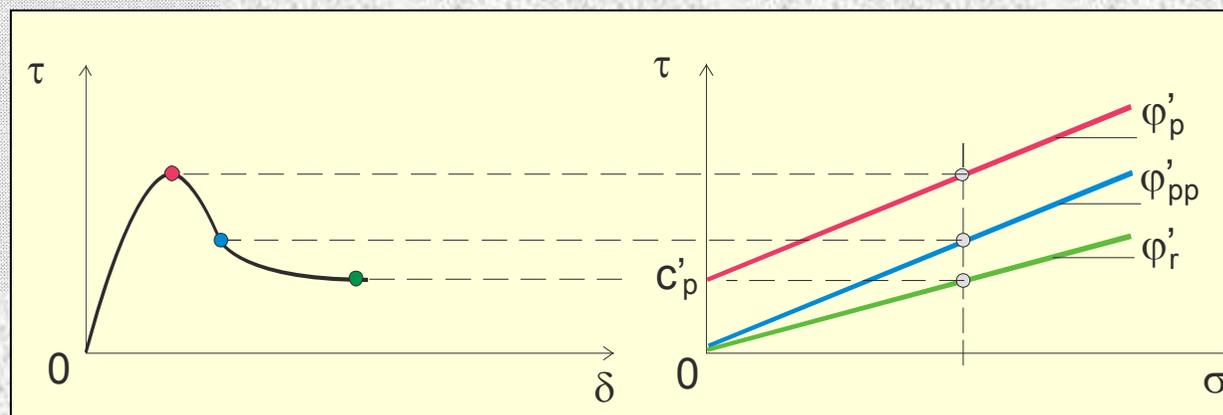
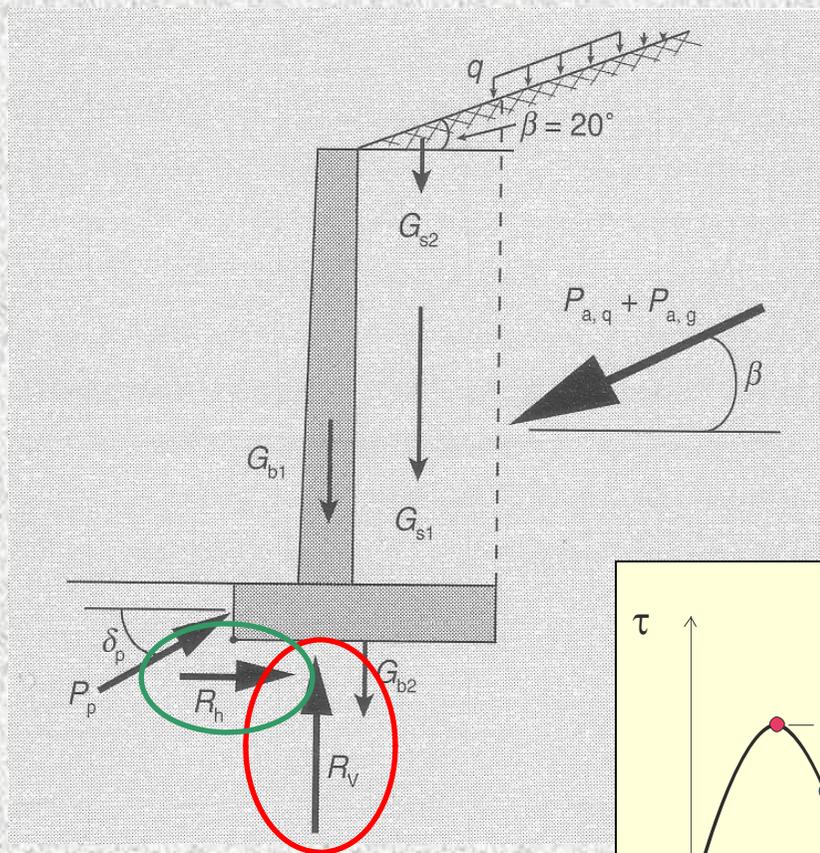
Valori **caratteristici**



Valori **di progetto**



Valori **rappresentativi** dei parametri geotecnici



valori caratteristici (k) delle azioni F e dei parametri di resistenza X $P[X < X_k] \leq 5\%$

EN 1997-1 (*Eurocodice 7: Geotechnical Design*)
characteristic value \rightarrow a cautious estimate of the value affecting the occurrence of the limit state.

NTC 6.2.2

“per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato”

il margine di sicurezza tradizionale è affidato ai soli coefficienti parziali

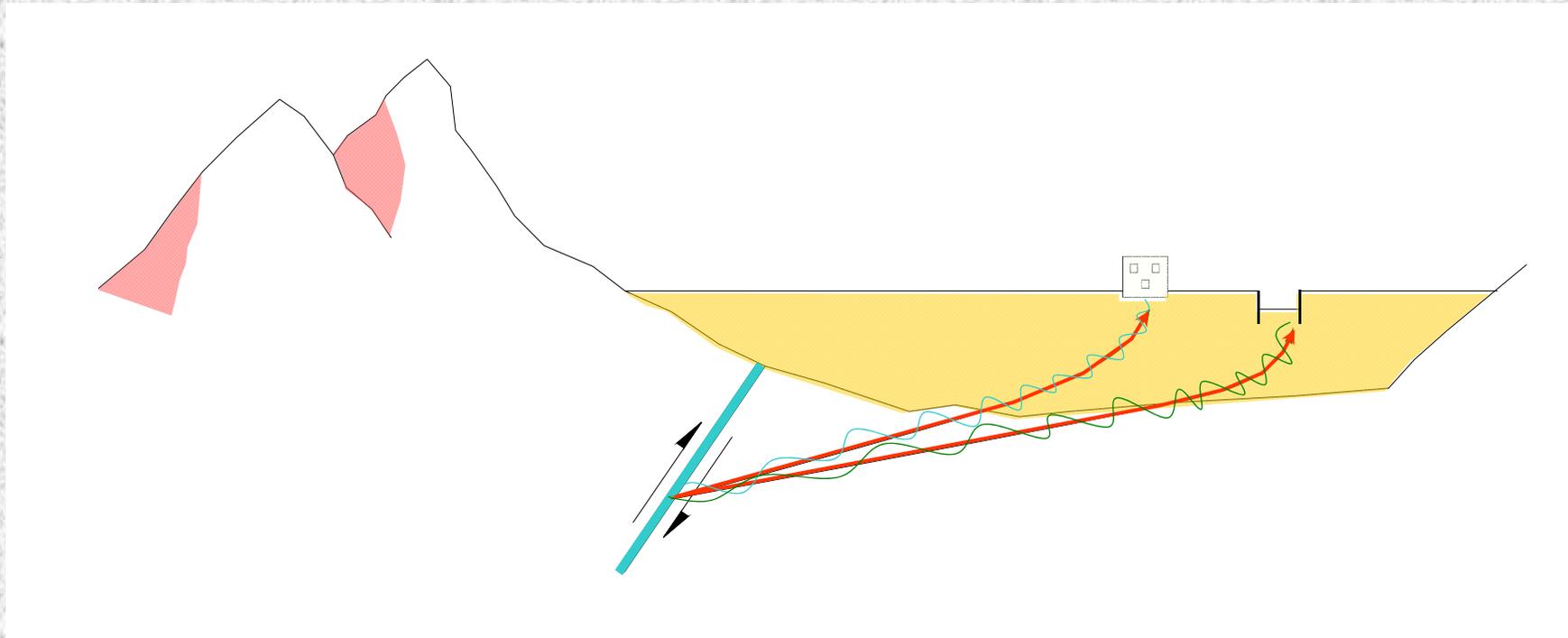
Definizione dell'azione sismica





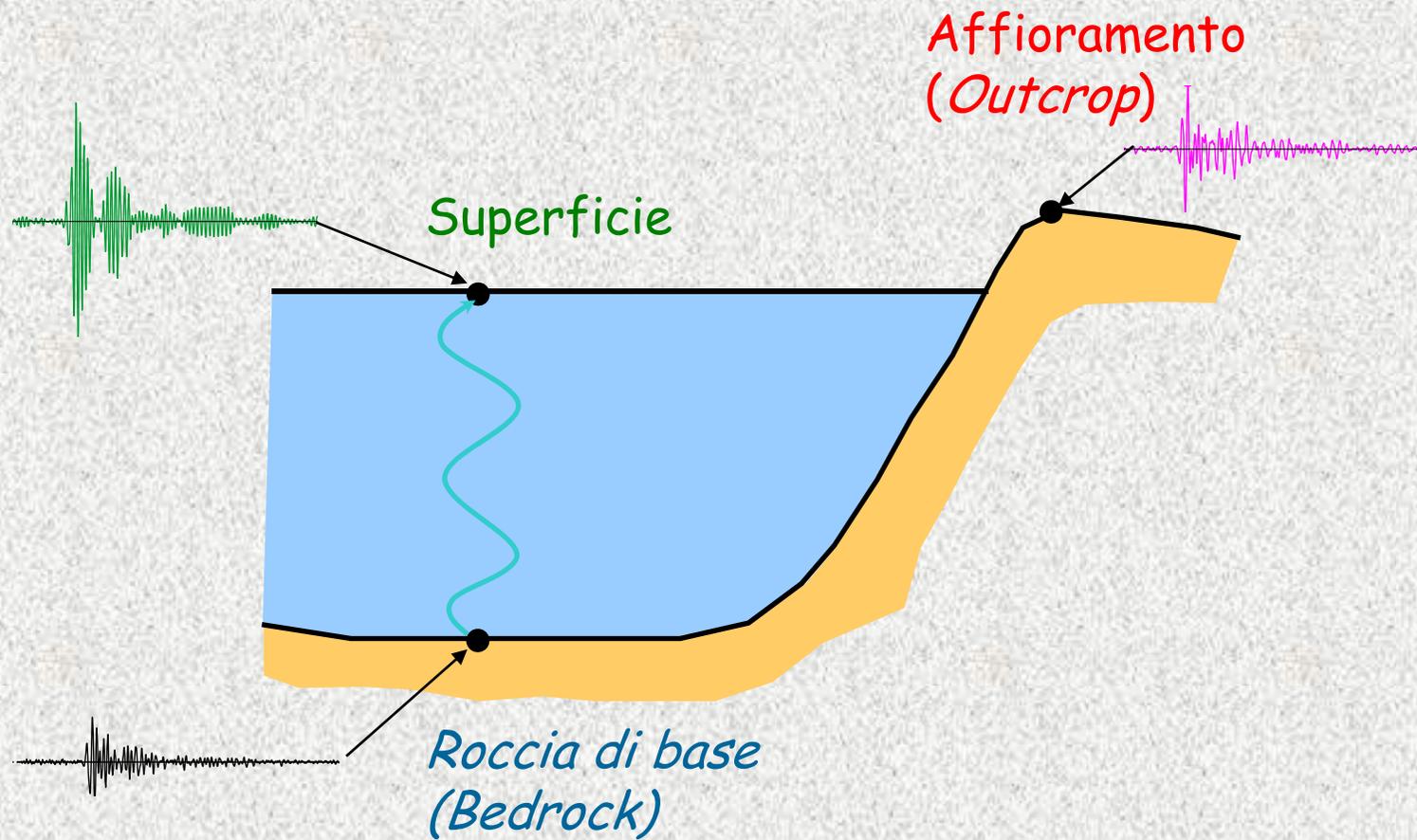
RISPOSTA SISMICA

Previsione del moto del terreno, in superficie o in profondità, indotto da un evento sismico



- rottura lungo una discontinuità (faglia)
- propagazione, sotto forma di onde, dell'energia rilasciata

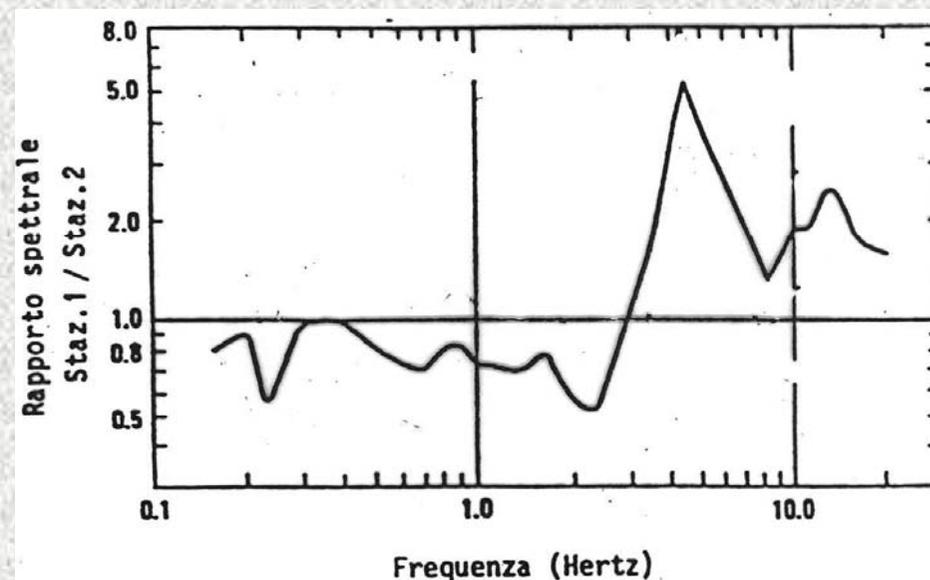
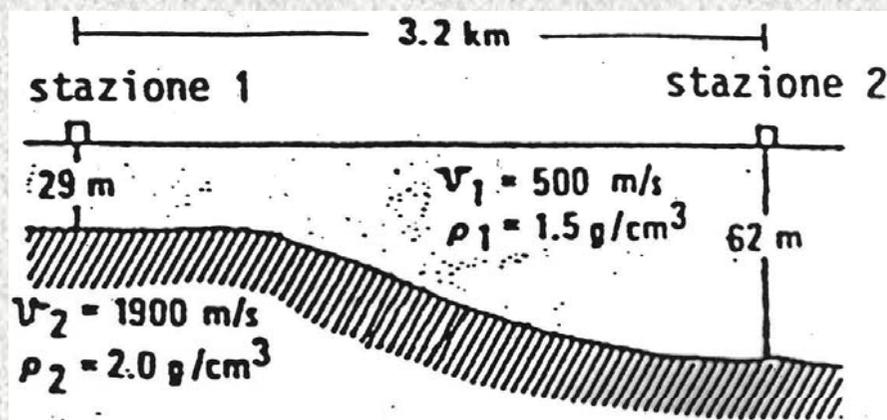
RISPOSTA SISMICA



$$f = (2n - 1) \cdot \frac{V_s}{4H}$$

Influenza dello spessore del deposito

- Strati di grande spessore ($H > 30 - 40$ m) amplificano le basse frequenze
- Strati di spessore modesto amplificano le alte frequenze

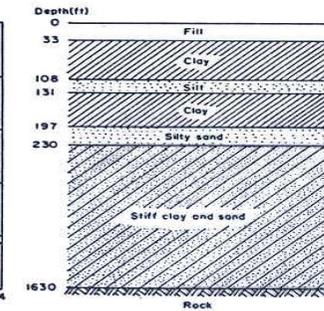
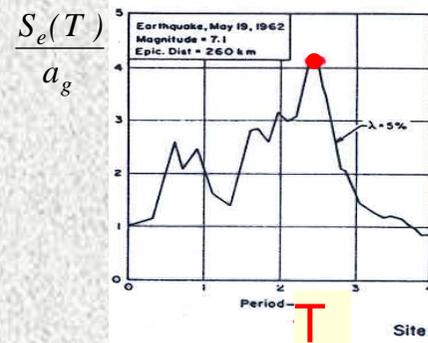
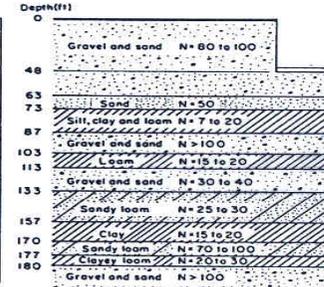
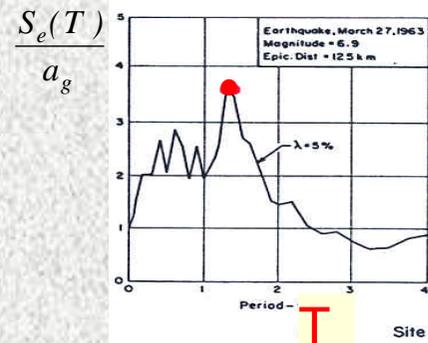
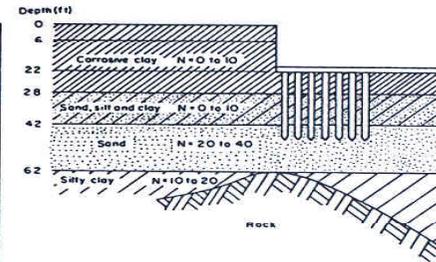
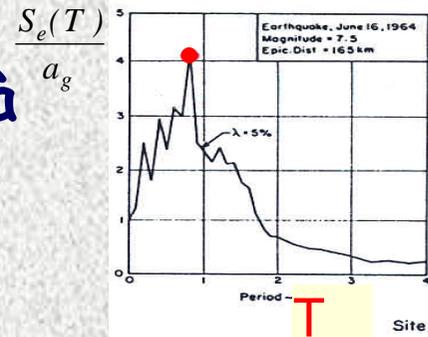


Influenza della deformabilità del deposito

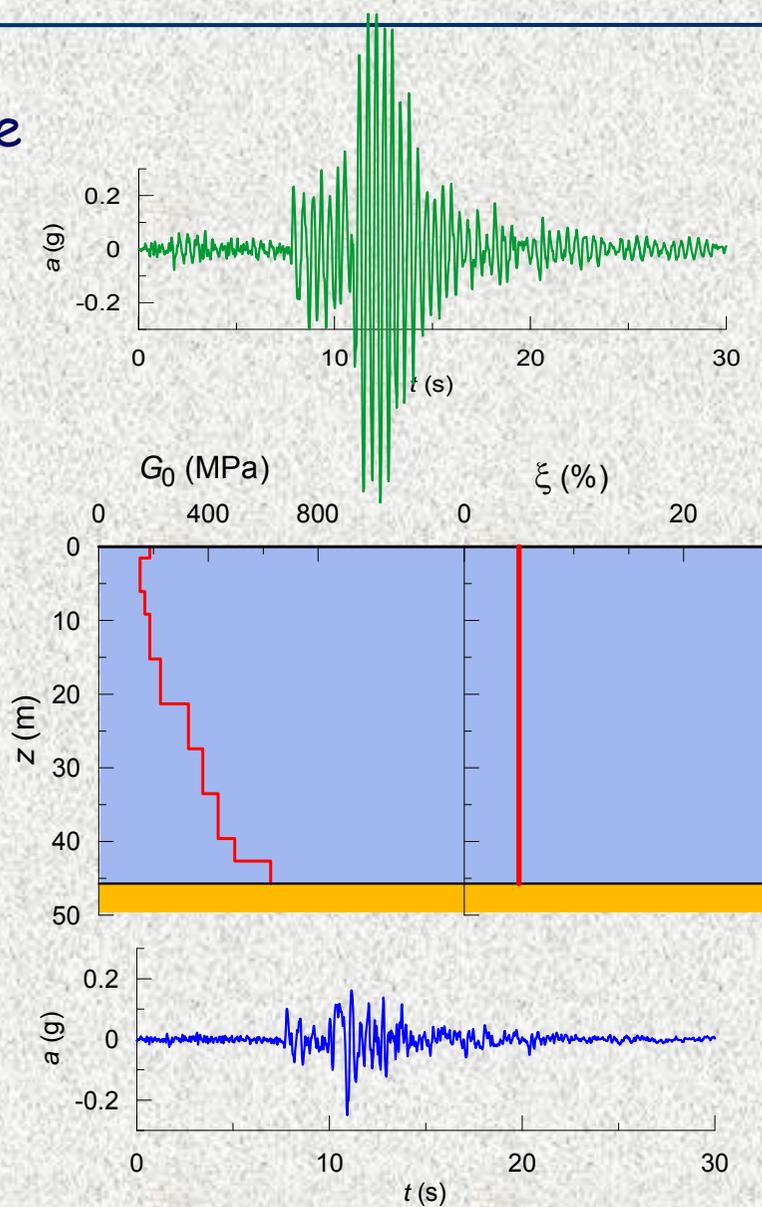
$$f = (2n - 1) \cdot \frac{V_s}{4H}$$

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{(2n - 1)} \frac{4H}{V_s}$$

Gli strati più deformabili ($V_s \downarrow$) esaltano le basse frequenze

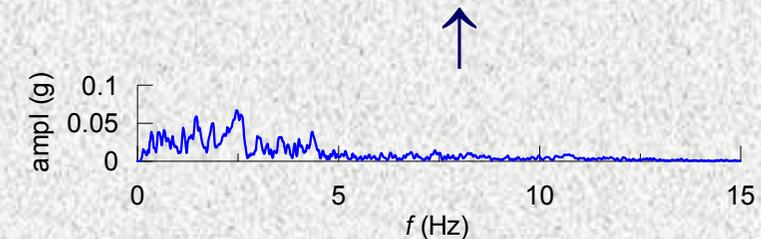
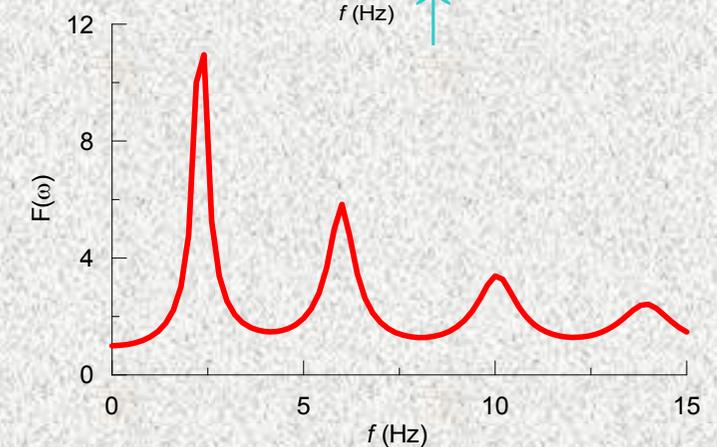
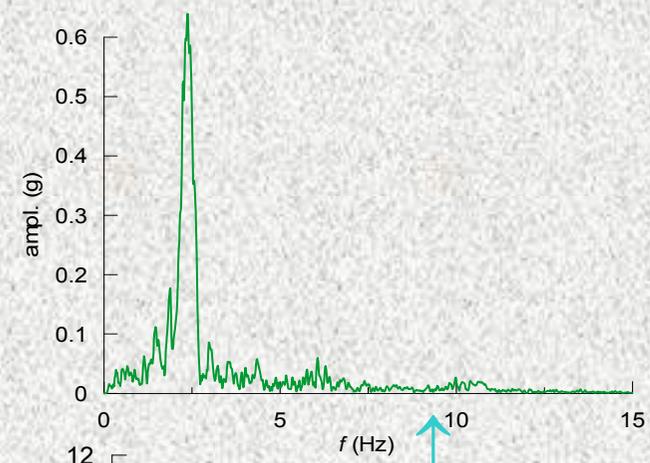
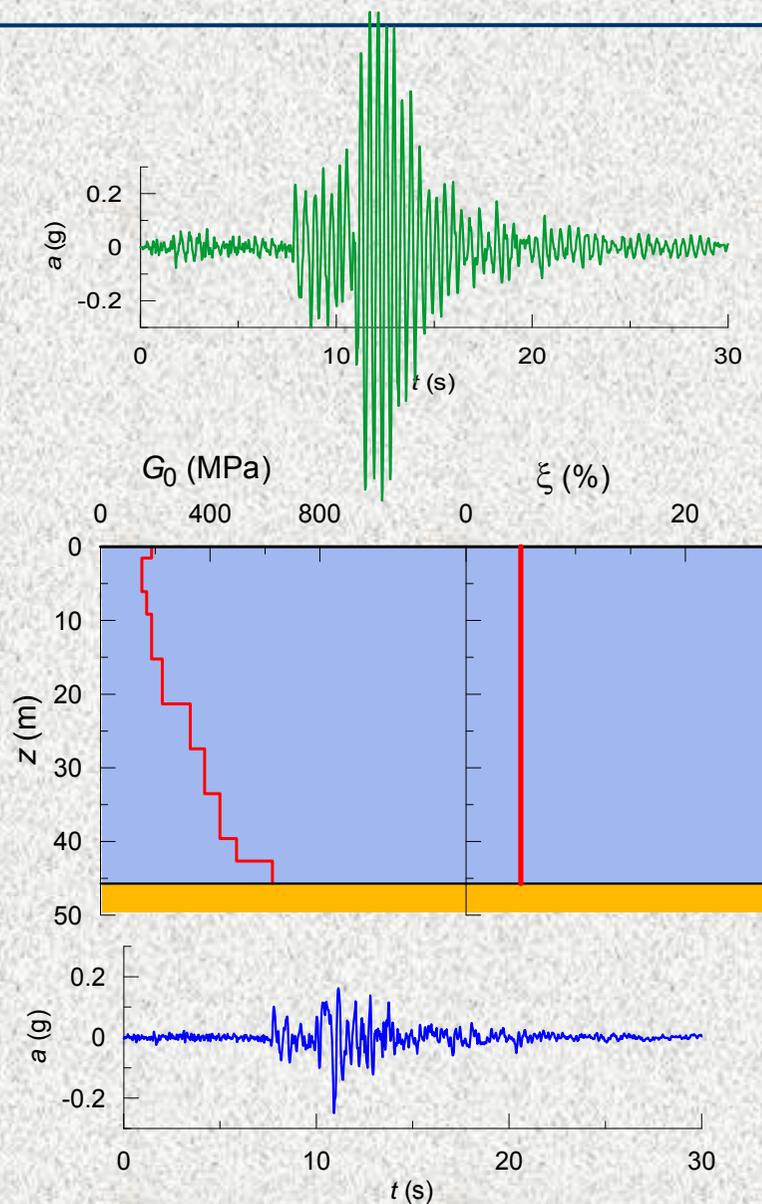


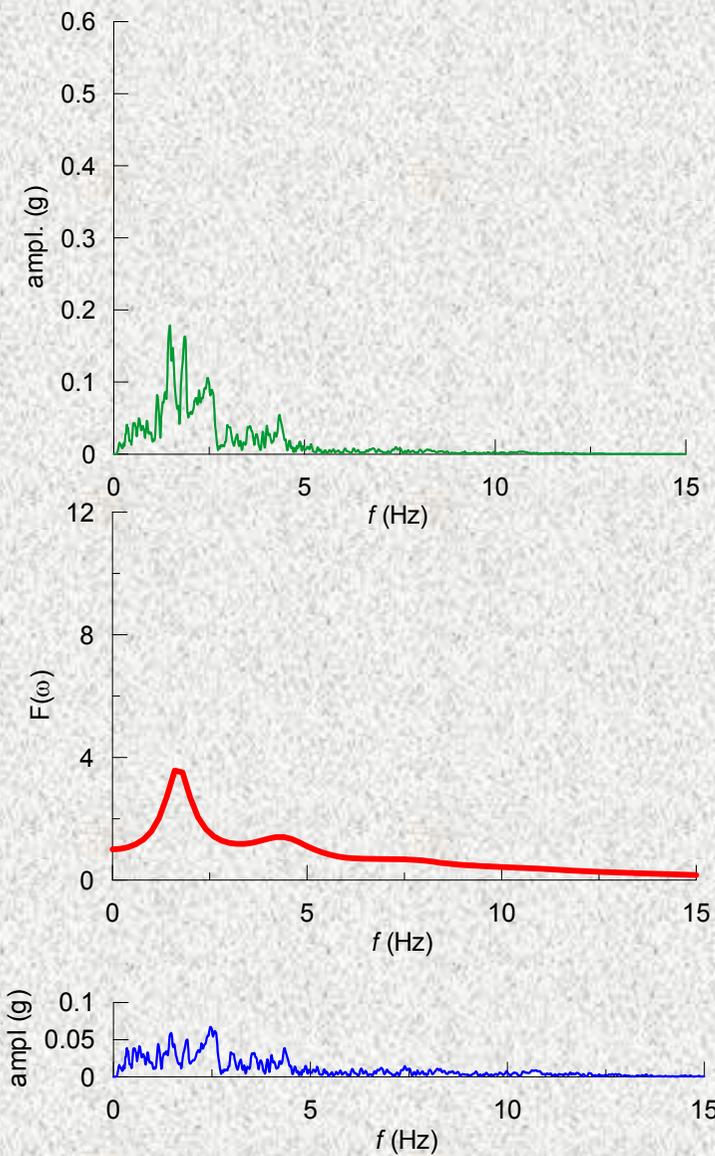
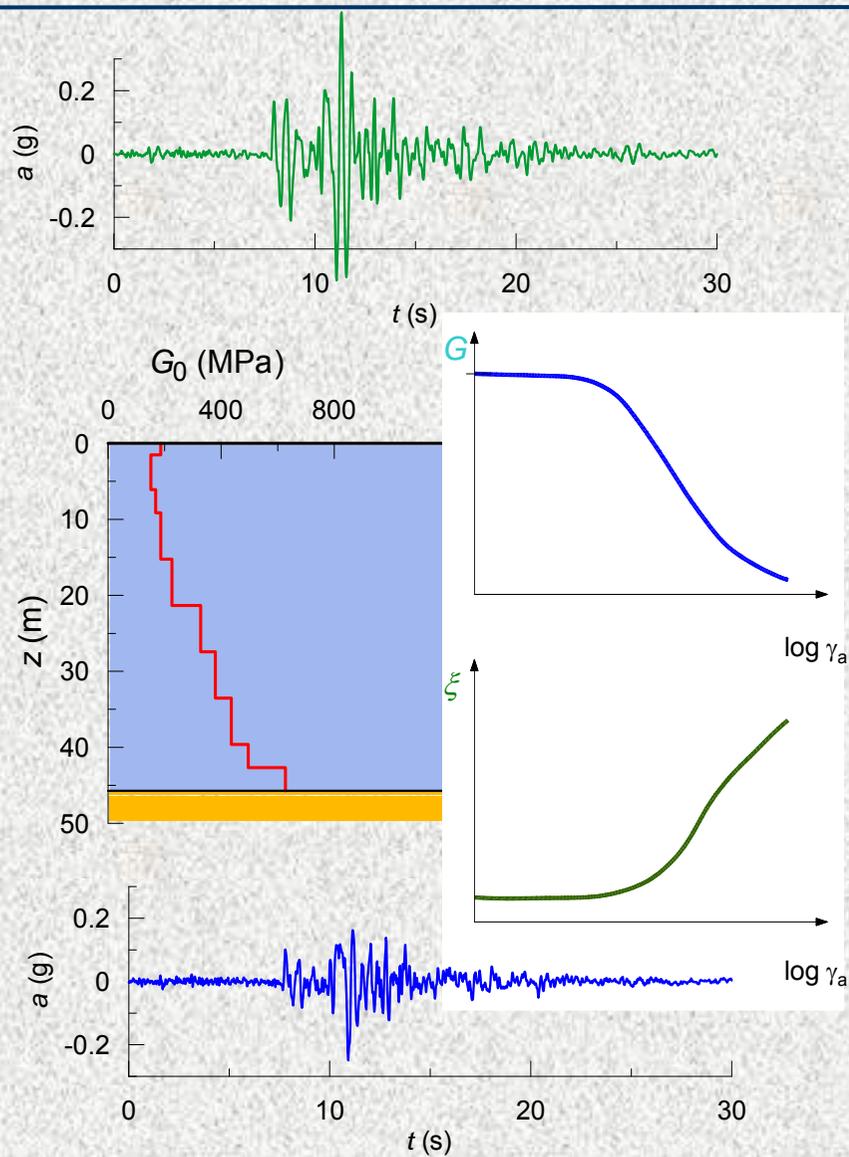
Modello monodimensionale



Aspetti geotecnici delle NTC08

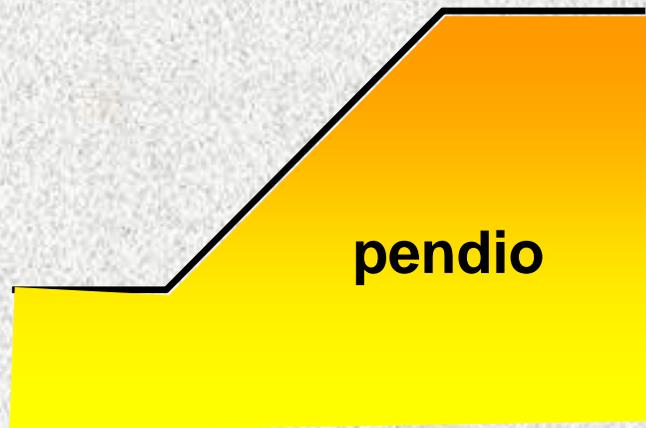
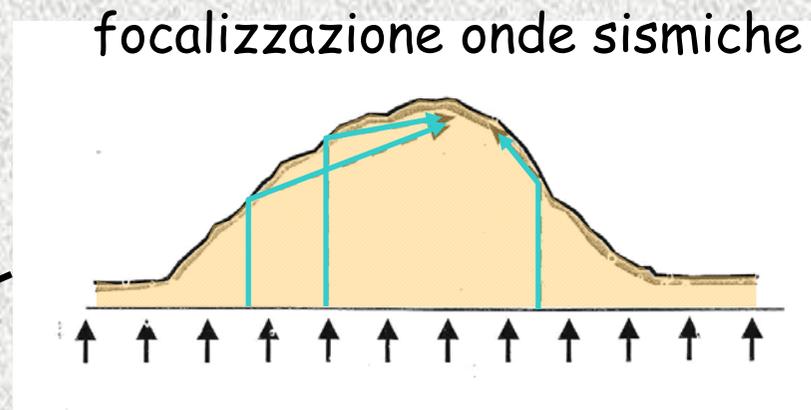
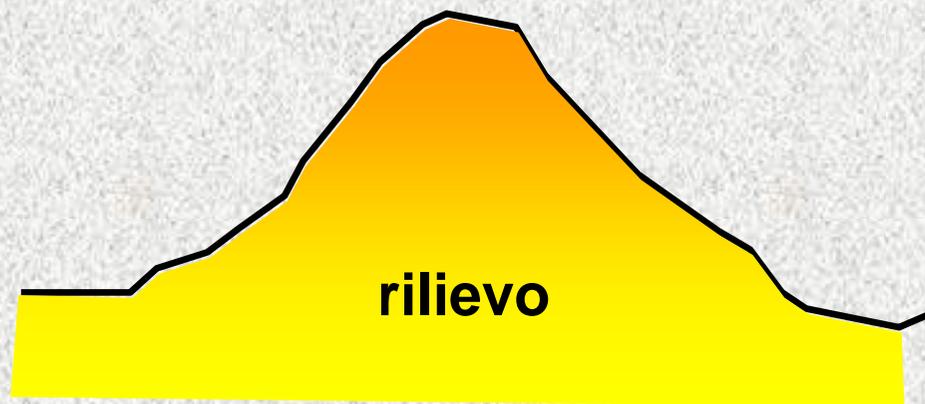
Risposta sismica locale





Influenza della topografia

deviazioni dalle condizioni monodimensionali



Rappresentazione dell'azione sismica

In funzione dell'analisi si fa riferimento:

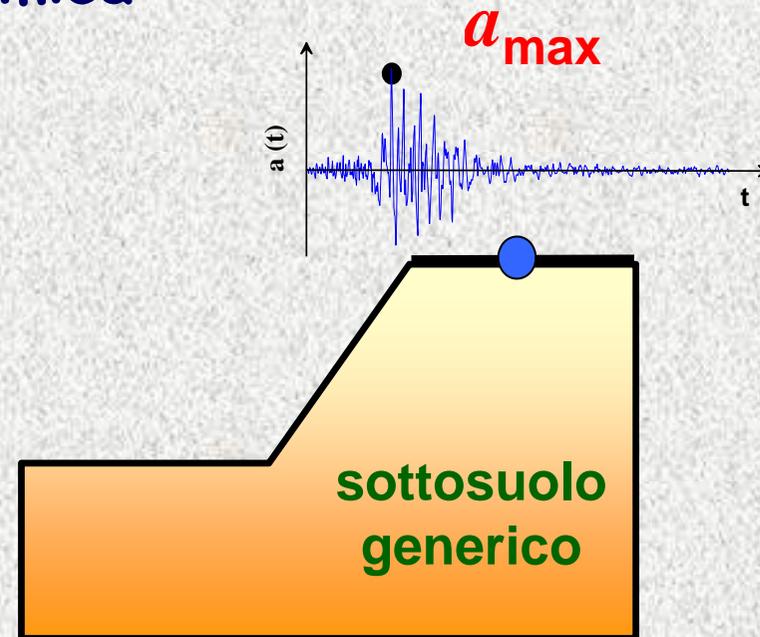
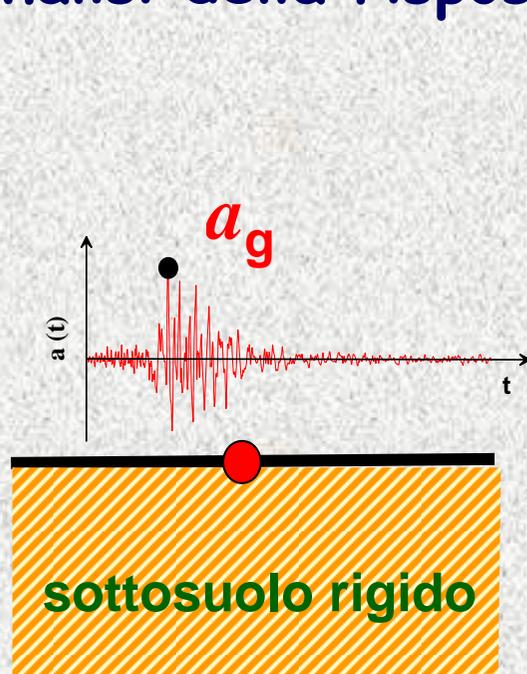
- all'**accelerazione massima** in superficie;
- all'**accelerazione massima** e al relativo **spettro di risposta** in superficie (differenti spettri per diversi tipi di sottosuolo);
- ad **accelerogrammi**.

Per le opere e i sistemi geotecnici si deve far riferimento solo ad **accelerogrammi sintetici o naturali**



Accelerazione massima in superficie

- Analisi della risposta sismica



Accelerazione massima in superficie

- Analisi semplificata della risposta sismica

$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

S_S = coefficiente di **amplificazione stratigrafica**

S_T = coefficiente di **amplificazione topografica**

- Specifica analisi della risposta sismica

Piani di riferimento per la valutazione dell'accelerazione massima

- fondazioni superficiali: **piano imposta**
- fondazioni su pali: **testa pali**
- opere di sostegno di terreno naturale (paratie): **testa opera**
- opere di sostegno di terrapieni: **piano imposta fondazioni**



Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{u,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{u,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).
Categoria	Descrizione
S1	Depositati di terreni caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 100 m/s (ovvero $10 < c_{u,30} < 20$ kPa), che includono uno strato di almeno 8 m di terreni a grana fina di bassa consistenza, oppure che includono almeno 3 m di torba o di argille altamente organiche.
S2	Depositati di terreni suscettibili alla liquefazione, di argille sensitive o qualsiasi altra categoria di terreno non classificabile nei tipi precedenti .



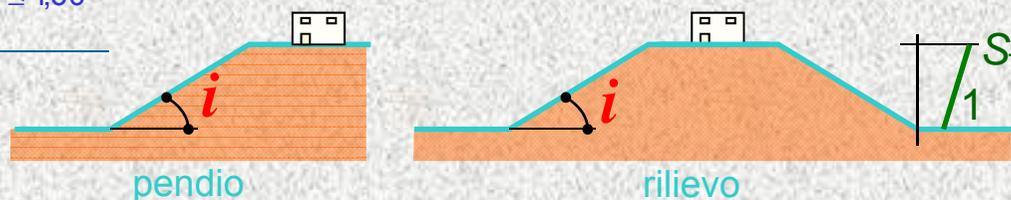
Aspetti geotecnici delle NTC08

Definizione dell'azione sismica

Categoria di sottosuolo	S_s
A	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$

F_0 : valore massimo del fattore di amplificazione dello spettro in accelerazione orizzontale

Coefficienti di amplificazione
 - stratigrafica (S_s) e
 - topografica (S_T)



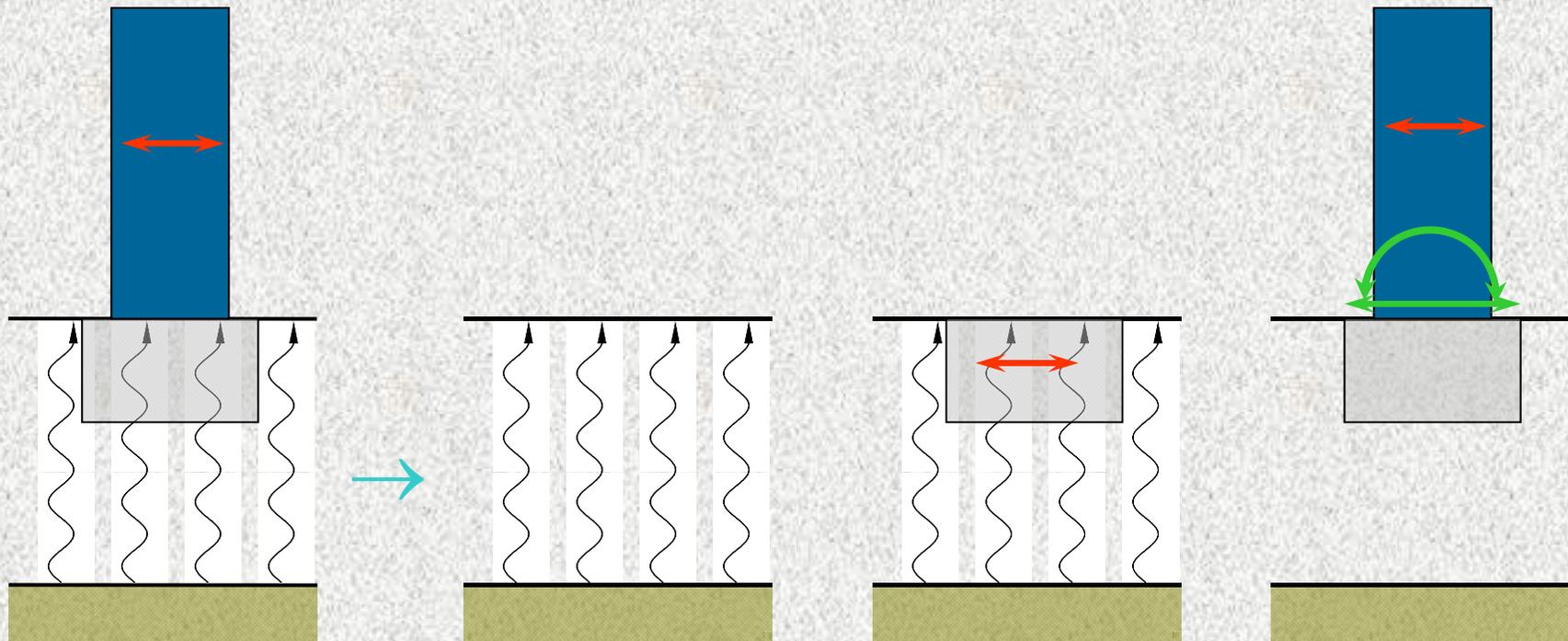
Categoria	Caratteristiche superficie topografica	Ubicazione opera o intervento	S_T
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$	---	1,0
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

- si applicano per altezze maggiori di 30 m
- si riferiscono a configurazioni piane



INTERAZIONE TERRENO-STRUTTURA IN PRESENZA DI AZIONE SISMICA





interazione "completa"

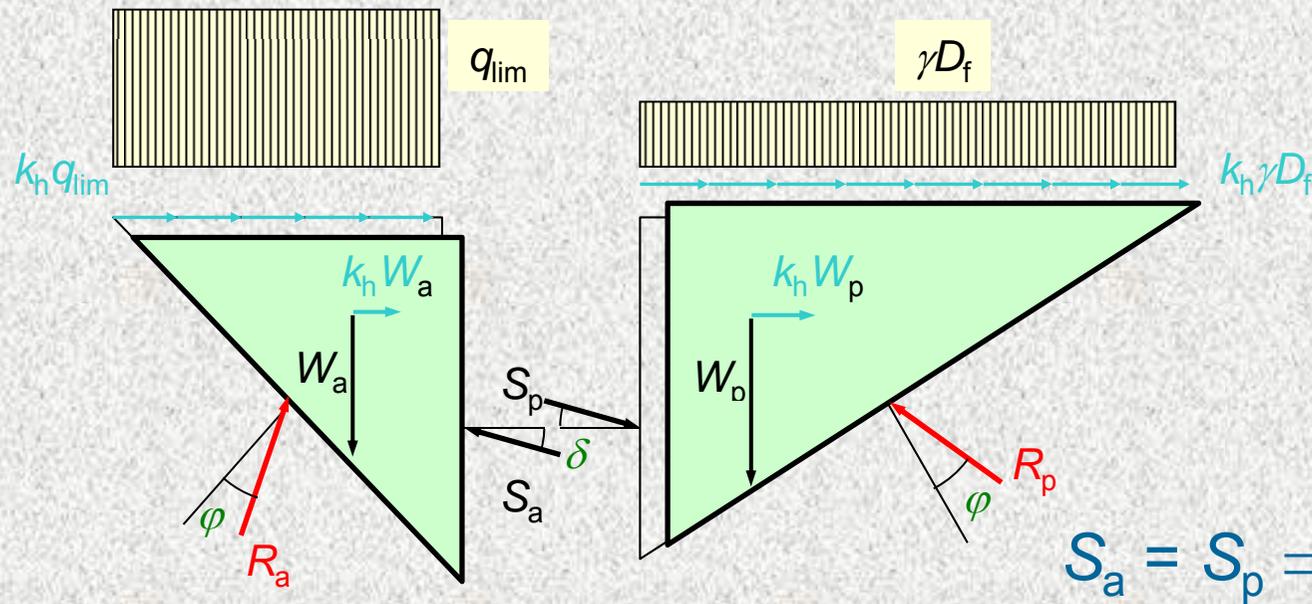
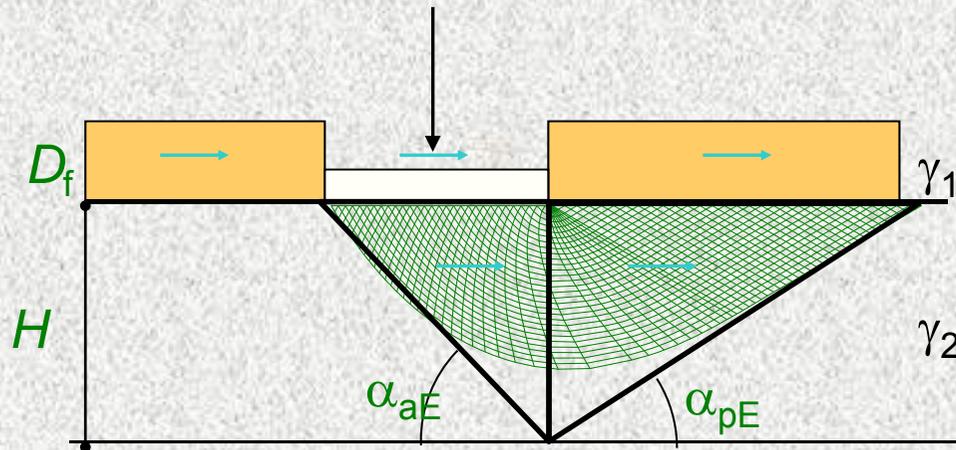
risposta sismica locale

interazione cinematica

interazione inerziale



Il modello di Richards, Helms & Budhu (1993)



Il modello di Richards, Helms & Budhu (1993)

φ : angolo di resistenza al taglio del terreno

δ : angolo di resistenza al taglio terreno - parete

$$\theta : \tan^{-1}[K_h/(1-K_v)]$$

$$\phi = \varphi - \theta$$

$$\alpha_{aE} = \phi + \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{(1 + \tan^2 \phi)[1 + \tan(\delta + \theta) \cot(\varphi - \theta)]} - \tan \phi}{1 + \tan(\delta + \theta)(\tan \phi + \cot \phi)} \right\}$$

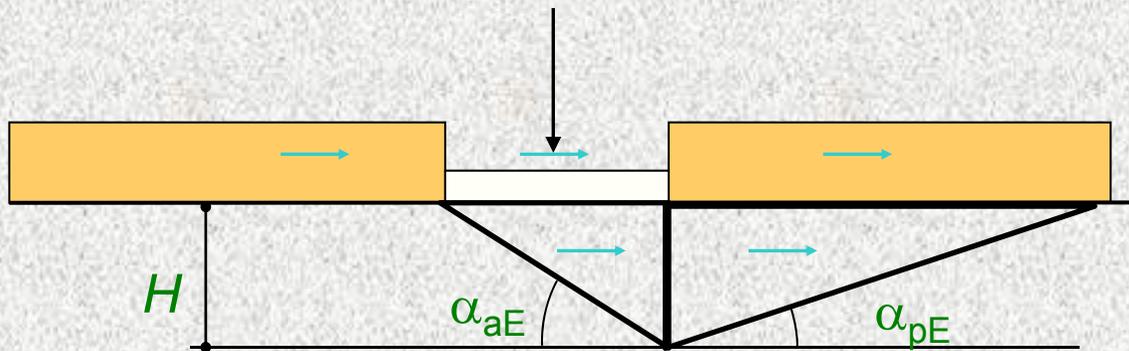
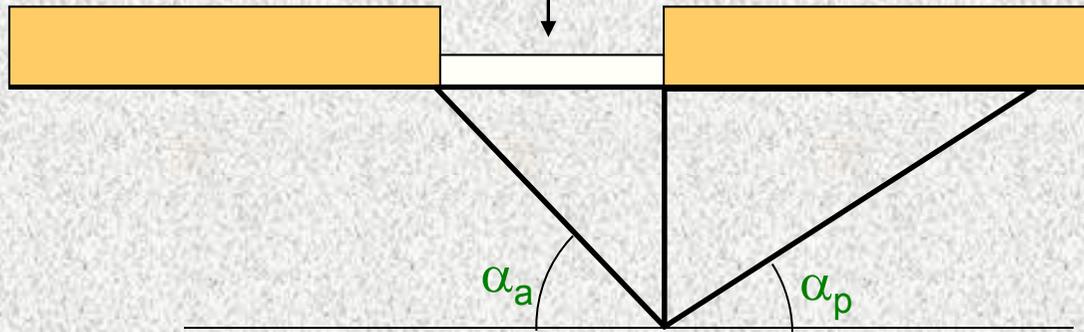
$$\alpha_{pE} = -\phi + \tan^{-1} \left\{ \frac{\sqrt{(1 + \tan^2 \phi)[1 + \tan(\delta - \theta) \cot(\varphi - \theta)]} + \tan \phi}{1 + \tan(\delta + \theta)(\tan \phi + \cot \phi)} \right\}$$

$$K_{AE} = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left\{ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \phi}{\cos(\delta + \theta)}} \right\}^2}$$

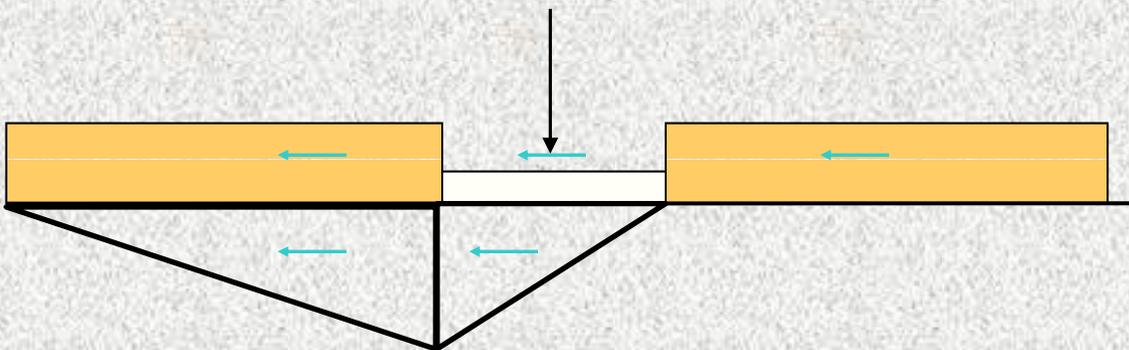
$$K_{PE} = \frac{\cos^2 \phi}{\cos \theta \cos(\delta + \theta) \left\{ 1 - \sqrt{\frac{\sin(\varphi + \delta) \sin \phi}{\cos(\delta + \theta)}} \right\}^2}$$



Il modello di Richards, Helms & Budhu (1993)



per effetto delle azioni sismiche il meccanismo di collasso è meno profondo

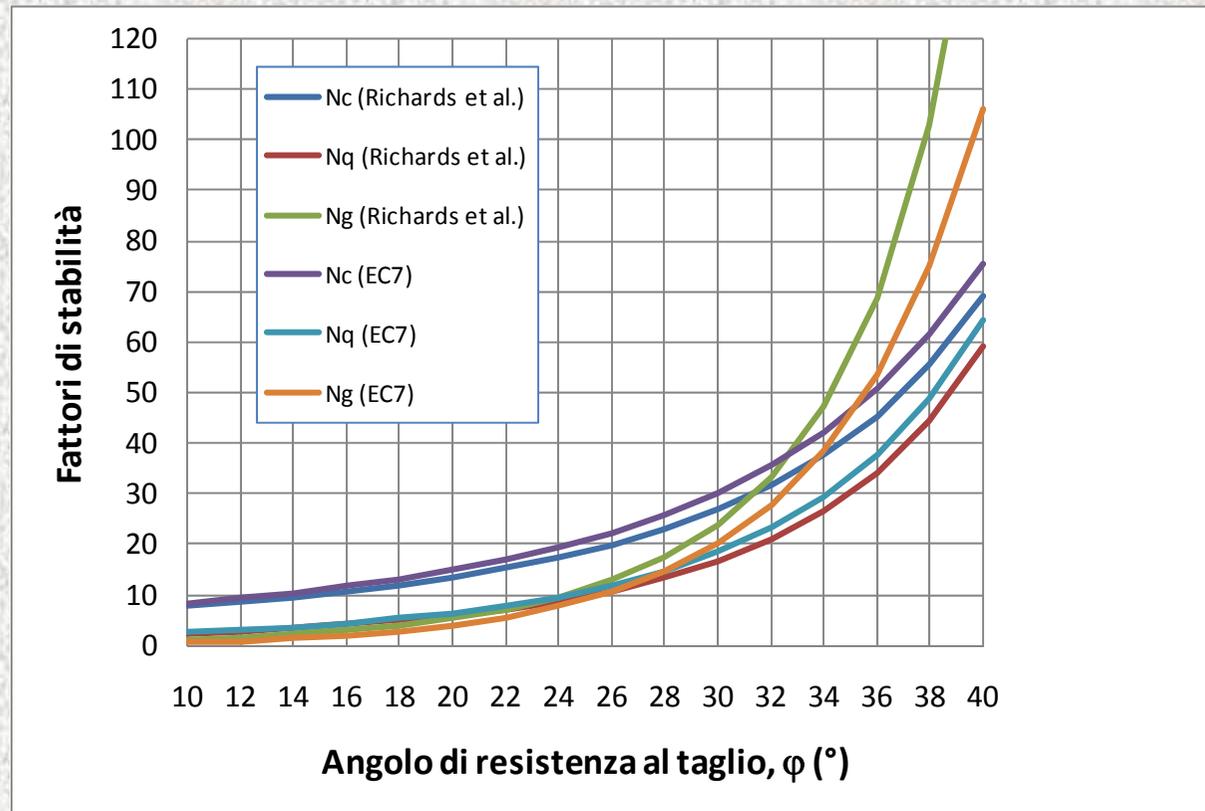


l'inversione delle azioni sismiche produce un'inversione del meccanismo di collasso



Il modello di Richards, Helms & Budhu (1993)

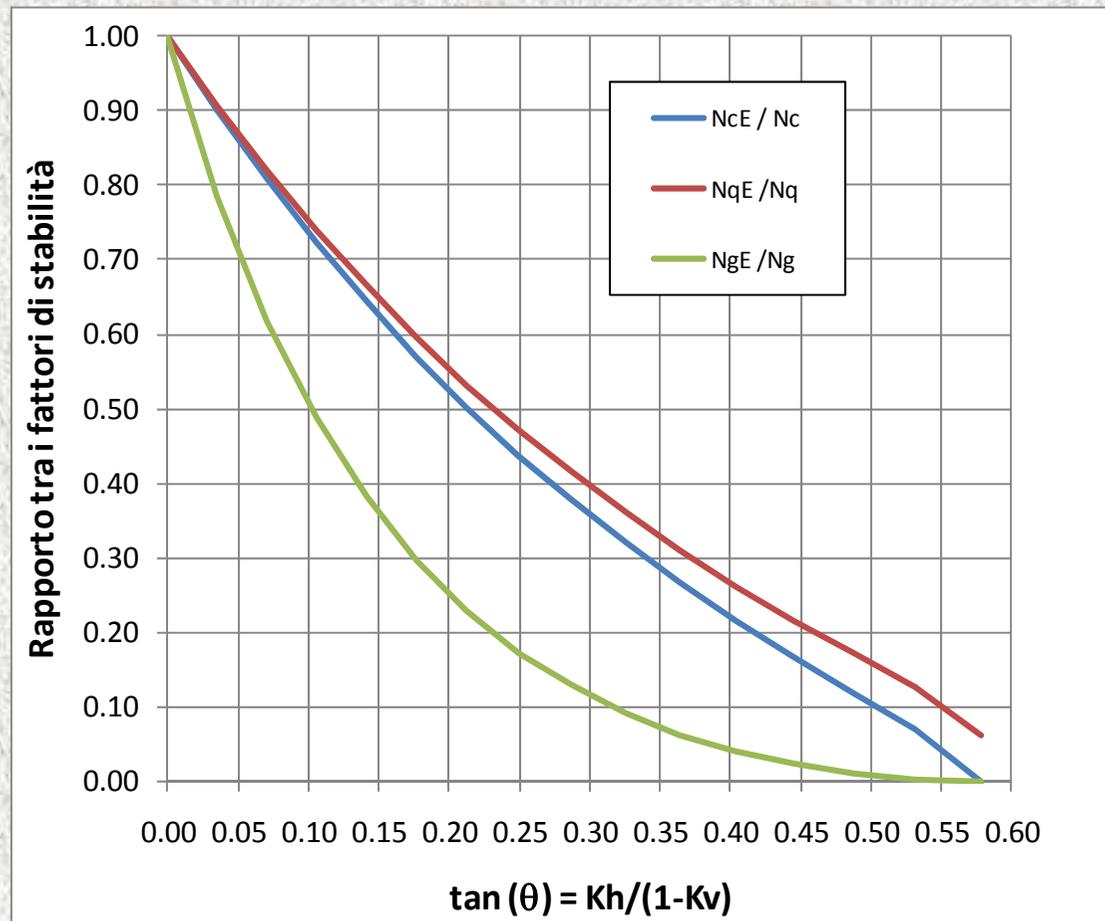
Confronto con la soluzione tradizionale (EC7)
(condizioni statiche)



Il modello di Richards, Helms & Budhu (1993)

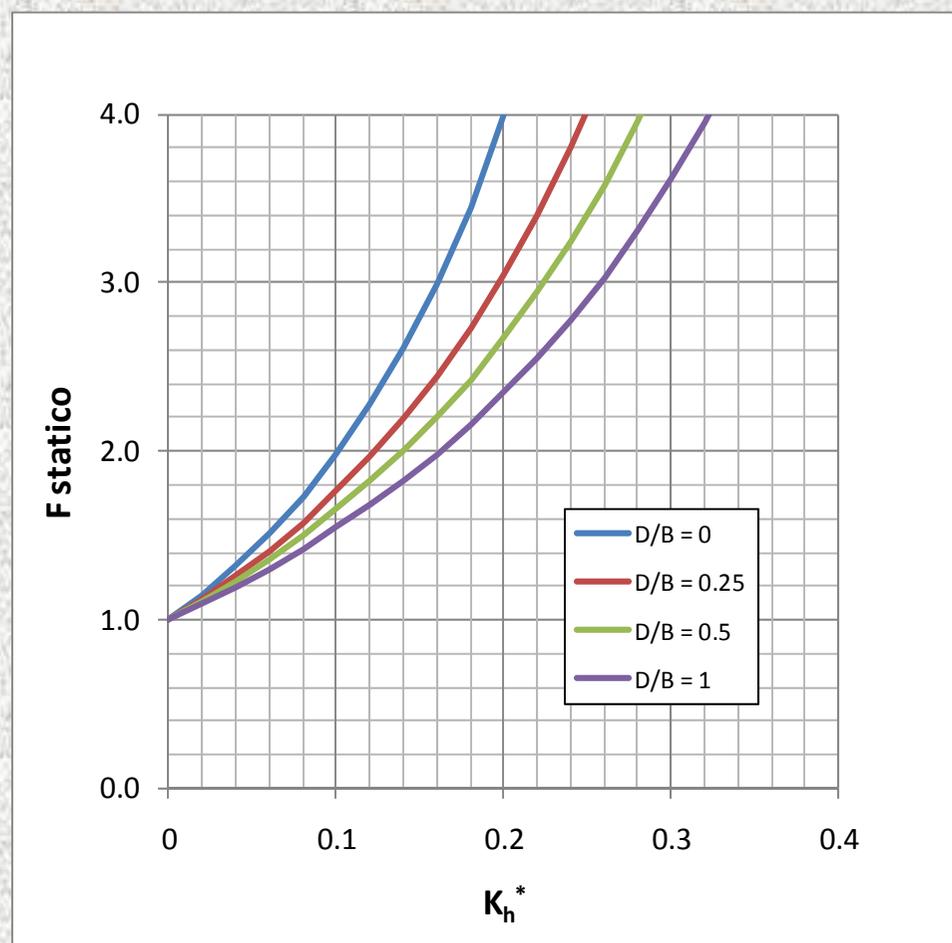
Influenza del sisma

$$\varphi' = 30^\circ, \delta/\varphi' = 0.5$$



Il modello di Richards, Helms & Budhu (1993)

Coefficiente sismico critico





Associazione Italiana

Calcestruzzo armato e Precompresso

LA PROGETTAZIONE STRUTTURALE
SECONDO IL D.M. 14.01.08 E
CIRCOLARE APPLICATIVA

(Catanzaro, 15-16 Aprile 2010)

**GRAZIE PER
L'ATTENZIONE !**

Alberto Burghignoli
Ordinario di Meccanica delle Terre



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA