

**PROGETTAZIONE GEOTECNICA
SECONDO LE NORME TECNICHE
PER LE COSTRUZIONI
D.M. 14.01.2008**

fondazioni e opere di sostegno

Luigi Callisto



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

- analisi agli stati limite
- valutazione della sicurezza secondo NTC
- fondazioni, condizioni statiche
- condizioni sismiche
 - determinazione dell'azione sismica
 - fondazioni superficiali e profonde
- muri di sostegno
 - condizioni statiche
 - condizioni sismiche
- paratie e ancoraggi
 - condizioni statiche
 - condizioni sismiche

stato limite

condizione nella quale l'opera non soddisfa un requisito

- di stabilità **SLU**
- funzionale **SLE**

SLU → sicurezza (collasso, totale o parziale)

SLE → comportamento (spostamenti, fessurazioni...)

analisi agli stati limite

valori caratteristici (k) di:

- azioni (valori rappresentativi)
- parametri di resistenza o resistenze globali

coefficienti parziali applicati ai valori caratteristici

altre incertezze:

- geometria e modello di sottosuolo
- distribuzione pressioni interstiziali
- schematizzazione del problema (1D, 2D)
- ...



verifiche nei confronti degli
Stati Limite Ultimi (SLU)

$$E_d \leq R_d$$

effetto delle azioni

$$E_d = E \left[\gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

$$E_d = \gamma_E \cdot E \left[F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

resistenza del sistema

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[\gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

coefficienti parziali NTC 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_{Qi}	0.0	0.0	0.0
	sfavorevoli		1.5	1.5	1.3

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	1.0	1.0

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

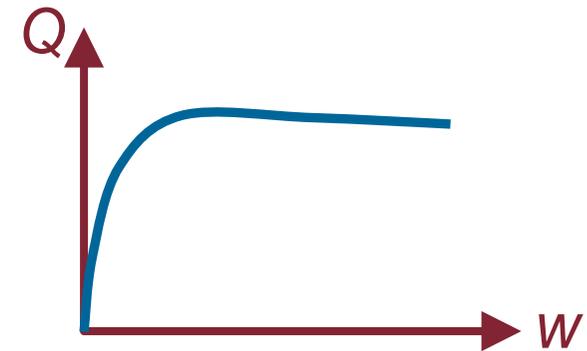
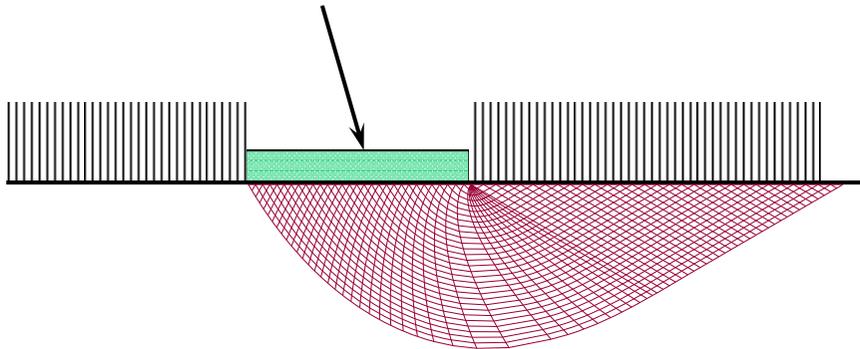
EN 1997-1 (*Eurocodice 7: Geotechnical Design*)
characteristic value \rightarrow a **cautious estimate** of the value affecting the occurrence of the **limit state**.

NTC 6.2.2

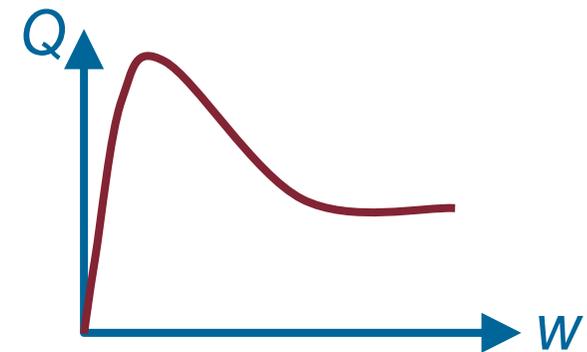
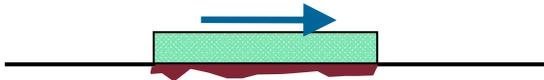
“per valore caratteristico di un parametro geotecnico deve intendersi una stima ragionata e cautelativa del valore del parametro nello stato limite considerato”

scelta dei valori caratteristici dei parametri di resistenza

- **valori medi:** volumi elevati, comportamento duttile



- **valori minimi:** volumi piccoli, comportamento fragile



verifiche nei confronti degli Stati Limite Ultimi

APPROCCIO 1: due diverse combinazioni

C1: si amplificano le azioni o gli effetti delle azioni

C2: si penalizzano i parametri di resistenza del terreno
(e le resistenze globali)

APPROCCIO 2: unica combinazione

si amplificano le azioni e si penalizzano le resistenze
globali del terreno

approcci di progetto e coefficienti parziali

appr.	azioni permanenti	proprietà $c', \varphi' (C_u)$	resistenze
1 C1	1.3	1.0	1.0
1 C2	1.0	1.25 (1.4)	γ_R
2	1.3	1.0	γ_R

γ_R dipende dal tipo di opera



approcci di progetto e coefficienti parziali

appr.	azioni permanenti	azioni variabili	proprietà $c', \varphi' (C_u)$	resistenze
1 C1	1.3	1.5	1.0	1.0
1 C2	1.0	1.3	1.25 (1.4)	γ_R
2	1.3	1.5	1.0	γ_R

γ_R dipende dal tipo di opera

coefficienti γ_R sulla resistenza globale

definiti per ciascun tipo di opera e per ciascun approccio di progetto

$$R_d = \frac{1}{\gamma_R} R \left[\gamma_F \cdot F_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; a_d \right]$$

EC7: γ_R usato in **alternativa** a γ_M

NTC: γ_R usato in **aggiunta** a γ_M



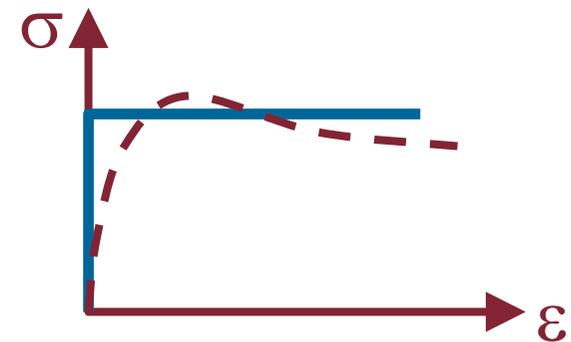
analisi di un sistema geotecnico

(Terzaghi 1943)

1. *stability problems*

deal with the conditions for the equilibrium of ideal soils immediately preceding ultimate failure by plastic flow

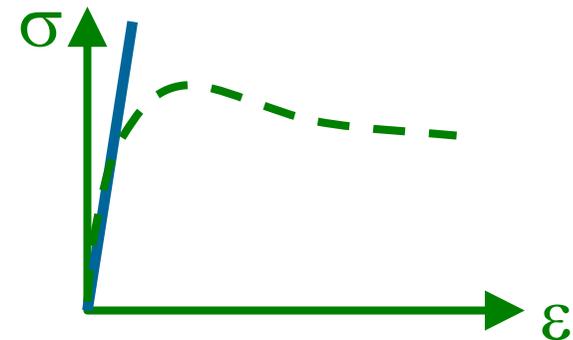
analisi di un meccanismo di collasso



2. *elasticity problems*

deal with the deformation of the soil due to its own weight or due to external forces

analisi di interazione



verifiche di resistenza **strutturali**

mobilitazione locale della resistenza in:

- fibre (tensioni ammissibili)
- sezioni (stati limite)

verifiche di resistenza **geotecniche**

- **mobilitazione globale** resistenze (meccanismo)
- plasticizzazioni locali sempre presenti



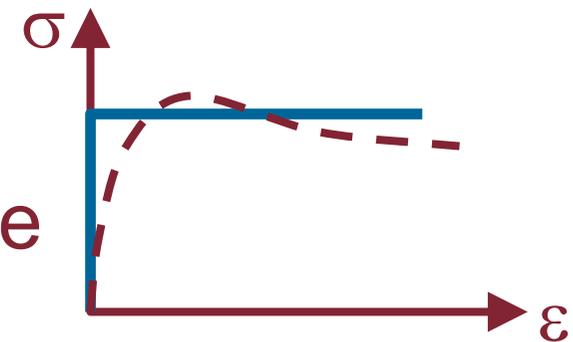
analisi di un sistema geotecnico

1. analisi di un meccanismo di collasso

studio della sicurezza

resistenza

distanza da una condizione limite

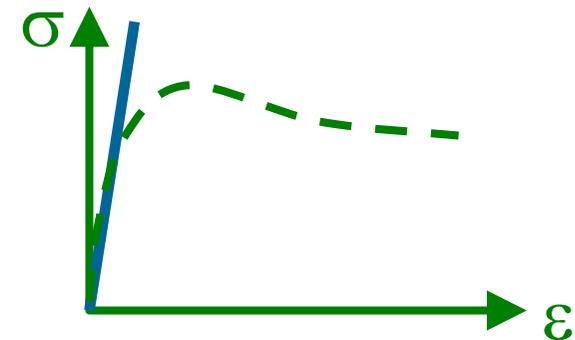


2. analisi di interazione

spostamenti e sollecitazioni

deformabilità

effettivo comportamento



analisi di un sistema geotecnico (tradizionale)

1. analisi di un meccanismo di collasso
studio della sicurezza **SLU**

2. analisi di interazione **SLE (?)**

- sollecitazioni negli elementi strutturali → tensioni ammissibili
- spostamenti



analisi di un sistema geotecnico (contemporanea)

1. analisi di un cinematismo di collasso
studio della sicurezza **SLU** **GEO**
verifica $E_d < R_d \rightarrow$ distanza dal collasso

2. analisi di interazione

- sollecitazioni negli elementi
strutturali **SLU** **STR**
es.: $M_{Ed} \leq M_{Rd}$
- spostamenti **SLE**

fondazioni superficiali

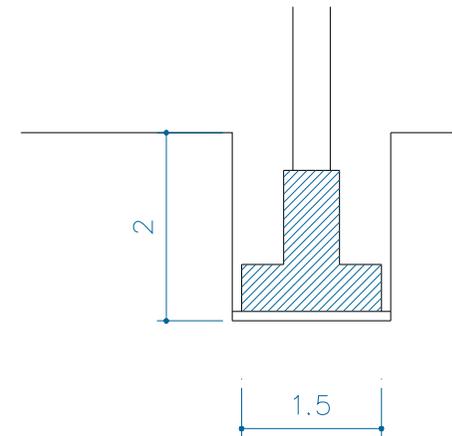
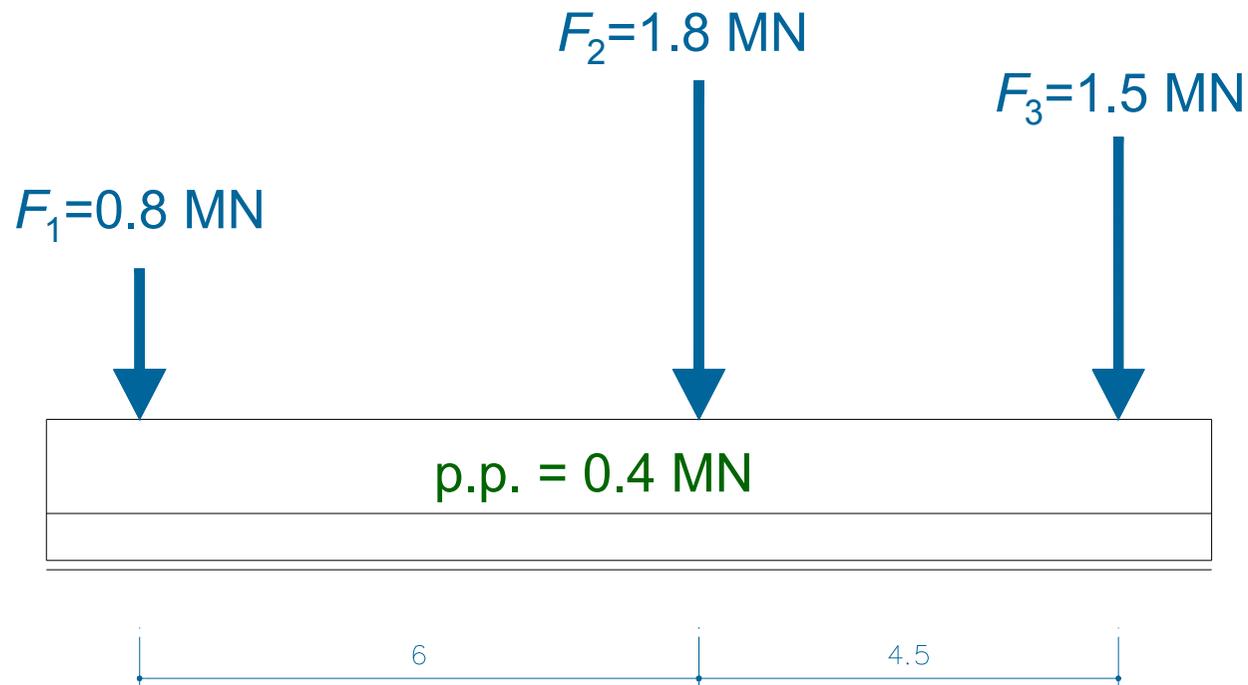
stati limite ultimi

- carico limite
- scorrimento
- resistenza strutturale

	valori di γ_R		
verifica	R1	R2	R3
carico limite	1.0	1.8	2.3
scorrimento	1.0	1.1	1.1



esempio: trave di fondazione



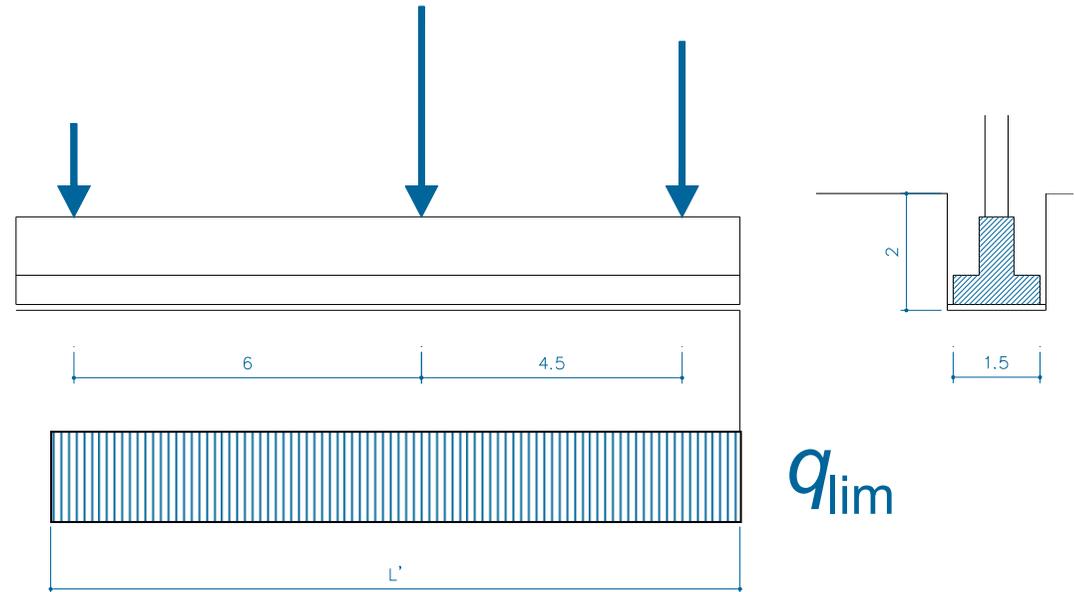
sabbia mediamente addensata
 $\gamma = 19 \text{ kN/m}^3$ $\varphi' = 33^\circ$ $E = 5 \text{ MPa}$

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



approccio
tradizionale
(GEO)

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



analisi di un meccanismo di collasso
(rottura generale)

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

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

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

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

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

$$FS = 4.8$$

A1-C2 (GEO)

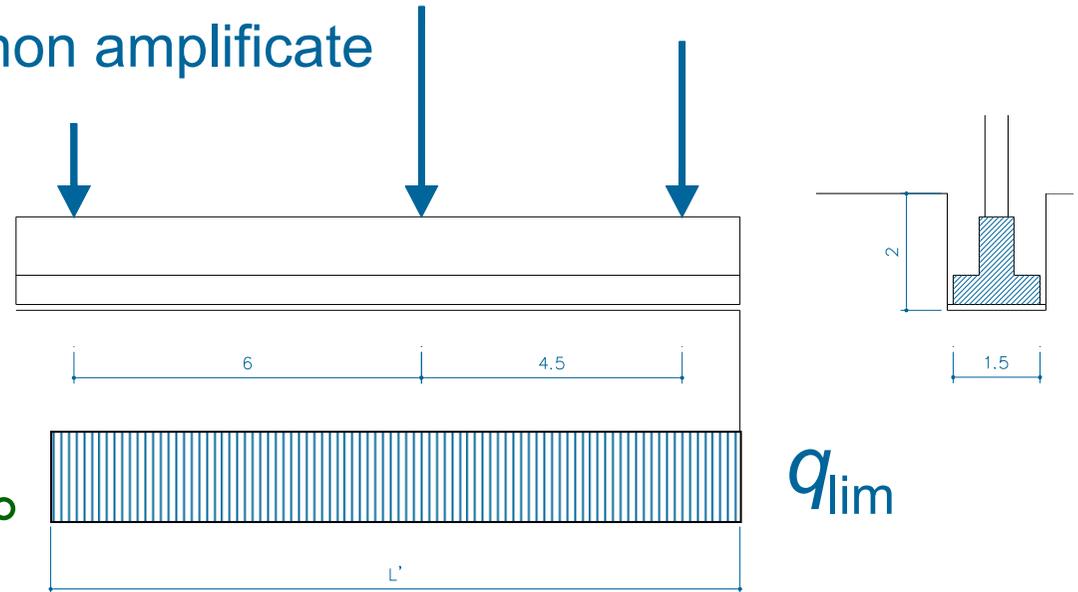
$$\gamma_G = 1.0$$

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

$$\gamma_R = 1.8$$

$$\varphi_k' = 33^\circ \quad \varphi_d' = 27.4^\circ$$

azioni non amplificate



analisi di un meccanismo di collasso
(rottura generale)

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

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

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

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

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

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

$$R_d / E_d = 1.4$$

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

A2 (GEO)

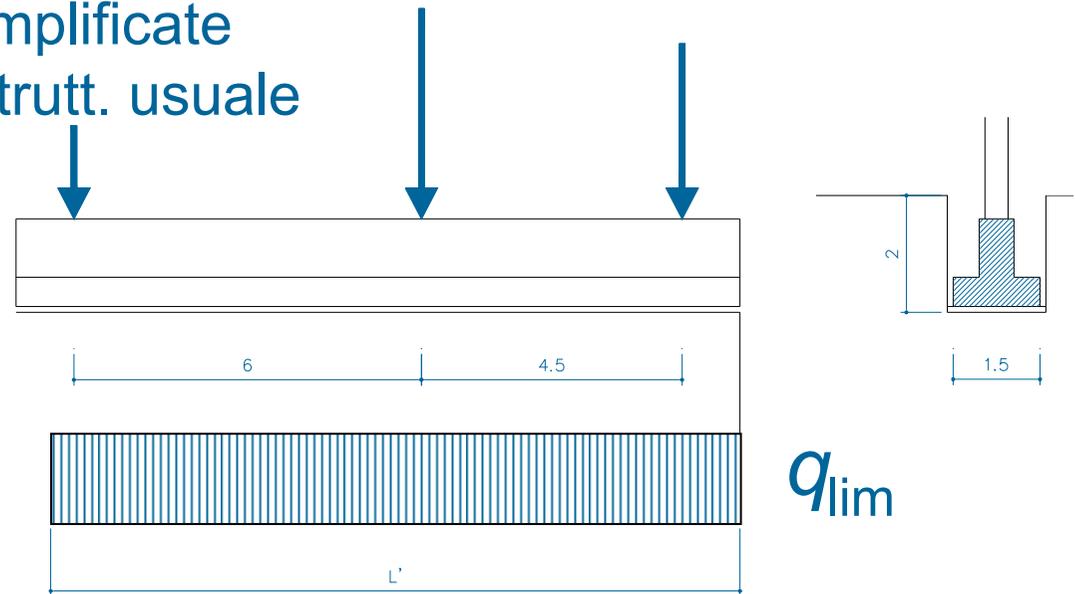
$$\gamma_G = 1.3$$

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

$$\gamma_R = 2.3$$

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

azioni amplificate
analisi strutt. usuale



analisi di un meccanismo di collasso
(rottura generale)

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

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

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

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

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

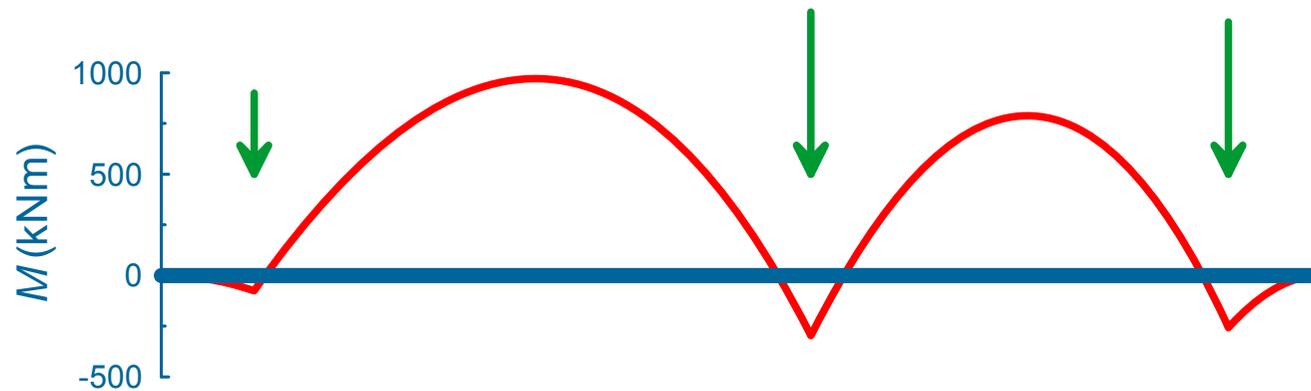
$$E_d = Q_{es} \cdot 1.3 = 5.9 \text{ MN}$$

$$R_d / E_d = 1.6$$

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

esempio: trave di fondazione approccio tradizionale (STR)

Winkler – $k = 3.0 \text{ MN/m}^3$



rigidezza \equiv costante di sottofondo

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



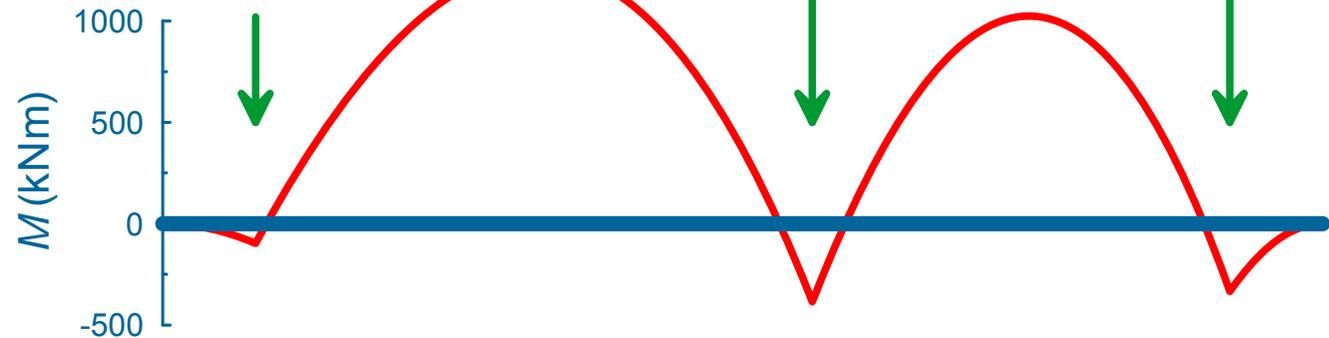
A1-C1 (STR)

$$\gamma_G = 1.3$$

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

~~$$\gamma_R = 1.0$$~~

azioni amplificate
analisi strutt. usuale



il modello costitutivo non include parametri di resistenza

~~A1-C2~~

analisi lineare:

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

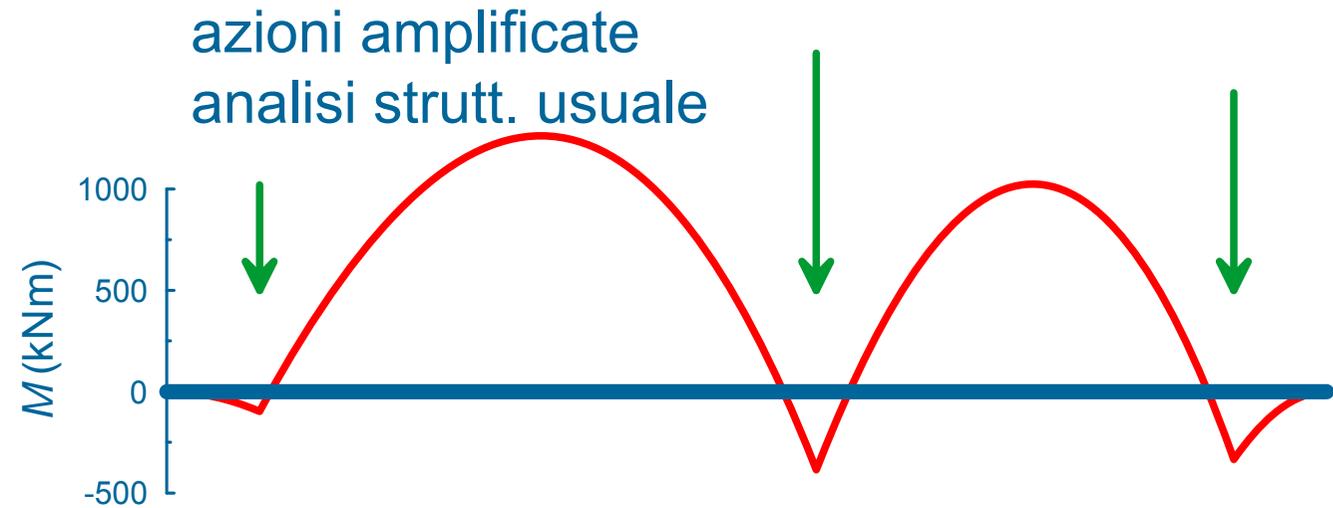
$$M_{\max} = 1.3 \text{ MNm} (= 1 \times 1.3) = M_{Ed} < M_{Rd}$$

A2 (STR)

$$\gamma_G = 1.3$$

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

$$\gamma_R = 2.3$$



γ_R non compare nell'analisi \rightarrow come A1C1

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



stati limite di esercizio

SLE

cedimenti

aspetti strutturali (fessurazioni...)

- verifica obbligatoria
- si opera con valori caratteristici
i coefficienti parziali sono unitari

pali di fondazione (e ancoraggi)

- resistenza influenzata da fattori tecnologici
- spesso determinata per via empirica

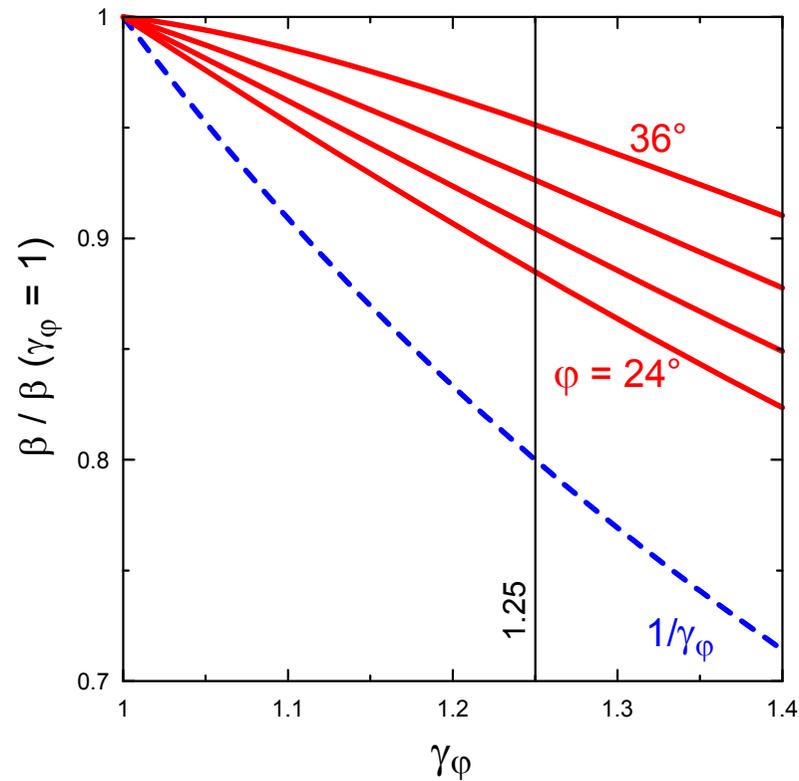
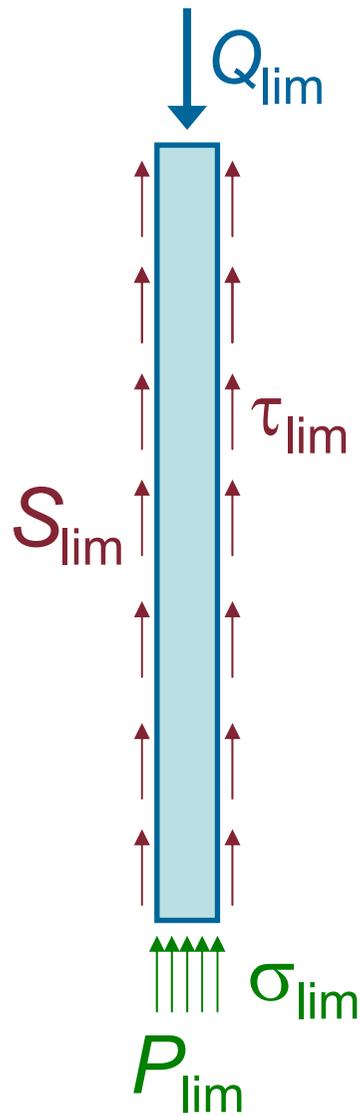
- coefficienti applicati alla resistenza globale e non ai parametri di resistenza

distinzione A1-A2 solo convenzionale

$$\sigma_{lim} = f(c', \varphi', C_u \dots)$$

$$\tau_{lim} = \sigma'_v K \tan \varphi_s = \sigma'_v \beta$$

$$\beta = (1 - \sin \varphi') \times \tan \varphi'$$



verifiche **fondazioni profonde**
valutazione resistenze caratteristiche

- a) da prove di carico su pali pilota
- b) con metodi analitici o con relazioni empiriche con prove in sito
- c) da prove dinamiche ad alto livello di deformazione, su pali pilota

$$R_k = \text{Min} \left\{ \frac{R_{\text{media}}}{\xi_1}, \frac{R_{\text{min}}}{\xi_2} \right\}$$

$\xi_1, \xi_2 = f(\text{numero prove di carico/verticali d'indagine})$

$$\xi = 1.0 - 1.7$$

verifiche fondazioni profonde

APPROCCIO 1

combinazione 2: A2+M1+R2

GEO

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

resistenze caratteristiche / γ_R

valori di γ_R

resistenza	tecnologia		
	infissi	trivellati	elica cont.
base	1.45	1.70	1.60
laterale	1.45	1.45	1.45
totale	1.45	1.60	1.55
lat.traz.	1.60	1.60	1.60
orizzontale		1.60	



verifiche fondazioni profonde

APPROCCIO 1

combinazione 1: A1+M1+R1

STR

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

$$\gamma_{\phi'} = \gamma_{c'} = \gamma_{Cu} = 1$$

$$\gamma_R = 1.0$$

le resistenze del terreno
non compaiono nelle
verifiche



verifiche fondazioni profonde

APPROCCIO 2

combinazione A1+M1+R3

$\gamma_{G1} = 1.3$ $\gamma_Q = 1.5$ resistenze caratteristiche / γ_R

valori di γ_R	tecnologia		
	infissi	trivellati	elica cont.
resistenza			
base	1.15	1.35	1.30
laterale	1.15	1.15	1.15
totale	1.15	1.30	1.25
lat.traz.	1.25	1.25	1.20
orizzontale		1.30	

GEO

γ_R non compare nelle verifiche STR



verifiche **fondazioni miste**

- solo approccio 2
- coefficienti γ_R applicati
alla somma delle resistenze caratteristiche

capacità portante

$$\gamma_R = 2.3$$

scorrimento

$$\gamma_R = 1.1$$

stato limite di esercizio

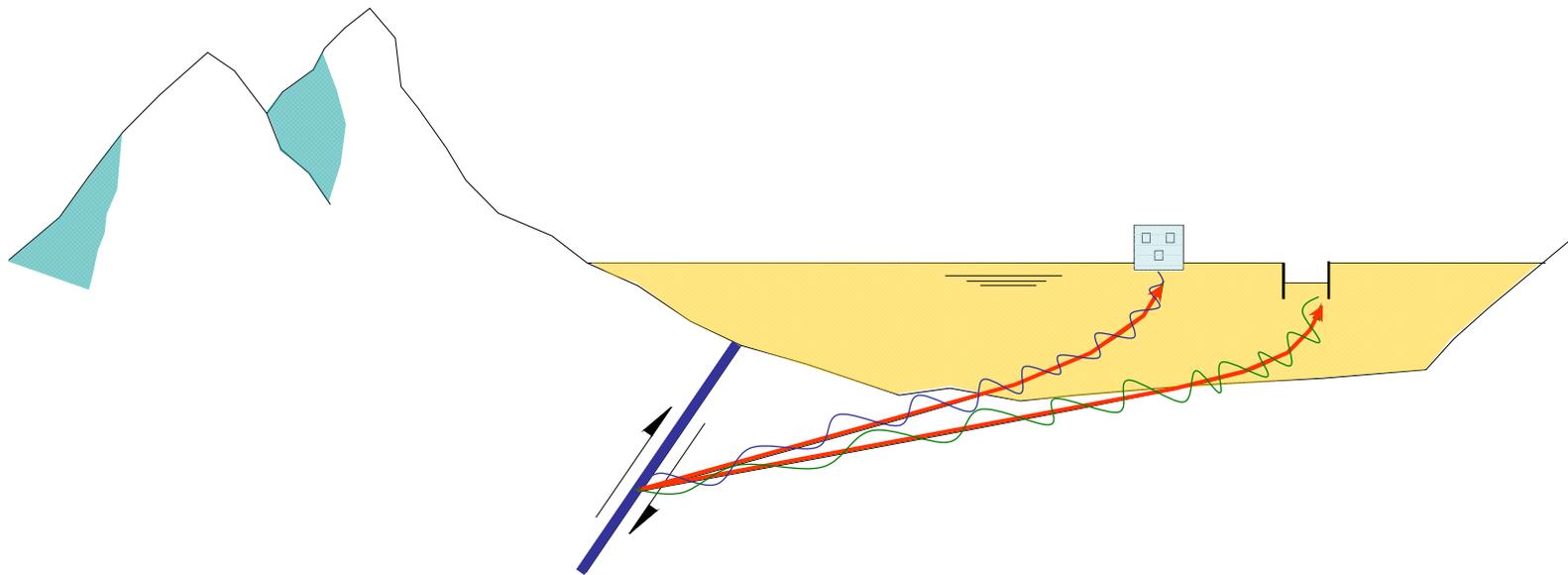
SLE

- verifica obbligatoria
- si opera con valori caratteristici
i coefficienti parziali sono unitari

condizioni sismiche

risposta sismica

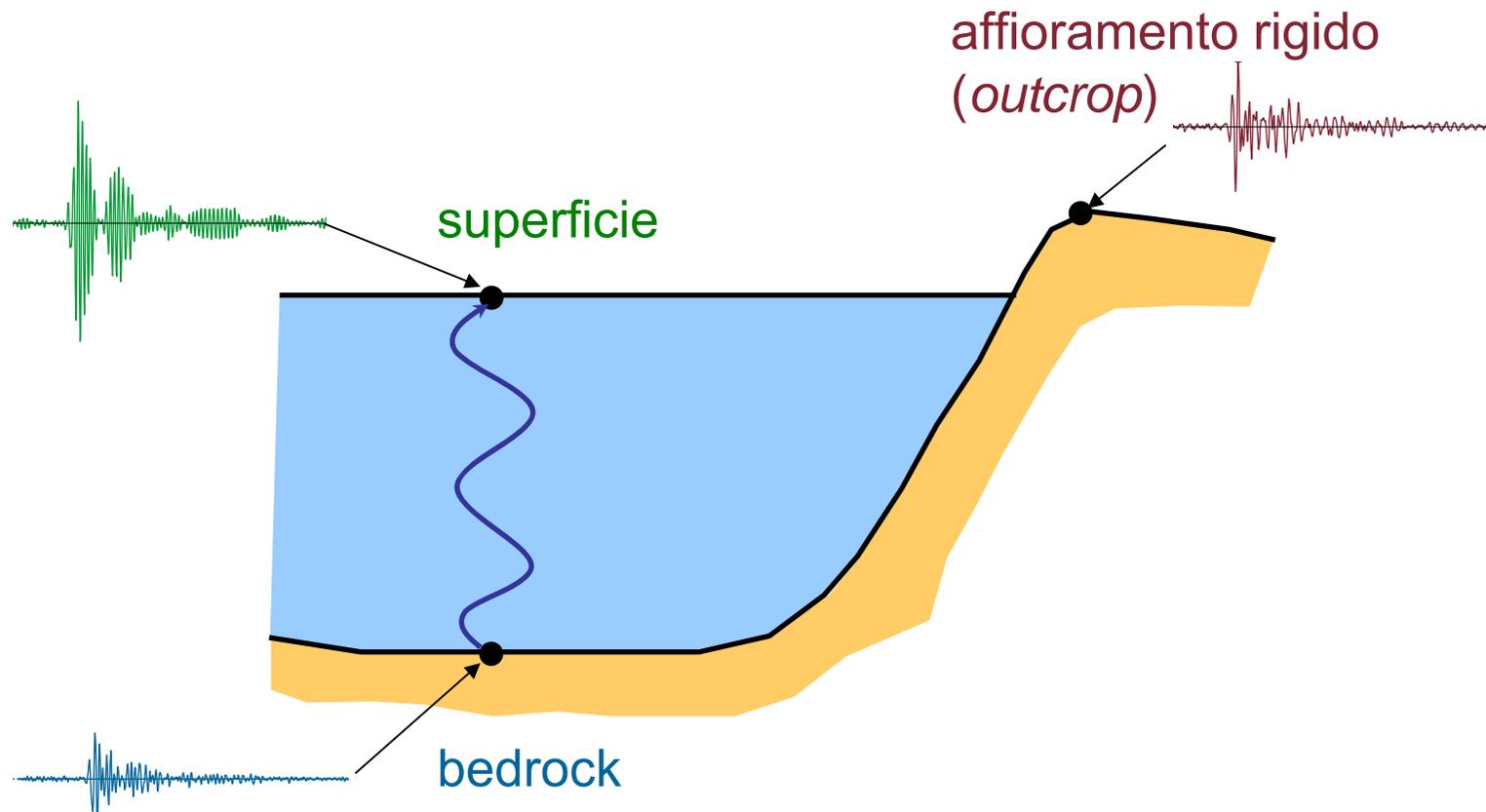
previsione del moto del terreno, in superficie o in profondità, indotto da un evento sismico



rottura lungo una discontinuità (faglia)

propagazione, sotto forma di onde, dell'energia rilasciata





moto su
affioramento



modifica (RSL)



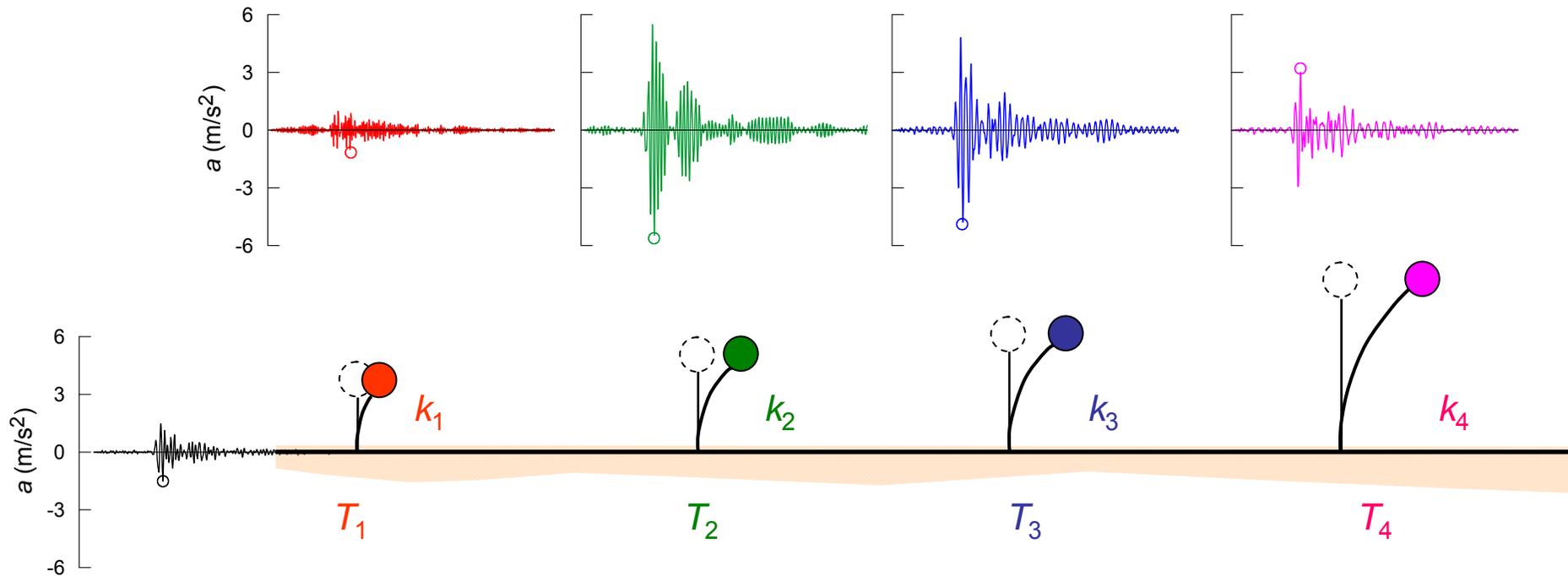
azione di progetto

a_g, F_0, T_c^*

S_S, S_T

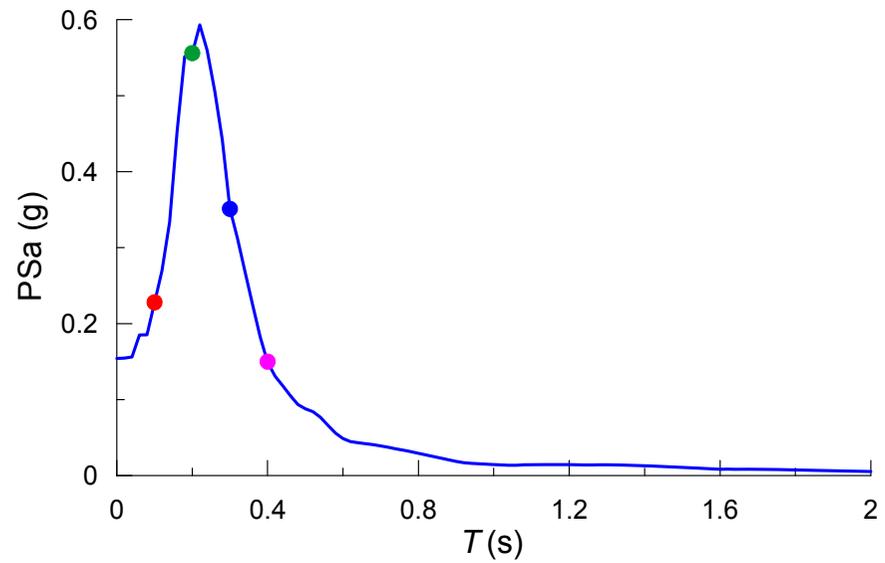
a_{max}, T_c





descrizione azione sismica

spettro elastico di risposta



vita di riferimento $V_R = V_N \times C_U$

stati limite \rightarrow probabilità di superamento P_{VR}

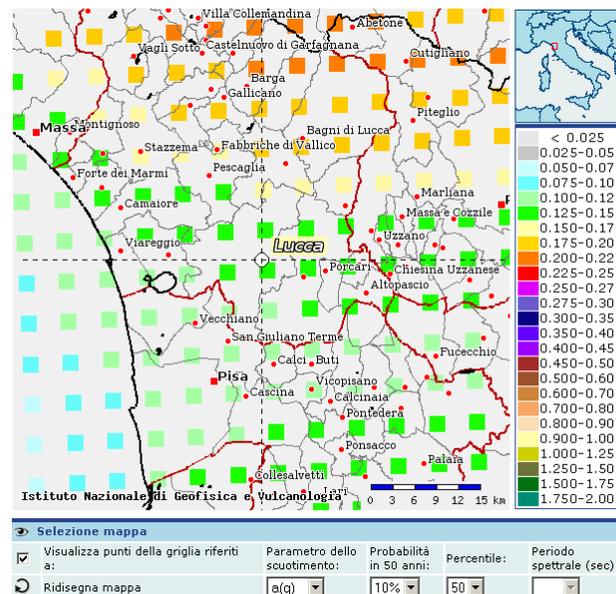
stati limite		P_{VR} (%)
ultimi	SLC	5
	SLV	10
di esercizio	SLD	63
	SLO	81

periodo di ritorno

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

moto su affioramento

a_g, F_0, T_c^*



<http://esse1-gis.mi.ingv.it>

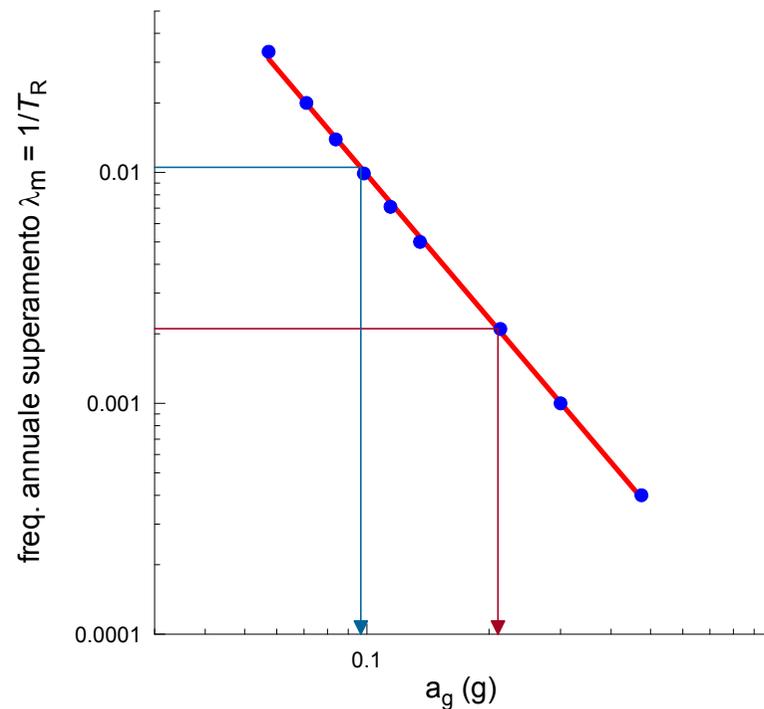
vita di riferimento $V_R = V_N \times C_U$

stati limite \rightarrow probabilità di superamento P_{VR}

stati limite		P_{VR} (%)
ultimi	SLC	5
	SLV	10
di esercizio	SLD	63
	SLO	81

periodo di ritorno

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$



moto su affioramento

a_g, F_0, T_c^*

periodo di ritorno

$$T_R = \frac{-V_R}{\ln(1 - P_{VR})}$$

intensità

prestazione

elevato (evento raro)

alta

anche
modesta
(SLU)

basso (evento frequente)

bassa

buona
(SLE)



a_{\max} , $T_C \rightarrow$ analisi di risposta sismica semplificata

$$a_{\max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g \quad T_C = C_C \cdot T_C^*$$

S_T coefficiente di amplificazione topografica

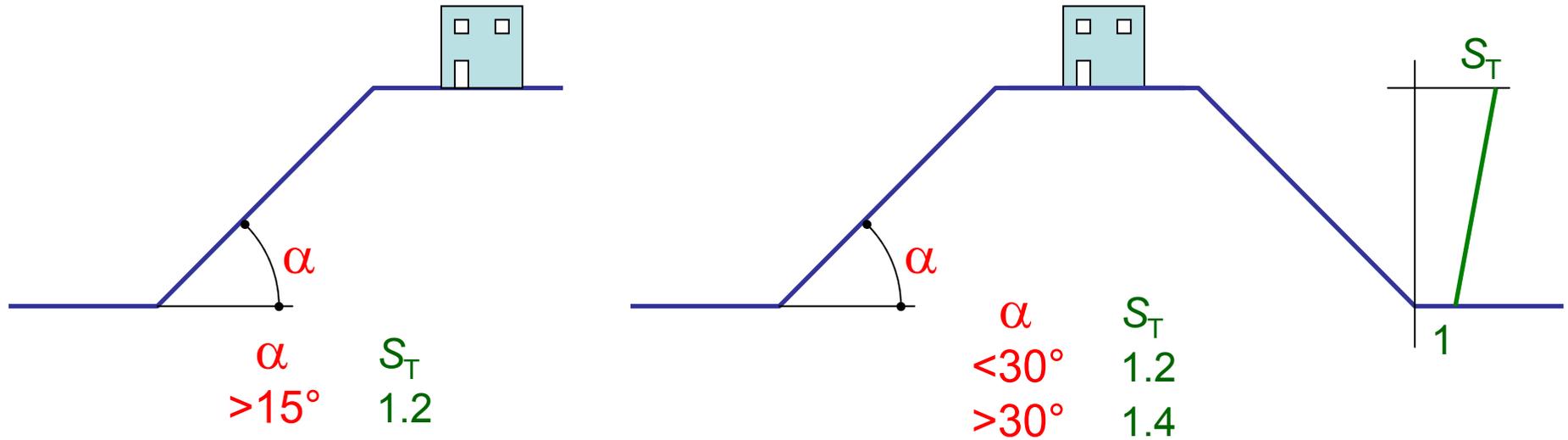
S_S coefficiente di amplificazione stratigrafica = 1.0-1.8
(dipende dalla categoria di sottosuolo)

Cat.	V_{S30}	N_{SPT30}	C_{U30}
A	> 800		
B	360-800	> 50	> 250
C	180-360	15-50	70-250
D	< 180	<15	< 70

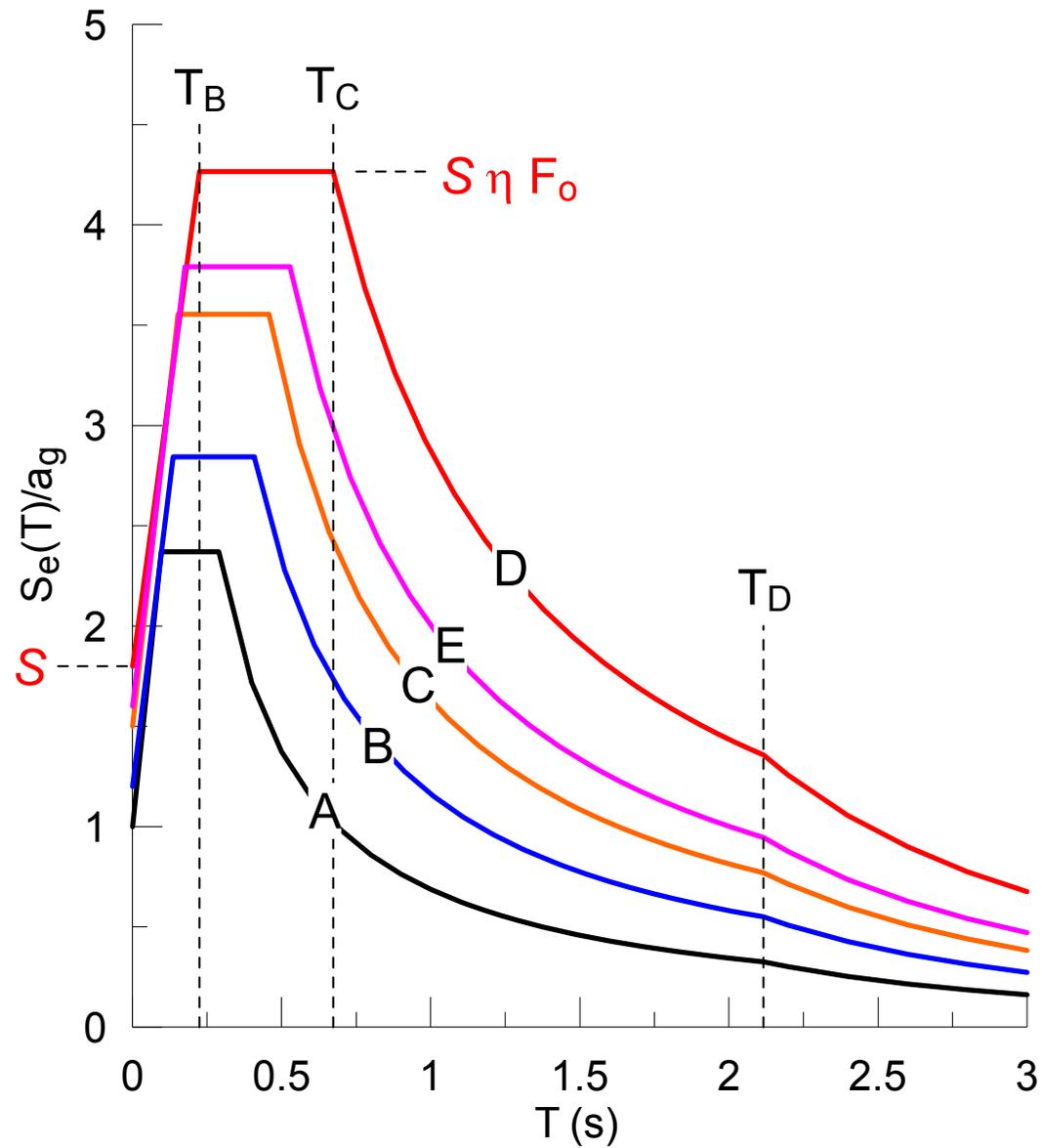
$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_i \frac{h_i}{v_{si}}} \quad (\text{m/s})$$

coefficienti di amplificazione topografica S_T

(per altezze maggiori di 30 m)



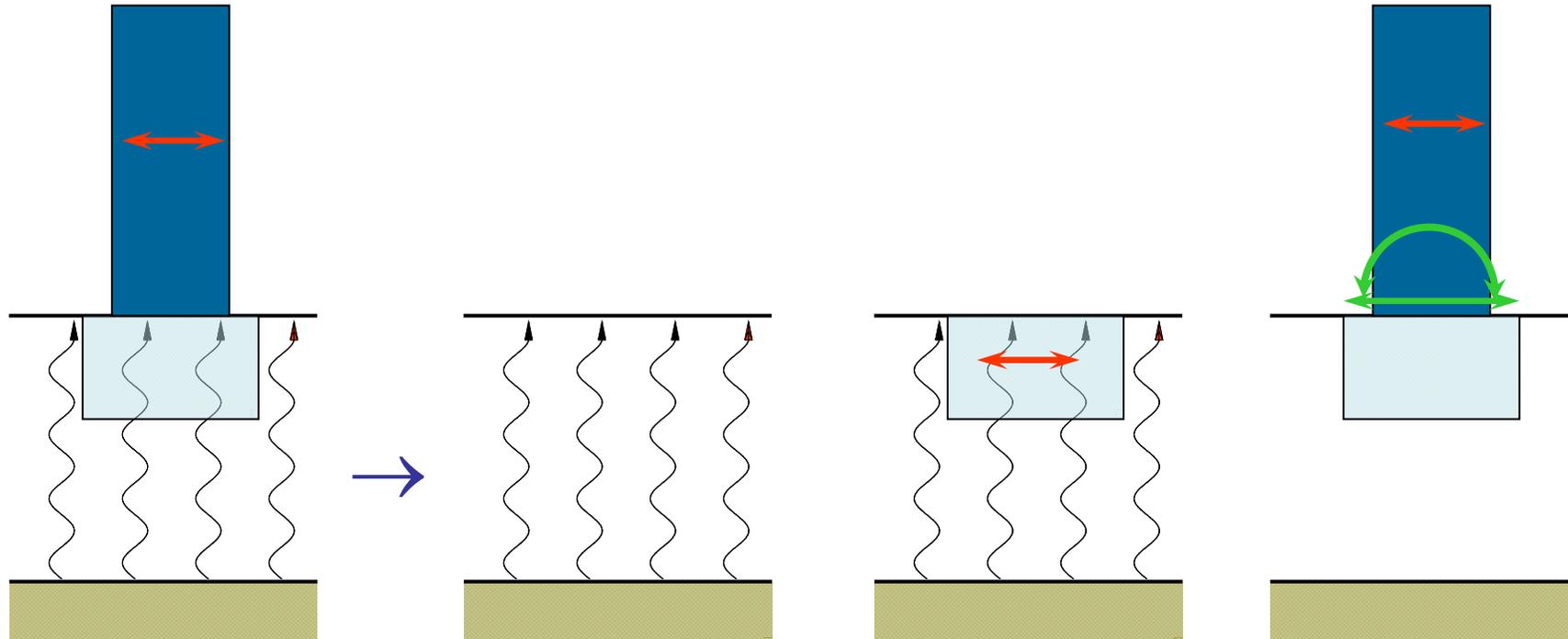
spettro di risposta di progetto (esempio)



fondazioni in condizioni sismiche

fondazioni

metodo delle sottostrutture



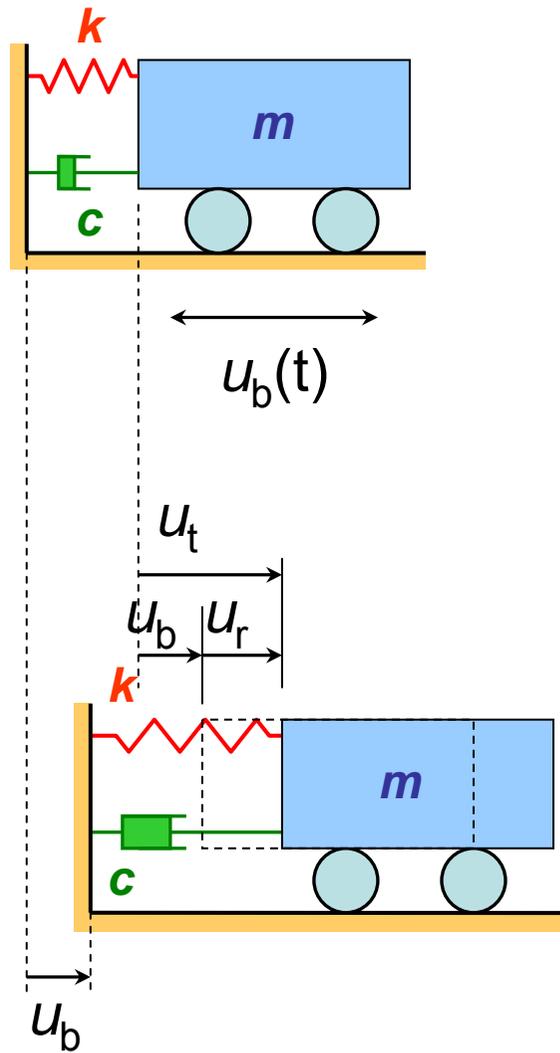
interazione
"completa"

risposta
sismica
locale

interazione
cinematica

interazione
inerziale

oscillatore elementare moto alla base



$$u_t = u_b + u_r$$

forze d'inerzia → accelerazione totale

$$F_i(t) = m \cdot \ddot{u}_t(t)$$

smorzatore → velocità relativa

$$F_c(t) = c \cdot \dot{u}_r(t)$$

molla → spostamento relativo

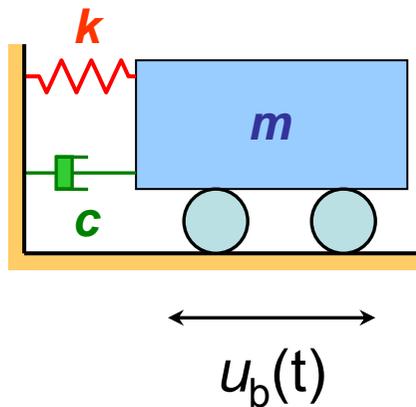
$$F_k(t) = k \cdot u_r(t)$$

$$m(\ddot{u}_b + \ddot{u}_r) + c \dot{u}_r + k u_r = 0$$

$$m \ddot{u}_r + c \dot{u}_r + k u_r = \underbrace{-m \ddot{u}_b}_{\text{forzante equivalente}}$$

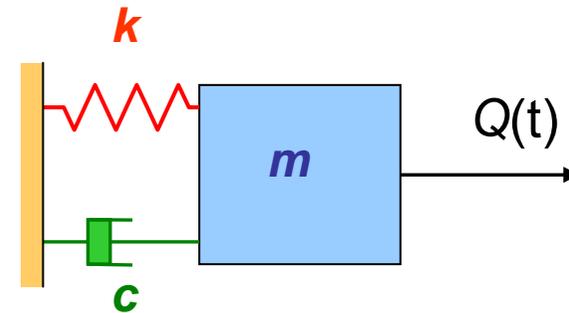
forzante
equivalente

interazione inerziale



moto alla base

moto relativo

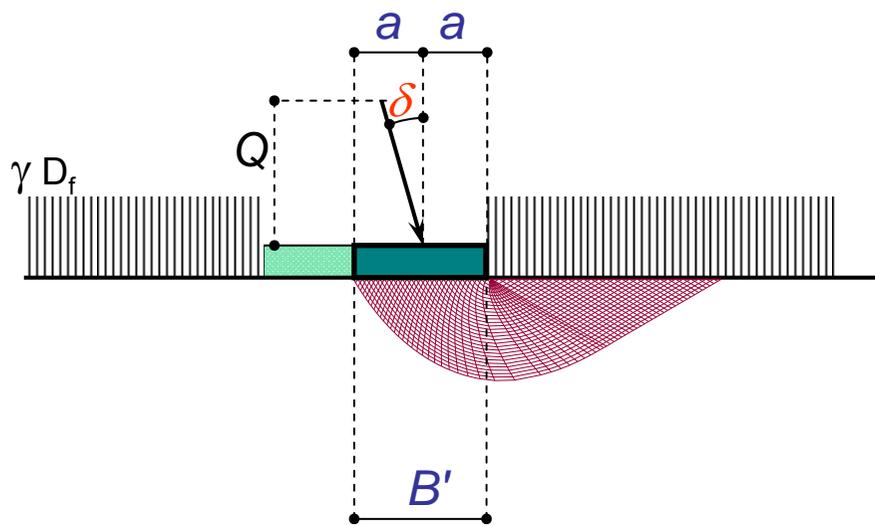
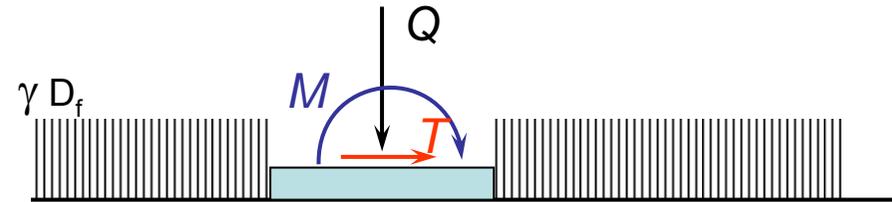
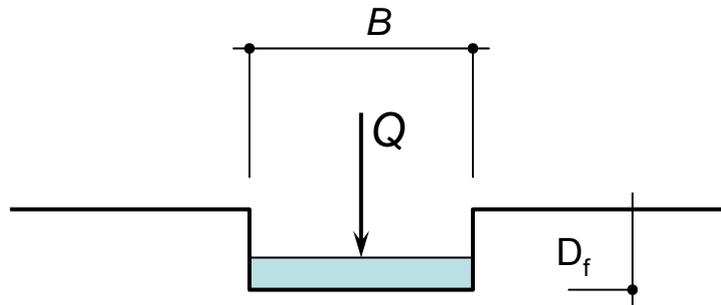


forzante equivalente

$$Q(t) = -m\ddot{u}_b$$

$$u(t) = u_r(t)$$

interazione inerziale - fondazioni superficiali carico limite e scorrimento (GEO)



γ, φ, c

$$N_q, N_c, N_\gamma = f(\varphi)$$

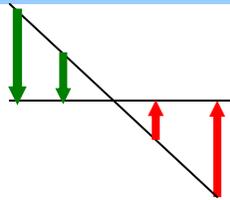
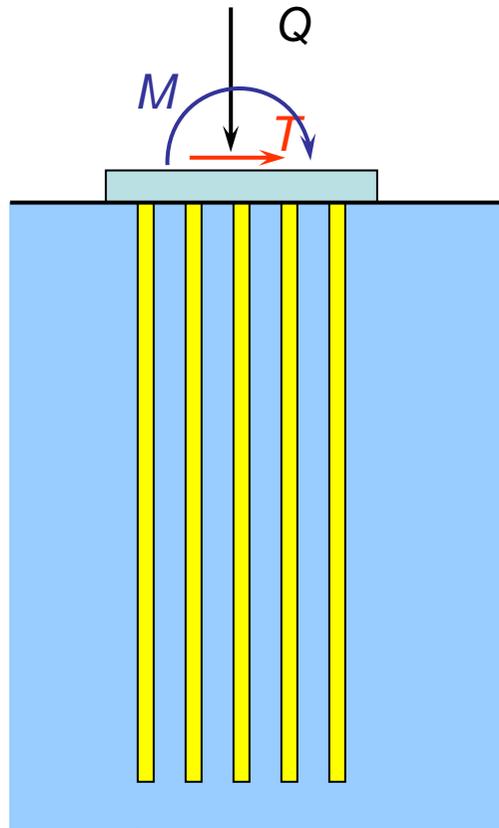
$$\xi_{q}, \xi_c, \xi_\gamma = f(\delta)$$

$$Q_{lim}/B' = \xi_{q} N_q \gamma D_f + \xi_c N_c c + \xi_\gamma N_\gamma \gamma B'/2$$

$$T_{lim} = c B' + Q \tan \varphi$$

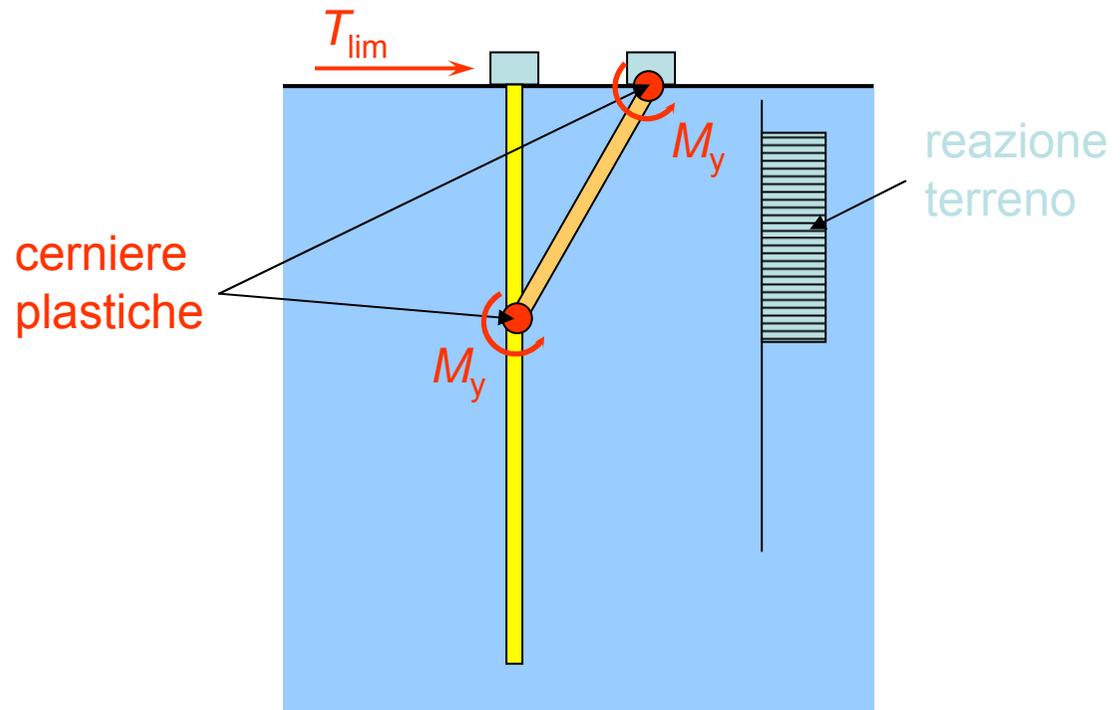


interazione inerziale - fondazioni profonde carico limite (GEO)



effetto di M :
incremento - decremento carico assiale

effetto di T :
meccanismo di collasso per carichi trasversali (Broms)

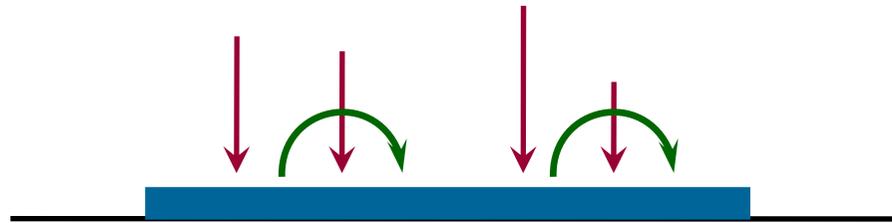


interazione inerziale

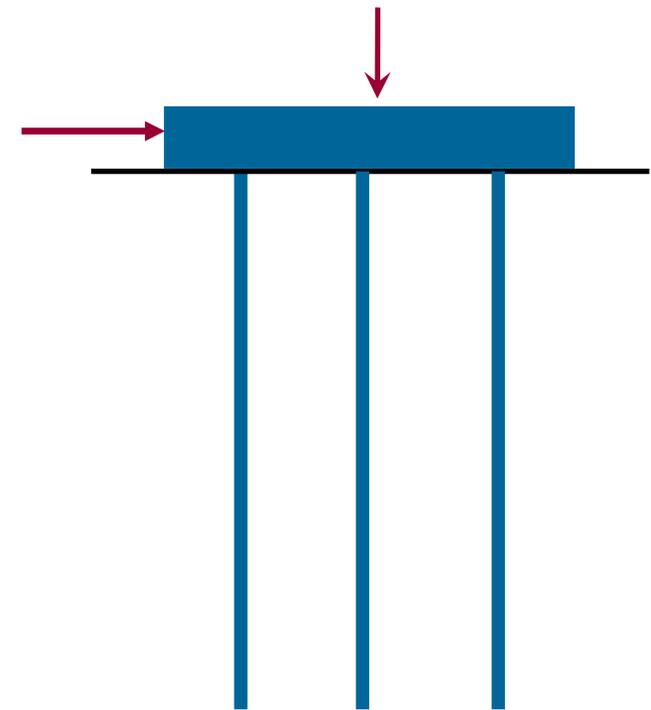
analisi strutturale (STR)

determinazione sollecitazioni negli elementi di fondazione

fondazioni superficiali



fondazioni profonde



terreno:

enfasi sulla **deformabilità**

es. Winkler, continuo elastico



interazione inerziale - azioni in fondazione - NTC

Combinazione fondamentale

$$\gamma_{G1} \times G_1 + \gamma_{G2} \times G_2 + \gamma_P \times P + \gamma_{Q1} \times 1 \times Q_{k1} + \gamma_{Q2} \times \psi_{02} \times Q_{k2} + \dots$$

Combinazione sismica

$$E + G_1 + G_2 + P + \psi_{21} \times Q_{k1} + \psi_{22} \times Q_{k2} + \dots$$

variano i coefficienti di combinazione

i coefficienti γ_G , γ_Q sono unitari, indipendentemente dall'approccio di verifica scelto

interazione inerziale - azioni in fondazione - NTC

Classi di Duttività (CD)

coefficiente di sovraresistenza

CD "A"

$$\gamma_{Rd} = 1.3$$

CD "B"

$$\gamma_{Rd} = 1.1$$

azioni in fondazione: valori minimi fra:

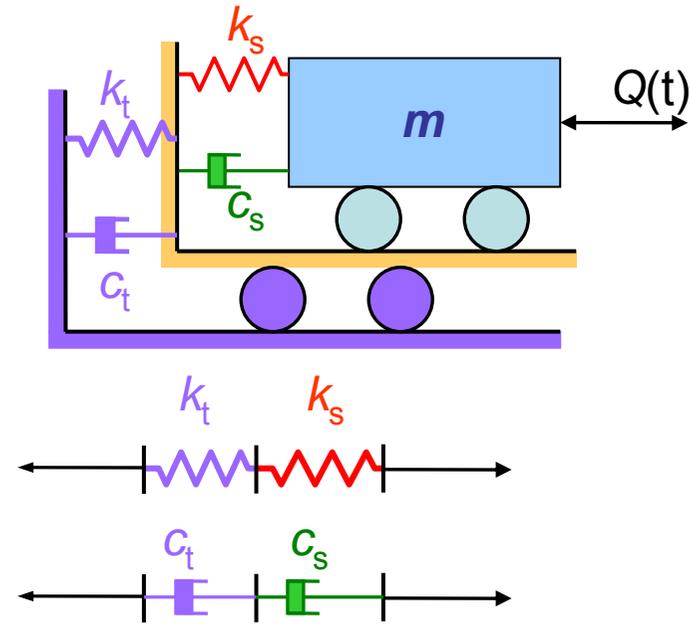
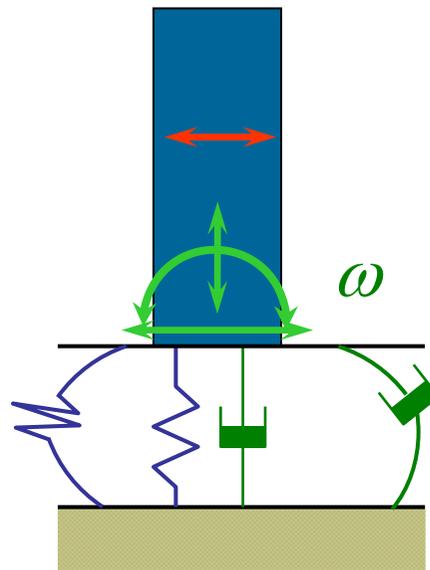
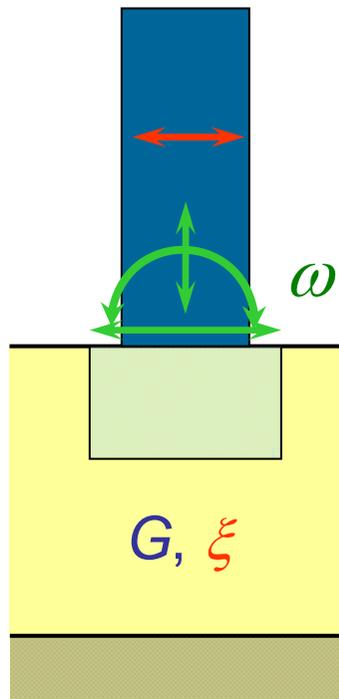
resistenze elementi strutturali sovrastanti

azioni trasmesse $\times \gamma_{Rd}$

azioni trasmesse in campo elastico $q = 1$



interazione inerziale - fondazioni superficiali analisi strutturale (STR)



$$\frac{1}{k_{eq}} = \frac{1}{k_t} + \frac{1}{k_s}$$

$$\xi_{eq} = \frac{c_{eq}}{2m\omega_{eq}}$$

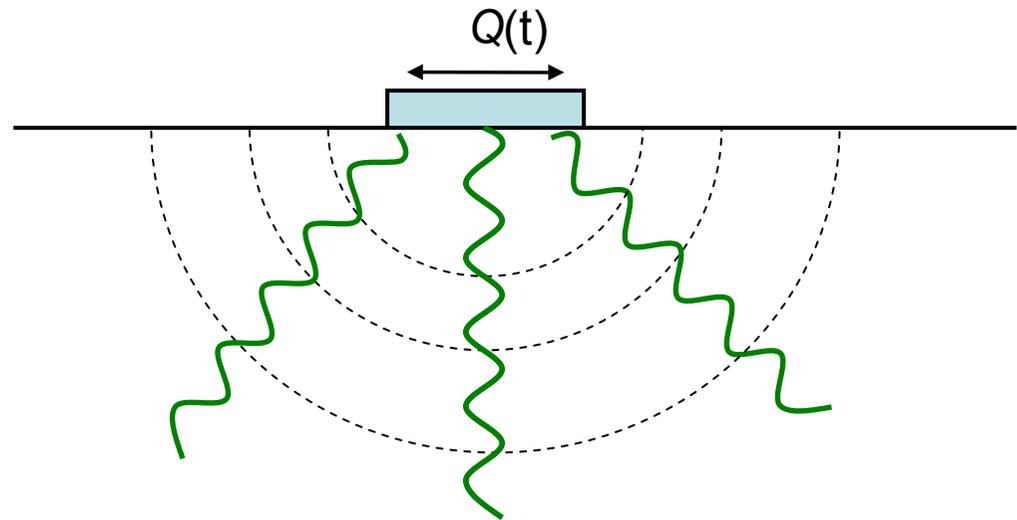
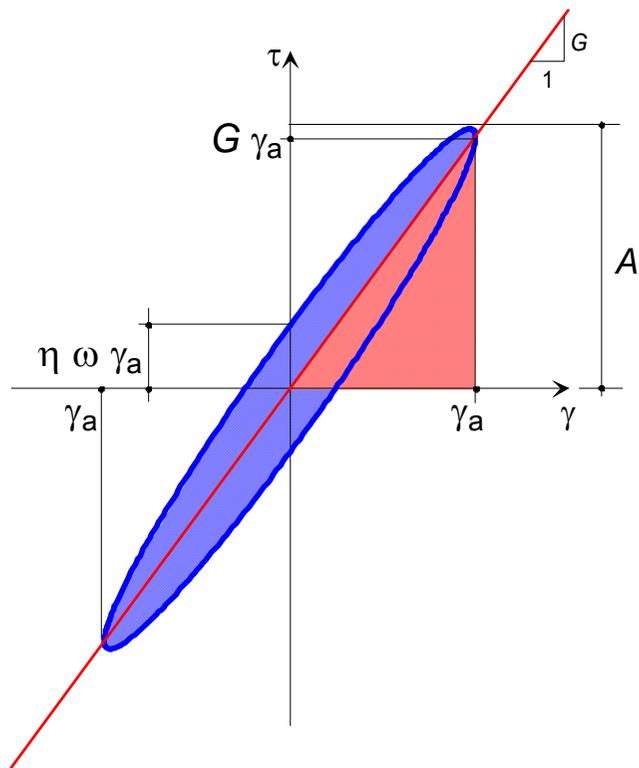
$$\frac{1}{\omega_{eq}^2} = \frac{1}{\omega_t^2} + \frac{1}{\omega_s^2}$$

riduzione pulsazione naturale

aumento smorzamento

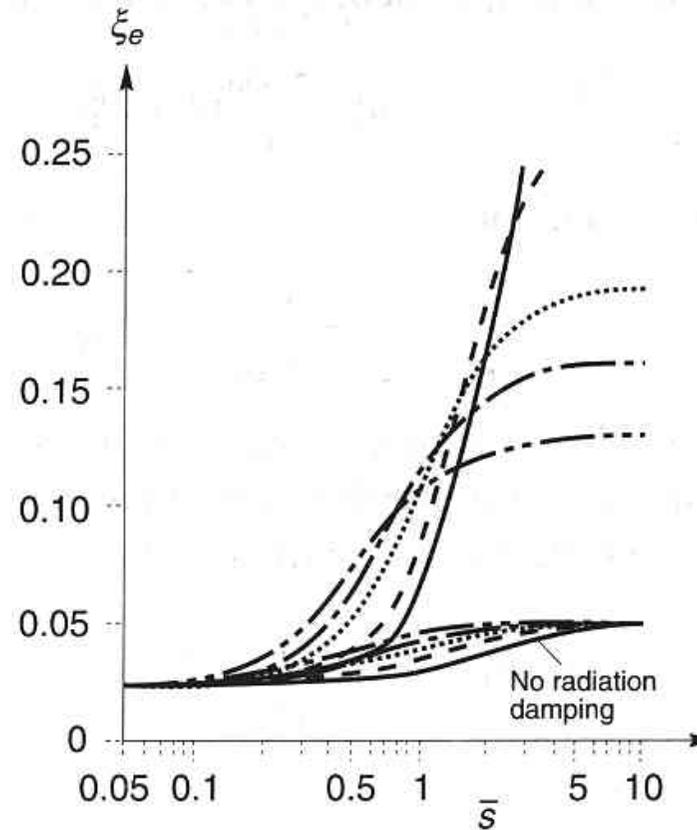
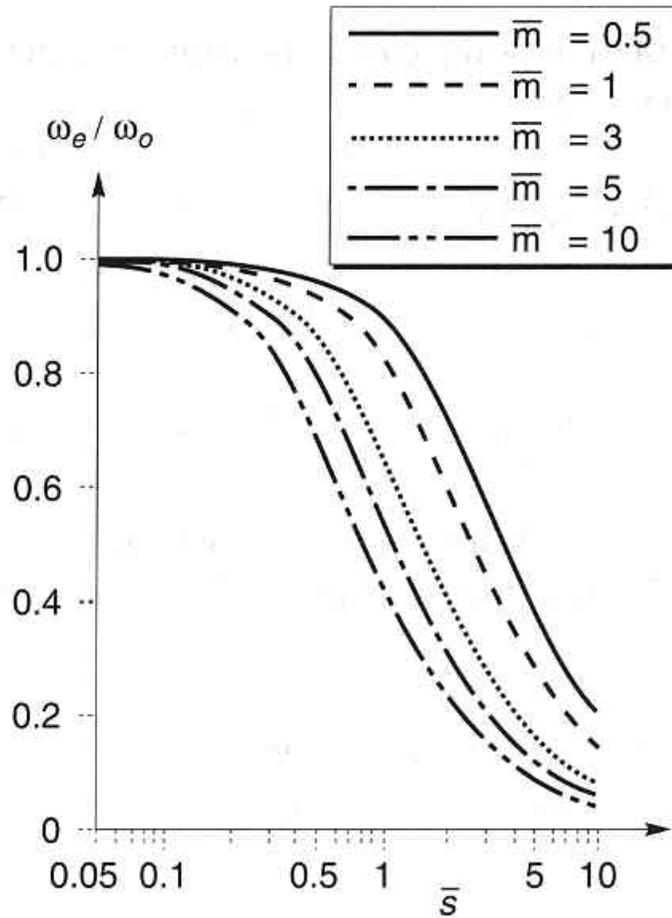
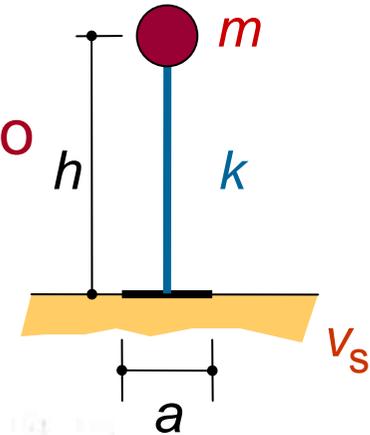
interazione con il terreno → due cause di smorzamento

- smorzamento isteretico, legato al comportamento meccanico del terreno (es. sviluppo di deformazioni plastiche)
- smorzamento geometrico: fronte d'onda di dimensioni crescenti



- sistema a un grado di libertà
- fondazione circolare rigida su semispazio elastico

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}$$



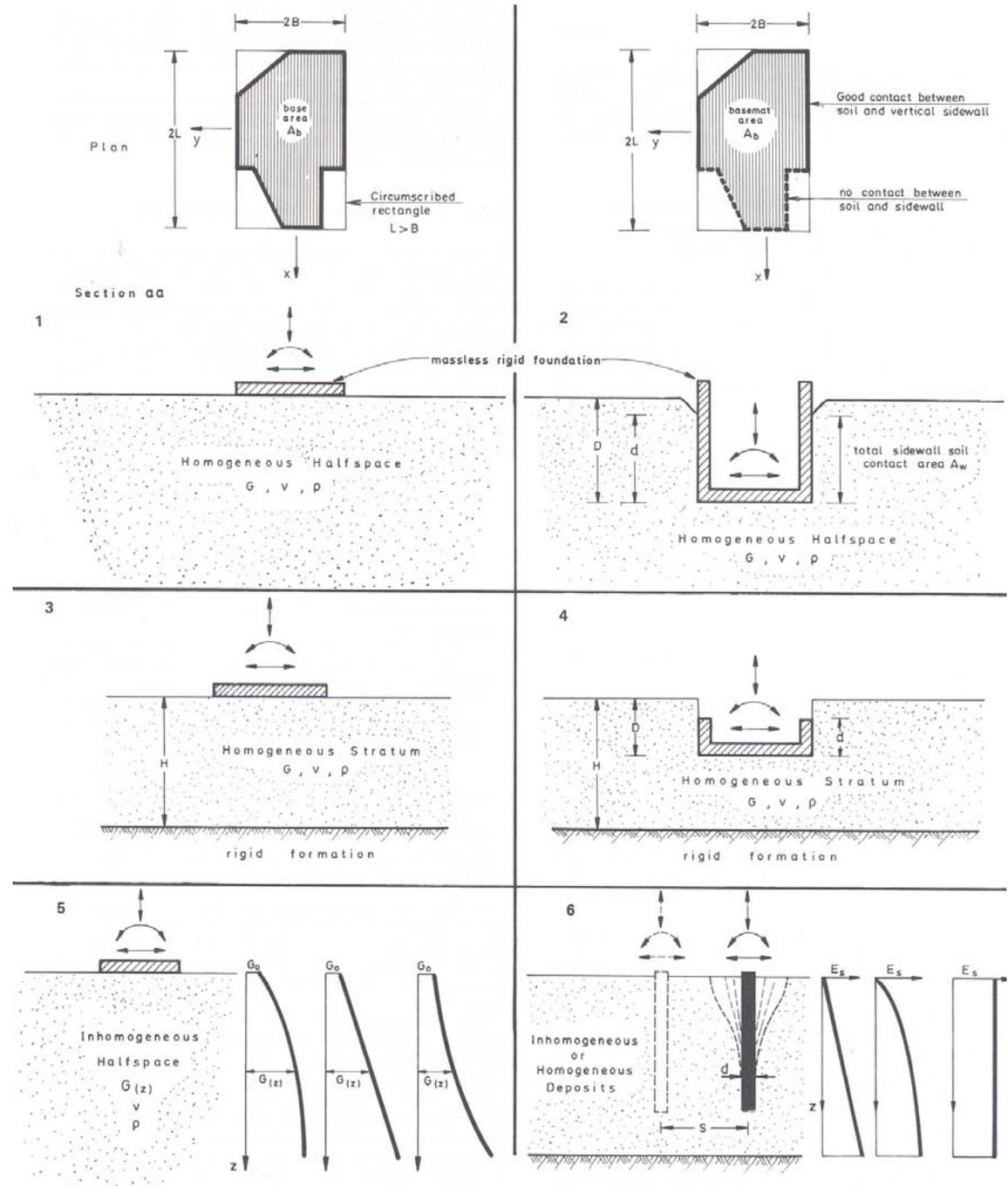
$$\bar{s} = \frac{\omega_0 \cdot h}{v_s}$$

$$\bar{m} = \frac{m}{\rho \cdot a^3}$$

Wolf (1985)

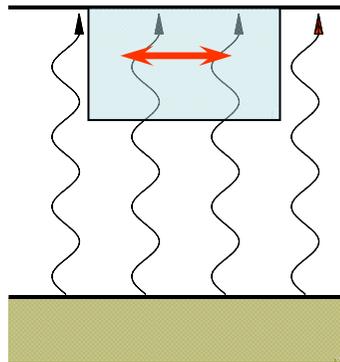
NTC: 7.2.6

- $V_s < 100$ m/s
- Strutture alte e snelle

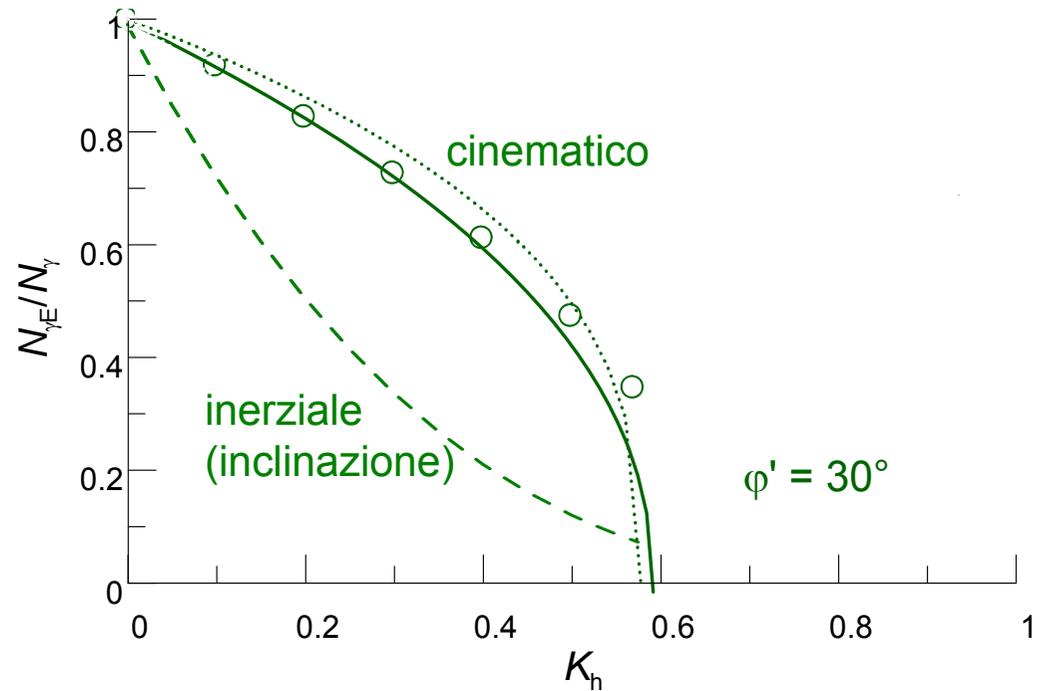
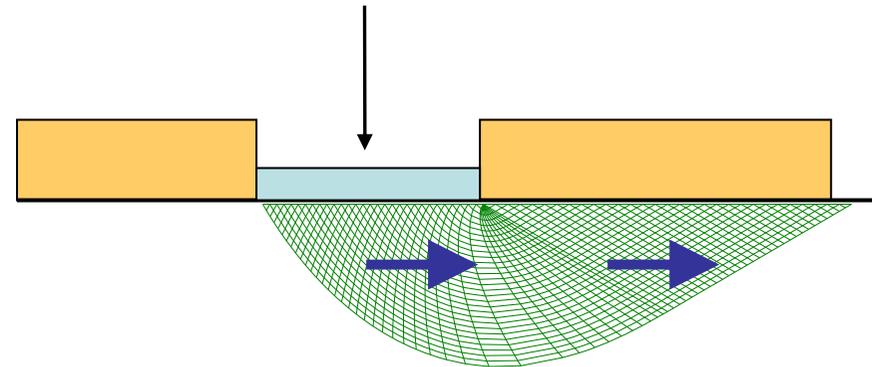


Gazetas (1990) *Foundation Vibrations*
in: *Foundation Engineering Handbook*
2nd edition - Fang ed.
Van Nostrand Reinhold, NY, cap 15

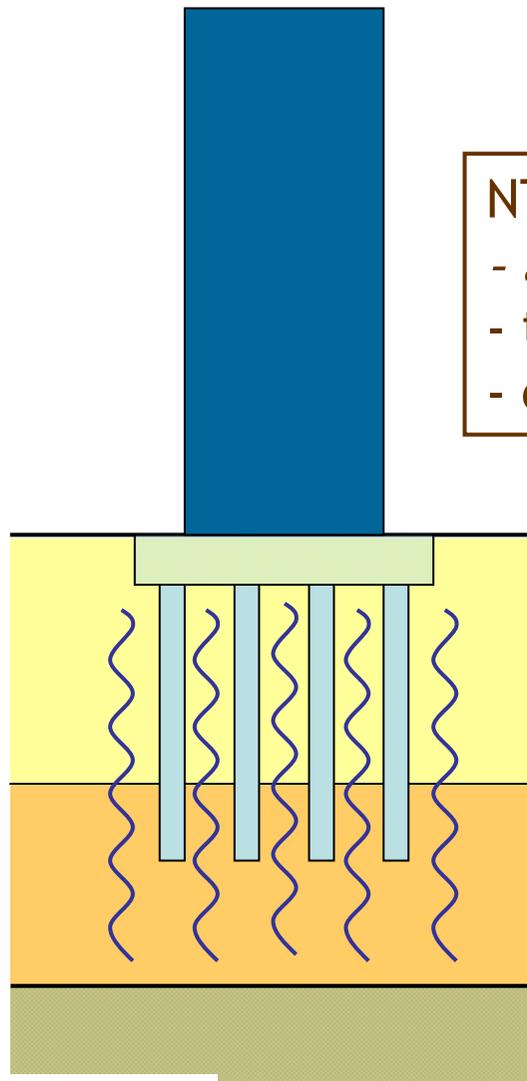
interazione cinematica - fondazioni superficiali riduzione del carico limite (GEO)



interazione
cinematica



interazione cinematica - fondazioni profonde sollecitazioni flettenti aggiuntive (STR)

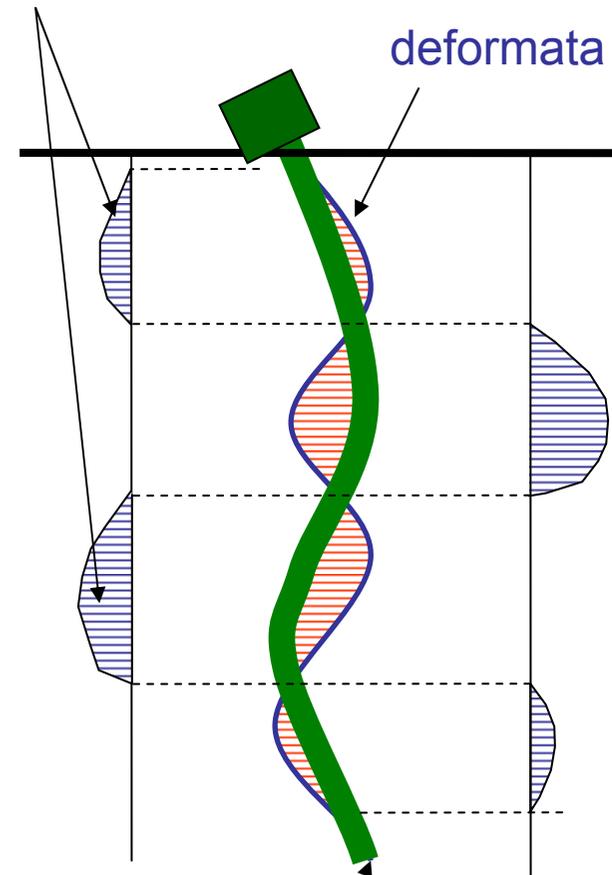


NTC:

- $a_g \geq 0.25 g$
- terreno tipo D
- contrasti rigidezza

pressioni sul palo

deformata terreno

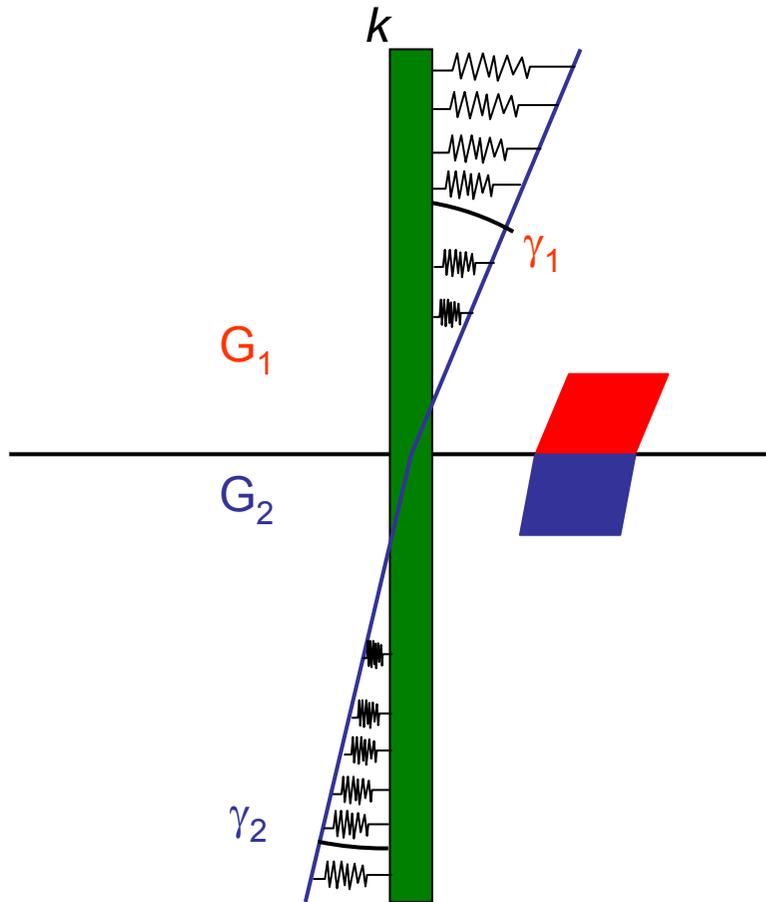


deformata palo



Dobry & O'Rourke (1983)
 metodo della costante di sottofondo (Winkler)

$$\lambda = \sqrt[4]{\frac{4EI}{k_1 D}}$$



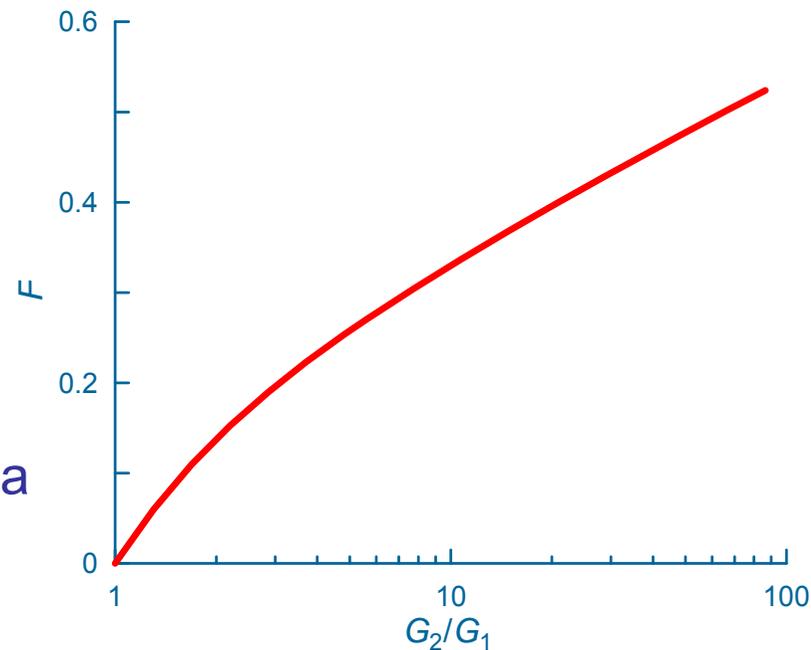
$$M = \frac{2EI}{\lambda} \gamma_1 \cdot F \left(\frac{G_2}{G_1} \right)$$

$$F = \frac{(1 - c^{-4})(1 + c^3)}{(1 + c)(c^{-1} + 1 + c + c^2)}$$

$$k = \frac{3G}{D}$$

$$G_1 \gamma_1 = G_2 \gamma_2 = \tau_{\max}$$

$$c = \sqrt[4]{\frac{G_2}{G_1}}$$



G e τ da analisi di risposta sismica
 o da valutazioni semplificate

$D = 0.8\text{ m}$
 $E = 30\text{ GPa}$
 $EI = 603\text{ MNm}^2$

$a_{\text{max}} = 0.3\text{ g}$
 $H = 20\text{ m}$
 $r_d = 0.7$

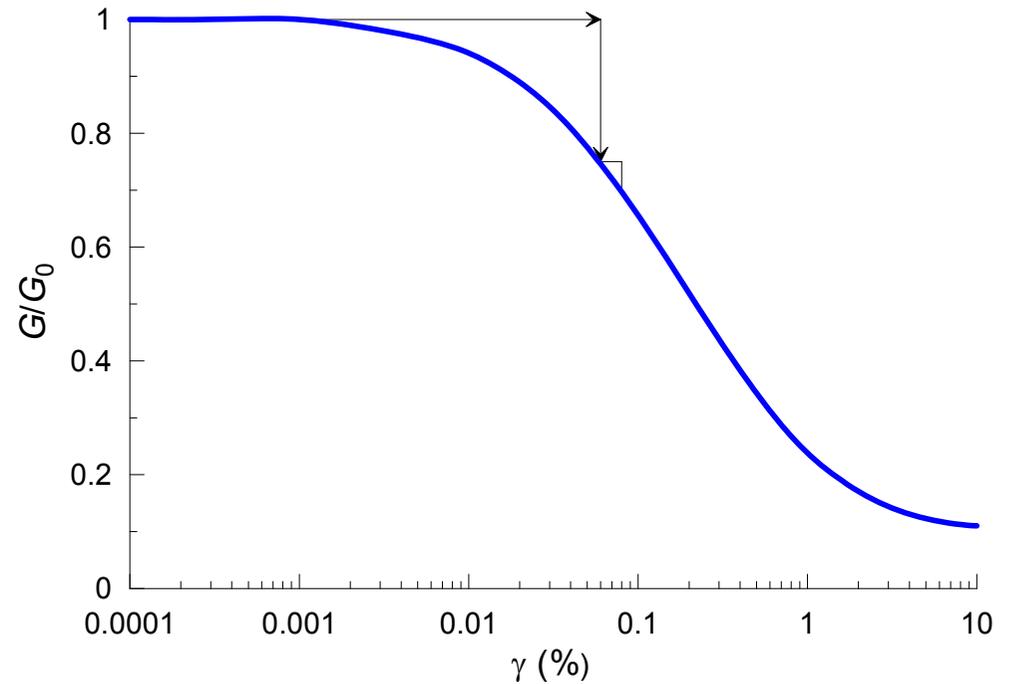
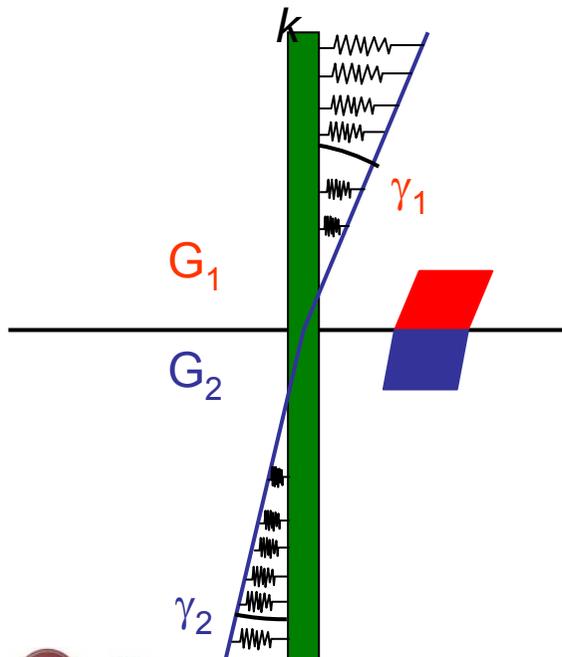
$\tau = 120\text{ kPa}$
 $G_{01} = 200\text{ MPa}$
 $G_1 = 0.7 G_{01} = 140\text{ MPa}$
 $\gamma_1 = 0.086\%$

$$\lambda = 4 \sqrt{\frac{4EI}{k_1 D}} = 1.55\text{ m}$$

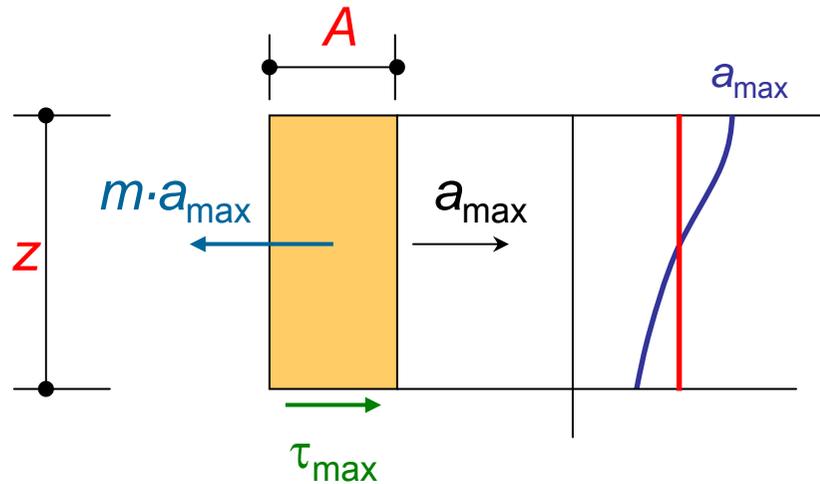
$$F \left(\frac{G_2}{G_1} \right) = 0.296$$

$G_2 = 1000\text{ MPa}$
 $\gamma_2 = 0.012\%$

$$M = \frac{2EI}{\lambda} \gamma_1 \cdot F = 198\text{ kNm}$$



valutazione semplificata

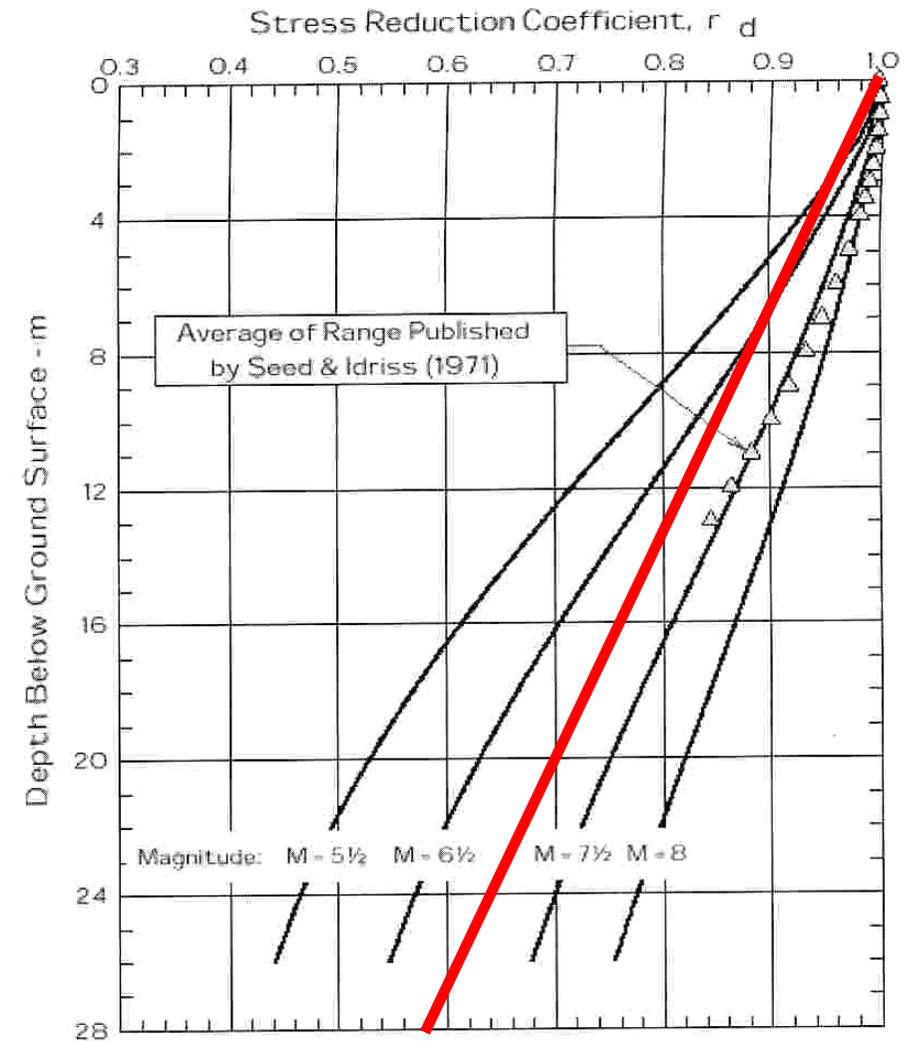


$$\tau_{\max} A = m \cdot a_{\max}$$

$$\tau_{\max} = \frac{m \cdot a_{\max}}{A} = \rho \cdot A \cdot z \frac{a_{\max}}{A} = \frac{\gamma}{g} \cdot z \cdot a_{\max}$$

$$\tau_{\max} = \sigma_v \frac{a_{\max}}{g} \cdot r_d$$

$$r_d = 1 - 0.015 z$$



Idriss e Golesorkhi (1997)

fondazioni: criteri costruttivi

- tipologia unica
- elevata rigidezza orizzontale
- no plasticizzazioni
- armatura pali estesa a tutta la lunghezza $A_{a-min} = 0.3 \%$
- evitare pali inclinati
- evitare cerniere plastiche nei pali

