

Verifiche pseudostatiche

- **Coefficiente sismico dovrebbe essere funzione di:**
 - Tipo di opera
 - Spostamenti accettabili
 - Duttilità
 - Rigidezza

Normativa previgente

- Forse calibrata su certe opere
- Inadeguata su altre
- Comunque, da verificare
- Da calibrare sulle prestazioni attese

RECENTI SVILUPPI NELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE IN ZONA SISMICA

- **Stati limite ↔ probabilità di superamento, periodo di ritorno**
- **Diverse prestazioni richieste, in funzione di:**
 - stato limite studiato
 - importanza dell'opera

ad esempio:

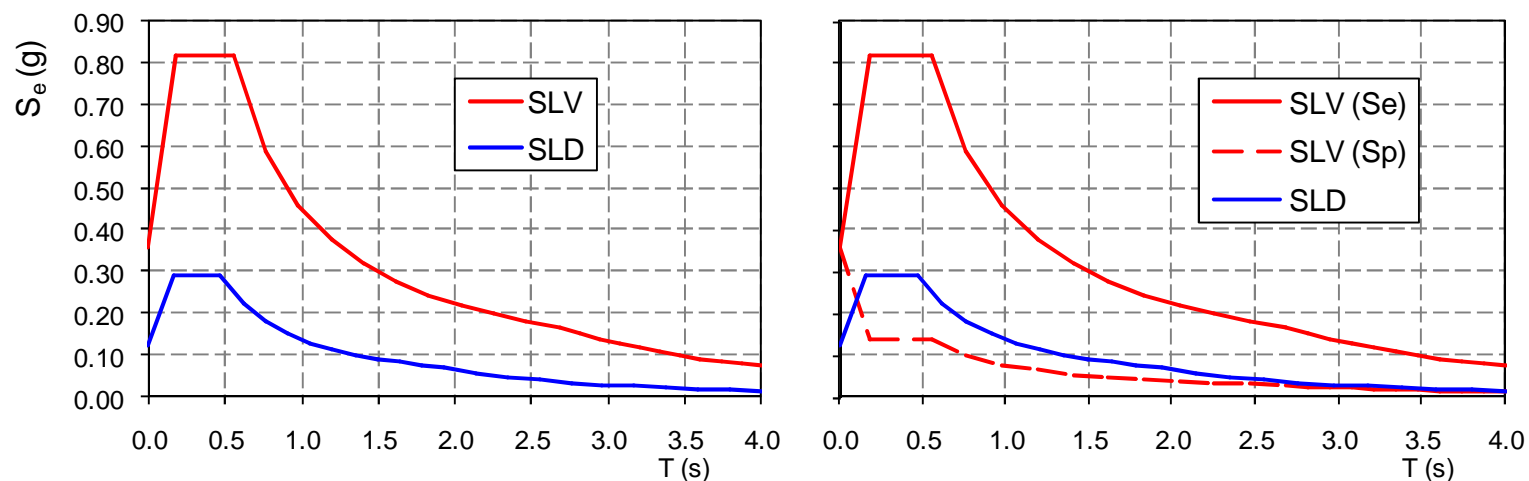
- I. **eventi sismici frequenti** → struttura in campo elastico
- II. **eventi sismici rari e opere "ordinarie"** → attivazione di meccanismi duttili – collasso distante

RECENTI SVILUPPI NELLA PROGETTAZIONE STRUTTURALE IN
ZONA SISMICA

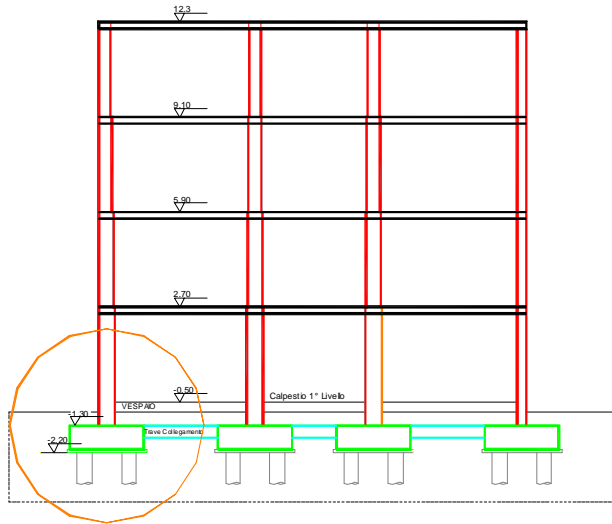
METODI DI ANALISI PER IL TERREMOTO RARO

Diversi approcci:

- a) analisi modale con spettri di progetto (fattore q)
- b) analisi non lineare con spettri di risposta
- c) analisi non lineare dinamica al passo



ANALISI MODALE CON SPETTRO DI PROGETTO (fattore q)



funzione di TIPOLOGIA STRUTTURALE,
REGOLARITÀ in ELEVAZIONE e NUMERO di
PIANI

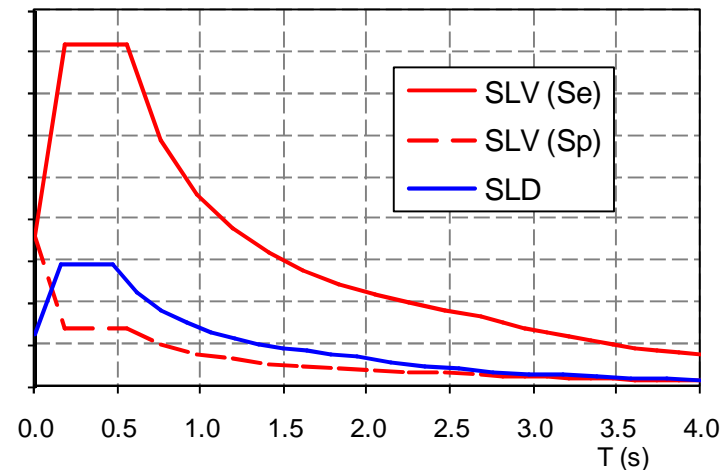
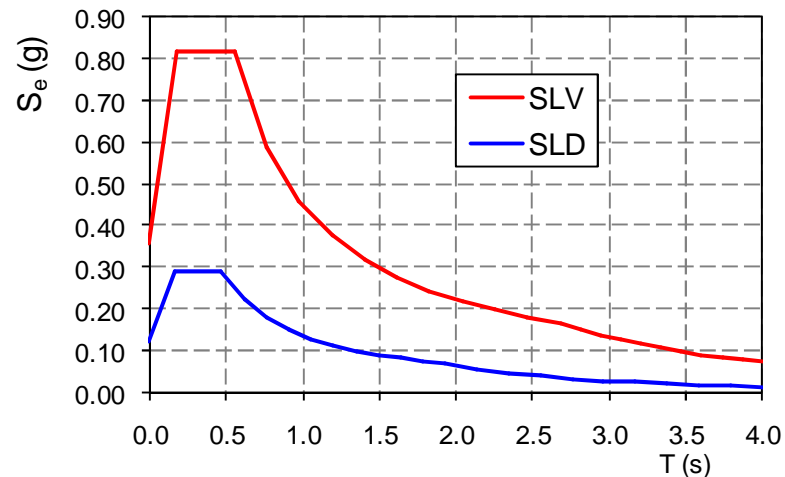
$$q = q_0 \cdot K_R$$

$$q_0 = a_U / a_1 \quad (\text{DUTTILITÀ ATTESA})$$

a_U = intensità azione sismica per la quale la
struttura diviene labile

a_1 = intensità azione sismica per la quale si forma la
prima cerniera plastica

$K_R (\leq 1)$ dipende dalla regolarità in altezza



GERARCHIA DELLE RESISTENZE

In caso di rotture alternative, preferire quella duttile

COME?

Innalzando la soglia di resistenza della rottura fragile

Ad esempio:

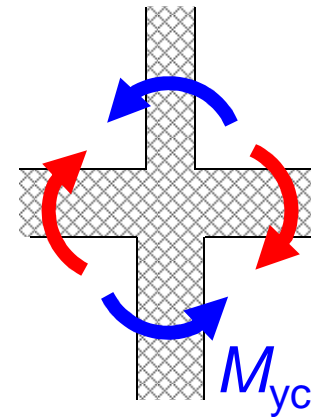
1. Utilizzare materiali con specifici requisiti di duttilità
2. Progettare le sezioni in modo da avere una rottura di tipo duttile
3. Favorire la duttilità locale curando i dettagli costruttivi
4. Ottenere un meccanismo globale di crisi con elevata capacità dissipativa

GERARCHIA DELLE RESISTENZE

Esempio: evitare trave
forte/pilastro debole



Kocaeli (1999)



$$\sum |M_{yc}| \geq \gamma_{rd} \cdot \sum |M_{yb}|$$

γ_{rd} = coefficiente di sovraresistenza →
→ Per inibire il meccanismo più fragile

APPROCCIO PRESTAZIONALE

Metodologia avanzata, che prevede la definizione dei terremoti attesi e dei corrispondenti di danno

Danno strutturale : misura del costo necessario per ripristinare l'integrità strutturale

Danno alla funzionalità: misura dei costo dovuti a interruzioni d'uso, limitazioni della funzionalità, danneggiamenti dei caratteri estetici

APPROCCIO PRESTAZIONALE

Gradi di prestazione - PIANC (2001)

Performance grade	Design earthquake L1	Design earthquake L2
S	Serviceable (deg. I)	Serviceable (deg. I)
A	Serviceable (deg. I)	Repairable (deg. II)
B	Serviceable (deg. I)	Near Collapse (deg. III)
C	Repairable (deg. II)	Collapse (deg. IV)

APPROCCIO PRESTAZIONALE

Gradi di danno (definizione) - AGI (2005)

Grado di danno		Danno strutturale	Danno funzionale
I	Danno lieve e sistema agibile	Assente o trascurabile	Perdita della funzionalità modesta o nulla
II	Danno medio e sistema riparabile	Apprezzabile	Perdita della funzionalità di breve durata
III	Danno ingente e non riparabile ma senza collasso	Ingente, ma senza collasso	Perdita della funzionalità di lunga durata, o totale

APPROCCIO PRESTAZIONALE

Gradi di prestazione - NTC (2008)

STATO LIMITE	<i>Livello di danno</i>	<i>Livello di terremoto</i> P_{VR} (%)
SLO	LA COSTRUZIONE NEL SUO COMPLESSO, INCLUSI IMPIANTI E MACCHINARI, NON SUBISCE DANNI	81
SLD	PUR CON INTERRUZIONI D'USO DELLE APPARECCHIATURE, LA COSTRUZIONE E' UTILIZZABILE. LIMITATA RIDUZIONE DELLA RESISTENZA ALLE AZIONI ORIZZONTALI	63
SLV	ROTTURE E CROLLI DI PARTI NON STRUTTURALI E IMPIANTI. MARGINE DI RESISTENZA PER AZIONI ORIZZONTALI	10
SLC	ROTTURE E CROLLI DI PARTI NON STRUTTURALI E IMPIANIT. MARGINE 'ESIGUO' DI RESISTENZA PER AZIONI ORIZZONTALI	5

P_{VR} probabilità di superamento nel periodo di riferimento V_R

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

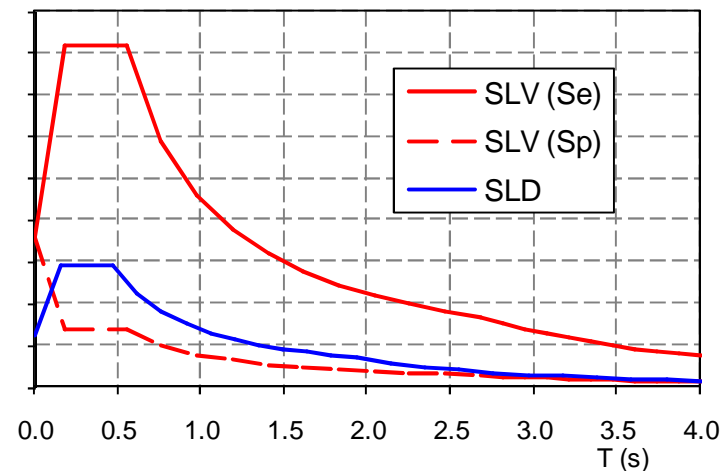
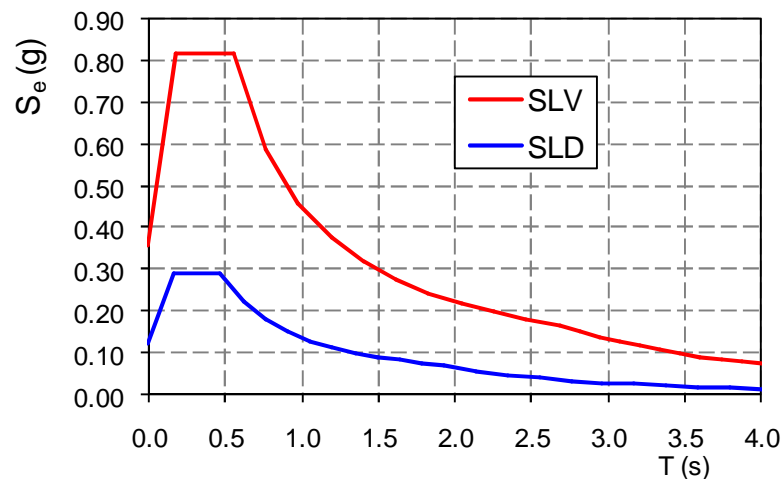
FONDAZIONI

Azioni di progetto in fondazione

METODI DI ANALISI PER IL TERREMOTO RARO

Diversi approcci:

- analisi modale con spettri di progetto (fattore q)
- analisi non lineare con spettri di risposta
- analisi non lineare dinamica al passo



VALUTAZIONE DELLE AZIONI IN FONDAZIONE

PRESCRIZIONE DELLE NTC

In ottica di gerarchia delle resistenze, le verifiche di sicurezza del complesso fondazione-terreno dovrebbero essere eseguite assumendo come azioni le resistenze degli elementi soprastanti.

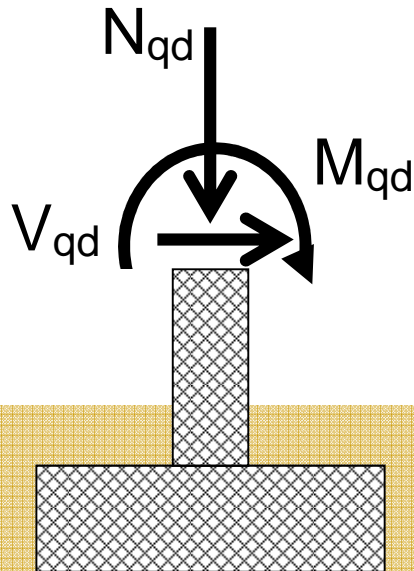
In effetti, le NTC richiedono di associare lo sforzo normale di calcolo al minore di:

1. Resistenza di progetto dell'elemento soprastante
2. Azione derivante dal calcolo, amplificata per un coefficiente che dipende dalla classe di duttilità (1.1 in CD'B' e 1.3 in CD'A')

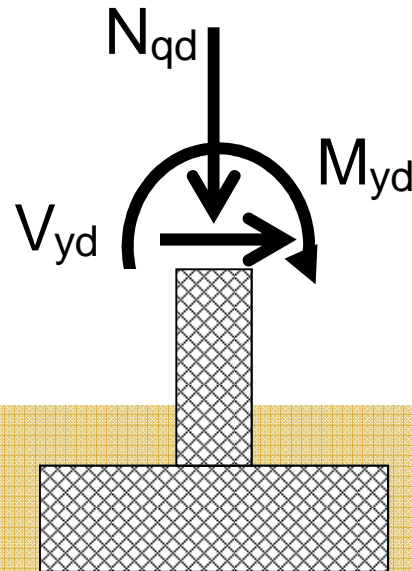
VALUTAZIONE DELLE AZIONI IN FONDAZIONE

SECONDO NTC

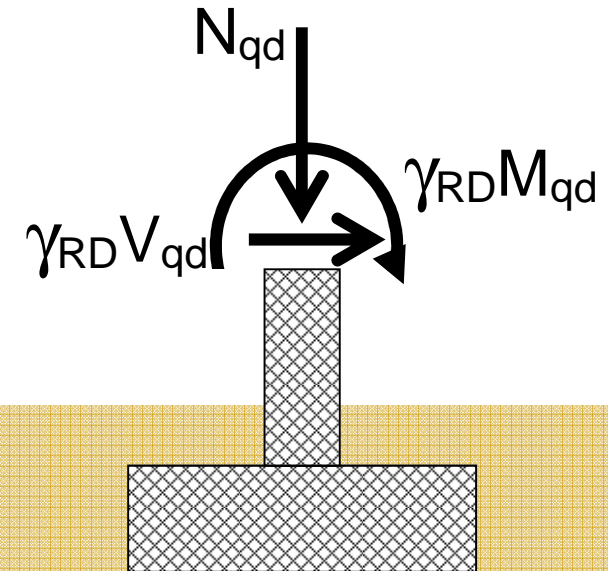
Sollecitazioni da calcolo (con q)



Resistenze di progetto



Sollecitazioni di calcolo amplificate



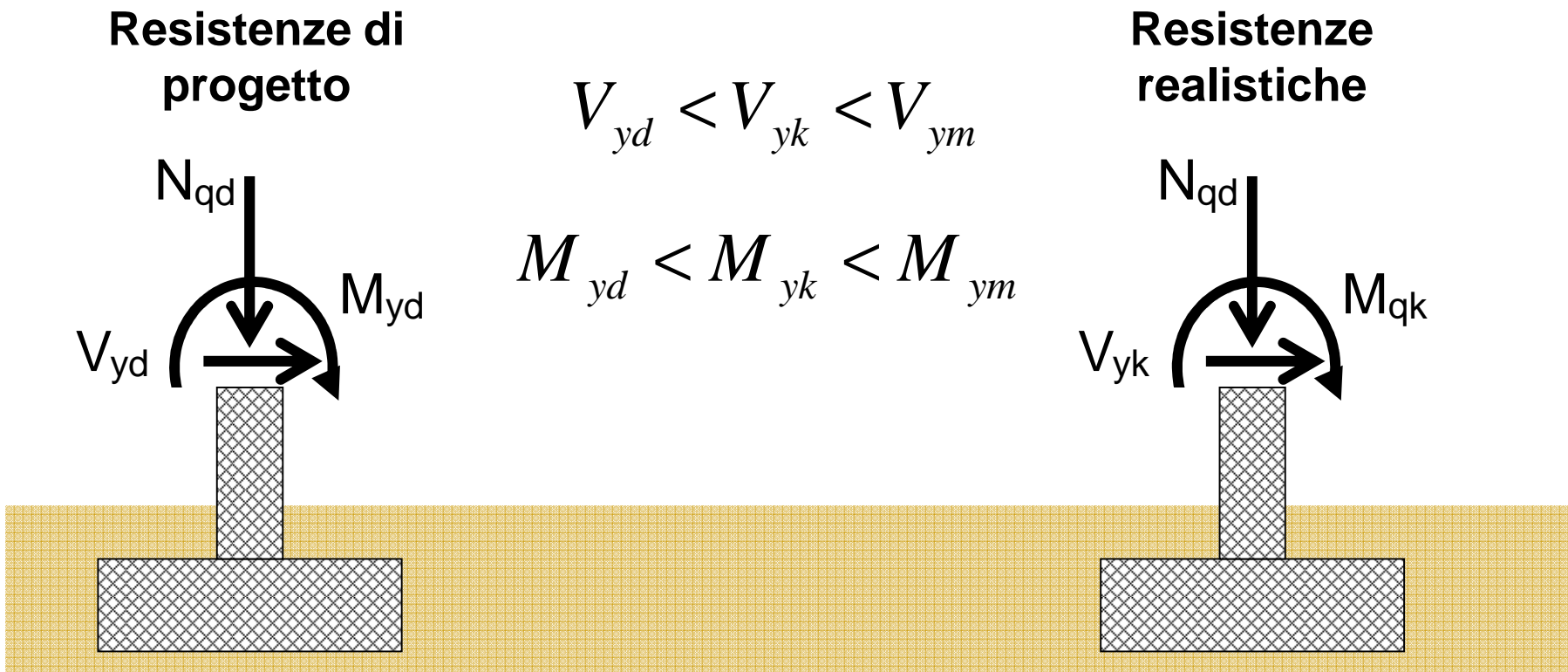
$$M_d = \text{Min} [M_{yd} ; \gamma_{RD} \cdot M_{qd}]$$

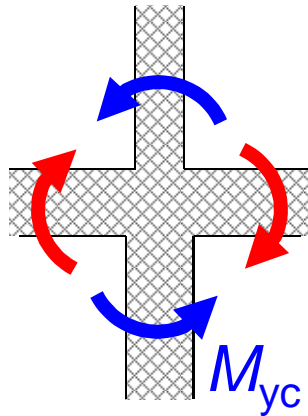
$$V_d = \text{Min} [V_{yd} ; \gamma_{RD} \cdot V_{qd}]$$

**ALCUNE DOMANDE SULLA VALUTAZIONE DELLE AZIONI
IN FONDAZIONE**

Prima domanda

Perché si sollecita la fondazione con le resistenze di progetto (ridotte) e non con valori più realistici (caratteristici o medi)?



E in ambito strutturale ?

$$\sum |M_{ycd}| \geq \gamma_{RD} \cdot \sum |M_{ybd}|$$

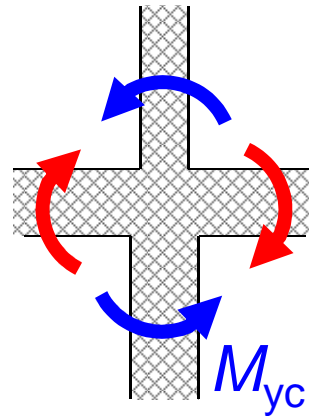
$$\sum \left| \frac{M_{yck}}{\gamma_M} \right| \geq \gamma_{RD} \cdot \sum \left| \frac{M_{ybk}}{\gamma_M} \right|$$

$$\sum |M_{yck}| \geq \gamma_{RD} \cdot \sum |M_{ybk}|$$

In strutture in acciaio i coefficienti parziali su azioni e resistenze si elidono

L'unico coefficiente di sicurezza è γ_{RD}

E per altre situazioni ?



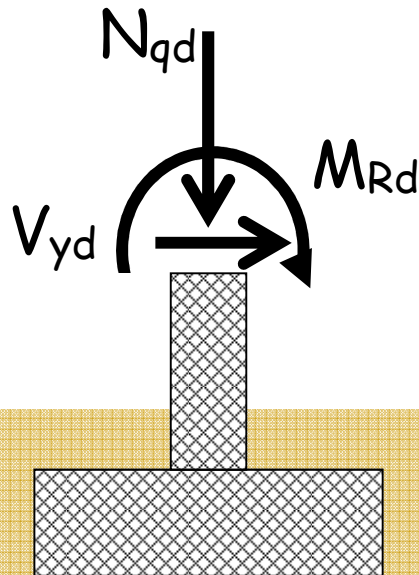
In strutture in c.a. non è detto che sia così ($\gamma_s \neq \gamma_c$)

E per strutture “miste” (travi in acciaio e pilastri in c.a.) ?

E per le fondazioni?

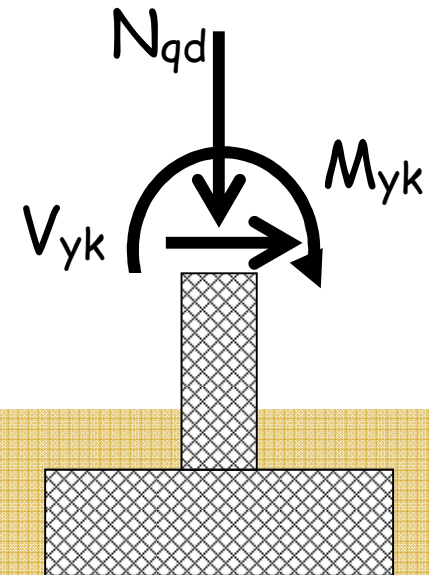
Fondazioni

Resistenze di progetto



Relazione fortemente non lineare per carico limite

Resistenze realistiche



≠

$$\varphi'_d = \arctg\left(\frac{tg(\varphi'_k)}{\gamma_\varphi}\right)$$

$$\varphi'_k$$

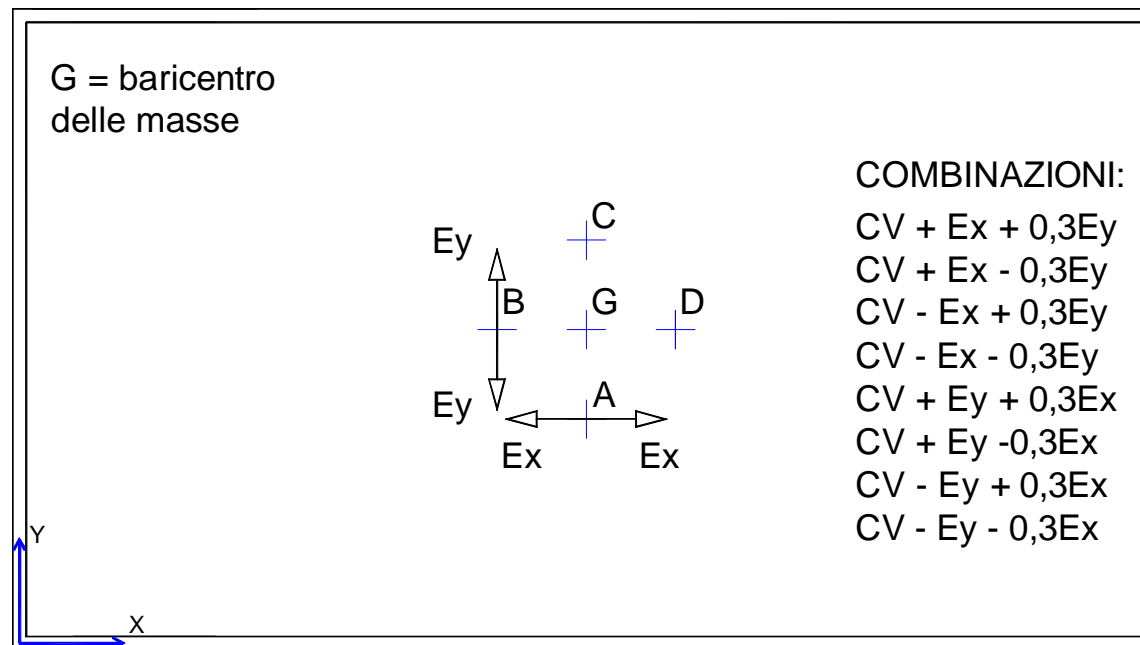
**FORSE, NELLE VERIFICHE SISMICHE CONVERREBBE UTILIZZARE
I VALORI “REALI” E NON QUELLI DI PROGETTO**

**NON APPLICARE I COEFFICIENTI PARZIALI DI SICUREZZA
(solo i coefficienti di sovraresistenza)**

IN FONDO SI VALUTA UN COMPORTAMENTO (*Performance*)

Seconda domanda

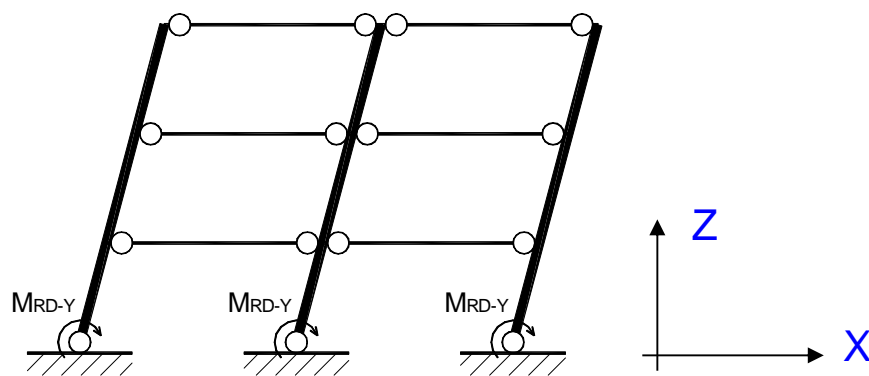
Nel caso di combinazione con azione sismica prevalente lungo x si modificano le caratteristiche della sollecitazione che agiscono nel piano x-z o anche quelle nel piano y-z?



Seconda domanda

Nel caso di combinazione con azione sismica prevalente lungo x si modificano le caratteristiche della sollecitazione che agiscono nel piano x-z o anche quelle nel piano y-z?

Volendo considerare la modalità di collasso lungo x



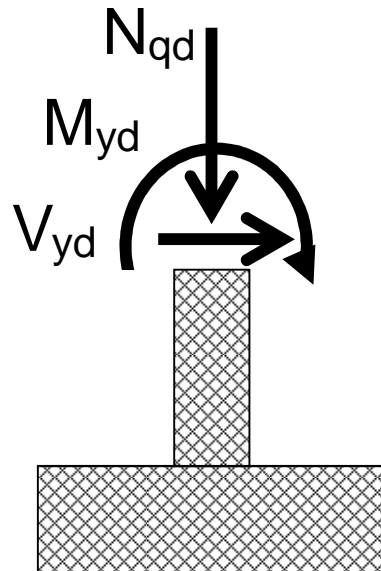
sembrerebbe opportuno modificare solo le caratteristiche della sollecitazione associate alla direzione sismica prevalente

$$M_{yd,Y} \text{ e } V_{yd,X}$$

Terza domanda

Per quale motivo si sceglie la minima tra resistenza della sezione e sollecitazione di calcolo amplificata per un coefficiente γ_{RD} ?

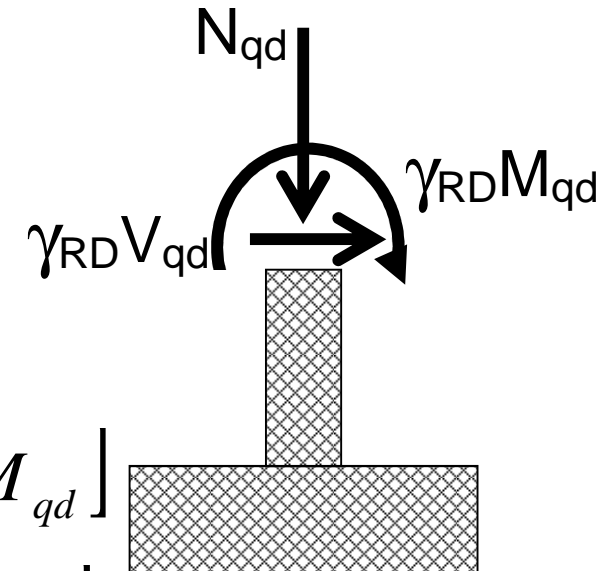
Resistenze di progetto



$$M_d = \text{Min}[M_{yd}; \gamma_{RD} \cdot M_{qd}]$$

$$V_d = \text{Min}[V_{yd}; \gamma_{RD} \cdot V_{qd}]$$

Sollecitazioni di calcolo amplificate



Terza domanda

Per quale motivo si sceglie la minima tra resistenza della sezione e sollecitazione di calcolo amplificata per un coefficiente γ_{RD} ?

Ovviamente per non sovradimensionare le fondazioni di strutture con elevati momenti resistenti plastici

Terza domanda

Cosa comporta ?

SE PER TUTTI GLI ELEMENTI VERTICALI

$$M_{yd} < \gamma_{RD} \cdot M_{qd}$$

SI APPLICANO I MOMENTI RESISTENTI



IL COLLASSO PER CARICO LIMITE PUO' COESISTERE CON LA CRISI
GLOBALE DELLA STRUTTURA



LA FONDAZIONE E' EQUIPARATA ALLA STRUTTURA

Terza domanda

Cosa comporta ?

SE PER TUTTI GLI ELEMENTI VERTICALI

$$M_{yd} > \gamma_{RD} \cdot M_{qd}$$

SI APPLICANO I MOMENTI DI CALCOLO AMPLIFICATI

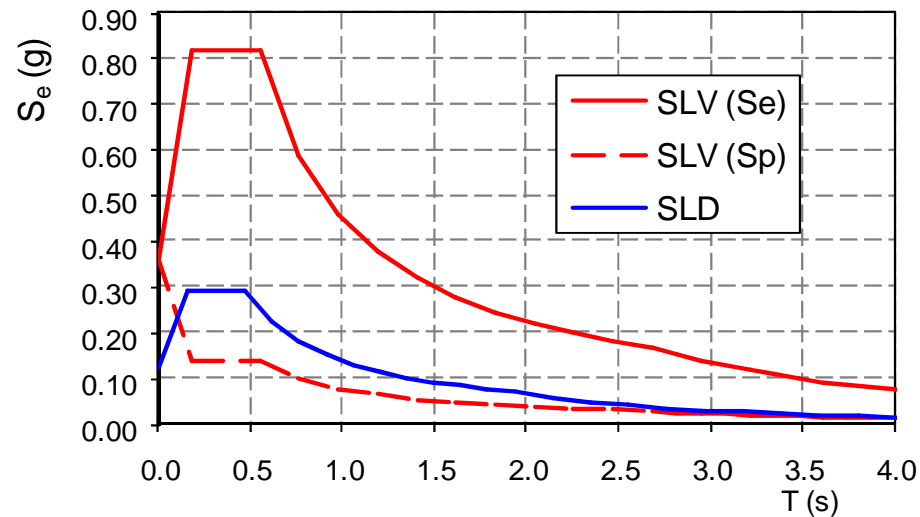


IL COLLASSO PER CARICO LIMITE POTREBBE AVVENIRE PRIMA
DELLA CRISI GLOBALE DELLA STRUTTURA



**LA FONDAZIONE E' GERARCHICAMENTE INFERIORE ALLA
STRUTTURA**

Quarta domanda

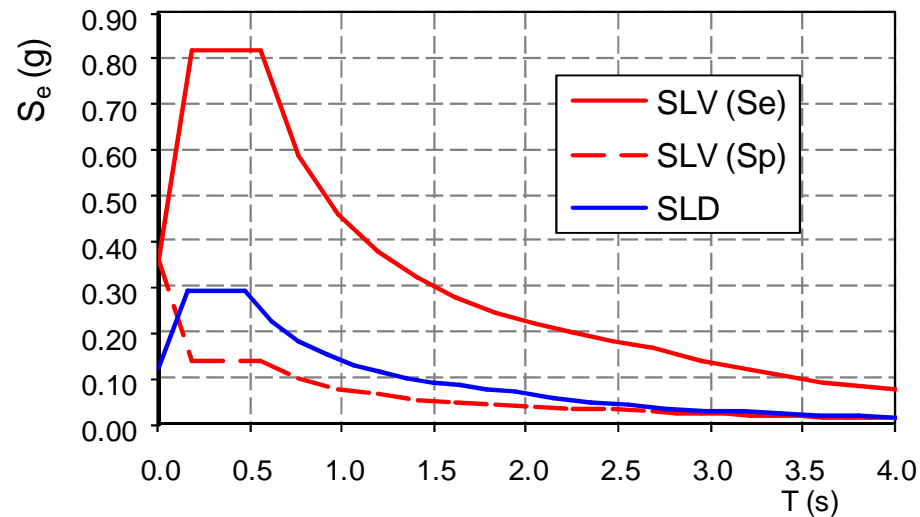


Lo SLD può produrre sollecitazioni di progetto in fondazione maggiori di quelle relative allo SLV.

Che significa e che si deve fare?

Per effetto di plasticizzazione negli elementi strutturali, i carichi da SLD non dovrebbero essere applicati in fondazione

Quarta domanda



Lo SLD può produrre sollecitazioni di progetto in fondazione maggiori di quelle relative allo SLV.

Che significa e che si deve fare?

Per effetto di plasticizzazione negli elementi strutturali, i carichi da SLD non dovrebbero essere applicati in fondazione

VALUTAZIONE DELLE AZIONI IN FONDAZIONE

Modifiche proposte

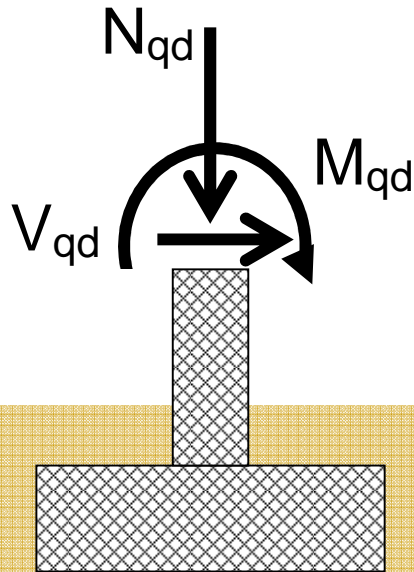
Si applica più correttamente la gerarchia delle resistenze, richiedendo di associare allo sforzo normale di calcolo la minore di:

1. Momento resistente di progetto amplificato per un coefficiente che dipende dalla classe di duttilità (1.0 in CD'B e 1.3 in CD'A), con il taglio in equilibrio
2. Momento derivante dal calcolo con $q = 1$ con taglio di calcolo ($q=1$)

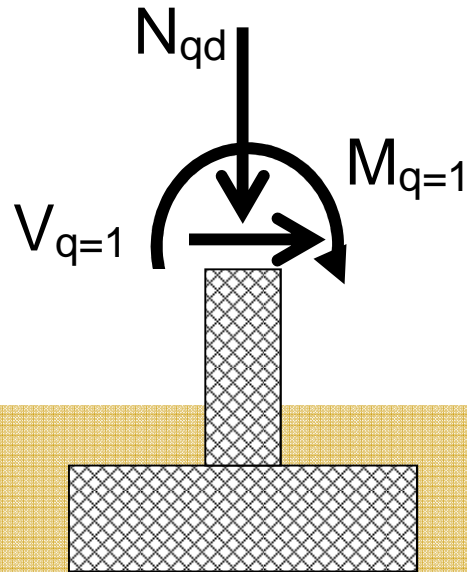
VALUTAZIONE DELLE AZIONI IN FONDAZIONE

SECONDO MODIFICA PROPOSTA

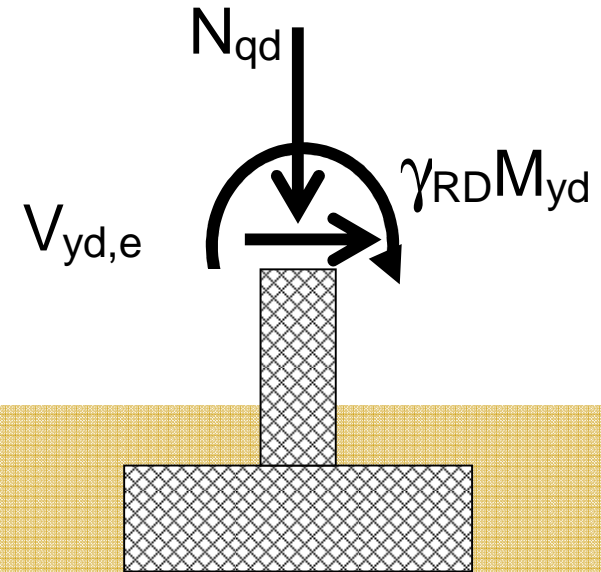
Sollecitazioni da calcolo (con q)



Resistenze di progetto



Sollecitazioni di calcolo amplificate



$$M_d = \text{Min} \left[M_{d(q=1)} ; \gamma_{RD} \cdot M_{yd} \right]$$

Azioni in fondazione maggiorate

FONDAZIONI SUPERFICIALI

Effetto cinematico nella valutazione del carico di collasso

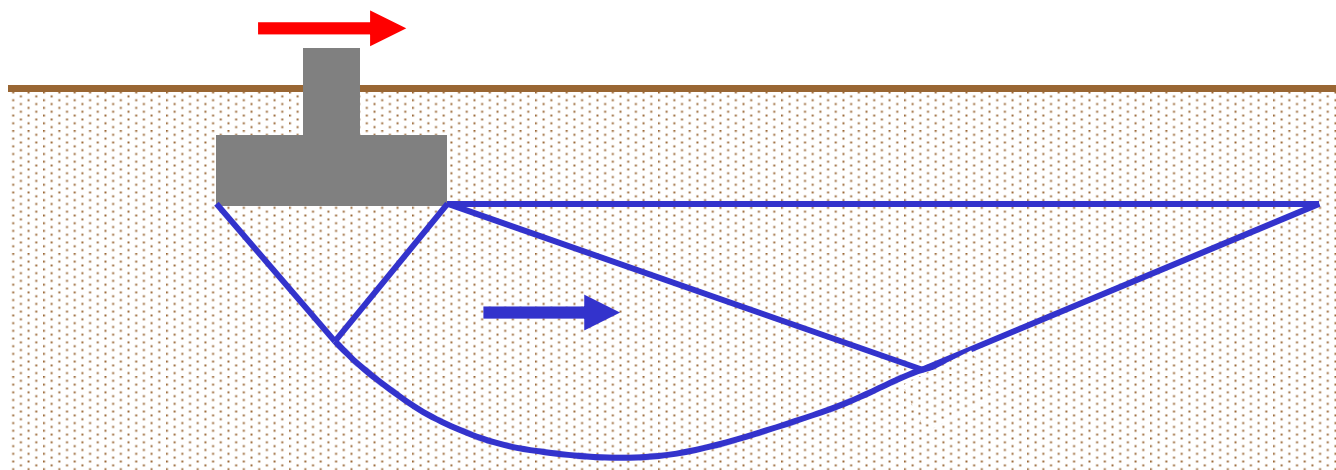
Generalmente si trascurano le azioni di inerzia sul volume di terreno potenzialmente interessato dalla rottura per carico limite

oppure metodi di:

- Richards, Elms e Budhu (1993)
- Maugeri e Novità (2004)
- metodo di Eurocodice 8-5

non obbligatori, ma utilizzabili

(escluso da Appendici Nazionali)



EFFETTO CINEMATICO NELLA VALUTAZIONE DEL CARICO DI COLLASSO

- Necessario definire un k_h analogamente a quanto fatto per altre opere e situazioni (muri, paratie, pendii)
- Contemporaneità con azioni inerziali da sovrastruttura
- Significato di accoppiamento con azioni convenzionali da sovrastruttura

- Solo DA2
- Coefficienti ridotti rispetto al caso statico
- Per fondazioni superficiali, coefficiente parziale di sicurezza a carico limite minore se si considera esplicitamente l'effetto delle azioni inerziali su volume sottostante la fondazione
- Coefficiente di sicurezza maggiore se non si considera esplicitamente tale effetto

FONDAZIONI SU PALI

PRESCRIZIONE DELLE NTC

- Evitare la formazione di cerniere plastiche nei pali
- Nelle verifiche strutturali SLU, includere anche gli effetti di interazione cinematica per:
 1. Zone di elevata sismicità ($a_g > 0.25 g$)
 2. Classe d'uso III e IV
 3. Sottosuolo di Classe D o peggiori
 4. Forti contrasti di rigidezza

Modifiche proposte:

- Accettata formazione di cerniere plastiche nei pali
- Solo DA2
- Probabilmente ridotti coefficienti parziali per verifiche sismiche

MURI DI SOSTEGNO

VERIFICHE SLU DI MURI DI SOSTEGNO – Prescrizioni NTC

Possono essere condotte con:

- **Metodo degli spostamenti**
- **Metodo pseudostatico**
 - Possibili i due Approcci progettuali
 - Coefficienti parziali solo su parametri di resistenza
 - Coefficienti pseudostatici

$$k_h = \beta_m \frac{a_g}{g}$$

	Categoria di sottosuolo	
	A	B,C,D,E
	β_m	β_m
$0.2 < a_g(g) \leq 0.4$	0.31	0.31
$0.1 < a_g(g) \leq 0.2$	0.29	0.24
$a_g(g) \leq 0.1$	0.20	0.18

VERIFICHE SLU DI MURI DI SOSTEGNO – Circolare attuativa

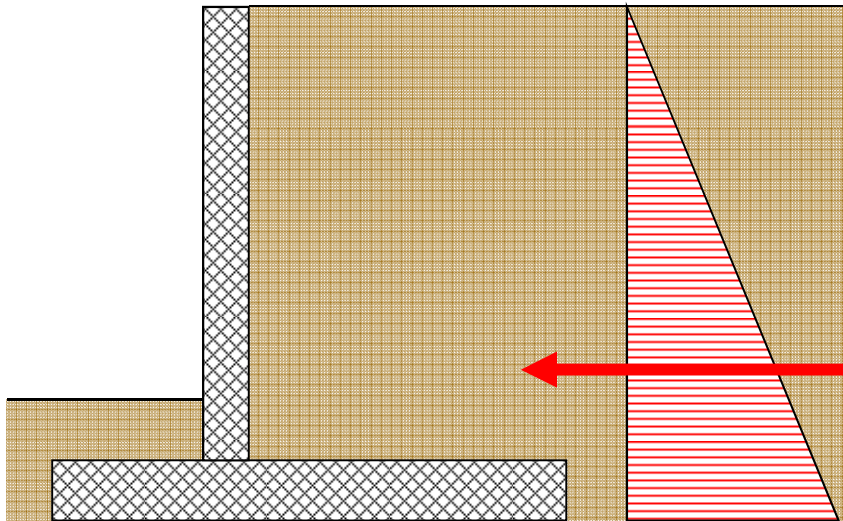
- **Metodo degli spostamenti**
 - Accelerogrammi reali e parametri non ridotti
 - Spostamenti accettabili definiti dal progettista

- **Metodo pseudostatico**
 - Si consiglia di utilizzare l'Approccio Progettuale 1
 - Combinazione 1 per le verifiche strutturali
 - Combinazione 2 per le verifiche geotecniche
 - Verifica a scorrimento
 - Verifica a carico limite
 - Approccio EQU per verifica a ribaltamento

Prima domanda

Perché la Circolare consiglia di utilizzare l'Approccio 1?

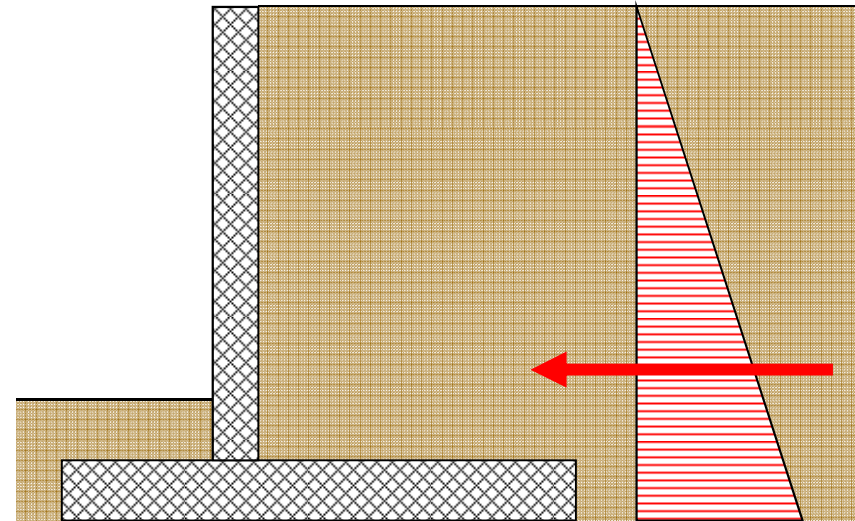
DA1 – C2



$$S_{ad,e} = \frac{1}{2} \gamma \cdot k_{ad} \cdot H^2$$



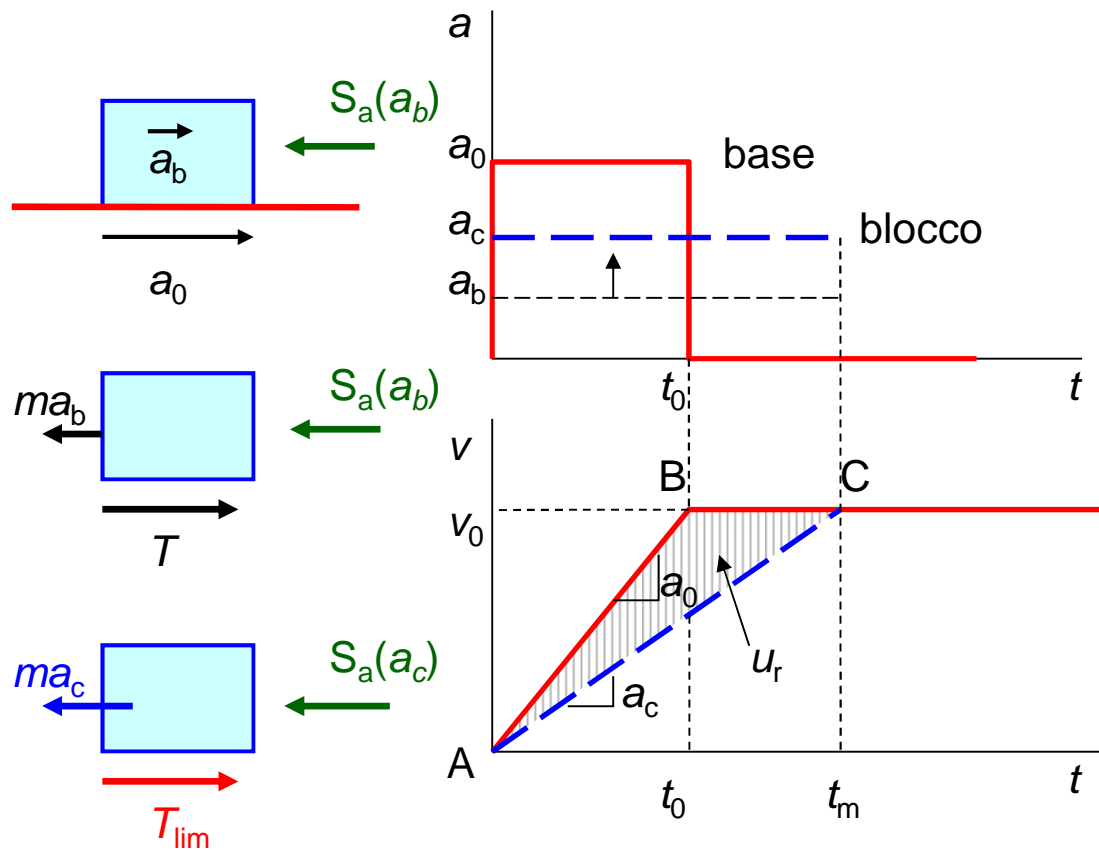
DA2



$$S_{ad,e} = \frac{1}{2} \gamma \cdot k_{ak} \cdot H^2$$

Seconda domanda

Perché i coefficienti sismici sono così ridotti?



Metodo di Newmark

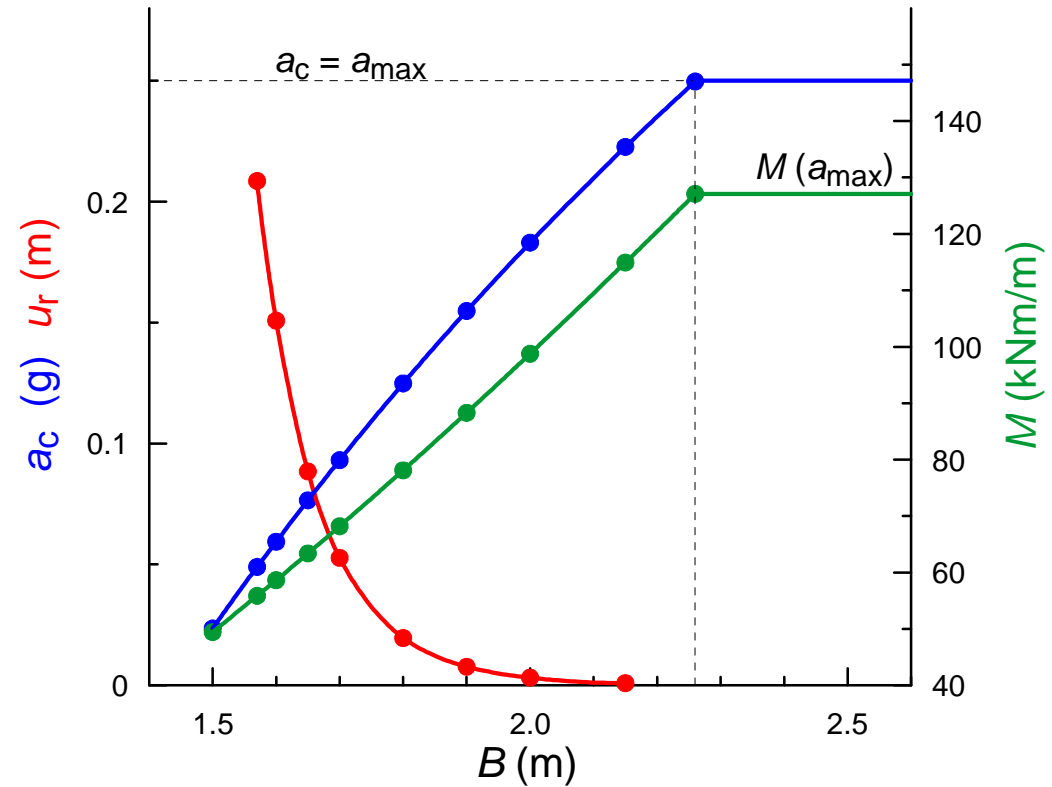
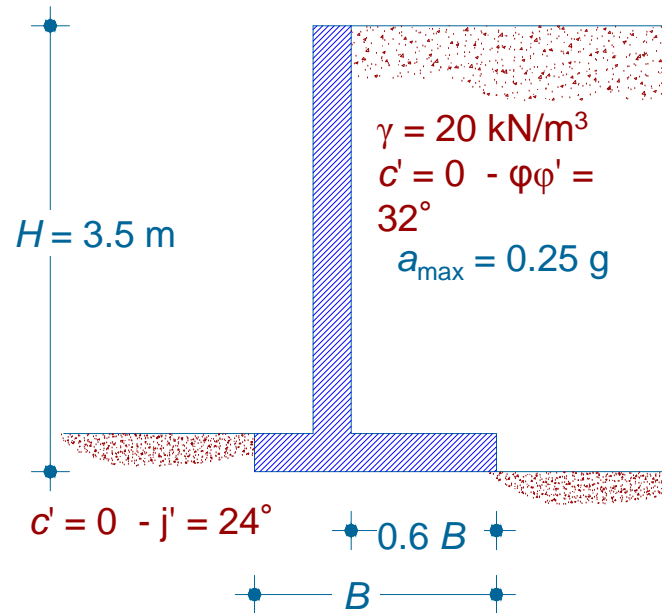
l'accelerazione del blocco non può superare a_c

le azioni inerziali sono limitate superiormente da $ma_c + S(a_c)$

per $a > a_c$ le sollecitazioni rimangono costanti

$$m \cdot a_c + S(a_c) = T_{lim}$$

Perché i coefficienti sismici sono così ridotti?



Al crescere di $B \rightarrow$

Aumenta a_c

Si riducono gli spostamenti

Aumentano le sollecitazioni

Callisto e Aversa, 2008

Seconda domanda

Perché i coefficienti sismici sono così ridotti?

- Coefficiente k_h dipende dalla possibilità di scorrimento del muro
- Calibrazione effettuata da Simonelli per spostamento di 10 cm utilizzando banca accelerogrammi nazionali

Terza domanda

Per quale stato limite valgono i β_m ?

- Coefficienti β_m pensati per SLV

Quarta domanda

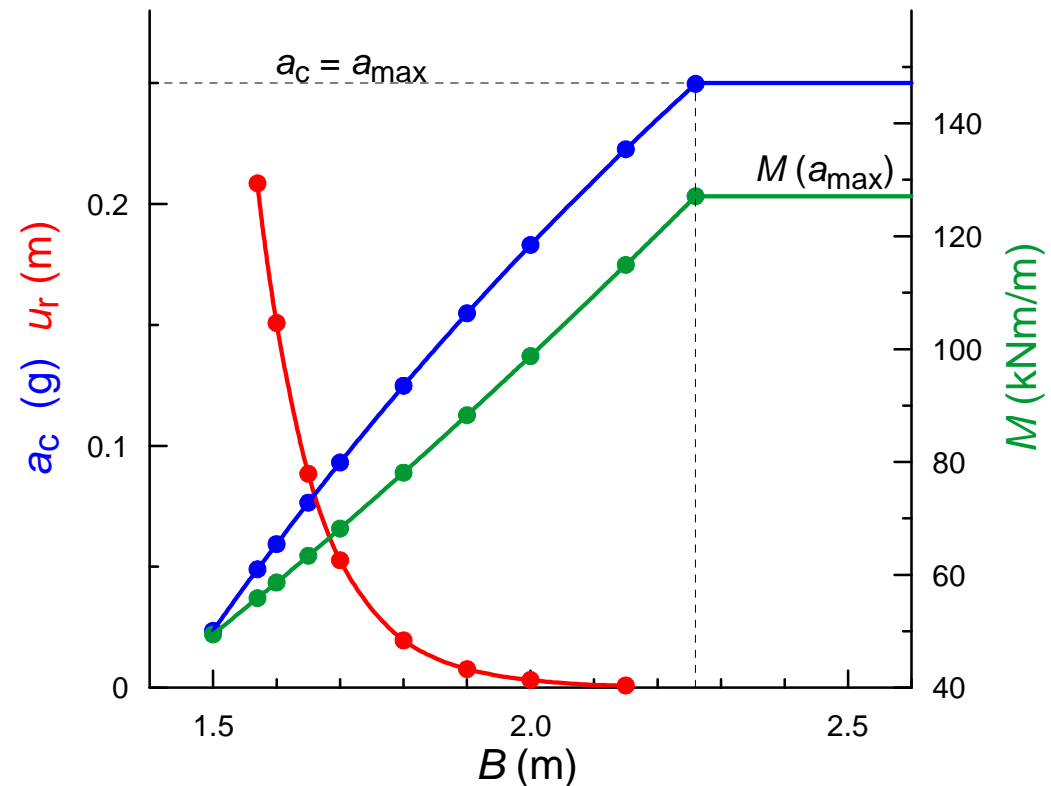
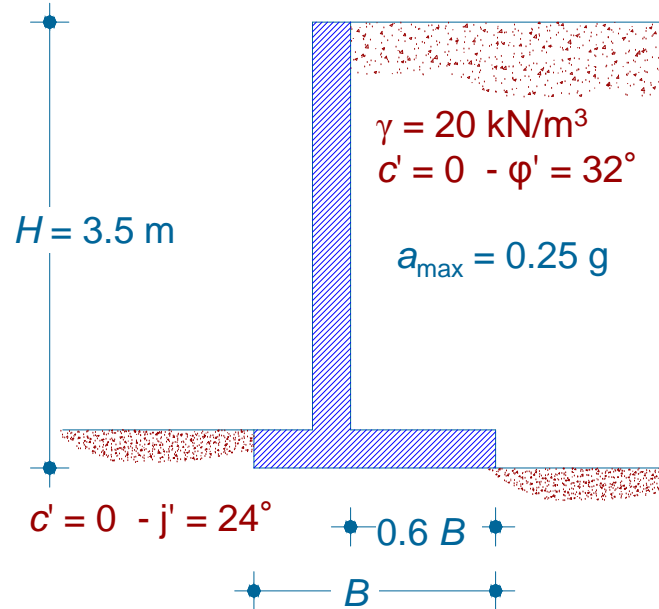
Che fare con le verifiche agli altri Stati limite?

- Accettando spostamenti ammissibili crescenti al passaggio da SLO a SLC, si dovrebbero ottenere β_m decrescenti
- Per gli stati limite di esercizio (SLD) si può utilizzare $\beta_m = 1$, imponendo quindi spostamenti nulli
- Se si utilizzassero i β_m di normativa per SLC, si avrebbe un sovradimensionamento del muro

Sarebbe opportuno gradare i coefficienti β_m per i vari stati limite (o in funzione degli spostamenti)

Quinta domanda

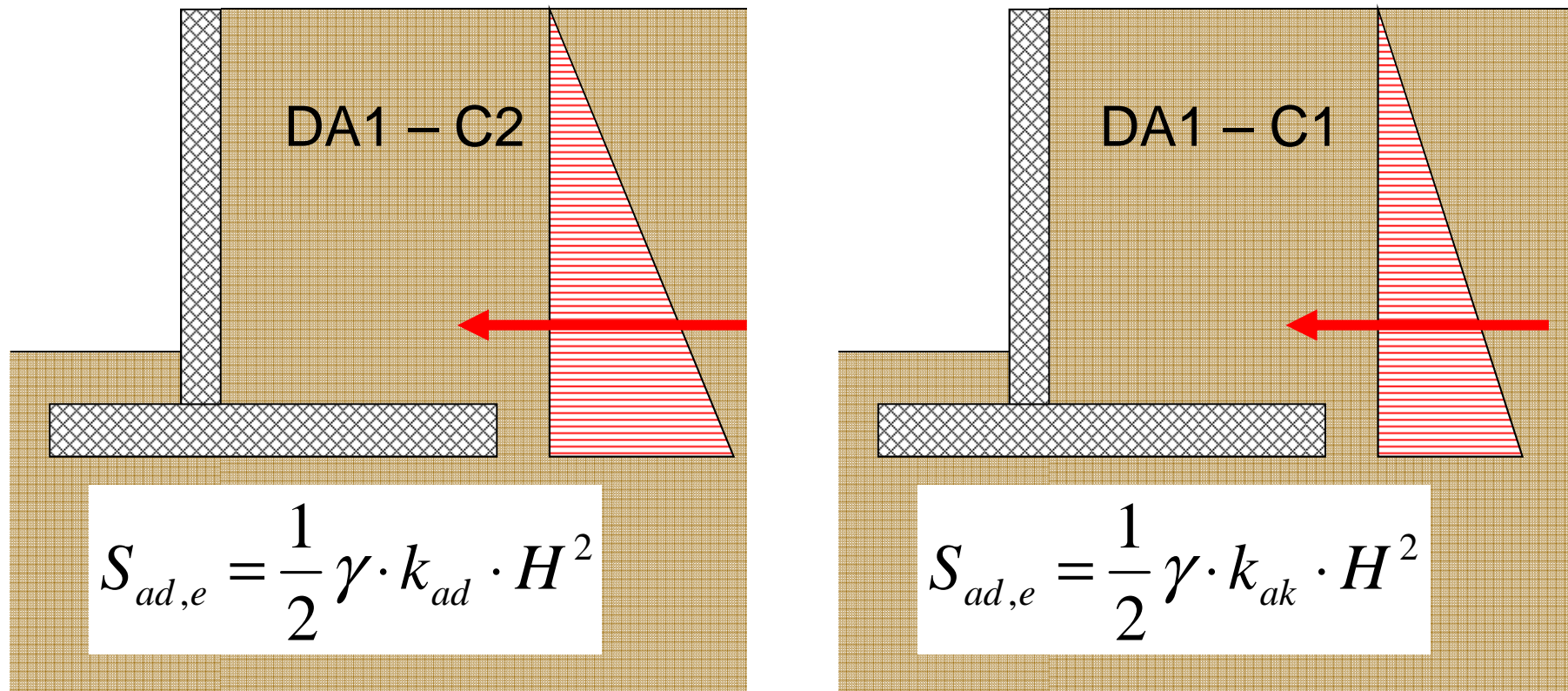
Con che spinte dimensionare strutturalmente il muro?



In un'ottica di gerarchia delle resistenze (Callisto e Aversa, 2008), si dovrebbero utilizzare quelle che portano a scorrimento sul piano di posa

Sesta domanda

Ha senso l'indicazione di effettuare verifiche geotecniche e strutturali rispettivamente con Combinazione 2 e 1?



L'indicazione potrebbe portare a gerarchia inversa

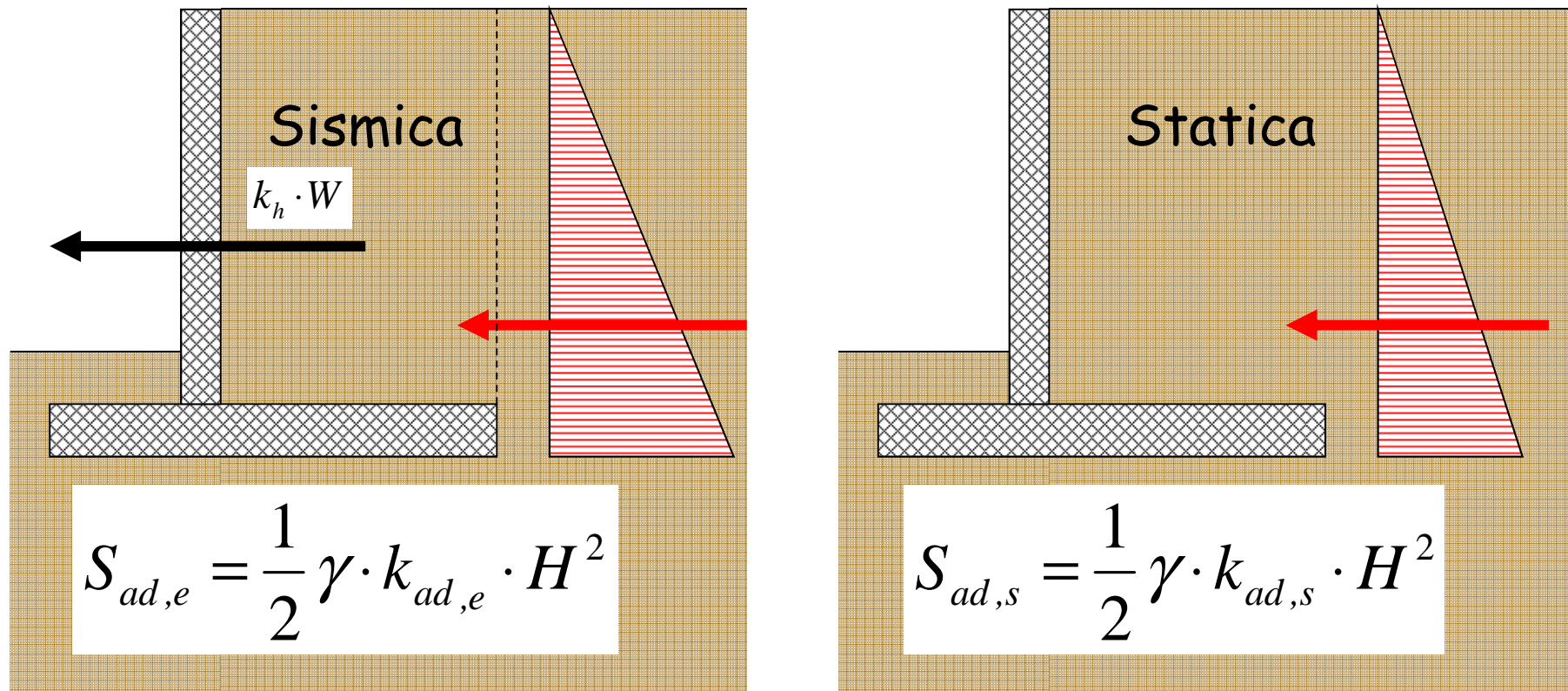
Settima domanda

Con che coefficiente sismico effettuare le verifiche a ribaltamento?

- **Meccanismo fragile**
- **Con coefficiente sismico pari all'accelerazione massima attesa adimensionalizzata (a_g/g)**
- **Con coefficiente sismico corrispondente a formazione di meccanismi duttili (scorrimento o plasticizzazione della mensola) eventualmente amplificato da un coefficiente di sovraresistenza**

Ottava domanda

La verifica sismica è sempre dimensionante?



Si ! A meno di sovraccarichi variabili molto rilevanti

- Solo approccio DA2
- Incrementati lievemente i coefficienti β_m per compensare tale modifica
- Coefficienti β_m per SLV e SLD
- Nella Circolare si dovrebbe dare maggiore importanza all'applicazione dei concetti di gerarchia delle resistenze
- **Con queste modifiche non è detto che la verifica sismica sia sempre quella dimensionante**

PARATIE

VERIFICHE SLU DI PARATIE – Prescrizioni NTC

Possono essere condotte con:

- **Metodi numerici**
 - Non se ne esclude l'uso
- **Metodi pseudostatici**
 - Solo l'Approccio progettuale 1
 - Coefficienti parziali solo su parametri di resistenza
 - Coefficienti pseudostatici

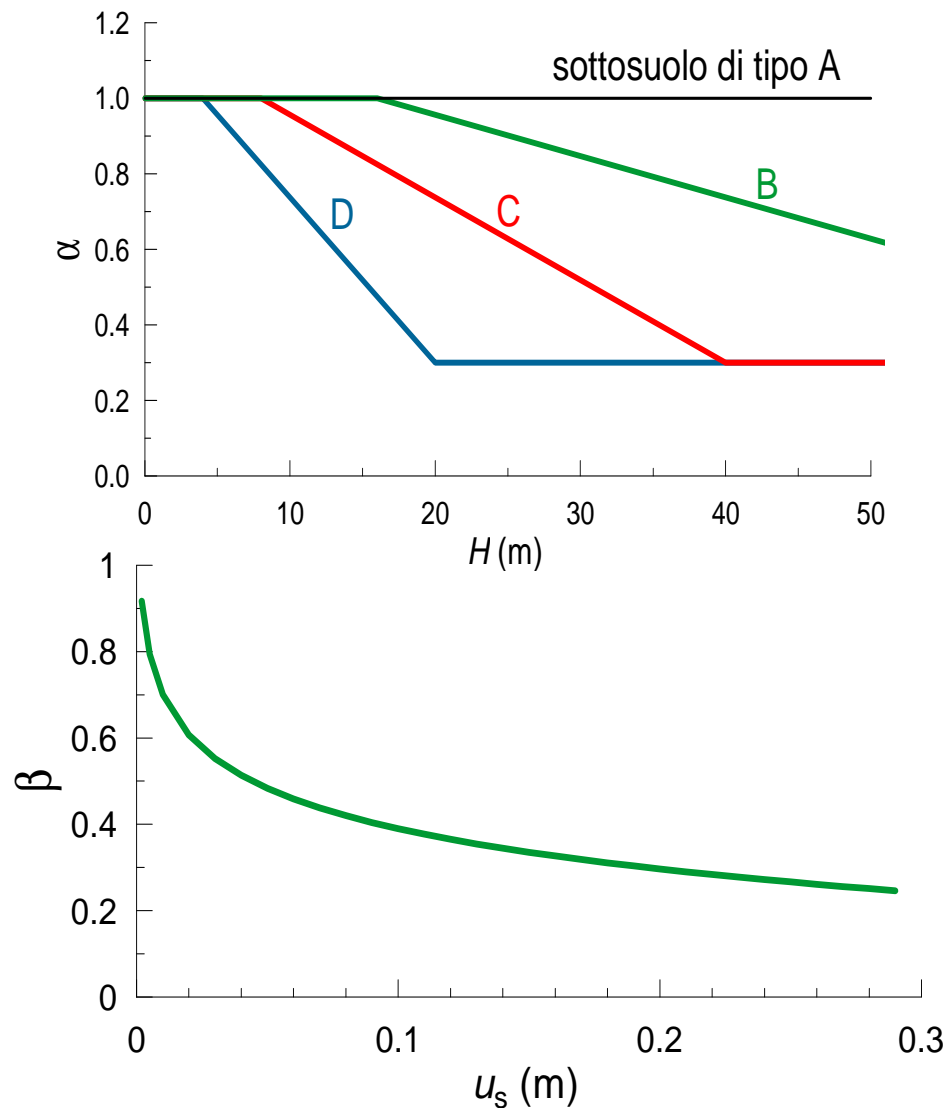
$$k_h = \alpha_p \beta_p \frac{a_g}{g}$$

- Coefficiente α solo per spinta a monte

**VERIFICHE SLU DI
PARATIE
Prescrizioni NTC**

**Coefficiente
pseudostatico**

$$k_h = \alpha \beta \frac{a_g}{g}$$



VERIFICHE SLU PER PARATIE – Circolare attuativa

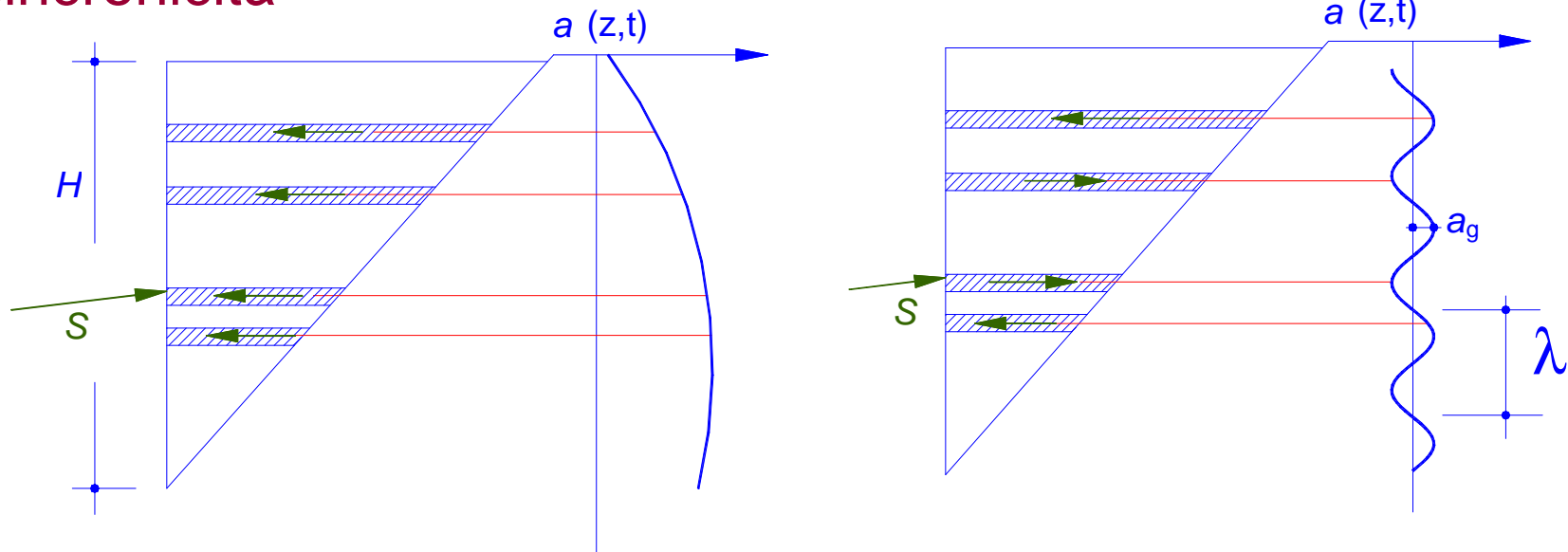
- **Metodi pseudostatici**

- Combinazione 1 per le verifiche strutturali
- Combinazione 2 per le verifiche geotecniche
- Spostamento u_s :
 - Massimo spostamento ritenuto ammissibile da progettista
 - Spostamento critico per meccanismi fragili

Prima domanda

Da cosa deriva il coefficiente α ?

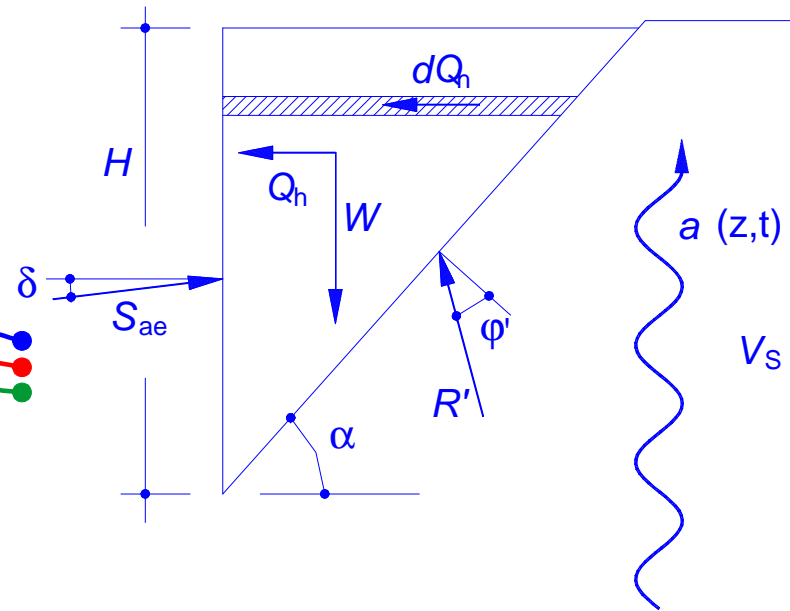
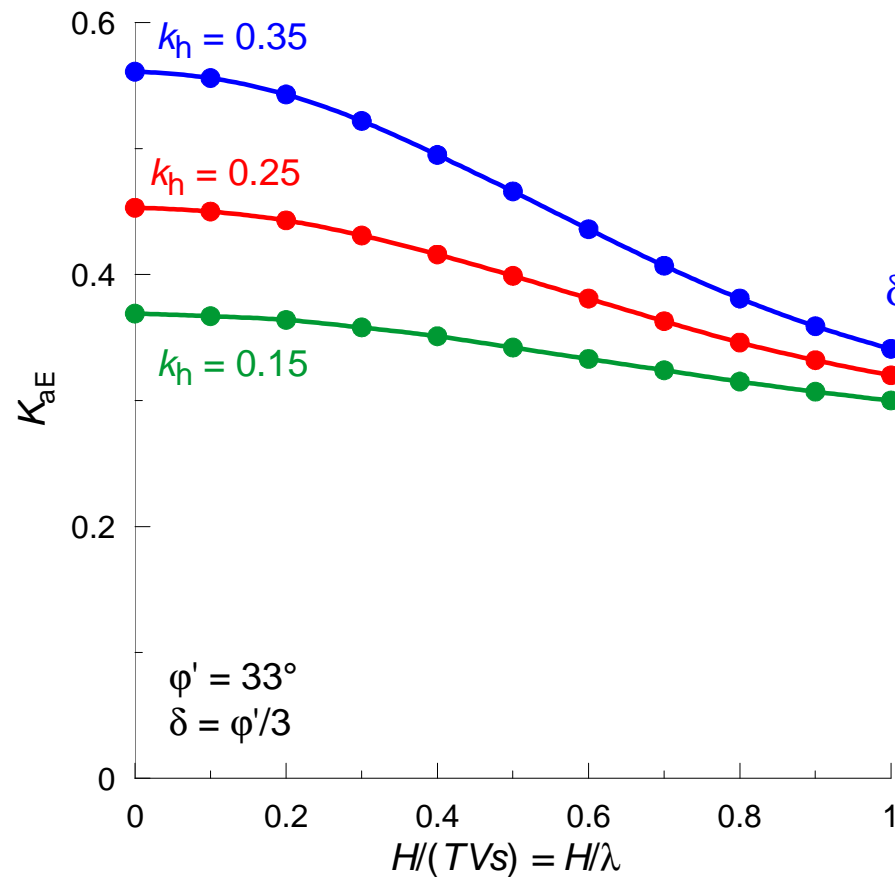
asincronicità



all'aumentare della deformabilità:

 $\lambda = v_s/f$ diminuisce \rightarrow moto asincrono $\rightarrow S$ diminuisce

Metodo di Steedman e Zeng (1990)



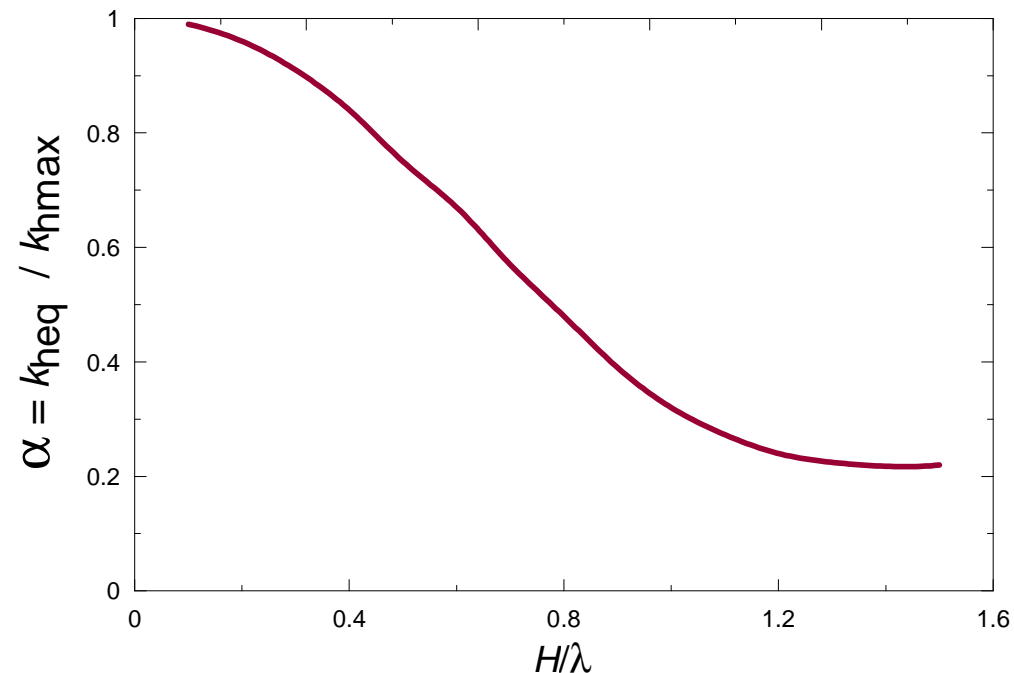
$$S_{aE} = \frac{1}{2} \gamma \cdot H^2 \cdot K_{aE}$$

estensione del metodo di Steedman & Zeng (1990)

definizione di un'accelerazione pseudostatica equivalente

$$k_{h \text{ eq}} = a \cdot k_{h \text{ max}}$$

da utilizzare nel metodo di M.O.



estensione del metodo di Steedman & Zeng (1990)

analisi di risposta sismica 1-D

$$a(t) \quad \frac{a_{\max}}{T_m}$$

azione sismica assimilata a una sollecitazione armonica di periodo medio (Rathje et al. 1998)

non linearità $G_{\text{sec}} \rightarrow V_{\text{seq}}$

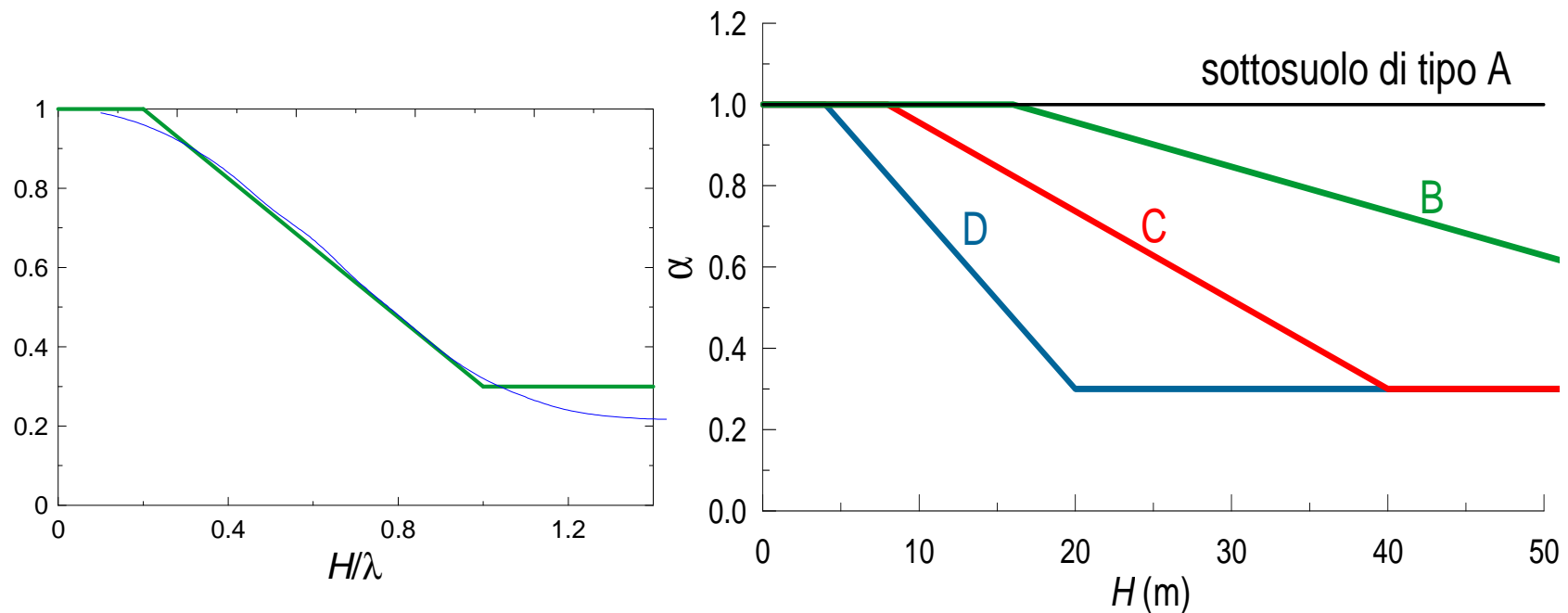
$$I = V_{\text{seq}} T_m$$

$$k_{\text{eq}} = f(H/I) \rightarrow K_{\text{aE}}$$

$$T_m = \frac{1}{f'_m} = \frac{\sum_i C_i^2 \cdot 1/f_i}{\sum_i C_i^2}$$

(Callisto, 2007)

applicazione a eventi sismici italiani e
categorie di sottosuolo NTC



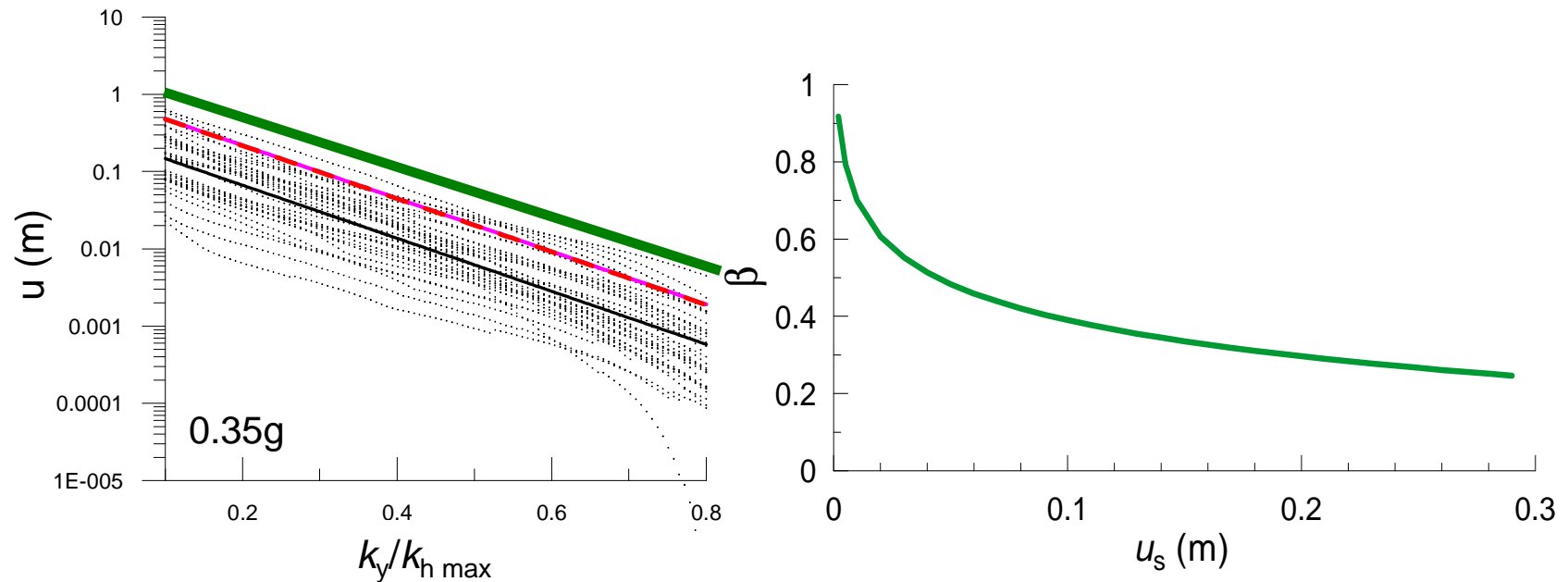
Seconda domanda

Da cosa deriva il coefficiente β ?

duttilità

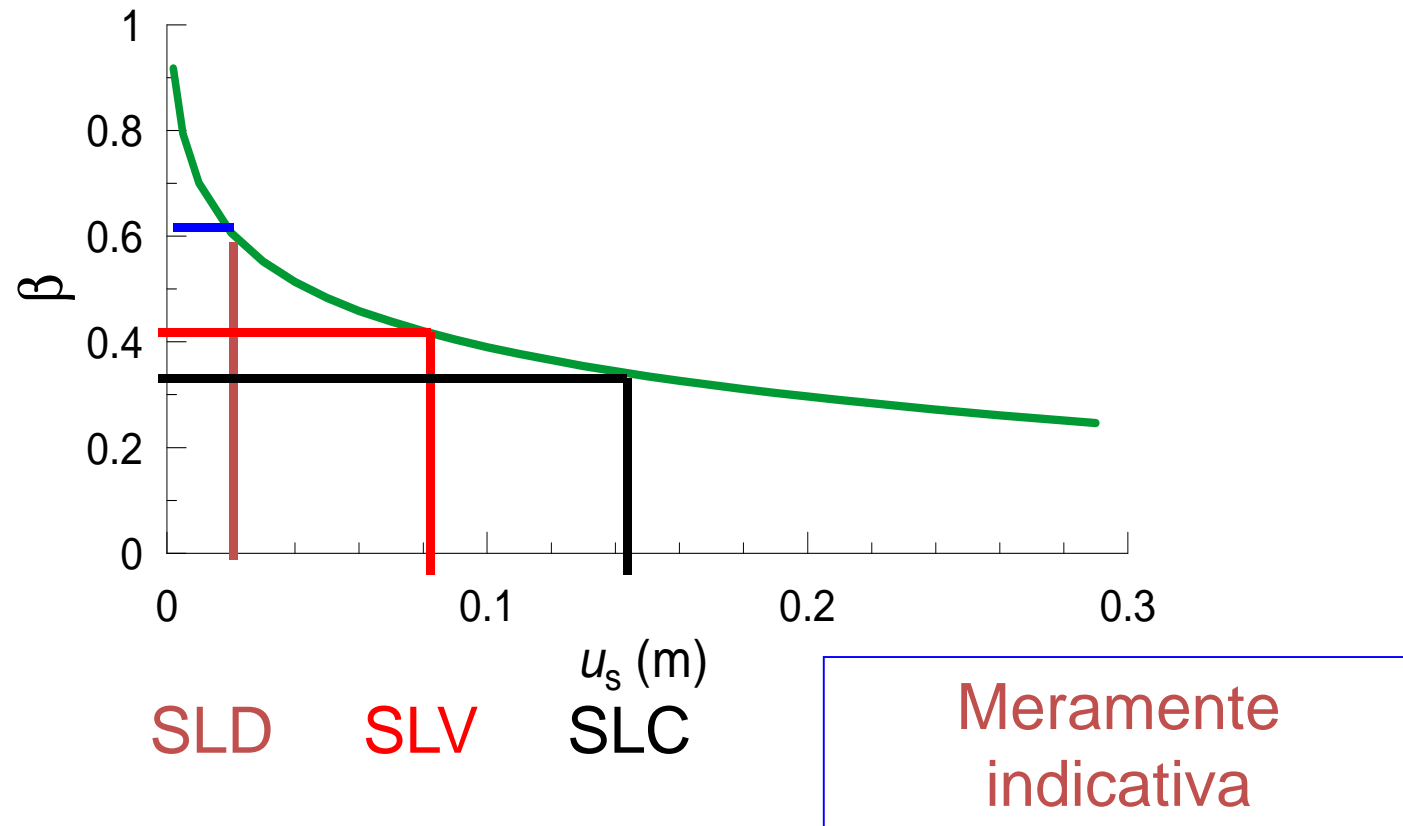
$$b = k_y / k_{h \max}$$

incertezze → inviluppo dei massimi



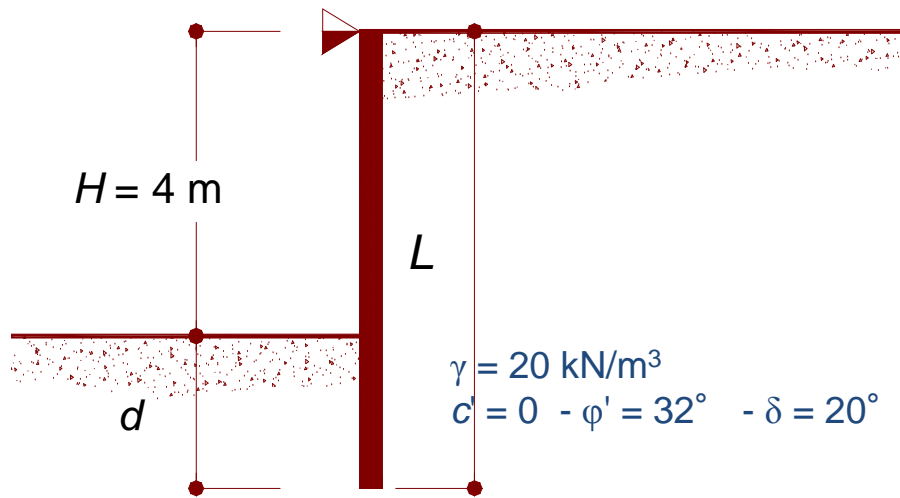
Possibilità di calibrare β per diversi SL

Al variare dello SL si possono considerare diversi spostamenti ammissibili e, quindi, diversi valori di β

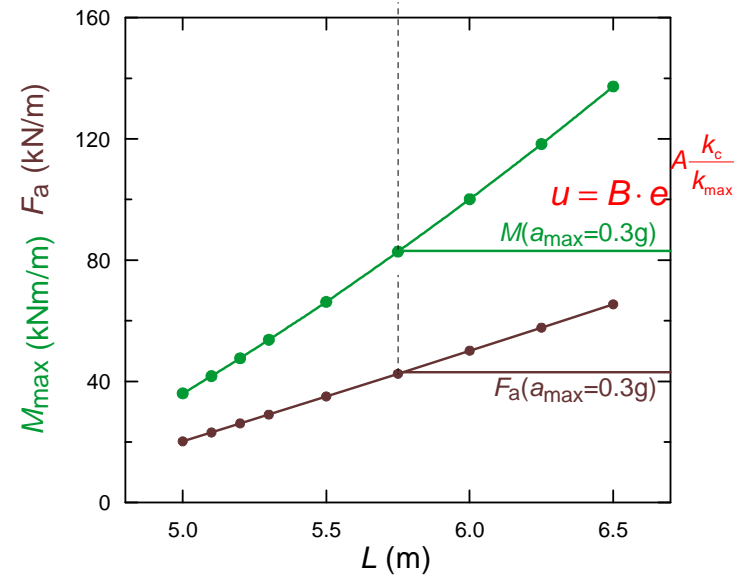
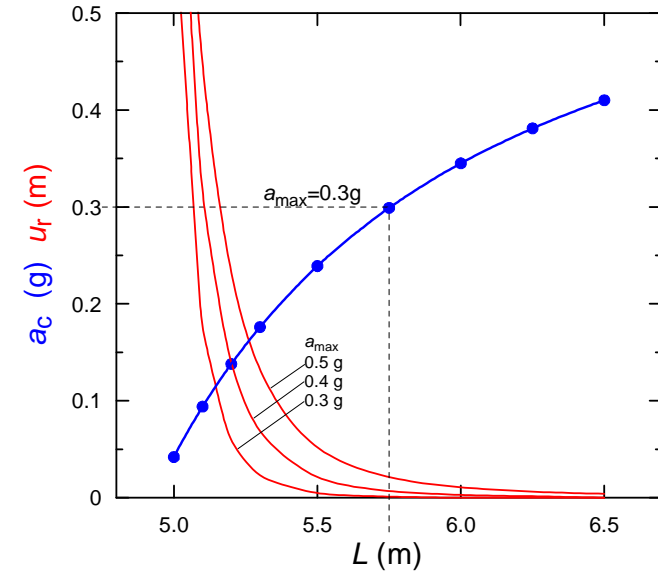


Terza domanda

Con che spinte dimensionare strutturalmente le paratie?

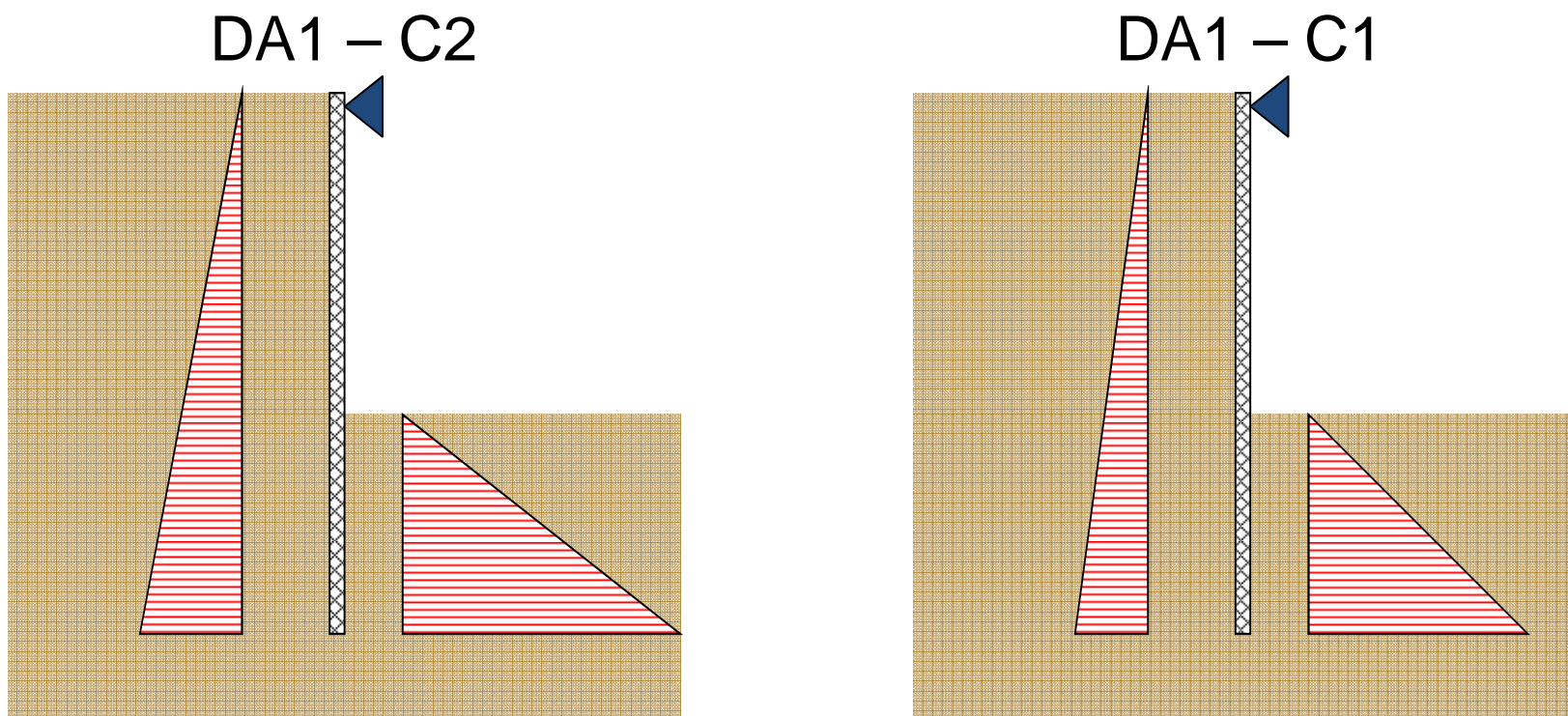


(Callisto e Aversa, 2008)



Quarta domanda

Ha senso l'indicazione di effettuare verifiche geotecniche e strutturali rispettivamente con Combinazione 2 e 1?

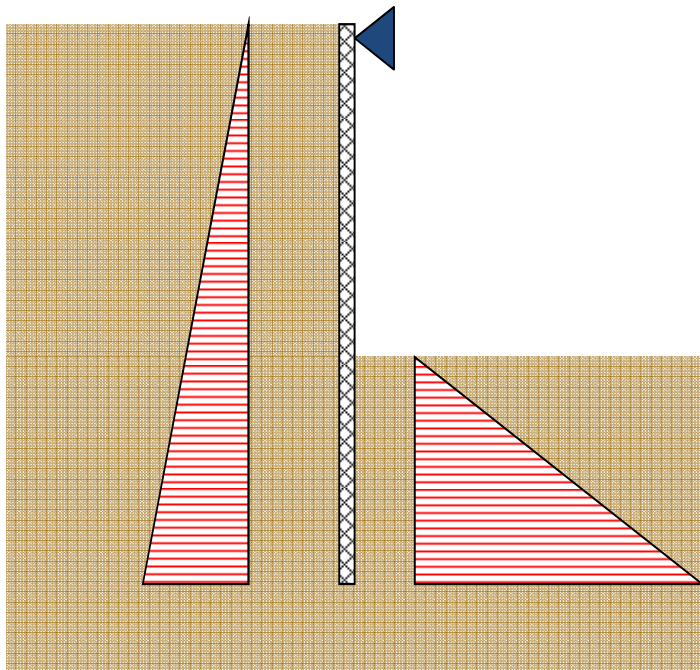


L'indicazione potrebbe portare a gerarchia inversa

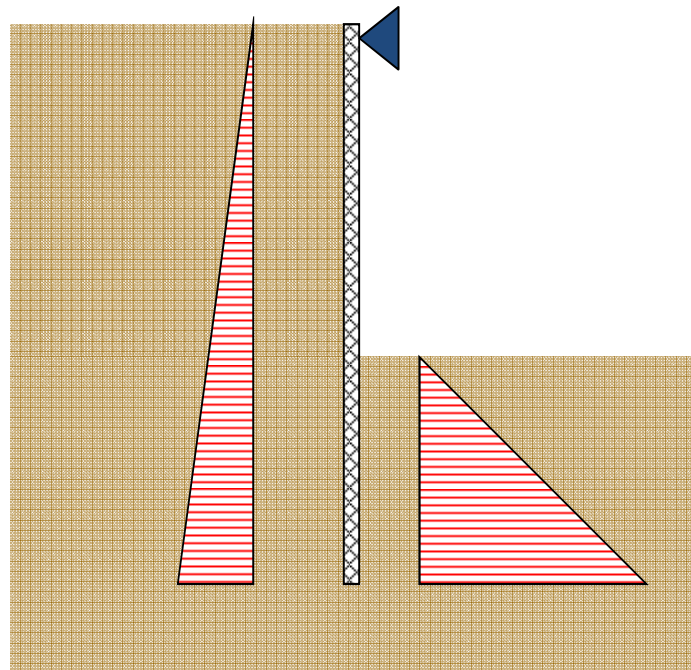
Quarta domanda

La verifica sismica è sempre quella dimensionante?

Condizioni sismiche



Condizioni statiche



Si ! A meno di sovraccarichi variabili molto rilevanti

- Eliminati i coefficienti parziali sulle caratteristiche di resistenza del terreno ($\gamma_M = 1.00$)
- Non vi è quindi più differenza per verifiche strutturali e geotecniche
- Si espliciterà maggiormente la richiesta di fare riferimento a gerarchia delle resistenze

CONCLUSIONI

- NTC meglio del precedente
- Permette di tenere conto meglio del comportamento delle opere
- Si inserisce in una logica di progettazione prestazionale (PBD)
- Modifiche proposte:
 - Semplificano la vita in condizioni statiche
 - Risolvono alcuni problemi sotto azioni sismiche
 - Sono più coerenti con gerarchia delle resistenze
 - Evitano sovradimensionamento sismico di muri di sostegno e paratie