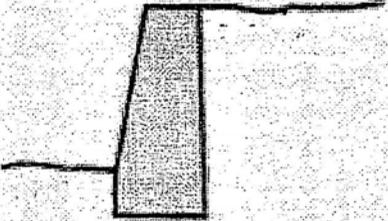
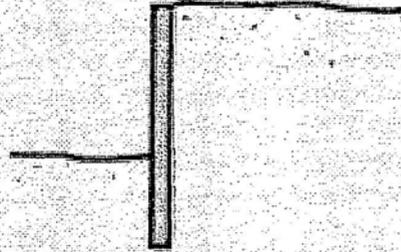


OPERE DI SOSTEGNO

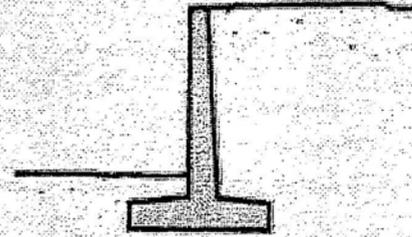
TIPOLOGIE STRUTTURALI



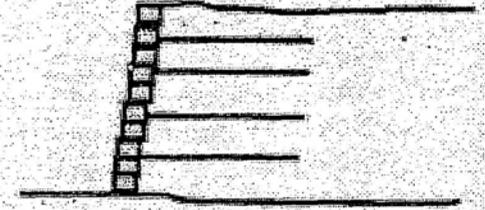
Gravity wall



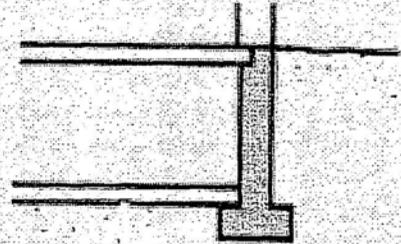
Cantilever wall



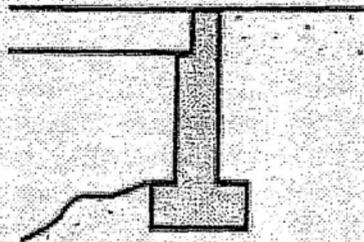
Cantilever wall



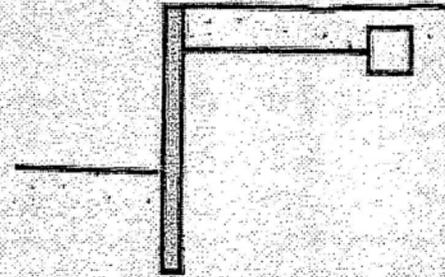
Reinforced soil wall



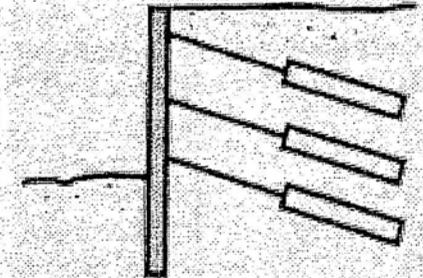
Basement wall



Bridge abutment wall



Anchored bulkhead



Tieback wall

OPCM 3274

- **Requisiti generali di progetto**
 - **Funzionalità (durante e dopo)**
 - **Ammessi spostamenti permanenti (compatibili)**
- **Criteri di progetto**
 - **Materiale di riporto (granulometria controllata e addensato)**
 - **Sistema di drenaggio (tolleranza deformazioni transitorie e permanenti)**
 - **Terreni a grana grossa (drenaggio esteso oltre superficie di rottura)**
- **Metodi di analisi**
 - **Non linearità terreno, effetti inerziali, idrodinamici, compatibilità deformazioni terreno, opera e tiranti**
 - **Strutture ordinarie ($H < 15$ m): pseudo-statico**

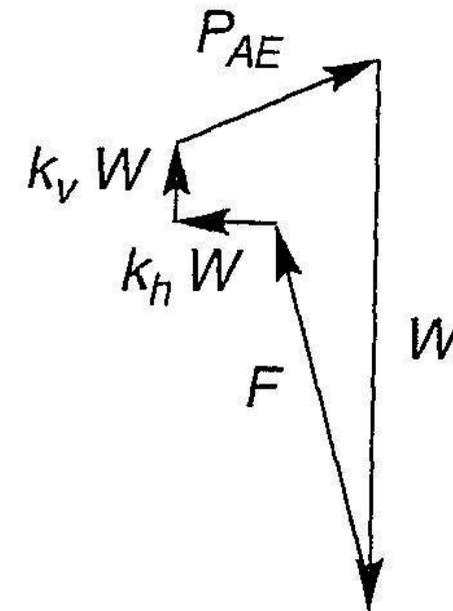
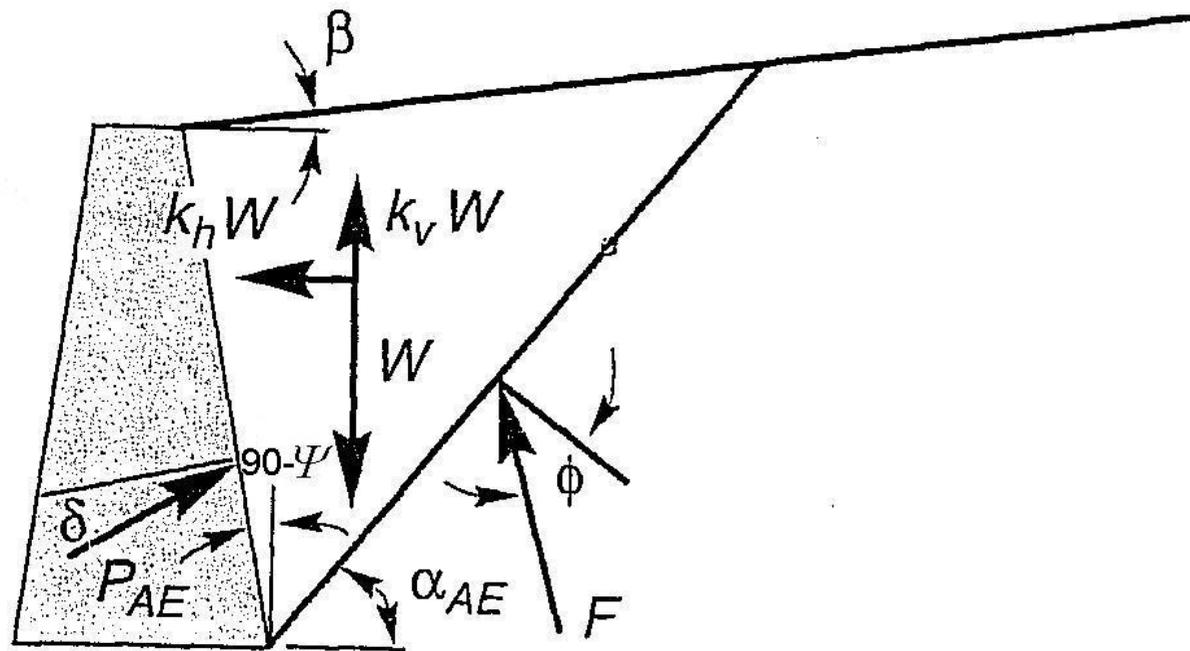
IPOTESI DI BASE (1)

- **Problema piano**
- **Spostamenti sufficienti ad attivare la spinta attiva e passiva**
- **Terrapieno omogeneo, dotato di solo attrito (Mohr-Coulomb)**
- **Superficie di rottura piana, passante per il piede del muro**
- **Il cuneo di terreno si comporta come un corpo rigido**

IPOTESI DI BASE (2)

- **Gli effetti inerziali del muro sono trascurabili**
- **Piano campagna regolare**
- **Sovraccarichi uniformemente distribuiti**
- **Assenza di fenomeni di liquefazione o degradazione**
- **Falda a pc o assente (salvo pc orizzontale)**

INTERPRETAZIONE GRAFICA (Kramer 1996)



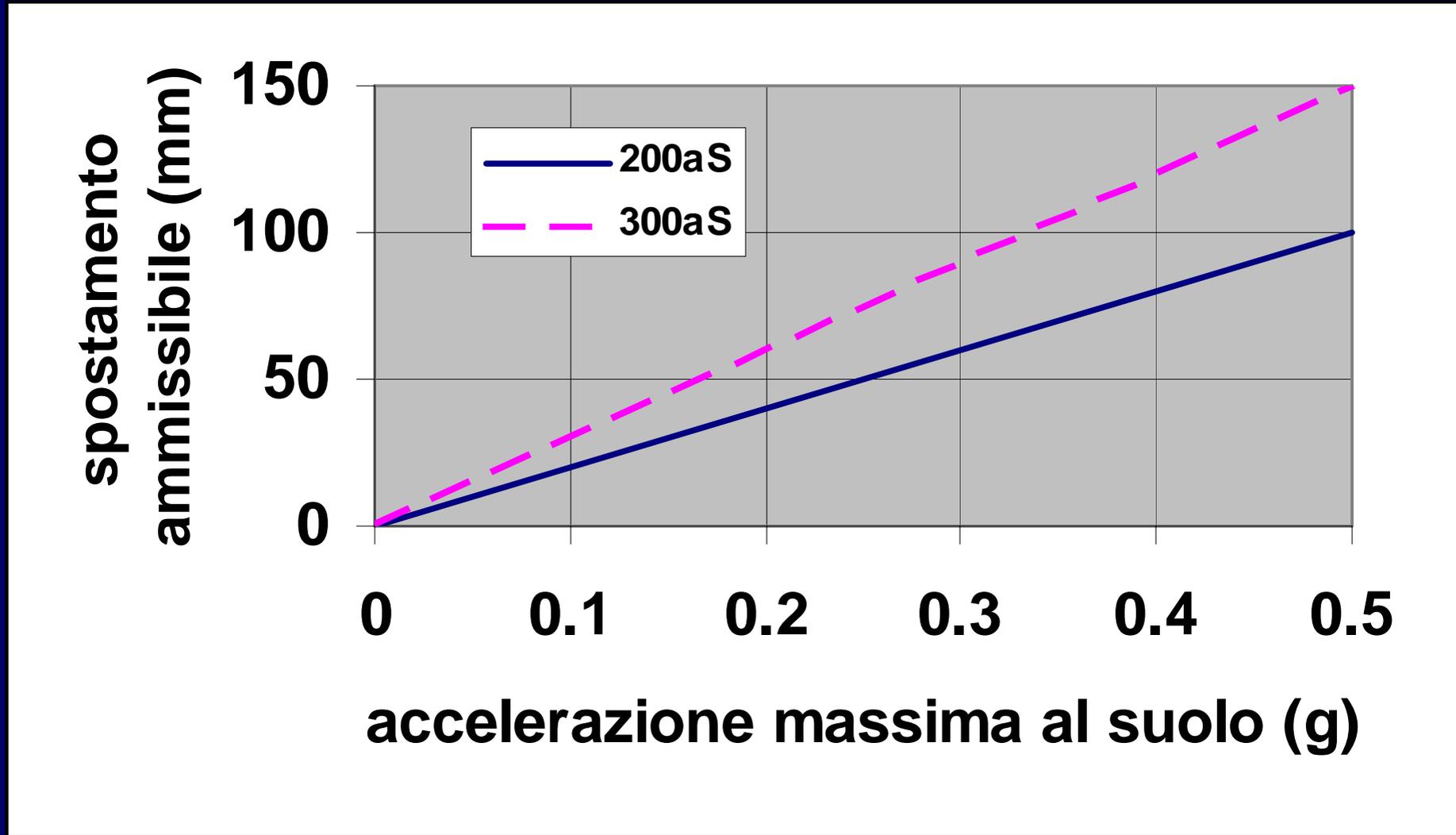
OPCM 3274: Metodi Pseudostatici (M-O) – COEFFICIENTI SISMICI

- Strutture che ammettono spostamenti ($r=2$)
- Altre tipologie ($r=1$)
- Terreni a grana grossa saturi ($r=1$)

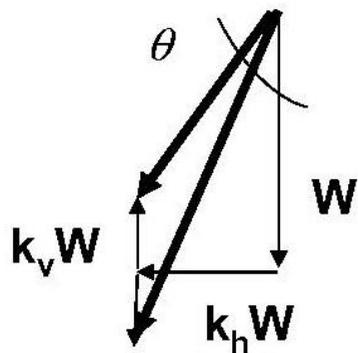
$$k_h = S \cdot \gamma_I \cdot a_g / (g \cdot r)$$

$$k_v = \pm 0.5 \cdot k_h$$

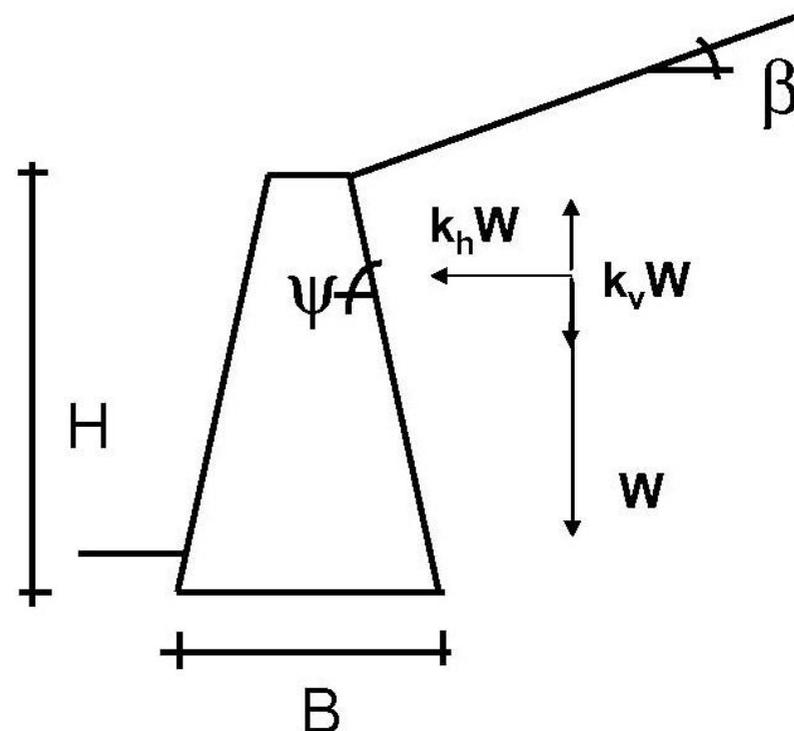
EC8: COEFFICIENTE r



EQUAZIONI (1): OPCM 3274; EC8



$$\theta = \arctan\left(\frac{k_h}{1 \pm k_v}\right)$$



$$E_d = \frac{1}{2} \gamma^* H^2 (1 \pm k_v) \cdot K + E_{ws} + E_{wd}$$

EQUAZIONI (2)

• SPINTA ATTIVA $\beta \leq \varphi' - \theta$

$$K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \varphi' - \theta)}{\cos \theta \cdot \text{sen}^2 \psi \cdot \text{sen}(\psi - \theta - \delta) \left[1 + \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi' + \delta) \cdot \text{sen}(\varphi' - \beta - \theta)}{\text{sen}(\psi - \theta - \delta) \cdot \text{sen}(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

$$\beta > \varphi' - \theta$$

$$K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \varphi' - \theta)}{\cos \theta \cdot \text{sen}^2 \psi \cdot \text{sen}(\psi - \theta - \delta)}$$

EQUAZIONI (3)

- **SPINTA PASSIVA: $\delta = 0$**

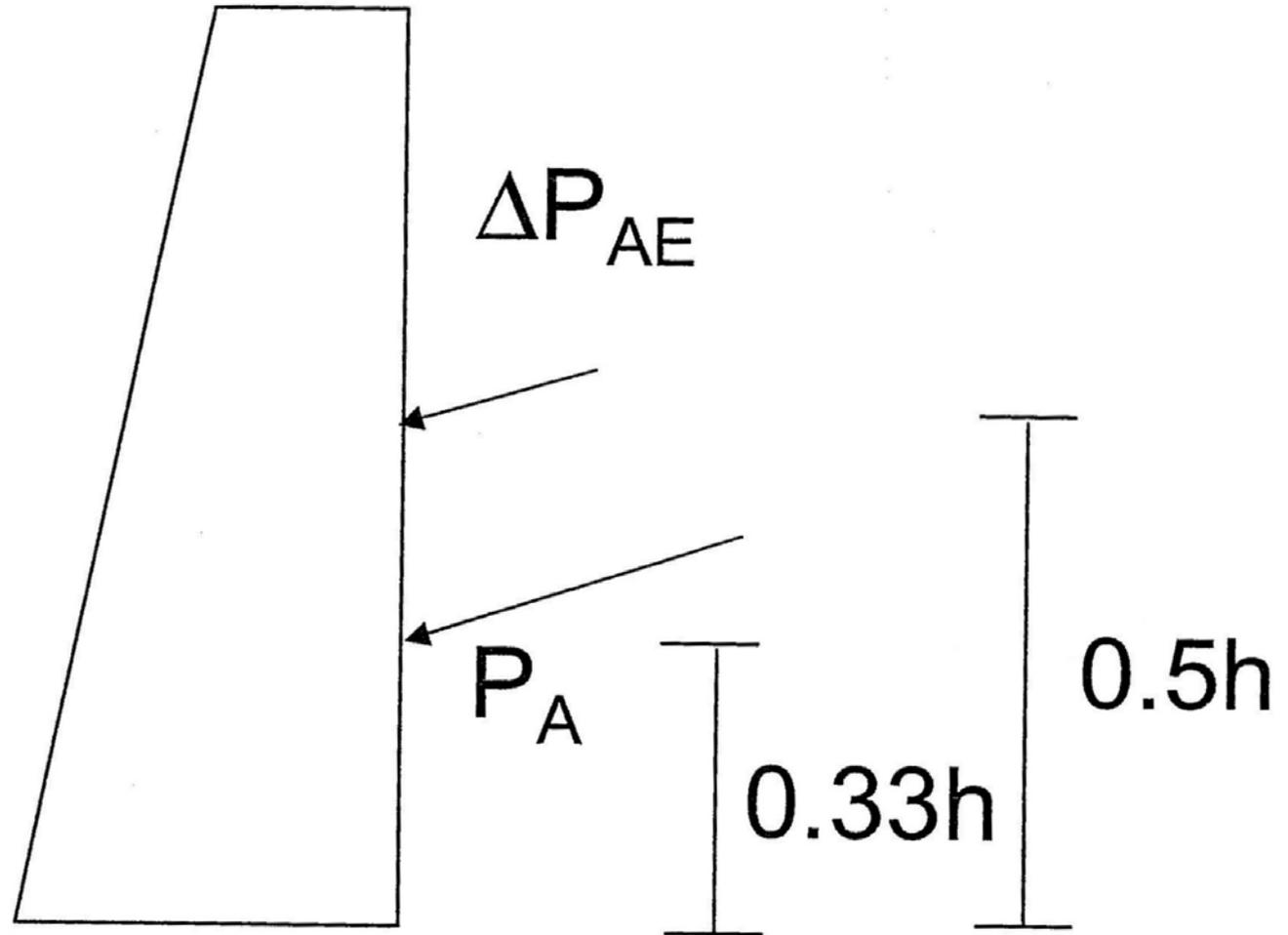
$$K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \varphi' - \theta)}{\cos \theta \cdot \text{sen}^2 \psi \cdot \text{sen}(\psi + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi') \cdot \text{sen}(\varphi' + \beta - \theta)}{\text{sen}(\psi + \theta) \cdot \text{sen}(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

PUNTO DI APPLICAZIONE

$$E_d = P_A + \Delta P_{AE}$$

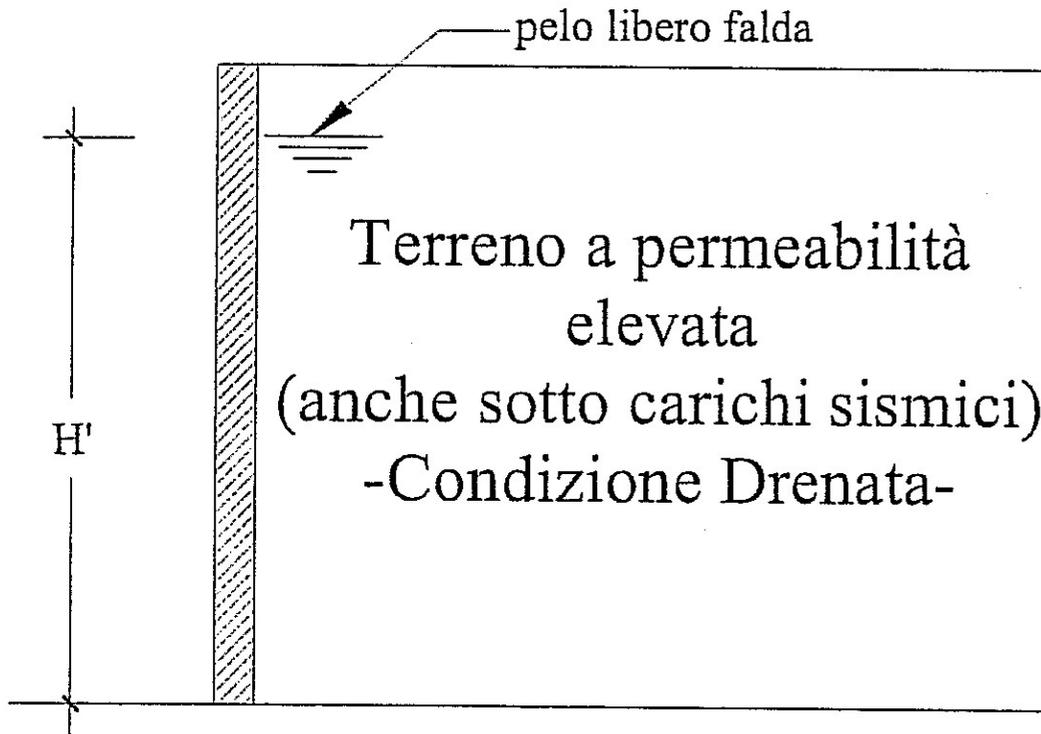
$$P_A \rightarrow (\theta = 0)$$

$$\Delta P_{AE} = E_d - P_A$$



SPINTA DELL'ACQUA (1):

$$E_{wd} @ 0.4H$$



$$\gamma^* = \gamma - \gamma_w = \gamma'$$

$$\tan \vartheta = \frac{\gamma_d}{\gamma - \gamma_w} \frac{k_h}{1 \mp k_v}$$

(Steedman & Zeng, 1990)

$$E_{wd} = \frac{7}{12} k_h \cdot \gamma_w \cdot H'^2$$

SPINTA DELL'ACQUA (2)

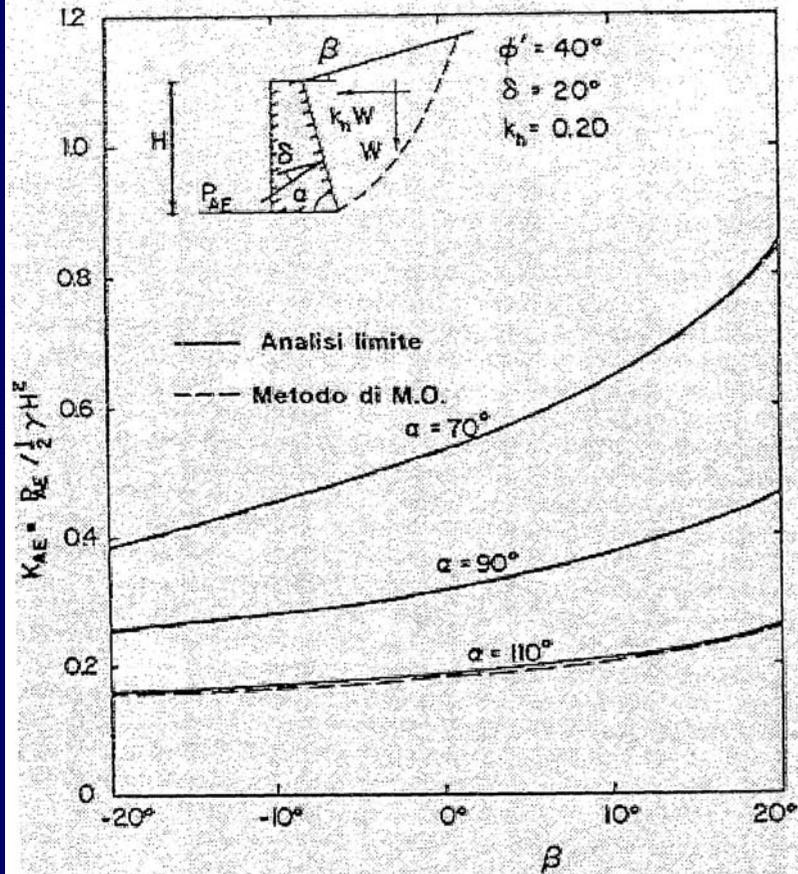
- **SPINTA IDRODINAMICA (ACQUA LIBERA A VALLE)**

$$q(z) = \pm \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{hz}$$

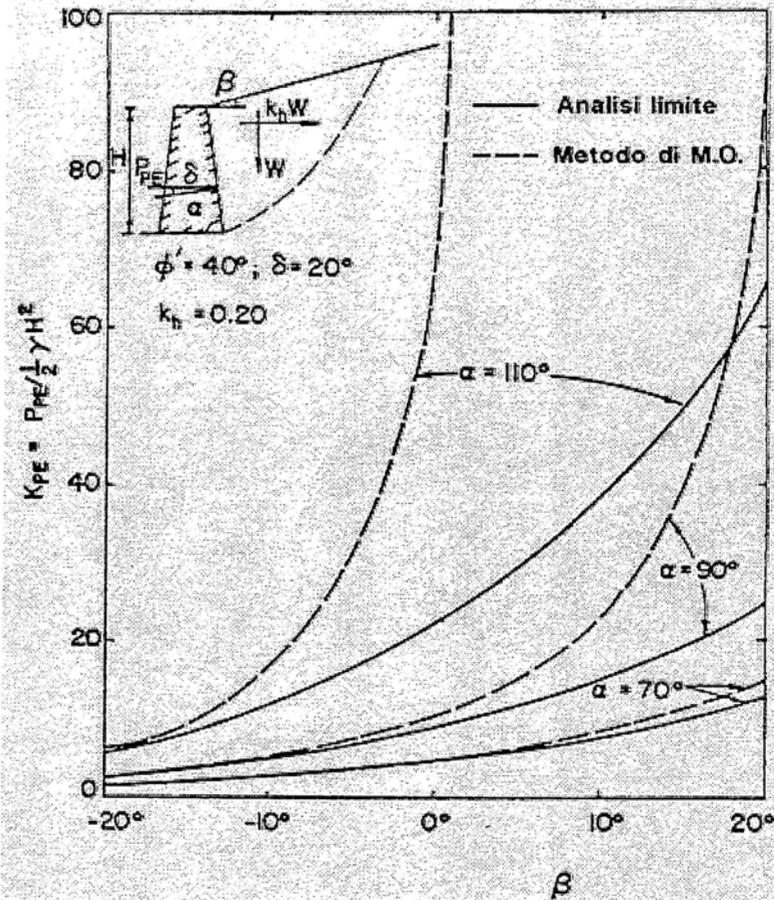
LIMITI (M – O)

- **Rapporto tra componente verticale e orizzontale ($\theta \leq \varphi$)**
- **Sovrastima K_{PE} (come nel caso statico)**
- **Opere che non ammettono spostamenti**
- **Deformabilità terrapieno**
 - **Amplificazione (Opere alte)**
 - **Differenze di fase**

MODIFICA DEI COEFFICIENTI DI SPINTA

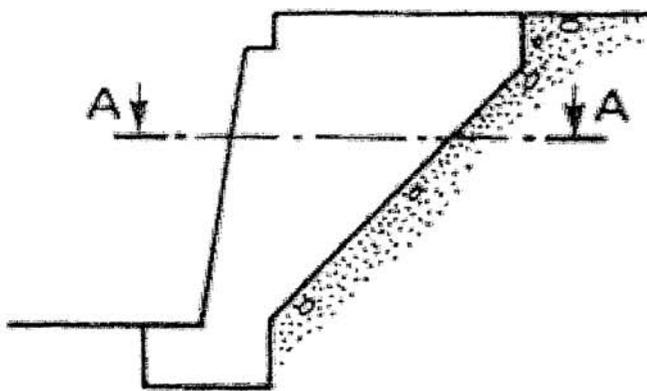
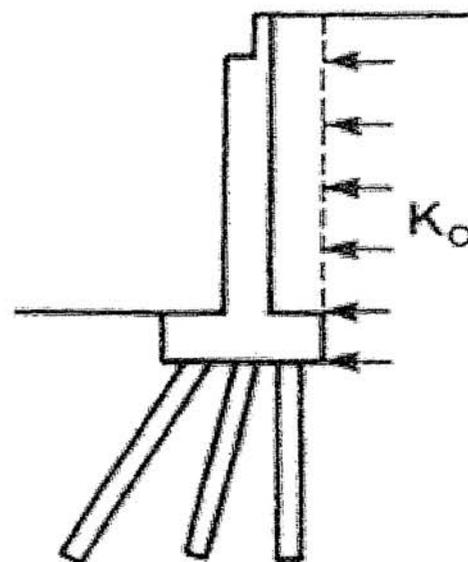
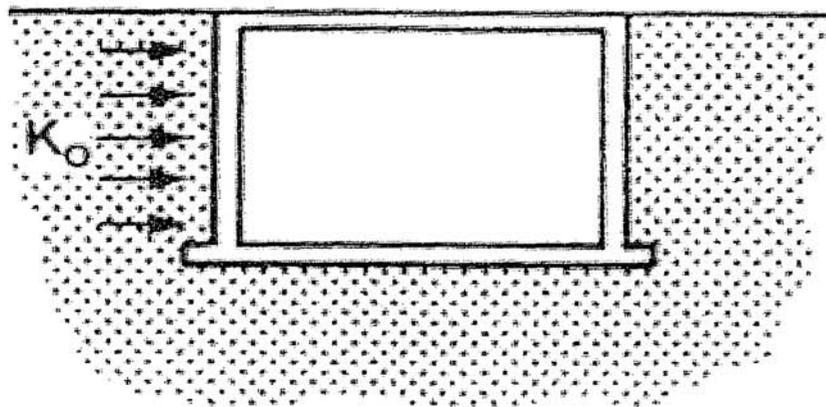


CONFRONTO DEI VALORI DI K_{AE} TRA ANALISI LIMITE E METODO DI M.O.

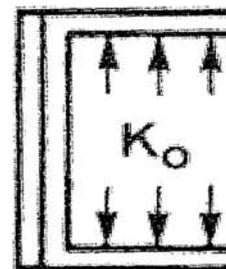


CONFRONTO DEI VALORI DI K_{PE} TRA ANALISI LIMITE E METODO DI M.O.

OPERE NON SOGGETTE A SPOSTAMENTI



SECTION A-A



(Lancellotta, 1993)

ANALISI ELASTICA: SPOSTAMENTI IMPEDITI

$$f \leq \frac{1}{24} \frac{V_s}{H}$$

$$\Delta P_{eq} = \gamma H^2 \frac{a_h}{g} F_p$$

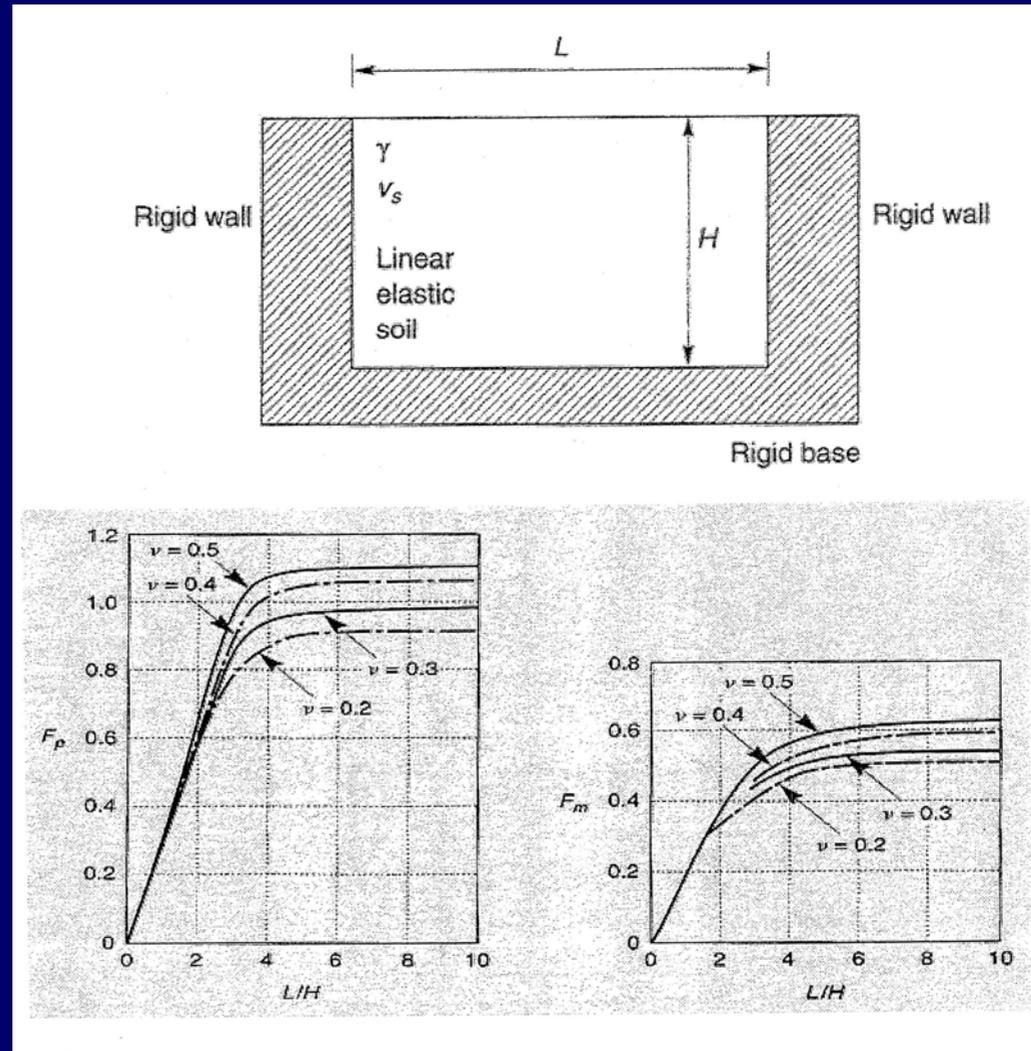
$$\Delta M_{eq} = \gamma H^3 \frac{a_h}{g} F_m$$

$$h_{eq} = \frac{M_{eq}}{\Delta P_{eq}} \cong 0.63H$$

OPCM 3274

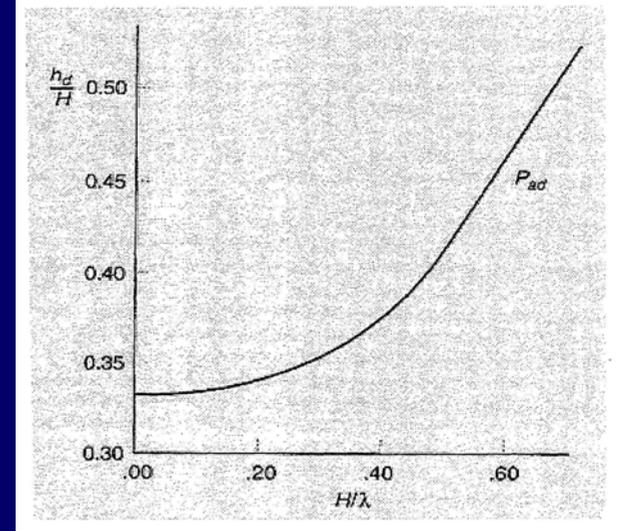
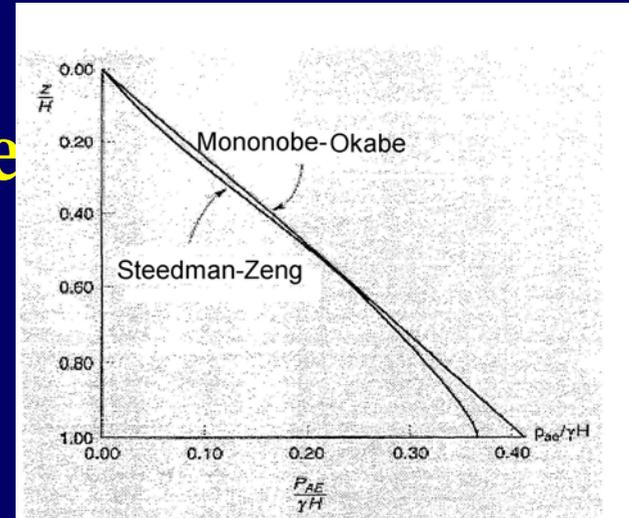
$$\Delta P_d = \frac{a_g}{g} S \cdot \gamma_I \cdot \gamma \cdot H^2$$

@ H/2



DEFORMABILITA' TERRAPIENO

- **Metodi pseudo-dinamici (Steedman 1990)**
 - Differenza di fase
 - Accelerazione variabile con z
 - Dipendenza da H/λ (lunghezza
- **Principali conseguenze:**
 - Amplificazione (muri alti)
 - Punto di applicazione



OPCM 3274: OPERE ALTE

- **$H > 10$ m: analisi di amplificazione (free-field) e uso di S_{a_g} media**

CALCOLO SPOSTAMENTI: NEWMARK

$$\mathbf{T} = \mathbf{F}_h + (\mathbf{P}_{AE})_h$$

$$\mathbf{N} = \mathbf{W} + (\mathbf{P}_{AE})_v$$

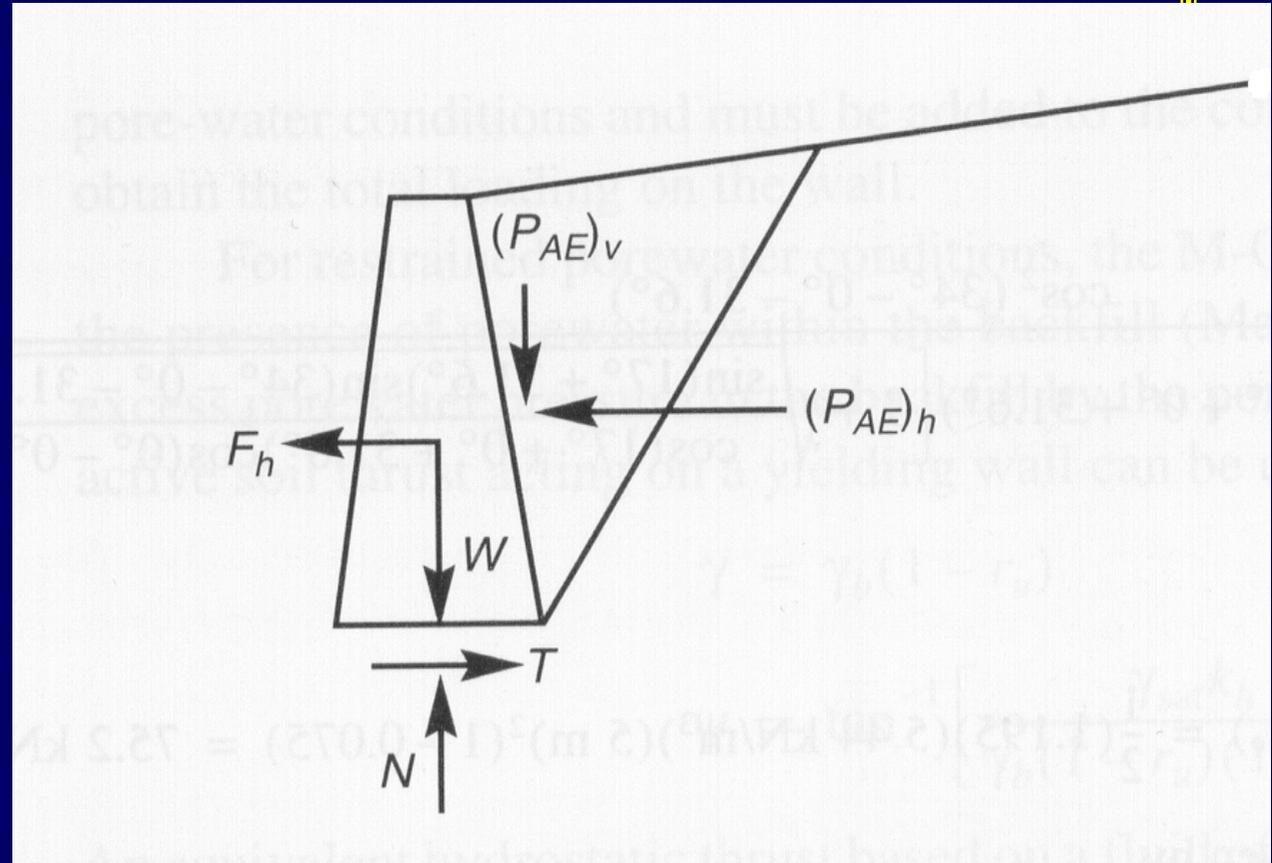
$$\mathbf{T} = \mathbf{N} \cdot \tan(\delta)$$

$$\mathbf{F}_h = \frac{\mathbf{a}_y}{\mathbf{g}} \mathbf{W}$$

$$(\mathbf{P}_{AE})_h = \mathbf{P}_{AE} \cos(\delta + 90 - \psi)$$

$$(\mathbf{P}_{AE})_v = \mathbf{P}_{AE} \text{sen}(\delta + 90 - \psi)$$

$$\mathbf{a}_y = \left[\tan \delta - \frac{\mathbf{P}_{AE} \cdot [\cos(\delta + 90 - \psi) - \text{sen}(\delta + 90 - \psi) \cdot \tan \delta]}{\mathbf{W}} \right] \cdot \mathbf{g}$$



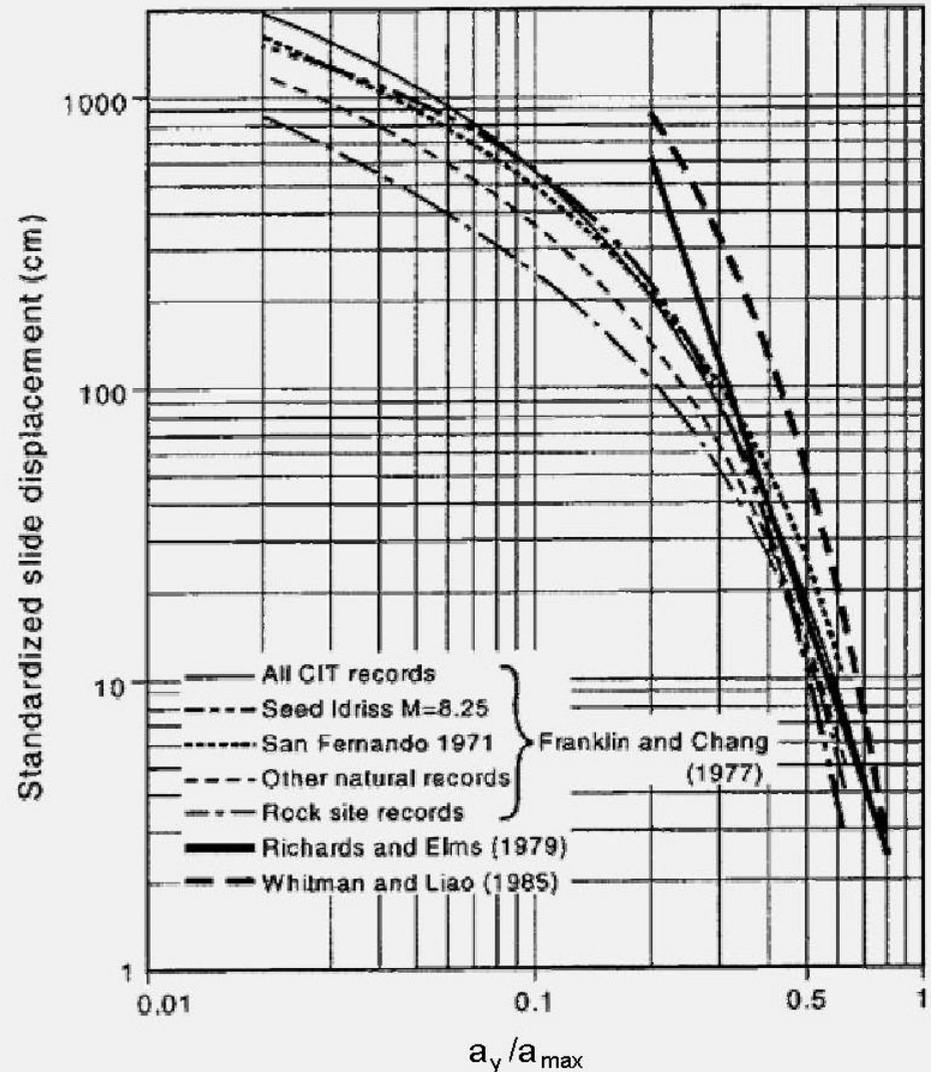
CALCOLO SPOSTAMENTI

- Analisi statistica degli sisma (casi reali e simulati)
- Richard & Elms (1979)

$$d = 0.22 \frac{v_{\max}^2 a_{\max}^3}{a_y^4}$$

- Whitman & Liao (1985)

$$d = \frac{330 \cdot v_{\max}^2}{a_{\max}} \exp(-9.4 a_y / a_{\max})$$



PROGETTO AGLI SPOSTAMENTI AMMISSIBILI

- Definire un opportuno valore di d
- Definire a_{\max} e v_{\max}
 - $a_{\max} = a_{gR} S \gamma_I$
 - $v_{\max} = 0.16 S T_C a_{\max}$

- Calcolare a_y

$$d = 0.22 \frac{v_{\max}^2 a_{\max}^3}{a_y^4}$$

- Si determina il peso W che assicura $F_s=1$

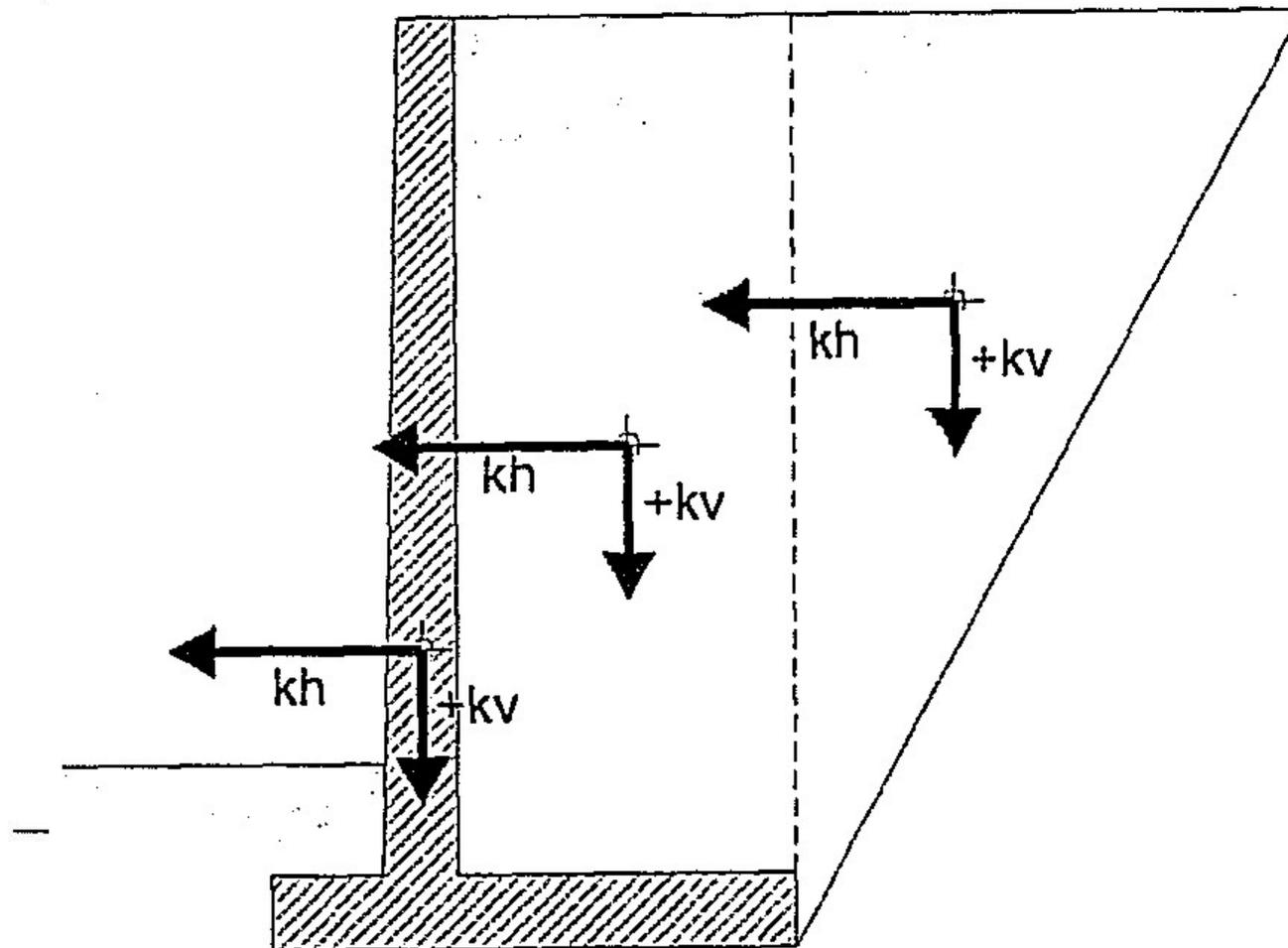
$$a_y = \left[\tan \delta - \frac{P_{AE} \cdot [\cos(\delta + 90 - \psi) - \sin(\delta + 90 - \psi) \cdot \tan \delta]}{W} \right] \cdot g$$

OPCM 3274, EC8: MURI A GRAVITA'

- **VERIFICHE:**
 - **Stabilita' globale (idoneita')**
 - **Slittamento (metodo delle forze o spostamenti ammissibili)**
 - **Rottura generale**
- **AZIONI:**
 - **Spinte (statica + dinamica) terreno**
 - **Spinte acqua (dinamica, EC8)**
 - **Forze inerzia muro**

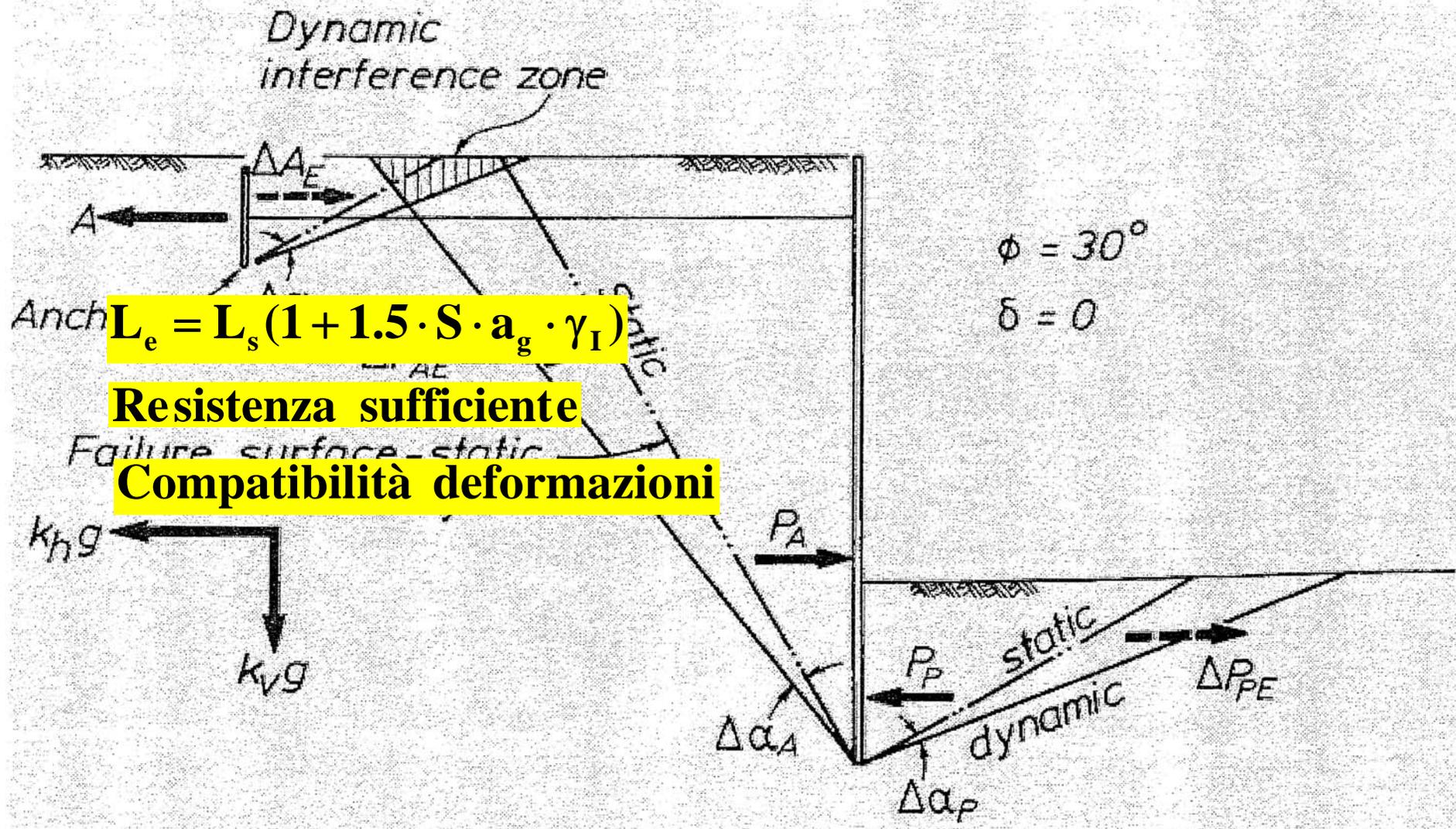
OPCM 3274, EC8: MURI A MENSOLA

EC8 -



- VE
- S
- S
- I
- AZ
- S
- S
- I
- RE

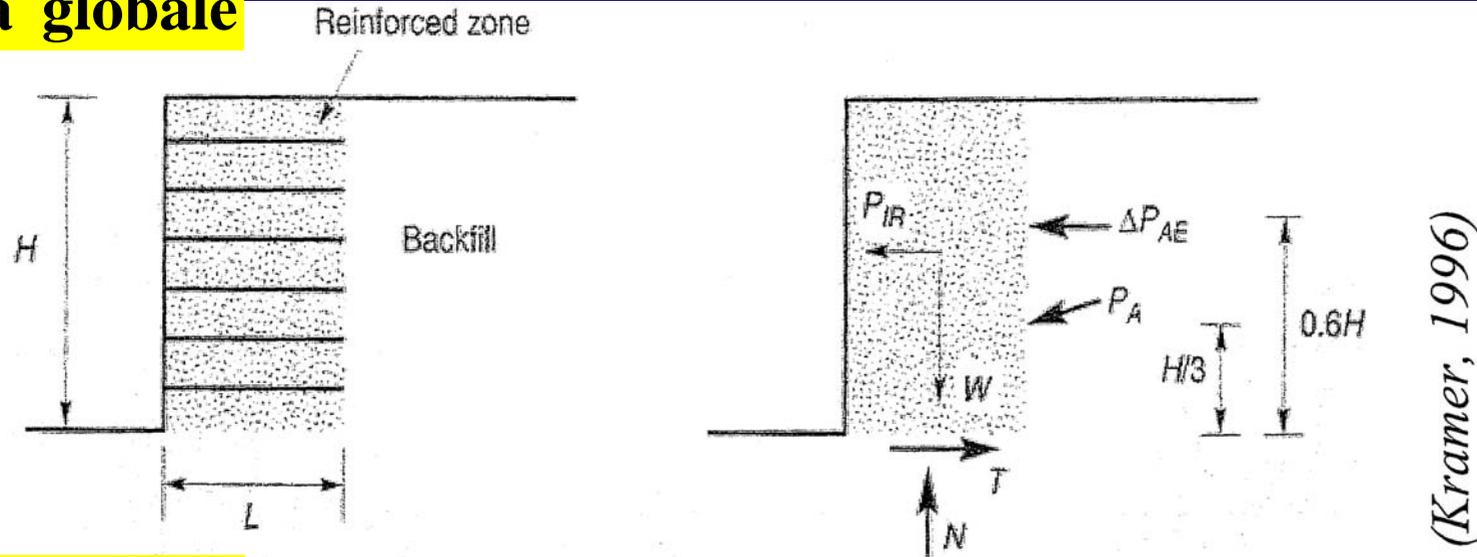
OPCM 3274, EC8: OPERE FLESSIBILI



(Elms & Richard, 1990)

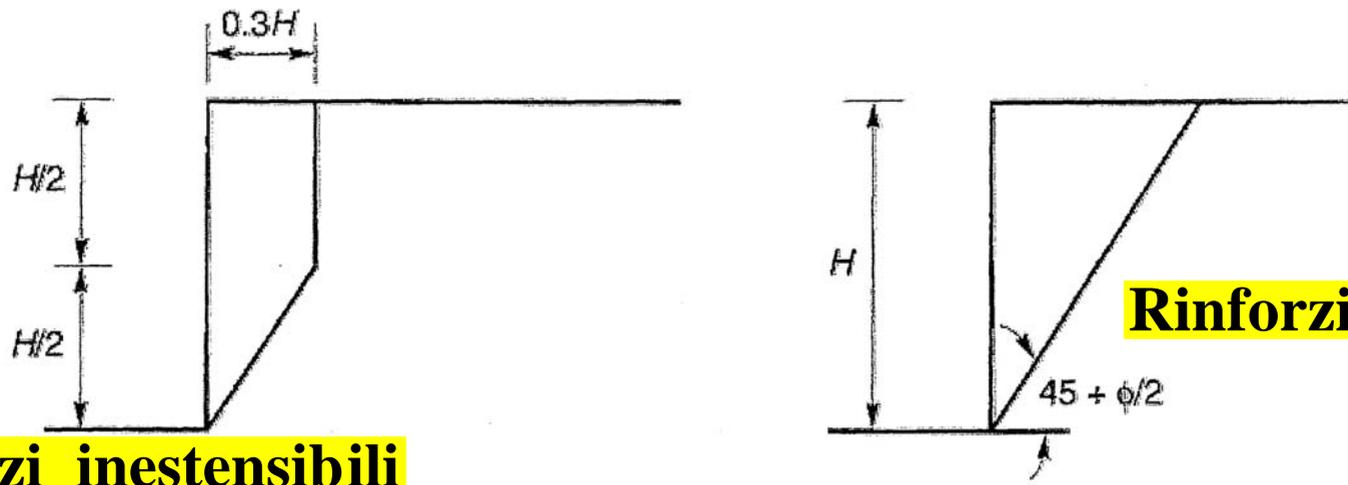
TERRE ARMATE

Stabilità globale



(Kramer, 1996)

Stabilità interna



Rinforzi estensibili

Rinforzi inestensibili

ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Sabbia densa

$$\varphi' = 40^\circ$$

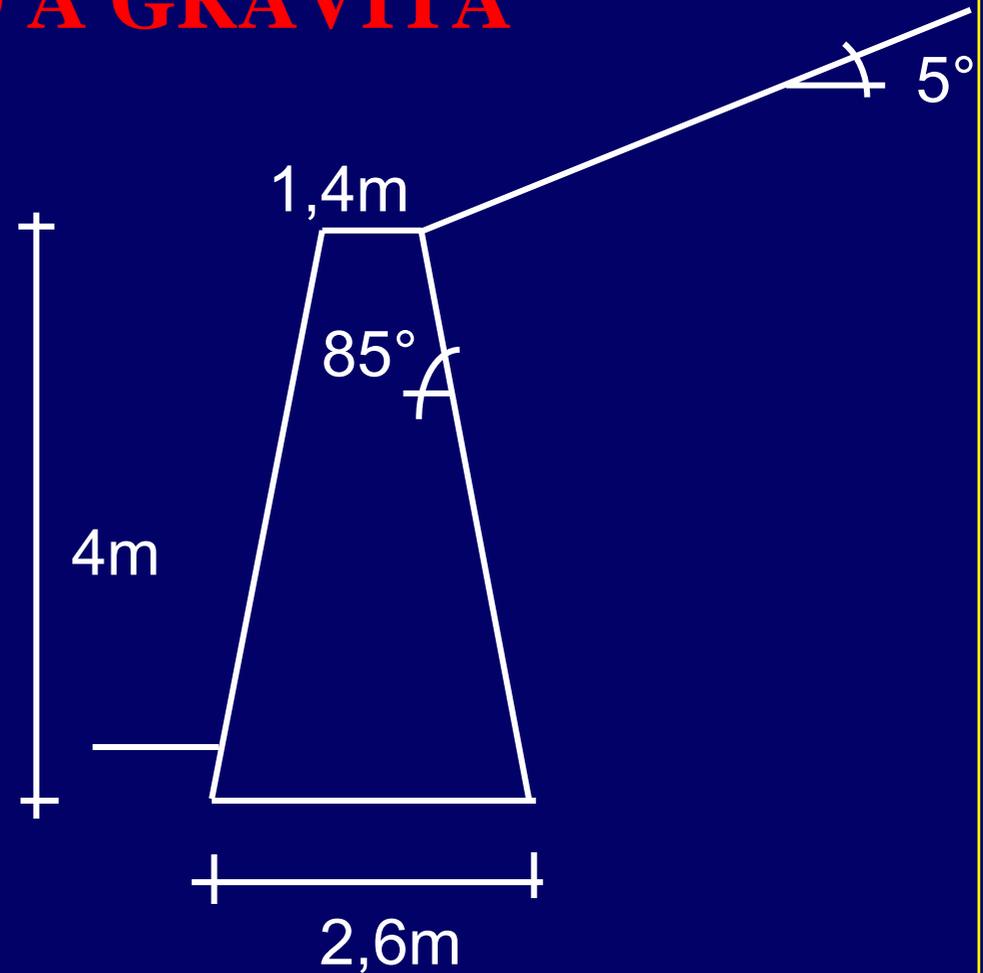
$$\gamma = 18 \frac{\text{kN}}{\text{m}^3}$$

$$a_g = 0,15 g$$

(zona 3)

$$S = 1,25$$

(Terreno classe B)



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 1: Accelerazione sismica verso l'alto

$$\phi' = 40^\circ$$

$$\gamma_M = 1,25$$

$$a_g = 0,150 \text{ g}$$

$$S = 1,25$$

$$k_h = 0,094$$

$$k_v = 0,047$$

$$r = 2$$

$$k_h = \frac{S \left(\frac{a_g}{g} \right)}{r} \quad k_v = 0.5 \cdot k_h$$

$$\phi'_d = 34^\circ$$

$$K_{AE} = 0,387$$

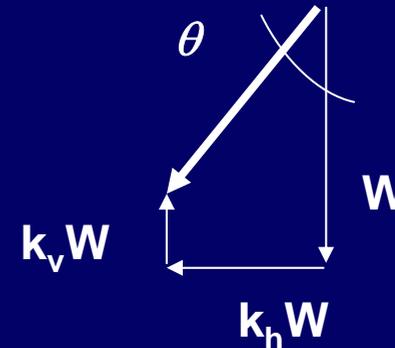
$$\delta_d = 24^\circ$$

$$K_{AS} = 0,312$$

$$\psi = 85^\circ$$

$$\beta = 5^\circ$$

$$\theta = 6^\circ$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 1: Accelerazione sismica verso l'alto

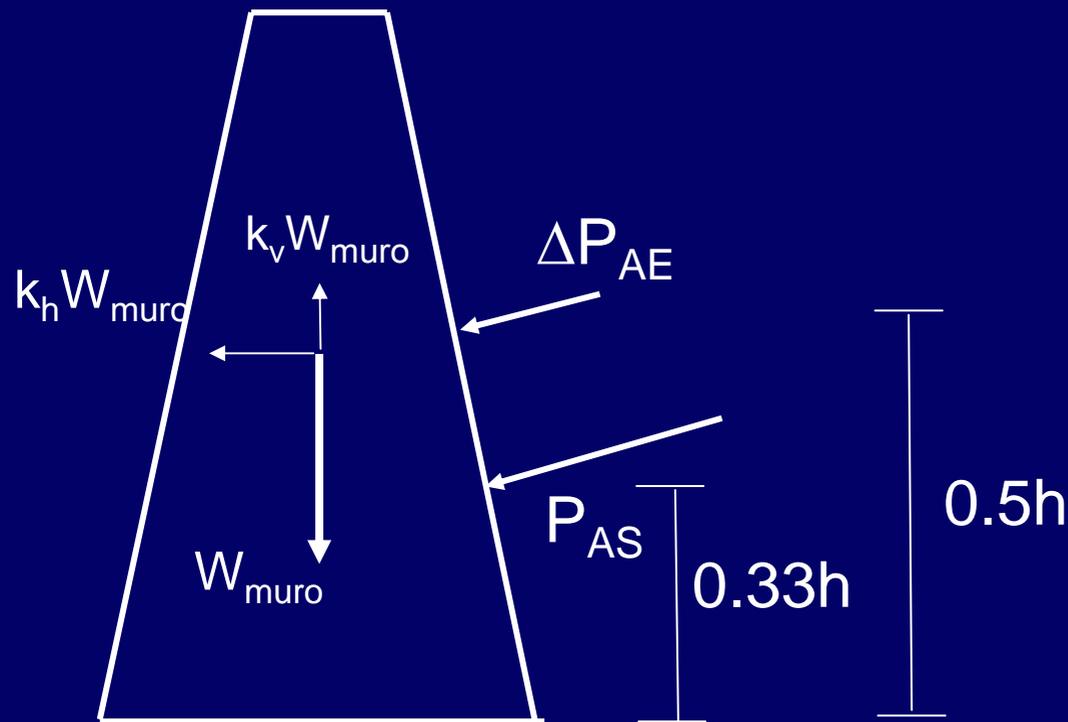
$$\gamma_{cls} = 23 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{\text{muro}} = 184 \text{ kN/m}$$

$$P_{AE} = 58 \text{ kN/m}$$

$$P_{AS} = 45 \text{ kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 13 \text{ kN/m}$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 1: Accelerazione sismica verso l'alto

VERIFICA A SLITTAMENTO

$$N_{sd} = 164 \quad \text{kN/m}$$

$$F_{Rd} = 72 \quad \text{kN/m}$$

$$V_{sd} = 69 \quad \text{kN/m}$$

$$N_{sd} = P_{AE,V} + W_{muro} (1 - k_h)$$

$$F_{Rd} = N_{sd} \tan \delta_d$$

$$V_{sd} = P_{AE,H} + W_{muro} k_h$$

$$F_{Rd} \geq V_{sd}$$

ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 2: Accelerazione sismica verso il basso

$$\phi' = 40^\circ$$

$$\gamma_{\phi'} = 1,25$$

$$a_g = 0,150 \text{ g}$$

$$S = 1,25$$

$$k_h = 0,094$$

$$k_v = 0,047$$

$$r = 2$$

$$k_h = \frac{S \left(\frac{a_g}{g} \right)}{r} \quad k_v = 0.5 \cdot k_h$$

$$\phi'_d = 34^\circ$$

$$K_{AE} = 0,380$$

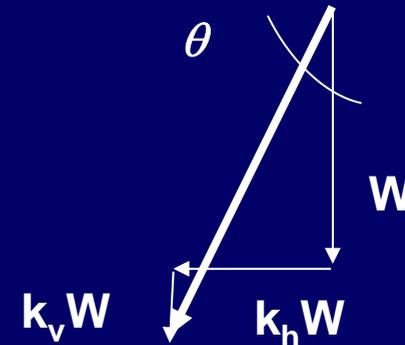
$$\delta_d = 24^\circ$$

$$K_{AS} = 0,312$$

$$\psi = 85^\circ$$

$$\beta = 5^\circ$$

$$\theta = 5^\circ$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 2: Accelerazione sismica verso il basso

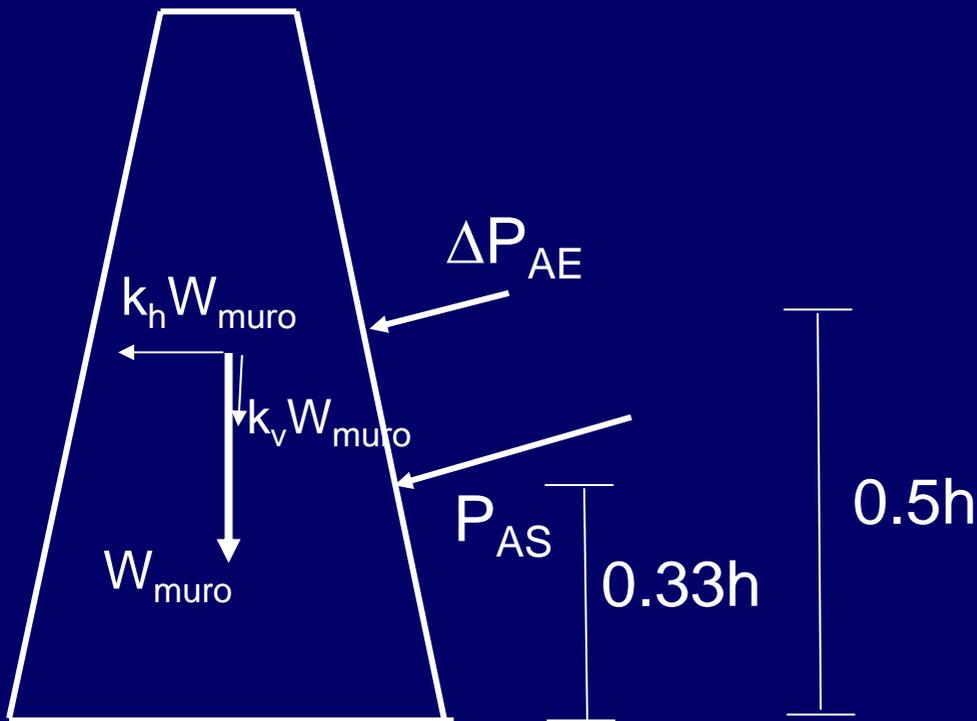
$$\gamma_{cls} = 23 \text{ kN/m}^3$$

$$W_{\text{muro}} = 184 \text{ kN/m}$$

$$P_{AE} = 52 \text{ kN/m}$$

$$P_{AS} = 45 \text{ kN/m}$$

$$\Delta P_{AE} = 7 \text{ kN/m}$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 2: Accelerazione sismica verso il basso

VERIFICA A SLITTAMENTO

$$N_{sd} = 178 \quad \text{kN/m}$$

$$F_{Rd} = 78 \quad \text{kN/m}$$

$$V_{sd} = 63 \quad \text{kN/m}$$

$$N_{sd} = P_{AE,V} + W_{muro} (1 - k_h)$$

$$F_{Rd} = N_{sd} \tan \delta_d$$

$$V_{sd} = P_{AE,H} + W_{muro} k_h$$

$$F_{Rd} \geq V_{sd}$$