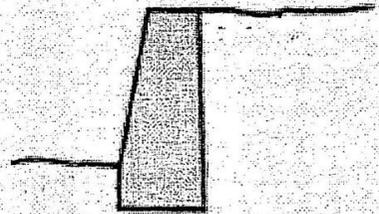
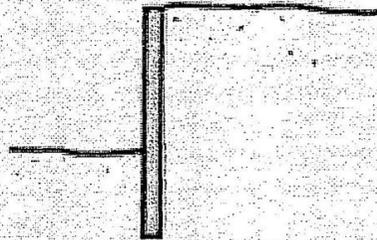


OPERE DI SOSTEGNO

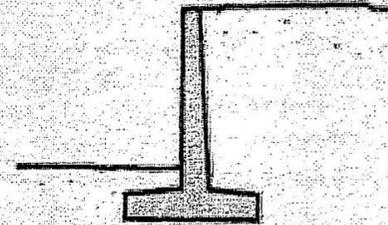
TIPOLOGIE STRUTTURALI



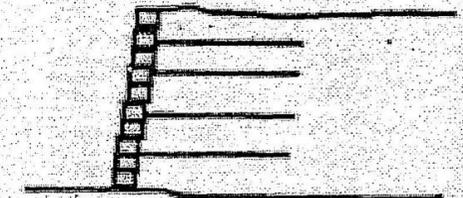
Gravity wall



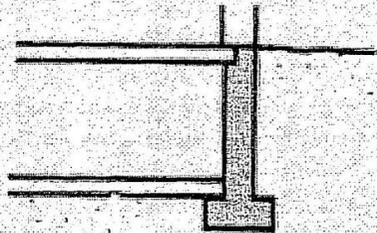
Cantilever wall



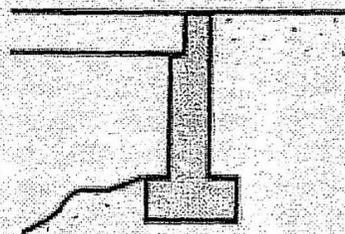
Cantilever wall



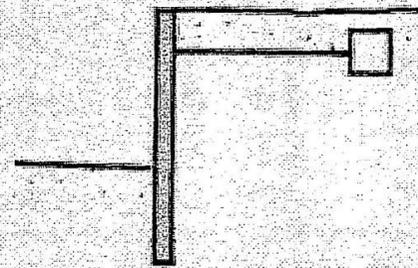
Reinforced soil wall



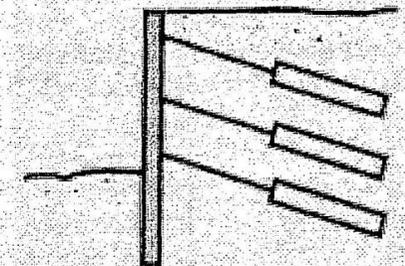
Basement wall



Bridge abutment wall



Anchored bulkhead



Tieback wall

Normativa: OPCM 3274, NTC 14.01.2008

- **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**

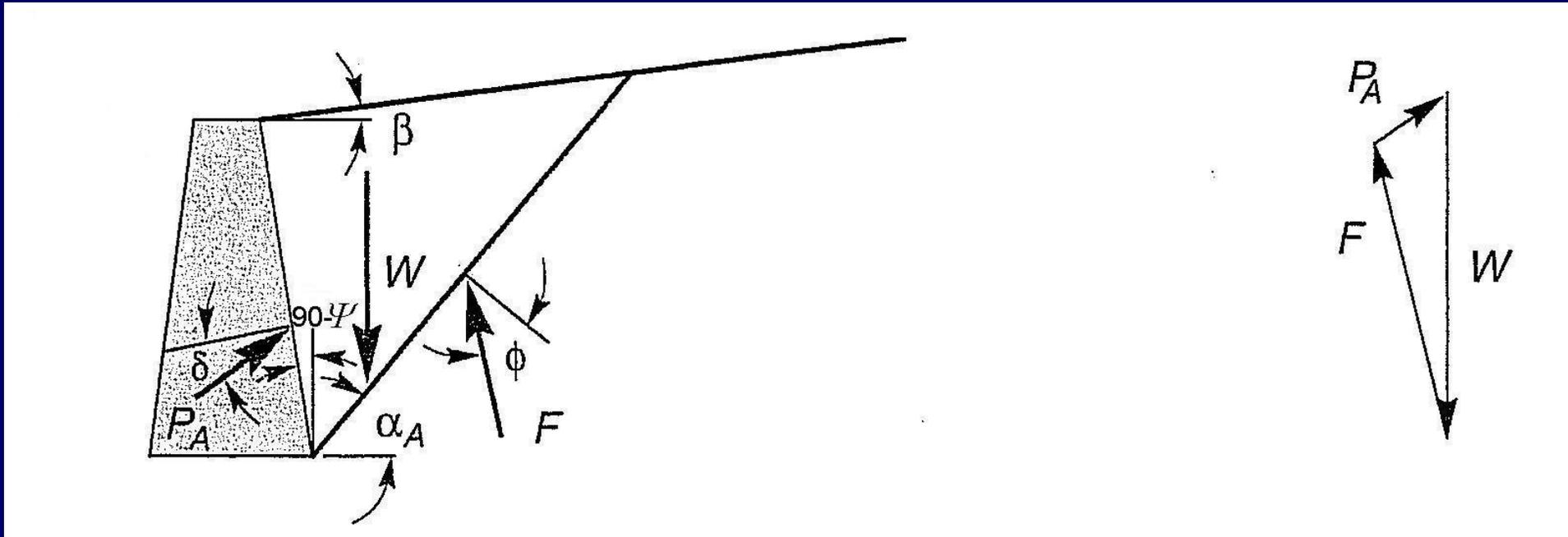
IPOTESI DI BASE (1)

- **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**

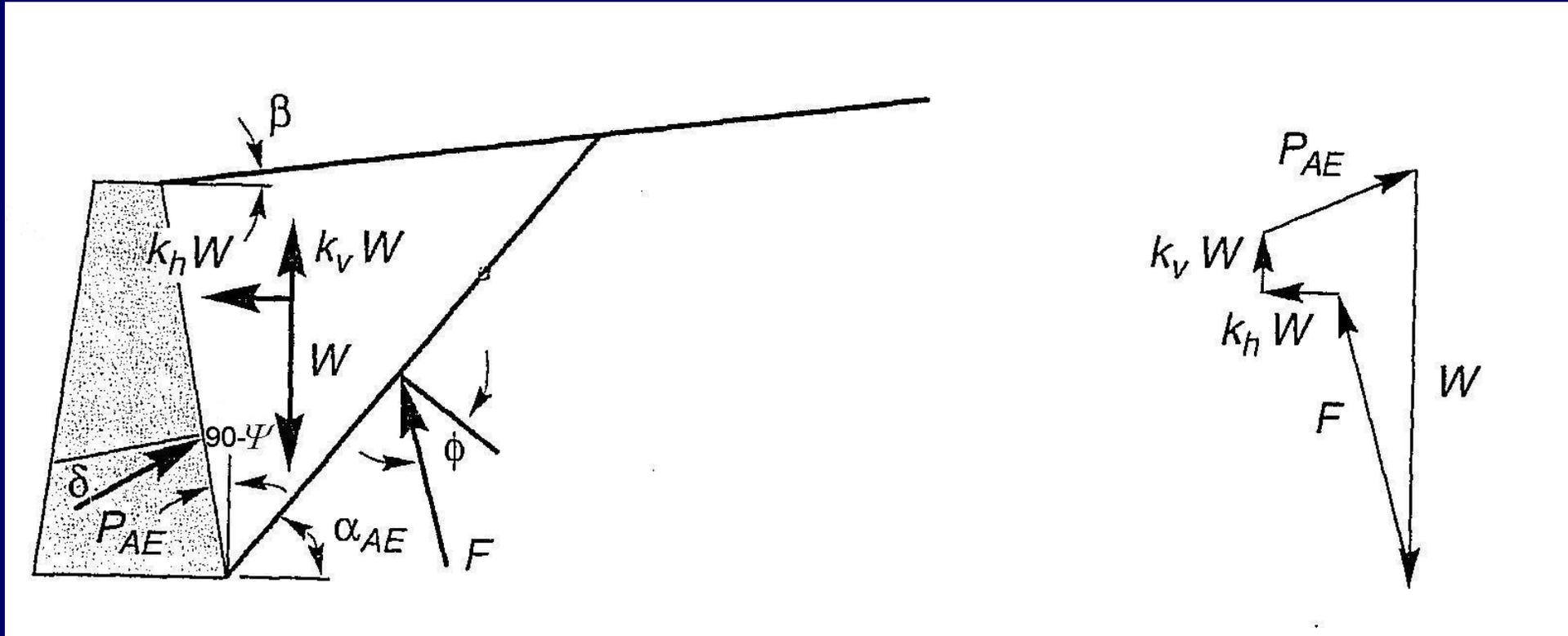
IPOTESI DI BASE (2)

- **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)



INTERPRETAZIONE GRAFICA (Kramer 1996)



NTC 14.01.2008: Metodi Pseudostatici (M-O) – COEFFICIENTI SISMICI

$$k_h = \beta_m \cdot \frac{a_{max}}{g} \quad a_{max} = S \cdot a_g = S_S \cdot S_T \cdot a_g$$

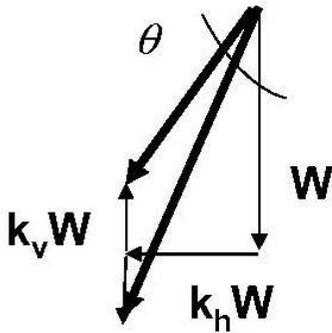
$$k_v = \pm 0,5 \cdot k_h$$

a_{max} = accelerazione orizzontale massima attesa al sito;

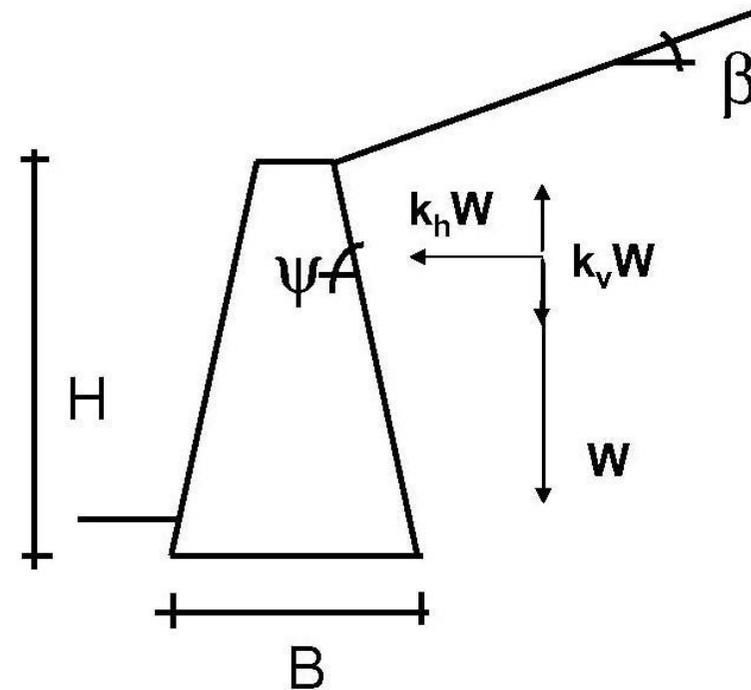
g = accelerazione di gravità.

	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

EQUAZIONI (1): EC8; NTC 2008



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



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

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: $\delta = 0$**

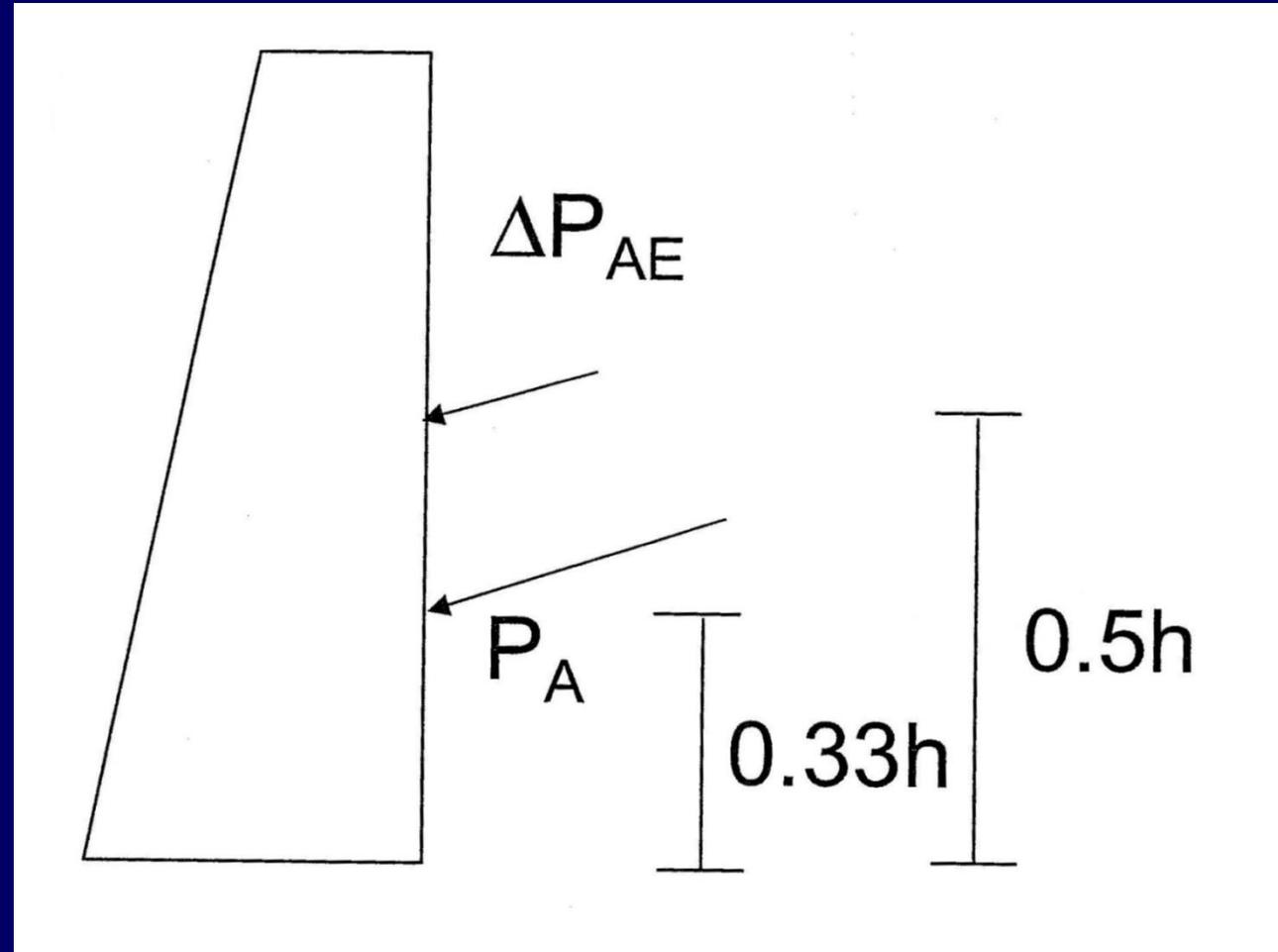
$$K = \frac{\text{sen}^2(\psi + \varphi' - \theta)}{\cos \theta \cdot \text{sen}^2 \psi \cdot \text{sen}(\psi + \theta) \left[1 - \sqrt{\frac{\text{sen}(\varphi') \cdot \text{sen}(\varphi' + \beta - \theta)}{\text{sen}(\psi + \theta) \cdot \text{sen}(\psi + \beta)}} \right]^2}$$

PUNTO DI APPLICAZIONE

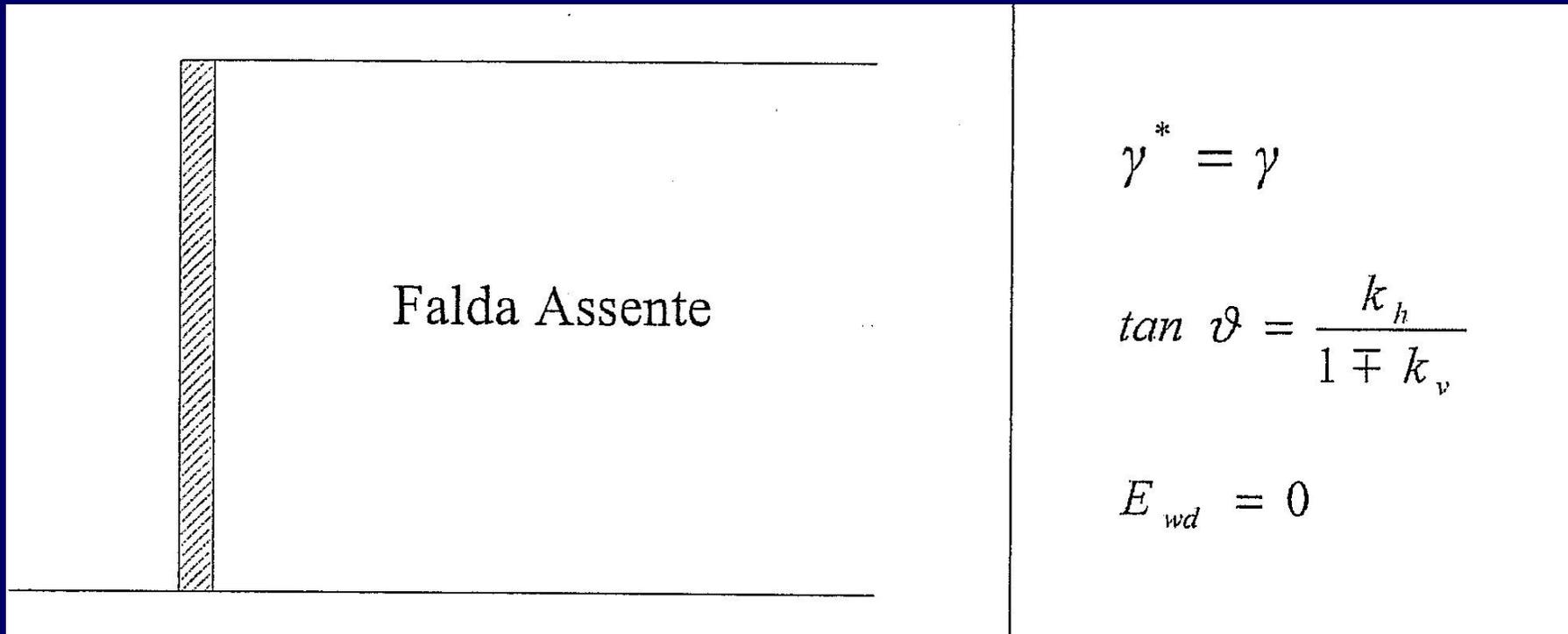
$$E_d = P_A + \Delta P_{AE}$$

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

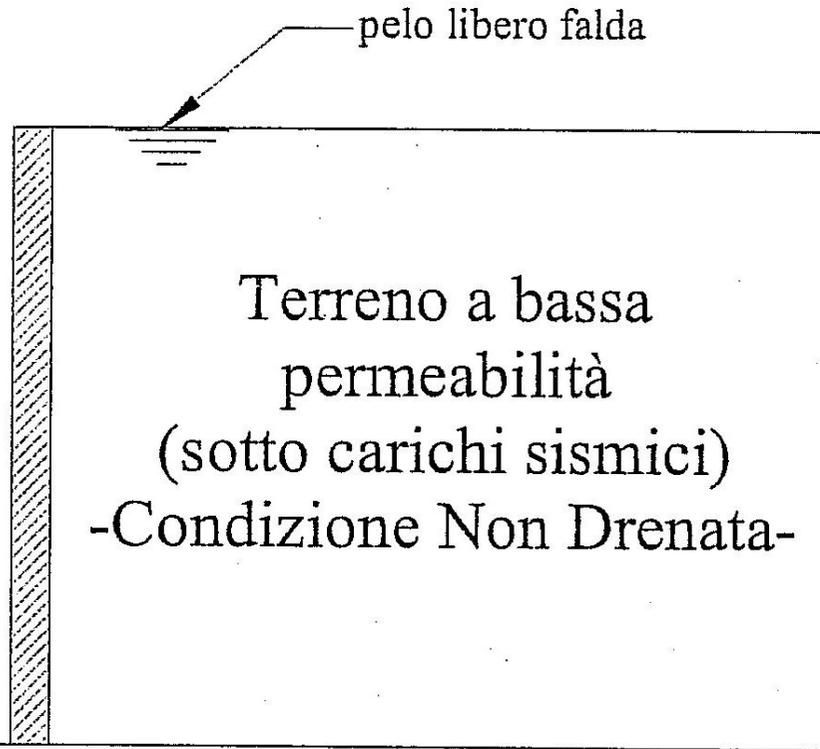
$$\Delta P_{AE} = E_d - P_A$$



SPINTA DELL'ACQUA (1):



SPINTA DELL'ACQUA (1):



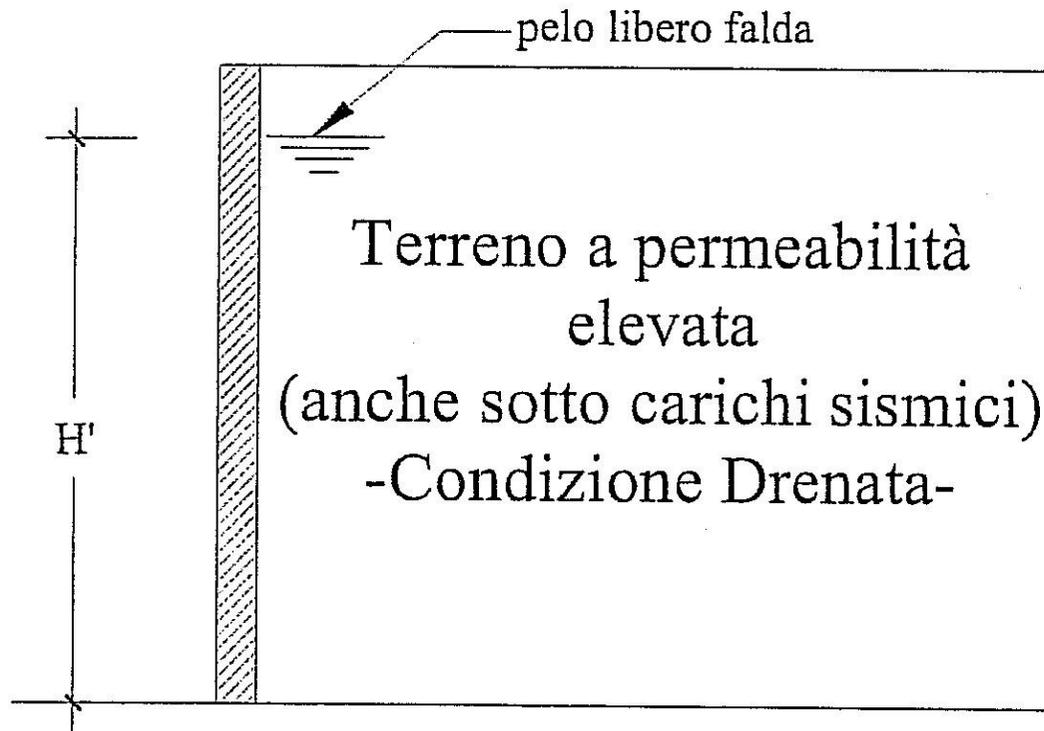
$$\gamma^* = \gamma - \gamma_w = \gamma'$$

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

$$E_{wd} = 0$$

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)**

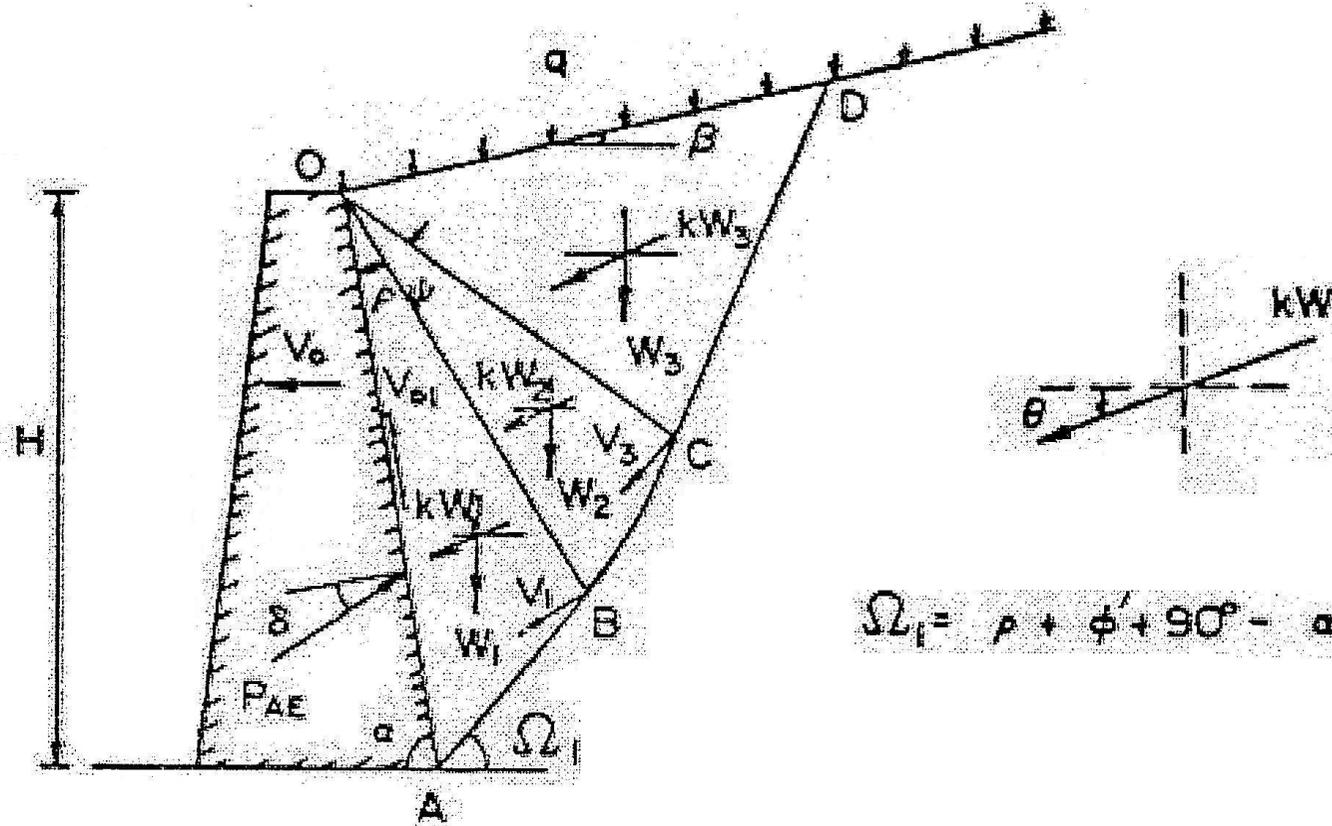
$$q(z) = \pm \frac{7}{8} k_h \gamma_w \sqrt{hz}$$

LIMITI (M – O)

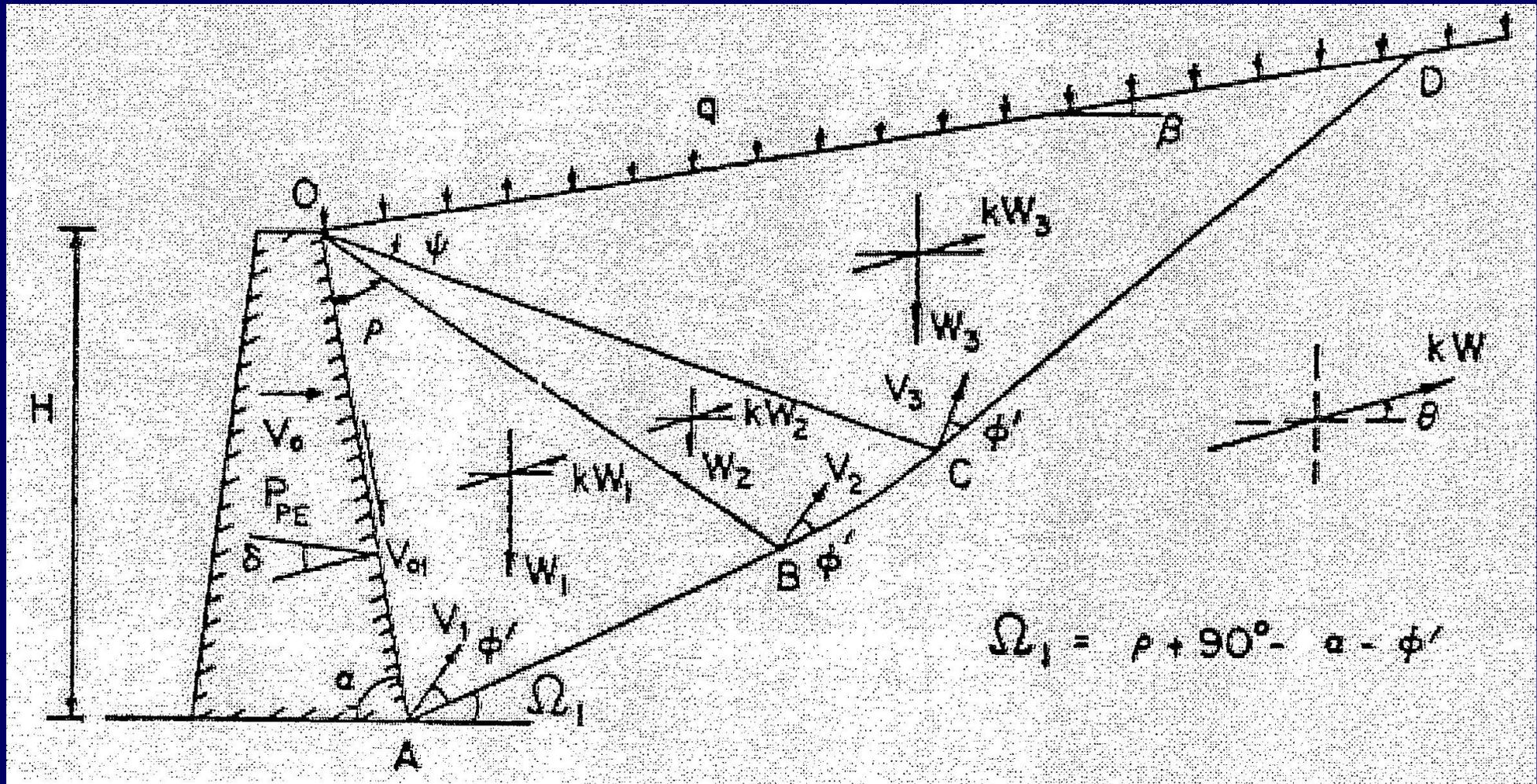
- **Rapporto tra componente verticale e orizzontale ($\theta \leq \varphi$)**
- **Sovrastima K_{PE} (come nel caso statico)**
- **Opere che non ammettono spostamenti**
- **Deformabilità terrapieno**
 - **Amplificazione (Opere alte)**
 - **Differenze di fase**

SUPERFICI DI ROTTURA CURVILINEE

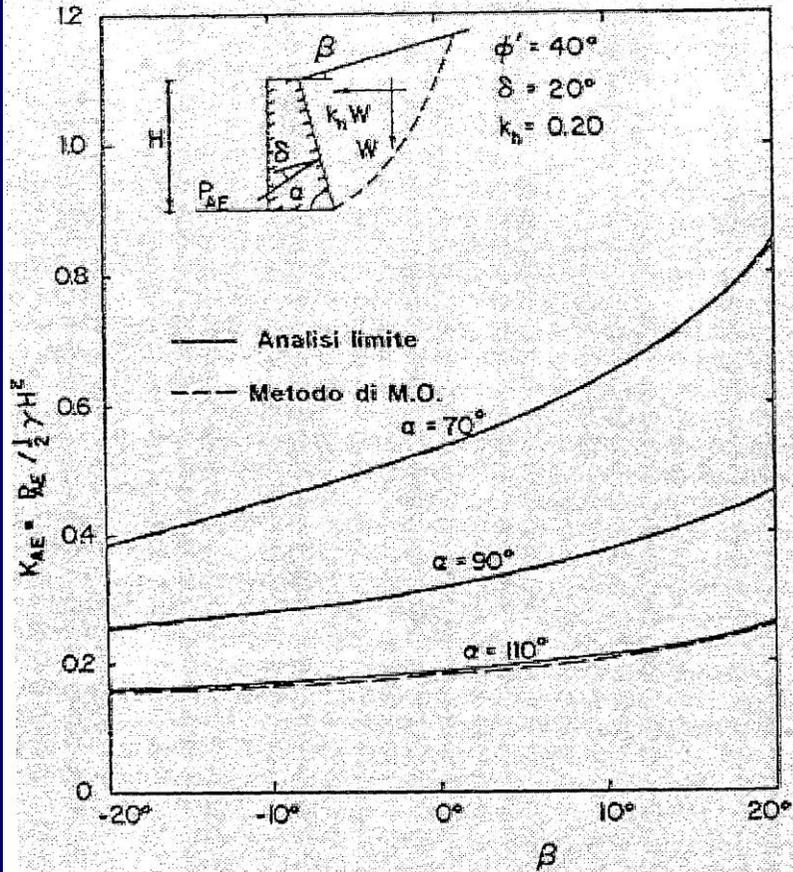
Attiva



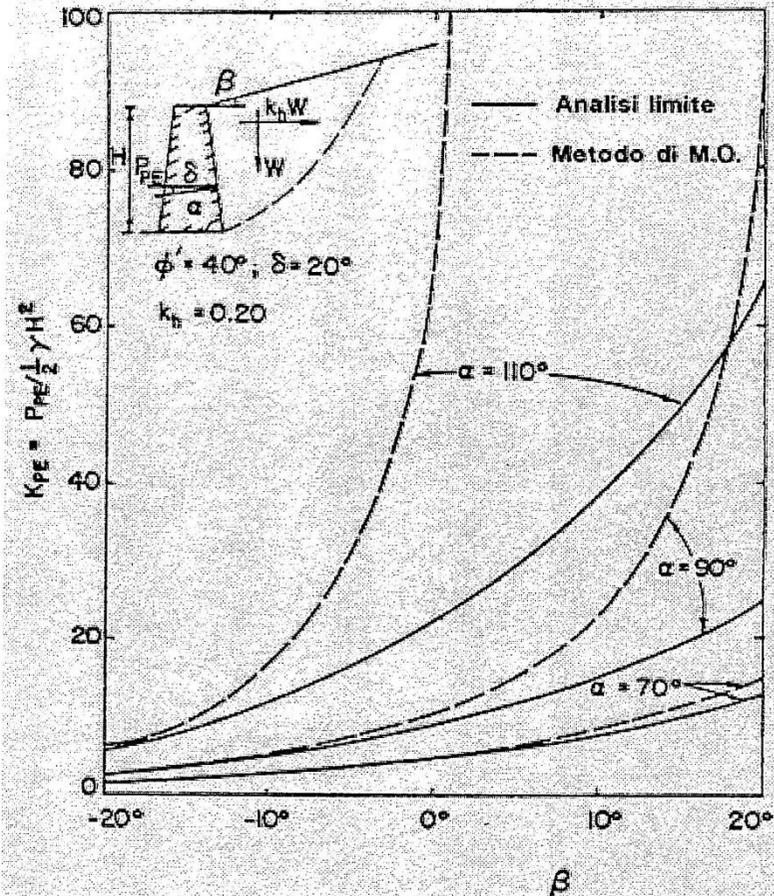
SUPERFICI DI ROTTURA CURVILINEE



MODIFICA DEI COEFFICIENTI DI SPINTA

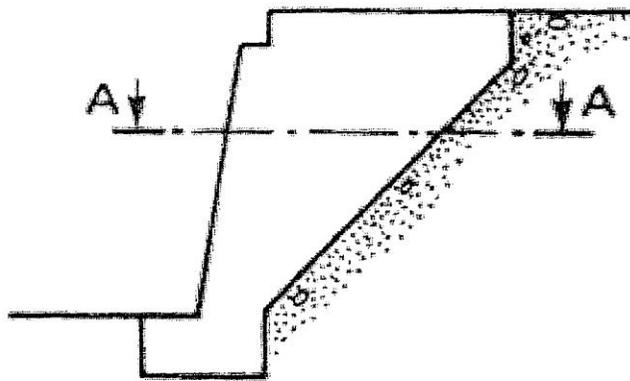
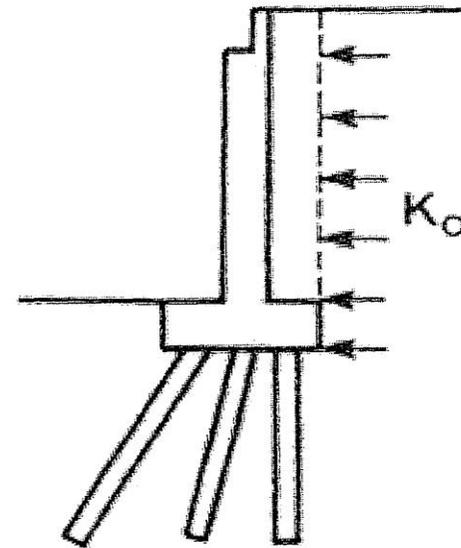
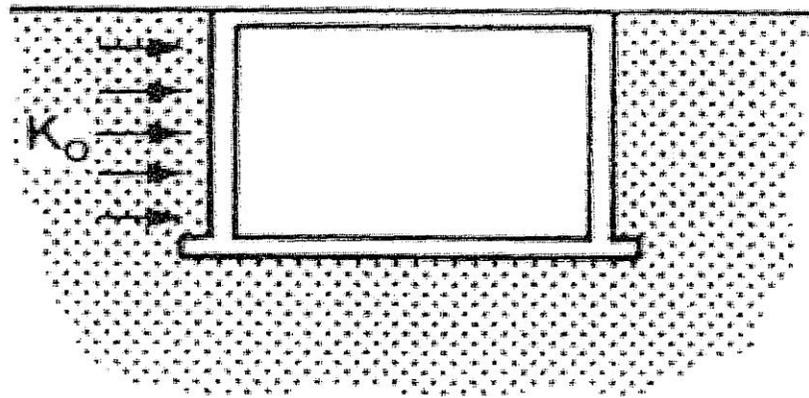


CONFRONTO DEI VALORI DI K_{AE} TRA ANALISI LIMITE E METODO DI M.O.

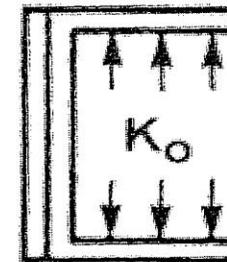


CONFRONTO DEI VALORI DI K_{PE} TRA ANALISI LIMITE E METODO DI M.O.

OPERE NON SOGGETTE A SPOSTAMENTI



SECTION A-A



(Lancellotta, 1993)

ANALISI ELASTICA: SPOSTAMENTI IMPEDITI

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

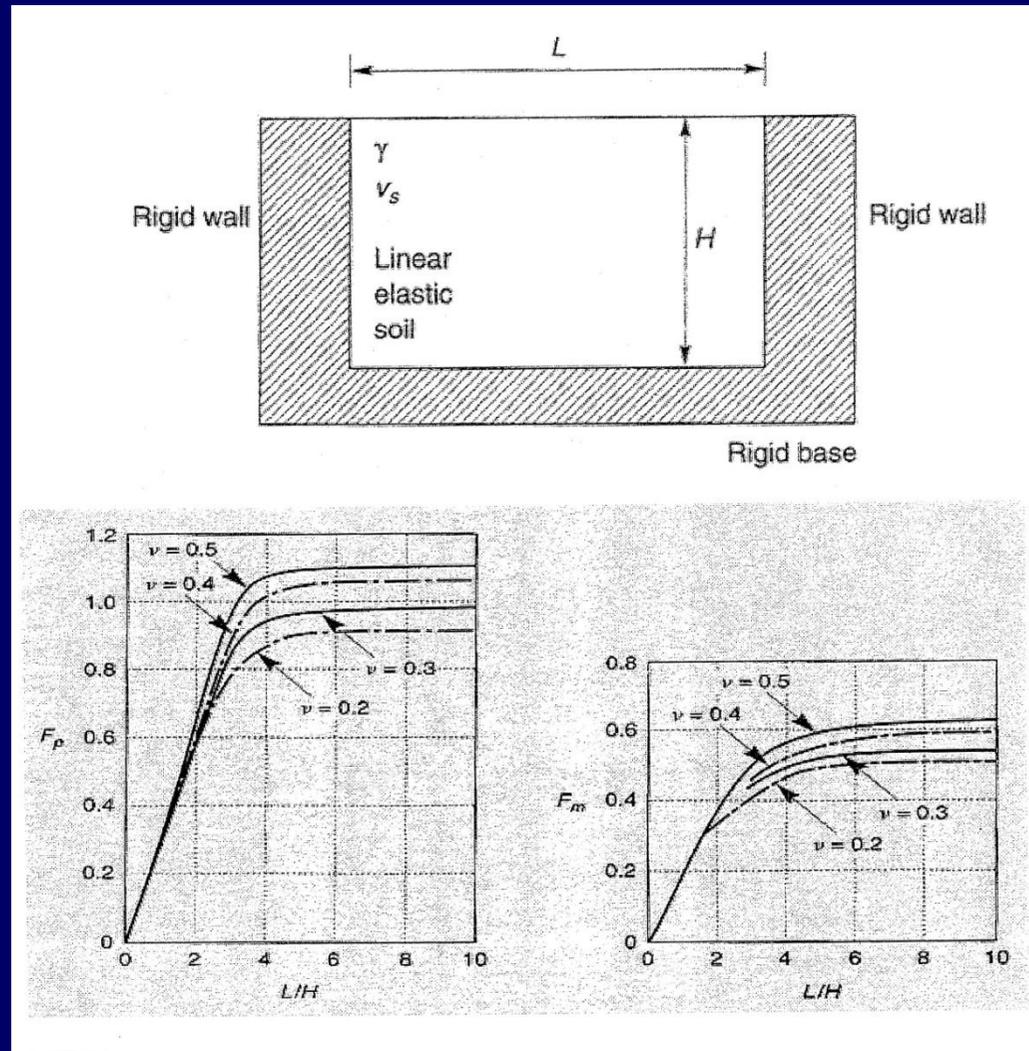
$$\Delta P_{eq} = \gamma H^2 \frac{a_h}{g} F_p$$

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

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

OPCM 3274

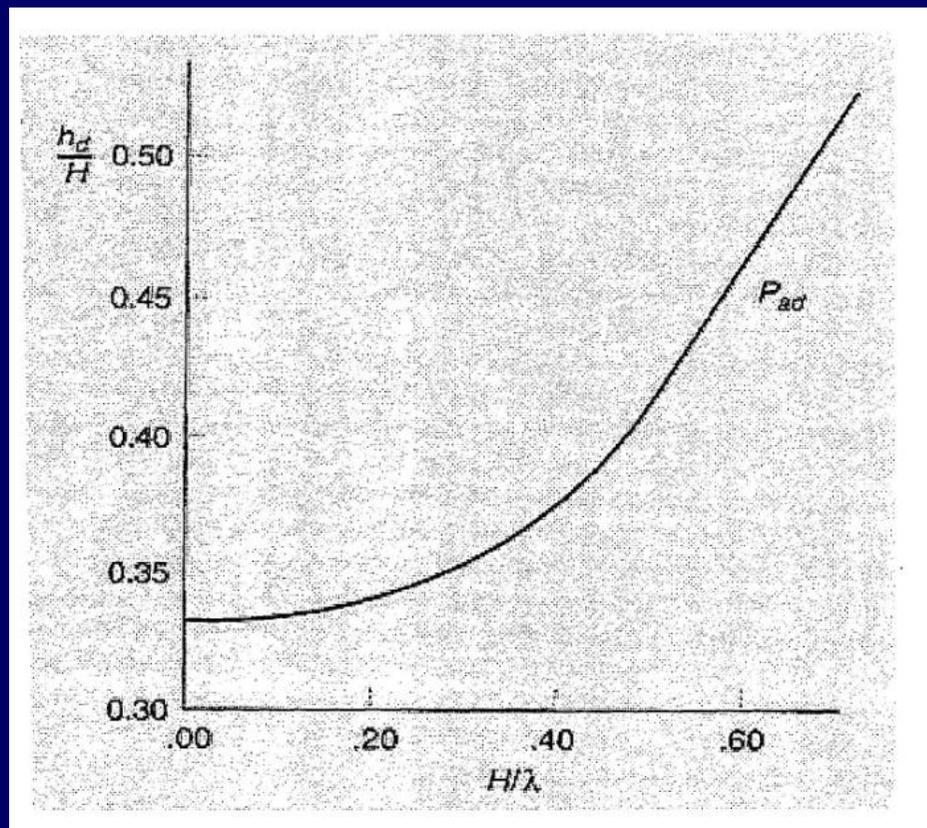
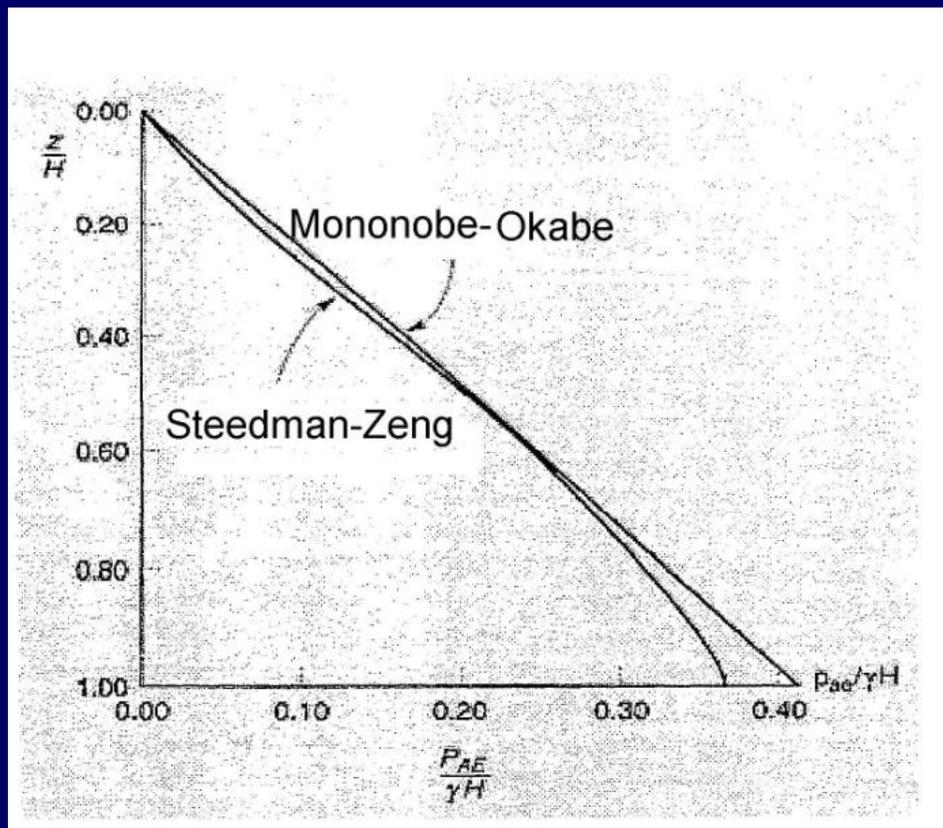
$$\Delta P_d = \frac{a_g}{g} S \cdot \gamma_I \cdot \gamma \cdot H^2$$



DEFORMABILITA' TERRAPIENO

- **Metodi pseudo-dinamici (Steedman & Zeng 1990)**
 - Differenza di fase
 - Accelerazione variabile con z
 - Dipendenza da H/λ (lunghezza d'onda = V_s/f)
- **Principali conseguenze:**
 - Amplificazione (muri alti)
 - Punto di applicazione

DEFORMABILITA' TERRAPIENO



OPCM 3274, NTC 2008: OPERE ALTE

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

CALCOLO SPOSTAMENTI: NEWMARK

$$T = F_h + (P_{AE})_h$$

$$N = W + (P_{AE})_v$$

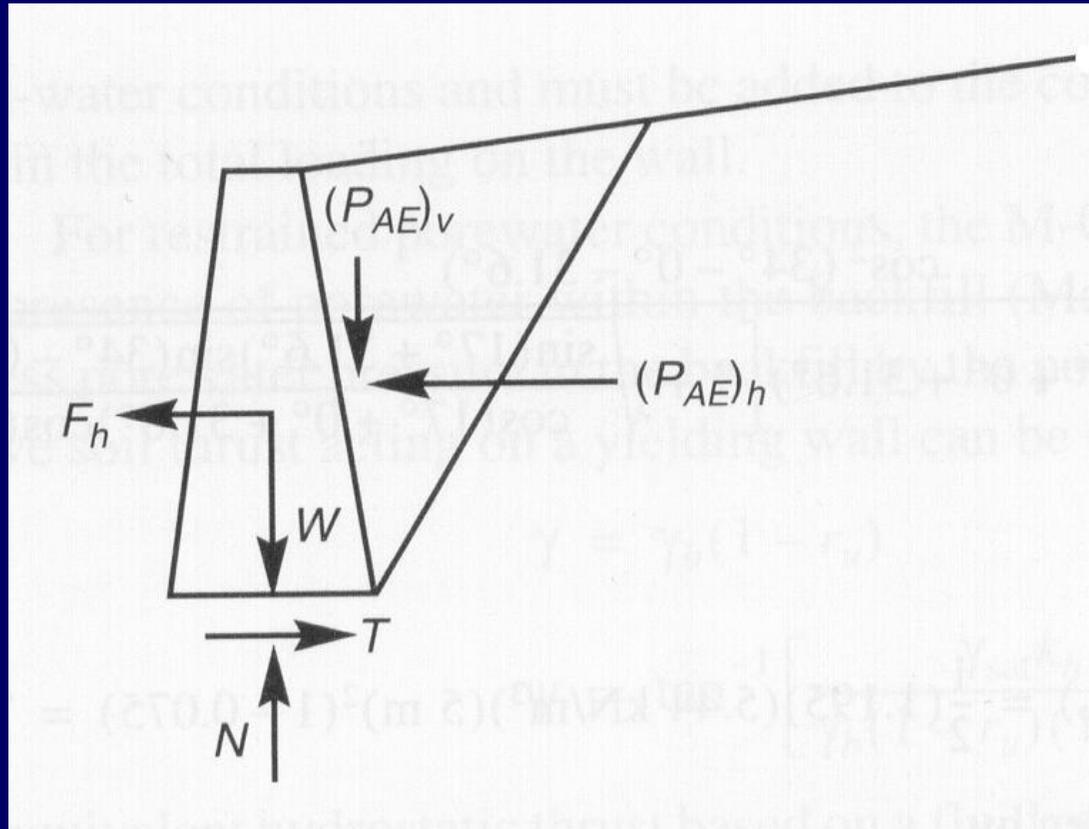
$$T = N \cdot \tan(\delta)$$

$$F_h = \frac{a_y}{g} W$$

$$(P_{AE})_h = P_{AE} \cos(\delta + 90 - \psi)$$

$$(P_{AE})_v = P_{AE} \sin(\delta + 90 - \psi)$$

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



CALCOLO SPOSTAMENTI

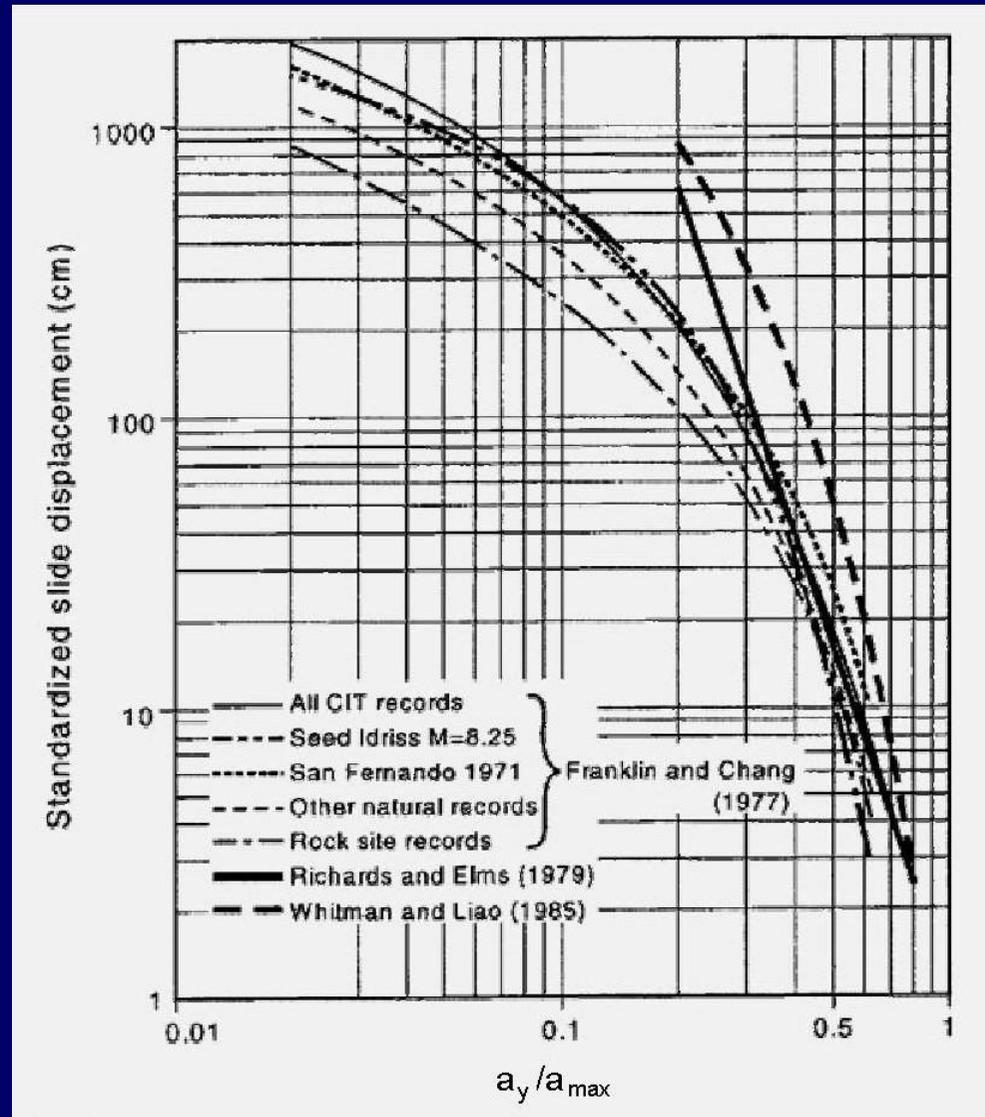
- **Analisi statistica degli spostamenti indotti dal sisma (casi reali e sintetici)**
- **Richard & Elms (1979)**

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

- **Whitman & Liao (1985)**

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

CALCOLO SPOSTAMENTI



PROGETTO AGLI SPOSTAMENTI AMMISSIBILI

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

- 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, NTC '08: MURI A GRAVITA'

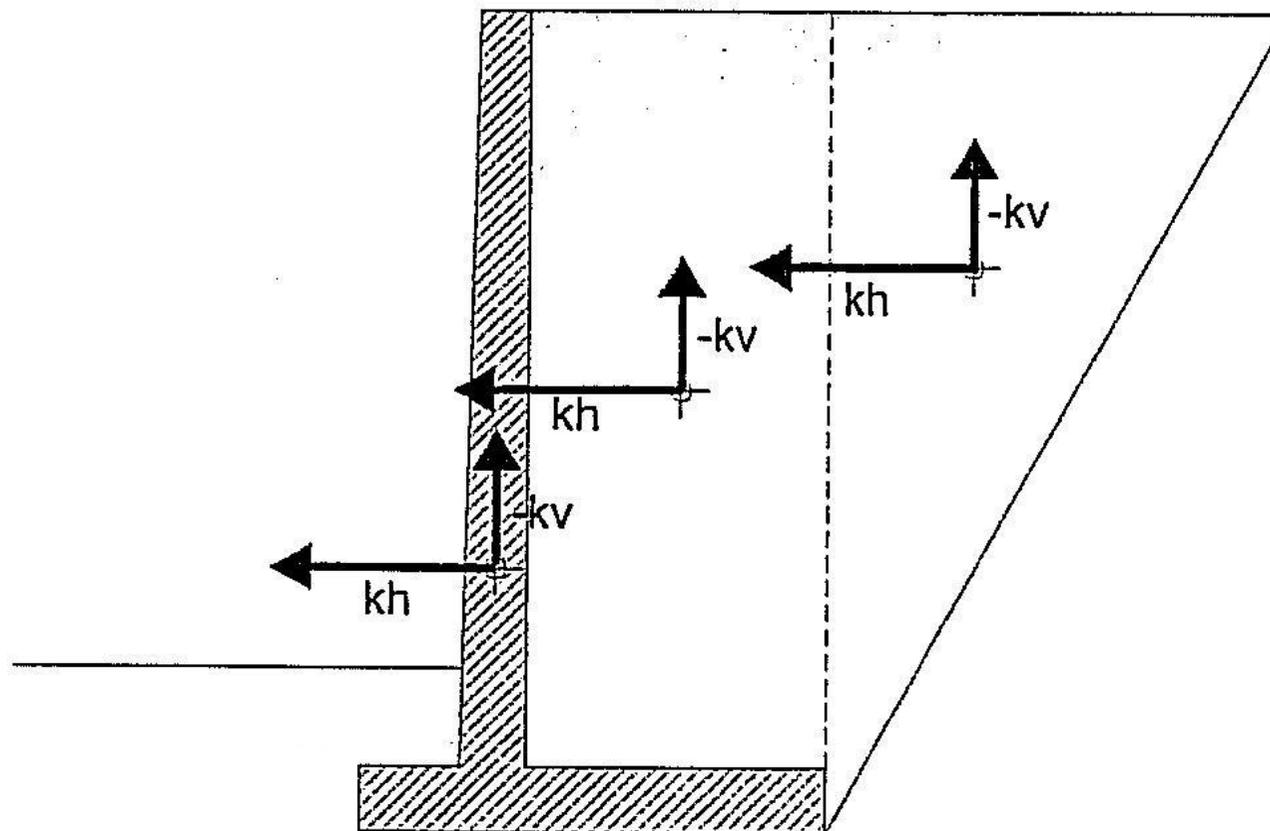
- **VERIFICHE:**
 - **Stabilita' globale (idoneita')**
 - **Slittamento (metodo delle forze o spostamenti ammissibili)**
 - **Rottura generale**
- **AZIONI:**
 - **Spinte (statica + dinamica) terreno**
 - **Spinte acqua (dinamica, EC8)**
 - **Forze inerzia muro**

OPCM 3274, EC8, NTC '08: MURI A MENSOLA

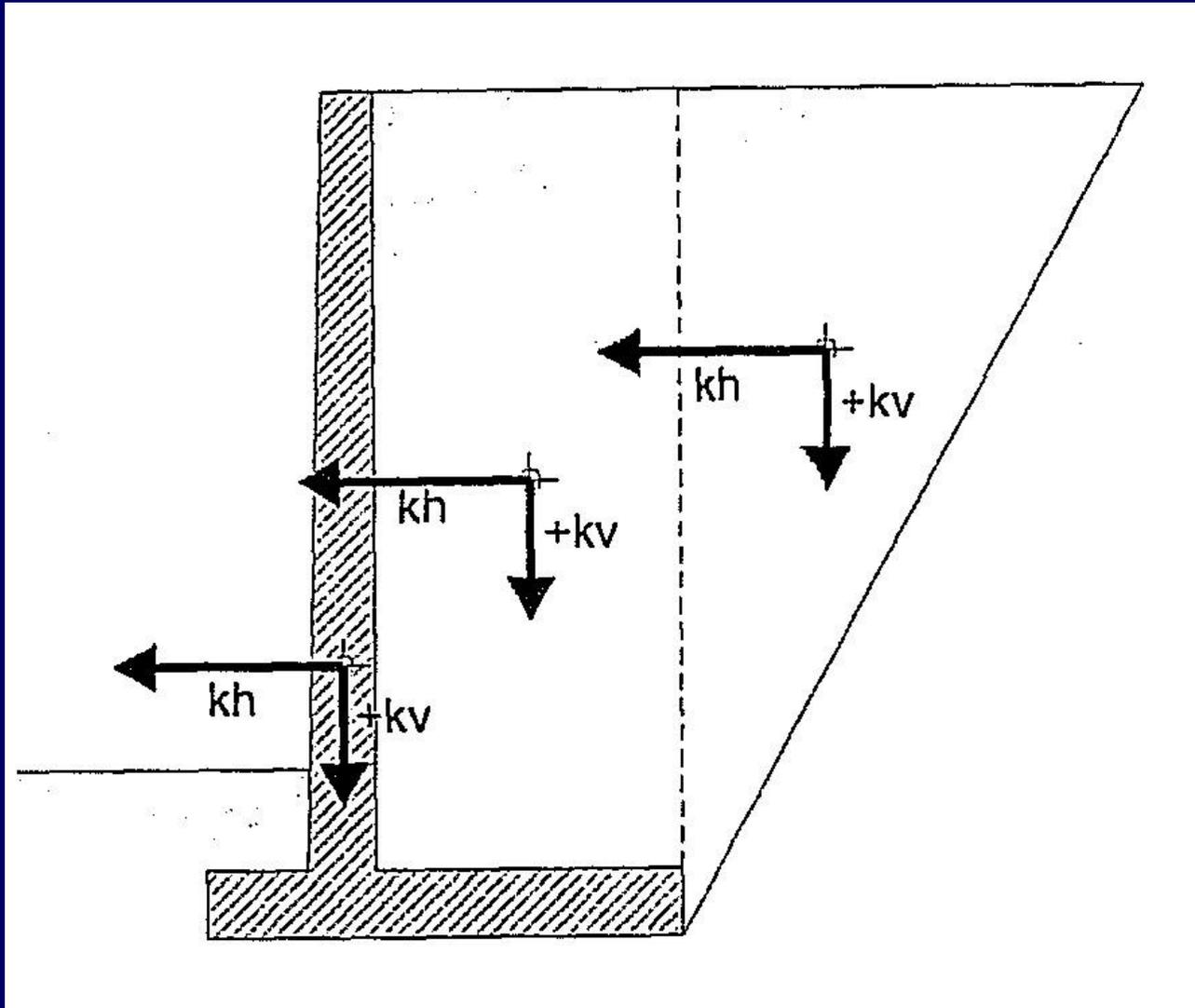
- **VERIFICHE:**
 - Stabilità globale (idoneità)
 - Slittamento
 - Rottura generale
- **AZIONI**
 - Spinte (statica + dinamica) terreno
 - Spinte acqua (dinamica, EC8)
 - Forze inerzia muro (solo orizzontale)
- **RESISTENZA STRUTTURALE ($R_d > S_d$)**

OPCM 3274, EC8, NTC '08: MURI A MENSOLA

EC8 - Parte 5



OPCM 3274, EC8, NTC '08: MURI A MENSOLA

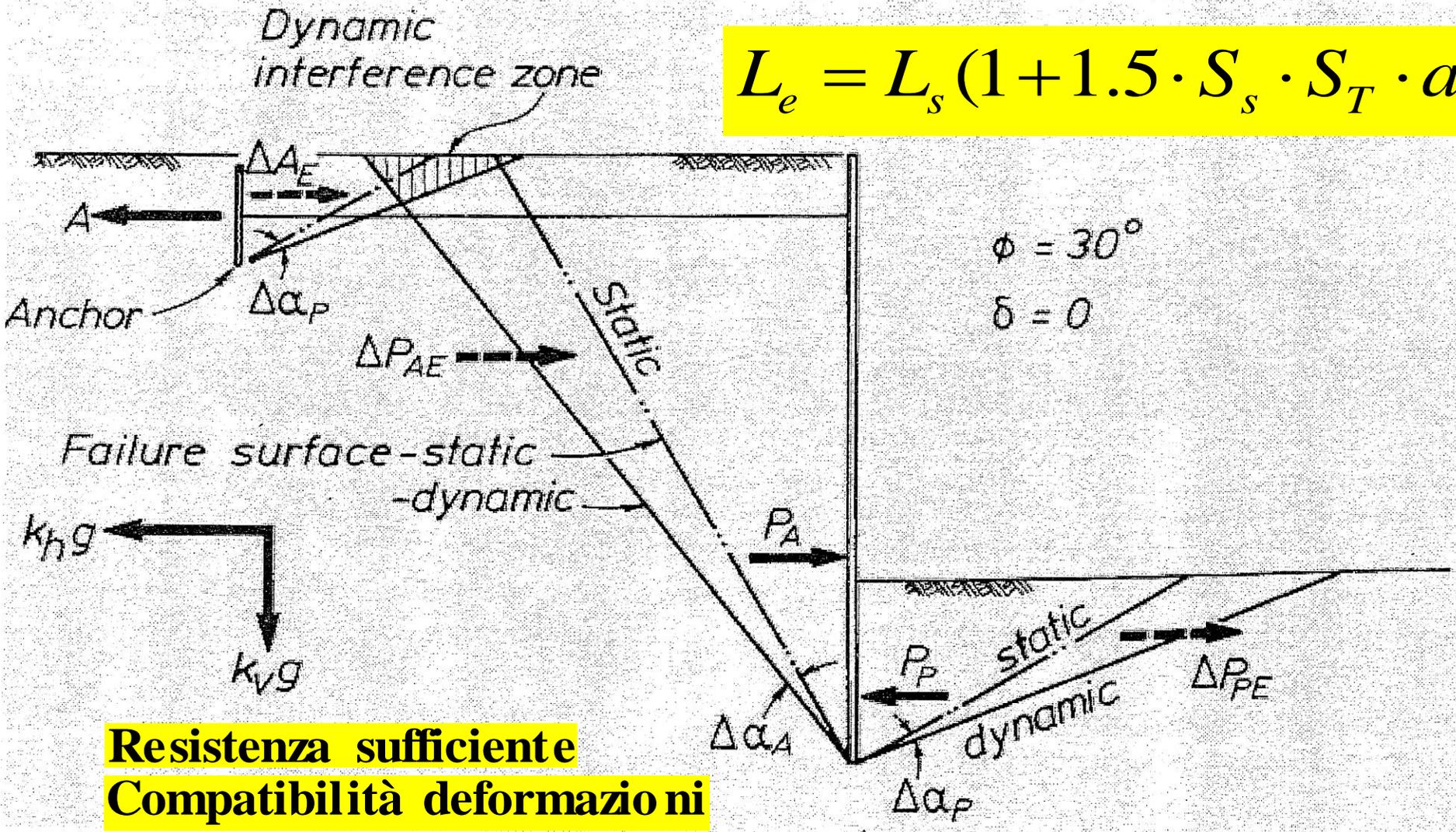


OPCM 3274, EC8, NTC '08: OPERE FLESSIBILI

- **VERIFICHE:**
 - **Stabilita' globale (idoneita')**
 - **Slittamento**
 - **Rottura generale**
- **AZIONI**
 - **Spinte (statica + dinamica) terreno**
 - **Spinte acqua (dinamica, EC8)**
- **RESISTENZA STRUTTURALE ($R_d > S_d$)**
- **ANCORAGGIO, LUNGHEZZA D'INFISSIONE**

OPCM 3274, EC8, NTC '08: OPERE FLESSIBILI

$$L_e = L_s (1 + 1.5 \cdot S_s \cdot S_T \cdot a_{gR})$$



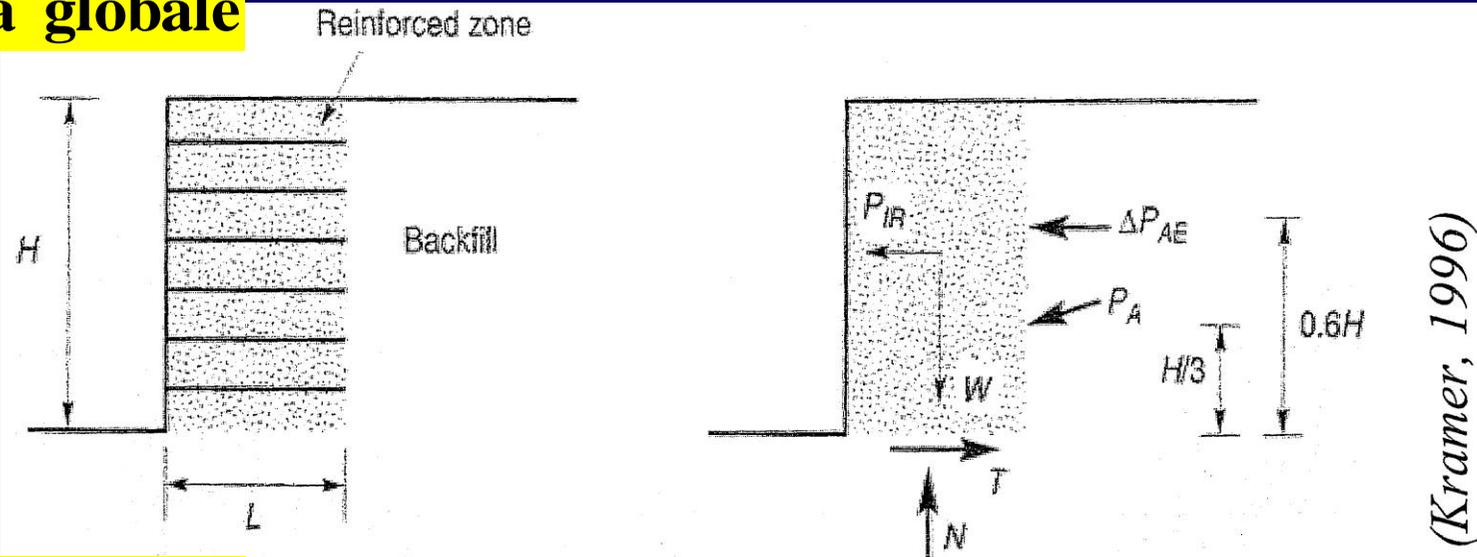
Resistenza sufficiente
Compatibilità deformazioni

(Elms & Richard, 1990)

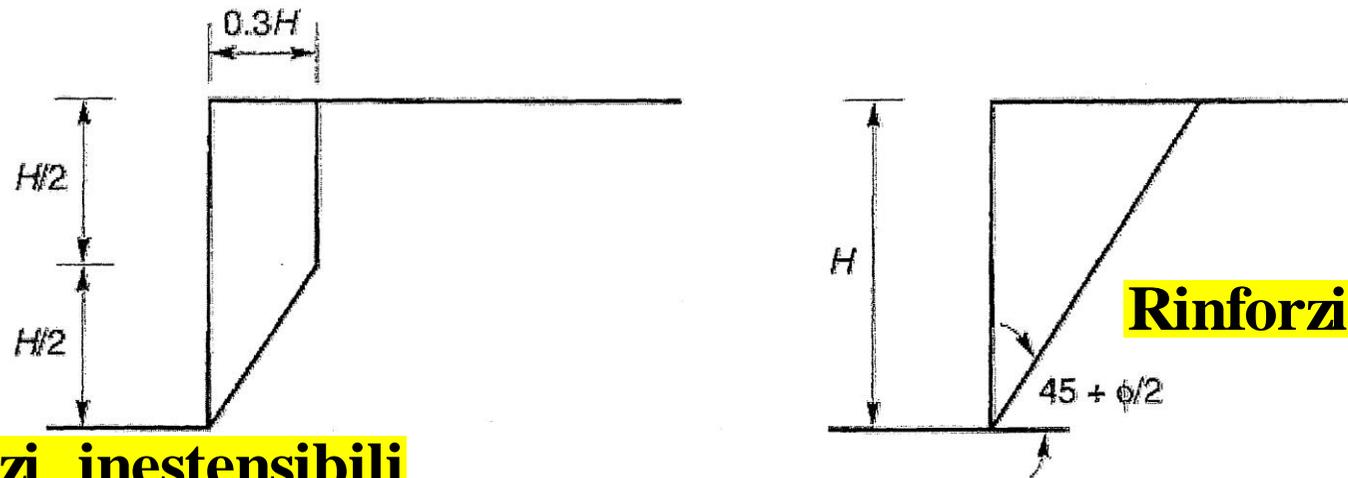


TERRE ARMATE

Stabilità globale



Stabilità interna



Rinforzi estensibili

Rinforzi inestensibili

ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Sabbia densa

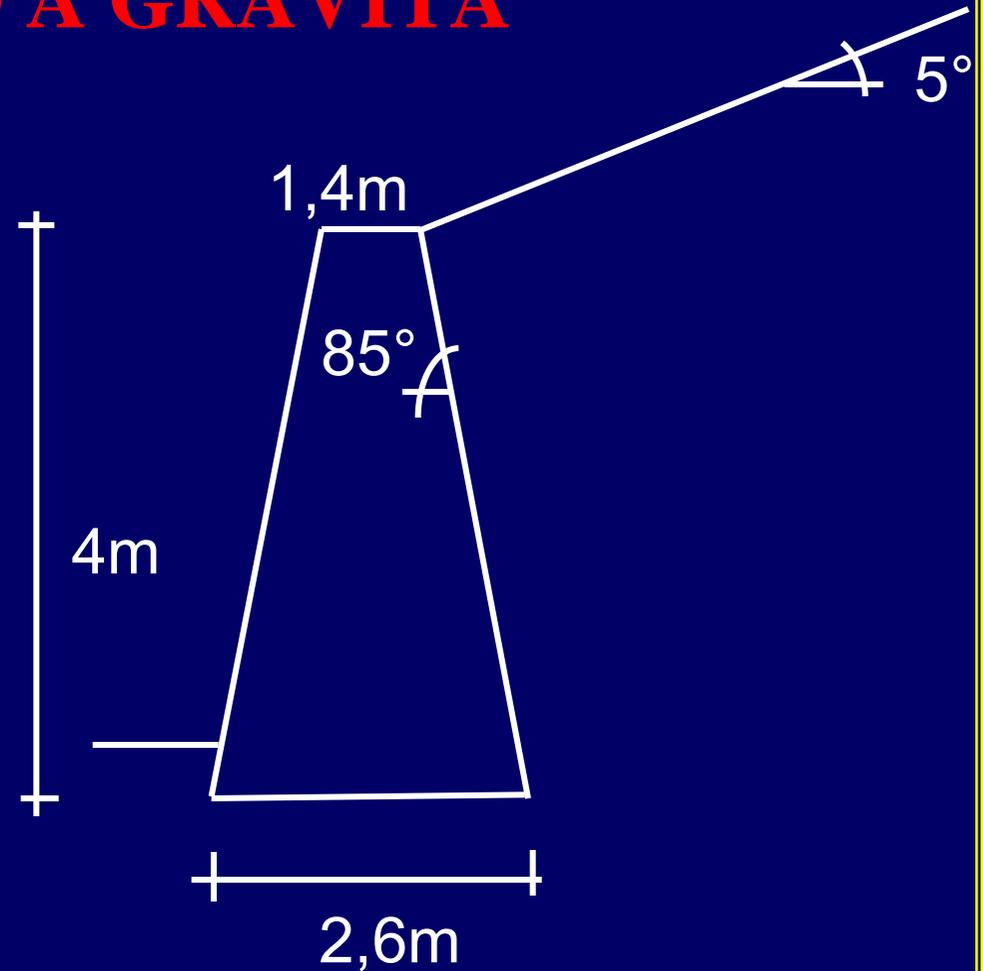
$$\varphi' = 40^\circ$$

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

$$a_g = 0,15g$$

$$S_s = 1,20 \quad (\text{Terreno classe B})$$

$$S_T = 1,00$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 1: Accelerazione sismica verso l'alto

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

$$\gamma_M = 1,25$$

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

$$S_s = 1,20$$

$$k_h = 0,043$$

$$k_v = 0,022$$

$$\beta_m = 0.24$$

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

$$K_{AE} = 0,342$$

$$\delta_d = 24^\circ$$

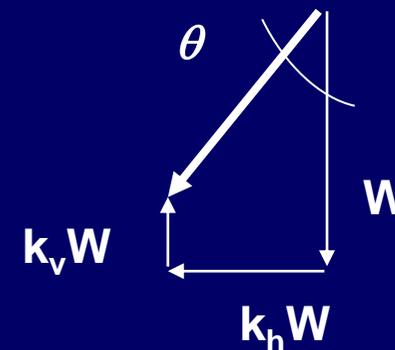
$$K_{AS} = 0,312$$

$$\psi = 85^\circ$$

$$\beta = 5^\circ$$

$$\theta = 2.5^\circ$$

$$k_h = \beta_m \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \quad k_v = 0.5 \cdot k_h$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 1: Accelerazione sismica verso l'alto

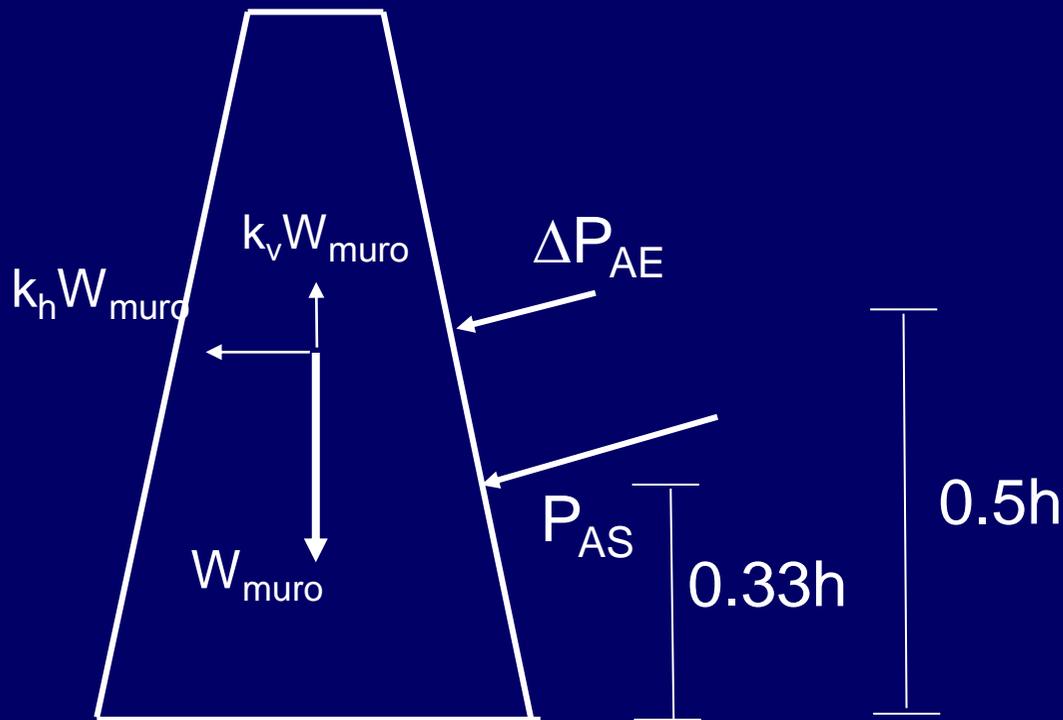
$$\gamma_{cls} = 23 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{AE} = 48 \text{ kN/m}$$

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

$$\Delta P_{AE} = 3 \text{ kN/m}$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 1: Accelerazione sismica verso l'alto

VERIFICA A SLITTAMENTO

$$N_{Ed} = 203 \quad \text{kN/m}$$

$$F_{Rd} = 90 \quad \text{kN/m}$$

$$T_{Ed} = 50 \quad \text{kN/m}$$

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

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

$$T_{Ed} = P_{AE,H} + W_{muro} k_h$$

$$F_{Rd} \geq T_{Ed}$$

ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 2: Accelerazione sismica verso il basso

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

$$\gamma_M = 1,25$$

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

$$S_s = 1,20$$

$$k_h = 0,043$$

$$k_v = 0,022$$

$$\beta_m = 0.24$$

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

$$K_{AE} = 0,340$$

$$\delta_d = 24^\circ$$

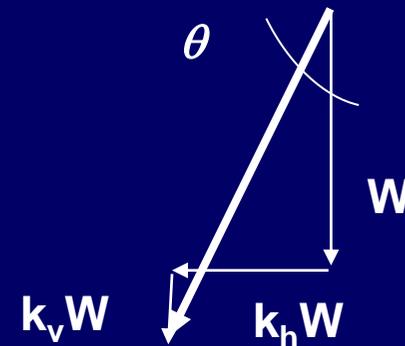
$$K_{AS} = 0,312$$

$$\psi = 85^\circ$$

$$\beta = 5^\circ$$

$$\theta = 2.4^\circ$$

$$k_h = \beta_m \left(\frac{a_{\max}}{g} \right) \quad k_v = 0.5 \cdot k_h$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 2: Accelerazione sismica verso il basso

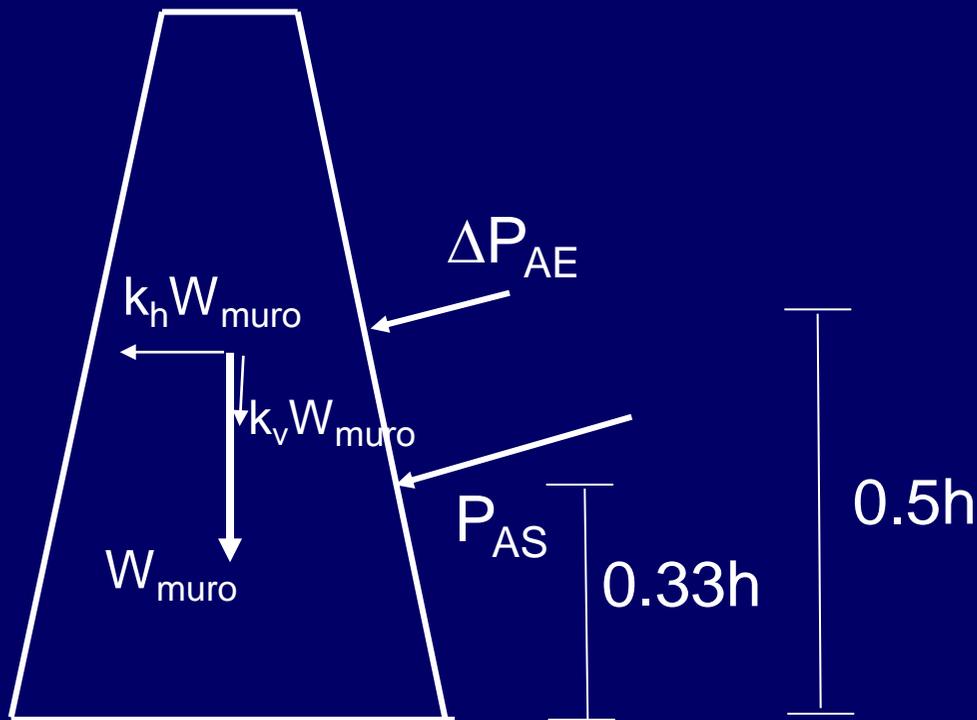
$$\gamma_{cls} = 23 \text{ kN/m}^3$$

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

$$P_{AE} = 50 \text{ kN/m}$$

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

$$\Delta P_{AE} = 5 \text{ kN/m}$$



ESEMPIO: MURO A GRAVITÀ

Configurazione di verifica 2: Accelerazione sismica verso il basso

VERIFICA A SLITTAMENTO

$$N_{sd} = 212 \quad \text{kN/m}$$

$$F_{Rd} = 94 \quad \text{kN/m}$$

$$T_{sd} = 52 \quad \text{kN/m}$$

$$N_{Ed} = P_{AE,V} + W_{muro}(1+k_v)$$

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

$$T_{Ed} = P_{AE,H} + W_{muro}k_h$$

$$F_{Rd} \geq T_{Ed}$$