

# **GEOTECNICA**

**ing. Nunziante Squeglia**

## **13. OPERE DI SOSTEGNO**

## DEFINIZIONI

- **Opere di sostegno rigide: muri a gravità, a mensola, a contrafforti.....**
- **Opere di sostegno flessibili: palancole metalliche, diaframmi in cls (eventualmente con ancoraggi)**
- **Strutture miste: terra armata, terra rinforzata, muri cellulari.....**

## **VERIFICA DI SICUREZZA (SLU, GEO)**

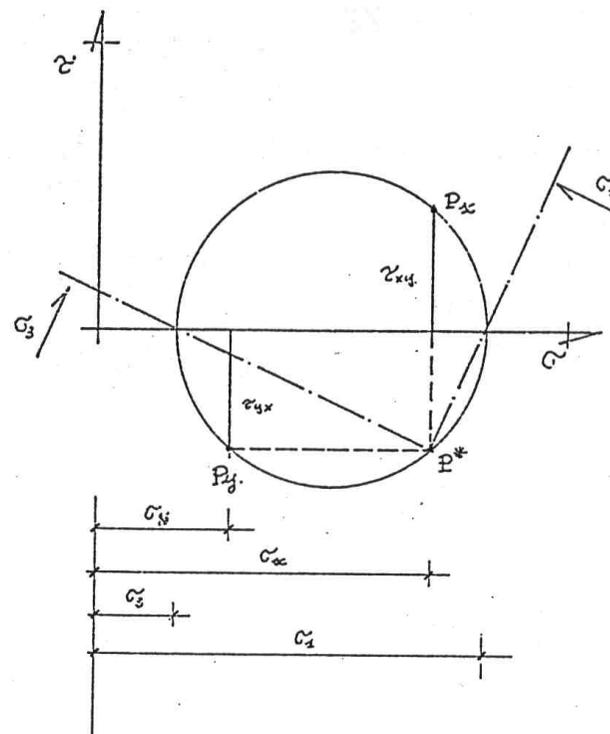
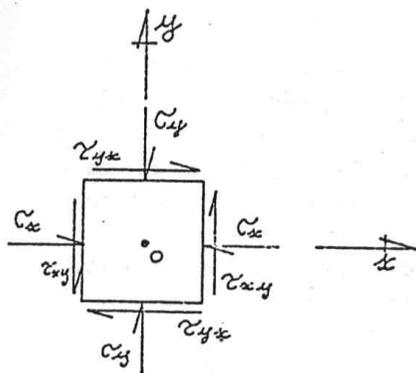
- **scivolamento sul piano di posa**
- **ribaltamento (muri?)**
- **rottura del complesso fondazione – terreno**
- **stabilità globale**

## **VERIFICA IN CONDIZIONI DI ESERCIZIO (SLE)**

- **compatibilità degli spostamenti**
- **influenza sul regime idraulico**
- **interazione terreno - struttura**

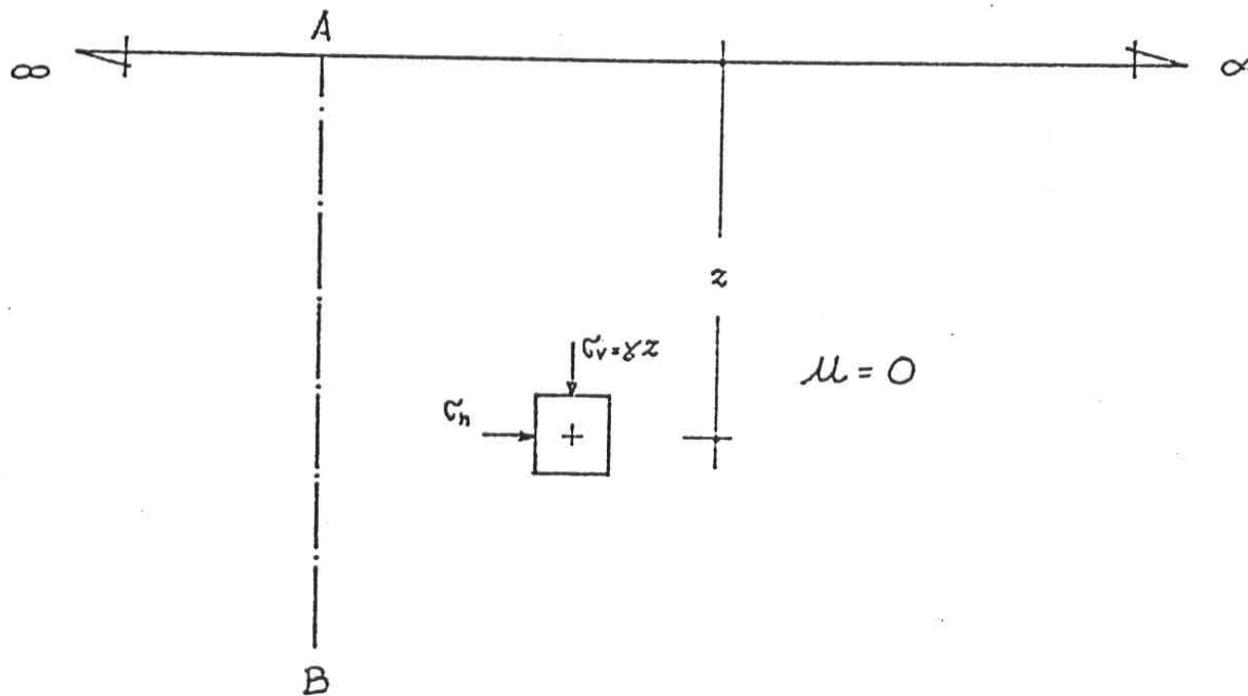
SPINTA DELLE TERRE

# ANALISI DELLO STATO TENSIONALE



SPINTA DELLE TERRE

# ANALISI DELLO STATO TENSIONALE



$$s'_h = k_0 \cdot s'_v$$



SPINTA DELLE TERRE

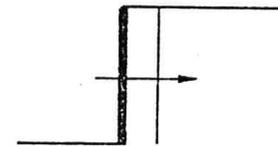
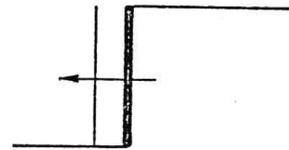
# PARETE DI ALTEZZA FINITA

## Cinematismo di rottura

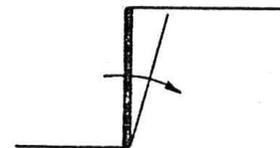
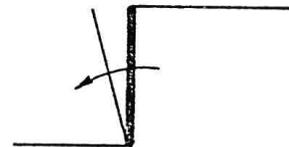
*SPOSTAMENTI ORIZZONTALI*

*Stato attivo*

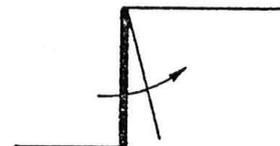
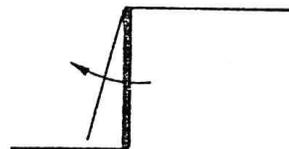
*Stato passivo*



*traslazione*



*rotazione  
intorno  
all'estremo  
inferiore*



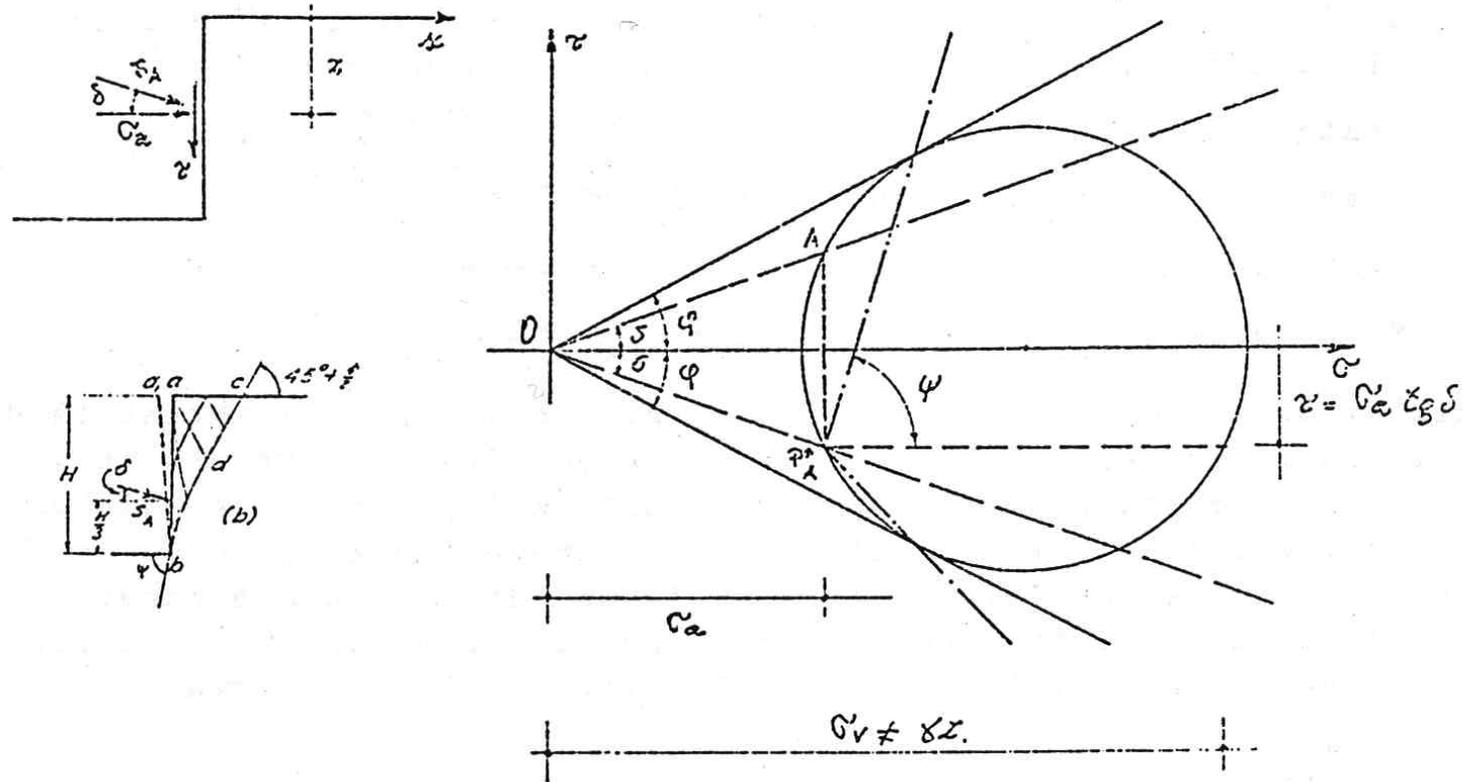
*rotazione  
intorno  
all'estremità  
superiore*



# INFLUENZA DEL CINEMATISMO

## Spinta Attiva – Cinematismo Negativo

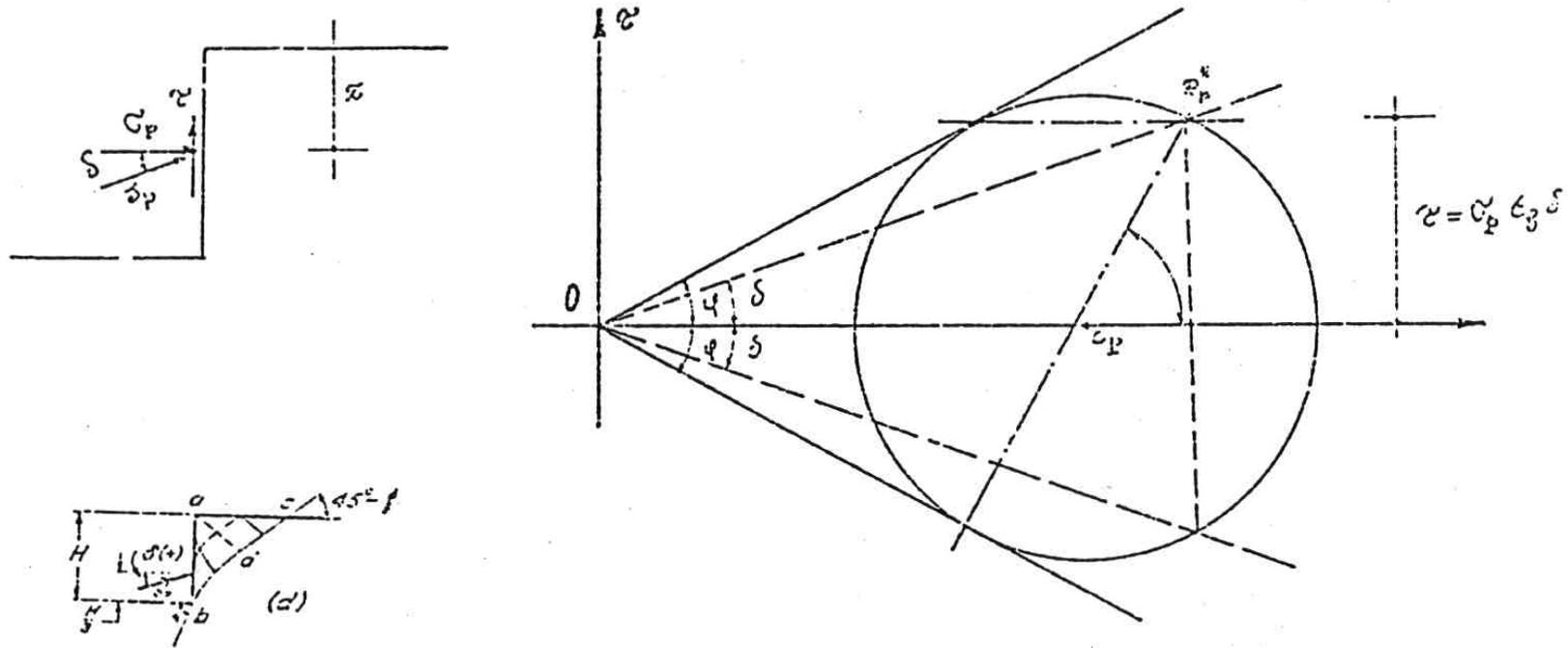
SPINTA DELLE TERRE



SPINTA DELLE TERRE

# INFLUENZA DEL CINEMATISMO

## Spinta Passiva – Cinematismo Negativo





# CALCOLO DELLA SPINTA METODI

SPINTA DELLE TERRE

Superfici piane → Teoria di Rankine  
Metodo di Coulomb

Superfici curve → Mistilinea (cerchio + retta)  
Spirale logaritmica

# **CALCOLO DELLA SPINTA**

## **Applicabilità della Teoria di Rankine**

- **Paramento di monte verticale**
- **Attrito nullo tra paramento e terreno**
- **Terrapieno orizzontale**

# CALCOLO DELLA SPINTA

## Determinazione della Spinta mediante la Teoria di Rankine

$$\sigma'_a = k_a \cdot \sigma'_v - 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_a}$$

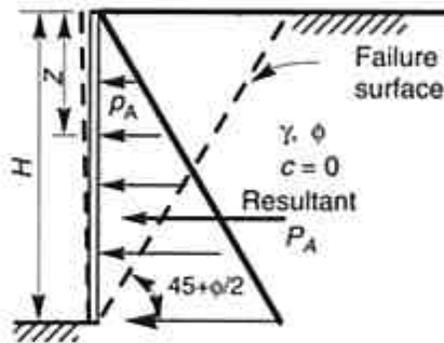
$$k_a = \frac{1 - \operatorname{sen}\varphi'}{1 + \operatorname{sen}\varphi'}$$

$$\sigma'_p = k_p \cdot \sigma'_v + 2 \cdot c' \cdot \sqrt{k_p}$$

$$k_p = \frac{1 + \operatorname{sen}\varphi'}{1 - \operatorname{sen}\varphi'}$$

# CALCOLO DELLA SPINTA

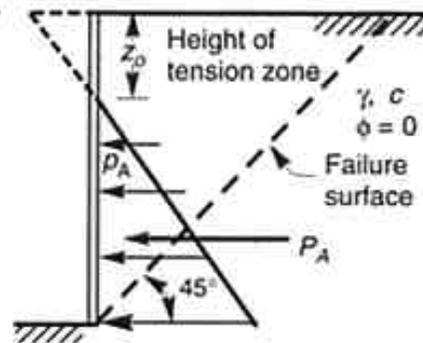
## Determinazione della Spinta mediante la Teoria di Rankine



$$K_A = \tan^2(45 - \phi/2)$$

$$p_A = K_A \gamma z$$

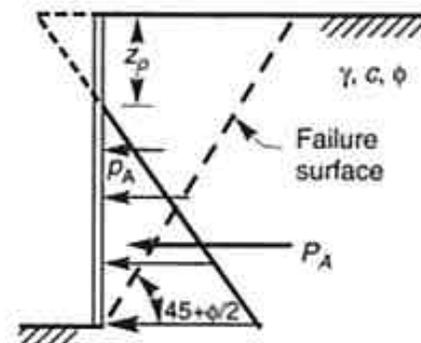
$$P_A = K_A \gamma H^2 / 2$$



$$z_0 = 2c/\gamma$$

$$p_A = \gamma z - 2c$$

$$P_A = \gamma H^2 / 2 - 2cH + \frac{2c^2}{\gamma}$$



$$z_0 = \left( \frac{2c}{\gamma} \right) \tan(45 + \phi/2)$$

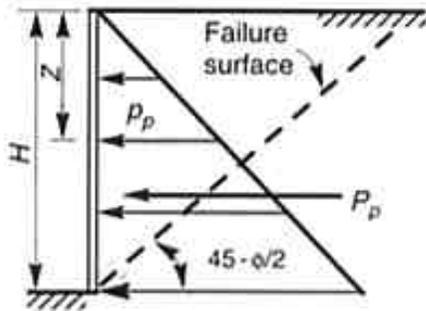
$$p_A = \gamma z \tan^2(45 - \phi/2) - 2c \tan(45 - \phi/2)$$

$$P_A = \left( \frac{\gamma H^2}{2} \right) \tan^2(45 - \phi/2) - 2cH \tan(45 - \phi/2) + 2c^2/\gamma$$

### Spinta Attiva

# CALCOLO DELLA SPINTA

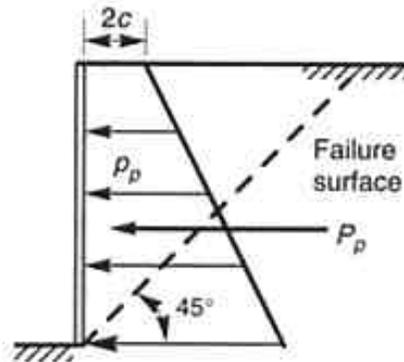
## Determinazione della Spinta mediante la Teoria di Rankine



$$K_p = \tan^2 (45 + \phi/2)$$

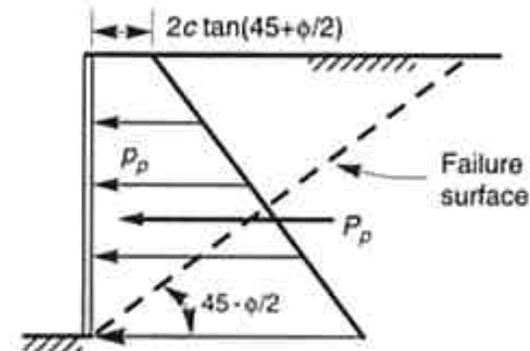
$$p_p = K_p \gamma z$$

$$P_p = K_p \gamma H^2 / 2$$



$$p_p = \gamma z + 2c$$

$$P_p = 1/2 \gamma H^2 + 2cH$$



$$p_p = \gamma z \tan^2(45 + \phi/2) + 2c \tan(45 + \phi/2)$$

$$P_p = \left( \frac{\gamma H^2}{2} \right) \tan^2(45 + \phi/2) + 2cH \tan(45 + \phi/2)$$

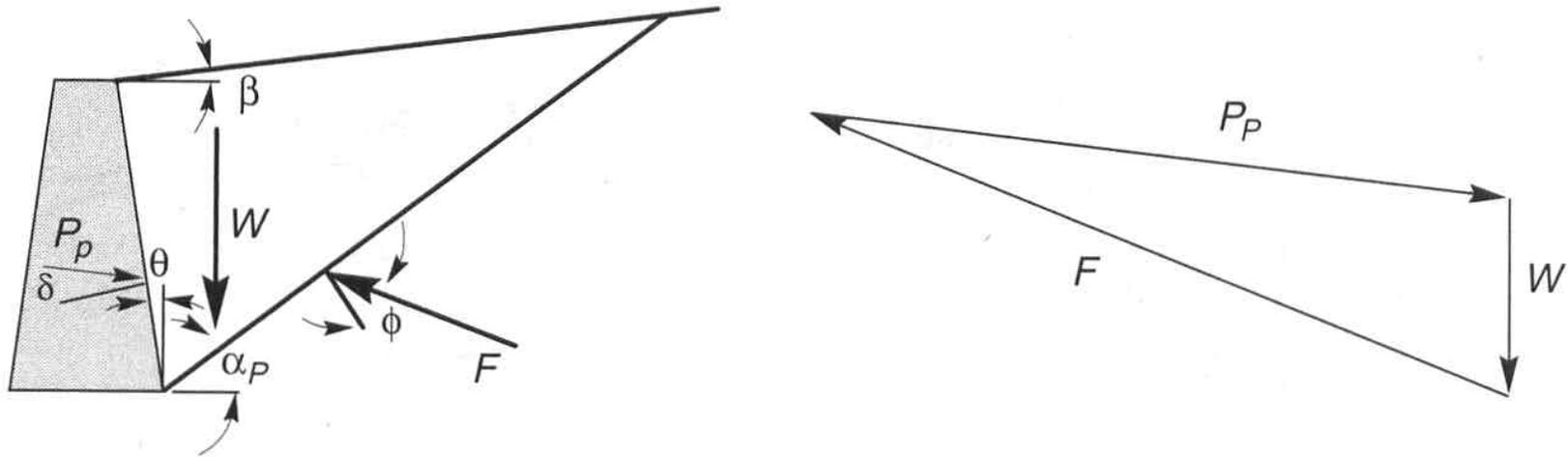
### Spinta Passiva



SPINTA DELLE TERRE

# CALCOLO DELLA SPINTA

## Teoria di Coulomb



Spinta Passiva

# CALCOLO DELLA SPINTA

## Teoria di Coulomb

$$S_i = \frac{1}{2} k_i \gamma H^2 \quad c' = 0$$

$$k_a = \frac{\cos^2(\varphi - \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta + \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \beta)}{\cos(\delta + \theta) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2}$$

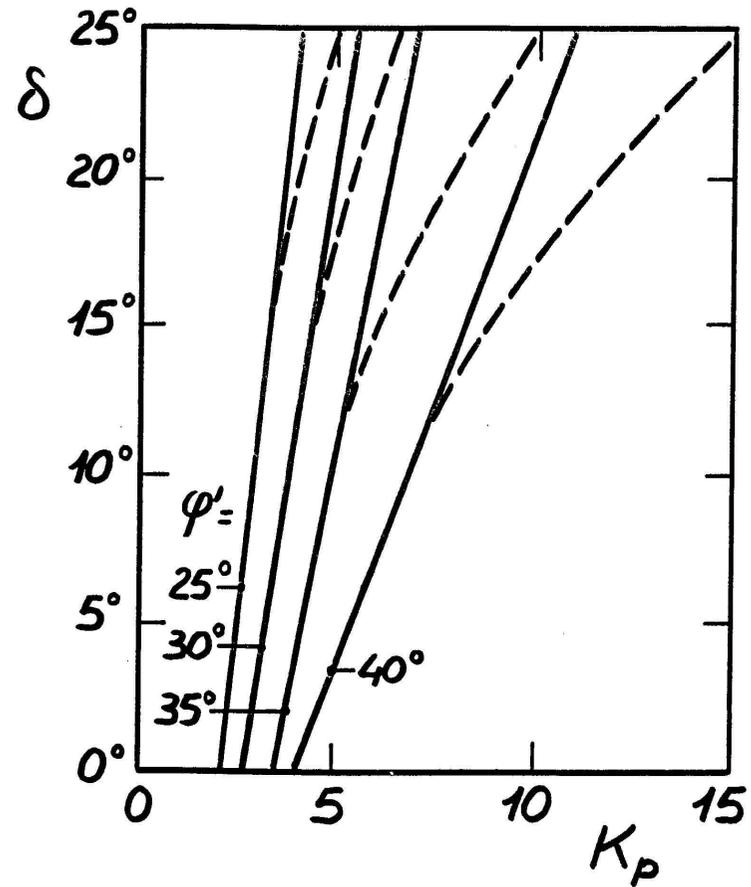
$$k_p = \frac{\cos^2(\varphi + \theta)}{\cos^2 \theta \cdot \cos(\delta - \theta) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi + \beta)}{\cos(\delta - \theta) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2}$$

SPINTA DELLE TERRE

# SPINTA PASSIVA

## Influenza della curvatura della superficie

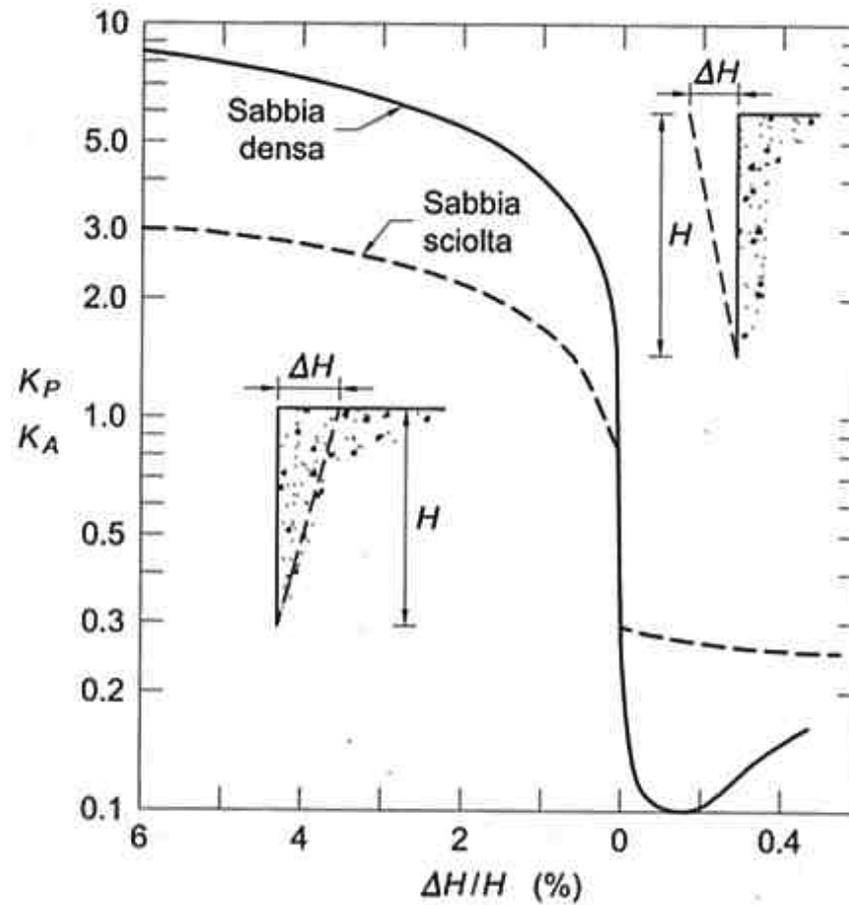
- superficie curva
- - - superficie piana



SPINTA DELLE TERRE

# CALCOLO DELLA SPINTA

## Influenza dell'entità degli spostamenti

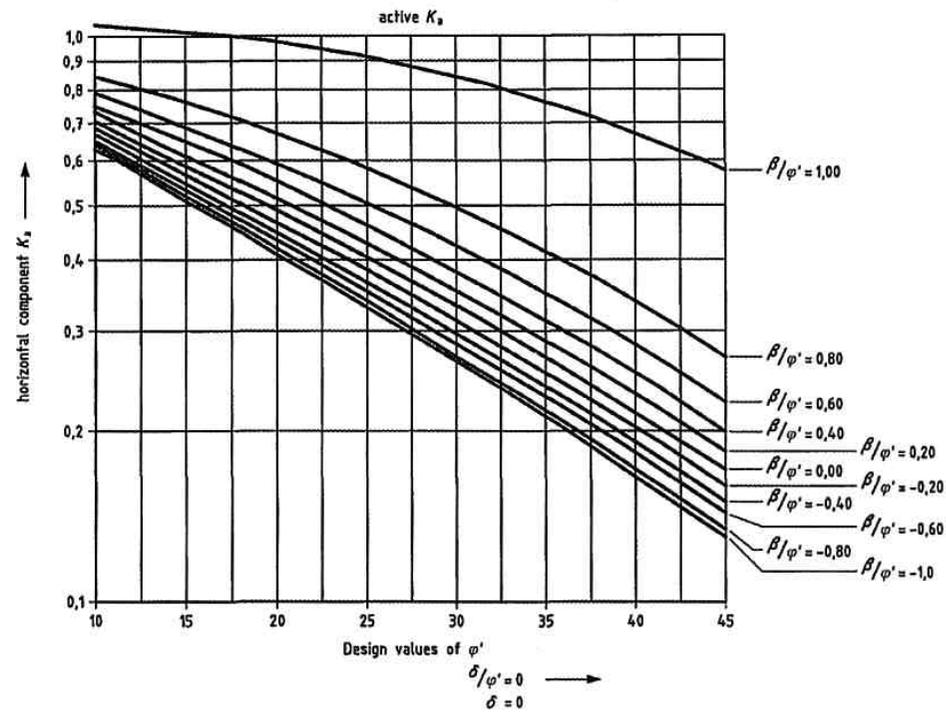
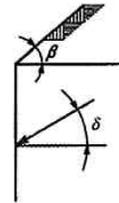


## CALCOLO DELLA SPINTA

1. **Azioni: terreno + acqua + sovraccarichi + sisma**
2. **Spinta attiva: utilizzare le soluzioni con la superficie di scorrimento piana:**
  - ? Rankine ( $i = 0, d = 0^\circ, c_a' = 0$ )
  - ? Coulomb ( $i \neq 0, d \neq 0^\circ, c_a' \neq 0$ )
3. **Spinta passiva: quando  $d > \frac{1}{3} f'$  utilizzare le soluzioni con la superficie di scorrimento curvilinea.**
4. **Spostamenti necessari per mobilitare la spinta:**
  - attiva, molto modesti
  - passiva, rilevanti

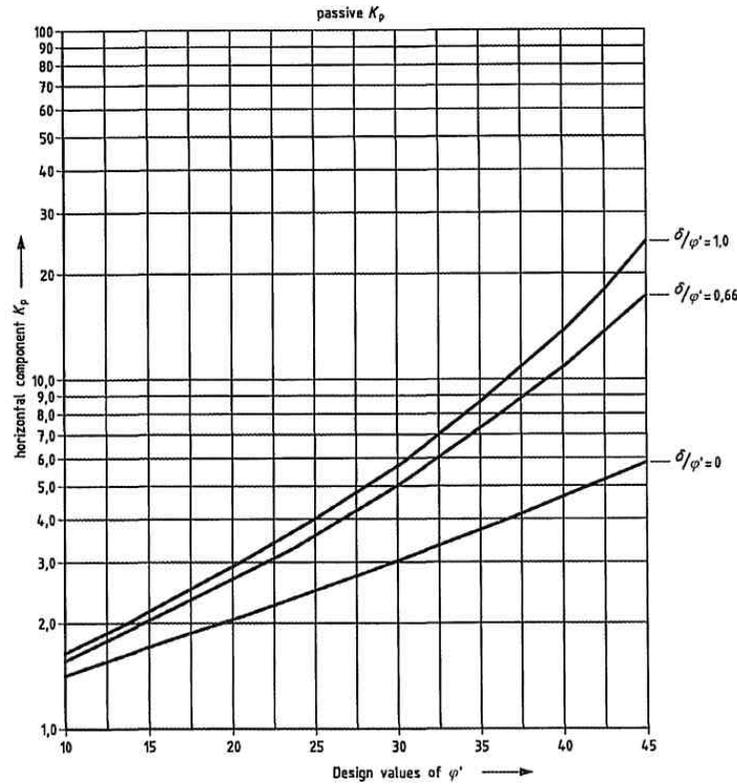
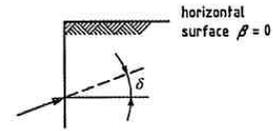
SPINTA DELLE TERRE

# CALCOLO DELLA SPINTA EC7 – Allegato C (Spinta Attiva)



SPINTA DELLE TERRE

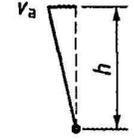
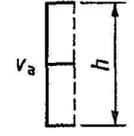
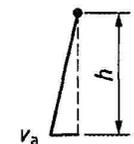
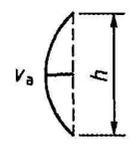
# CALCOLO DELLA SPINTA EC7 – Allegato C (Spinta Passiva)



**SPINTA DELLE TERRE**

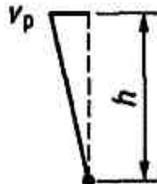
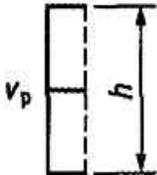
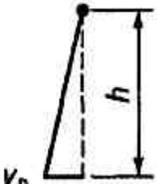
**CALCOLO  
DELLA SPINTA  
EC7 – All. C**

**Spostamenti  
necessari  
per la mobilitazione  
della Spinta Attiva**

Kind of wall movement		$v_a/h$ loose soil %	$v_a/h$ dense soil %
a)		0,4 to 0,5	0,1 to 0,2
b)		0,2	0,05 to 0,1
c)		0,8 to 1,0	0,2 to 0,5
d)		0,4 to 0,5	0,1 to 0,2
where: $v_a$ is the wall motion to mobilise active earth pressure $h$ is the height of the wall			

## CALCOLO DELLA SPINTA EC7 – All. C

**Spostamenti  
necessari  
per la mobilitazione  
della Spinta Passiva**

Kind of wall movement	$v_p/h$ loose soil %	$v_p/h$ dense soil %
a) 	7 (1,5) to 25 (4,0)	5 (1,1) to 10 (2,0)
b) 	5 (0,9) to 10 (1,5)	3 (0,5) to 6 (1,0)
c) 	6 (1,0) to 15 (1,5)	5 (0,5) to 6 (1,3)
where: $v_p$ is the wall motion to mobilise passive earth pressure $h$ is the height of the wall		

# **MURI DI SOSTEGNO**

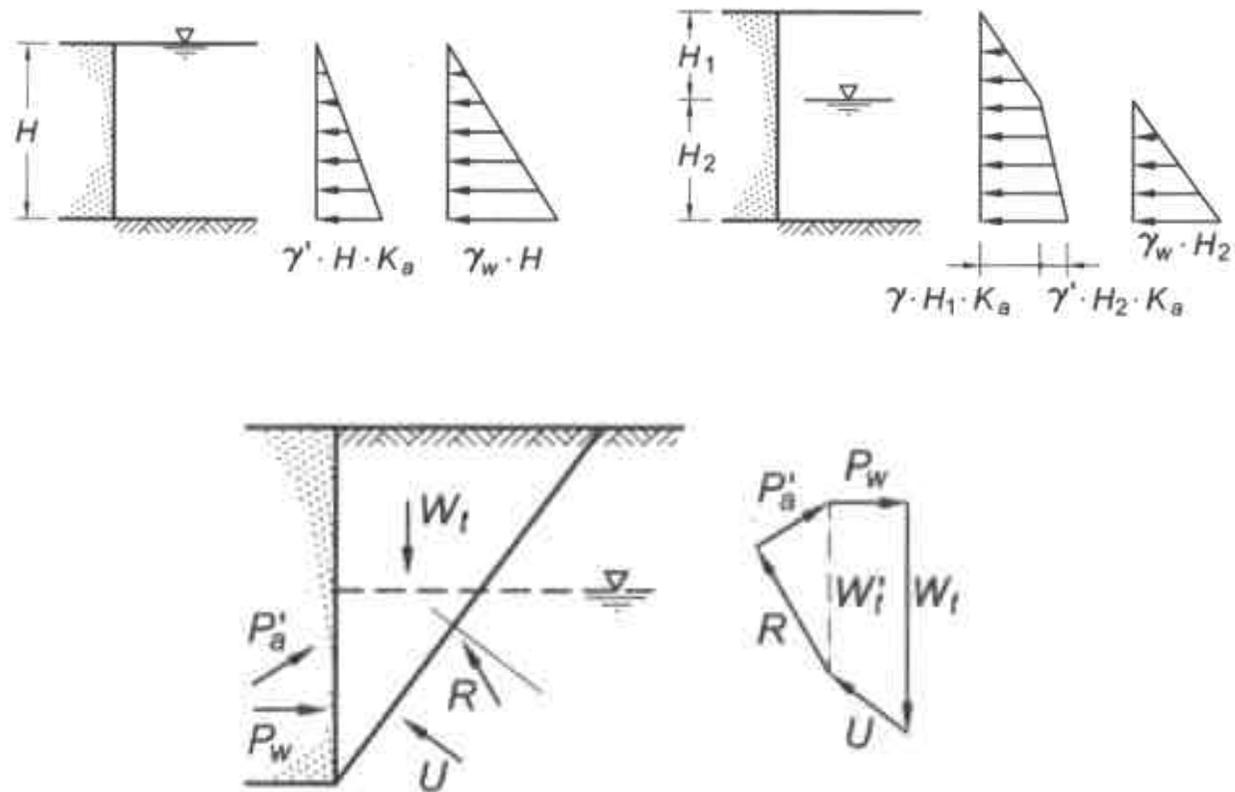
## **Fasi del progetto**

- 1. Scelta della tipologia (gravità, mensola, contrafforti....)**
- 2. Dimensionamento di massima**
- 3. Scelta dei parametri geotecnici**
- 4. Scelta del tipo di drenaggio**
- 5. Valutazione del cinematismo e degli spostamenti**
- 6. Calcolo della spinta (rif. 3, 4, 5)**
- 7. Verifiche GEO**
- 8. Definizione particolari costruttivi**
- 9. Verifiche STR**

OPERE DI SOSTEGNO RIGIDE

# MURI DI SOSTEGNO

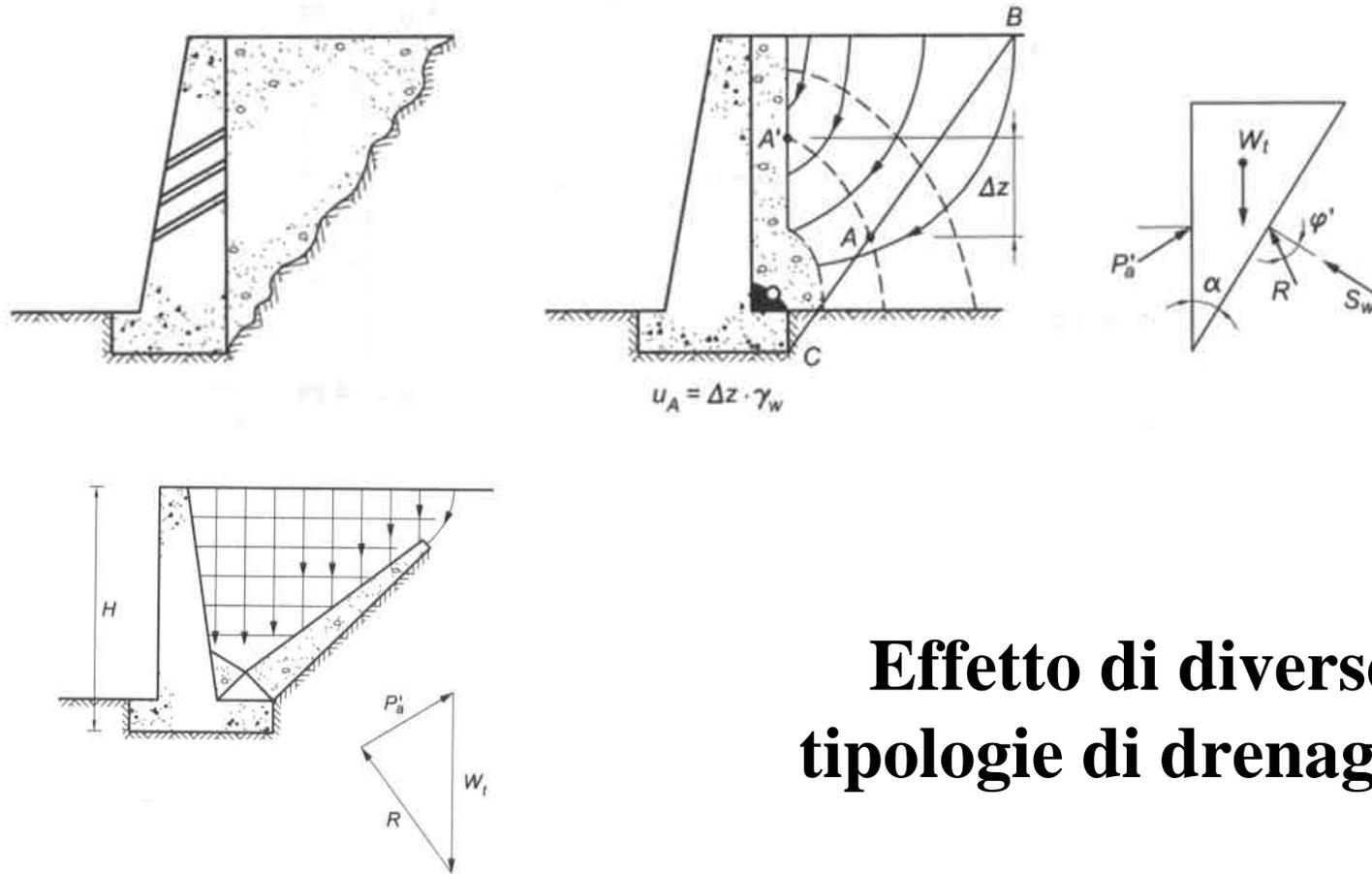
## Influenza delle pressioni neutre



OPERE DI SOSTEGNO RIGIDE

# MURI DI SOSTEGNO

## Influenza delle pressioni neutre



Effetto di diverse  
tipologie di drenaggio

## **MURI DI SOSTEGNO**

### **Valutazione degli spostamenti**

#### **Spostamenti relativi terrapieno-muro**

- **azioni sul muro**
- **peso del terrapieno**

#### **Muri che non subiscono spostamenti**

- **referirsi al coefficiente di spinta a riposo ( $k_0$ )**
- **effetto del costipamento del terrapieno**

# MURI DI SOSTEGNO

## Spinte indotte da sovraccarichi

Sovraccarico uniforme  $q$  [F/L<sup>2</sup>]

### TEORIA DI RANKINE

$$DS_a = k_a \cdot q$$

$$DS_a = k_a \cdot q \cdot H$$

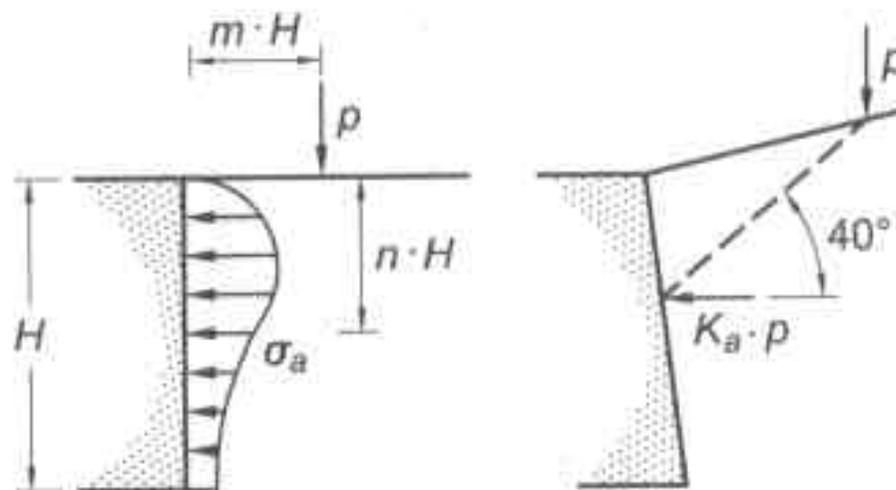
Applicato a  $0.5H$

OPERE DI SOSTEGNO RIGIDE

# MURI DI SOSTEGNO

## Spinte indotte da sovraccarichi

Sovraccarico lineare  $q$  [F/L]  
Teoria dell'elasticità



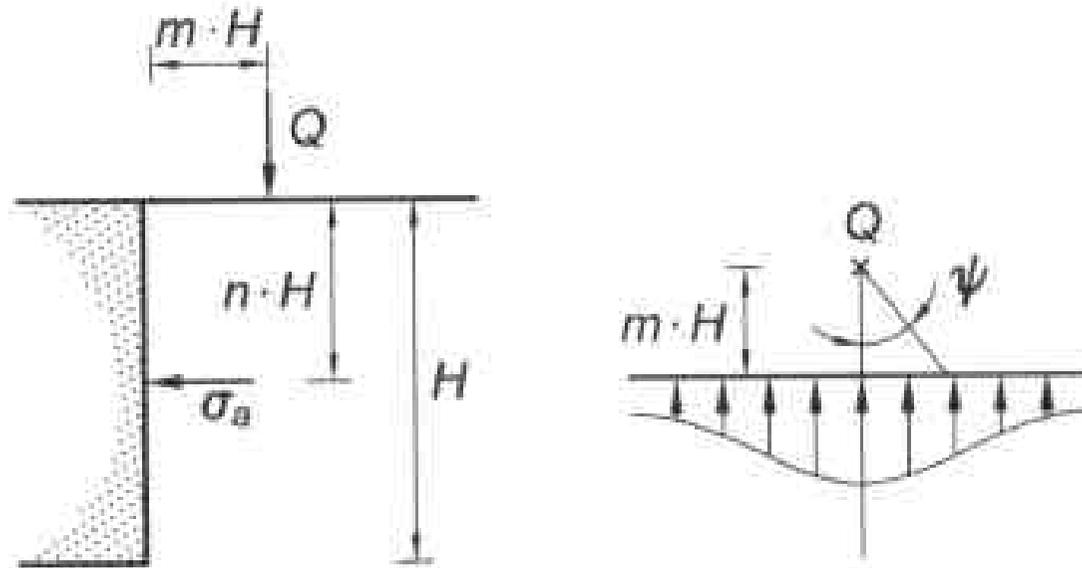
OPERE DI SOSTEGNO RIGIDE

# MURI DI SOSTEGNO

## Spinte indotte da sovraccarichi

### Sovraccarico puntiforme $Q$ [F]

### Teoria dell'elasticità





# MURI DI SOSTEGNO

## Spinte indotte dal sisma

Approccio pseudo-statico (Mononobe-Okabe)

$$P_{AE} = \frac{1}{2} k_{AE} \gamma H^2 (1 - k_v) \quad \psi = \arctan \frac{k_h}{1 - k_v}$$

$$k_{AE} = \frac{\cos^2(\varphi - \theta - \psi)}{\cos \psi \cdot \cos^2 \theta \cdot \cos(\delta + \theta + \psi) \left[ 1 + \sqrt{\frac{\sin(\delta + \varphi) \sin(\varphi - \beta - \psi)}{\cos(\delta + \theta + \psi) \cos(\beta - \theta)}} \right]^2}$$

$S_a$ , applicata H/3;  $P_{AE} - S_a$ , applicata H/2

---

# MURI DI SOSTEGNO

## Spinte indotte dal sisma

### Coefficienti sismici (OPCM 3274)

$$k_h = S \times g_I \times a_g / (g \times r) \qquad k_v = \pm 0.5 \times k_h$$

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

# MURI DI SOSTEGNO

## Spinte indotte dal sisma

### Spinta dell'acqua

Terreni poco permeabili: incremento di spinta legato a  $g_{sat}$

Terreni molto permeabili: incremento di spinta legato a  $g'$ , spinta dell'acqua libera

## **MURI DI SOSTEGNO**

### **Limiti dell'approccio pseudo-statico**

- **Rapporto tra componente verticale e orizzontale ( $q$  e  $j$ )**
- **Sovrastima  $k_{PE}$  (come nel caso statico)**
- **Opere che non ammettono spostamenti**
- **Deformabilità terrapieno**
  - **Amplificazione (Opere alte)**
  - **Differenze di fase**

## **PARATIE DI SOSTEGNO**

### **Condizioni per il proporzionamento**

- **Stabilità del complesso terreno – paratia (anche se ancorata)**
- **Massime sollecitazioni sulla paratie inferiori a quelle sopportabili dalla struttura**
- **Massimi spostamenti della paratia inferiori a quelli accettabili**

## **PARATIE DI SOSTEGNO**

### **Metodi di Calcolo**

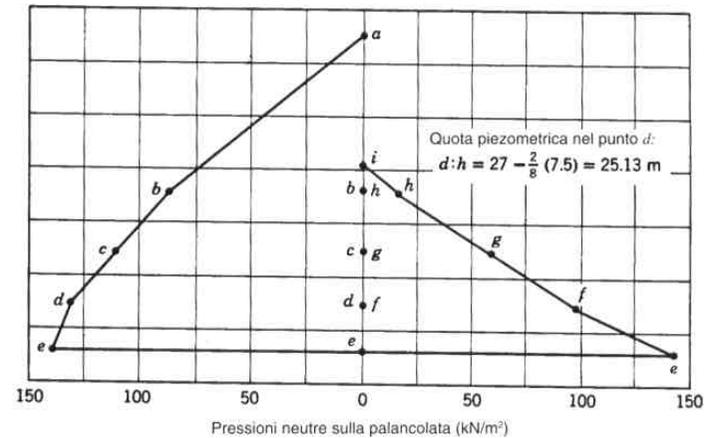
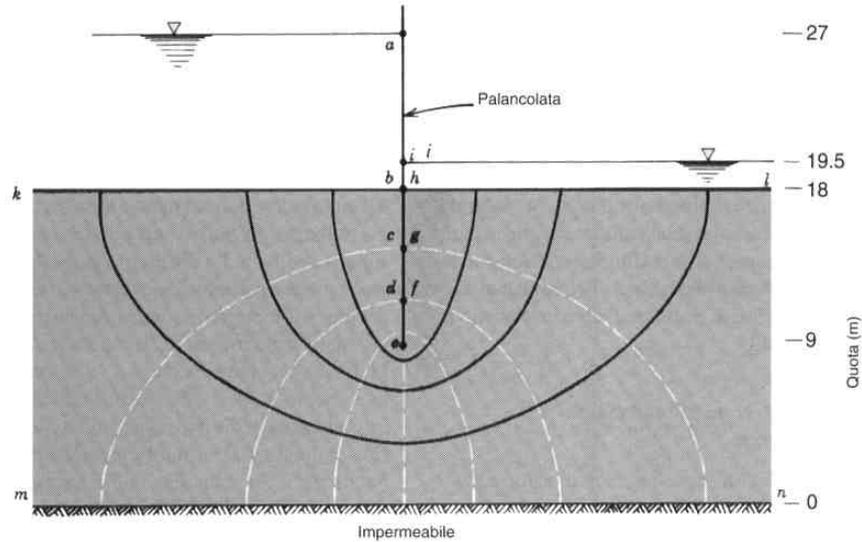
- **parete rigida e terreno rigido – plastico**
- **parete elastica e terreno non lineare**
- **modellazione FEM o FDM**

## **PARATIE DI SOSTEGNO**

### **Terreno rigido – plastico**

- **Spinta dovuta al peso del terreno**
- **Effetto dei sovraccarichi**
- **Effetto dell'acqua**
  - Spinta sulla parete**
  - Pressioni idrodinamiche**
  - Determinazione della portata**

# Pressioni neutre sul contorno di una palancolata



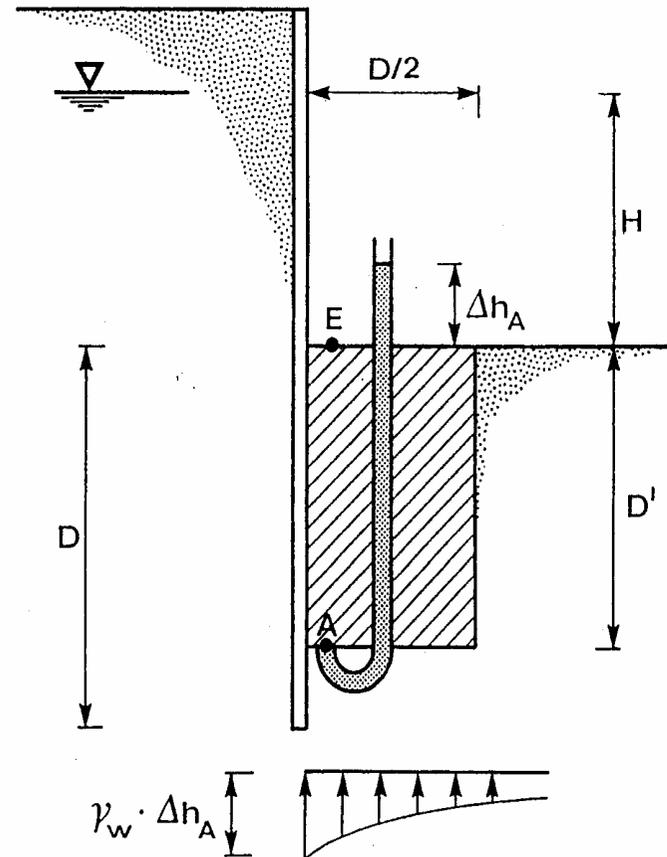
# PARATIE DI SOSTEGNO

## Sifonamento

$$s'_v = (g' - i g_w) z$$

$$i_c = g' / g_w$$

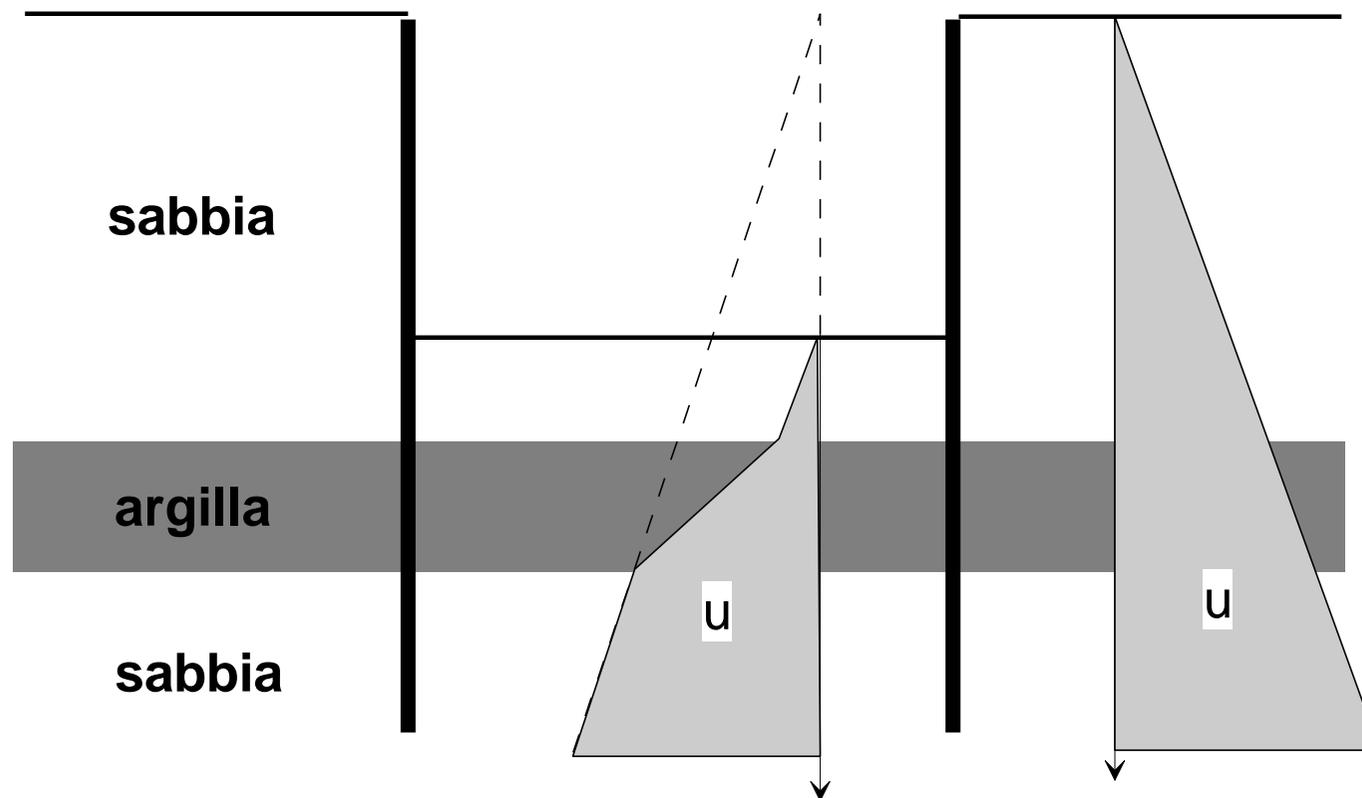
$$F_s = i_c / i_e$$



**OPERE DI SOSTEGNO FLESSIBILI**

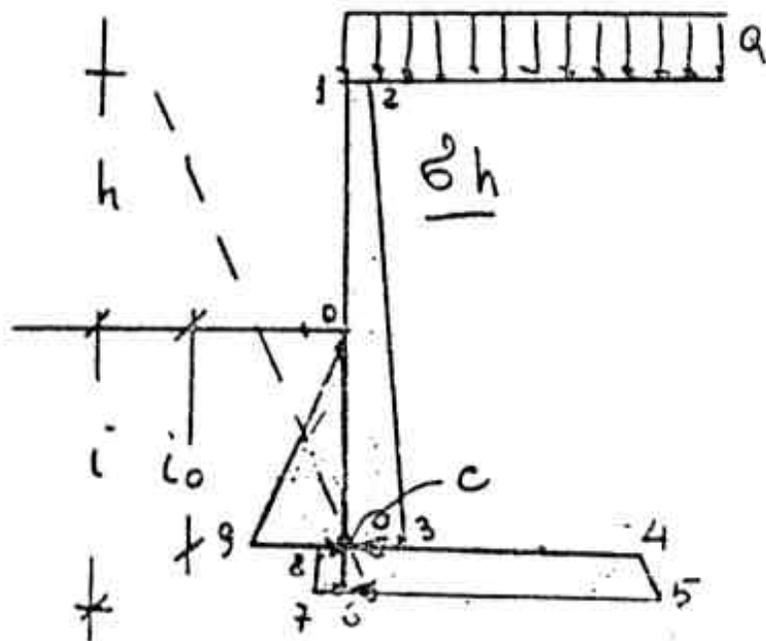
# PARATIE DI SOSTEGNO

## Sollevamento del fondo scavo



# PARATIE DI SOSTEGNO LIBERE

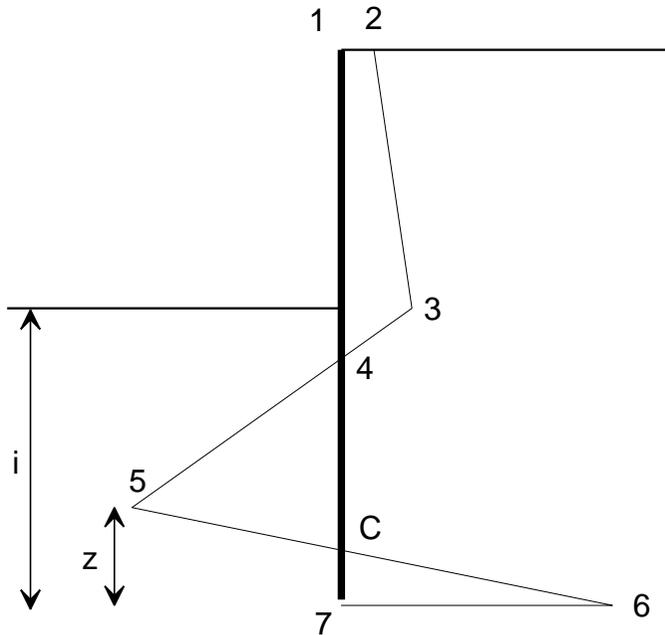
## Terreno rigido – plastico



- 1-2  $\textcircled{R}$   $q \cdot k_a$
- c-3  $\textcircled{R}$   $q \cdot k_a + (h+i_0) \cdot g \cdot k_a$
- c-4  $\textcircled{R}$   $q \cdot k_p + (h+i_0) \cdot g \cdot k_p$
- 6-5  $\textcircled{R}$   $q \cdot k_p + (h+i) \cdot g \cdot k_p$
- 7-6  $\textcircled{R}$   $i \cdot g \cdot k_a$
- 8-c  $\textcircled{R}$   $i_0 \cdot g \cdot k_a$
- 9-c  $\textcircled{R}$   $i_0 \cdot g \cdot k_p$

# PARATIE DI SOSTEGNO LIBERE

## Metodo del “doppio triangolo”



$$7-6 \text{ (R) } q \cdot k_p + (h+i) \cdot g \cdot k_p - g \cdot k_a \cdot i$$

**Inclinazioni dei segmenti**

$$2-3 \text{ (R) } g \cdot k_a$$

$$3-5 \text{ (R) } g \cdot (k_p - k_a)$$

**Incognite:**

**posizione punto 5, z**

**lunghezza di infissione, i**

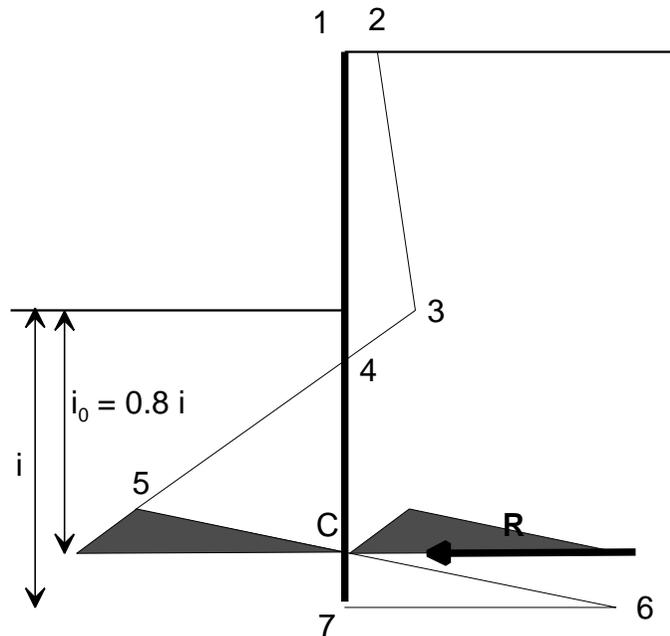
**Equazioni:**

**traslazione orizzontale**

**rotazione**

# PARATIE DI SOSTEGNO LIBERE

## Metodo di Blum (1943)



$$i_0 = 0.8 \cdot i$$

Equilibrio alla rotazione  
intorno al punto C  
=  
Polinomio di 3° grado in  $i_0$

## **PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE**

### **Vantaggi:**

- **limitazione degli spostamenti della parete**
- **effetto di stabilizzazione degli ancoraggi**
- **riduzione del momento flettente**

### **Ancoraggi:**

**Passivi – carico dovuto al movimento della parete**

**Attivi – tiranti pretesi**

## **PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE**

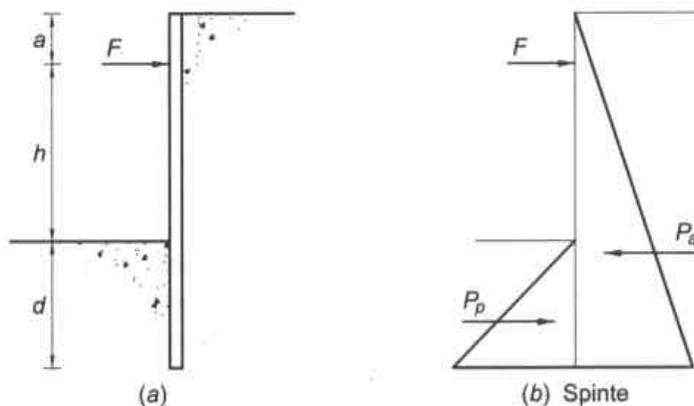
**Metodi di calcolo (terreno rigido – plastico)**

**Paratie con un livello di ancoraggi:**

- 1. Metodo della parete libera al piede**
- 2. Metodo della parete vincolata al piede**

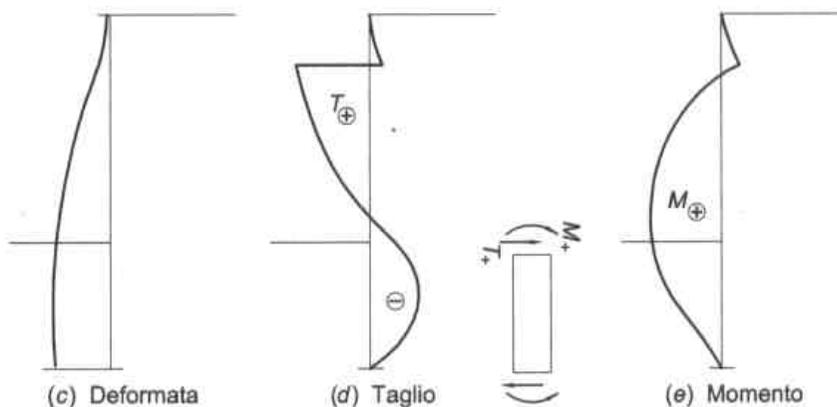
# PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE

## Metodo della parete libera al piede



**Incognite:**

1. Sforzo nei tiranti
2. Infissione



**Equazioni:**

1. Rotazione intorno F
2. Traslazione orizzontale

# **PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE**

## **Metodo della parete libera al piede: commenti**

**Riduzione del momento flettente massimo dovuta a:**

- 1. controrotazione della parete nel tratto iniziale**
- 2. “effetto arco” tra il livello dell’ancoraggio e piano di scavo**
- 3. inflessione della parete nel tratto immerso**

**Il cedimento dell’ancoraggio porta all’annullamento dei fenomeni 1. e 2.**

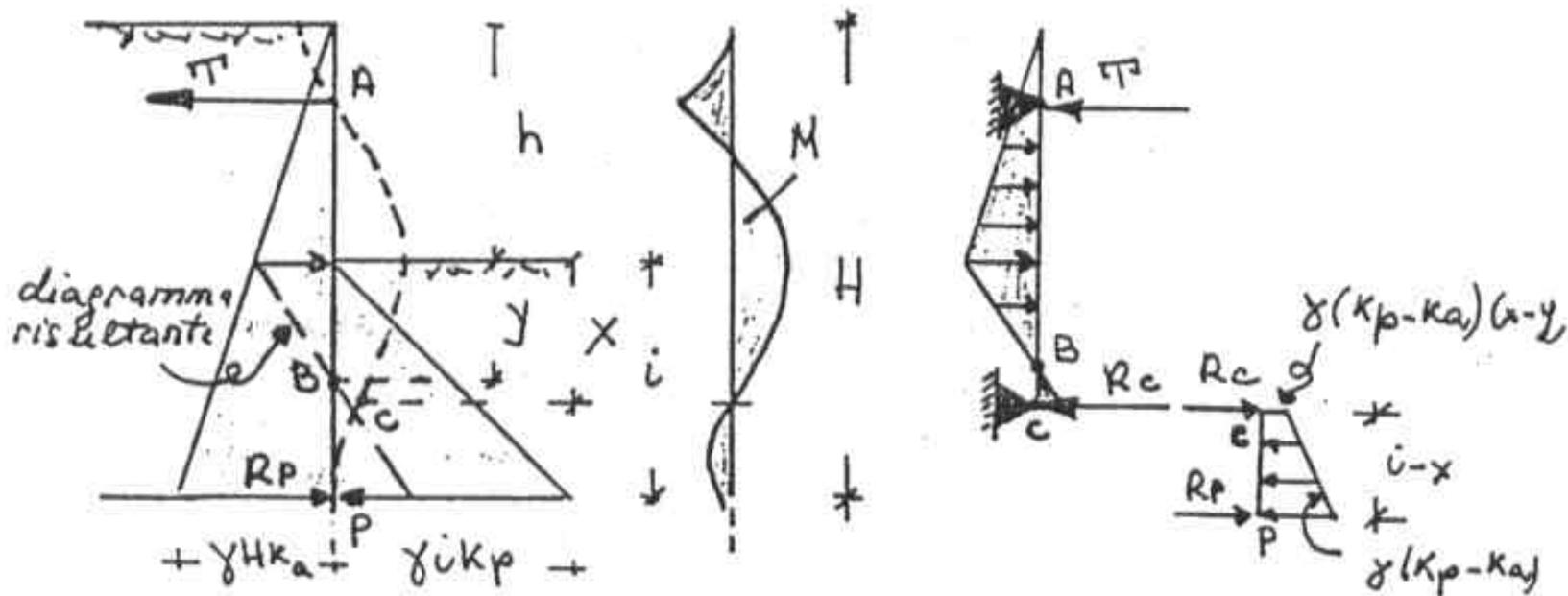
**Rowe (1952):**

**Buon accordo nel caso di strutture rigide**

**Strutture flessibili ® sovrastima del momento flettente massimo**

# PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE

## Metodo della parete vincolata al piede



C, flesso della deformata; P, punto fisso

# PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE

## Metodo della parete vincolata al piede

**Incognite:**

1. sforzo nel tirante,  $T$
2. posizione del punto di flesso  $C$ ,  $x$
3. posizione del punto  $P$ ,  $i$
4. lunghezza al di sotto del punto  $P$
5. Sforzo di taglio nel punto  $P$ ,  $R_p$

**Equazioni:**

1. Rotazione
2. Traslazione

**Nessuna relazione di congruenza**

---

# **PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE**

## **Parete vincolata al piede**

**“Metodo della Trave Equivalente”, Blum (1950)**

- 1. Valutazione della spinta attiva e passiva**
- 2. Il punto di ancoraggio è da considerarsi fisso**
- 3. Il valore di  $x$  è noto ( $x = 0.1 \cdot h$ )**
- 4. Si considera il diagramma risultante ed il taglio  $R_p$**

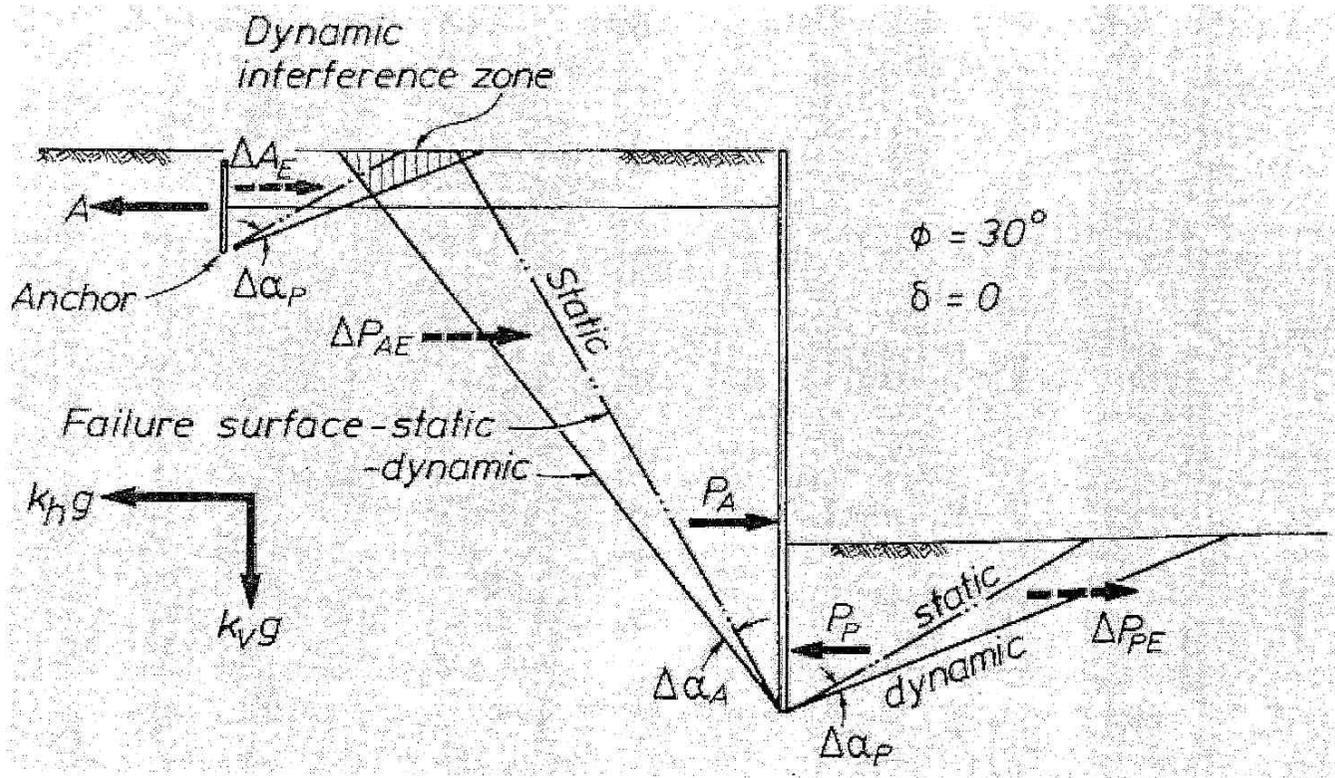
**Quindi:**

- 1. Si ricavano dall’equilibrio della trave superiore  $R_c$  e  $T$**
- 2. Dall’equilibrio della parte inferiore si ricava  $i$**
- 3. Il tratto al di sotto di  $P$  si pone pari a  $0.2 \cdot i$**

OPERE DI SOSTEGNO FLESSIBILI

# PARATIE DI SOSTEGNO ANCORATE

## Lunghezza degli ancoraggi (OPCM, EC8)



(Elms & Richard, 1990)

$$L_e = L_s (1 + 1.5 \cdot S \cdot a_g \cdot \gamma_I)$$