



**Dipartimento di Ingegneria Civile
Università di Pisa**

Anno accademico 2010 / 2011

***STABILITA'
PENDII***

Prof. Lo Presti

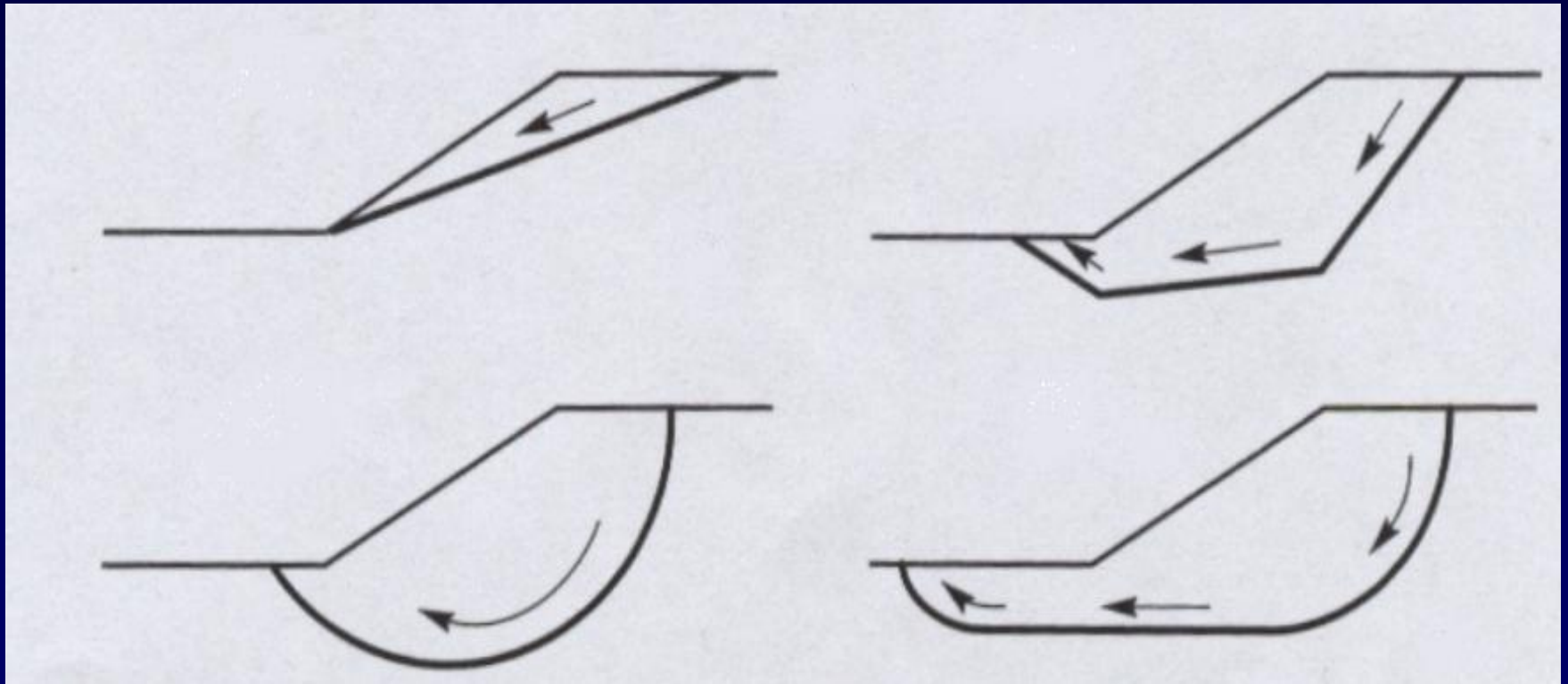
CLASSIFICAZIONE FRANE

- **TIPO DI TERRENO**
 - rocce
 - terreni
- **TIPO DI MOVIMENTO**
 - crolli, ribaltamenti
 - scivolamenti
 - soliflussioni
- **OCCORRENZA TEMPORALE**
 - co-sismico
 - post sismico

ASPETTI GENERALI

- **GEOLOGIA**
- **CONDIZIONI IDRAULICHE**
- **TOPOGRAFIA (SEZIONE, SVILUPPO)**
- **GEOMETRIA (2D – 3D)**
- **CARATTERISTICHE MECCANICHE MATERIALI**

GEOMETRIA 2D



$$F = \frac{\tan(\varphi')}{\tan(i)}$$

PENDIO INDEFINITO

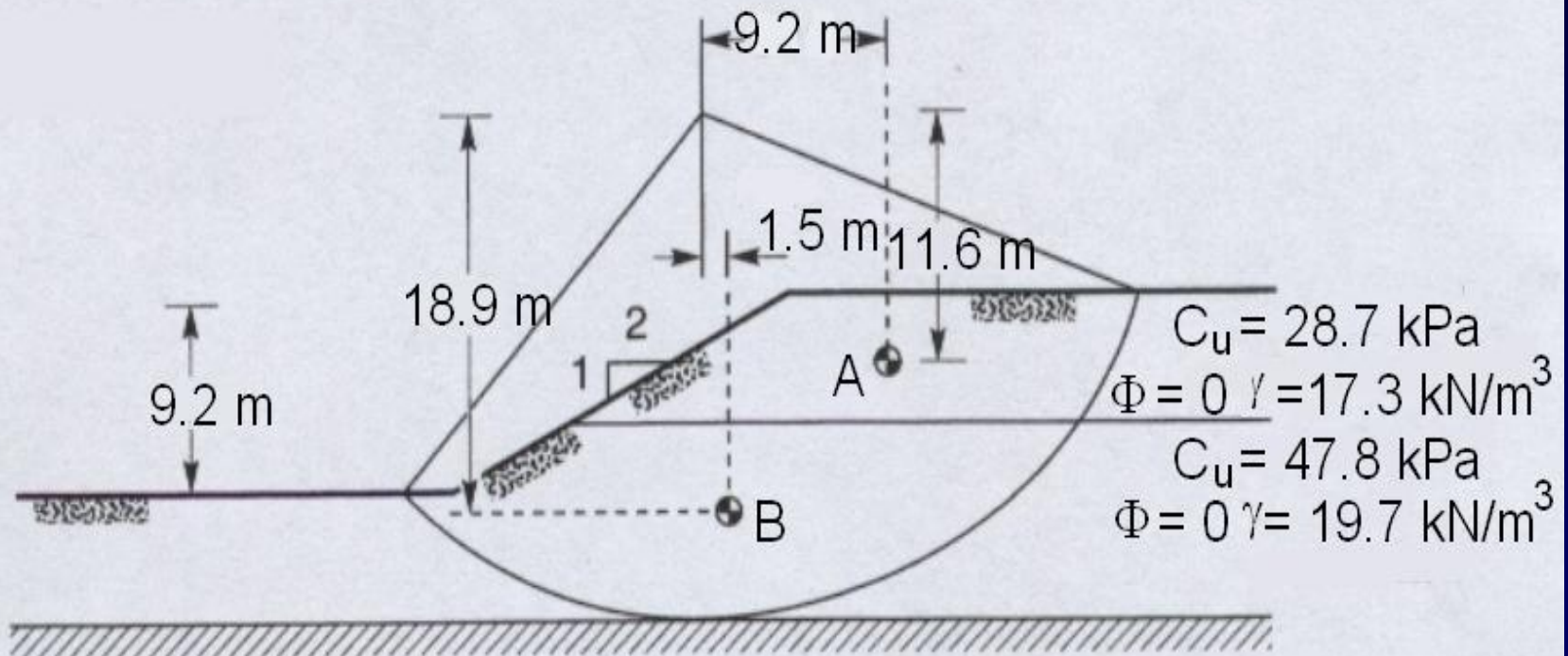
$$F = \frac{\tan(\varphi')}{\tan(i)}$$

$$F = \frac{\tan(\varphi')}{\tan(i)} \frac{\gamma'}{\gamma}$$

$$F = \frac{\tan(\varphi')}{\tan(i)} \frac{\gamma \cdot \cos^2(i) - \gamma_w}{\gamma \cdot \cos^2(i)}$$

$$F = \frac{c' + \gamma' \cdot h \cdot \cos^2(i) \cdot \tan(\varphi')}{\gamma \cdot h \cdot \sin(i) \cdot \cos(i)}$$

PSEUDO-STATIC (ESEMPIO)



ESEMPIO: MOMENTO STATICO

Area (m²)	γ (kN/m³)	W (kN/m)	Braccio (m)	Momen to kN- m/m
126.4	17.3	2184.0	9.2	20092.8
213.8	19.7	4197.2	1.5	6295.8
			TOTALE	26388.6

ESEMPIO: MOMENTO PSEUDO-STATICO

Area (m ²)	γ (kN/m ³)	$W \cdot k_h$ (kN/m)	Braccio (m)	Moment o kN- m/m
126.4	17.3	218.4 (0.1)	11.6	2533.4
		368.6 (0.169)		
213.8	19.7	419.7 (0.1)	18.9	7932.3
		708.3 (0.169)	TOTAL E	10465.8

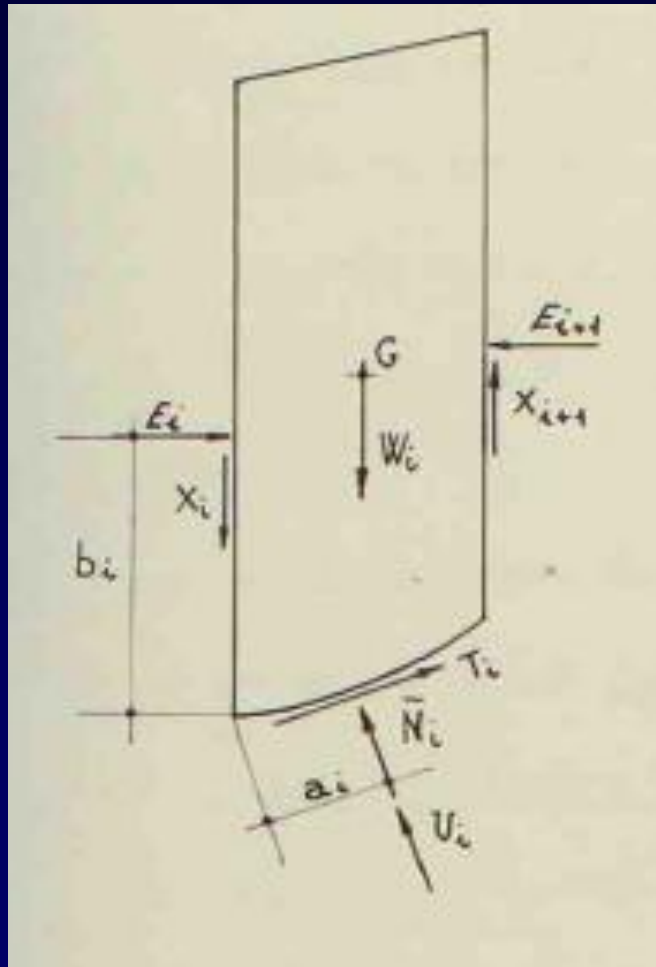
ESEMPIO: MOMENTO RESISTENTE

Lunghezza a (m)	C_u (kN/m²)	Forza (kN/m)	Braccio (m)	Momento kN- m/m
3.5	28.7	100.5	23.8	2388.1
39.4	47.8	1883.3	23.8	44774.8
			TOTAL E	47163.9

ESEMPIO: FATTORE DI SICUREZZA

momento resistente	momento statico	momento pseudo-statico (1)	momento pseudo-statico (2)
47163.9	26388.6	10465.8	17662.6
FS	1.79	1.28	1.07

METODO DELLE STRISCE



W_i = peso del singolo concio

\bar{N}_i = risultante degli sforzi normali efficaci alla base

U_i = " della pressione interstiziale alla base

T_i = " degli sforzi di taglio alla base

INCOGNITE

- $F(1)$
- $N_i(n)$
- $X_i(n-1)$
- $E_i(n-1)$
- $a_i(n)$
- $b_i(n-1)$
- $5n-2$ (incognite) $3n$ equazioni ($2n-2$ indeterminate)
- Assumendo Δx piccolo si riducono a $n-2$

IPOSTESI SEMPLIFICATIVE

- Fellenius (forze di interazione con risultante nulla in direzione normale alla base – n condizioni $N_i = W_i \cos(\alpha_i)$)
- Bishop semplificato (forze di interazione con risultante nulla in direzione verticale)
- Janbu semplificato (equilibrio verticale trascura X_i , superficie qualsiasi, fattore di sicurezza delle sezioni in direzione orizzontale, non verifica l'equilibrio alla rotazione)
- Analisi a blocchi

$$F = \frac{R \cdot \sum [c' l_i + (N_i - U_i) \tan(\varphi')]}{\sum W_i x_i}$$

BISHOP SEMPLIFICATO

$$F = \frac{R \cdot \sum [c' l_i + (N_i - U_i) \tan(\varphi')]}{\sum W_i x_i}$$

$$W_i - T_i \operatorname{sen} \alpha_i - N_i \cos \alpha_i - (X_{i+1} - X_i) = 0$$

$$F = \frac{\sum [c' \Delta x_i + W_i (1 - r_u) \tan(\varphi') + (X_i - X_{i+1}) \tan(\varphi')]}{\sum W_i \cdot \operatorname{sen} \alpha_i} \frac{1}{M_\alpha}$$

$$M_\alpha = \cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \varphi' \tan \alpha_i}{F} \right)$$

$$r_u = \frac{u_i \Delta x_i}{W_i}$$

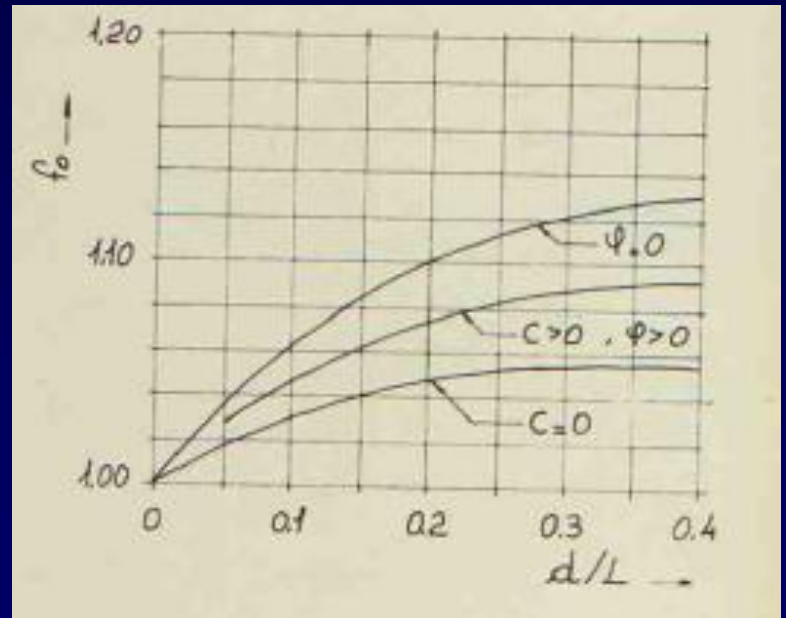
$$F = \frac{\sum [c' \Delta x_i + (\gamma \cdot z_i - u_i) \tan(\phi') \Delta x_i] \frac{1}{n_\alpha}}{\sum \gamma \cdot z_i \cdot \Delta x_i \tan \alpha_i}$$

JANBU SEMPLIFICATO

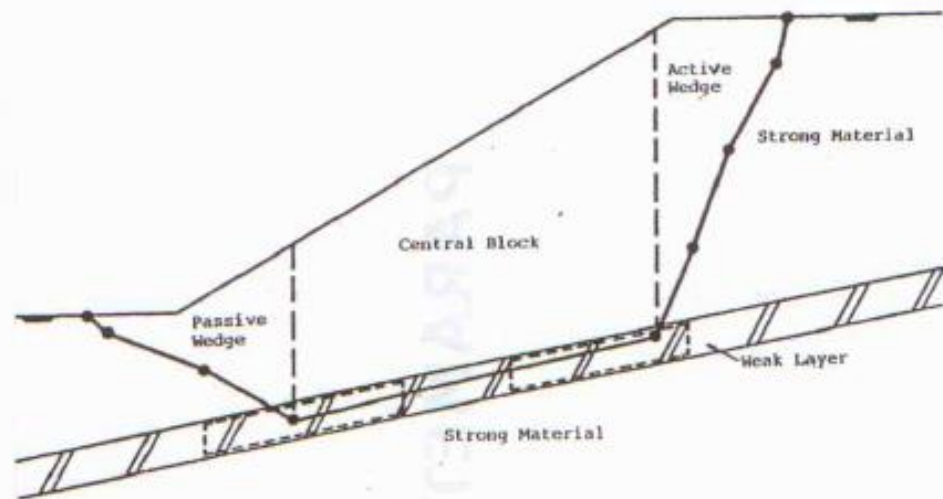
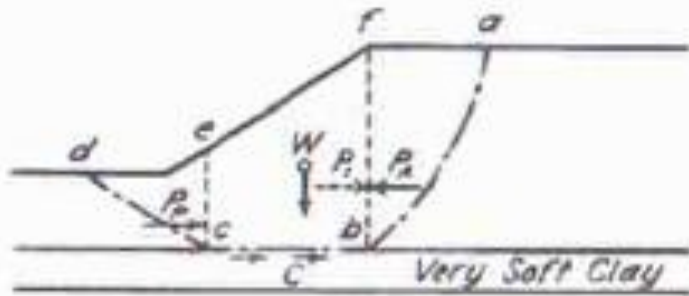
$$F = \frac{\sum [c' \Delta x_i + (\gamma \cdot z_i - u_i) \tan(\phi') \Delta x_i] \frac{1}{n_\alpha}}{\sum \gamma \cdot z_i \cdot \Delta x_i \tan \alpha_i}$$

$$n_\alpha = \cos^2 \alpha_i \frac{1 + \tan \phi' \tan \alpha_i}{F}$$

$$F_c = f_o F$$



ANALISI A BLOCCHI



METODI DISPONIBILI

- **PSEUDO-STATICO** (equilibrio limite, rigido plastico)
 - Esclusi pendii con superficie topografica e profilo stratigrafico molto irregolare;
 - Esclusi terreni che sviluppano elevate pressioni interstiziali ed elevate perdite di rigidità
- **PSEUDO DINAMICO (NEWMARK, spostamenti ammissibili)**
- **FEM DINAMICA (legge costitutiva)**

METODI DI ANALISI

- Pseudostatico

- K_h

- Ishihara 1996

$$\left(\frac{c'_D}{c'} - 1 \right) = \left(1 + \frac{\sigma'_{3f}}{c' \cot \varphi'} \right) \left(\frac{\sigma'_{1D}}{\sigma'_{1f}} - 1 \right)$$

- Pseudodinamico (acc., K_y , analisi)

- Newmark (1965)

- Makdisi e Seed(1978)

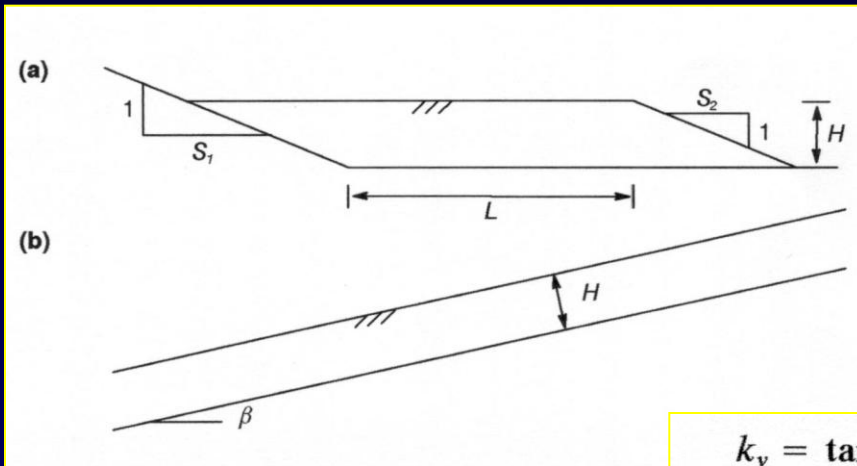
- Bray et al. (1998)

- Rathje e Bray (2000)

DETERMINAZIONE DI K_y

- Sarma (1979)
- Chang et al. (1984)
- Bray et al. (1998)
- Biondi et al. (2007)

DETERMINAZIONE DI K_y



$$k_y = \tan(\phi - \beta) + \frac{c}{\gamma H \cos^2 \beta (1 + \tan \phi \tan \beta)}$$

$$k_y = \frac{(FS_{static} - 1) \cos \theta_1 \sin \theta_1 S_1 H/2}{H(S_1 + S_2)/2 + L}$$

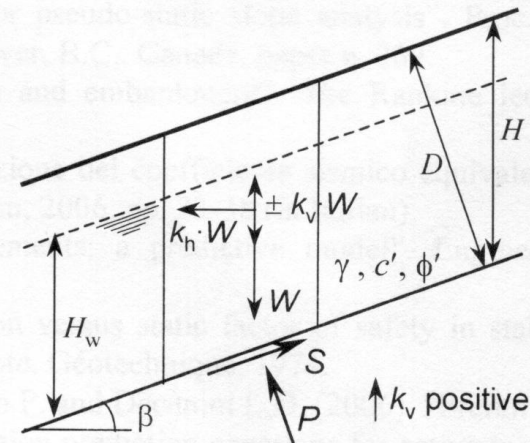
$$FS_{static} = \frac{\tan \phi (S_1 H/2 \cos^2 \theta_1 + L + S_2 H/2)}{\cos \theta_1 \sin \theta_1 S_1 H/2}$$

$$\theta_1 = \tan^{-1} (1/S_1)$$

DETERMINAZIONE DI K_y

Notation

- β : slope angle
 H, D : failure surface depth, thickness of unstable soil
 c' : effective cohesion
 ϕ' : angle of shearing resistance
 γ : soil unit weight
 γ_w : water unit weight
 r_u : pore pressure ratio = $(\gamma_w \cdot H_w) / (\gamma \cdot H)$
 Δu^* : earthquake-induced pore pressure ratio
 $= \Delta u / [\gamma \cdot D \cdot \cos \beta \cdot (1 - r_u)]$
 k : seismic coefficient
 k_h, k_v : horizontal and vertical component of k
 $\Omega = k_v / k_h$;
 $D = H \cdot \cos \beta$



Scheme of infinite slope

Horizontal critical acceleration coefficient:

$$k_{h,c} = \frac{c' / (\gamma \cdot D) + \cos \beta \cdot (1 - r_u) \cdot (1 - \Delta u^*) \cdot \tan \phi' - \sin \beta}{(\sin \beta \mp \Omega \cdot \cos \beta) \cdot \tan \phi' + (\cos \beta \pm \Omega \cdot \sin \beta)}$$

AUMENTO PRESSIONE u

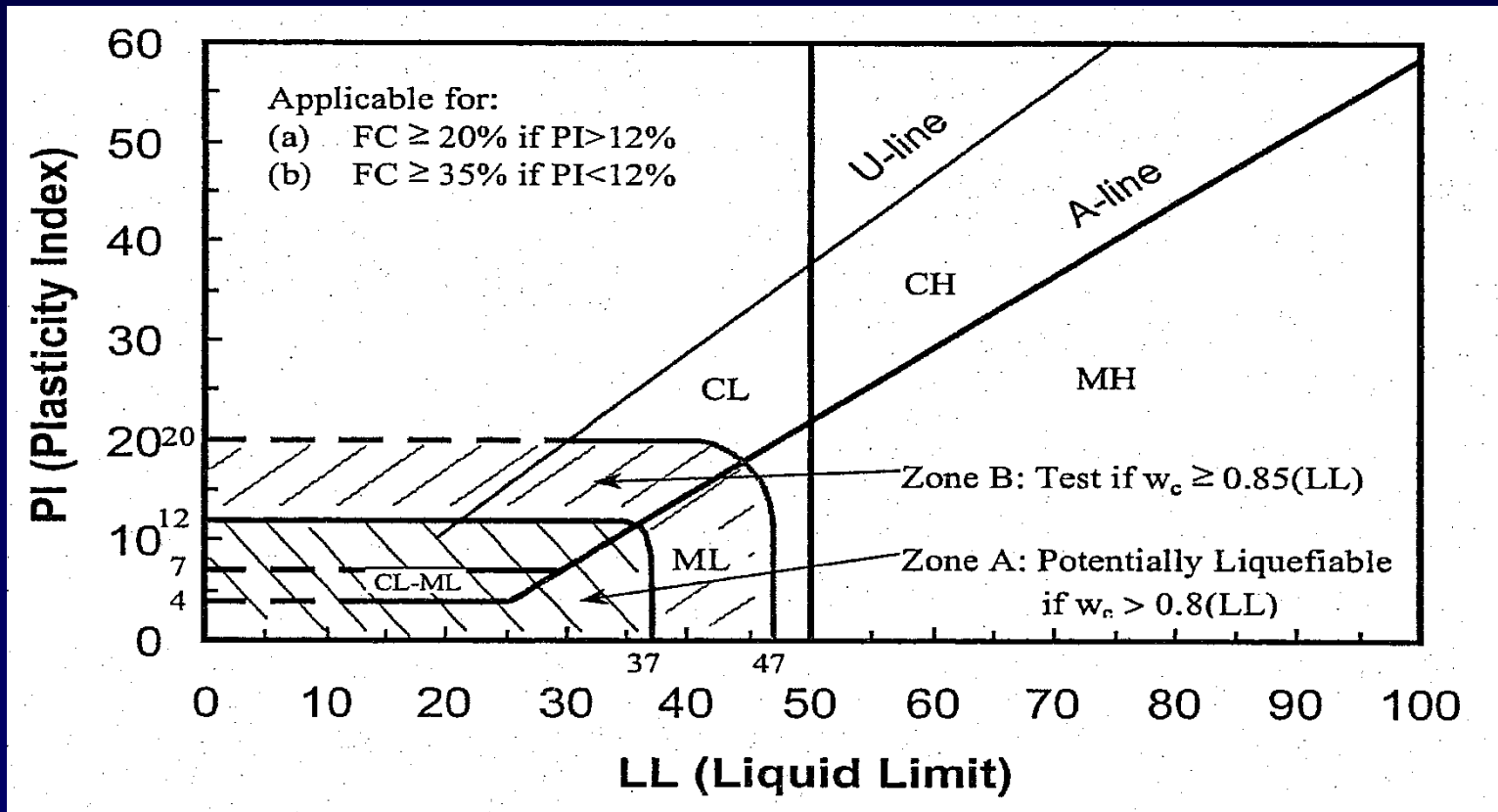
- Matasovic e Vucetic (1992)

$$u_N^* = \sum_{i=0}^m N^i \left(\sum_{j=0}^n \alpha_{ij} \text{OCR}^j \right) (\gamma - \gamma_{tv})^2 + \sum_{i=0}^m N^i \left(\sum_{j=0}^n \beta_{ij} \text{OCR}^j \right) (\gamma - \gamma_{tv})$$

- Dobry et al (1985)

DEGRADAZIONE CICLICA

- Liquefazione
- Ishihara (1996)



$$k_h = \pm \beta \cdot S_s \cdot S_T \cdot a_g / g$$

PSEUDO-STATICO (FORZE INERZIALI)

- **FORZA ORIZZONTALE**

$$F_v = \frac{a_v W}{g} = k_v W$$

- **FORZA VERTICALE**

$$F_h = \frac{a_h W}{g} = k_h W$$

$$k_h = \pm \beta \cdot S_s \cdot S_T \cdot a_g / g$$

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

- **NTC 2008**

FATTORE DI AMPLIFICAZIONE TOPOGRAFICA

- **Dislivello > 30 m; Pendenza > 15°**
 - **$S_T=1.2$ (in prossimità del ciglio superiore di pendii scoscesi isolati)**
 - **$S_T=1.4$ (alla sommità di profili topografici aventi larghezza in cresta molto inferiore alla base e pendenza > 30°)**
 - **$S_T=1.2$ (come il caso precedente ma pendenze minori)**

PSEUDO-STATICO (PARAMETRI DI RESISTENZA)

- **COMPORTAMENTO FRAGILE
(RESIDUO)**
- **CONDIZIONI DRENATE – NON
DRENATE**
- **DEGRADAZIONE CICLICA**

**ASSUMERE LE CONDIZIONI PIU'
SVAFOREVOLI**

PSEUDO-STATICO (FATTORE DI SICUREZZA GLOBALE)

- **$F_s \geq 1.3$ (D.M. LL.PP 11/03/1988, Fattore di sicurezza globale)**
- **$F_s = 1.0$ (back-analysis)**
- **A2 + M2 + R2 (NTC 2008)**

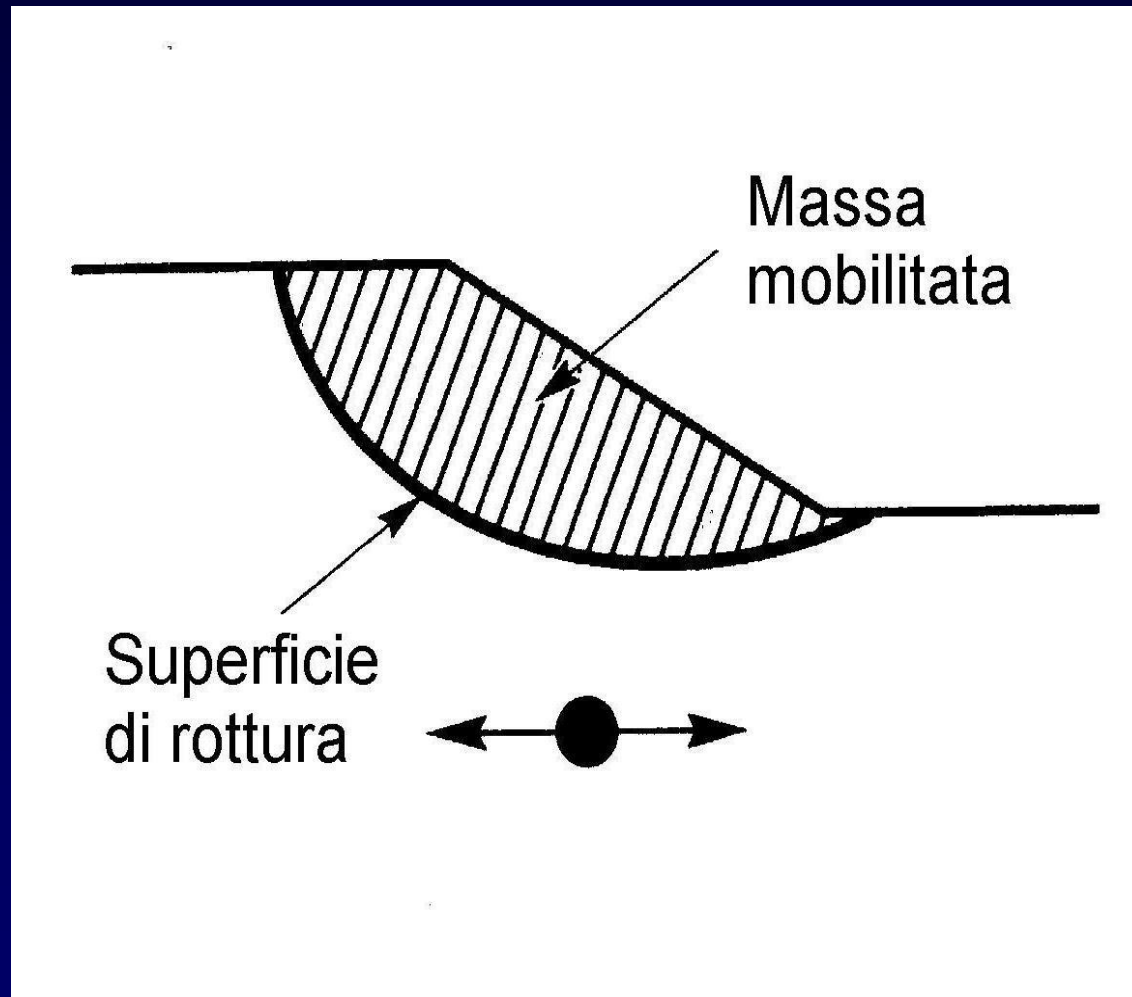
FATTORI DI SICUREZZA PARZIALI: EC8 EC7 NTC 2008

- Resistenza al taglio non drenata (grana fine) $C_u/1.4$
- Resistenza al taglio non drenata (grana grossa) $\tau_{cyc,u}/1.25$
- Angolo di resistenza al taglio $\tan(\varphi')/1.25$

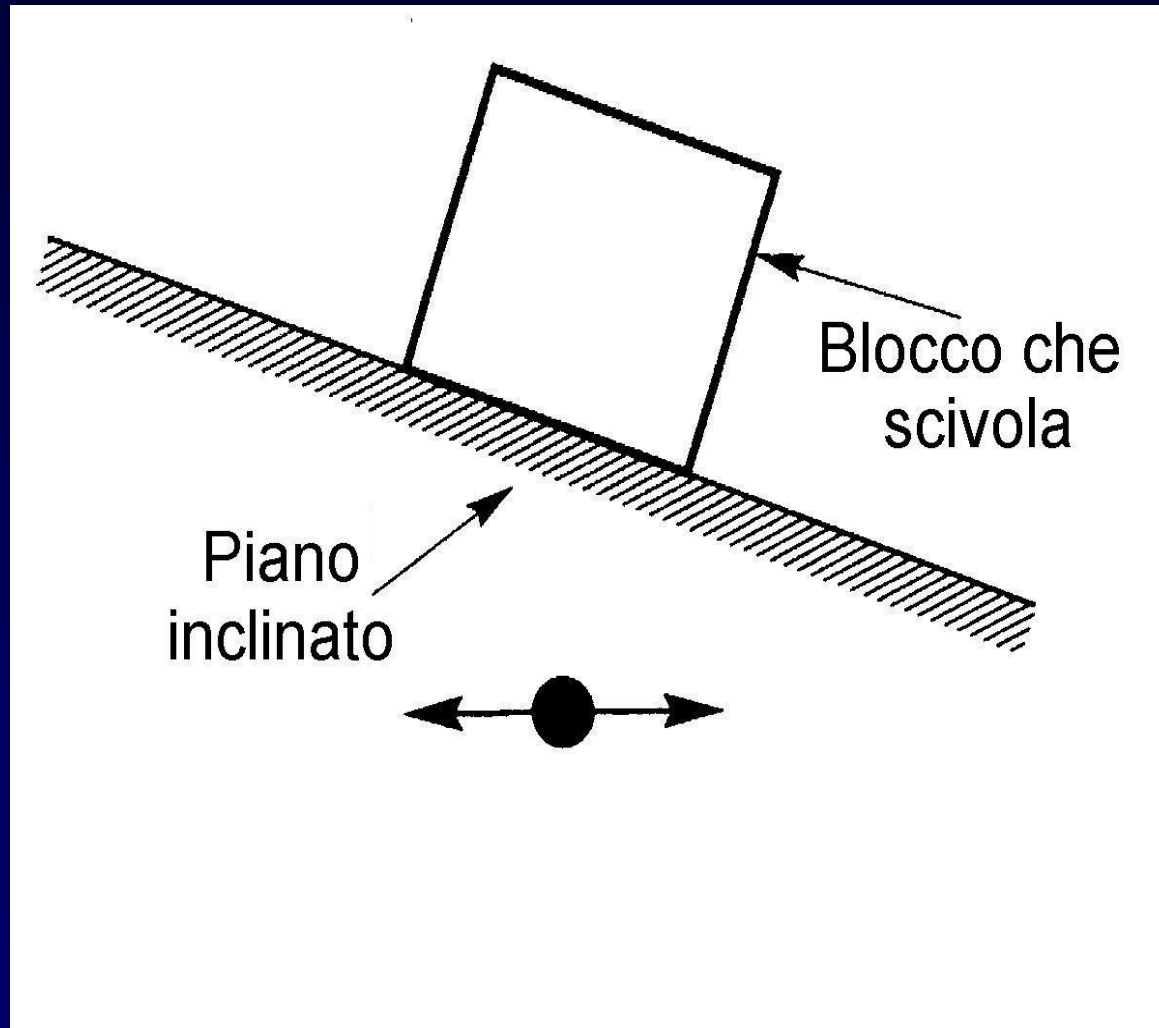
METODO PSEUDOSTATICO: ASPETTI CRITICI

- **TERRENI FRAGILI (PICCO O RESIDUO)**
- **SCELTA COEFFICIENTI SISMICI**
- **DEGRADAZIONE CICLICA**

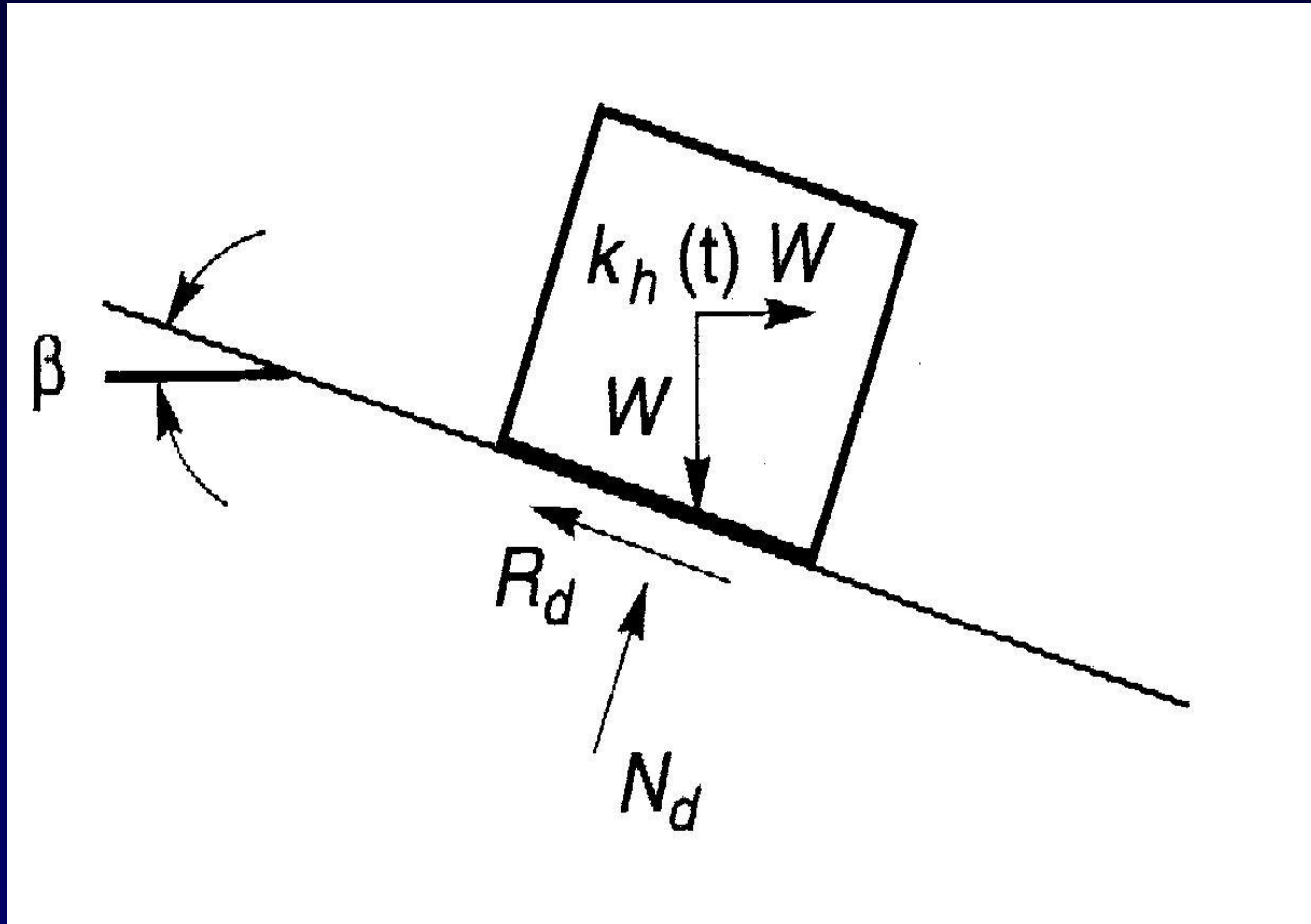
PSEUDO-DINAMICO (NEWMARK)



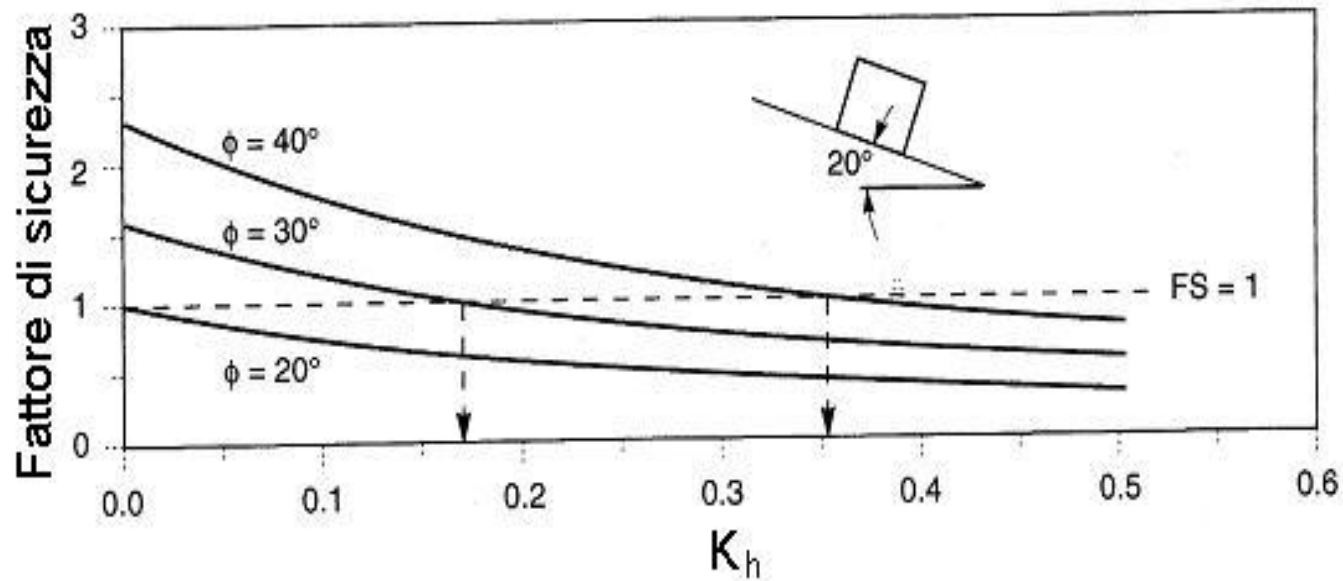
PSEUDO-DINAMICO (NEWMARK)



PSEUDO-DINAMICO (NEWMARK)



NEWMARK



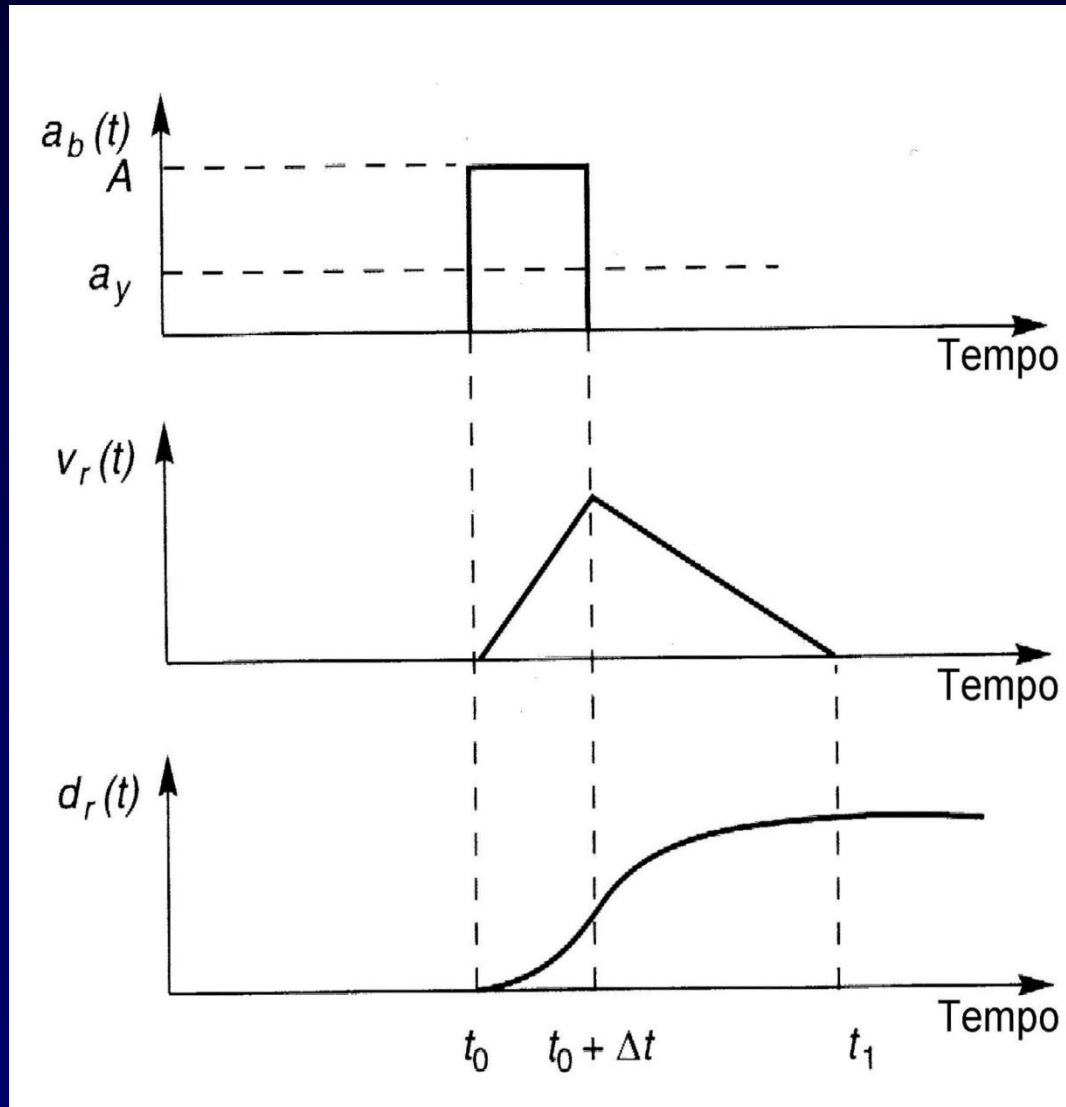
$$F_s = \frac{[\cos\beta - k_h(t)\text{sen}\beta] \cdot \tan\phi}{\text{sen}\beta + k_h(t)\cos\beta}$$

$$a_y = k_y g$$

$$k_y = \tan(\phi' - \beta)$$

$$k_y = (\tan\phi' + \tan\beta) / (1 + \tan\phi' \tan\beta)$$

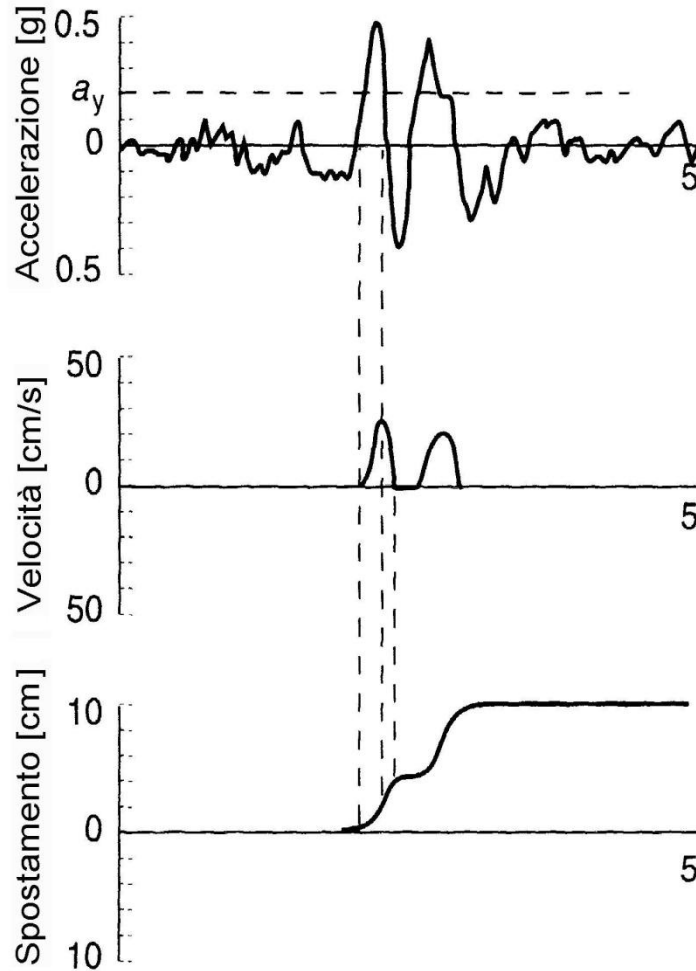
NEWMARK: CALCOLO



NEWMARK: CALCOLO SPOSTAMENTO

$t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$	$t = t_0 + \Delta t$	$t_1 = t_0 + A \Delta t / a_y$
$a_{\text{rel}} = a_b(t) - a_y = A - a_y$	$-a_y$	0
$v_{\text{rel}}(t) = \int_{t_0}^t a_{\text{rel}}(t) dt =$ $(A - a_y)(t - t_0)$	$(A - a_y)\Delta t$	0
$d_{\text{rel}}(t) = \int_{t_0}^t v_{\text{rel}}(t) dt =$ $0.5(A - a_y)(t - t_0)^2$	$0.5(A - a_y)\Delta t^2$	$d_{\text{rel}}(t_1) = 0.5(A - a_y)\Delta t^2 A / a_y$

DURATA, AMPIEZZA,



SPOSTAMENTO MASSIMO

- Formula semplificata di Newmark

$$d_{\max} = \frac{v_{\max}^2}{2 \cdot a_y} \frac{a_{\max}}{a_y}$$

$$a_y = k_y g$$

$$k_y = \tan(\varphi' - \beta)$$

LIMITI E POTENZIALITA' DEL METODO DI NEWMARK

- **MOTO SISMICO**
 - **LUNGO PERIODO (BASSE FREQUENZE)**
 - **PERIODO BREVE (ALTE FREQUENZE)**
- **FATTORI CHE SI POSSONO
PRENDERE IN CONTO:**
 - **COMPORTAMENTO FRAGILE**
 - **FORMA SUPERFICIE DI ROTTURA**
 - **SOVRAPRESSIONI INTERSTIZIALI**