

STABILITA' DEI PENDII E OPERE DI SOSTEGNO

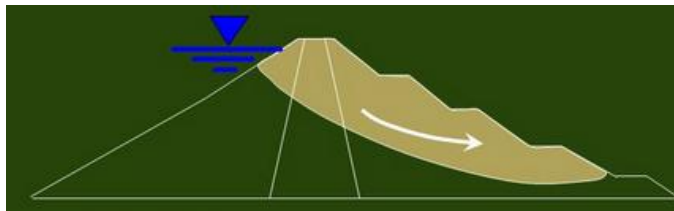
prof. ing. Nunziante Squeglia – ing. Stefano Stacul

4. Stabilità dei Pendii naturali e artificiali

1. Pendii naturali

2. Pendii artificiali:

- Rilevati stradali e ferroviari
- Discariche di R.S.U.
- Fronti di scavo di opere di sbancamento
- Dighe in terra e argini fluviali
- Discariche minerarie
-

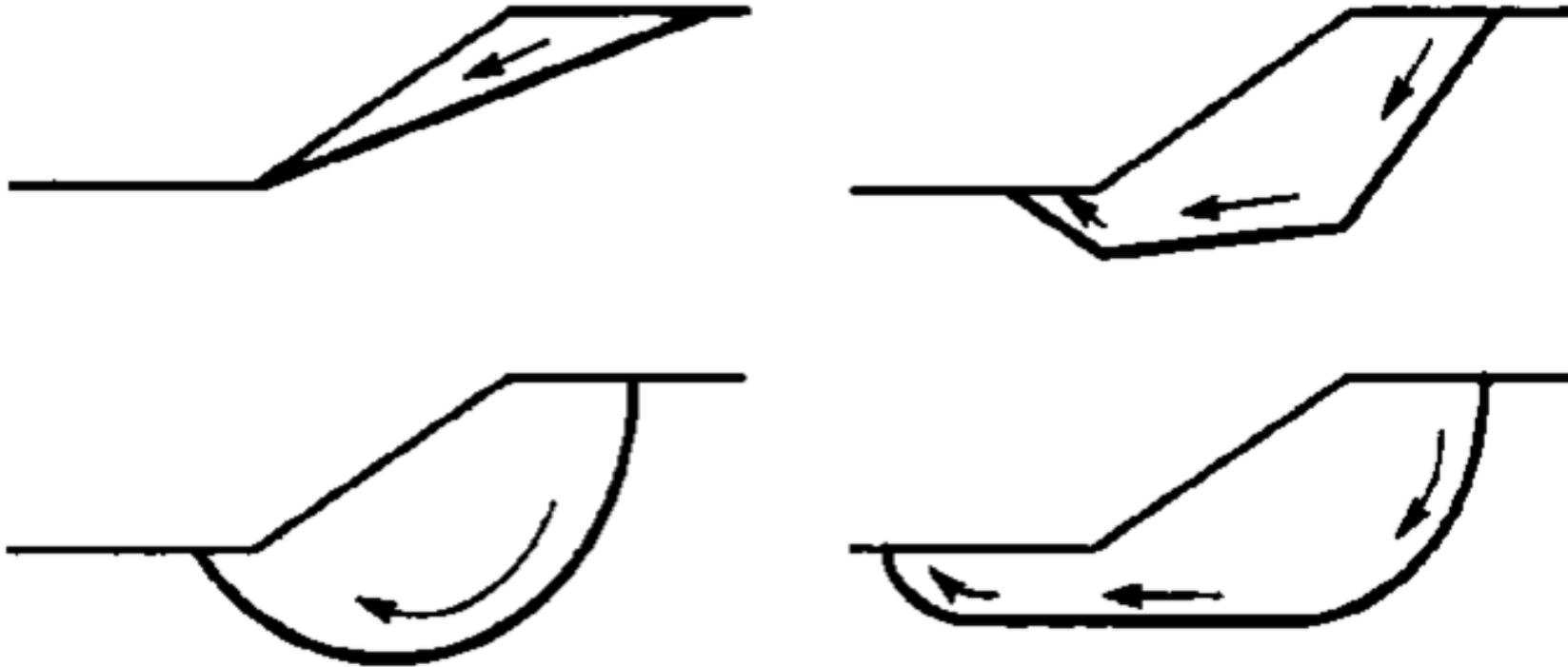


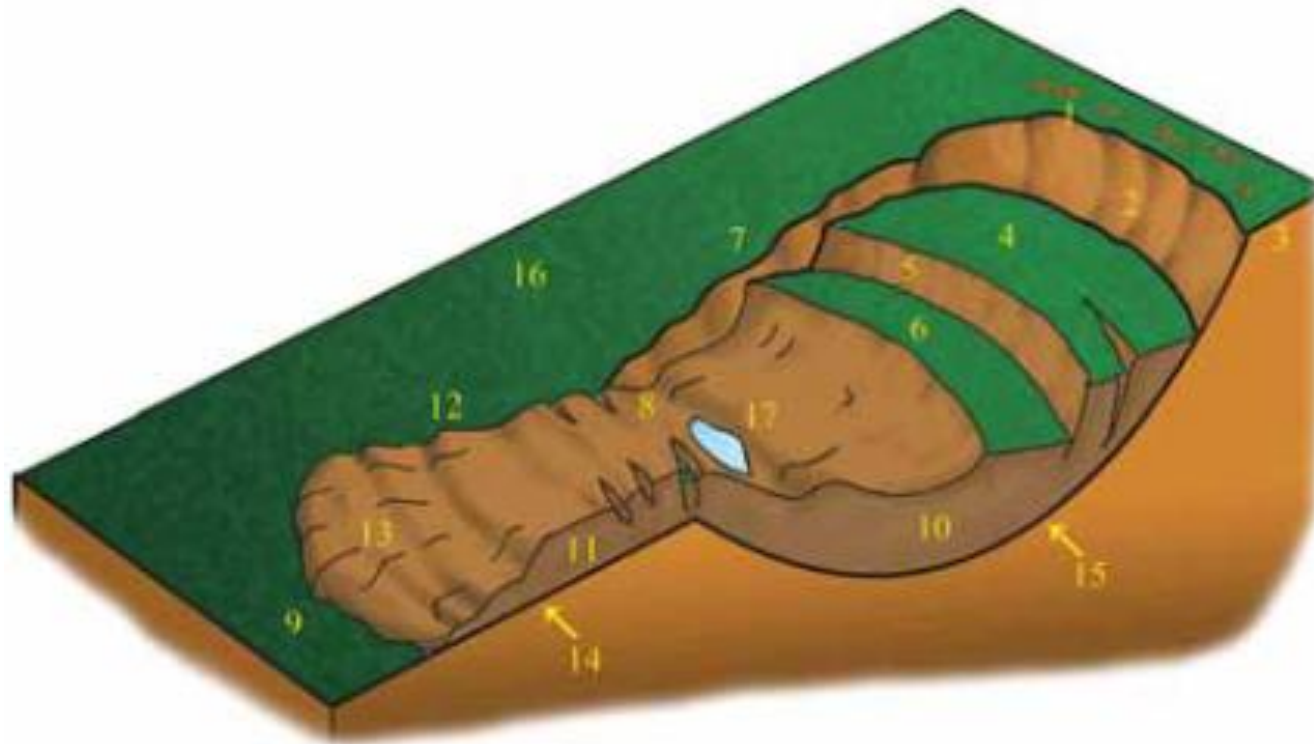
District of Pisa: piping phenomenon through the embankment (landside over the riverbank). From "La voce del Serchio".

L'instabilità del pendio porta allo spostamento verso il basso di una sua porzione lungo una superficie di scivolamento che delimita la parte stabile da quella instabile.

La porzione instabile potrà essere composta da:

- Massa caotica di terreno o roccia (valanghe, colate)
- Struttura coerente





NOMENCLATURA

- 1) Coronamento
- 2) Scarpata principale o nicchia di distacco
- 3) Fessure di trazione
- 4) Testata
- 5) Scarpata secondaria
- 6) Gradino di frana
- 7) Fianco destro
- 8) Fessure trasversali
- 9) Unghia della frana
- 10) Corpo principale
- 11) Piede
- 12) Rigonfiamenti trasversali
- 13) Fessure longitudinali o radiali
- 14) Superficie di separazione o di scorrimento
- 15) Superficie di rottura o di scivolamento
- 16) Superficie originaria del versante
- 17) Area in contropendenza con ristagni d'acqua

CAUSE DELL'INSTABILITA' DI UN VERSANTE:

- **PREDISPONENTI:**
 - *Geometria*
 - *Condizioni Idrauliche*
 - *Geologiche/geotecniche*

- **SCATENANTI:**
 - *Piogge ed eventi meteorici estremi*
 - *Terremoti*
 - *Azioni antropiche*

- *Le condizioni di un pendio variano nel tempo: eventi occasionali/eccezionali, azioni antropiche, evoluzione geomorfologica del sito, variazioni delle caratteristiche geomeccaniche dei materiali coinvolti*

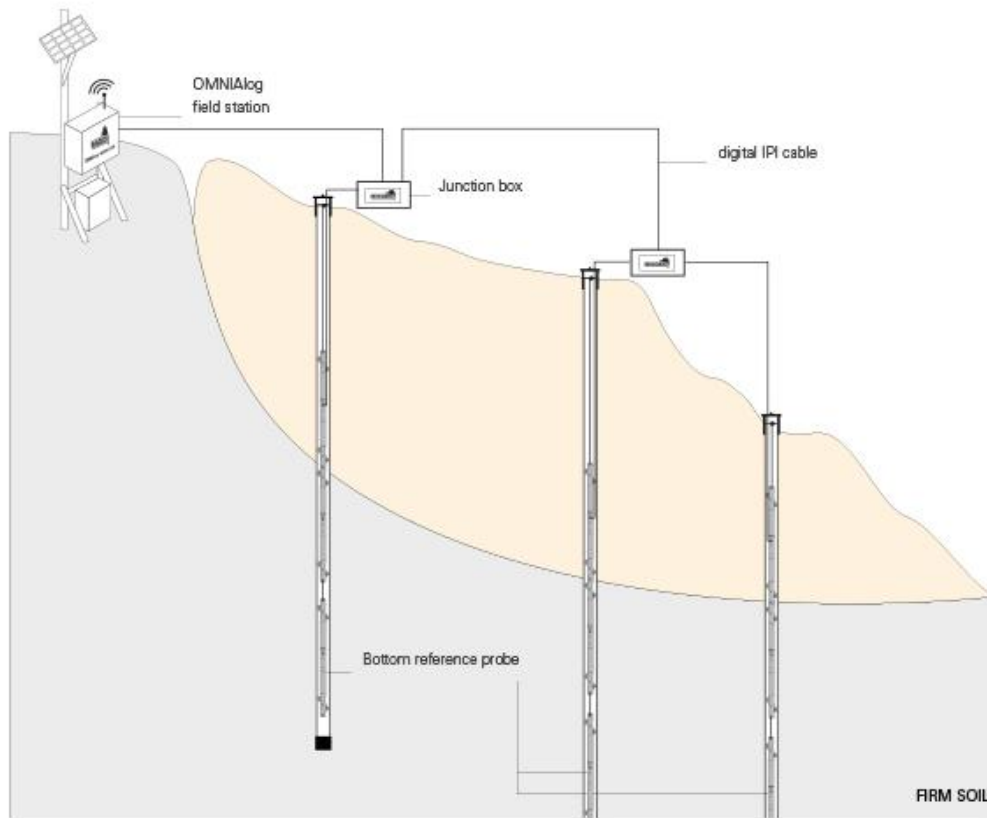






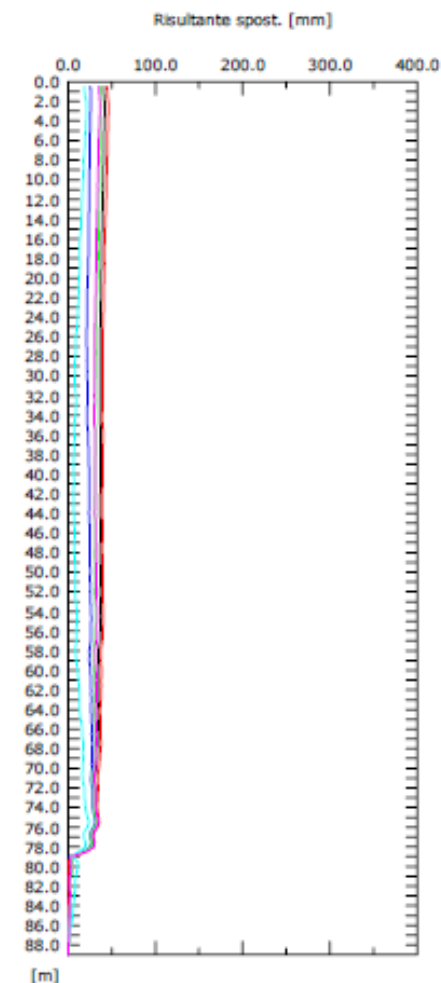
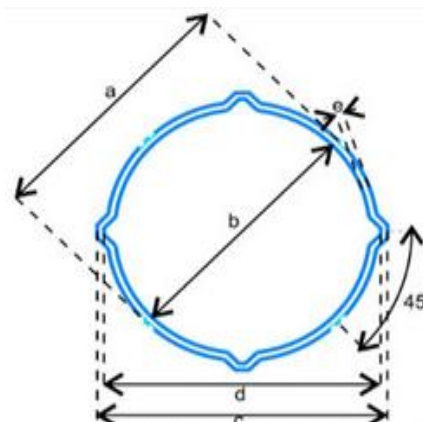
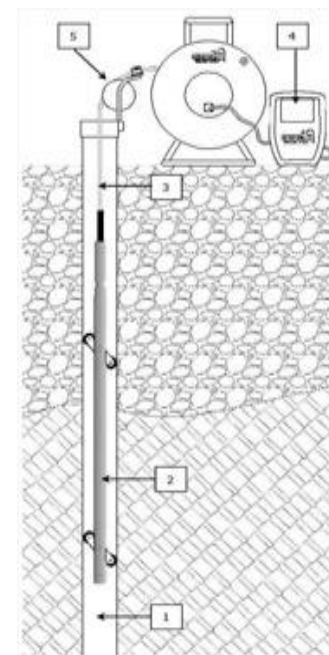
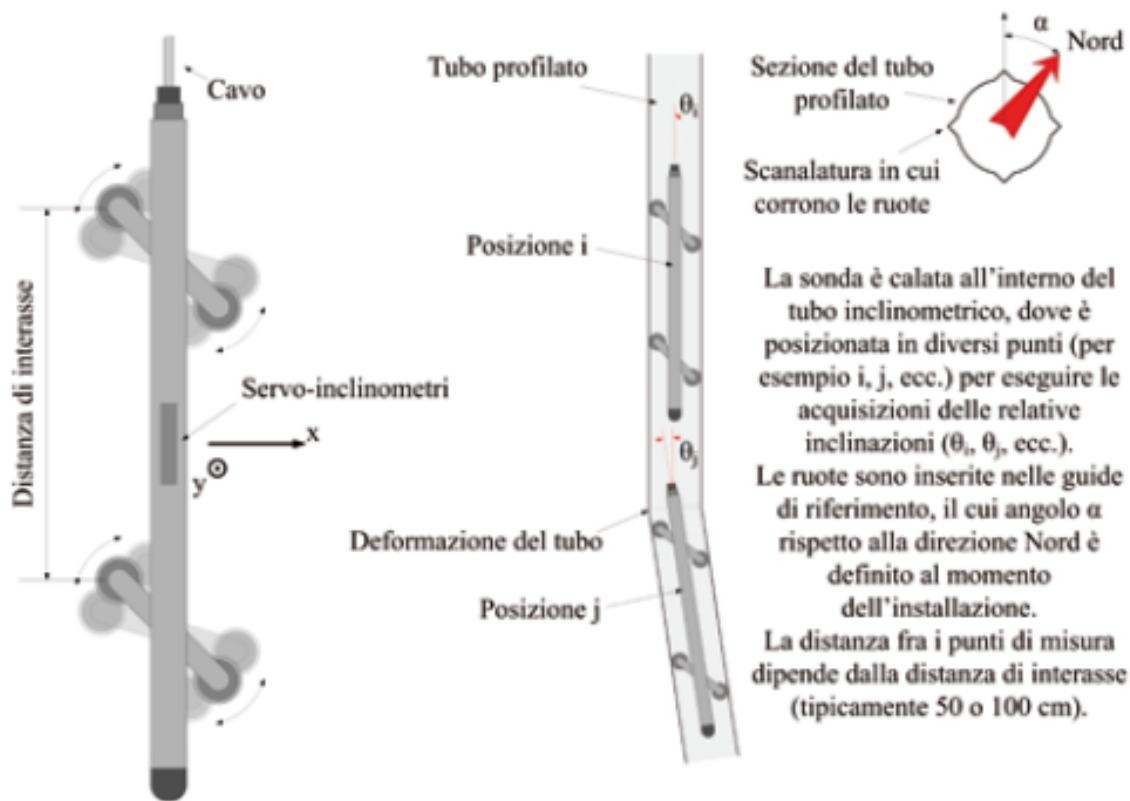
Monitoraggio/indagini movimento franoso

Gli inclinometri fissi da foro (dotati spesso di sensori/accelerometri MEMS) - tubo inclinometrico.



Gli inclinometri mobili o removibili (sonda calata all'interno del tubo inclinometrico generalmente in alluminio)

Sensore della sonda di tipo MEMS (accelerometri triassiali) o inclinometri servo-meccanici. Rilevazioni periodiche, non in continuo.



STABILITA' DEI PENDII NATURALI

CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI DI INSTABILITA' SULLA BASE DI:

- *Natura del materiale (terreno, detrito, roccia, ...)*
- *Stato di attività (attiva, sospesa, riattivata, quiescente, stabilizzata, relitta)*
- *Meccanismo di collasso del corpo instabile o tipologia di fenomeno (crolli, ribaltamenti, scorrimenti rotazionali, scorrimenti traslativi, colate e valanghe detritiche, colate viscosse e traslative, fenomeni gravitativi profondi, fenomeni complessi e compositi, ...)*
- *Distribuzione di attività del fenomeno (costante, retrogressivo, in allargamento, avanzante, in diminuzione, confinato, multidirezionale, ...)*
- *Velocità di evoluzione del fenomeno*

STABILITA' DEI PENDII NATURALI

Stato di attività

Tabella 1.2 – Stati di attività (tratta da AMANTI *et alii*, 1996; parzialmente modificata).

ATTIVO (<i>active</i>): fenomeno attualmente in movimento o comunque che si è mosso l'ultima volta entro l'ultimo ciclo stagionale.	ATTIVO s.s.: fenomeno attualmente in movimento. SOSPESO (<i>suspended</i>): fenomeno che si è mosso entro l'ultimo ciclo stagionale ma che non si muove attualmente. RIATTIVATO (<i>reactivated</i>): fenomeno di nuovo attivo dopo essere stato inattivo.
QUIESCENTE (<i>dormant</i>): fenomeno che può essere riattivato dalle sue cause originali (ossia per il quale permangono le cause del movimento).	
INATTIVO O STABILIZZATO (<i>stabilized</i>): fenomeno che non può essere riattivato dalle sue cause originali.	NATURALMENTE STABILIZZATO (<i>abandoned</i>): fenomeno che non è più influenzato dalle sue cause originali (per il quale le cause del movimento sono state naturalmente rimosse). ARTIFICIALMENTE STABILIZZATO (<i>artificially stabilized</i>): fenomeno che è stato protetto dalle sue cause originali da misure di stabilizzazione. RELICTO (<i>relict</i>): fenomeno che si è sviluppato in condizioni geomorfologiche o climatiche considerevolmente diverse dalle attuali.

STABILITA' DEI PENDII NATURALI

Attiva



Sospesa



Riattivata



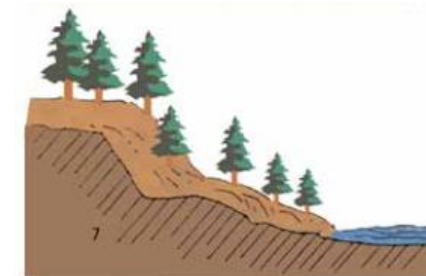
Quiescente



*Stabilizzata naturalmente
o artificialmente*



Relitta



Velocità di evoluzione del fenomeno

Tabella B.2 – Scala di intensità delle frane basata sulla velocità e sul danno prodotto (Cruden e Varnes, 1996)

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità	(m/s)
7	<i>Estremamente rapido</i>	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.	5 m/s	5
6	<i>Molto rapido</i>	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$
5	<i>Rapido</i>	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	1,8 m/h	$5 \cdot 10^{-4}$
4	<i>Moderato</i>	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute.	13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$
3	<i>Lento</i>	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	1,6 m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$
2	<i>Molto lento</i>	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	16 mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$
1	<i>Estremamente lento</i>	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni.	-	-

Tipologia di fenomeno/meccanismo

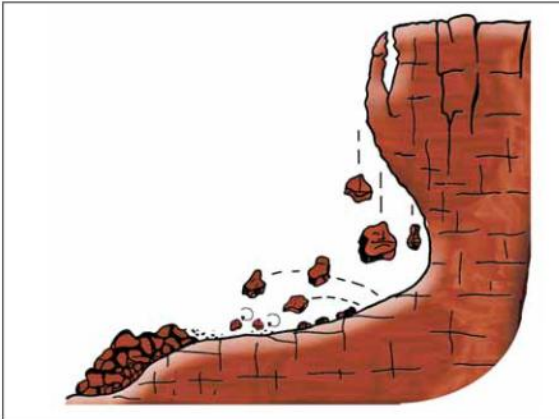
Tabella B.1 - Esempio di classificazione dei fenomeni di frana in funzione del tipo di materiale (Varnes, 1978)

Tipo di movimento		Tipo di materiale		
		Rocce	Terreni grossolani	Terreni fini
Crolli (<i>falls</i>)		Crolli di roccia	Crolli di detrito	Crolli-di-terra
Ribaltamenti (<i>topples</i>)		Ribaltamento di roccia	Ribaltamento di detrito	Ribaltamento di terra
Scorrimenti (<i>slides</i>)	Rotazionali	Scorrimento rotazionale di roccia	Scorrimento rotazionale di detrito	Scorrimento rotazionale di terra
	Traslazionali	Scorrimento traslazionale di roccia	Scorrimento traslazionale di detrito	Scorrimento traslazionale di terra
Espandimenti laterali (<i>lateral spreads</i>)		Espandimenti laterali di roccia	Espandimenti laterali di detrito	Espandimenti laterali di terra
Flussi (<i>flows</i>)		Flussi di roccia (deformazioni gravitative profonde di versante)	Flussi di detrito	Flussi di terra
Frane complesse / composite (<i>complex</i>)		Combinazione di 2 o più tipi nello spazio e/o nel tempo		

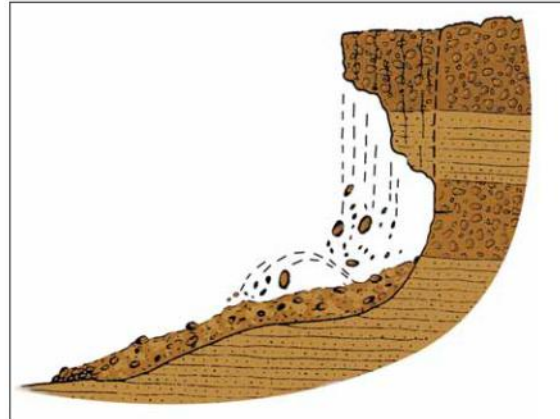
Fenomeno gravitativo profondo



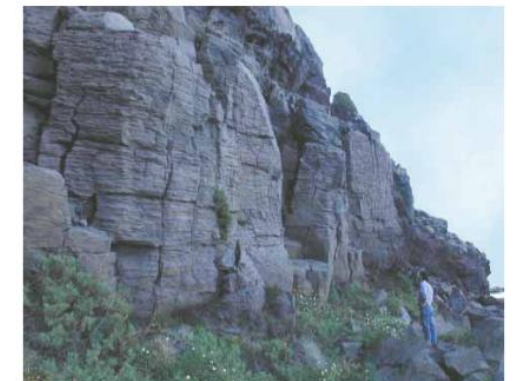
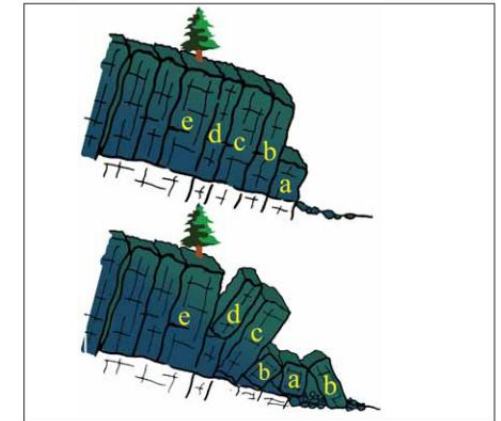
*Crollo in roccia (litoidi
fratturati e fessurati)*



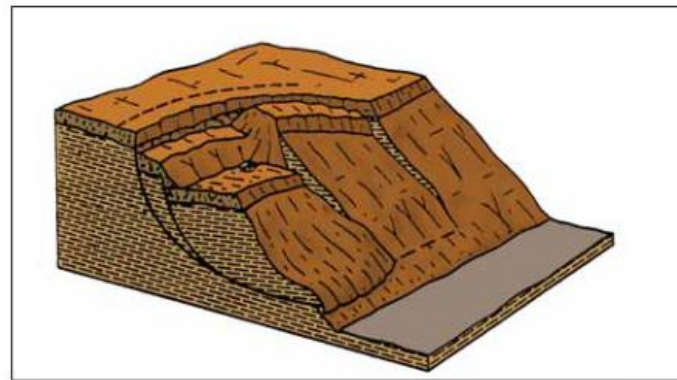
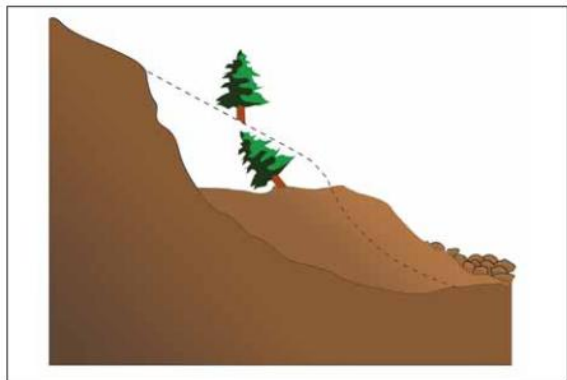
*Crollo in depositi detritici
stratificati*



*Ribaltamento in roccia
fratturata*



Scorrimenti rotazionali: forma arcuata della superficie di rottura e formazione di aree di contropendenza

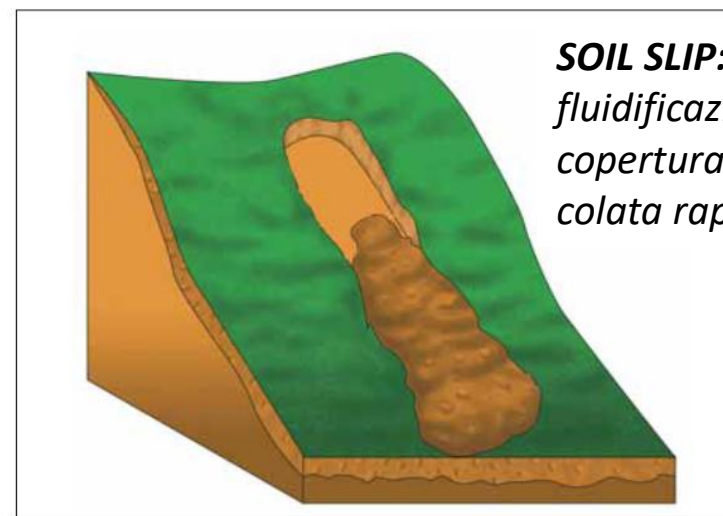
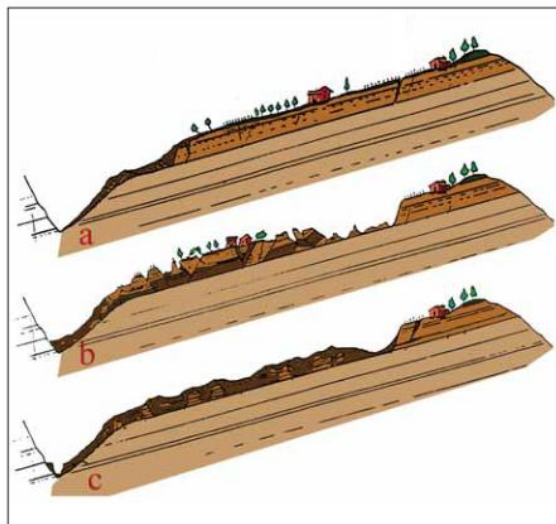
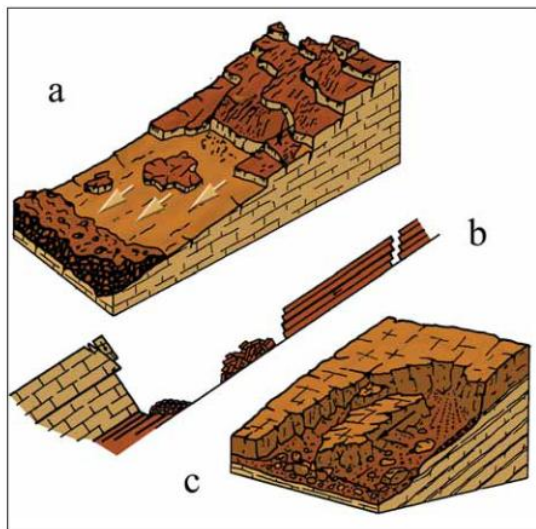


Comune di Fiamignano (RI)



Comune di Cassano allo Jonio (CS).

Scorrimenti traslativi: superfici di discontinuità preesistenti e poco scabre orientate con giacitura a franapoggio e inclinazione minore o uguale a quella del pendio



SOIL SLIP: Frane per saturazione e fluidificazione dei terreni della copertura superficiale. Può evolvere in colata rapida.



Località Lavini di Marco, comune di Rovereto (TN).



Evento alluvionale del novembre 1994, nella zona collinare delle Langhe

Colate rapide: Le colate rapide di detrito (debris flows) e di fango (mud flows)



Fenis (AO). Alluvione ottobre 2000

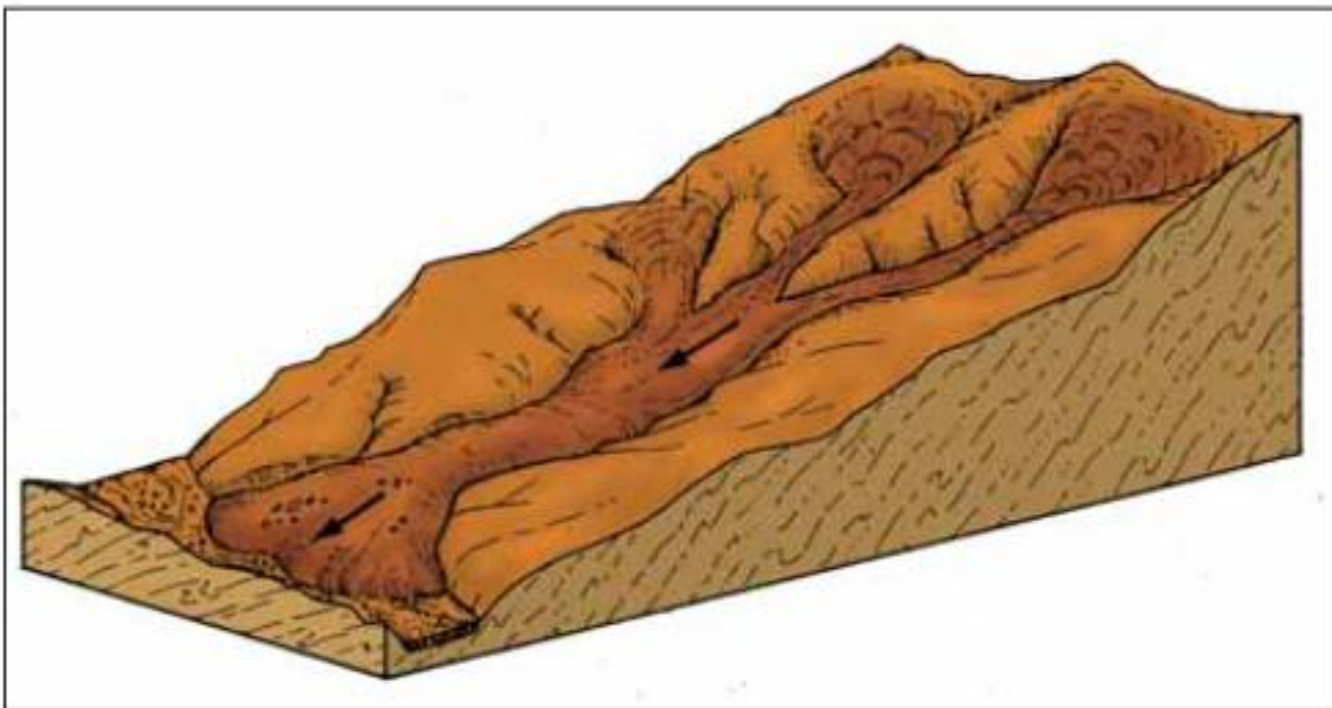


Comune di Vieille (AO)



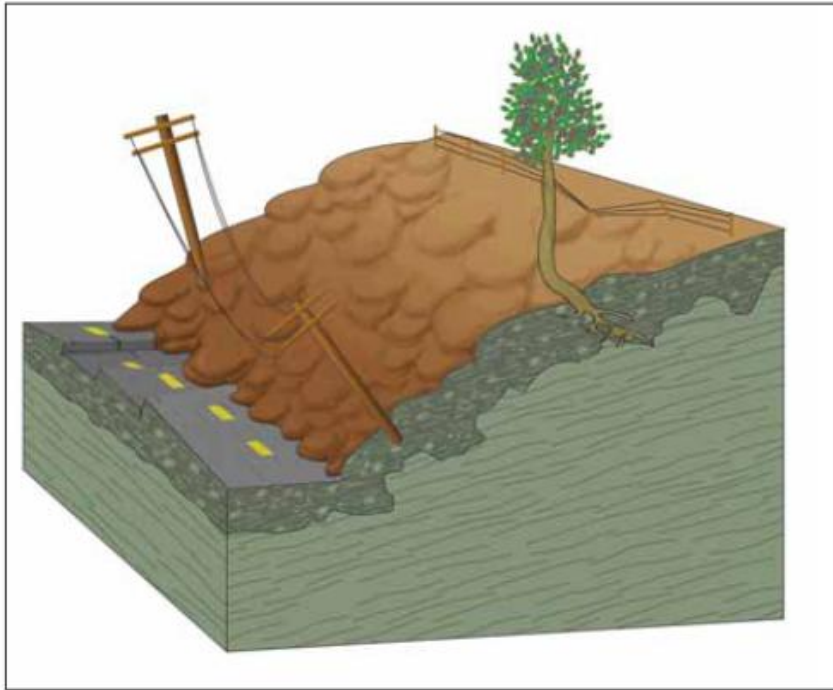
Alluvione di Cervinara (AV),
dicembre 1999

Colamenti lenti: Il movimento è causato generalmente dalla saturazione del materiale per aumento del contenuto d'acqua. La velocità di spostamento è variabile nello spazio, risulta maggiore al centro rispetto ai bordi, più alta in superficie rispetto alle parti più profonde. Questa distribuzione genera la caratteristica forma «lobata» del corpo di frana.



Località Fossalto, comune Castropignano (CB)

Soliflusso (colate lente viscosi): consiste in un movimento lento e discontinuo, che coinvolge le porzioni più superficiali di materiali sedimentari, rese fluide e molto viscosi dal contenuto in acqua. E' tipico di terreni poco permeabili, ricchi di limo e argilla e capaci di imbibirsi d'acqua. Coinvolge spessori modesti (1-2 metri) ed è caratterizzato da velocità dell'ordine di alcuni decimetri per anno.

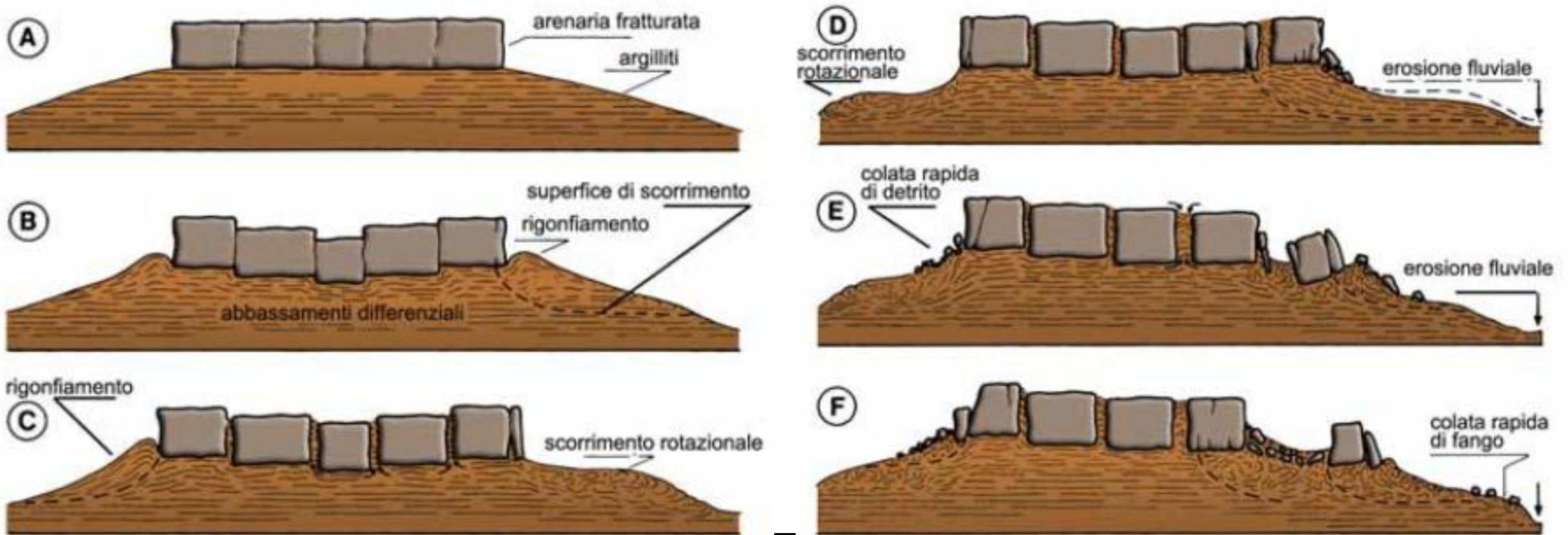


Provincia di Campobasso



Comune di Volterra (PI)²²

Espansioni laterali: Le espansioni laterali si verificano tipicamente quando corpi rocciosi rigidi e fratturati sono sovrapposti a terreni a comportamento plastico.



6.3.4. VERIFICHE DI SICUREZZA

Le verifiche di sicurezza devono essere effettuate con metodi che tengano conto del tipo di frana e dei possibili cinematismi, considerando forma e posizione della eventuale superficie di scorrimento, le proprietà meccaniche dei terreni e degli ammassi rocciosi e il regime delle pressioni interstiziali.

Nel caso di pendii in frana le verifiche di sicurezza devono essere eseguite lungo le superfici di scorrimento che meglio approssimano quella/e riconosciuta/e con le indagini.

Negli altri casi, la verifica di sicurezza deve essere eseguita lungo superfici di scorrimento cinematicamente possibili, in numero sufficiente per ricercare la superficie critica alla quale corrisponde il grado di sicurezza più basso.

Quando sussistano condizioni tali da non consentire una agevole valutazione delle pressioni interstiziali, le verifiche di sicurezza devono essere eseguite assumendo le condizioni più sfavorevoli che ragionevolmente si possono prevedere.

La valutazione del coefficiente di sicurezza dei pendii naturali, espresso dal rapporto tra la resistenza al taglio disponibile (τ) e la tensione di taglio agente (τ) lungo la superficie di scorrimento, deve essere eseguita impiegando sia i parametri geotecnici, congruenti con i caratteri del cinematismo atteso o accertato, sia le azioni presi con il loro valore caratteristico.

L'adeguatezza del margine di sicurezza ritenuto accettabile dal progettista deve comunque essere giustificata sulla base del livello di conoscenze raggiunto, dell'affidabilità dei dati disponibili e del modello di calcolo adottato in relazione alla complessità geologica e geotecnica, nonché sulla base delle conseguenze di un'eventuale frana.

6.3.5. INTERVENTI DI STABILIZZAZIONE

Il progetto degli interventi di stabilizzazione deve comprendere la descrizione completa dell'intervento, l'influenza delle modalità costruttive sulle condizioni di stabilità, il piano di monitoraggio e un significativo piano di gestione e controllo nel tempo della funzionalità e dell'efficacia dei provvedimenti adottati. In ogni caso devono essere definiti l'entità del miglioramento delle condizioni di sicurezza del pendio e i criteri per verificarne il raggiungimento.

La scelta delle più idonee tipologie degli interventi di stabilizzazione deve tener conto delle cause promotrici della frana, del meccanismo di collasso ipotizzato o in atto, dei suoi caratteri cinematici e del regime delle pressioni interstiziali nel sottosuolo. Il progetto degli interventi deve essere basato su specifici modelli geotecnici di sottosuolo.

L'adeguatezza del margine di sicurezza raggiunto per effetto degli interventi di stabilizzazione deve essere giustificato dal progettista.

Oltre alla valutazione dell'incremento di sicurezza indotto dagli interventi di stabilizzazione nei confronti del meccanismo di collasso più critico, è necessario verificare le condizioni di sicurezza connesse con altri, diversi, meccanismi di collasso, compatibili con gli interventi ipotizzati

***Indicazioni delle NTC2018
(Verifiche in assenza di sisma) –
Pendii naturali***

Indicazioni delle Normative tecniche (Verifiche in assenza di sisma) - Pendii artificiali, materiali sciolti e fronti di scavo

Le presenti norme si applicano ai manufatti di materiali sciolti, quali rilevati, argini di difesa per fiumi, canali e litorali, rinfianchi, rinterri, terrapieni e colmate, scavi per la formazione di piazzali e/o trincee. Le norme si applicano, inoltre, alle opere e alle parti di opere di materiali sciolti con specifiche funzioni di drenaggio, filtro, transizione, fondazione, tenuta, protezione ed altre. Gli sbarramenti di ritenuta idraulica di materiali sciolti sono oggetto di normativa specifica.

- **NTC 2018:** A2 + M2 + R2

Tab. 6.2.II – Coefficienti parziali per i parametri geotecnici del terreno

Parametro	Grandezza alla quale applicare il coefficiente parziale	Coefficiente parziale γ_M	(M1)	(M2)
Tangente dell'angolo di resistenza al taglio	$\tan \varphi'_k$	γ_φ	1,0	1,25
Coesione efficace	c'_k	γ_c	1,0	1,25
Resistenza non drenata	c_{uk}	γ_{cu}	1,0	1,4
Peso dell'unità di volume	γ_γ	γ_γ	1,0	1,0

Tab. 6.2.I – Coefficienti parziali per le azioni o per l'effetto delle azioni

	Effetto	Coefficiente Parziale γ_F (o γ_E)	EQU	(A1)	(A2)
Carichi permanenti G_1	Favorevole	γ_{G1}	0,9	1,0	1,0
	Sfavorevole		1,1	1,3	1,0
Carichi permanenti $G_2^{(1)}$	Favorevole	γ_{G2}	0,8	0,8	0,8
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3
Azioni variabili Q	Favorevole	γ_Q	0,0	0,0	0,0
	Sfavorevole		1,5	1,5	1,3

Le verifiche devono essere effettuate secondo la Combinazione 2 (A2+M2+R2) dell'Approccio 1, tenendo conto dei valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e 6.8.I.

Tab. 6.8.I - Coefficienti parziali per le verifiche di sicurezza di opere di materiali sciolti e di fronti di scavo

COEFFICIENTE	R2
γ_R	1,1

La stabilità globale dell'insieme manufatto-terreno di fondazione deve essere studiata nelle condizioni corrispondenti alle diverse fasi costruttive, al termine della costruzione e in esercizio.

ANALISI DI STABILITA' (statica o pseudo-statica)

Metodo dell'equilibrio limite globale

- L'azione sismica è tenuta in conto mediante l'approccio PSEUDO-STATICO. È valutata come un'aliquota di W del terreno compreso nell'area potenzialmente instabile

Componente orizzontale dell'azione sismica pseudo-statica
(direzione: verso l'esterno del pendio)

$$k_h W$$

$$k_h = \beta_s S_S S_T a_g / g$$

Il coefficiente β_s tiene conto della possibilità che il pendio possa subire degli spostamenti durante il sisma

Pendii naturali

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
$0,2 < a_g/g \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g/g \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g/g \leq 0,1$	0,20	0,20

Artificiali (fronti di scavo e rilevati)

$$\beta_s = 0.38 \text{ (SLV)}$$

$$\beta_s = 0.47 \text{ (SLD)}$$

Componente verticale dell'azione sismica pseudo-statica
(direzione: sia verso l'alto che verso il basso)

$$k_v W$$

$$k_v = \pm 0.5 k_h$$

Fattore di amplificazione stratigrafica S_S

$$k_h = \beta_s S_S S_T a_g / g$$

Tab. 3.2.II – *Categorie di sottosuolo che permettono l'utilizzo dell'approccio semplificato.*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di velocità delle onde di taglio superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie terreni di caratteristiche meccaniche più scadenti con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> , caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 360 m/s e 800 m/s.
C	<i>Deposit</i> i di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 180 m/s e 360 m/s.
D	<i>Deposit</i> i di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti, con profondità del substrato superiori a 30 m, caratterizzati da un miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di velocità equivalente compresi tra 100 e 180 m/s.
E	<i>Terreni con caratteristiche e valori di velocità equivalente riconducibili a quelle definite per le categorie C o D</i> , con profondità del substrato non superiore a 30 m.

Tab. 3.2.IV – *Espressioni di S_S e di C_C*

Categoria sottosuolo	S_S
A	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,20$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,50$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,80$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_o \cdot \frac{a_g}{g} \leq 1,60$

Fattore di amplificazione topografica S_T

$$k_h = \beta_S S_S S_T a_g / g$$

Tab. 3.2.III – *Categorie topografiche*

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Ubicazione dell'opera e dell'intervento

- $S_T = 1.2$ (In corrispondenza della sommità del pendio – max T2)
- $S_T = 1.2$ (In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media minore o uguale a 30° - max T3)
- $S_T = 1.4$ (In corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30° - max T4)

Altrimenti S_T potrà essere stimato mediante analisi di risposta sismica locale bidimensionali.

In generale l'amplificazione tende a decrescere sotto la superficie del pendio. Pertanto, gli effetti topografici tendono ad essere massimi lungo le creste di dorsali e rilievi, ma si riducono sensibilmente in frane con superfici di scorrimento profonde. In tali situazioni, nelle analisi pseudo-statiche gli effetti di amplificazione topografica possono essere trascurati ($S_T = 1$)

Indicazioni nelle NTC 2018 – Pendii naturali (condizioni sismiche) – 7.11.3.5

Corso di Stabilità dei Pendii e Opere di Sostegno

La condizione di stato limite deve essere valutata con riferimento ai valori caratteristici dei parametri geotecnici e riferita alla superficie di scorrimento critica, caratterizzata dal minore margine di sicurezza. L'adeguatezza del margine di sicurezza nei confronti della stabilità del pendio deve essere valutata e motivata dal progettista.

In terreni saturi e in siti con accelerazione orizzontale massima attesa $a_{max} > 0,15g$, nell'analisi statica delle condizioni successive al sisma si deve tenere conto della possibile riduzione della resistenza al taglio per incremento delle pressioni interstiziali o per decadimento delle caratteristiche di resistenza indotti dalle azioni sismiche.

Nell'analisi di stabilità di frane quiescenti, che possono essere riattivate dall'azione del sisma, si deve fare riferimento ai valori dei parametri di resistenza attinti a grandi deformazioni. L'eventuale incremento di pressione interstiziale indotto dal sisma, da considerare in dipendenza della natura dei terreni, deve considerarsi uniformemente distribuito lungo la superficie di scorrimento critica.

Bisogna anche tener conto dei comportamenti di tipo fragile che si verifica in terreni a grana fine OC e terreni a grana grossa addensati con una riduzione della resistenza al taglio al crescere delle deformazioni

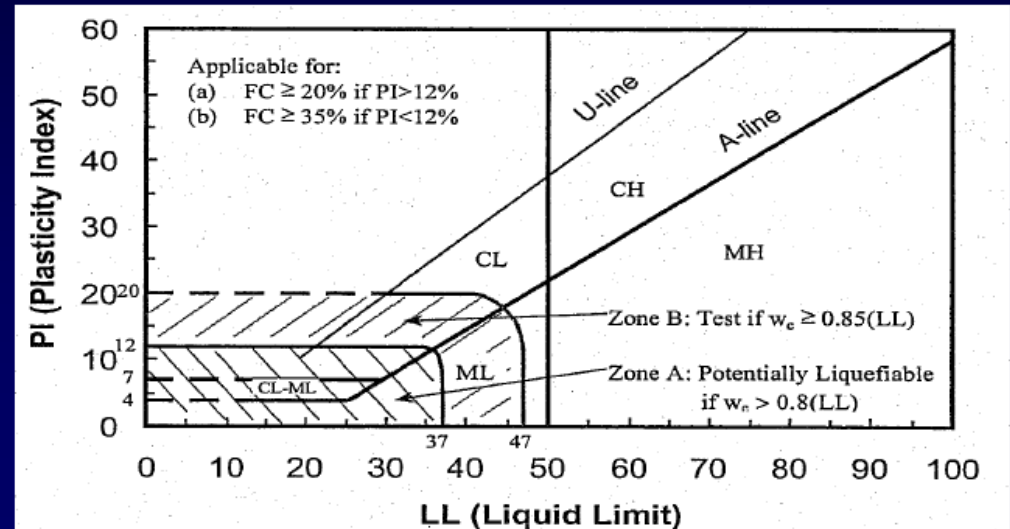
AUMENTO PRESSIONE u

- Matasovic e Vucetic (1992)

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

DEGRADAZIONE CICLICA

- Liquefazione
- Ishihara (1996)



Indicazioni nelle NTC 2018 – Pendii artificiali, materiali sciolti e fronti di scavo (condizioni sismiche) – 7.11.4

Nelle verifiche di sicurezza si deve controllare che la resistenza del sistema sia maggiore delle azioni (condizione [6.2.1]) impiegando lo stesso approccio di cui al § 6.8.2 per le opere di materiali sciolti e fronti di scavo, ponendo pari all'unità i coefficienti parziali sulle azioni e sui parametri geotecnici (§ 7.11.1) e impiegando le resistenze di progetto calcolate con un coefficiente parziale pari a $\gamma_R = 1.2$. Si deve inoltre tener conto della presenza di manufatti interagenti con l'opera.

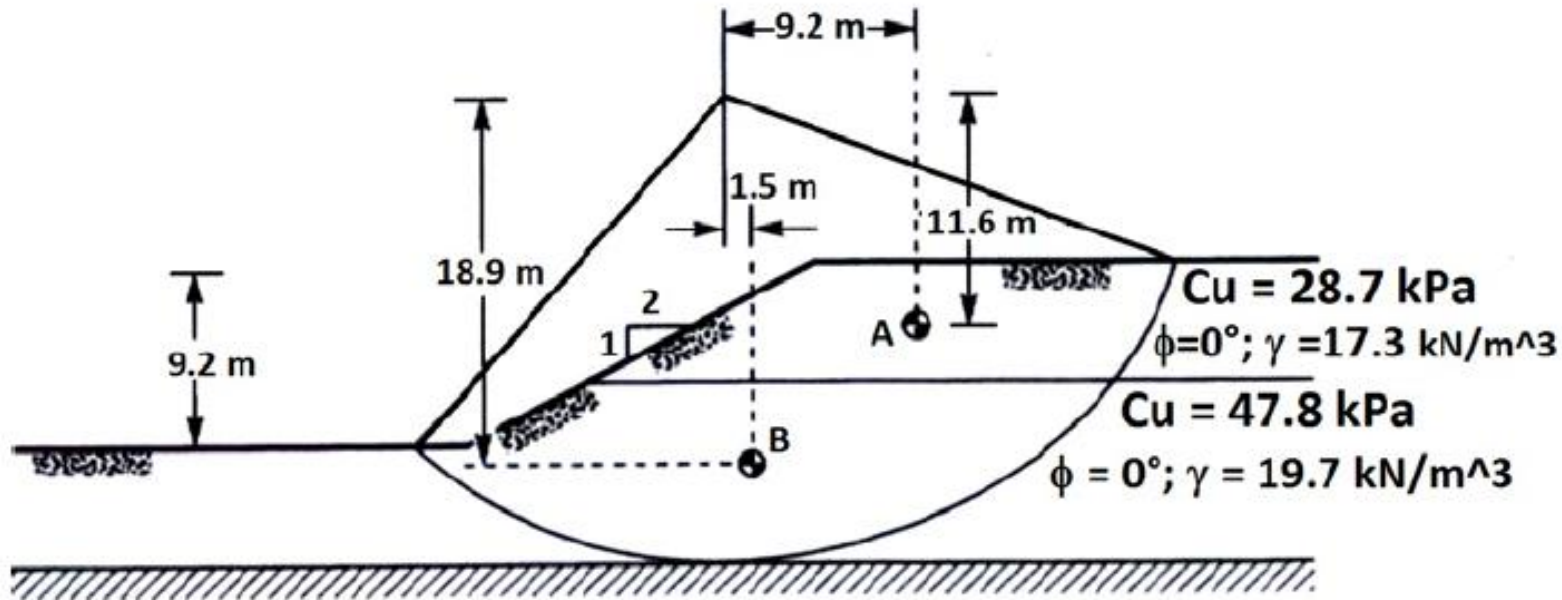
In alternativa, le verifiche degli stati limite ultimi (SLV) o di esercizio (SLD) possono essere eseguite con il metodo degli spostamenti, controllando che gli spostamenti permanenti indotti dal sisma siano di entità tale da non pregiudicare le condizioni di sicurezza o di funzionalità dei fronti di scavo o dei rilevati e dei manufatti eventualmente interagenti con essi. Nel metodo degli spostamenti, l'accelerazione critica deve essere valutata utilizzando i valori caratteristici dei parametri di resistenza. Le condizioni dell'opera possono essere riferite al raggiungimento di uno stato limite ultimo o di esercizio in dipendenza del valore di soglia dello spostamento. La valutazione delle condizioni di sicurezza è effettuata mediante il confronto tra lo spostamento calcolato e il corrispondente valore limite o di soglia. I criteri di scelta dei valori limite di spostamento devono essere illustrati e giustificati dal progettista.

ANALISI DI STABILITA' (statica o pseudo-statica)

Metodo dell'equilibrio limite globale

- La massa instabile viene trattata come un corpo rigido
- La stabilità dell'equilibrio viene studiata con le equazioni della statica
- Tipicamente la trattazione è di tipo 2D, ipotizzando uno stato di deformazione piano
- È necessario ipotizzare a priori la forma della superficie di scorrimento (piana, spezzata, circolare, spirale logaritmica) sulla base delle conoscenze e della tipologia di fenomeno in esame
- La stabilità viene valutata mediante il fattore di sicurezza FS dato dal rapporto tra la resistenza al taglio disponibile sulla superficie di scorrimento e quella mobilitata. $FS = 1$ (incipiente collasso), $FS > 1$ (stabile)
- È possibile valutare le caratteristiche meccaniche (resistenza del terreno sulla superficie di scorrimento) del terreno instabile in caso di fenomeno in atto e conducendo analisi a ritroso in cui si pone $FS = 1$.
- In caso di analisi in condizioni non drenate la resistenza del terreno si esprime mediante la coesione non drenata

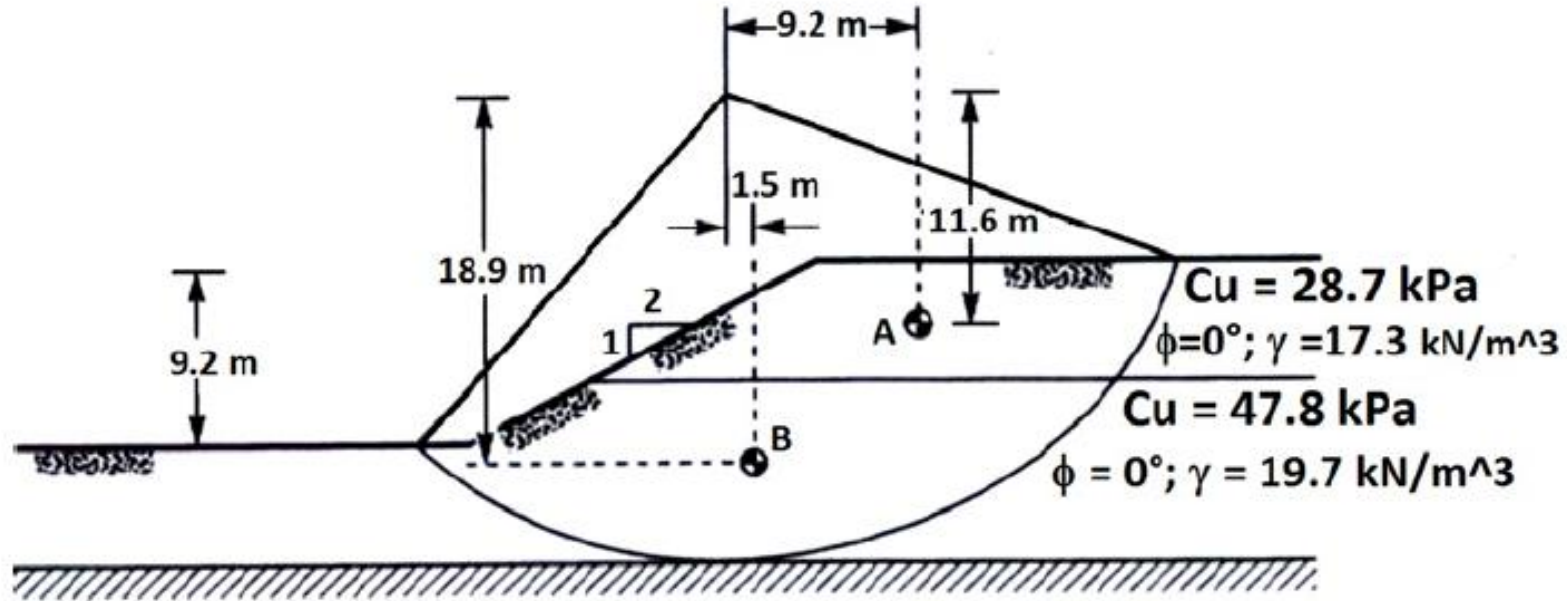
Metodo dell'equilibrio limite globale – ESEMPIO DI ANALISI NON DRENATA



CALCOLO DEI MOMENTI INSTABILIZZANTI (Peso del terreno nell'area instabile x Braccio rispetto al centro di rotazione)

Esempio: Momento Statico				
Area (m ²)	γ (kN/ m ³)	W (kN/m)	Braccio (m)	Momento (kNm/m)
126.4	17.3	2184.0	9.2	20092.8
213.8	19.7	4197.2	1.5	6295.8
			TOTALE	26388.6

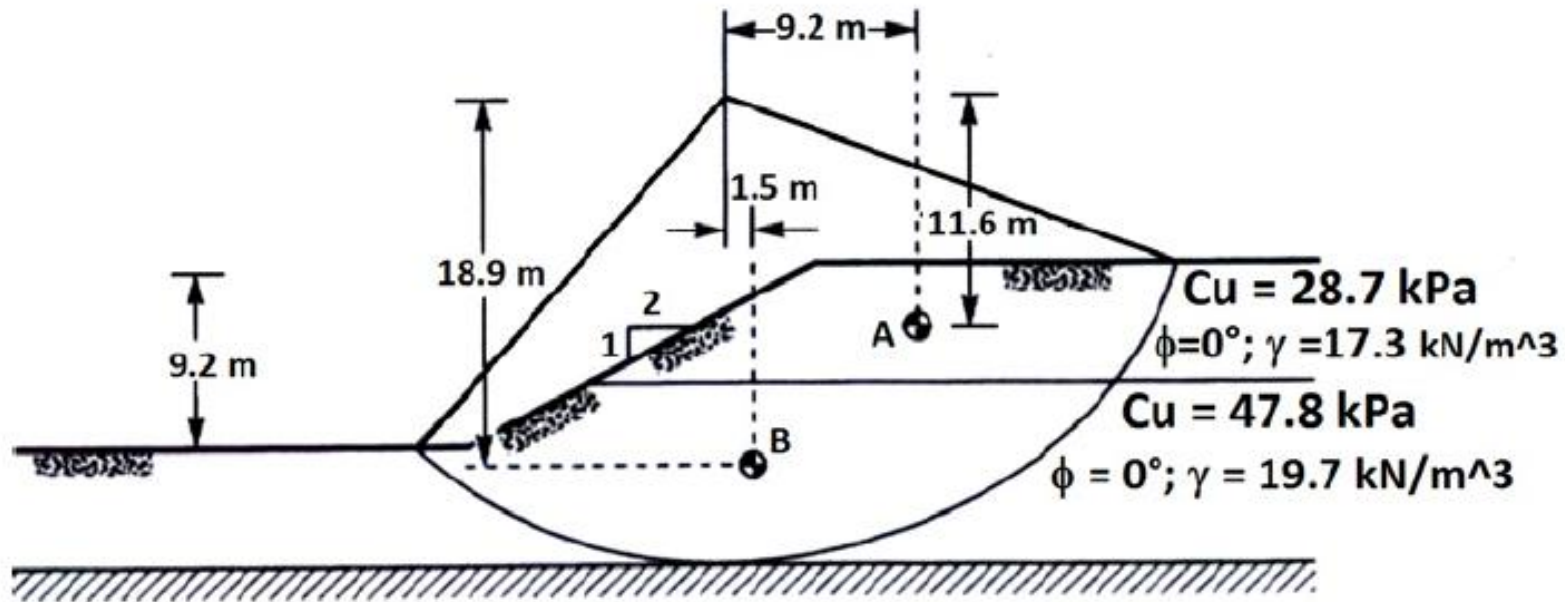
Metodo dell'equilibrio limite globale – ESEMPIO DI ANALISI NON DRENATA



CALCOLO DEI MOMENTI INSTABILIZZANTI DOVUTI AL SISMA (nell'esempio: $K_h = 0.10$)

Esempio: Momento Pseudo-Statico				
Area (m ²)	γ (kN/ m ³)	$W \cdot k_h$ (kN/m)	Braccio (m)	Momento (kNm/m)
126.4	17.3	218.4 (0.1)	11.6	2533.4
213.8	19.7	419.7 (0.1)	18.9	7932.3
			TOTALE	10465.8

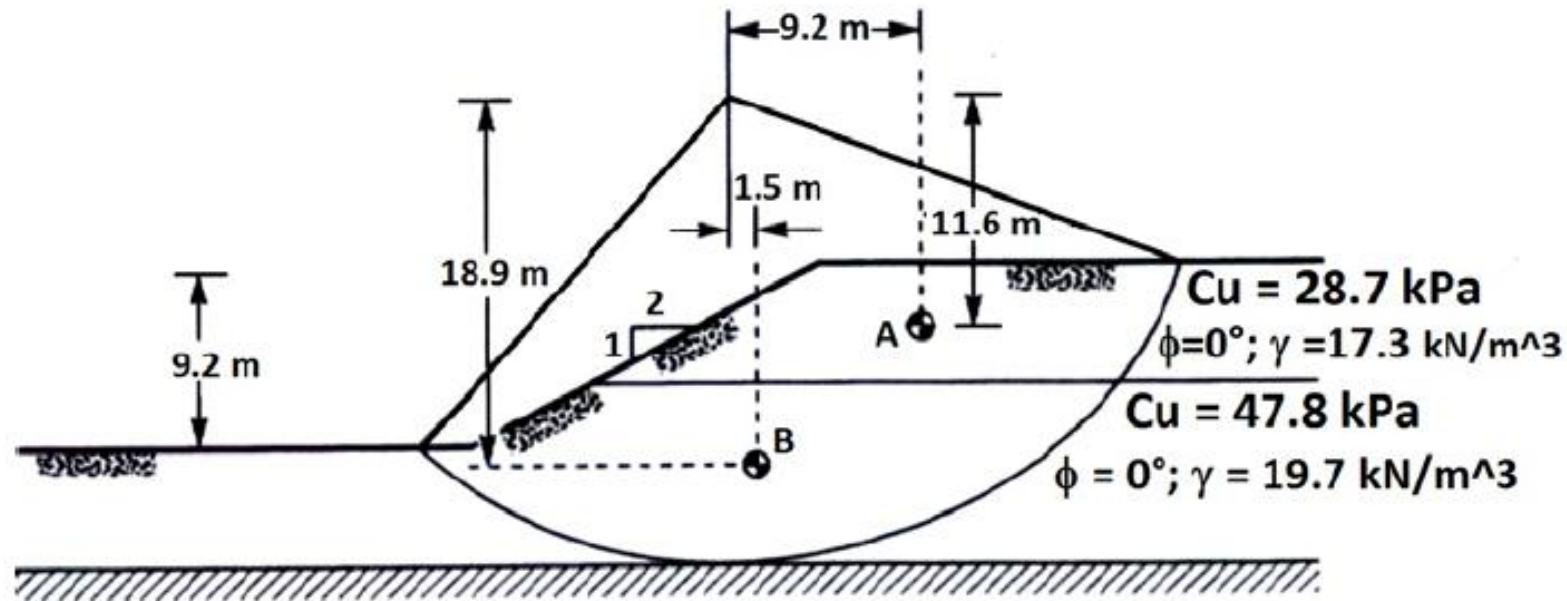
Metodo dell'equilibrio limite globale – ESEMPIO DI ANALISI NON DRENATA



CALCOLO DEI MOMENTI STABILIZZANTI

Esempio: Momento Resistente				
Lunghezza (m)	C_u (kN/ m ²)	Forza (kN/m)	Braccio (m)	Momento (kNm/m)
3.5	28.7	100.5	23.8	2388.1
39.4	47.8	1883.3	23.8	44774.8
			TOTALE	47163.9

Metodo dell'equilibrio limite globale – ESEMPIO DI ANALISI NON DRENATA



CALCOLO DEL FATTORE DI SICUREZZA

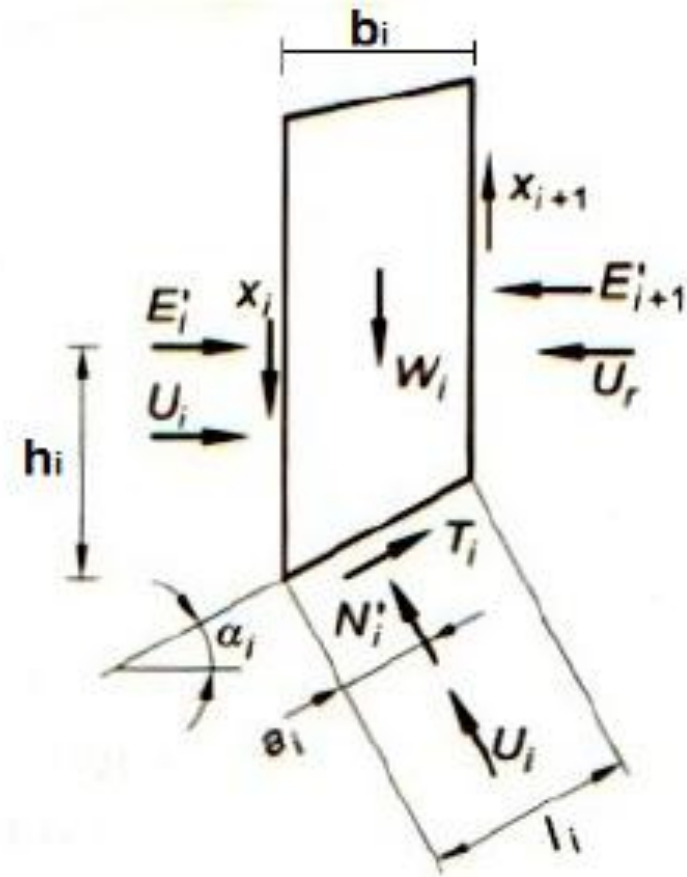
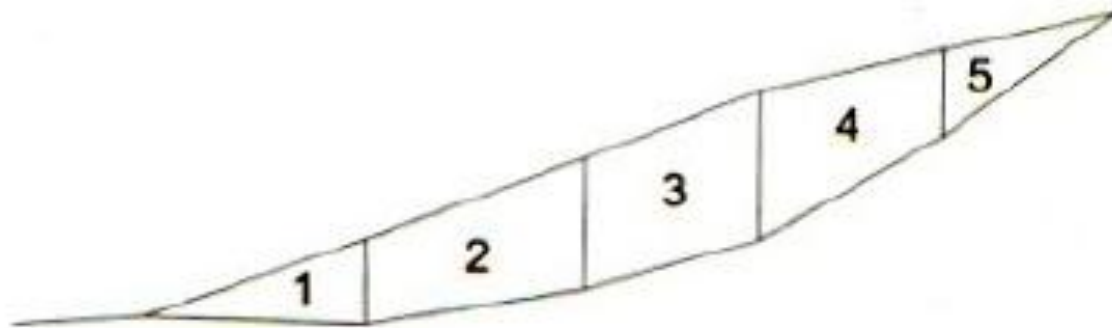
Esempio: Fattore di sicurezza			
	Momento resistente	Momento statico	Momento pseudostatico
	47163.9	26388.6	10465.8
FS		1.79	1.28

Metodo dell'equilibrio limite globale – ESEMPIO DI ANALISI NON DRENATA

- È stato preso in esame un solo centro di rotazione.
- Vanno prese in esame più superfici di scorrimento al fine di indentificare la superficie con il fattore di sicurezza minimo
- È stato preso in esame il solo equilibrio alla rotazione. Trascurato quello alla traslazione. Soluzione Approssimata
- Si è ipotizzata una resistenza costante lungo tutta la superficie.
- Al piede del corpo instabile si hanno spostamenti maggiori e la resistenza mobilitabile è quella residua (< di quella di picco). Lungo le altre porzioni si può effettivamente mobilitare la resistenza di picco
- Questo metodo non si può applicare al caso di colate o valanghe (il terreno o la roccia si comporta come un fluido che si muove ad elevata velocità)
- Non si può applicare nemmeno in caso di crolli e ribaltamenti. Tuttavia è possibile studiarli anche con questo approccio o quello di equilibrio del corpo rigido.

ANALISI DI STABILITA'

Metodo dei conci (o delle strisce)

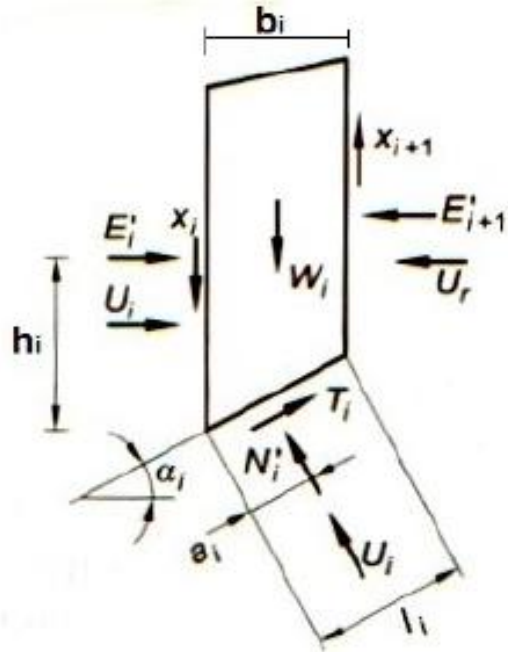


DOVE:

$$b_i = l_i \cos \alpha_i$$

$$U_i = u_i l_i$$

Metodo dei conci (o delle strisce)

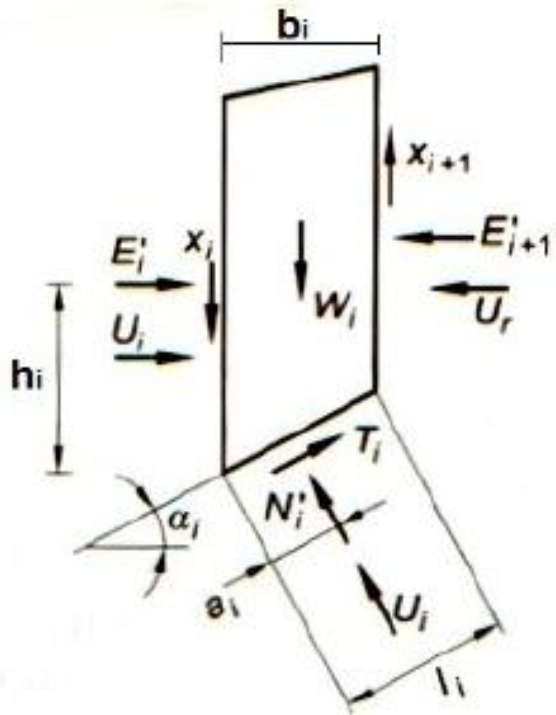


DOVE:
 $b_i = l_i \cos \alpha_i$
 $U_i = u_i l_i$

EQUAZIONI DI EQUILIBRIO ALLA TRASLAZIONE E ALLA ROTAZIONE DEI CONCI

- L'area instabile è suddivisa in n conci
 - N_i' (n) -> forze normali alla base dei conci
 - Coordinate a_i (n) -> punti di applicazione delle N_i'
 - E_i' (n-1) -> componenti orizzontali (normali) delle forze di interfaccia fra conci adiacenti
 - X_i (n-1) -> componenti verticali (tangenziali) delle forze di interfaccia fra conci adiacenti
 - Coordinate h_i (n-1) -> per definire il punto di applicazione delle E_i'
 - **FS** (1) -> fattore di sicurezza
- **5n-2 (incognite), 3n equazioni (rot., trasl. vert., trasl. orizz.), (2n-2 indeterminate)**, assumendo l piccolo, quindi a_i è all'incirca uguale a l/2, si riducono a n-2 e
 - I vari metodi differiscono in base alle ipotesi semplificative adottate circa le forze di interazione tra conci

Metodo dei conci (o delle strisce)



DOVE:
 $b_i = l_i \cos \alpha_i$
 $U_i = u_i l_i$

Le verifiche si eseguono generalmente considerando condizioni a lungo termine (drenate) che sono in generale le **condizioni più appropriate** nel caso di pendio naturale.

Nel caso invece di manufatti in terreni a grana fine vanno verificate sia le condizioni di breve termine (condizioni non drenate) sia quelle di lungo termine (condizioni drenate). In questo caso vanno considerate le condizioni di flusso stazionario.

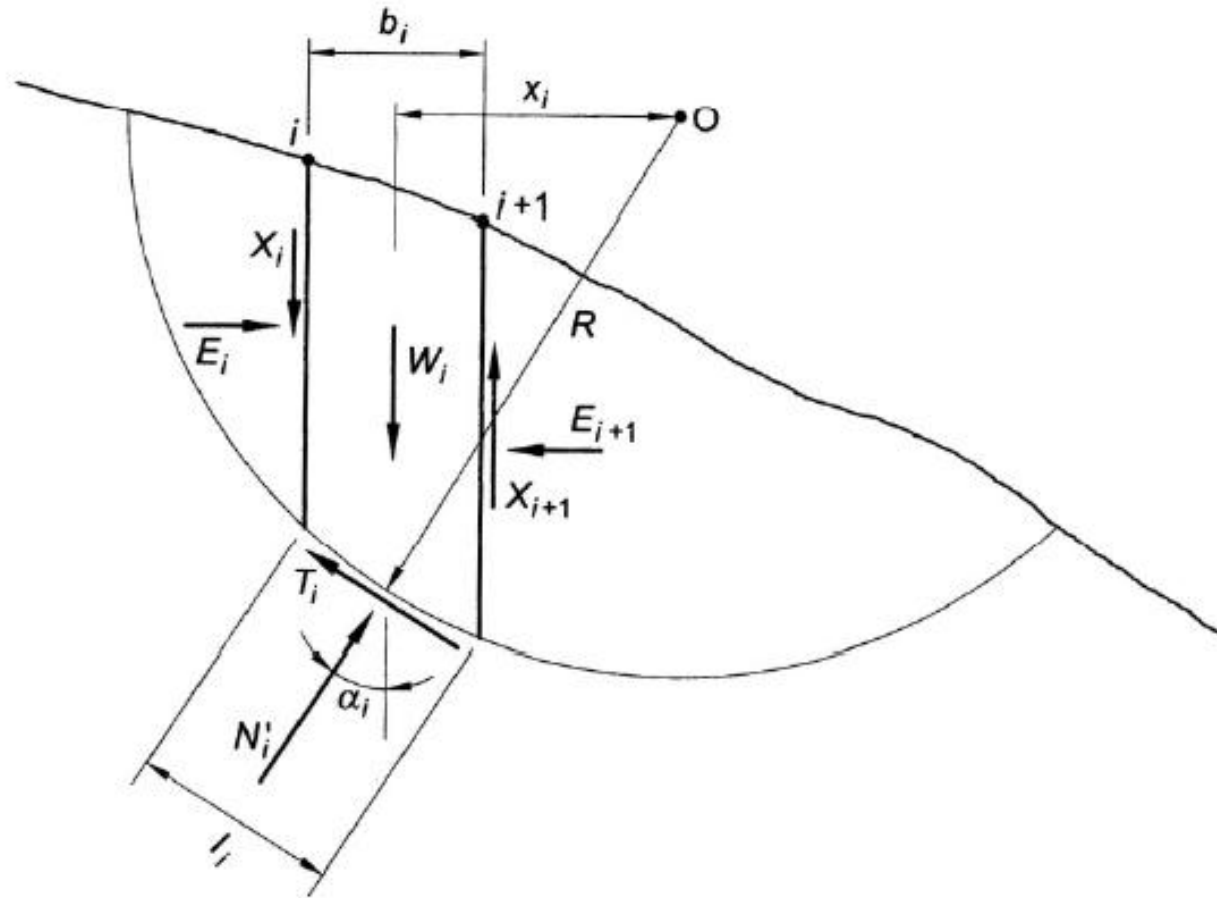
La resistenza al taglio alla base di ciascun concio di lunghezza l_i è dato da:

$$c' l_i + N'_i \tan \varphi' = \tau_{Ri} l_i$$

Lo sforzo di taglio mobilitato alla base di ciascun concio è dato da:

$$T_i = \frac{c' l_i + N'_i \tan \varphi'}{FS}$$

Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI BISHOP



- Superfici di rottura cilindrica a direttrice circolare
- In un problema piano si ottiene FS scrivendo l'equilibrio alla rotazione intorno al generico centro di rotazione O

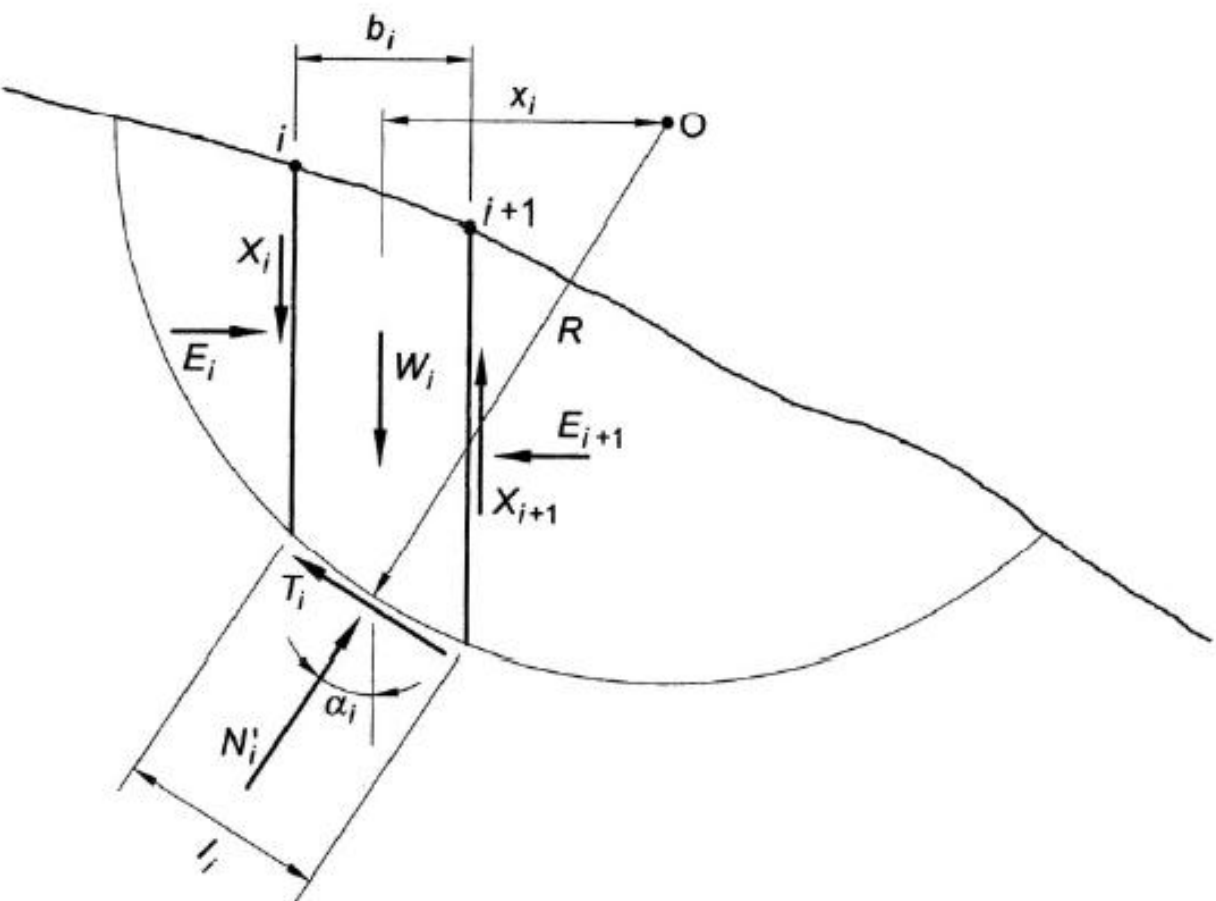
$$FS = \frac{R \sum [c' l_i + (N_i - U_i) \tan \varphi']}{\sum W_i x_i}$$

$$x_i = R \text{ sen } \alpha_i$$

$$N'_i = N_i - U_i$$

- L'unico termine incognito dell'equazione in cui si definisce FS è lo sforzo normale efficace N'_i agente alla base di ciascun concio

Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI FELLENIUS



- Le forze di interfaccia hanno risultante nulla in direzione normale alla base. Risultante parallela alla base di ciascun concio.
- Pertanto N'_i è determinato e può essere definito in funzione del peso del concio, risultano quindi definite n condizioni:

$$N_i = W_i \cos \alpha_i$$

- È possibile risolvere l'equazione

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

- Porta a sottostimare FS

Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI BISHOP SEMPLIFICATO

- Le forze di interfaccia hanno risultante nulla in direzione verticale.

$$W_i - T_i \sin \alpha_i - N'_i \cos \alpha_i - u_i l_i \cos \alpha_i - (X_{i+1} - X_i) = 0$$

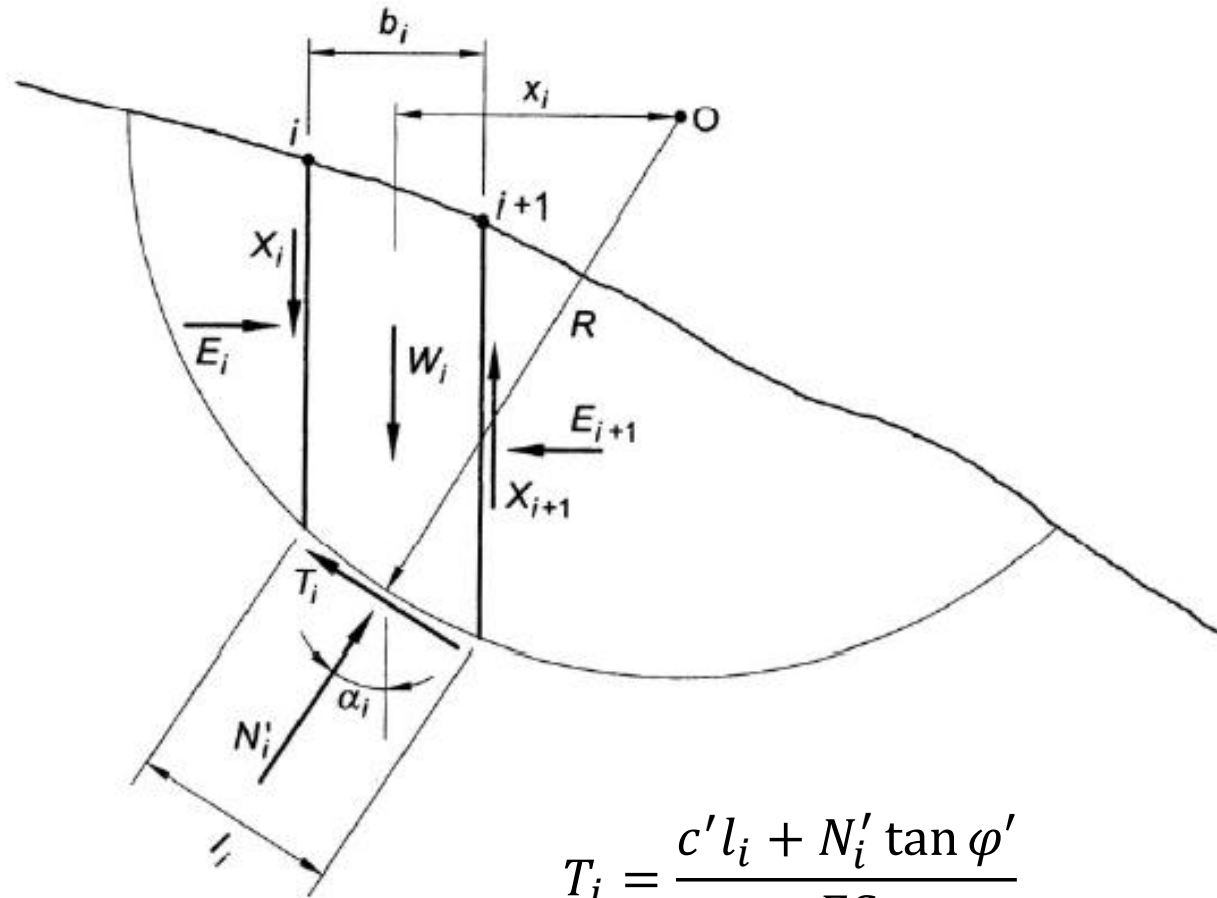
- Si considera nulla la risultante delle forze tangenziali di interfaccia agenti a destra e a sinistra di uno stesso concio

$$(X_{i+1} - X_i) = 0$$

- Vengono quindi introdotte n-1 equazioni.
- Il metodo non è esatto perché sovradeterminato e non soddisfa le equazioni di equilibrio orizzontale.

$$N'_i = \frac{W_i - u_i l_i \cos \alpha_i - c' l_i \sin \alpha_i / FS}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi'}{FS} \right)}$$

$$T_i = \frac{c' l_i + N'_i \tan \varphi'}{FS}$$



Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI BISHOP SEMPLIFICATO

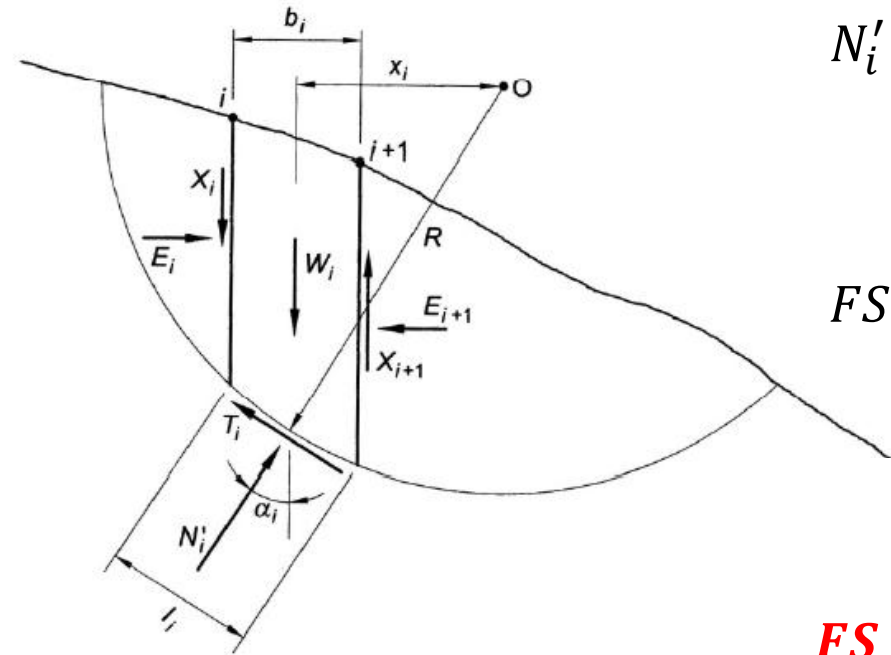
- Il Fattore di Sicurezza FS sarà dato quindi da:

$$N'_i = \frac{W_i - u_i l_i \cos \alpha_i - c' l_i \sin \alpha_i / FS}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi'}{FS} \right)}$$

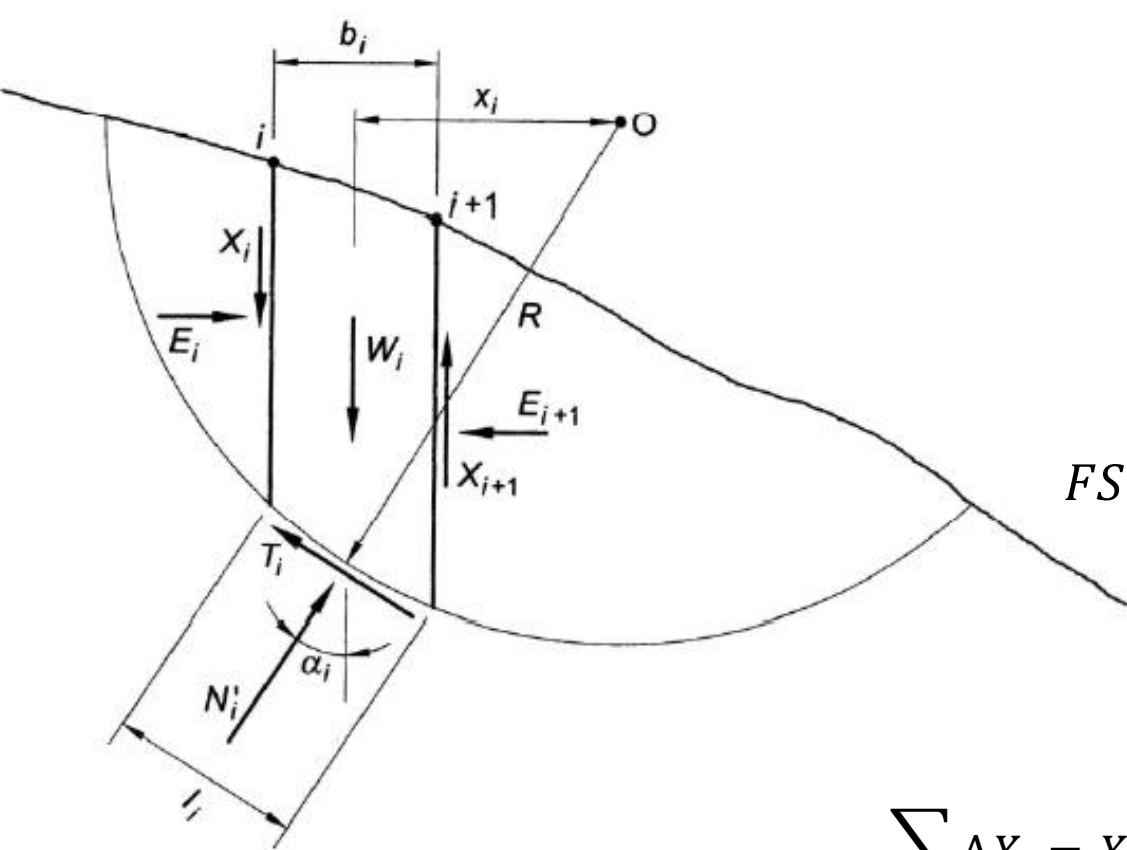
$$FS = \frac{R \sum [c' l_i + (N_i - U_i) \tan \varphi']}{\sum W_i x_i}$$

$$FS = \frac{\sum \left[c' l_i \cos \alpha_i + W_i \left(1 - \frac{u_i l_i \cos \alpha_i}{W_i} \right) \tan \varphi' \right] \frac{1}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \varphi' \tan \alpha_i}{FS} \right)}}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

- L'Equazione di **FS** non è in forma esplicita. Soluzione per tentativi fino a convergenza



Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI BISHOP COMPLETO



- Equazione di equilibrio in direzione normale alla base di ciascun concio:

$$N'_i = (W_i + \Delta X_i) \cos \alpha_i - \Delta E_i \sin \alpha_i - u_i l_i$$

- Dove: $(X_i - X_{i+1}) = \Delta X_i$ $(E_i - E_{i+1}) = \Delta E_i$

- L'espressione del fattore di sicurezza sarà:

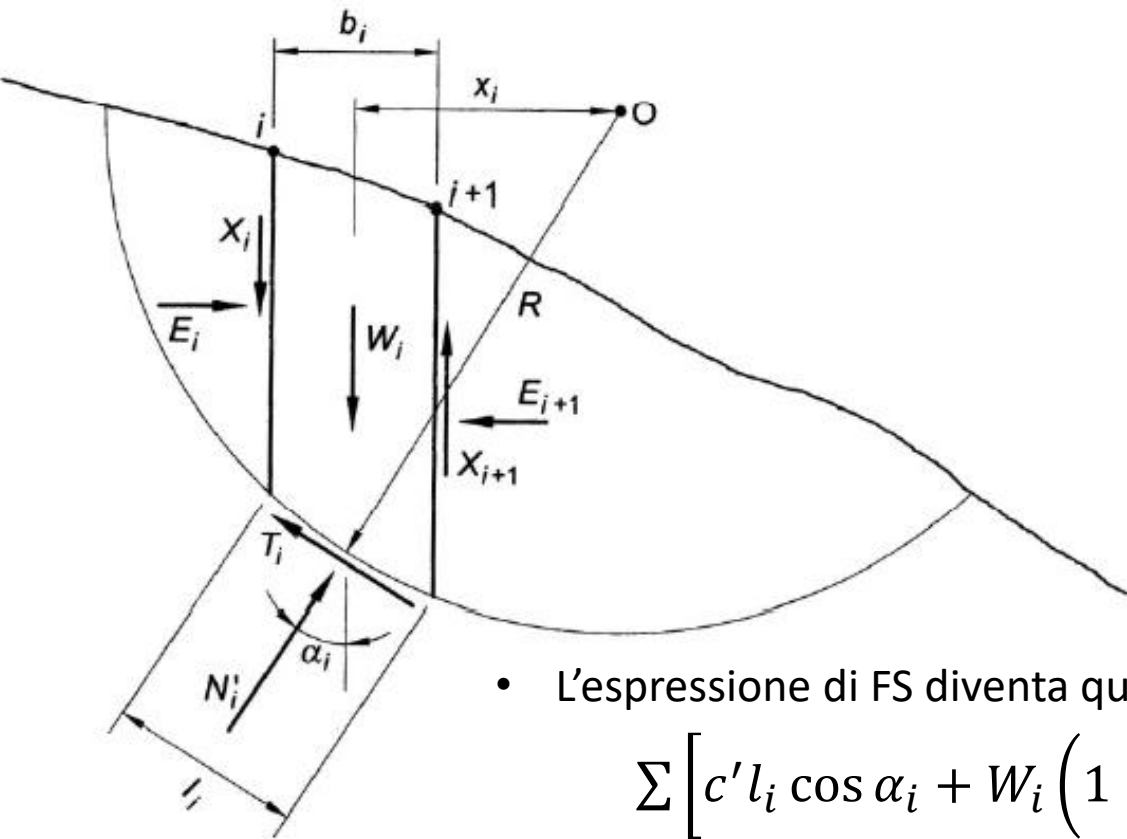
$$FS = \frac{\sum [c' l_i + (W_i \cos \alpha_i - u_i l_i + \Delta X_i \cos \alpha_i - \Delta E_i \sin \alpha_i) \tan \varphi']}{\sum W_i \sin \alpha_i}$$

- Le sommatorie delle forze di interazione tra i conci devono eguagliare le forze interne agenti ai bordi della scarpata. Se queste sono nulle si avrà:

$$\sum \Delta X_i = X_b - X_a = 0$$

$$\sum \Delta E_i = E_b - E_a = 0$$

Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI BISHOP COMPLETO

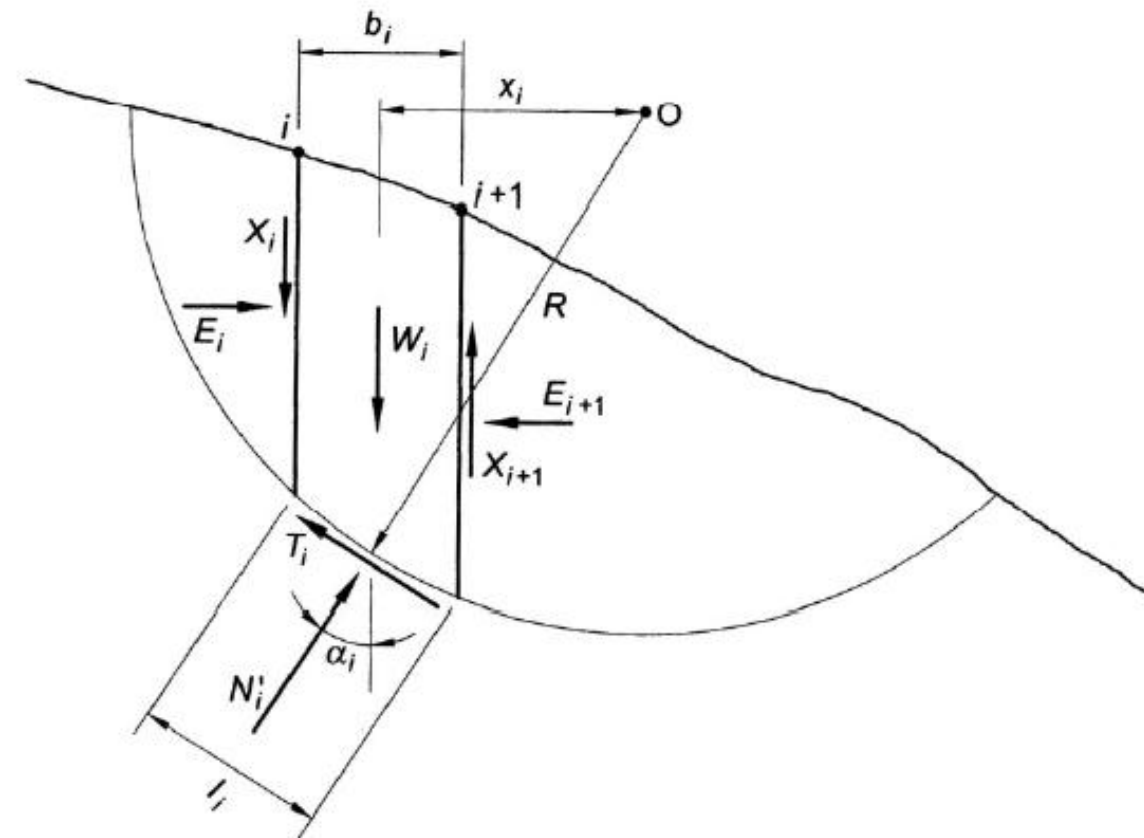


- Si ricava lo sforzo normale efficace dall'equazione di equilibrio alla traslazione verticale senza trascurare le componenti tangenziali degli sforzi di interfaccia:

$$N'_i = \frac{W_i - \Delta X_i - u_i l_i - c' l_i \text{sen } \alpha_i / FS}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi'}{FS} \right)}$$

- L'espressione di FS diventa quindi:

$$FS = \frac{\sum \left[c' l_i \cos \alpha_i + W_i \left(1 - \frac{u_i l_i \cos \alpha_i}{W_i} \right) \tan \varphi' + \Delta X_i \tan \varphi' \right] \frac{1}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \varphi' \tan \alpha_i}{FS} \right)}}{\sum W_i \text{sen } \alpha_i}$$



I valori di X_i non devono superare la resistenza a taglio sulla parete laterale del concio. I punti di applicazione degli sforzi E_i cadono tra $\frac{1}{2}$ e $\frac{1}{3}$ l'altezza del concio

• **PROCEDIMENTO ITERATIVO**

• Si assume una distribuzione iniziale dei valori ΔX_i , solitamente si considera nulla la risultante degli sforzi tangenziali di interfaccia (Bishop semplificato). Si calcola FS

• Si verifica che i valori di ΔX_i rispettino l'equazione:

$$\sum \Delta X_i = X_b - X_a = 0$$

Generalmente soddisfatta

• e quella ottenuta dall'equilibrio in direzione tangenziale alla base e che deriva dall'equilibrio in direzione tangenziale dei singoli concii:

$$(W_i + \Delta X_i) \sin \alpha_i + \Delta E_i \cos \alpha_i = T_i$$

• Poi è possibile ricavare ΔE_i e quindi la sommatoria dei ΔE_i , che in assenza di sforzi ai bordi risulta nulla:

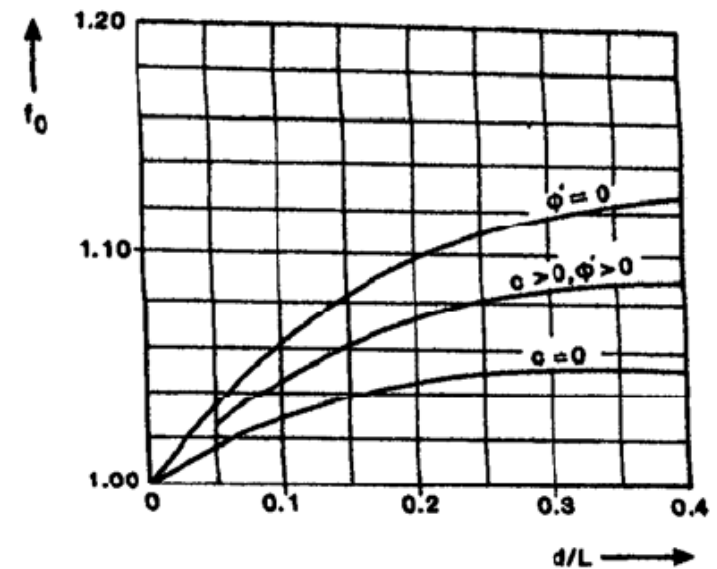
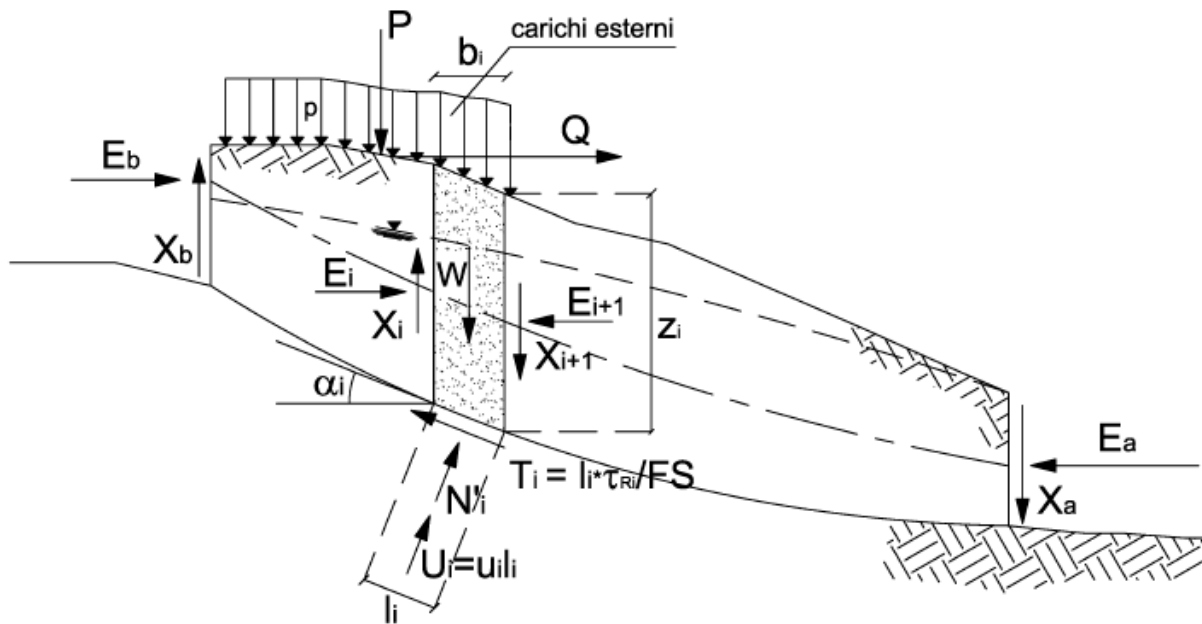
$$\sum \Delta E_i = \sum \left(\frac{\tau_{Ri} l_i}{FS \cos \alpha_i} - (W_i + \Delta X_i) \tan \alpha_i \right) = 0$$

• Si calcola nuovo FS, se non si ha convergenza si correggono i valori di ΔX_i

Generalmente non soddisfatta da subito

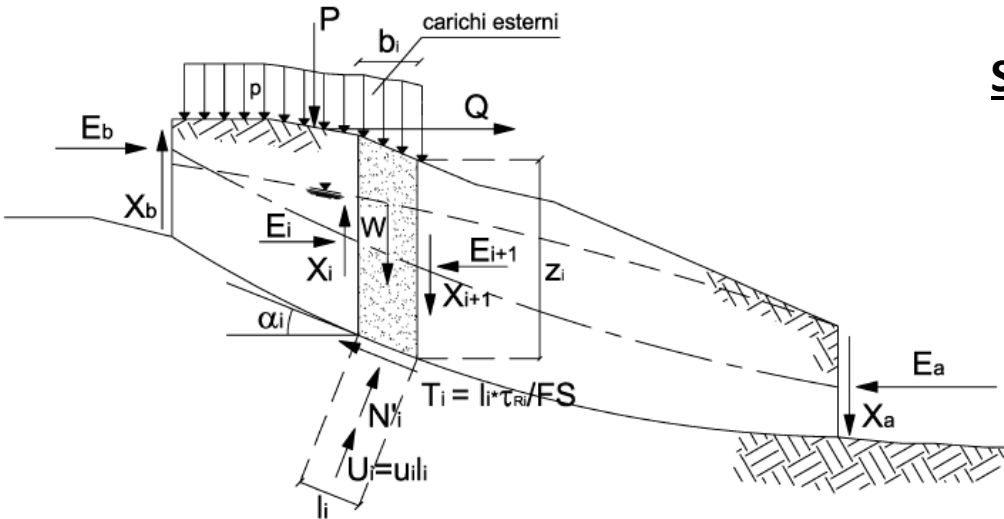
Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI JANBU – Superfici di rottura di forma qualsiasi
Superfici che derivano da adeguata campagna di indagini, misure inclinometriche

- RIGOROSO: ipotesi di conoscere a priori il punto di applicazione delle forze normali interconco (problema perfettamente determinato)
- **SEMPLIFICATO**: vengono trascurate nell'equilibrio le azioni all'interfaccia fra i conci, del cui effetto si tiene conto applicando ad FS un coefficiente moltiplicativo $f_0 > 1$. Solo rispetto dell'equilibrio alla traslazione in direzione verticale e orizzontale (prescinde da quello alla rotazione). Più cautelativo rispetto al rigoroso.



Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI JANBU – Superfici di rottura di forma qualsiasi
Superfici che derivano da adeguata campagna di indagini, misure inclinometriche

- **SEMPLIFICATO:** vengono trascurate nell'equilibrio le azioni all'interfaccia fra i conci, del cui effetto si tiene conto applicando ad FS un coefficiente moltiplicativo $f_0 > 1$. Solo rispetto dell'equilibrio alla traslazione in direzione verticale e orizzontale (prescinde da quello alla rotazione). Più cautelativo rispetto al rigoroso.



SEMPLIFICATO: equilibrio traslazione verticale, trascurando forze di interfaccia

$$W_i - T_i \sin \alpha_i - N'_i \cos \alpha_i - u_i l_i \cos \alpha_i = 0$$

$$N'_i = \frac{W_i - u_i l_i \cos \alpha_i - \frac{c' l_i \sin \alpha_i}{FS}}{\cos \alpha_i \left(1 + \frac{\tan \alpha_i \tan \varphi'}{FS} \right)}$$

$$T_i = \frac{c' l_i + N'_i \tan \varphi'}{FS}$$

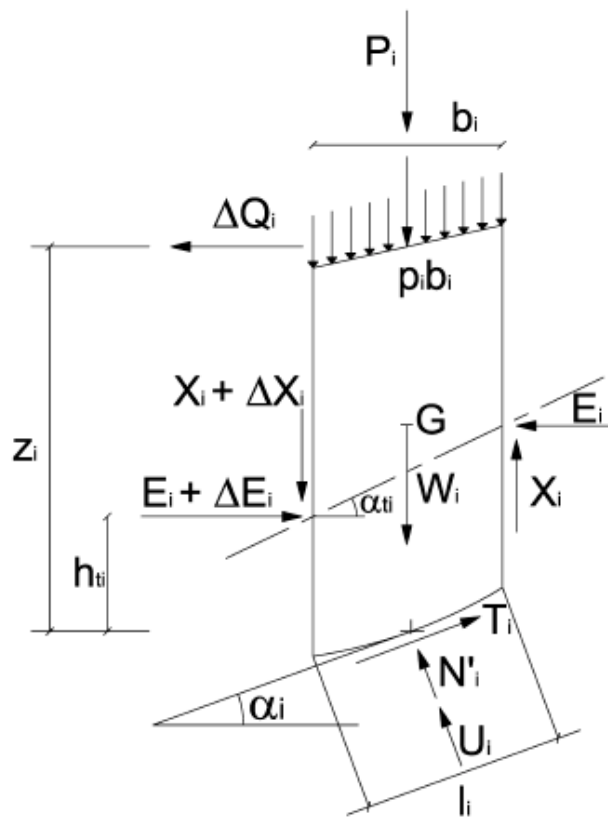
SEMPLIFICATO: FS è rapporto tra la somma delle componenti in direzione orizzontale degli sforzi di taglio e quelli mobilitati sui singoli conci. Si procede iterativamente. Formula non in forma esplicita.

$$FS = \frac{\sum [c' l_i \cos \alpha_i + (\gamma z_i - u_i) l_i \cos \alpha_i \tan \varphi'] \left(\frac{1}{\cos^2 \alpha_i (1 + \tan \varphi' \tan \alpha_i / FS)} \right)}{\sum W_i \tan \alpha_i}$$

$$W_i = \gamma z_i l_i \cos \alpha_i$$

Metodo dei conci (o delle strisce) – METODO DI JANBU – Superfici di rottura di forma qualsiasi
Superfici che derivano da adeguata campagna di indagini, misure inclinometriche

- RIGOROSO: ipotesi di conoscere a priori il punto di applicazione delle forze normali interconco (problema perfettamente determinato). Si introducono n-1 equazioni e si arriva ad un sistema di 3n-1 equazioni completamente determinato. Si introducono per la prima volta anche le forze esterne (concentrate o distribuite) agenti sulla scarpata. Quelle verticali vengono considerate aggiungendole al peso dei conci, quelle orizzontali sono ricondotte ad una risultante.



- 1) Equilibrio in direzione verticale scritto in termini di tensioni (n equazioni)

$$\frac{N_i}{b_i} \cos \alpha_i = \frac{W_i + \Delta X_i}{b_i} - \frac{T_i}{l_i} \tan \alpha_i$$

- 2) Equilibrio in direzione tangente alla base di ciascun conco (n equazioni)

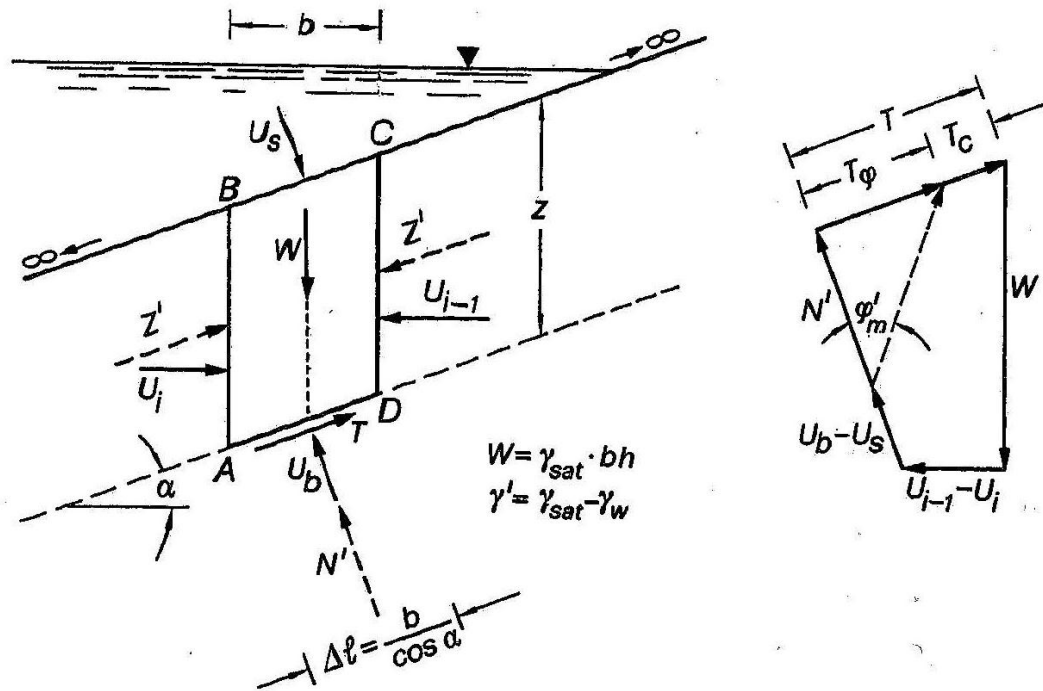
$$(\Delta E_i - \Delta Q_i) \cos \alpha_i - (W_i + \Delta X_i) \sin \alpha_i + \tau_i \frac{b_i}{\cos \alpha_i} = 0$$

- 3) Equilibrio alla rotazione rispetto al punto medio della base (n-1 equazioni)

$$X_i \frac{b_i}{2} + X_i \frac{b_i}{2} + E_i (h_{ti} + b_i \tan \alpha_{ti}) - E_i h_{ti} - \Delta E_i h_{ti} + \Delta Q_i z_i + \Delta X_i \frac{b_i}{2} = 0$$

- Meccanismo di rottura tipico delle coltri (depositi recenti alluvionali o detritici a grana fina a copertura di terreni più antichi e, di norma, di maggiore resistenza)
- Scivolamento di una porzione di terreno, di spessore molto piccolo rispetto all'ampiezza, su di una superficie piana grossomodo parallela all'estradosso del pendio, ubicata in prossimità del contatto tra i due tipi di terreni.
- In questi casi l'analisi di stabilità può essere eseguita con riferimento allo schema del PENDIO INDEFINITO nel quale (per simmetria) la distribuzione delle pressioni efficaci sulle sezioni verticali è sempre la stessa e dà luogo a risultati eguali ed opposti (Terzaghi, 1942; Taylor, 1948)

Schema generale – Pendio immerso in acqua



- Considero la generica striscia ABCD, di larghezza **b**
- Pongo l'equilibrio alla traslazione nelle direzioni normale e parallela alla base AD
- Avendo posto $\Delta U = U_{i-1} - U_i$ si ricava:

$$N' = W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha$$

$$T = W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha$$

$$FS = \frac{T_f}{T} = \frac{c' \Delta l + N' \operatorname{tg} \phi'}{T}$$

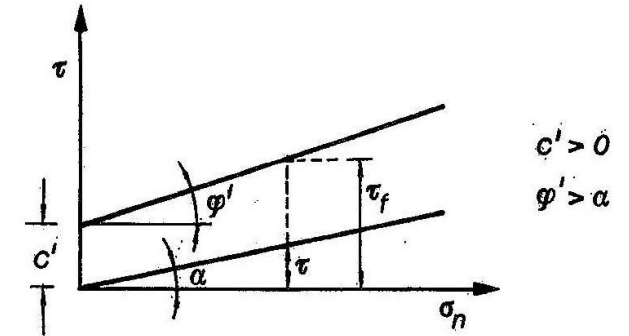
$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \phi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

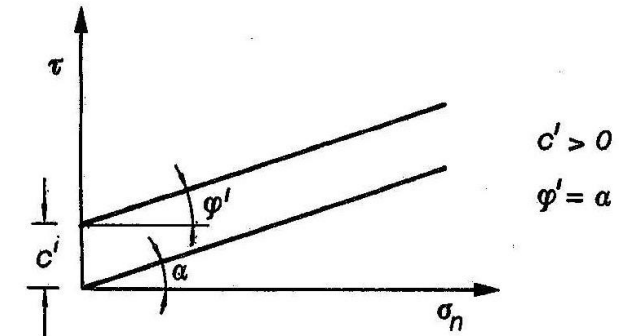
$$N = \gamma z \cos \alpha \quad T = \gamma z \sin \alpha$$

$$\sigma_n = \frac{N}{\Delta \ell} = \gamma z \cos^2 \alpha$$

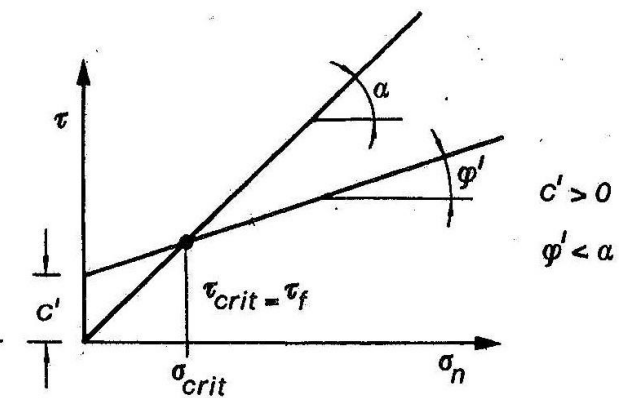
$$\tau = \frac{T}{\Delta \ell} = \gamma z \cos \alpha \sin \alpha$$



$c' > 0$
 $\varphi' > \alpha$



$c' > 0$
 $\varphi' = \alpha$



$c' > 0$
 $\varphi' < \alpha$

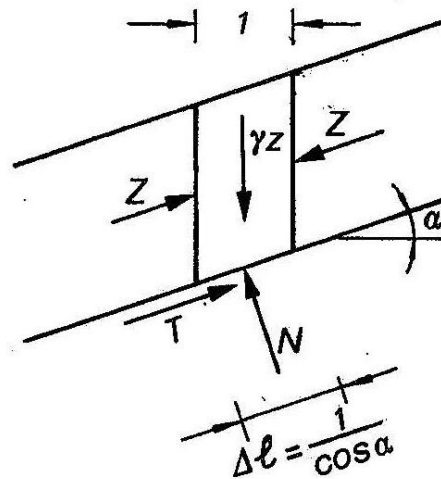
$$F = \frac{\tau_f}{\tau} = \frac{c' + \sigma_n \operatorname{tg} \varphi'}{\tau} =$$

$$= \frac{c'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$\tau_{\text{crit}} = \gamma z_{\text{crit}} \sin \alpha \cos \alpha =$$

$$= c' + \gamma z_{\text{crit}} \cos^2 \alpha \operatorname{tg} \varphi'$$

$$z_{\text{crit}} = \frac{c'}{\gamma \cos \alpha (\sin \alpha - \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi')}$$



$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha}$$

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha}{W \sin \alpha} + \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \alpha}$$

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

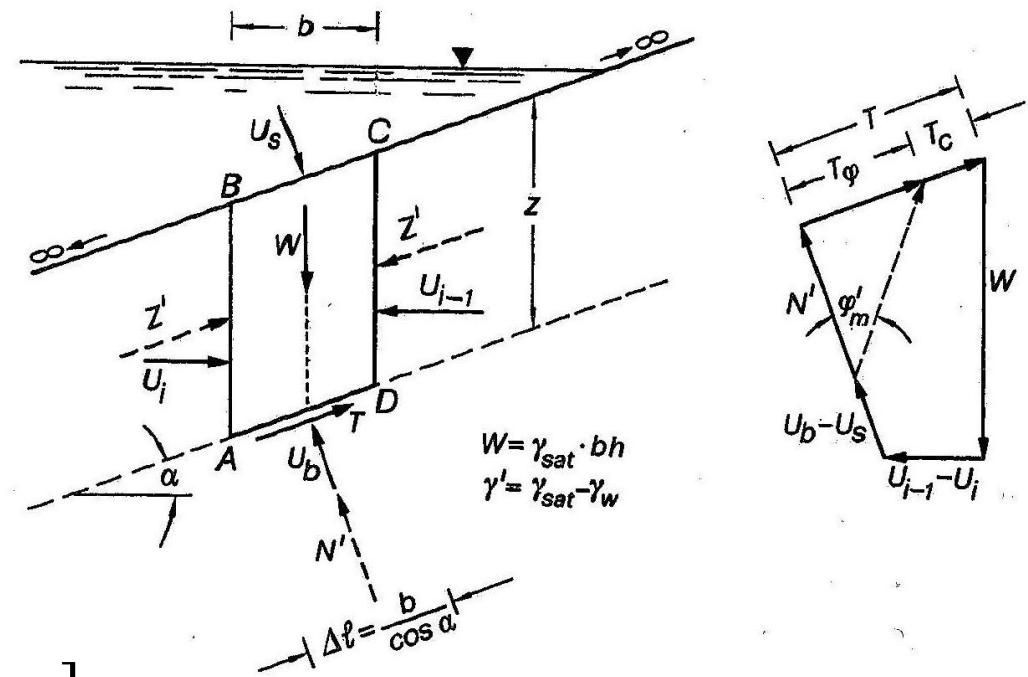
Il pendio indefinito immerso in acqua in quiete

$$\Delta U = U_{i-1} - U_i = -\gamma_w z b \operatorname{tg} \alpha$$

$$U_b - U_s = \gamma_w z \frac{b}{\cos \alpha} \quad \gamma' = \gamma_{sat} - \gamma_w$$

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + \left[\gamma_{sat} z b \cos \alpha - \gamma_w z b \frac{1}{\cos \alpha} + \gamma_w z b \operatorname{tg} \alpha \sin \alpha \right] \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_{sat} z b \sin \alpha - \gamma_w z b \sin \alpha}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma' z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\operatorname{tg} \varphi'}{\operatorname{tg} \alpha}$$



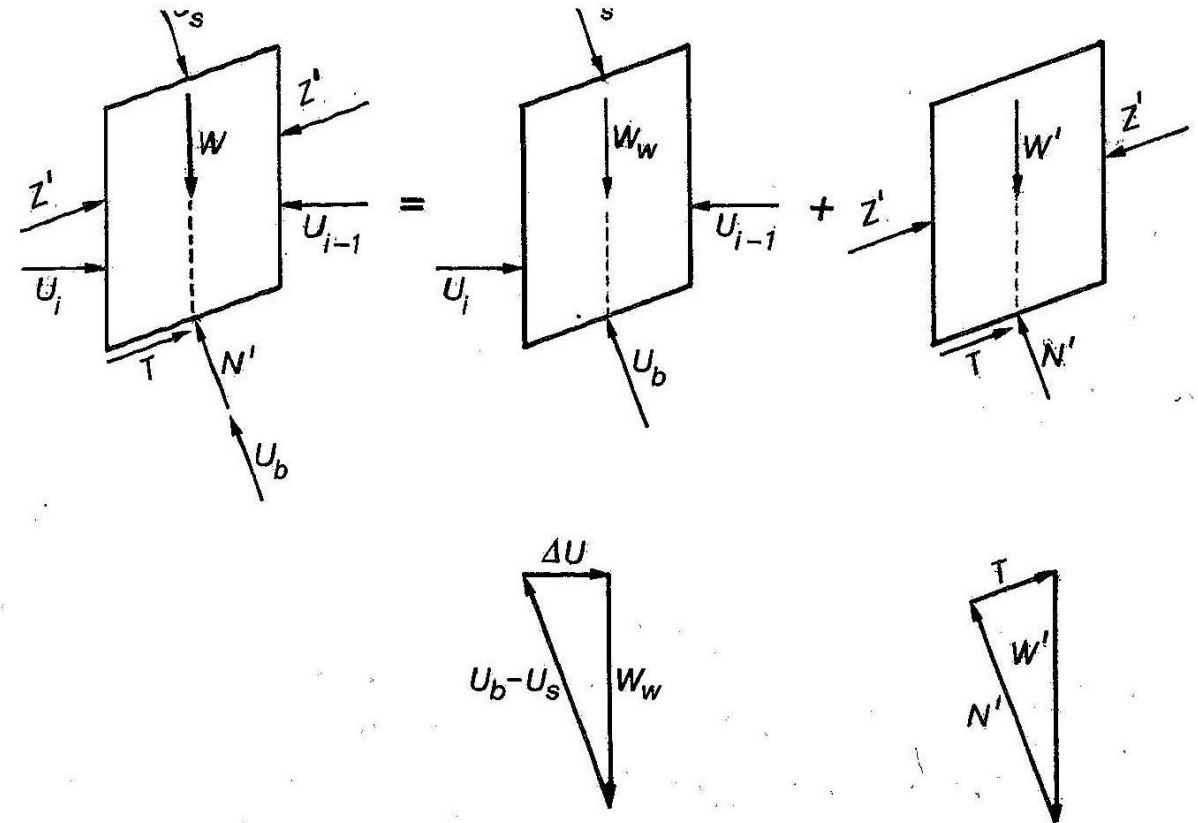
Rispetto alla condizione nella quale le u sono nulle, il coefficiente di sicurezza del pendio immerso in acqua in quiete rimane invariato per $c'=0$ o addirittura aumenta quando $c'>0$.

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

Il pendio indefinito immerso in acqua in quiete

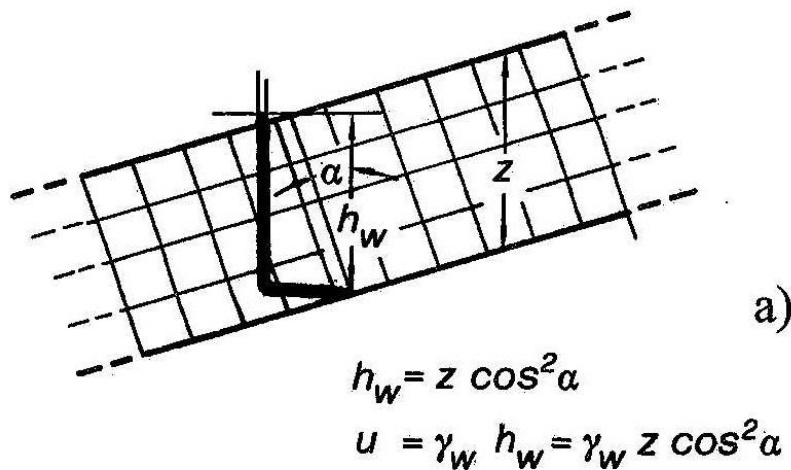
Nel caso di acqua in quiete l'insieme delle forze U_s , U_b , U_i , U_{i-1} (l'insieme delle forze che rappresentano la spinta dell'acqua sui singoli tratti del contorno della striscia) deve equilibrare il peso W_w dell'acqua contenuta nella striscia.

Pertanto, ai fini della valutazione dell'equilibrio della striscia, è possibile tenere conto delle sole forze «efficaci» di superficie, N' e T , e di volume, W' , ossia il peso immerso della striscia di intensità pari a $\gamma' b z$



$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

Il pendio indefinito immerso in una falda in moto stazionario con linee di flusso parallele al pendio



Questo caso può presentarsi tutte le volte in cui, a seguito di piogge di opportuna intensità e durata, la coltre di terreno superficiale, generalmente molto più permeabile del terreno che costituisce la sottostante formazione di base, si satura e diviene sede di un moto di filtrazione (che si suppone stazionario) con linee di flusso parallele all'estradosso del pendio.

La pressione neutra alla profondità z è quindi pari a:

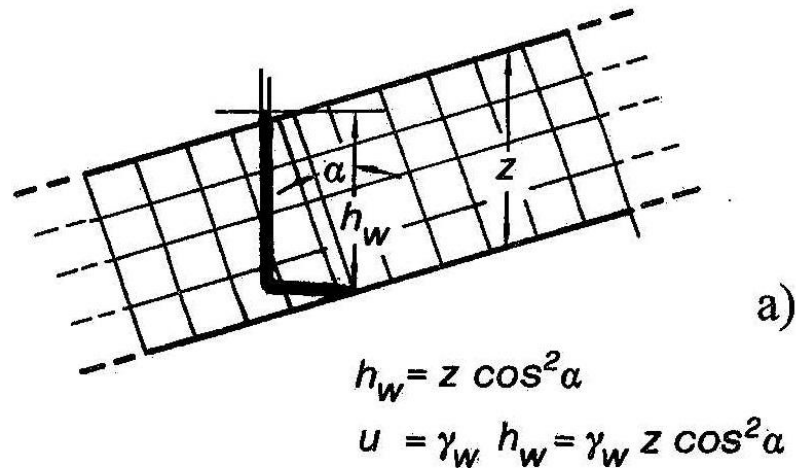
$$u = \gamma_w z \cos^2 \alpha$$

E quindi:

$$U_i = U_{i-1} \qquad U_b = u \frac{b}{\cos \alpha} = \gamma_w z b \cos \alpha$$

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

Il pendio indefinito immerso in una falda in moto stazionario con linee di flusso parallele al pendio



$$U_i = U_{i-1} \quad U_b = u \frac{b}{\cos \alpha} = \gamma_w z b \cos \alpha$$

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b)] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha}$$

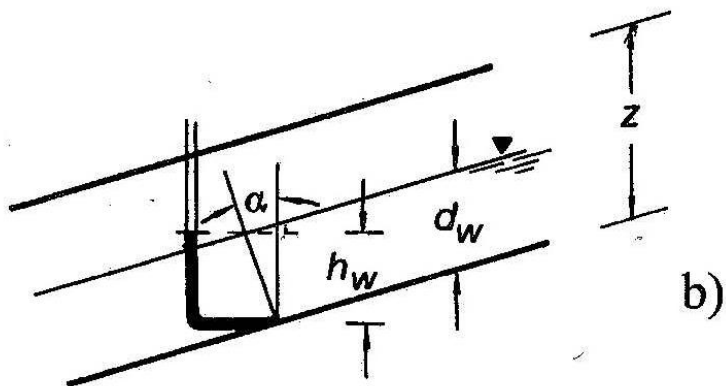
$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [\gamma_{sat} z b \cos \alpha - \gamma_w z b \cos \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_{sat} z b \sin \alpha}$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\gamma' \operatorname{tg} \varphi'}{\gamma_{sat} \operatorname{tg} \alpha}$$

Con linee di flusso parallele all'estradosso ho riduzione del 50% del FS rispetto al caso di pendio asciutto o pendio immerso in acqua in quiete in assenza di coesione efficace.

$$FS = \frac{c' b / \cos \alpha + [W \cos \alpha - (U_b - U_s) - \Delta U \sin \alpha] \operatorname{tg} \varphi'}{W \sin \alpha + \Delta U \cos \alpha}$$

Il pendio indefinito immerso in una falda in moto stazionario con linee di flusso parallele al pendio



$$h_w = d_w \cos^2 \alpha$$

$$u = \gamma_w h_w = \gamma_w d_w \cos^2 \alpha$$

Se la superficie libera della falda non raggiunge il piano limite del pendio, ma si posiziona ad una certa profondità da questo, ammettendo che il terreno al di sopra della superficie risulti saturo, si ottiene:

$$U_i = U_{i-1} \quad U_b = u \frac{b}{\cos \alpha} = \gamma_w d_w b \cos \alpha$$

$$FS = \frac{c'}{\gamma_{sat} z \sin \alpha \cos \alpha} + \left(1 - \frac{\gamma_w d_w}{\gamma_{sat} z} \right) \operatorname{tg} \varphi'$$

ANALISI DI STABILITA' IN CONDIZIONI SISMICHE

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***
 - Metodo pseudo-dinamico alla Newmark
 - Spostamenti ammissibili
- ***FEM DINAMICA (legami costitutivi avanzati)***

ANALISI DI STABILITA' IN CONDIZIONI SISMICHE

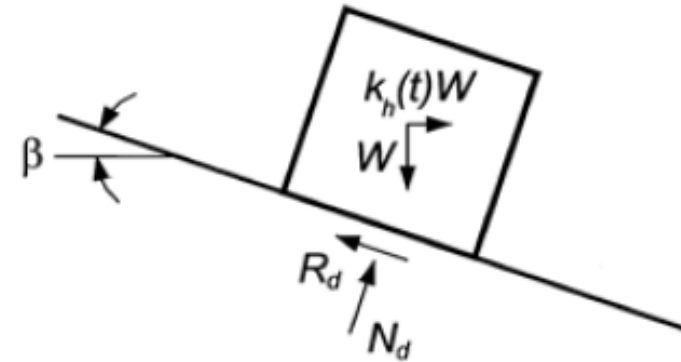
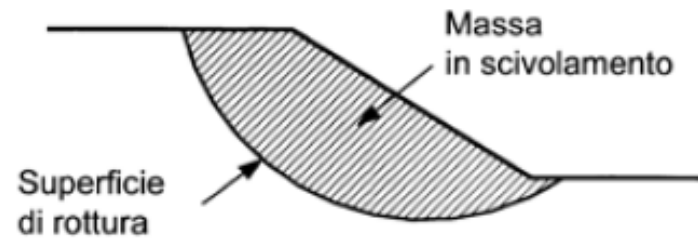
- **PSEUDO-STATICO**

- Coefficiente sismico K_h $k_h = \beta_s S_S S_T a_g / g$ Componente orizzontale dell'azione sismica pseudo-statica $k_h W$

- **PSEUDO DINAMICO (acc., Ky, analisi ...)**

- Newmark (1965)
- Makdisi e Seed (1978)
- Bray et al. (1998)
- Rathje e Bray (2000)
-

- Metodo sviluppato in origine per problemi di stabilità di dighe e rilevati – pendii e poi applicato anche alle verifiche di stabilità di opere di sostegno rigide
- La condizione di equilibrio può essere violata durante l'evento sismico ogniqualvolta che **l'accelerazione del sisma supera un valore critico corrispondente alla condizione FS=1**
- Si ammette la formazione/accumulo di spostamenti permanenti quando le azioni superano le resistenze
- Il metodo necessita la definizione di un valore di spostamento permanente ammissibile
- La verifica si sposta sull'ammissibilità degli spostamenti



- Si basa sull'analogia tra stabilità dei pendii e scivolamento di un blocco rigido su un piano inclinato dotato di attrito

Indicazioni nelle NTC 2018 (condizioni sismiche) – 7.11.3.5

Le analisi del comportamento dei pendii in condizioni sismiche possono essere svolte anche mediante il metodo degli spostamenti, in cui la massa di terreno potenzialmente in frana viene assimilata ad un corpo rigido che può muoversi rispetto al terreno stabile lungo una superficie di scorrimento. Il metodo permette la valutazione dello spostamento permanente indotto dal sisma nella massa di terreno potenzialmente instabile.

L'applicazione del metodo richiede la valutazione dell'accelerazione critica, che deve essere valutata con i valori caratteristici dei parametri di resistenza, e dell'azione sismica di progetto, che deve essere rappresentata mediante storie temporali delle accelerazioni. Gli accelerogrammi impiegati nelle analisi, in numero non inferiore a 7, devono essere rappresentativi della sismicità del sito e la loro scelta deve essere adeguatamente giustificata (vedi § 3.2.3.6). Non è ammesso l'impiego di accelerogrammi artificiali.

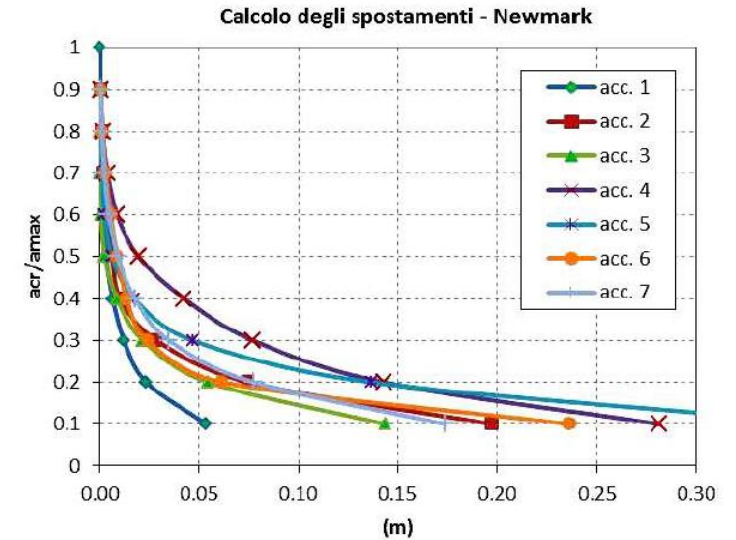
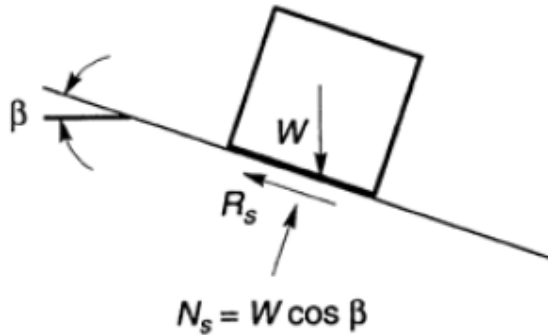


Figura 7.116 Spostamenti permanenti per differenti valori di a_{cr}/a_{max} relativi alle coperture detritiche dell'Appennino Settentrionale, utilizzando 7 accelerogrammi diversi (Lo Presti et al. 2009)

Nel metodo degli spostamenti, la valutazione delle condizioni di stabilità del pendio è effettuata mediante il confronto tra lo spostamento calcolato per il cinematismo di collasso critico e i valori limite o di soglia dello spostamento. Le condizioni del pendio e dei manufatti eventualmente interagenti con esso possono essere riferite al raggiungimento di uno stato limite ultimo (SLV) o di esercizio (SLD) in dipendenza del valore di soglia dello spostamento. I criteri di scelta dei valori limite di spostamento devono essere illustrati e giustificati dal progettista.

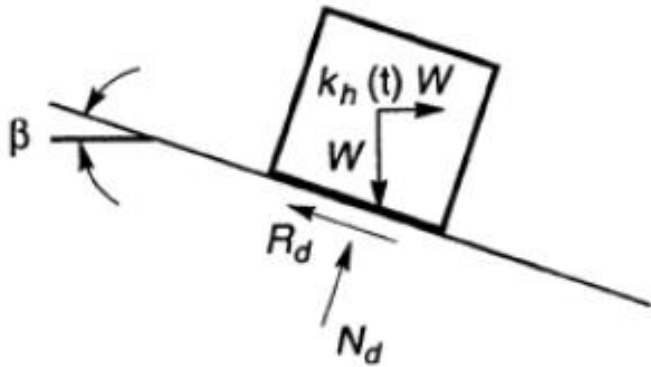
Condizioni Statiche



- Condizioni statiche ($c' = 0$)

$$FS_{statico} = \frac{R_s}{D_s} = \frac{W \cos \beta \tan \varphi}{W \sin \beta} = \frac{\tan \varphi}{\tan \beta}$$

Condizioni Dinamiche (si trascurano per semplicità gli effetti dell'accelerazione verticale, k_v)



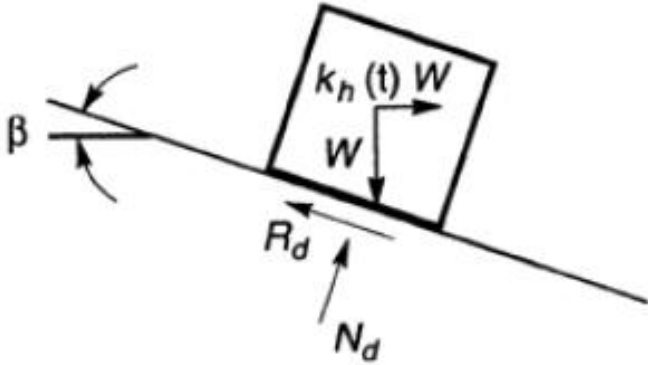
- Condizioni dinamiche ($c' = 0$)

$$a_h(t) = k_h(t)g$$

$$FS_{dinamico} = \frac{R_d}{D_d} = \frac{[\cos \beta - k_h(t) \sin \beta] \tan \varphi}{[\sin \beta + k_h(t) \cos \beta]}$$

- FS dinamico diminuisce all'aumentare di k_h ed esiste un particolare valore di k_h tale per cui FS dinamico è uguale ad 1 -> k_y **Coefficiente Critico** e a_y **Accelerazione Critica**

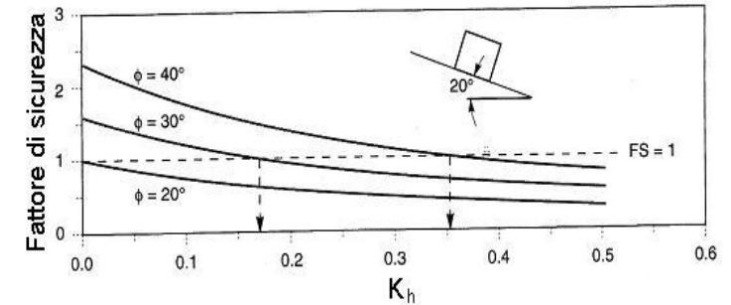
Condizioni Dinamiche (si trascurano per semplicità gli effetti dell'accelerazione verticale, k_v)



- Condizioni dinamiche ($c' = 0$)

$$a_h(t) = k_h(t)g$$

$$FS_{dinamico} = \frac{R_d}{D_d} = \frac{[\cos \beta - k_h(t) \sin \beta] \tan \varphi}{[\sin \beta + k_h(t) \cos \beta]}$$



- FS dinamico diminuisce all'aumentare di k_h ed esiste un particolare valore di k_h tale per cui FS dinamico è uguale ad 1 -> k_y **Coefficiente Critico** e a_y **Accelerazione Critica**

- L'accelerazione critica corrisponde alla minima accelerazione pseudo-statica che provoca l'instabilità del blocco. Nel caso in Figura si avrà che:

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

Se l'accelerazione tende a far scivolare il blocco verso il basso

$$k_y = \frac{\tan \varphi + \tan \beta}{1 + \tan \varphi \tan \beta}$$

Se l'accelerazione tende a far scivolare il blocco verso l'alto (ipotesi meno realistica)

Condizioni Dinamiche (si trascurano per semplicità gli effetti dell'accelerazione verticale, k_v)

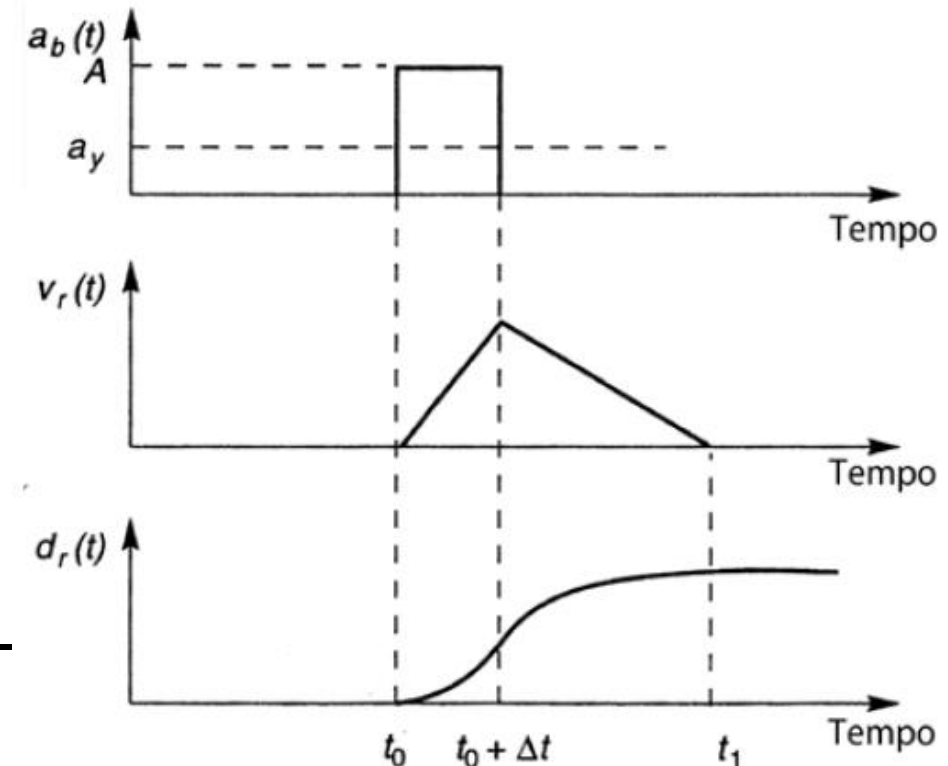
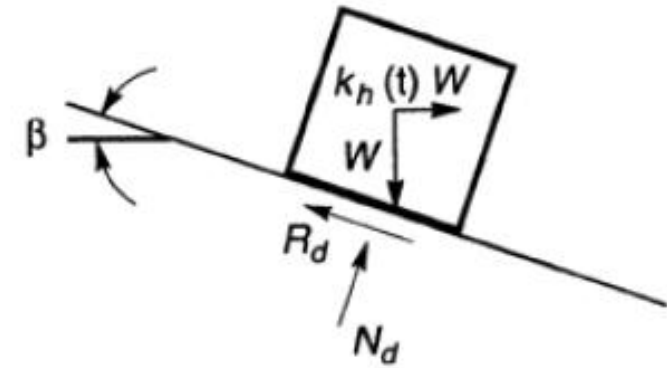
- Calcolo dello spostamento relativo finale tra blocco e piano: si scompone l'accelerogramma considerandolo come somma di impulsi di forma rettangolare con ampiezza A e durata Δt
- Se l'accelerazione $A > a_y$, l'accelerazione relativa del blocco rispetto al piano è:

$$a_{rel}(t) = a_b(t) - a_y(t) = A - a_y$$

- Lo spostamento relativo è ottenuto mediante doppia integrazione dell'accelerazione relativa

$$v_{rel}(t) = \int_{t_0}^t a_{rel} dt = [A - a_y](t - t_0) \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$$

$$d_{rel}(t) = \int_{t_0}^t v_{rel} dt = \frac{1}{2} [A - a_y](t - t_0)^2 \quad t_0 \leq t \leq t_0 + \Delta t$$



Condizioni Dinamiche (si trascurano per semplicità gli effetti dell'accelerazione verticale, k_v)

- All'istante $t = t_0 + \Delta t$ la velocità relativa raggiunge il valore massimo:

$$v_{rel}(t_0 + \Delta t) = [A - a_y]\Delta t$$

$$d_{rel}(t_0 + \Delta t) = \frac{1}{2}[A - a_y]\Delta t^2$$

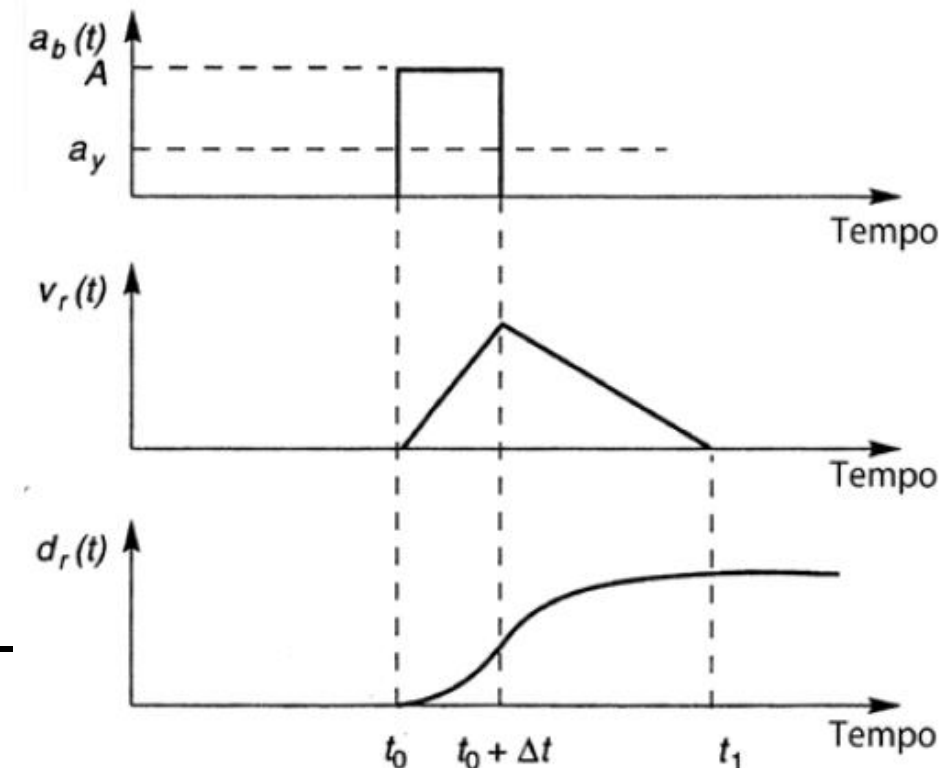
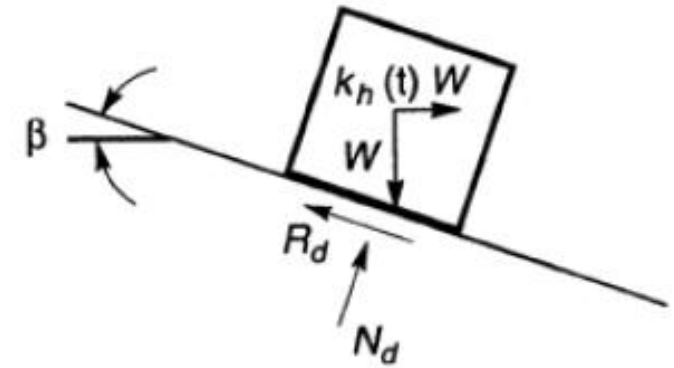
- All'istante $t = t_0 + \Delta t$ l'accelerazione a_b si annulla ed il blocco subisce una decelerazione per effetto dell'attrito. L'accelerazione relativa varrà quindi:

$$a_{rel}(t) = a_b(t) - a_y(t) = 0 - a_y = -a_y \quad t_0 + \Delta t \leq t \leq t_1$$

- L'istante t_1 è l'istante in cui la velocità relativa si annulla. Tra $t_0 + \Delta t$ e t_1 la velocità relativa e lo spostamento relativo saranno:

$$v_{rel}(t) = v_{rel}(t_0 + \Delta t) + \int_{t_0 + \Delta t}^t a_{rel} dt = [A\Delta t - a_y(t - t_0)]$$

$$d_{rel}(t) = \left[A\Delta t(t - t_0 - \Delta t) - \frac{1}{2}a_y(t^2 - (t_0 + \Delta t)^2) \right]$$



Condizioni Dinamiche (si trascurano per semplicità gli effetti dell'accelerazione verticale, k_v)

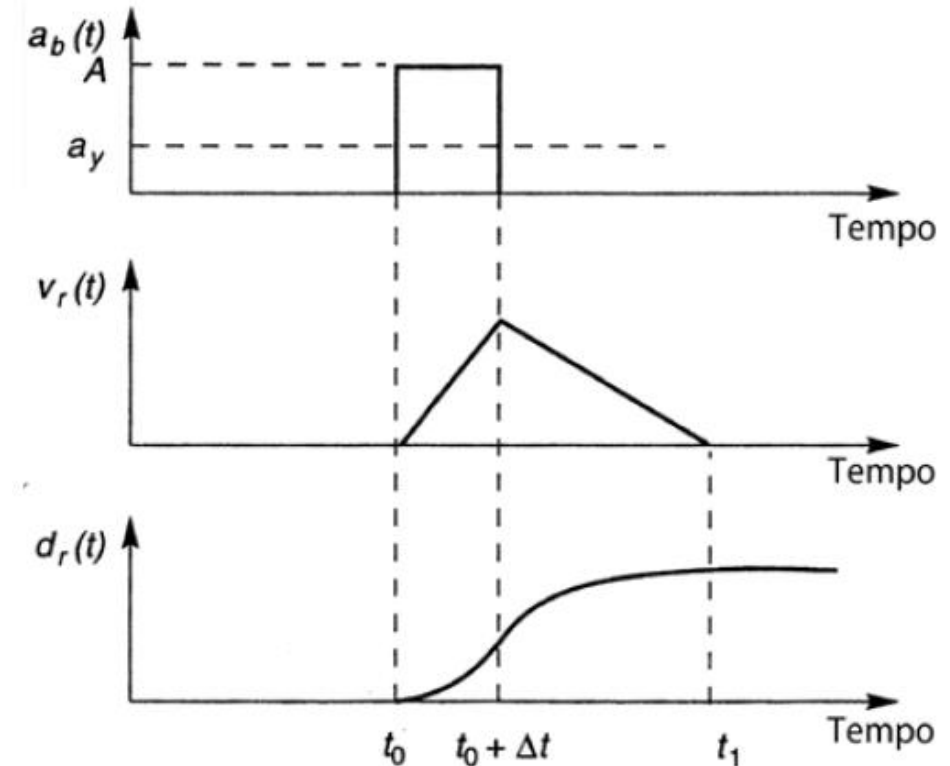
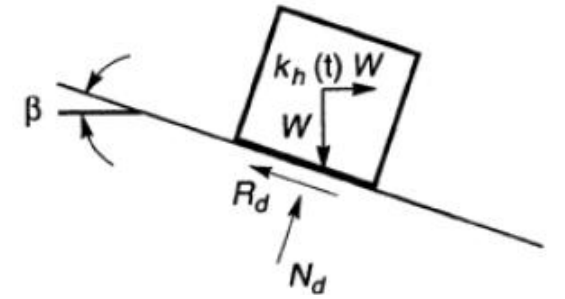
- Il valore di t_1 si ottiene imponendo che la velocità relativa sia uguale a zero

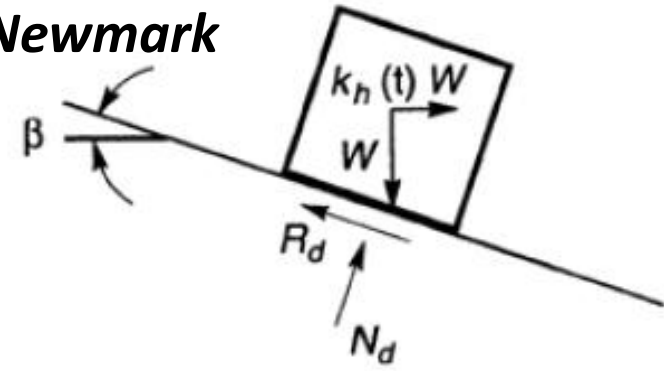
$$t_1 = t_0 + \frac{A}{a_y} \Delta t$$

- Lo spostamento relativo complessivo è dato da:

$$d_{rel}(t_1) = \left[\frac{1}{2} (A - a_y) (\Delta t)^2 \frac{A}{a_y} \right]$$

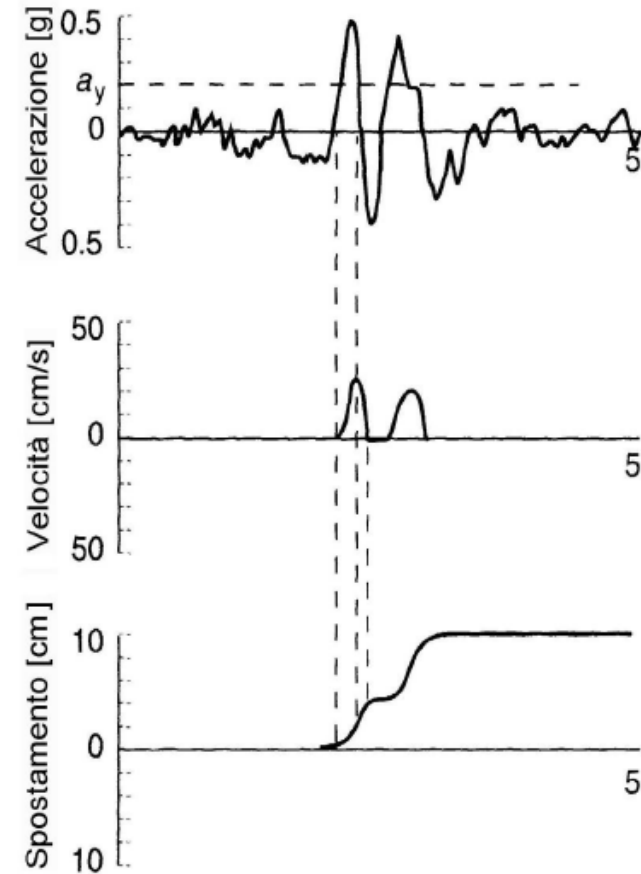
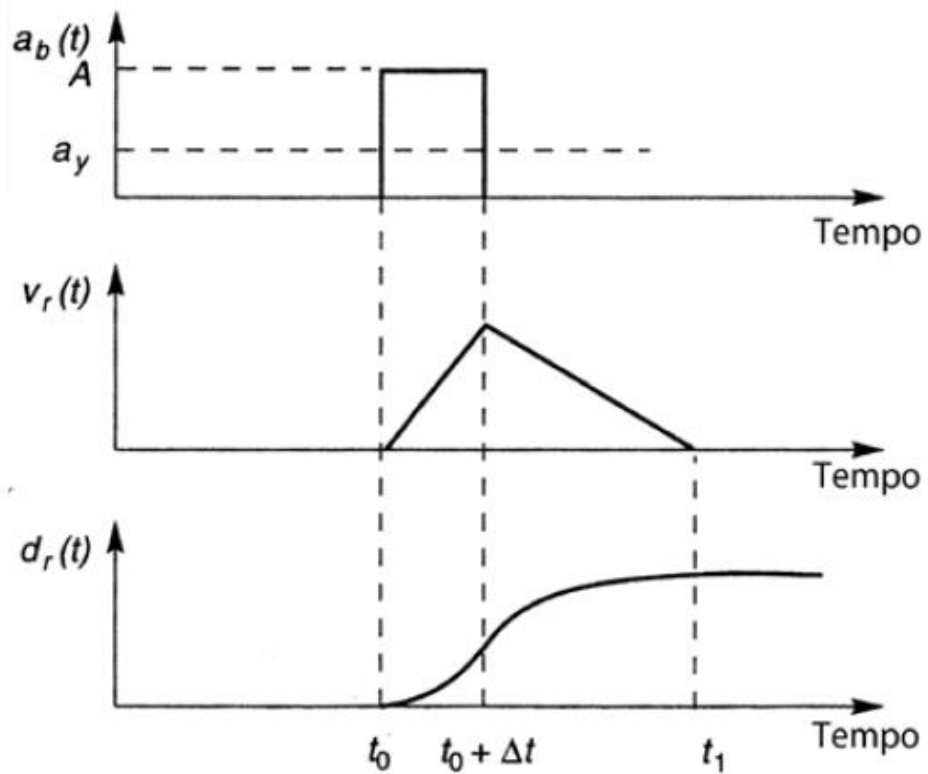
- Lo spostamento relativo finale dipende dalla differenza tra accelerazione critica e accelerazione del sisma e dalla durata del periodo in cui l'accelerazione supera quella critica.





Condizioni Dinamiche (si trascurano per semplicità gli effetti dell'accelerazione verticale, k_v)

- Lo spostamento relativo finale dipende dalla differenza tra accelerazione critica e accelerazione del sisma e dalla durata del periodo in cui l'accelerazione supera quella critica.

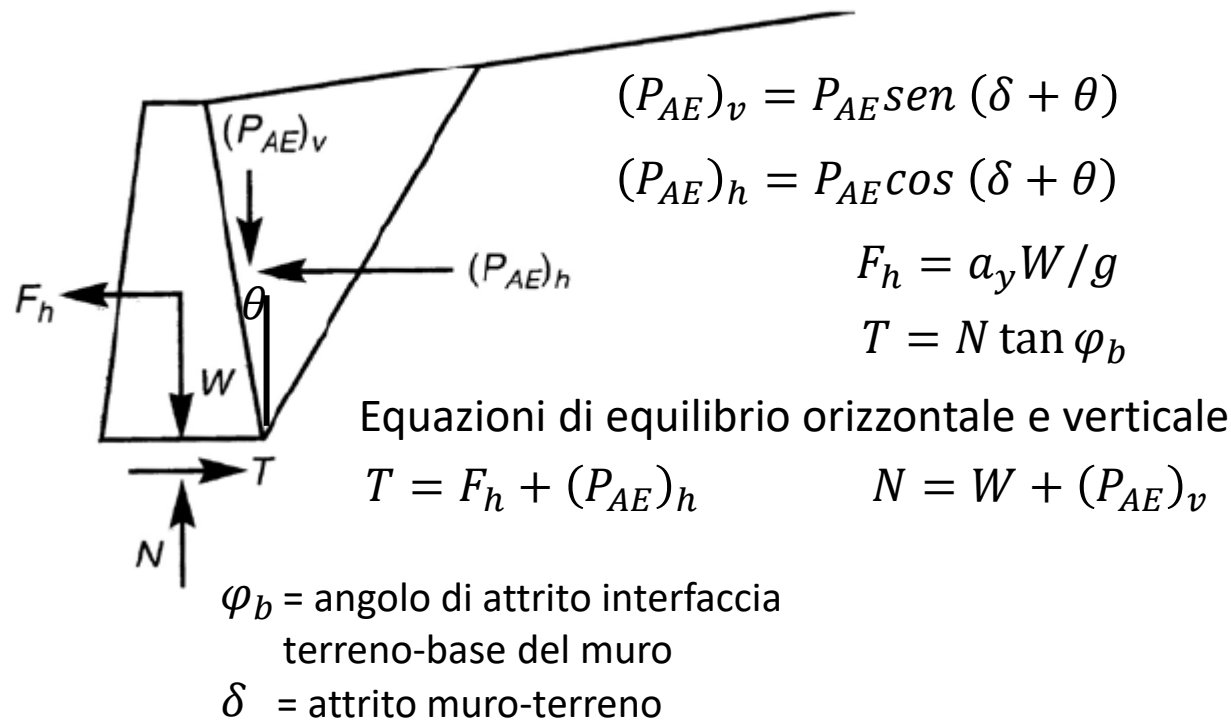


- Calcolo approssimato dello spostamento totale sulla base dell'accelerogramma e dell'accelerazione critica

$$d = \frac{1}{2} \frac{v_{max}^2}{a_y} \frac{a_{max}}{a_y}$$

- v_{max} = velocità di picco al suolo
- a_{max} = accelerazione orizzontale di picco al suolo

Applicazione del metodo approssimato per la verifica di opere si sostegno rigide



1. Definizione di un valore dello spostamento ammissibile (d_{amm}). Solitamente è accettabile un valore di 10 cm
2. Definizione di a_{max} e v_{max} (dalle NTC 2018)
 - a) $a_{max} = a_{gR} S$
 - b) $v_{max} = 0.16 S T_c a_{max}$
3. Calcolo dell'accelerazione critica (metodo di Richards e Elms, 1979)

$$a_y = \left(0.22 \frac{v_{max}^2 a_{max}^3}{d_{amm}} \right)^{0.25}$$

4. Calcolo del peso W che assicura FS = 1

$$W = \frac{P_{AE} \cos(\delta + \theta) - P_{AE} \sin(\delta + \theta) \tan \varphi_b}{\tan \varphi_b - a_y / g}$$

5. Si applica un coefficiente di sicurezza al peso (FS=1.1-1.2)

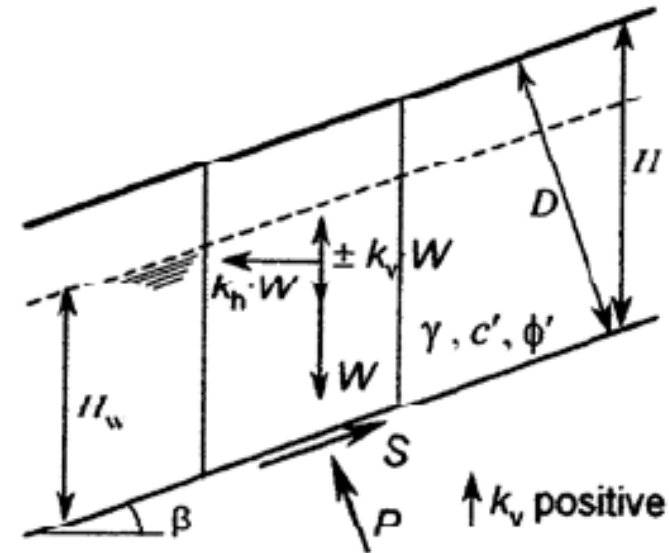
Accelerazione critica nel caso di pendii indefiniti dotati di attrito e coesione in presenza di falda - Biondi et al. (2007)

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
 $\Omega = k_v / k_h$
 $D = H \cdot \cos \beta$

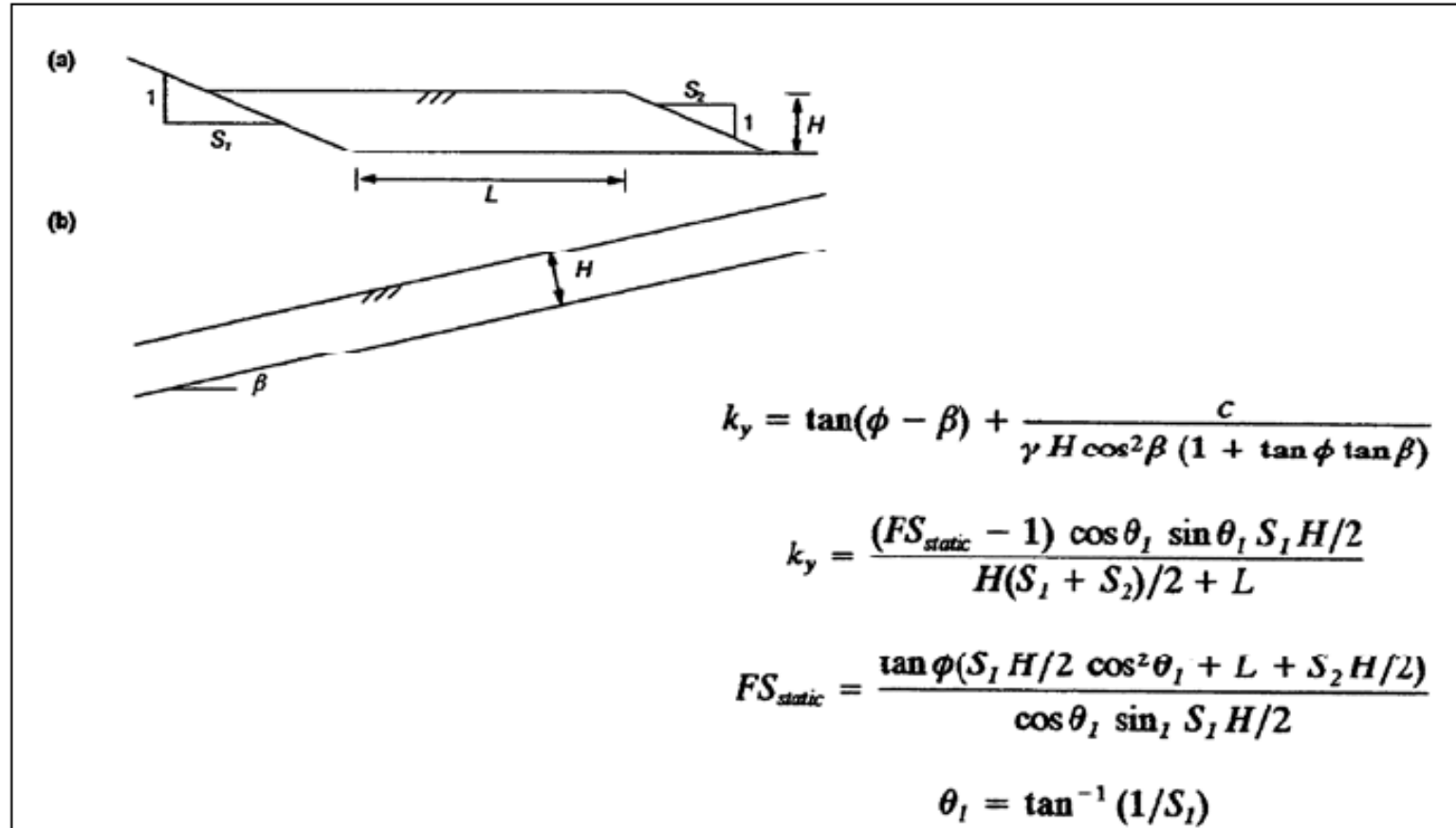
Horizontal critical acceleration coefficient:

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



Scheme of infinite slope

Accelerazione critica nel caso di pendii di diverse geometrie dotati di attrito e coesione (no falda)
Bray et al. (1998)



Altre indicazioni sono fornite in Chang et al. (1984) e Sarma (1979). Nel caso più generale si può stimare l'accelerazione critica da analisi di stabilità imponendo $FS = 1$

- In presenza di strati sottili con caratteristiche meccaniche scadenti
- Strati non necessariamente orizzontali
- Meccanismo di collasso nello strato sottile soffice
- L'azione instabilizzante è la spinta attiva del blocco attivo
- L'azione stabilizzante è data da: «spinta passiva del blocco passivo» + «resistenza al taglio nello strato con proprietà scadenti»

