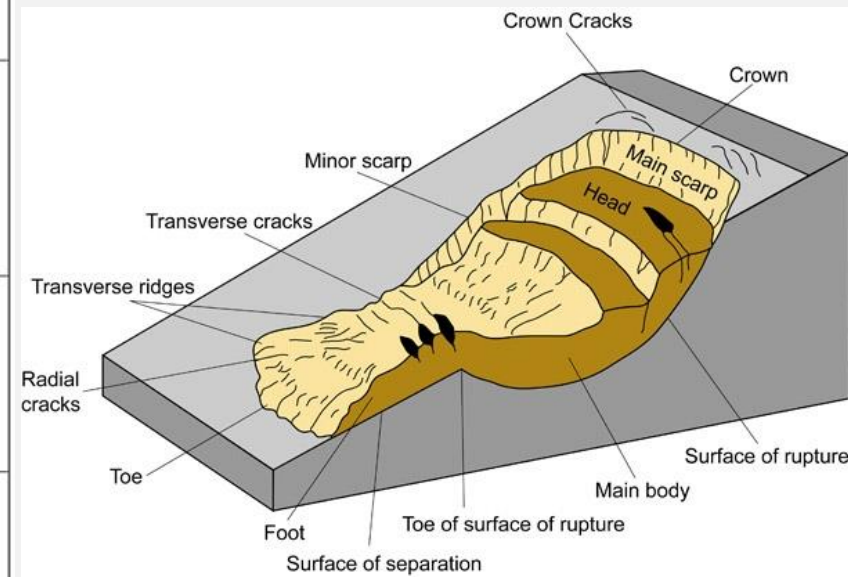


# LE FRANE

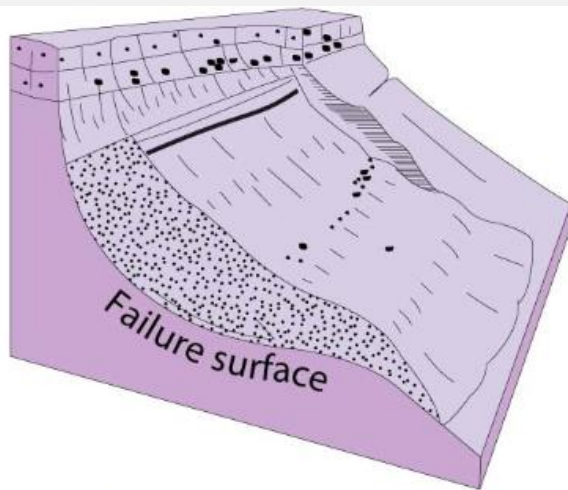
Material	ROCK	DEBRIS	EARTH
<b>FALLS</b>	<p>Rock fall</p>	<p>Debris fall</p>	<p>Earth fall</p>
<b>TOPPLES</b>	<p>Rock topple</p>	<p>Debris topple</p>	<p>Earth topple</p>
<b>SLIDES</b>	<p>Single rotational slide (slump)</p>	<p>Multiple rotational slide</p>	<p>Successive rotational slides</p>
	<p>Rock slide</p>	<p>Debris slide</p>	<p>Earth slide</p>
<b>SPREADS</b>	<p>Earth spread</p>		<p>Earth spread</p>
<b>FLOWS</b>	<p>Solifluction flows (Periglacial debris flows)</p>	<p>Debris flow</p>	<p>Earth flow (mud flow)</p>
<b>COMPLEX</b>	<p>e.g. Slump-earthflow with rockfall debris</p>		<p>e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe</p>



[https://www.geocaching.com/geocache/GC36T1A\\_angle-of-repose?guid=f8ea869c-9ca7-4890-8840-672f0399d83d](https://www.geocaching.com/geocache/GC36T1A_angle-of-repose?guid=f8ea869c-9ca7-4890-8840-672f0399d83d)

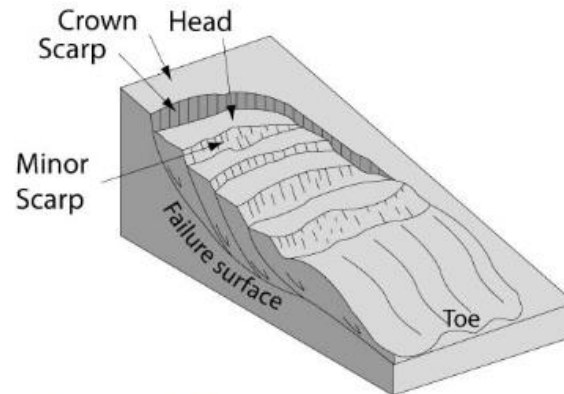
Chiara Calligaris, Ph.D. – D.M.G. Università degli Studi di Trieste

# SCIVOLAMENTI ROTAZIONALI

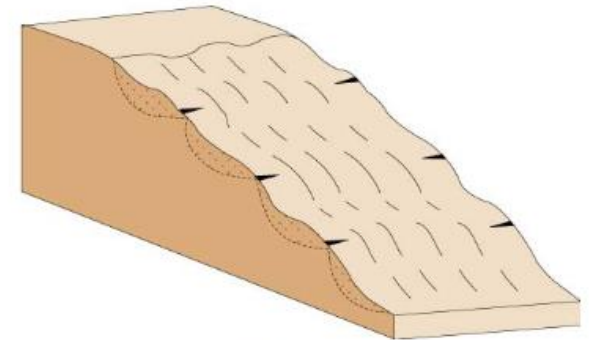


Single rotational slide

Varnes, 1978



Multiple rotational slide



Successive rotational slides

Chiara Calligaris, Ph.D. – D.M.G. Università degli Studi di Trieste

# SCIVOLAMENTI ROTAZIONALI

## [Landslide causes homes to collapse in Tennessee](#) – 17 February 2020

The incident occurred late Saturday afternoon after what neighbors describe as “terrible rain.” It happened as the county continues to recover from ongoing flooding and damage from straight-line winds several weeks ago.

<https://www.bing.com/videos/search?q=sliding+landslide+video&&view=detail&mid=29F07AAAA8157F6A52E729F07AAAA8157F6A52E7&&FORM=VDRVRV>

## **Drone footage of Rattlesnake Ridge landslide** from May 31, 2018

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=4&v=ijxyGY0rc6k&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=4&v=ijxyGY0rc6k&feature=emb_logo)

<https://www.dnr.wa.gov/rattlesnake-hills-landslide> sito con info sul fenomeno.

*Chiara Calligaris, Ph.D. – D.M.G. Università degli Studi di Trieste*

# SCIVOLAMENTI

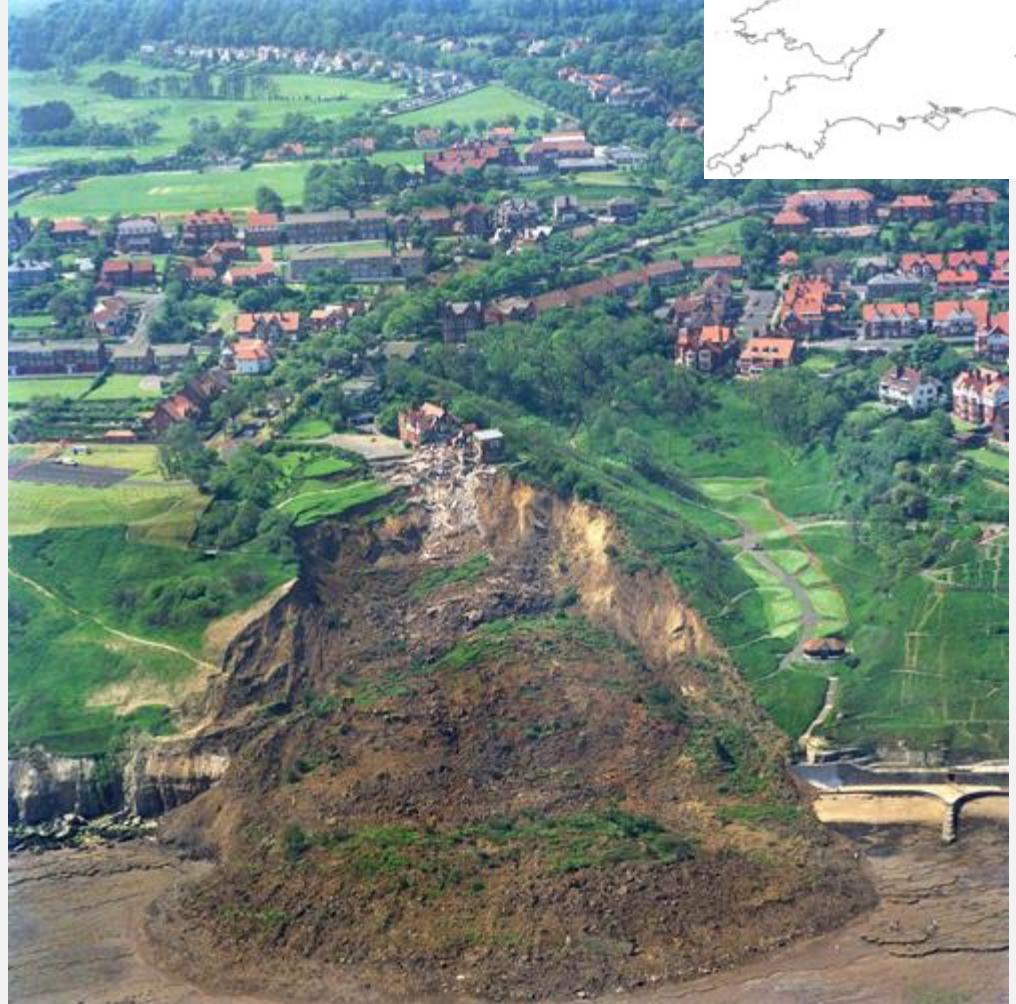


Aerial view of the Washington landslide. Photo from March 27, 2014 by Jonathan Godt, USGS.

# SCIVOLAMENTI

The Holbeck landslide, south of Scarborough in North Yorkshire, attracted considerable interest when it **destroyed the four-star Holbeck Hall Hotel between the night of 3 June and 5 June 1993**. A rotational landslide involving about 1 million tonnes of **glacial till** cut back the 60 m high cliff by 70 m. It flowed across the beach to form a semicircular promontory 200 m wide projecting 135 m outward from the foot of the cliff. The likely cause of the landslide was a combination of: rainfall of **140 mm in the two months before the slide took place**; issues related to the drainage of the slope; pore water pressure build up in the slope and the geology. The first signs of movement on the cliff were seen six weeks before the main failure, when cracks developed in the surface of footpaths running across the cliffs. These were filled to stop ingress of water to the cliff, but when the cracks reopened, shortly before the main failure, the council closed the cliff paths below the hotel. At this time a small part of the hotel garden was also observed to have suffered a minor movement.

The landslide is a rotational landslide degrading to a mud/debris flow which covered the rocks on the beach (platform).



Holbeck Hall landslide, Scarborough (UK)

# SCIVOLAMENTI

[https://www.youtube.com/watch?time\\_continue=205&v=M0JcEsl2P3g&feature=emb\\_logo](https://www.youtube.com/watch?time_continue=205&v=M0JcEsl2P3g&feature=emb_logo)

## References

Forster, A. 1993. Scarborough Landslip. *Geoscientist* Vol. 3. No.5. pp 2-3 and cover photograph.

Forster, A, and Culshaw, M. 2004. Feature: Implications of climate change for hazardous ground conditions in the UK, [Geology Today, v.20 issue 2](#), pp. 61–66

Lee, E M. 1999. Coastal planning and management: the impact of the 1993 Holbeck Hall landslide, Scarborough : *East Midlands Geographer* Vol 21 pt 2 1998 & v.22 pt1, p78–91

# Analisi di stabilità dei versanti

1. Quali sono i parametri che mi servono per realizzare un'analisi di stabilità???



Taiwan-Landslide

2. Dal punto di vista teorico, su cosa si basano le analisi di stabilità?

# Analisi di stabilità dei versanti

1. Quali sono i parametri che mi servono per realizzare un'analisi di stabilità???

**CARATTERIZZAZIONE GEOTECCNICA**

n°	x	y
1	0.00	138.00
2	4.00	135.00
3	19.00	126.00
4	26.50	119.00
5	49.00	116.00
6	53.00	112.50
7	54.00	110.00
8	66.50	106.50
9	72.00	103.50
10	86.00	101.50
11	97.50	98.00
12	103.50	95.00
13	108.00	92.00
14	111.50	87.50
15	131.00	85.00
16	147.50	84.00
17	157.50	76.00
18	164.00	73.50
19	177.00	66.50
20	185.00	62.50
21	197.00	56.50
22	213.00	45.50
23	237.00	38.00
24	275.00	24.00
25	0.00	115.00
26	18.00	115.00
27	35.00	108.00

n°	descrizione	sequenza nodi	materiale	falda
1	Argilla azzurra	1 2 3 4 5 6 7 8 9 10 11 12	1: Argilla azzurra	1: Falda
2	Argilla limosa	35 36 37 38 39 40 41 42 4	2: Argilla limosa	1: Falda
3	Sabbia g.sa	45 46 47 48 39 40 41 42 4	3: Sabbia ghiaiosa	1: Falda
4	Granito	45 46 47 48 49 50 51 34	4: Granito compact	1: Falda

ps	pw	c	fi	retino	colore
2050	2110	4120	27.0	argilla	
2060	2100	1410	18.0	sedime 135°	
2210	2300	750	23.0	sabbia	

n°	descrizione
1	Scuola
2	Strada
3	Edificio

**PESO DI VOLUME**  
**COESIONE non drenata**  
**ANGOLO DI ATTRITO**



# Analisi di stabilità dei versanti

2. Dal punto di vista teorico, su cosa si basano le analisi di stabilità?

## METODI DELL'EQUILIBRIO LIMITE

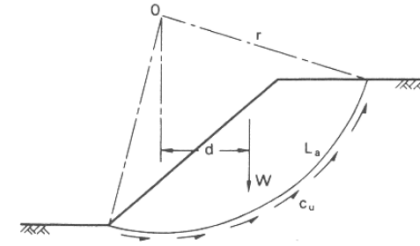
Il metodo dell'equilibrio limite consiste nello studiare l'equilibrio di un corpo rigido, costituito dal pendio e da una superficie di scorrimento di forma qualsiasi (linea retta, arco di cerchio, spirale logaritmica); da tale equilibrio vengono calcolate le tensioni da taglio ( $\tau$ ) e confrontate con la resistenza disponibile ( $\tau_f$ ), valutata secondo il criterio di rottura di Mohr-Coulomb, da tale confronto ne scaturisce la prima indicazione sulla stabilità attraverso il coefficiente di sicurezza (F):

$$F = T_f / T$$

Tra i metodi dell'equilibrio limite alcuni considerano l'equilibrio globale del corpo rigido (Skempton, Taylor), altri a causa della non omogeneità dividono il corpo in conci considerando l'equilibrio di ciascuno (Fellenius, Bishop, Janbu ecc.).

# Skempton, 1948

- Terreni coesivi, non fessurati, completamente saturi
- Condizioni a breve termine (drenaggio impedito)
- Analisi in termini di tensioni totali ( $\phi_u=0$ )
- Criterio di resistenza al taglio:  
 $\tau_f = c_u$
- La rottura tende a svilupparsi lungo una superficie a sezione circolare



Il più semplice dei metodi del cerchio di scorrimento

Si assume che la **resistenza del terreno sia dovuta a sola coesione**

Momento resistente  $M_{res} = \sum r L c_u$

Momento ribaltante  $M_{rib} = \sum W d$

$F_s = M_{res} / M_{rib} = \sum r L c_u / \sum W d$  dividendo per r ottengo:

$F_s = L c_u / W \sin \alpha$  l'equazione non dipende più da r (raggio del cerchio di scorrimento) è identica a quella relativa ad un unico blocco che scorre su di un piano inclinato al cui movimento si contrappone solo la resistenza coesiva. Pertanto questa espressione è valida per superfici di scorrimento di ogni forma.

Paragonando i risultati ottenuti con questa metodologia a quelli ottenuti con metodologie più complesse, l'errore nel calcolo di  $F_s$  è del 5-8%  $\longrightarrow$  buon metodo

Momento = prodotto tra intensità della forza ed il suo braccio

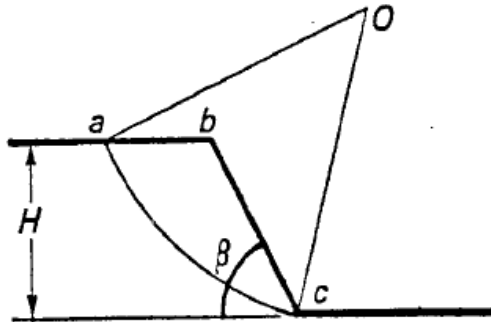
# Metodi della massa totale, metodo di Taylor (1937)

Taylor ha affrontato analiticamente il problema della stabilità di un pendio omogeneo, con geometria regolare e di altezza limitata, fornendo soluzioni adimensionali e carte di stabilità di impiego semplice ed immediato.

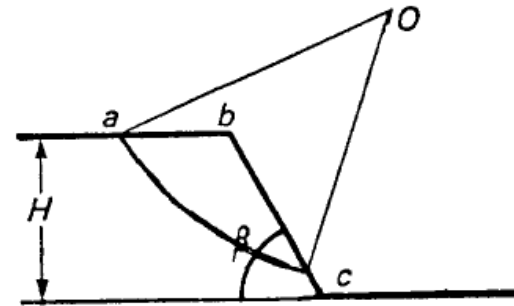
Il terreno ha peso di volume  $\gamma$ , e resistenza al taglio  $\tau = c + \sigma \tan \phi$ .

Il caso di pendio costituito da materiale puramente coesivo ( $\gamma = \gamma_{\text{sat}}$ ,  $\phi_u = 0$ ,  $\tau = c_u$ ) è applicabile per la verifica a breve termine di pendii di argilla omogenea satura non fessurata in condizioni non drenate. Il caso di pendio costituito da materiale dotato di coesione e attrito è applicabile alle verifiche a breve termine di terreno argilloso non saturo ( $\gamma < \gamma_{\text{sat}}$ ,  $\phi_u > 0$ ,  $\tau = c_u + \sigma \tan \phi_u$ ), e a lungo termine di terreni coesivi sovraconsolidati in assenza di pressione interstiziale ( $\phi' > 0$ ,  $u = 0$ ,  $\tau = c' + \sigma \tan \phi'$ ).

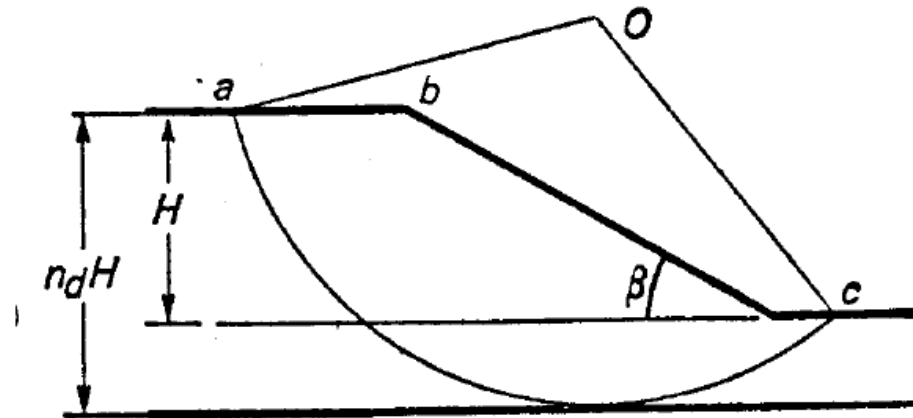
### A) ROTTURA DI PENDIO



CERCHIO DI PIEDE



CERCHIO DI PENDIO



B) ROTTURA DI BASE

Schemi di rottura di un pendio omogeneo di altezza limitata con superficie di scorrimento circolare (da Facciorusso et al. (2011) Dispense di geotecnica, Università degli studi di Firenze.



- per un pendio a parete verticale ( $\beta = 90^\circ$ )

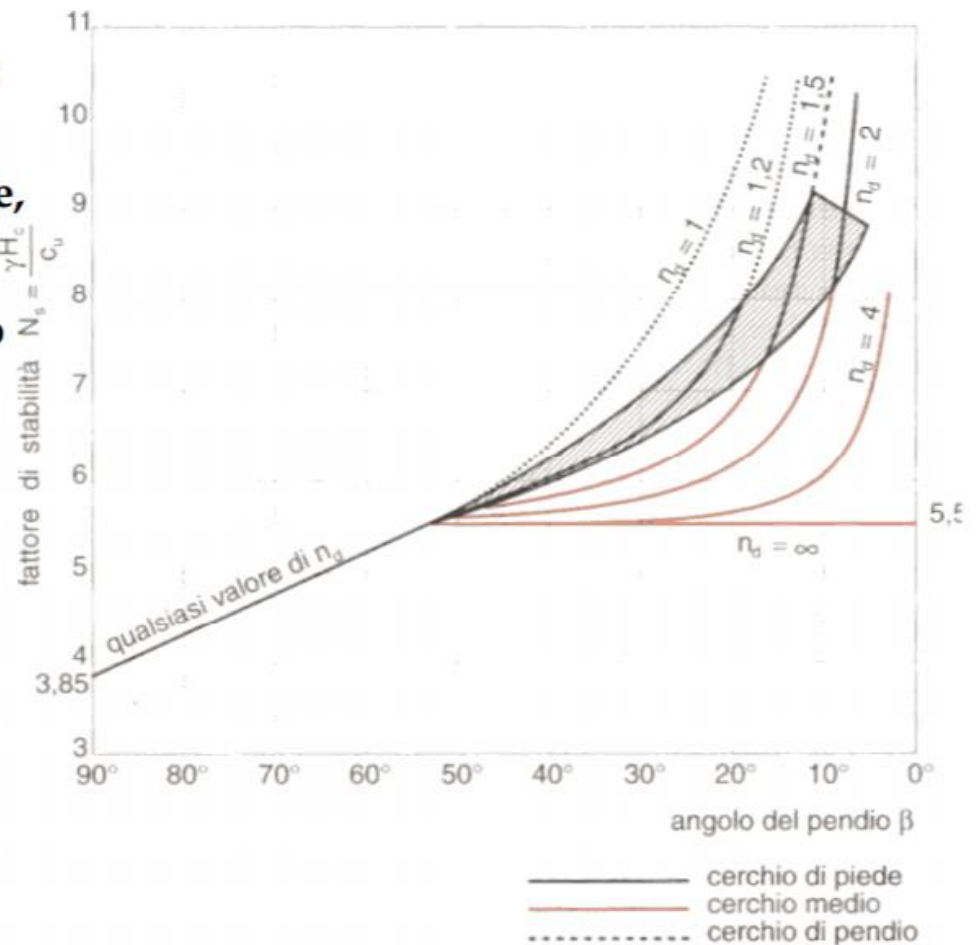
$$N_s = 3.85 \quad H_c = 3,85 \cdot \frac{c_u}{\gamma} < H_{C(\text{Culmann})} = \left( H_c = 4 \cdot \frac{c_u}{\gamma} \right)$$

- per angolo di pendio  $\beta > 53^\circ$   
il cerchio critico è sempre di piede;

- per angolo di pendio  $\beta < 53^\circ$   
il cerchio critico può essere di piede,  
medio o di pendio a seconda di  $H_1 \frac{\gamma H_c}{c_u}$

- in assenza di uno strato compatto di base ( $n_d = \infty$ )

$$H_c = 5,52 \cdot \frac{c_u}{\gamma} \quad \text{indipendente da } \beta.$$



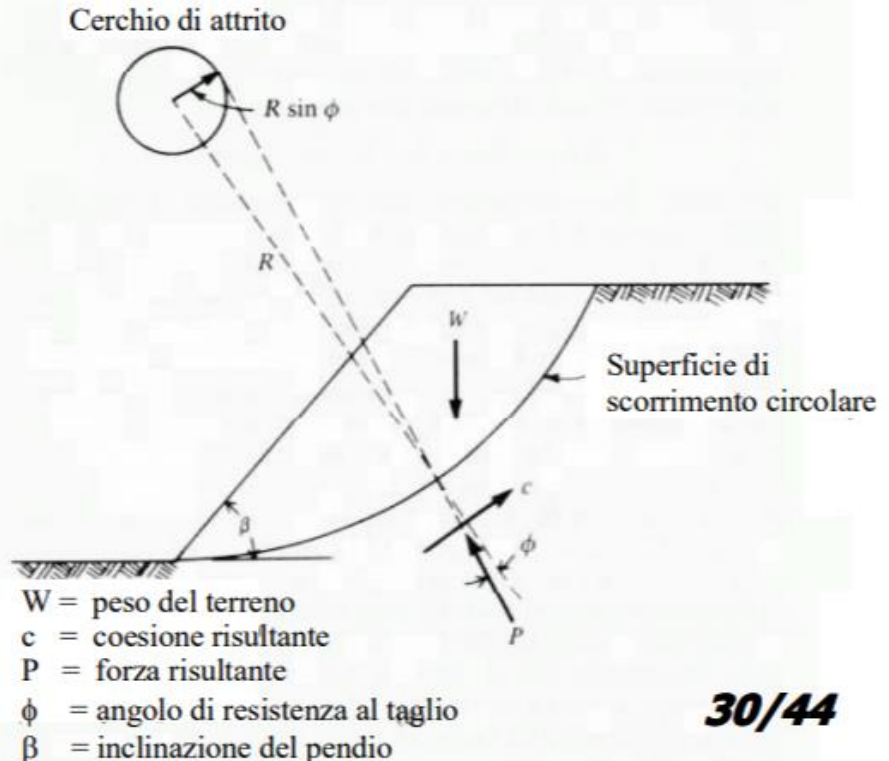
# Quando il materiale è dotato di coesione e angolo di attrito

È applicabile per:

- la verifica a breve termine di pendii di argilla omogenea non satura ( $\gamma < \gamma_{sat}$ ,  $\varphi_u > 0$ ,  $\tau = c_u + \sigma \cdot \tan \varphi_u$ ),
- la verifica a lungo termine di pendii di argilla omogenea sovraconsolidata in assenza di falda ( $u = 0$ ,  $\varphi' > 0$ ,  $\tau = c' + \sigma \cdot \tan \varphi'$ ),

Si basa sul metodo del **cerchio d'attrito**, concentrico alla superficie circolare di scorrimento (di raggio  $R$ ) e avente raggio  $R \sin \phi$ .

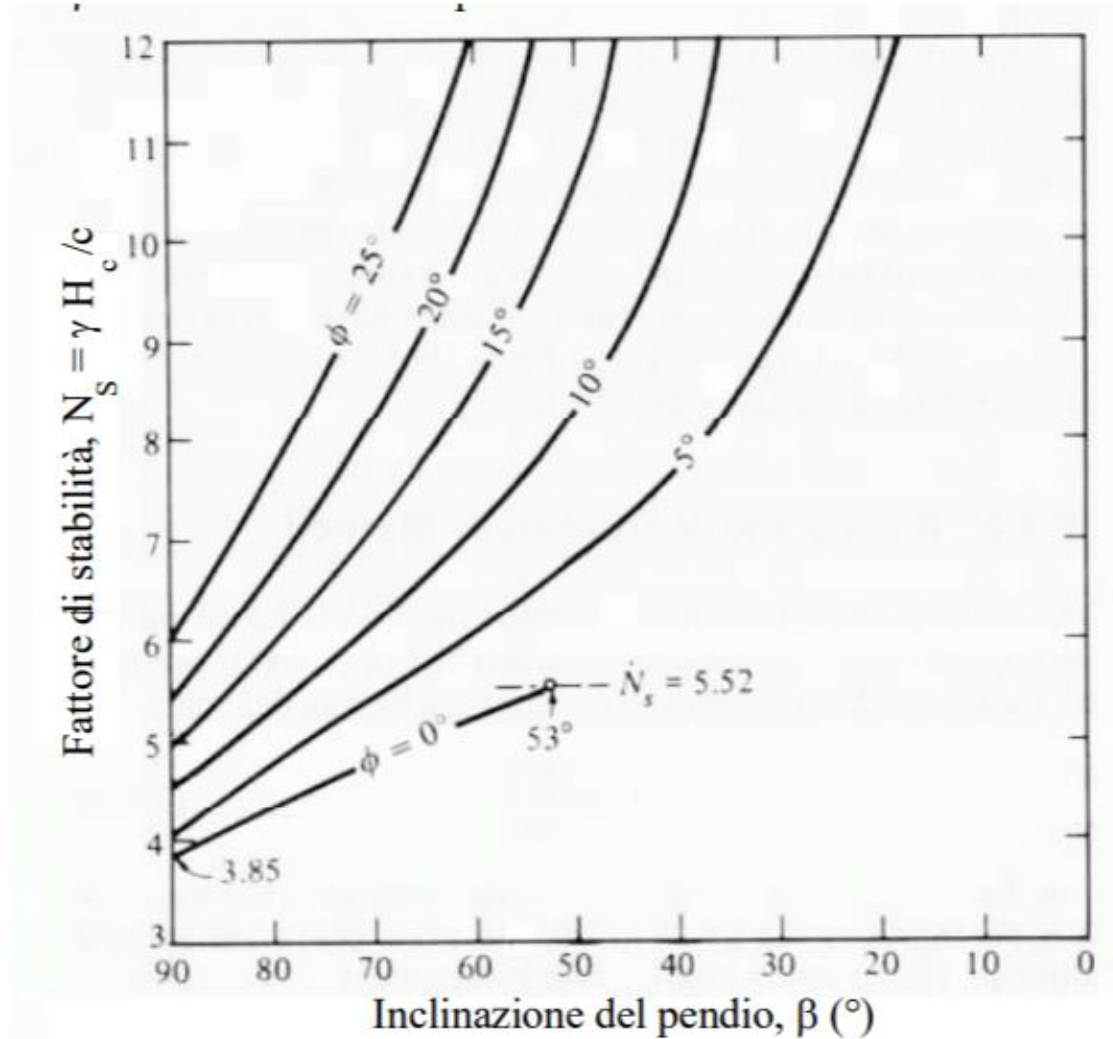
In ogni punto della superficie di scorrimento, la direzione della tensione mutua (somma dello sforzo normale e della tensione tangenziale dovuta all'attrito), in condizioni di equilibrio limite, forma un angolo  $\phi$  con la normale alla superficie ed è tangente al cerchio d'attrito.



**30/44**

Per un assegnato valore di  $\phi$  l'altezza critica del pendio è data dall'equazione:

$$H_c = N_s \cdot \frac{c}{\gamma}$$





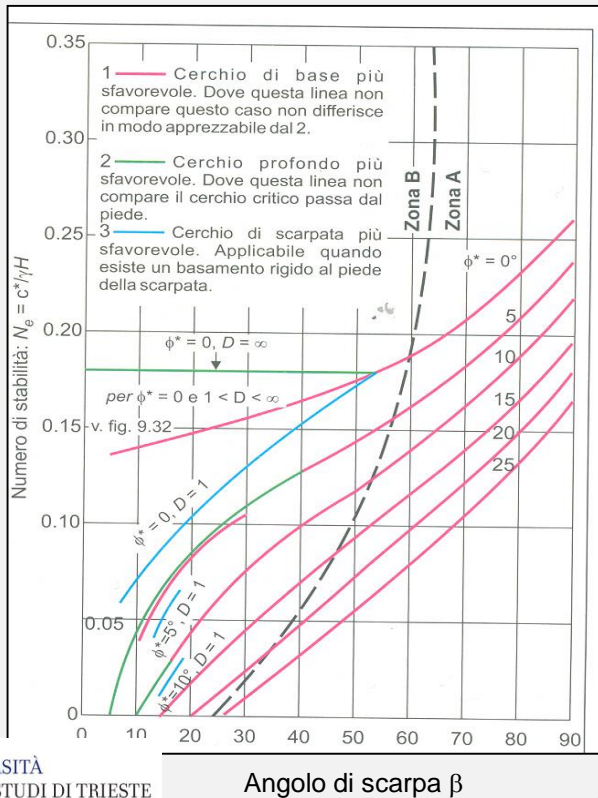
# Abachi di Taylor

L'abaco mette in relazione  $N_e$  (numero di stabilità) con  $\beta$  (l'angolo della scarpata) e con  $\Phi$  per valori compresi tra  $0^\circ$  e  $25^\circ$ .

## • TERRENI GRANULARI

Nella zona A il cerchio critico di base rimane completamente al di sopra del piede della scarpata.

Nella zona B il cerchio di base più sfavorevole passa al di sotto del piede della scarpata



# Hoek & Bray (1981)

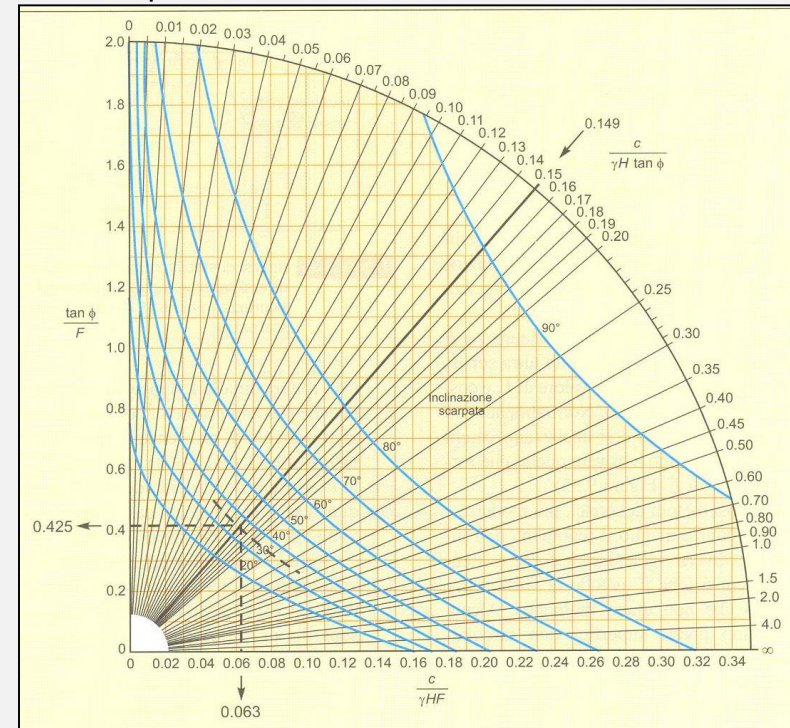
$F_s$  calcolato in base a CARTE DI STABILITA' (sup. scivolamento circolari) **Hoek & Bray (1981)**

## 5 carte in funzione del livello della falda

Valutazione speditiva e approssimata di  $F_s$

### IPOSTESI

1. Materiale omogeneo in tutta la scarpata
2. Esistenza di una frattura di trazione
3. La tensione normale viene concentrata in un unico punto della superficie di rottura



Terreni omogenei con coesione ed attrito

Abaco numero 3

# Metodo dei conci, metodo di Bishop

L'ipotesi di Taylor assume che le tensioni normali sulla superficie di rottura siano concentrate in un punto unico, il che comporta un certo errore, anche se a favore della sicurezza. L'abaco di Taylor permette solo di considerare la presenza d'acqua in un terreno omogeneo con livello di falda orizzontale.

## Bishop (1955): METODO DEI CONCI

### Ipotesi

1. Superficie di rottura circolare
2. Il terreno viene suddiviso in conci o fasce verticali
3. Si impone l'equilibrio dei momenti delle forze agenti in ciascun concio rispetto al centro del cerchio
4. Dalla condizione di equilibrio delle forze verticali in ciascun concio si ottengono le forze  $N$  (normali alla superficie di rottura) e si sostituiscono nell'equazione risultante dell'equilibrio dei momenti
5. Il metodo di Bishop semplificato ipotizza inoltre, che le forze di contatto tra 2 conci adiacenti non influiscano essendo in equilibrio.
6. Si ottiene così il coefficiente di sicurezza  $F$  della superficie considerata.

# Metodo di Bishop semplificato (1955)

Assunzioni preliminari:

- superfici di movimento circolari
- nulle le forze tangenziali agenti sulle superfici laterali di ciascun concio
- coesione e angolo di attrito interno del materiale diversi da zero
- si impone l'equilibrio dei momenti delle forze agenti in ciascun concio rispetto al centro del cerchio

L'espressione non è lineare pertanto per ottenere la risoluzione della medesima è necessario ricorrere ad un procedimento iterativo fino a convergenza rispetto ad un valore di tolleranza prefissato all'inizio del procedimento di calcolo.

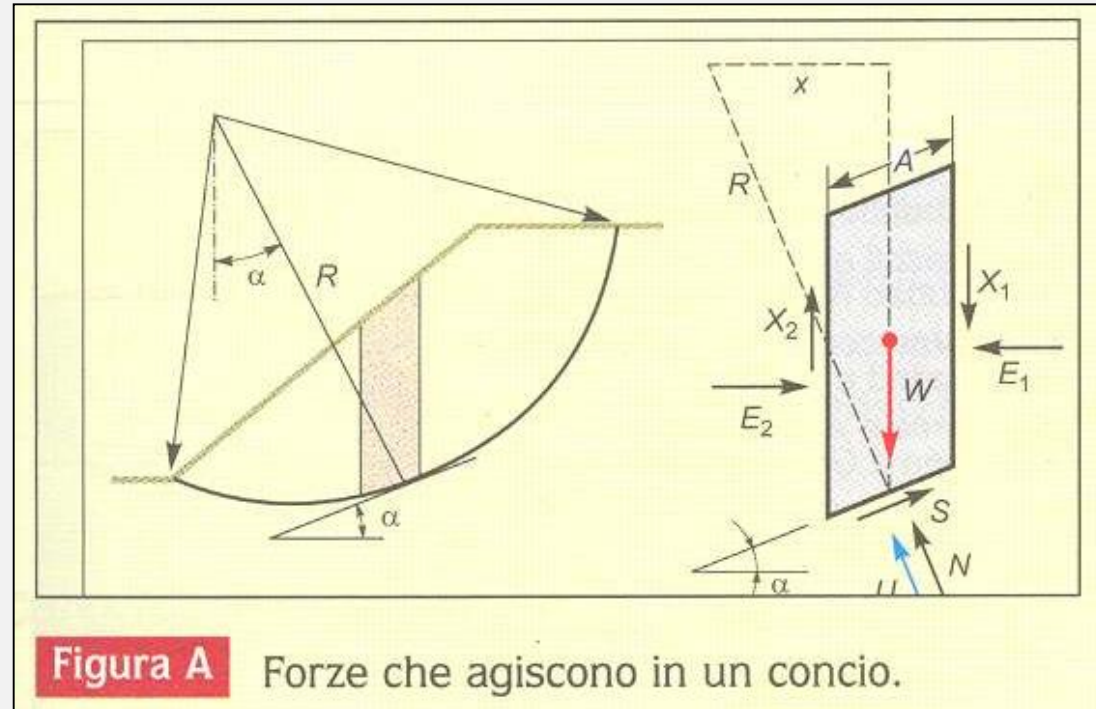


Figura A Forze che agiscono in un concio.

$$F = \frac{\Sigma(cA + N \tan \phi)}{\Sigma(W \sin \alpha)}$$

Il calcolo di  $F_s$  è a favore della sicurezza ed è generalmente modesto

1

A partire dalle forze che agiscono su ciascun dei conci considerati lungo la scarpata, si stabilisce l'equilibrio di momenti:

$$\Sigma S \cdot R = \Sigma W \cdot x = \Sigma W \cdot R \sin \alpha$$

Come:

$$F = (cA + N \tan \phi) / S$$

il valore di  $S$  è:

$$S = (cA + N \tan \phi) / F$$

quindi:

$$\Sigma \frac{cA + N \tan \phi}{F} R = \Sigma (WR \sin \alpha)$$

2

$$F = \frac{\Sigma (cA + N \tan \phi)}{\Sigma (W \sin \alpha)}$$

Per ricavare l'incognita  $N$ , si stabilisce l'equilibrio verticale del conico:

$$W + \Delta X = N \cos \alpha + U \cos \alpha + S \sin \alpha$$

sostituendo  $S$  e ricavando  $N$  si ottiene:

$$N = \frac{W + \Delta X - U \cos \alpha - [(cA + N \tan \phi) / F] \sin \alpha}{\cos \alpha}$$

da cui:

$$N = \frac{W + \Delta X - [(cA \sin \alpha) / F] + U \cos \alpha}{\cos \alpha + [(\tan \phi \sin \alpha) / F]}$$

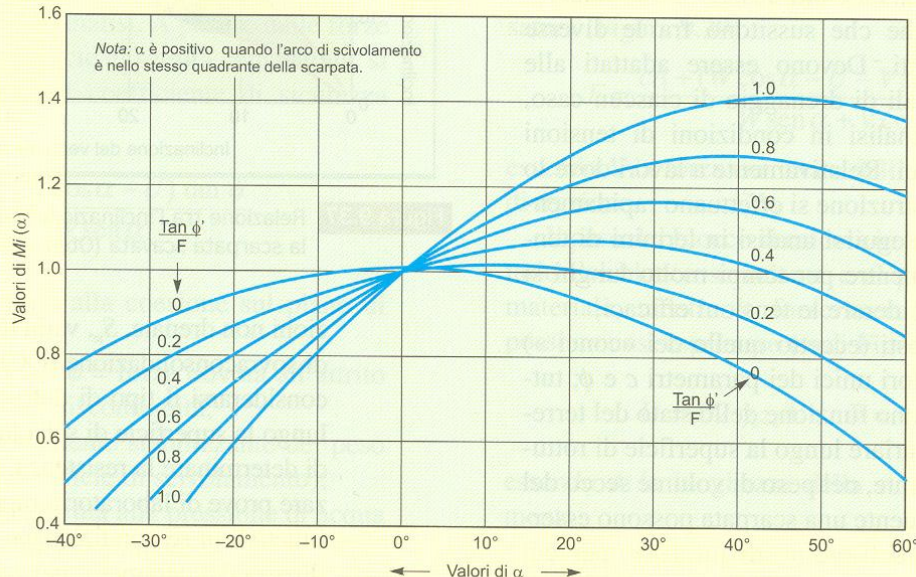
e il coefficiente di sicurezza risulta (considerando  $\Delta X = 0$ ):

$$F = \frac{\Sigma [cA \cos \alpha + (W - U \cos \alpha) \tan \phi] [1 / Mi(\alpha)]}{\Sigma W \sin \alpha}$$

dove:

$$Mi(\alpha) = \cos \alpha \left( 1 + \frac{\tan \phi \tan \alpha}{F} \right)$$

Per il calcolo di  $Mi(\alpha)$  può utilizzarsi l'abaco della Figura B.




**Figura B** Abaco per ottenere il valore di  $Mi(\alpha)$  dell'espressione di Bishop.

# Metodo di Janbu semplificato (1969)

Assunzioni preliminari:

- **superfici di scivolamento di forma qualsiasi**
- **nulle le forze tangenziali agenti** sulle superfici laterali di ciascun concio
- **coesione e angolo di attrito interno del materiale diversi da zero**

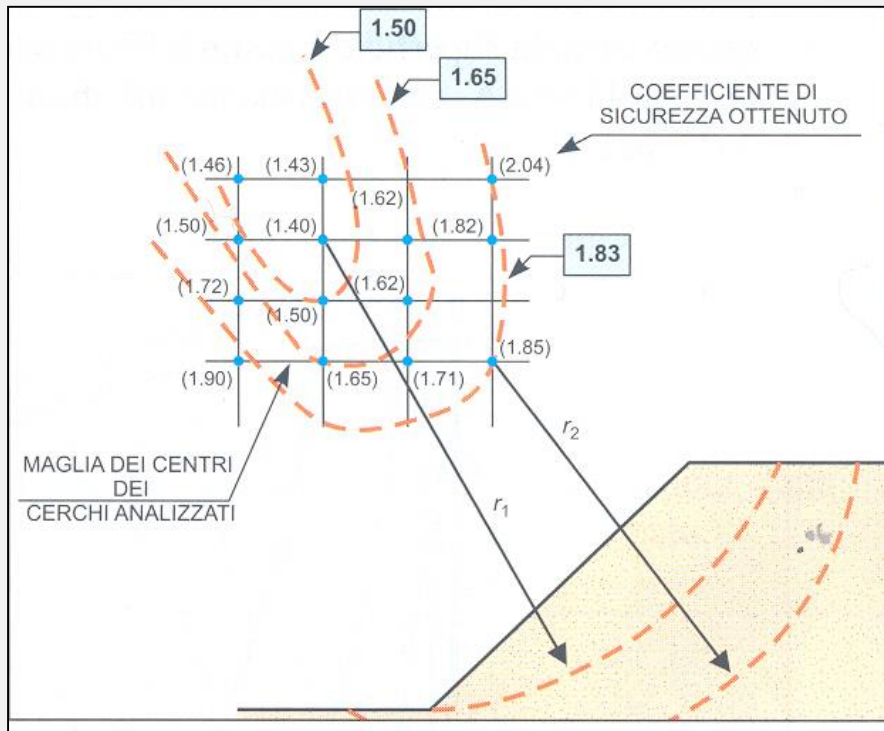
L'espressione non è lineare e per ottenerne la risoluzione è necessario ricorrere ad un procedimento iterativo fino a convergenza rispetto ad un valore di tolleranza prefissato all'inizio del procedimento di calcolo.

Il valore di  $F_s$  è sottostimato a favore della sicurezza soprattutto per terreni coesivi e sup. di scivol. profonde  fattore di correzione

$F_s$  corretto =  $f_0 F_s$  dove  $f_0$  dipende dai parametri di resistenza al taglio

$$F_s = \frac{\sum_{i=1}^n \left[ \frac{c'_i \Delta x_i + (W_i - u_i \Delta x_i)}{n_{\alpha i}} \operatorname{tg} \varphi_i \right]}{\sum_{i=1}^n W_i \operatorname{tg} \alpha_i}$$

dove:  $n_{\alpha i} = \cos^2 \alpha_i [1 + \operatorname{tg} \alpha_i \operatorname{tg} \varphi_i / F_s]$



Analisi di stabilità lungo superfici circolari (con diversi centri e raggi) e calcolo del coefficiente di sicurezza minimo (1.4) corrispondente alla scarpata considerata.

- Una volta ottenuto il coefficiente di sicurezza  $F$  dalla superficie considerata, si ipotizza un'altra superficie circolare e si determina il nuovo valore di  $F$  e così via fino ad ottenere quello minimo.
- Di norma con queste espressioni si scelgono e si analizzano cerchi con diversi centri e raggi, fino a trovare quello che fornisce il valore minimo di  $F$ .
- Esistono numerosi metodi dei conchi, più moderni e che cercano di riprodurre meglio il fenomeno dell'instabilità, stabilendo diverse ipotesi tra le forze esistenti nei contatti tra i conchi (che con il metodo di Bishop trascura ipotizzando che non diano momenti). Alcuni metodi considerano anche superfici non circolari (Janbu), sostituendole con una spirale logaritmica (potenzialmente più simile alla realtà) o una superficie poligonale. Si fa riferimento in questo caso a Spencer, Morgenstern & Price....
- Ma tutti hanno qualche inconveniente....quindi Bishop lo si utilizza ancora moltissimo per superfici di rottura circolari.

# Il codice **SSAP**

## Slope Stability Analysis Program

Il creatore del software  
Lorenzo Borselli, Ph.D

*“un passo oltre...”*

# **(SLOPE STABILITY ANALYSIS PROGRAM)**

<http://www.ssap.eu>



*Manuale di Riferimento*

## **Versione 4.9.9 (2019) - Win 64 Bit**

by

**Dr. Lorenzo Borselli, Geol , Ph.D. \*,\*\***

**dicembre 2017**





Nelle applicazioni Geologico-Tecniche è spesso necessario valutare il grado di **stabilità di un pendio naturale in terreni sciolti** o di **opere in terra rispetto** a potenziali movimenti gravitativi.

Tali valutazioni vengono usualmente condotte tenendo conto sia delle condizioni attuali che di quelle prevedibili o probabili nel futuro. Generalmente tali verifiche vengono realizzate, una volta note le caratteristiche lito-stratigrafiche, idrogeologiche, geomeccaniche del pendio, con **procedure di calcolo lunghe, ripetitive e talvolta assai complesse**.

Per questo motivo da TEMPO trovano largo impiego in questo campo **codici di calcolo automatico** che consentono di ridurre tempi e costi e, grazie alla loro velocità ed efficienza, di ottenere risultati più attendibili, perché basati su un numero più elevato di verifiche.

Il Programma **SSAP** nasce dall'attività di ricerca svolta nello sviluppo di algoritmi che consentono di ottenere un'ottimale modellizzazione della configurazione geomeccanica e litostratigrafica dei **pendii in terreni sciolti ma anche per ammassi rocciosi**.

Per valutare correttamente il grado di stabilità di un pendio, oltre che eseguire una corretta caratterizzazione geolitologica dell'area, è necessario tener conto delle eventuali disomogeneità presenti nella massa del pendio, soprattutto nei casi di marcata variabilità delle caratteristiche del terreno, quali ad esempio disomogeneità costituite da strati e lenti di materiali aventi diverse caratteristiche geomeccaniche, livelli di falda variabili, topografie irregolari, elementi stabilizzanti (muri, palificate, tiranti, geogriglie, geosintetici ecc.).

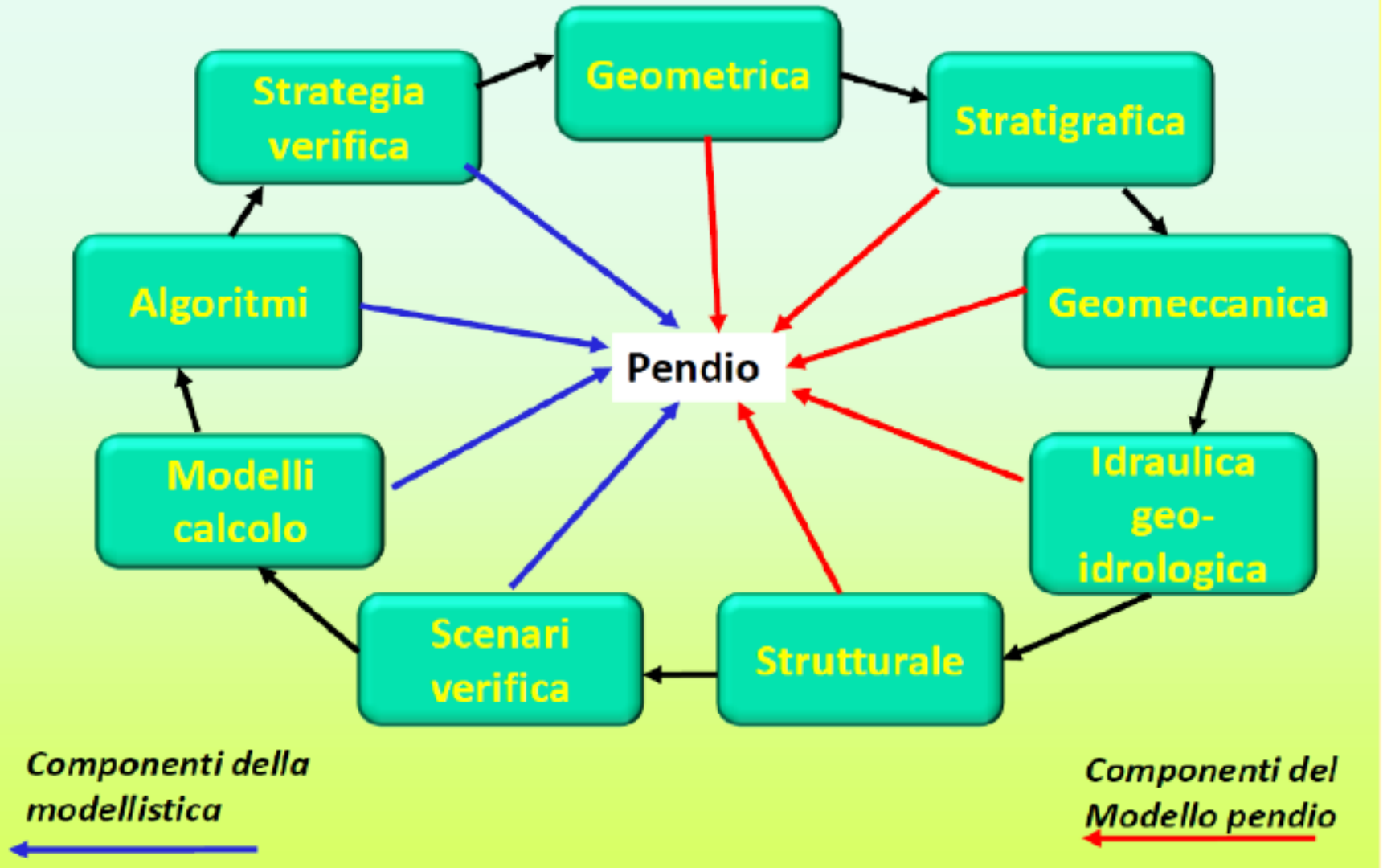
# Applicazione di SSAP2010 in ammassi rocciosi fratturati e rocce tenere e uso del criterio di rottura GSI di Hoek & Brown (2002,2006) +JRC Barton Bandis (1990), barton (2013)



Il codice SSAP è stato sviluppato mirando ai seguenti obiettivi:

1. Possibilità di rappresentare adeguatamente tutte le discontinuità presenti nei pendii naturali o artificiali;
2. Evitare tutte le eccessive assunzioni semplificative sulla stratigrafia, sul profilo della falda, sulle superfici di scorrimento;
3. Seguire gli attuali standard di lavoro e le normative nelle verifiche di stabilità nei pendii in terreni sciolti e ammassi rocciosi fratturati;
4. Implementare nel software una serie di strumenti di calcolo tra i più avanzati e originali nell'ambito dei modelli di calcolo per le verifiche dell'equilibrio limite;
5. Conseguire tempi di calcolo realistici anche per elaboratori di medie capacità;
6. Facilità di uso e interfaccia amichevole, con console a pulsanti, uso del mouse e di sistemi touch-screen, un sistema di aiuto contestuale.

## Complessità verifica stabilità: componenti e interazioni



Lo scopo è quello di **definire un modello geometrico e meccanico del pendio semplice e nello stesso tempo il più realistico possibile**, al fine di poter effettuare, con tempi di calcolo accettabili, verifiche di stabilità attendibili.

<http://www.ssap.eu>

SSAP2010 è il risultato di lungo lavoro di sviluppo iniziato ben **26 anni fa**.  
**E' un software freeware**

E' stata eseguita una completa ricodifica dei metodi di calcolo che hanno permesso di aggiornare le procedure di verifica a standard più elevati in termini di rigore, affidabilità e interattività con l'utente.

Il codice è caratterizzato dalla presenza di **7 metodi di calcolo** rigorosi che operano nell'ambito della metodologia della verifica della stabilità dei pendii **mediante il metodo dell'equilibrio limite**.

Questi 7 metodi di calcolo permettono un notevole salto qualitativo verso uno standard solitamente offerto da pacchetti software estremamente più costosi presenti sul mercato internazionale e nazionale, mantenendo tuttavia nel programma caratteristiche originali come i tre motori di ricerca diversi per la ricerca delle superfici con minor FS, l'originale "SNIFF RANDOM SEARCH" e l'algoritmo di ricerca con «intervallo dinamico».

**Il motore di ricerca "sniff random search", è un algoritmo che permette di superare le incertezze che caratterizzano i metodi classici di ricerca in situazioni con pendii molto complessi stratigraficamente o di ammassi rocciosi o di strati in condizioni di liquefazione.**

1. Rilievi topografici: sezioni dettagliate;
2. Indagini geologiche – geo idrologiche, geotecniche, geofisiche
3. Modelli geomeccanici: parametrizzazione, criterio di rottura
4. Modello del pendio: definizione modello di pendio che ingloba i punti 1,2 3
5. Modelli di calcolo: modelli e procedure di calcolo esistenti
6. Software di calcolo (es. SSAP): una galassia di software da scegliere e usare con molta attenzione...
7. E per finire (o per cominciare) **le risorse più importanti: le conoscenze, l'esperienza del geologo e dell'ingegnere e l'uso prima di tutto del nostro cervello!**



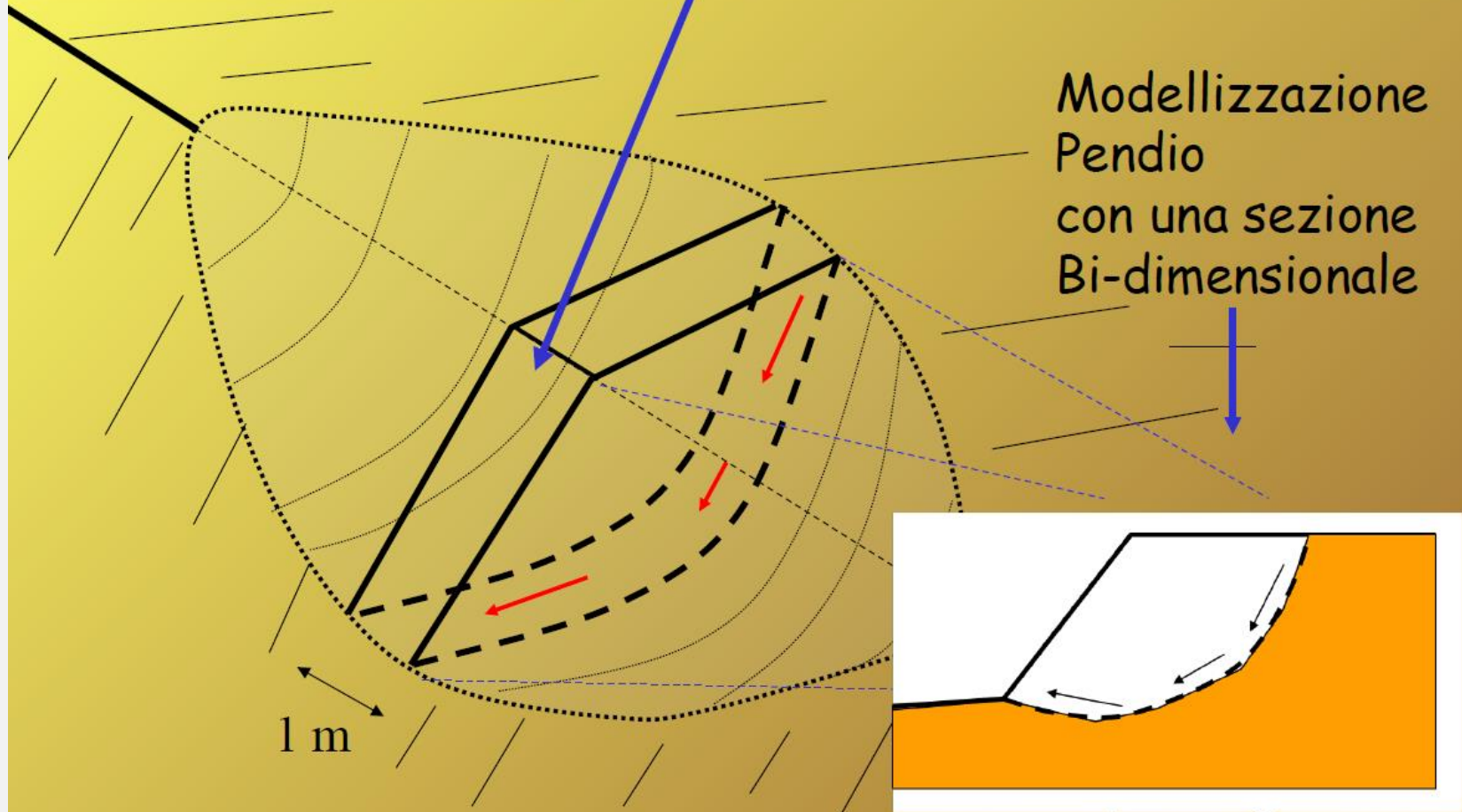
# COMPLESSITA' GEOMETRICA

Verifica di stabilità 3D→2D  
LEM (limit equilibrium method)

Complessità geometrica

Verifica su striscia di  
larghezza unitaria (1 m)  
Rappresentativa di una massa  
potenzialmente instabile

Modellizzazione  
Pendio  
con una sezione  
Bi-dimensionale

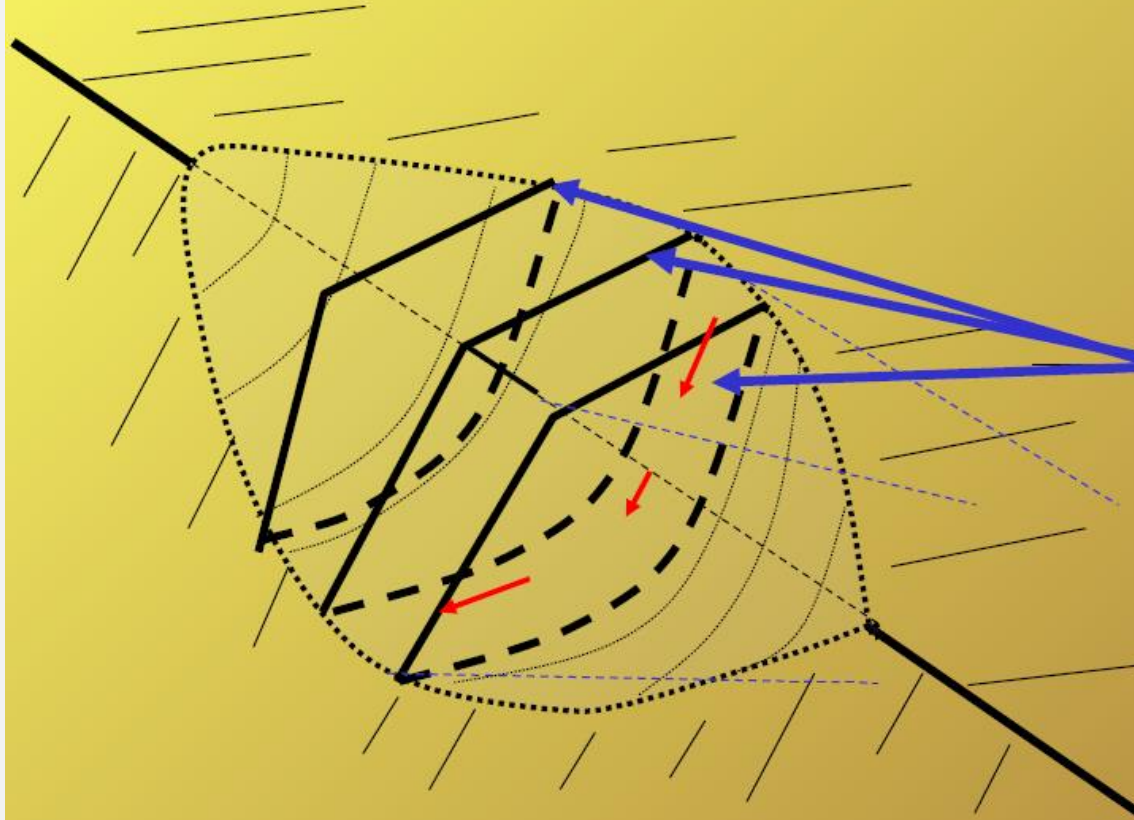


<http://www.ssap.eu>



## Complessità geometrica

Verifica di stabilità 3D→2D



Verifica di diverse sezioni  
2D

E calcolo di ciascun  $F_s$ .  
 $F_{s3D}$  è ottenuto come  
media ponderata rispetto  
all'area delle differenti  
sezioni

(Lambe and Whitman, 1969;  
Chowdhury 2010)

$$F = \frac{F_1 A_1 + F_2 A_2 + F_3 A_3 + \dots}{A_1 + A_2 + A_3 + \dots}$$

È il metodo più semplice  
e logico e che alla fine  
ha meno incertezze

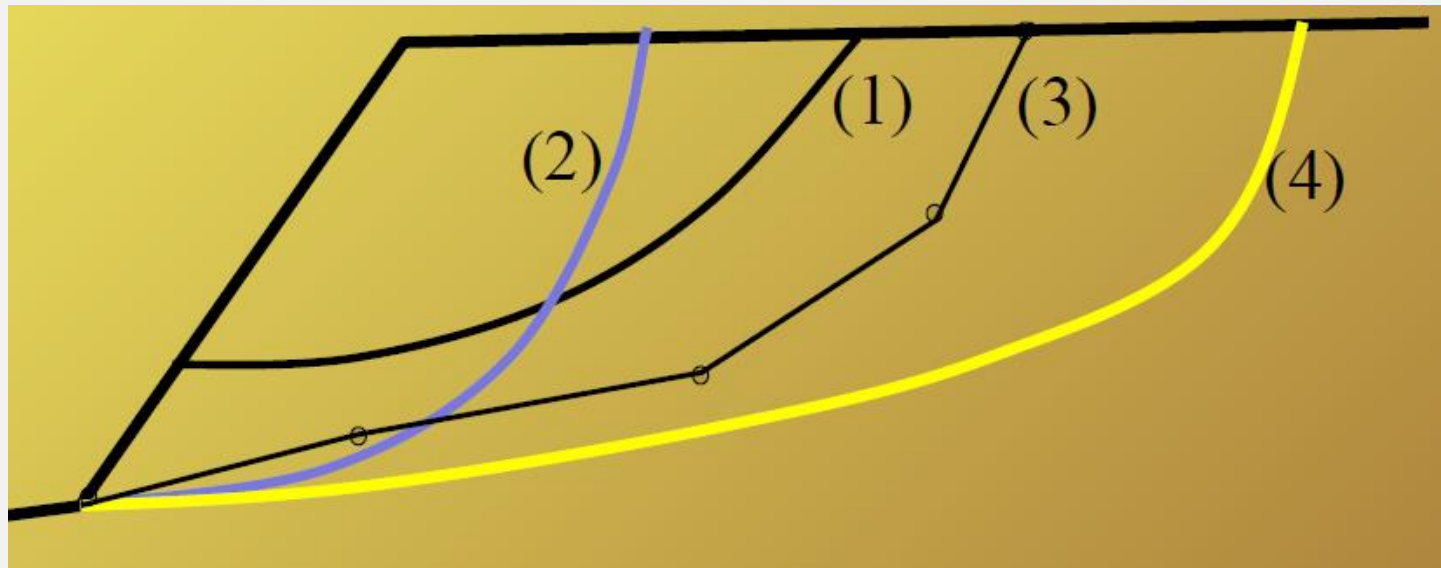
**Esistono comunque molti metodi completamente  
3D...che lavorano su superfici 3D**

Chiara Calligaris, Ph.D. – D.M.G. Università degli Studi di Trieste

<http://www.ssap.eu>



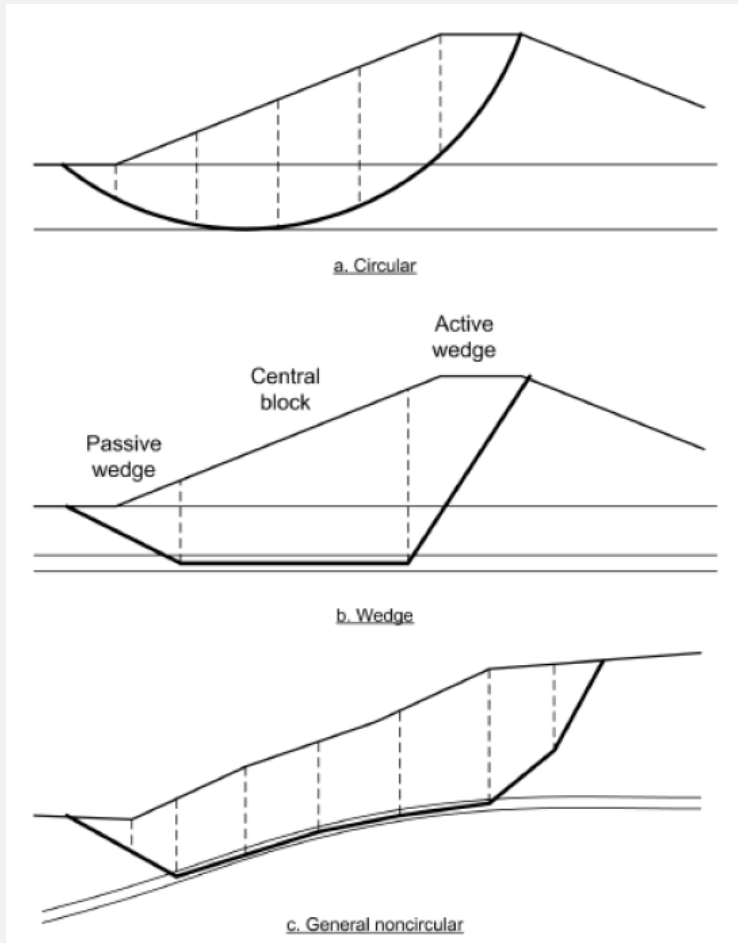
SCIVOLAMENTI: a) traslazione, b) rotazione; c) composti



Tipi di superfici generabili nel piano della sezione del pendio:

- (1) **Circolari** : definite da eq. Circonfrenza (arco di cerchio: centro e raggio)
- (2) **Spirali logaritmiche**: eq. Spirale logaritmica
- (3) **Generiche**: serie di punti (nodi) collegati da tratti rettilinei (SSAP)
- (4) **Generiche smussate**: superficie smussata interpolante serie di punti (SSAP).

# COMPLESSITA' GEOMETRICA

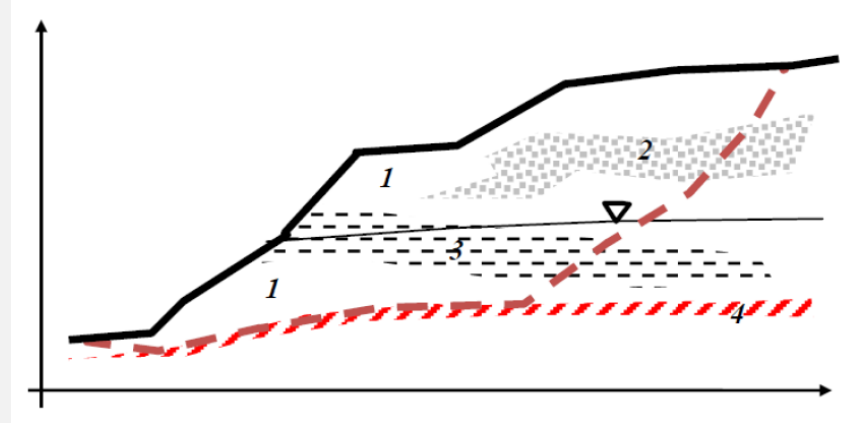
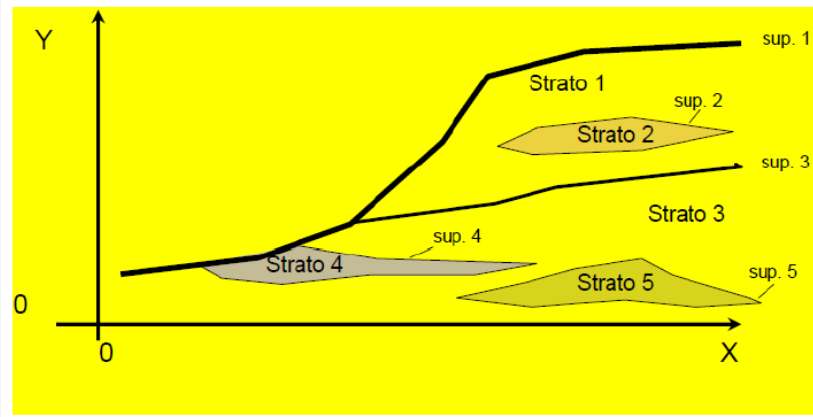


Alcuni tipi di superfici (es. circolari) non sono in grado di rappresentare le discontinuità presenti che possono avere una determinate influenza sull'instabilità.

Vari autori (ABRAMSON L.W. et al. (2002); DUNCAN J.M. (1996; SARMA S.K. (1979).; CHENG Y.M. (2003); JANBU N. (1973) ) indicano con assoluta chiarezza che il metodo dell'equilibrio limite deve essere applicato in una modalità differenziata in funzione del grado di omogeneità del pendio e della presenza di discontinuità stratigrafiche o strutturali.

Nel caso di presenza di disomogeneità stratigrafica, si devono assumere preferenzialmente superfici di forma composita in modo da poter verificare anche possibili contatti e zone che non possono essere controllate con forme più semplici.

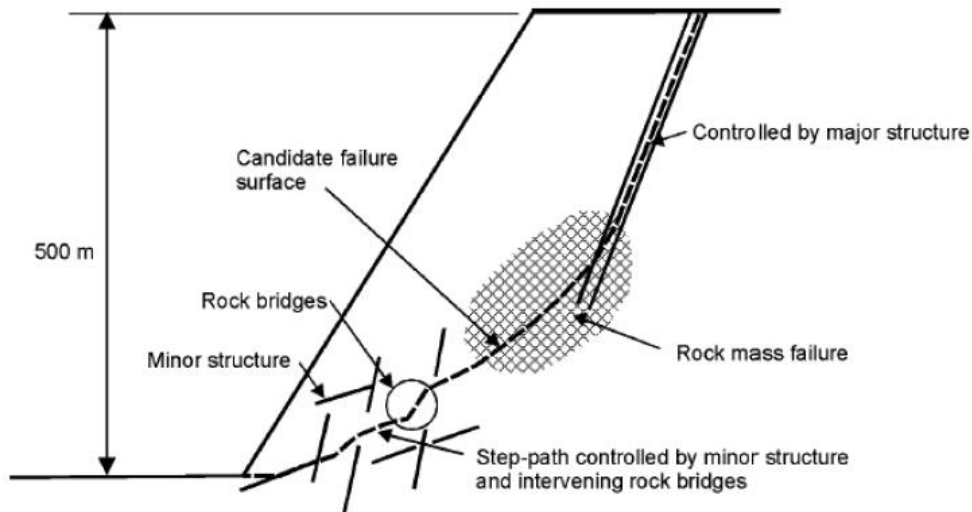
# COMPLESSITA' STRATIGRAFICA



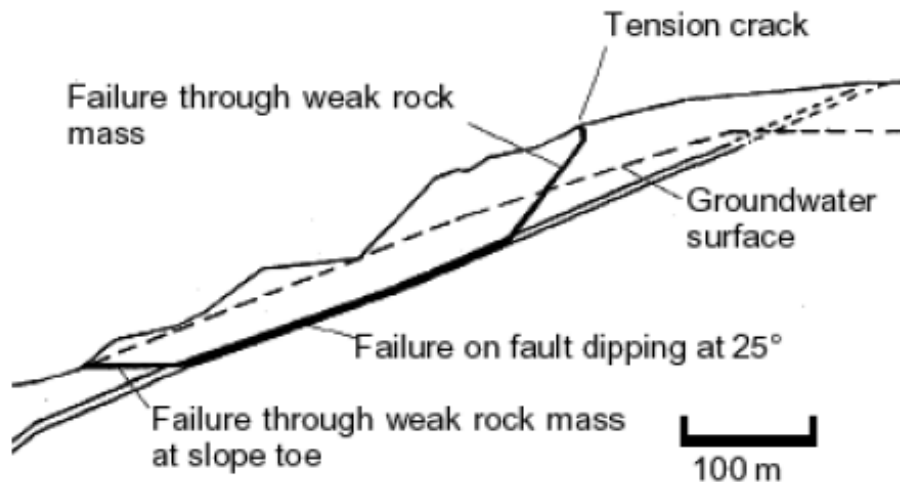
Tutti i pendii sono generalmente disomogenei dal punto di vista stratigrafico. Molto spesso anche quelli artificiali.

La modellistica deve necessariamente tenere conto di questa realtà...

# COMPLESSITA' STRATIGRAFICA



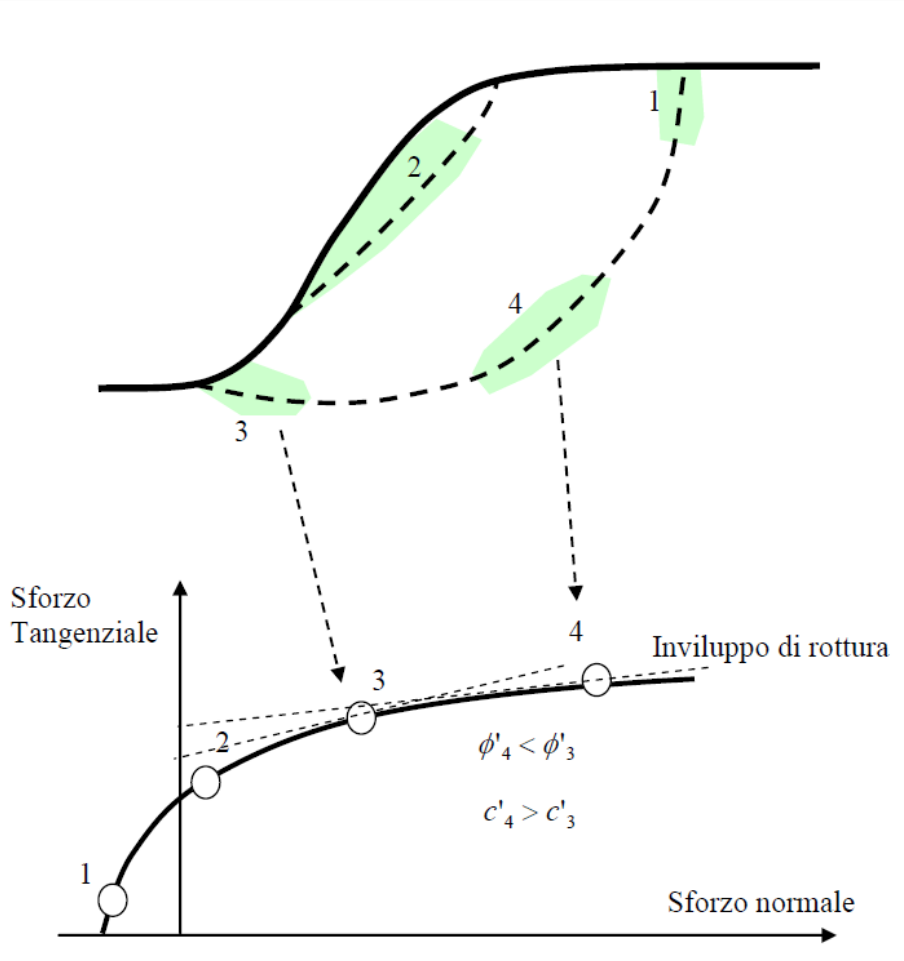
Piccole discontinuità strutturali o stratigrafiche fanno talvolta la differenza tra un pendio stabile e uno instabile.



La ricostruzione stratigrafica e strutturale e l'analisi devono prendere in considerazione queste caratteristiche, semplificando ove possibile, ma non troppo.

<http://www.ssap.eu>

# COMPLESSITA' GEOMECCANICA



Criteri di rottura utilizzati:

Es: Mohr-Coulomb

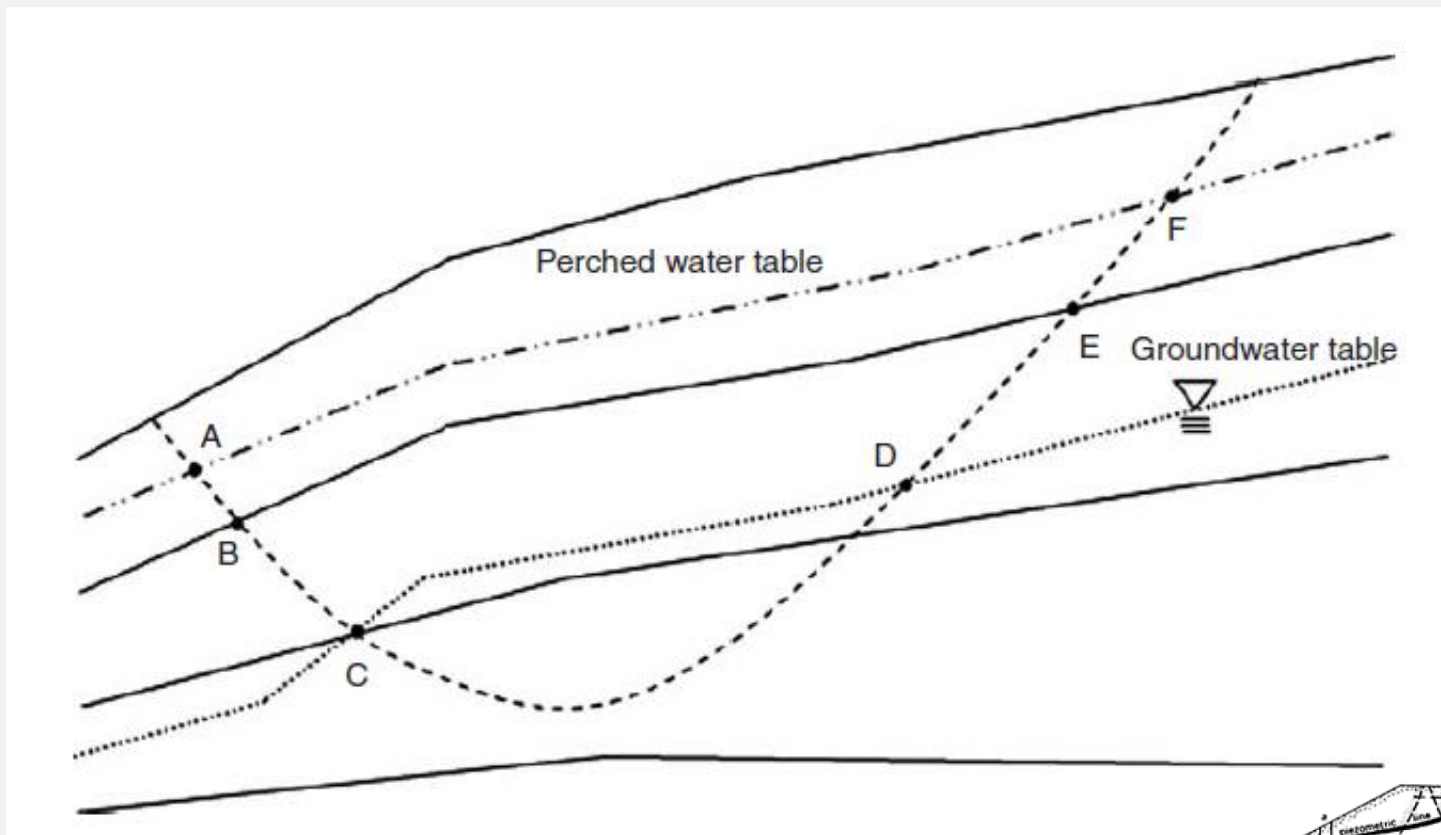
Hoek et al. (2002)

Barton ...

Condizioni a breve e lungo termine (dissipazione pressioni interstiziali: condizioni drenate e non drenate).

Non linearità dell'involuppo in condizioni di rottura.

# COMPLESSITA' GEO-IDROLOGICA



In un pendio possono sussistere porzioni sature e insature, acquiferi in pressione e sospesi. Pendii sommersi.. ecc.

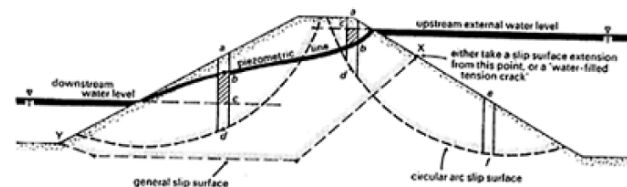
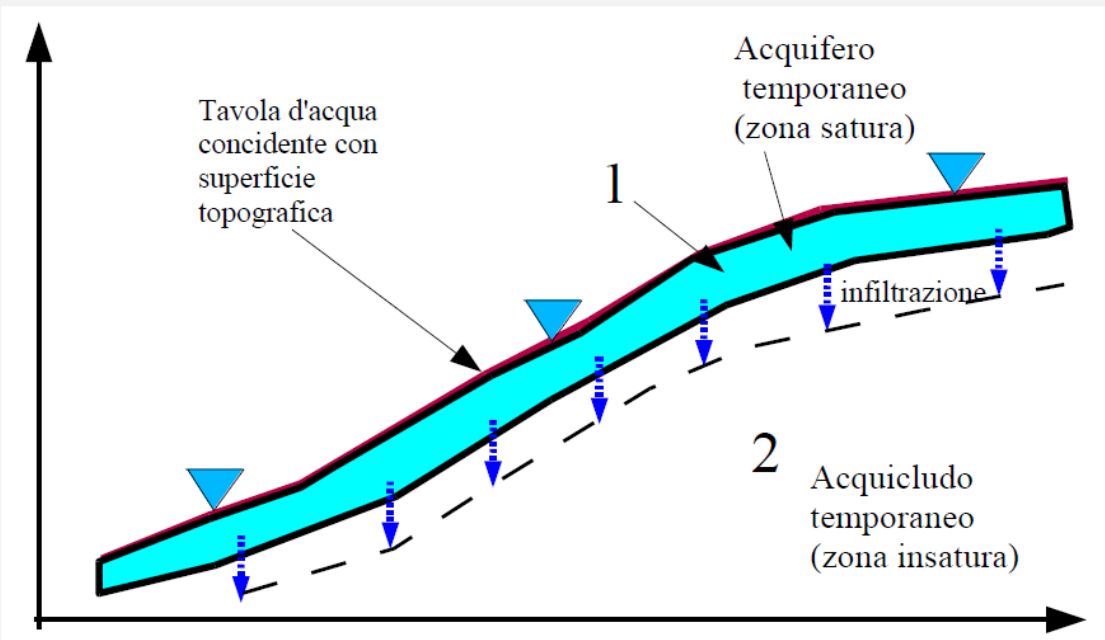
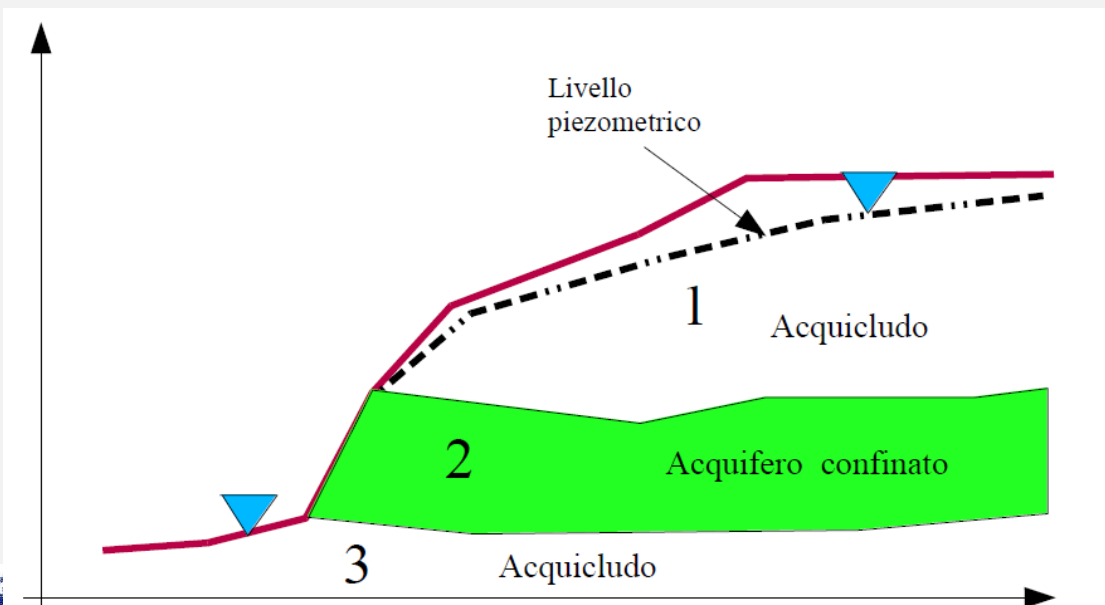


Figure 6.5 Submerged and partly submerged slopes. Bishop's technique for dealing with these is poorly understood, and often misapplied. See the text for details.

# COMPLESSITA' GEO-IDROLOGICA



Zone superficiali temporaneamente sature



Acquifero confinato