



Corso Luigi Einaudi, 55 - Torino

Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 1477A -

ANNO: 2015

A P P U N T I

STUDENTE: Fiorello

MATERIA: Stabilità dei Pendii + Eserc. Prof. Deangeli

Il presente lavoro nasce dall'impegno dell'autore ed è distribuito in accordo con il Centro Appunti.

Tutti i diritti sono riservati. È vietata qualsiasi riproduzione, copia totale o parziale, dei contenuti inseriti nel presente volume, ivi inclusa la memorizzazione, rielaborazione, diffusione o distribuzione dei contenuti stessi mediante qualunque supporto magnetico o cartaceo, piattaforma tecnologica o rete telematica, senza previa autorizzazione scritta dell'autore.

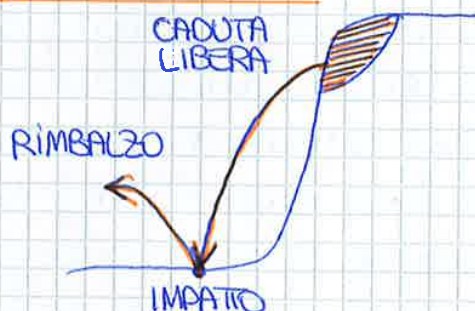
ATTENZIONE: QUESTI APPUNTI SONO FATTI DA STUDENTIE NON SONO STATI VISIONATI DAL DOCENTE.
IL NOME DEL PROFESSORE, SERVE SOLO PER IDENTIFICARE IL CORSO.

→ CROLLO

Il crollo si può verificare in roccia, terra o detrito però è più frequente nelle rocce. consiste nel distacco di un volume di materiale da un parete in seguito ad un piccolo spostamento di taglio nel pendio o di ribaltamento di un volume di roccia. Si parla di piccolo spostamento di taglio perché se fosse grande darei anzitutto lo scioglimento.

Il crollo avviene su pareti sub-verticali. Però anzitutto la discontinuità e capire se si può generare un distacco.

Quando la roccia perde contatto con il pendio il crollo è caratterizzato dalla caduta libera, dall'impatto e dallo scioglimento o ribaltamento.



I crolli in roccia si dividono in:

- GRANDI FRANE DA CROLLO, in cui sono coinvolti grandi volumi con il distacco non di una singola

roccia ma di un ammasso roccioso.

L'ammasso roccioso durante l'impatto si divide in blocchi che possono interagire tra loro e generare il fenomeno della colata che sembra un fluido viscoso.

- CADUTA MASSI: riguarda singoli blocchi di roccia fino a 10 m^3 divisi da discontinuità



Dopo la fase di rimbalzo ha lo scioglimento o rotolamento fino all'arresto.

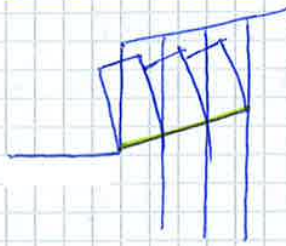
si generano fratture durante il raggiungimento della resistenza a trazione delle rocce.

Uno gneiss mediamente compatto ha una resistenza a compressione monoassiale di circa 100 MPa.

$$\sigma_c = \sigma_0 = 100 \text{ MPa}$$

$$\sigma_t = \sigma_0 = \frac{1}{10} \cdot \sigma_0 = 10 \text{ MPa}$$

L'inflessione delle lastre genera una superficie di rottura che NON era preesistente.



Le lastre si scambiano delle tensioni di taglio.

I due tipi di ribaltamento si possono combinare se ho inflessione, generazione di una superficie di rottura e poi ribaltamento di blocchi.

→ SCIVOLAMENTO

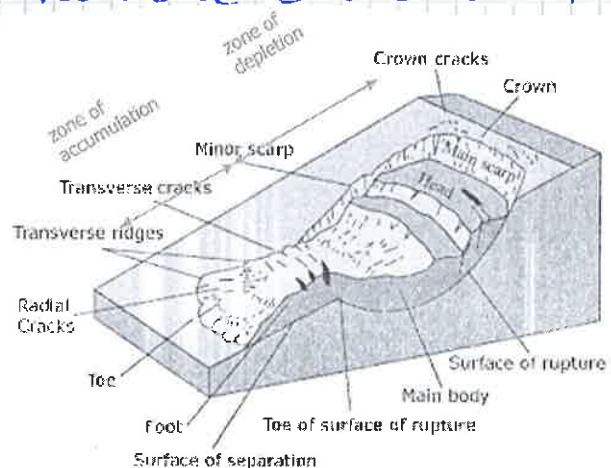
Si hanno due tipi di scioglimento:

- ROTAZIONALE

- TRASLAZIONALE

si differenziano per le tecniche di analisi (equazioni) che uso

Per gli scioglimenti esistono delle descrizioni del corpo di frana:



Corona (crown): parte sommitale della nicchia di distacco

Scarpata principale (main scarp): superficie ripida che si crea nella parte alta della zona indisturbata in seguito al movimento di materiale

Cima (top): punto di contatto tra la frana e la scarpata principale

Testa (head): parte più alta del materiale in frana

Corpo principale (main body): parte di materiale in frana che si trova tra la scarpata principale e il piede della frana

Piede (toe): zona più distante dalla scarpata principale e di forma generalmente curva

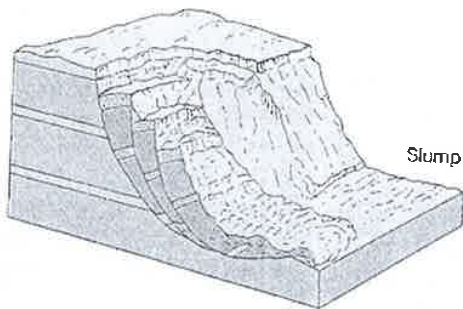
Superficie di rottura (surface of rupture): superficie che isola inferiormente il materiale che ha subito movimento; dal punto di vista meccanico è chiamata superficie di scorrimento o di taglio

Zona di deplezione (zone of depletion): area della frana all'interno della quale il materiale che ha subito movimento giace al di sotto della superficie originaria del pendio

Zona di accumulo (zone of accumulation): area della frana all'interno della quale il materiale che ha subito movimento giace al di sopra della superficie originaria del pendio

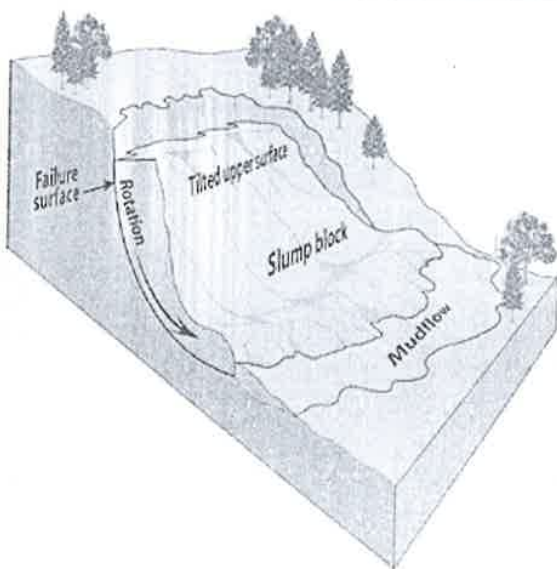
diversi tipi di materiale coinvolto soprattutto se considero materiali granulari con i quali ho la possibilità che lo scioglimento si trasformi in colata con velocità molto elevate. Quando ho scioglimenti composti si creano dei processi deformativi interni importanti e non posso trascurarli.

↳ SCIOLGIMENTI ROTAZIONALI IN ROCCIA



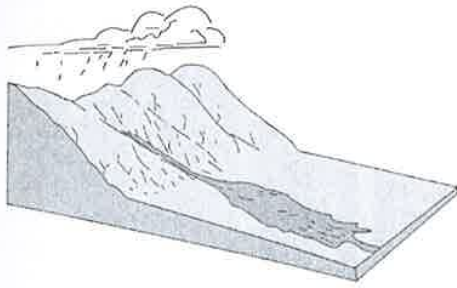
sono abbastanza frequenti e si ripetono. All'interfaccia si può generare un altro tension crack e quindi una nuova superficie di rottura. Questo fenomeno si chiama RETROAGGRESSIVO MULTIPLO.

↳ SCIOLGIMENTO ROTAZIONALE NEI TERRENI



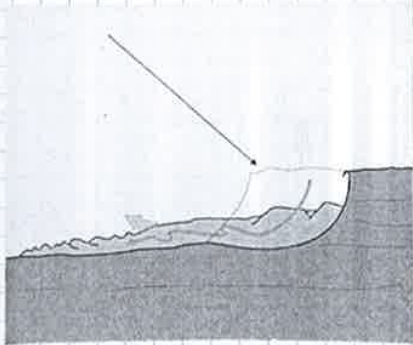
Anche questo fenomeno può essere retroattivo.

• DEBRIS FLOW



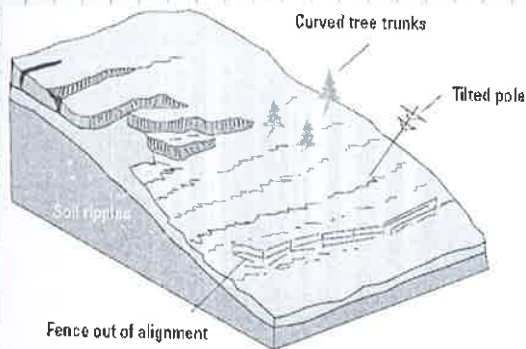
Sono flussi di materiale detritico (grossolano) saturo che ha l'apparenza di un fluido viscoso. Sono fenomeni rapidi o molto rapidi innescati da fenomeni meteorologici.

• EARTH FLOW



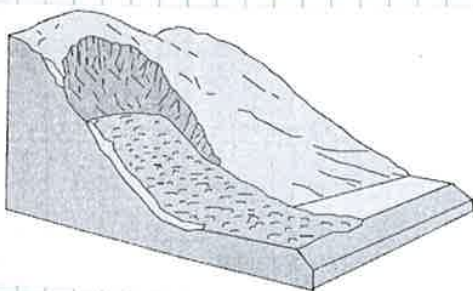
Interessano materiali fini (sabbie fine o argilla), sono fenomeni rapidi.

• SLOW EARTH FLOW



Fenomeni di colata lenta che avviene nelle argille.

• DEBRIS AVALANCHE



Fenomeno di colata che coinvolge un materiale detritico asciutto.

• LAHAR



Sono debris flow che avvengono nei materiali vulcanici.

Debris flow ed earth flow possono essere di 2 tipi:

- SU PENDIO: sono l'evoluzione degli scioglimenti trasloziandi.

- INCANALATI: si sviluppano lungo un impluvio naturale che generalmente non è un corso d'acqua perenne.

Dove si deposita la colata si chiama cono di DEPOSIZIONE

Le colate si manifestano in tutti i tipi di terreni dai frammenti o blocchi di roccia fino alle argille e possono essere sature o asciutte.

Le colate possono essere movimenti sia estremamente lenti (mm/anno) sia rapidi (m/oro) fino ad estremamente rapidi (m/s).

Le colate rapide sono tra i fenomeni naturali più distruttivi, proprio a causa delle velocità raggiunte dalla massa in movimento, e possono causare ingenti danni oltre che perdita di vite umane.

→ ESPANSIONI

Riguardano grandi porzioni di territorio ed avvengono su pendii poco inclinati o su piani compagne orizzontali. Il cinematismo è un movimento laterale molto lento. Alle espansioni sono spesso associati anche altri tipi di cinematismo.

L'espansione in roccia e terreno può essere dovuta al fatto che ho una formazione con scadenti



caratteristiche meccaniche con sopra una formazione con buone caratteristiche. se il terreno sotto si muove e si sposta lateralmente il materiale sopra tende a fratturarsi per bilanciare quello che succede sotto fino ad arrivare alla divisione in blocchi che si muovono molto lentamente.

FRANE

La superficie della terra fa parte di un sistema dinamico, che evolve sia progressivamente che episodicamente attraverso le azioni di processi geologici, geomorfologici e meteorologici.

Le frane sono tra i principali modellatori della superficie terrestre alla scala umana.

Interessano materiali diversi come le rocce o terreni poco consistenti (come le argille non consolidate). Posso avere lo stesso cinematisimo in ambienti geografici diversi con caratteristiche relative alla pendenza molto diverse.

Hanno corpi di frana i cui volumi variano da pochi m^3 a centinaia di milioni di m^3 . Si muovono con velocità comprese tra alcuni $mm/anno$ a decine di m/s .

↳ DEFINIZIONI

↳ FRANA:

- spostamento rapido di una massa di roccia, terreno residuo o sedimento formante un pendio, il cui baricentro avanza verso il basso o verso l'esterno (Terzaghi, 1950)
- Movimento verso il basso di una massa di roccia, terreno o detrito lungo un pendio. (Cudeu, 1991)

Altri autori osservano che esiste un passaggio graduale tra detti movimenti (frane) e i fenomeni di deformazione lenta e poco percettibile dei pendii. Le frane e tali fenomeni nell'insieme possono essere denominati "fenomeni franosi".

↳ FENOMENO FRANOSO

Movimento controllato dalla gravità, superficiale o profondo, rapido o lento di materiali costanti su versante o su rilievo (Varnes 1978)

↳ INGEGNERIA DEI PENDII

I pendii sono sistemi meccanici di tipo geotecnico. I movimenti di pendio sono risposte meccaniche dei terreni e delle rocce ai cambiamenti nel tempo delle condizioni al contorno di carattere statico, idraulico, ed ambientale, capaci di influire sui campi tensionali e deformativi, ovvero sulle proprietà dei terreni e delle rocce.

↳ PENDII NATURALI, PENDII ARTIFICIALI, FRONTI DI SCAVO

Ho problemi applicativi diversi a causa di:

- natura ed origine dei terreni che hanno geometrie e caratteristiche che sono indipendenti dal progettista nel caso dei pendii naturali o geometrie e caratteristiche note perché scelte dal progettista stesso nel caso di pendii artificiali.
- stato tensionale e deformativo
- condizioni idrauliche

	Obiettivo	Geometria	Stratigrafia Materiali	Proprietà geotecniche	Condizioni idrauliche
Pendio naturale	Valutazione del grado di stabilità e dei movimenti (frana attiva, quiescente o probabile) e interazione con i manufatti esistenti o da costruire	Note (ma di difficile determinazione)			
Pendio artificiale	Dimensionamento, progetto, verifica del manufatto in terra (diga, argine, rilevato)	Da assegnare			
Fronti di scavo	Scelta della geometria per assicurare stabilità adeguata	Da assegnare	Note		

ANALISI DEL RISCHIO

Il rischio dipende essenzialmente dalla presenza o meno di persone.

$$R = P \cdot N \cdot V$$

P → PERICOLosità: probabilità che un dato evento (frana) si verifichi in una certa area in un determinato tempo (hazard).

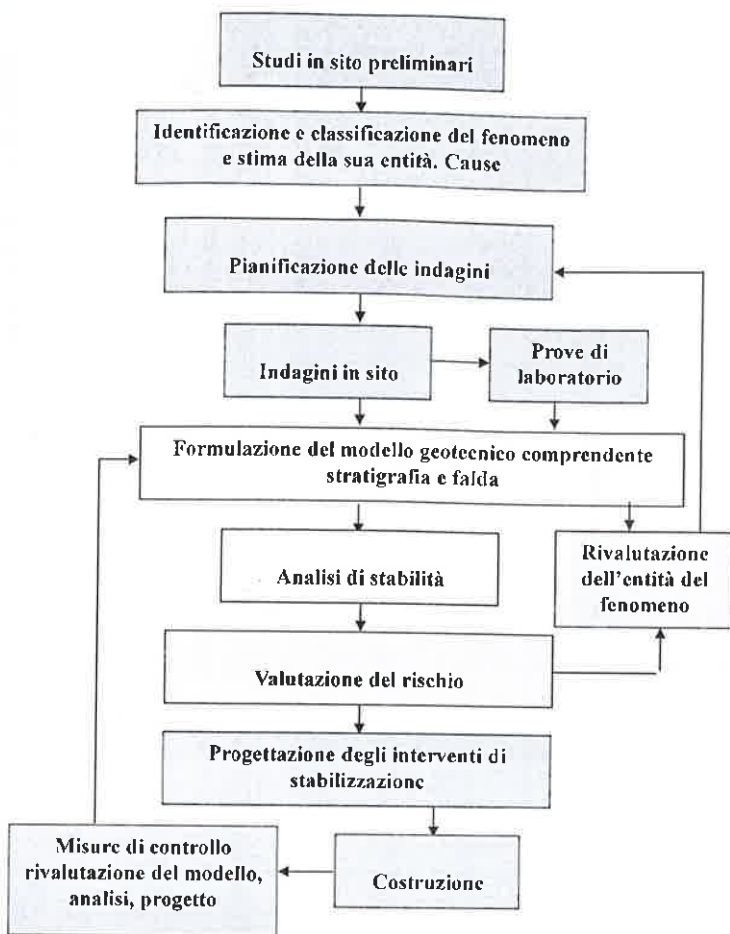
La pericolosità ha 2 connotazioni: spaziale e temporale. Quindi per fare un'analisi di pericolosità completa darei dove e quando si verifica il fenomeno franoso però non so mai dire con esattezza quando avverrà perché le variabili in gioco sono molte. Attraverso la costruzione di opere di consolidamento o con interventi attivi di stabilizzazione del pendio (chiodi, tiranti, iniezioni...) posso ridurre la probabilità di occorrenza dell'evento in un dato tempo e luogo.

N → NUMERO di ELEMENTI a RISCHIO. Per mitigare il rischio devo limitare o annullare il numero ed il valore degli elementi a rischio. In Alaska per esempio si è scelto di spostare la cittadina a seguito del terremoto.

V → VULNERABILITÀ (vulnerability) ci dice quale è il grado di perdite attese in termini di persone e beni (anche o lungo termine). V è compreso tra 0 ed 1. Per ridurre le perdite posso costruire opere di difesa, in questo caso però suppongo che l'evento avvenga, limito solo le perdite con barriere paramassi o filtranti.

Spesso non si può lavorare sui 3 parametri quindi devo ACCETTARE e convivere con la frana.

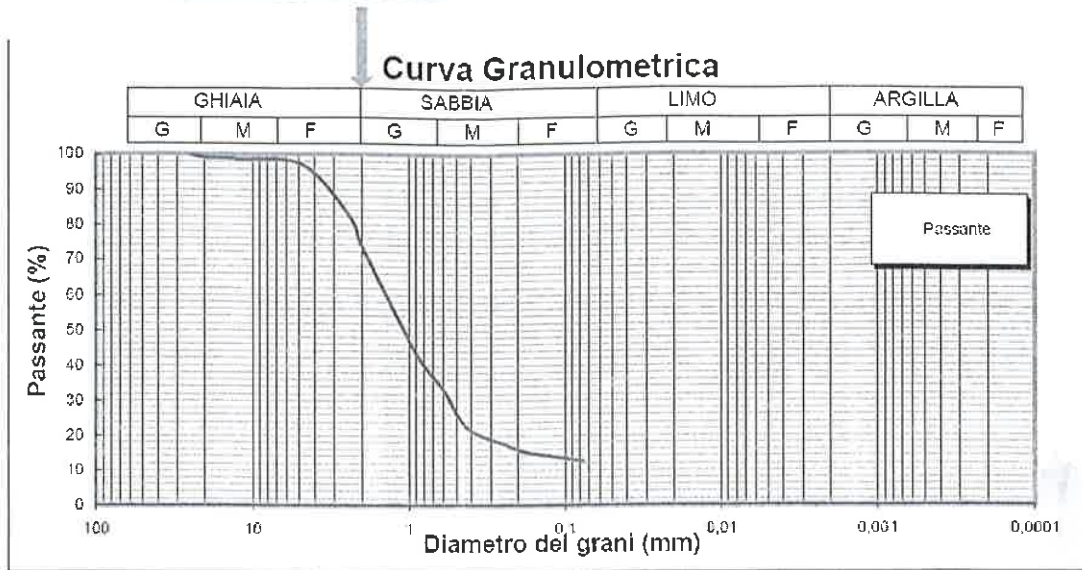
INQUADRAMENTO E CLASSIFICAZIONE DEI FENOMENI FRANOSI



Nello studio con finalità sia scientifiche che applicative di fenomeni vari e complessi quali i movimenti franosi e di estrema importanza che questi siano identificati e classificati facendo riferimento ai loro caratteri essenziali direttamente osservabili e misurabili. Le classificazioni consentono di inquadrare i movimenti franosi dal punto di vista fenomenologico.

L'identificazione è fondamentale perché spesso non ci rendiamo conto che abbiamo un fenomeno franoso in atto e che ci sono movimenti nel pendio. Devo capire quali materiali sono coinvolti e le cause che possono causare il fenomeno. Fatto questo pianifico indagini in sito e prove di laboratorio per studiare il comportamento meccanico del materiale. Ho così un'idea di ciò che è il problema dal punto di vista geometrico e meccanico e posso formulare il modello geotecnico del sottosuolo. Effettuo poi l'analisi di stabilità, valuto il rischio e analizzando gli scenari più succedere di dover verificare il fenomeno e riformulare il modello geotecnico. Quindi progetto interventi di stabilizzazione procedo con la costruzione e spesso devo riformulare il modello geotecnico.

Limite tra terra e detrito secondo Varnes



**Terreni a grana grossa
Granulari**

**Terreni a grana fine
Coesivi**

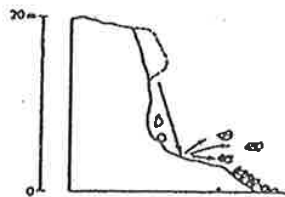
Quindi questa classificazione non riflette nessun comportamento meccanico ma mi consente di inquadrare dal punto di vista generale il problema.

↳ **TIPI DI MOVIMENTO**

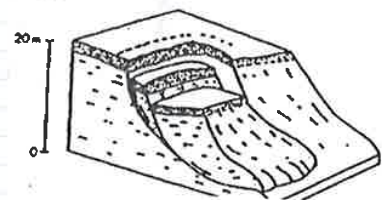
La cinematica di una frana costituisce uno dei principali criteri per classificare i movimenti del pendio.

Si distinguono 5 cinematiche diverse:

- **CROLLI**
- **RIBALTAMENTI**
- **SCIVOLAMENTI**
- **ESPANSIONI**
- **COLATE**



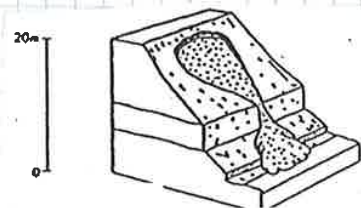
CROLLO



SCIVOLAMENTO



RIBALTAMENTO



COLATA



ESPANSIONE

CAUSE DEL MOVIMENTO

Varves divide le cause del movimento in:

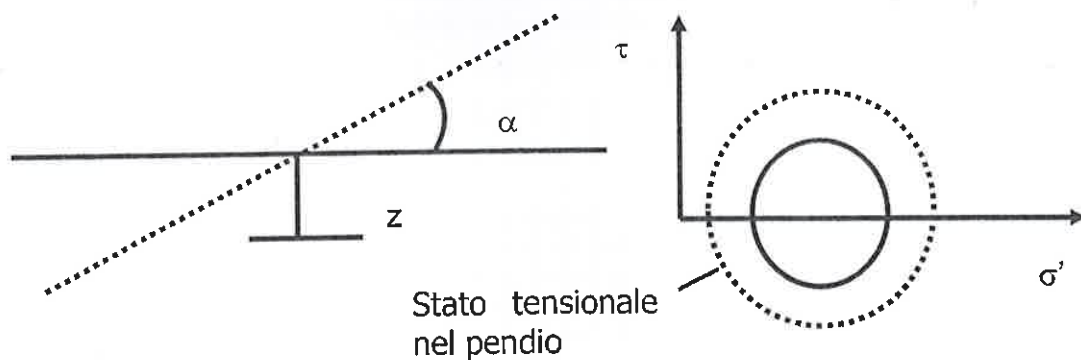
↳ PREDISPONENTI: comprendono tutti quei processi che hanno portato alla formazione del pendio e ne hanno determinato una certa geometria e materiali con determinate proprietà fisico-meccaniche

↳ SCATENANTI: rappresentano un'azione che mette in movimento la massa del terreno.

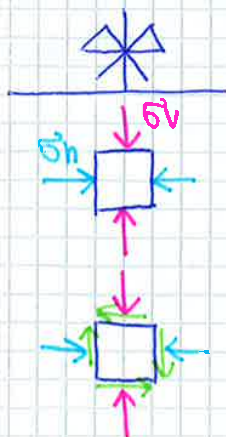
Quest'ultima azione non può essere considerata la sola causa, anche se necessaria, nella catena di eventi.

Molte cause possono mettere in moto il pendio ma con il termine INNESCO indico solo l'ultimo movimento che ha subito il pendio.

→ STATO TENSIONALE: PIANO ORIZZONTALE ED INCLINATO



Se ho un piano orizzontale infinitamente esteso, qualunque piano verticale è un piano di



simmetria dal cui ho tensioni di taglio e quindi dal le tensioni orizzontali e verticali sono tensioni principali. se invece il piano orizzontale non è infinitamente esteso ho il caso generale con anche le tensioni tangenziali.

INNESCO DEI FENOMENI FRANOSI

Le frane possono avere molte cause (geologiche, morfologiche, fisiche ed umane) ma un solo INNESCO. Per definizione l'innescò è un STIMOLO ESTERNO (pioggia intensa, vibrazione dovuta ai terremoti, eruzioni vulcaniche, mareggiate, erosione dei corri d'acqua) che causa una risposta immediata sotto forma di frana tramite il rapido incremento degli sforzi agenti o riduzione della resistenza del materiale che costituisce il pendio.

In alcuni casi è difficile individuare l'innescò di una frana, per via delle varietà o combinazione di cause (per esempio degradazione chimica o fisica dei materiali), che gradualmente portano il pendio a rottura.

↳ TIPI DI INNESCO NATURALI

- PIOGGIA INTENSA
- RAPIDO SCIQUINMENTO DELLE NEVI
- RAPIDO SVASSO
- ERUZIONI VULCANICHE
- TERREMOTI

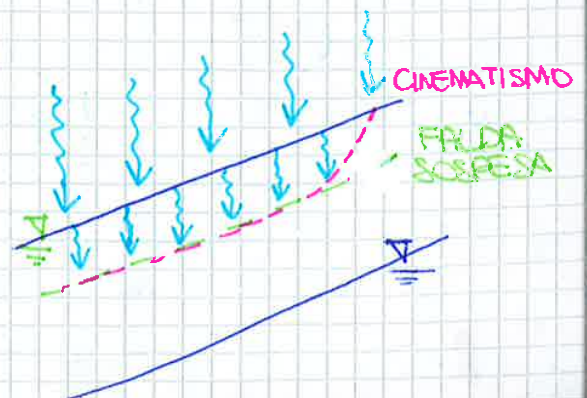
↳ PRECIPITAZIONI METEORICHE

Quando studio fenomeni di precipitazione devo fare il bilancio idrologico.

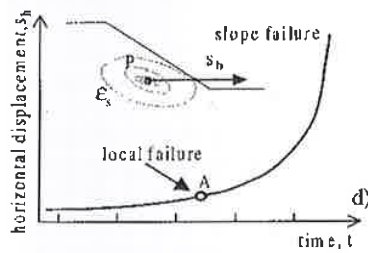
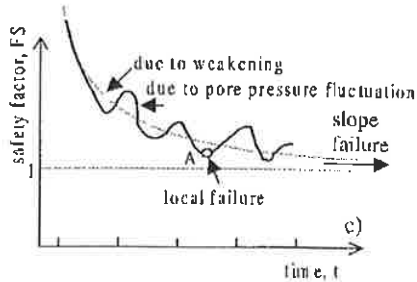
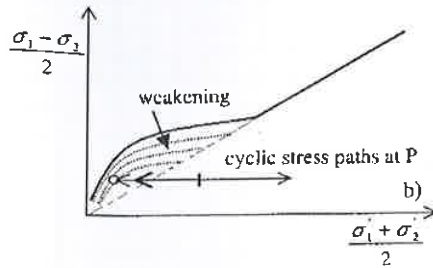
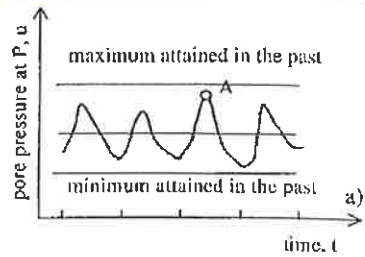
L'effetto della pioggia può essere di due tipi:

- CREAZIONE DI Falda sospesa
- OSCILLAZIONE DI Falda profonda

Nel primo caso è acqua si infiltra e con il procedere dell'infiltrazione ho la saturazione di una parte superficiale del terreno che viene chiamata falda sospesa.



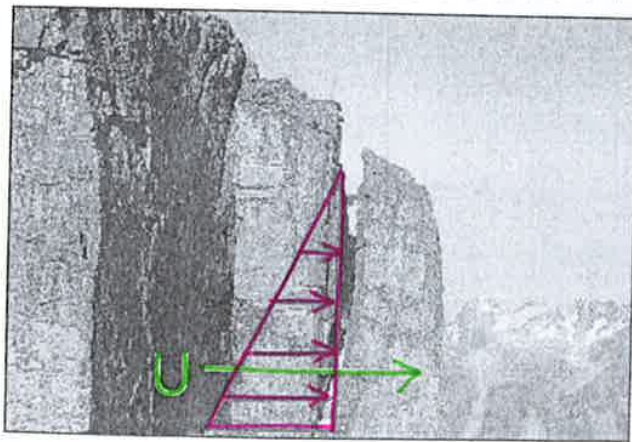
può variare le caratteristiche meccaniche del terreno.
Il grado di instabilità del pendio (FS) varia al variare di u. (grafico c).



Si possono verificare delle rotture locali del terreno quindi in certe zone non ho più la resistenza che mi aspettavo con conseguente ridistribuzione delle tensioni

e generazione di una superficie di scorrimento.

LE PRESSIONI DELL'ACQUA LUNGO UNA DISCONTINUITÀ IN ROCCIA



$$u = \gamma_w \cdot z$$

$$U = \frac{1}{2} \cdot \gamma_w \cdot z^2$$

↑ area del triangolo della distribuzione di u.

A seconda della porosità della roccia posso avere una fessura interna alla roccia (crevasses o clefts). Spesso però l'acqua satura le discontinuità naturali ed ha una risalita dell'acqua nella discontinuità che mi genera una risultante U che rende instabile la roccia.

2. Mappatura empirica di rti in frame, uso delle carte di pericolosità dei versanti basate su eventi franosì del passato riuscendo talvolta a fare una previsione. con il modello matematico ritrouo gli eventi che sono già avvenuti e dopo posso provare a prevederne di nuovi sulla base delle caratteristiche della zona che sto analizzando.
3. Modelli deterministici meccanico - idrologici. Metto a punto delle analisi di stabilità su una scala molto grande. lego così la risposta del bacino con la resistenza al taglio del materiale.

Vediamo ora singolarmente i 3 approcci:

↳ 1. ANALISI EMPIRICA delle caratteristiche degli eventi meteorici che innescano fenomeni franosì.

Questo tipo di analisi viene eseguito per le frame superficiali.

Andiamo a cercare una caratteristica dell'evento meteorico (intensità di pioggia, durata...) con l'evento franosì. la scelta della caratteristica da correlare con la frame dipende dal tipo di pendio con cui ho a che fare e dal tipo di materiale.

Generalmente la correlazione della singola precipitazione con gli eventi franosì non porta a buoni risultati.

Risultò quindi necessario individuare cosa è accaduto nei giorni antecedenti all'evento meteorico scatenante.

Per generalizzare la correlazione si normalizza con la PMA (pioggia media annua) caratteristica dello zona.

questi approcci si usano su scala regionale e servono per mettere a punto dei

Trovo così due soglie una per gli eventi estivi ed autunnali ed una per quelli invernali e primaverili.
 una precipitazione con caratteristiche che portano ad avere un punto al di sopra della soglia (considerando la stagione in cui questa si verifica), con molto probabile genererà un fenomeno franoso.

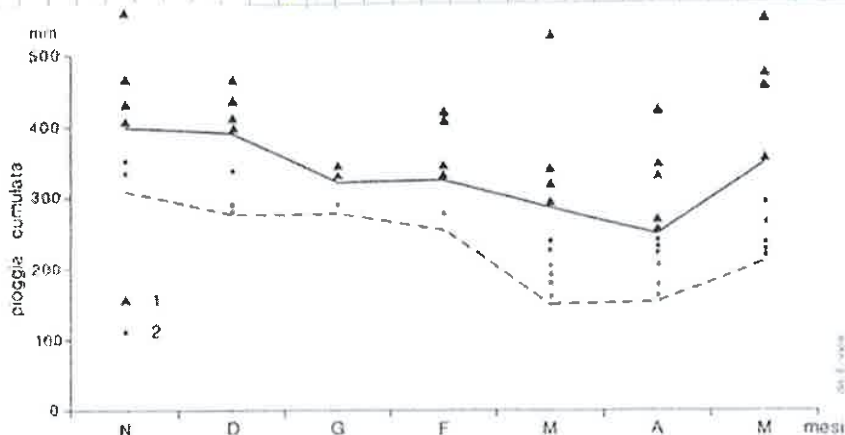
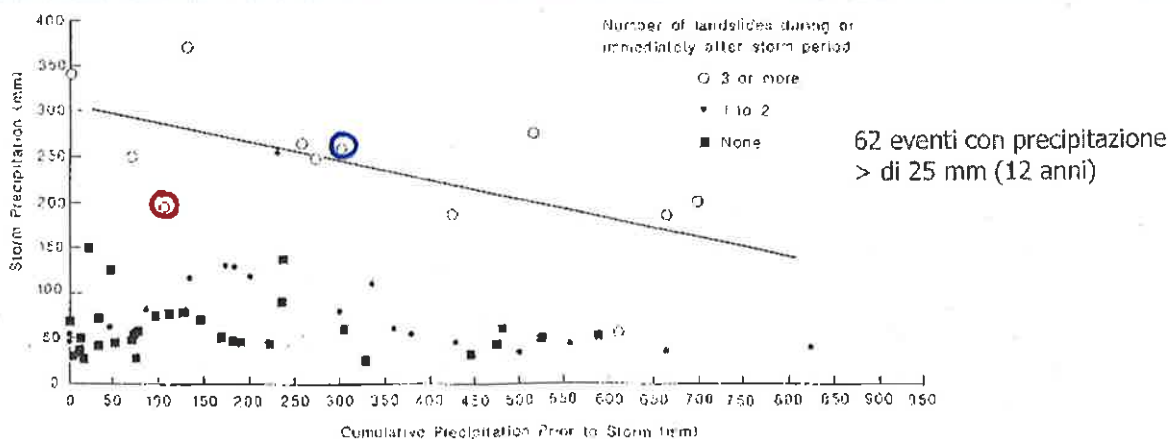


Fig. 7. Diagramma delle quantità minime di pioggia necessarie per attivare nei vari mesi frane di scivolamento planare in roccia nel Bacino Terziario Piemontese. La linea a tratti definisce il campo dei valori minimi di precipitazione totalizzata nei 60 giorni precedenti gli eventi che hanno determinato l'instabilità. La linea continua corrisponde ai valori "soglia" globali (piogge antecedenti + piogge dell'evento) oltre ai quali si sviluppano i franamenti (1: piogge cumulate che hanno prodotto scivolamenti; 2: piogge cumulate che non hanno prodotto scivolamenti).



Pioggia precedente (mm)	105.4	301.0
Durata evento (giorni)	8	17
Pioggia totale durante l'evento (mm)	195.6	256.3
Numero di frane	7	43
Intensità (mm/giorno)	25	15

Nel primo grafico in ascissa ho la durata mentre in ordinata ho l'intensità di pioggia. Si sono trovate due diverse correlazioni e 2 diverse soglie, una per le alte precipitazioni medie annue e l'altra per le precipitazioni medie annue più basse.

La correlazione di come si trova a metà tra le 2 soglie.

L'ultimo curva in basso tiene conto anche di fenomeni che hanno provocato un solo fenomeno di instabilità.

La soglia con alta PMA è più in alto rispetto a quella con bassa PMA e questo perché i pendii si sono già adattati agli eventi meteorici e quindi servono un evento meteorico molto più importante per far avvenire un fenomeno franoso in una zona con alta PMA.

Nella seconda figura è riportato lo strati-grafico del terreno considerando che in superficie ho una copertura detritica e sotto ho delle zone sedimentarie (arenarie).

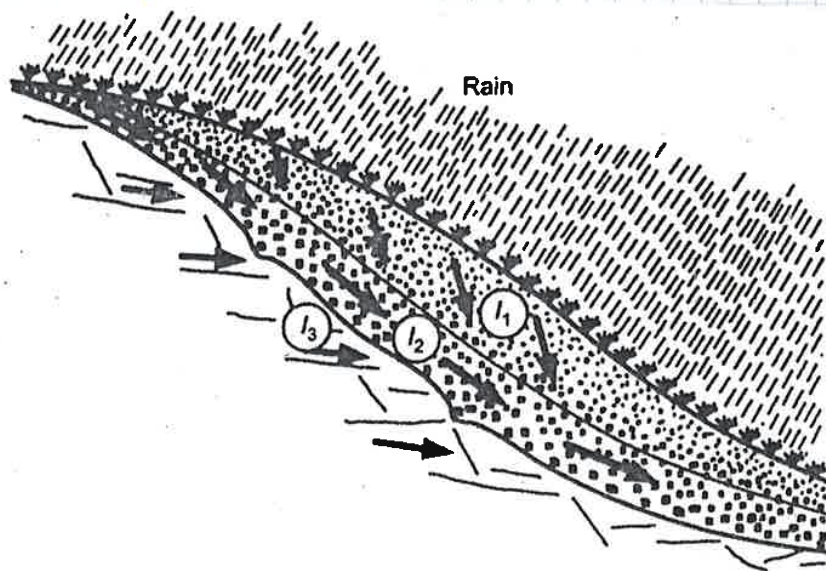
Si è pensato di audizzare la risposta del pendio alla precipitazione meteorica in determinati punti e quindi sono stati installati dei tensimetri che in continuo audizzano il valore della pressione interstiziale del terreno in diversi punti del pendio e a diverse profondità.

Le campagne di misura sono state eseguite su terreno secco (grafici a sinistra nella figura a pagina seguente) e su terreno saturo (grafici a destra).

Nel primo grafico a sx è riportata l'intensità di pioggia in funzione del tempo mentre nei grafici sottostanti viene riportata la pressione interstiziale.

del terreno all'evento, non ho una grande variazione di u . Il materiale è meno permeabile e lo scuo è di drenaggio.
 Nel punto 3 (a dx) ho una risposta idrologica in corrispondenza dei picchi dell'evento. Le massime variazioni di u ce le ho per profondità più elevate.
 Nel punto 4 ho un picco di u sia 75 che a 125 cm, ho una contemporanea risposta idrologica.

In diverse zone dello stesso pendio ho risposte idrologiche diverse. Le risposte dipendono dalle caratteristiche del materiale. In superficie ho uno strato di detriti, sotto ho un rocce molto fratturato e ancora più sotto un basamento



roccioso che ha delle fratture. Le frecce della figura indicano che nello strato superficiale la saturazione avviene per infiltrazione (nei primi 30 cm) (punto 3) e di sotto il contributo di infiltrazione è dato dalle caratteristiche stesse del materiale, la roccia molto fratturata infatti contribuisce all'infiltrazione in profondità. Ho anche un altro contributo di infiltrazione dato dalla percolazione dell'acqua nelle discontinuità.

MODELLO DI MONTGOMERY & DIETRICH

$$\frac{a}{b} \geq \left[\frac{c'}{\gamma_w \cdot z \cdot \cos^2 \theta \cdot \operatorname{tg} \phi'} + \frac{\gamma}{\gamma_w} \cdot \left(1 - \frac{\operatorname{tg} \theta}{\operatorname{tg} \phi'} \right) \right] \cdot \frac{T}{9} \cdot \operatorname{sen} \theta$$

↓
↓
↓

COMPONENTE TOPOGRAFICA
COMPONENTE FISICO-MECCANICA
COMPONENTE IDROLOGICA

La componente topografica riguarda la struttura del bacino, la seconda componente tiene conto delle caratteristiche fisico-meccaniche del materiale, e l'ultimo componente tiene conto della trasmissività del materiale e della precipitazione efficace.

a: area di drenaggio

b: larghezza sezione di deflusso

θ : inclinazione del versante

c' : coesione

γ : peso dell'unità di volume del terreno

γ_w : " " dell'acqua

ϕ' : angolo di resistenza al taglio

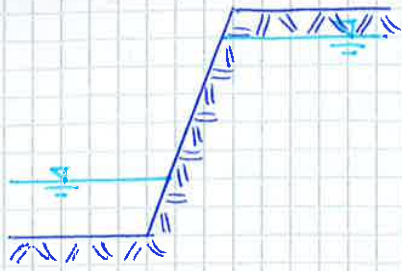
COMPONENTE IDROLOGICA: $\frac{T}{9} \cdot \operatorname{sen} \theta = \frac{k \cdot z \cdot \cos \theta}{9} \cdot \operatorname{sen} \theta$

k: permeabilità del terreno saturo

T: trasmissività

↑ precipitazione efficace in 24 ore

se la disuguaglianza è verificata ho instabilità

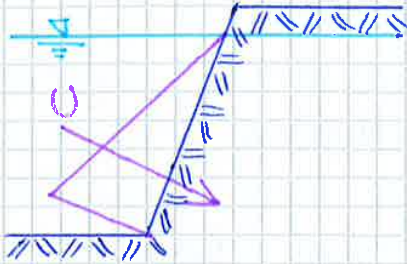


In questa situazione c'è una pressione interstiziale pari a:

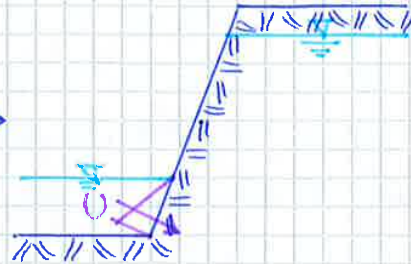
$$u + \Delta u$$

↑
pressione interstiziale prima dello svasso

←
sottopressione dovuta alla lacerazione di forze sul paramento

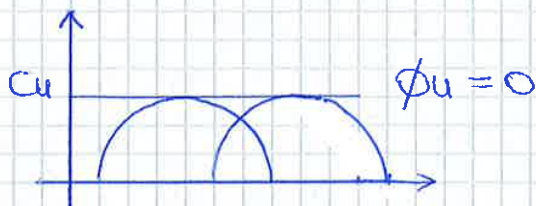


SVASSO →



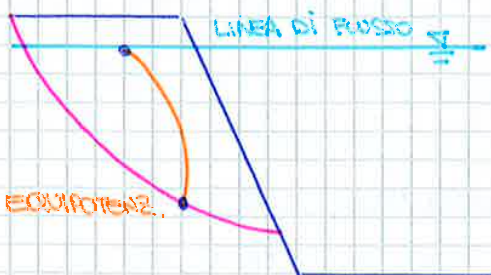
Posso lavorare in 2 modi:

- quando sono in condizioni NON DRENATE uso le tensioni totali perché non so calcolare lo Δu e considero i parametri: c_u, ϕ_u



- se ho noto lo Δu posso lavorare in condizioni DRENATE considerando c', ϕ'

Nel pendio la condizione non drenata si evolve in moto di filtrazione che serve per riequilibrare la pressione interstiziale, quindi si dissipa lo Δu che si era generato sul paramento ed ho un andamento curvo delle u



le moto di filtrazione ϕ riferimento ed un processo di consolidazione e variano nel tempo perché siamo in regime transitorio.

Devo considerare le stime del versante considerando diversi rettili di flusso

B è anche funzione di $1/k$ cioè della compri-
mibilità dei materiali (scheletro solido, acqua
e grano solido).

Noti k_s, k_w, k' e lo porosità n del materiale
possa calcolare Δu a seguito di $\Delta \sigma$. Questo
è valido per tutte le rocce.

Per i terreni: $1/k_s \ll 1/k'$ cioè prima di
riuscire a comprimere il singolo grano non
ho più il poro $\rightarrow 1/k_s = 0$

si ha inoltre che: $1/k_w \ll 1/k' \rightarrow 1/k_w = 0$
nei terreni quindi si ha:

$$B = \frac{1/k' - 1/k_s}{(1/k' - 1/k_s) + n \cdot (1/k_w - 1/k_s)} \rightarrow \underline{B = 1}$$

$\rightarrow \Delta u = B \cdot \Delta \sigma \rightarrow \Delta u = \Delta \sigma$ ed un incremento di
tensione isotropa, in condizioni non drenate,
corrisponde un incremento di u uguale.

Quando voglio eseguire una prova triassiale
devo essere sicuro che il campione sia saturo.
Per sapere se il campione è saturo chiudo il
drenaggio e applico un incremento di tensione
isotropa, se sul trasduttore di pressione leggo
un uguale incremento di pressione interstiziale
allora il campione è saturo. ($\Delta u = \Delta \sigma$)

Skempton ha fornito una relazione nel caso
in cui ho a che fare con un problema

assid-simmetrico, quando applico
incrementi di tensione diverso in
direzione assiale e radiale.

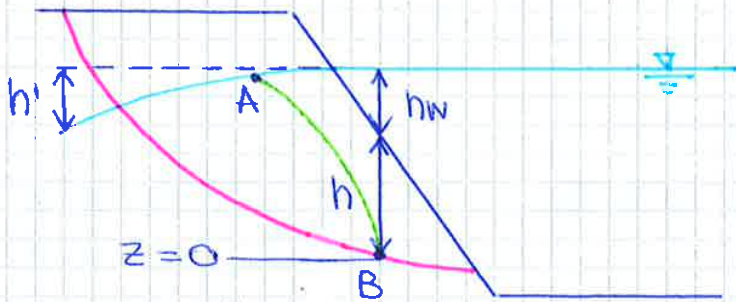
Siamo sempre in condizioni sature,
non drenate e comportamento elastico

$$\Delta u = B [\Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3)]$$

\uparrow si riferisce alle forze deviatorie e
tiene conto delle Δu durante le
varie fasi di carico.

ESERCIZIO TEORICO

Considero un versante costituito da terreno e udato con skempton l'ecesso di u che nasce a seguito dello scavo. se voglio fare un'analisi di



stabilito devo valutare Δu su una possibile superficie di scioglimento (ross)

Considero un generico punto B.

considero l'equipotenziale che passa per B (verde) chiamo h' il dislivello tra il battente d'acqua ed il livello interno della falda che nella realtà tende a scendere (come in figura).

Applico il teorema di Bernoulli sull'equipotenziale AB:

$$h_A = h_B$$

$$\frac{U_A}{\gamma_w} + z_A = \frac{U_B}{\gamma_w} + z_B$$

$U_A = 0$ perché sono sul pelo libero

$$U_B = \gamma_w (z_A - z_B)$$

$z_B = 0$ per come ho preso il SR

$$\hookrightarrow U_B = \gamma_w \cdot z_A$$

$$z_A = h_w + h - h'$$

$$\hookrightarrow U_B = (h + h_w - h') \cdot \gamma_w \quad \text{pressione in B prima dello scavo.}$$

se il pendio non è molto inclinato posso dire che

$$\sigma_1 \sim \sigma_v$$

$$\sigma_{1B} = \gamma_w \cdot h_w + \gamma \cdot h \quad \leftarrow \text{tutto ciò che sta sopra B}$$

↑
tensione principale max

$U_{B\text{SVASO}}$ dipende da \bar{B} , se scende \bar{B} aumenta la pressione interstiziale.

$$\bar{B} = B \left(1 - (1-A) \left(1 - \frac{\Delta s_3}{\Delta s_1} \right) \right)$$

$$B = 1$$

$A = 1$ andando a fuore di stabilità

↳ $\bar{B} = 1$ come suggerito da Bishop e Morgenstern

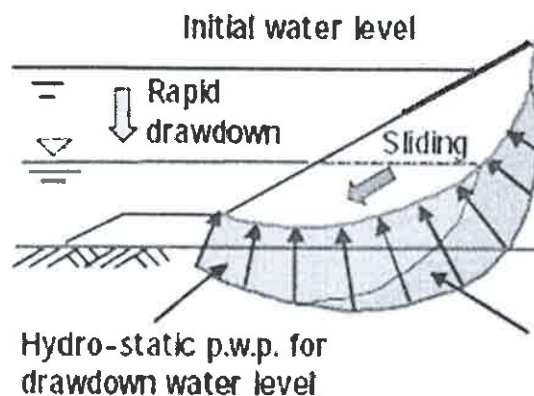
Abbiamo una $\Delta u < 0$ perché siamo in un processo di scarico. calcolo u in B nella condizione non drenata che è pari alla u_B iniziale più Δu :

$$u_B = \gamma_w (h_w + h - h')$$

$$u_{B\text{SVASO}} = \gamma_w (h + h_w (1 - \bar{B}) - h')$$

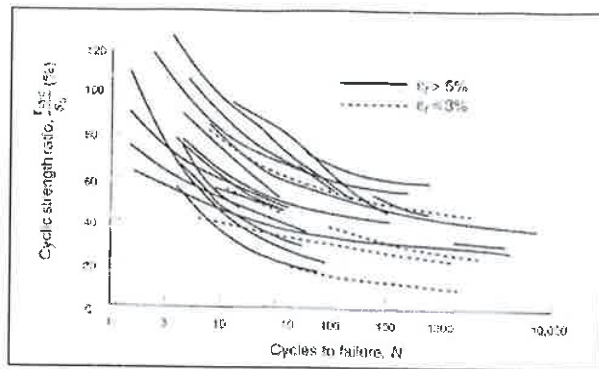
$u_{B\text{SVASO}}$ è maggiore della u_B alla fine del processo di consolidazione quando tutto in condizioni drenate, infatti vale zero. ($u_{B\text{FIN}} = 0$)

le rapide suose risulti sfuorende alla stabilità del pendio in quanto comporta la diminuzione della spinta U dell'acqua sul pendio.



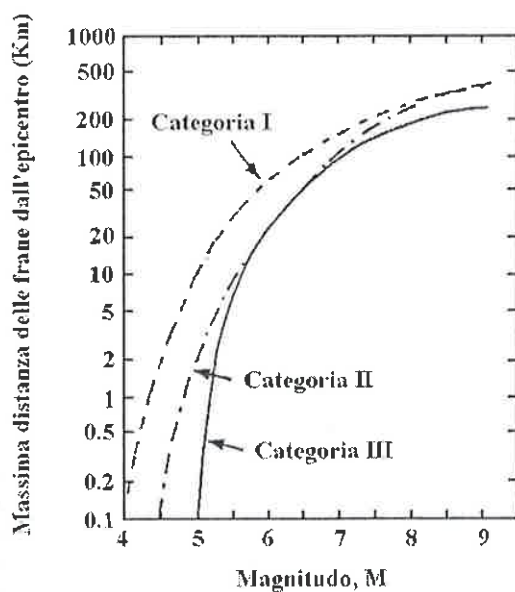
→ VEDI ESERCIZI ②, ③, ④

Degradazione ciclica della resistenza non drenata



nei materiali a grana fine coesivi, non avviene la liquefazione, ma a seguito del carico ciclico si può avere una degradazione della resistenza non drenata con l'aumentare dei cicli di carico.

Keefex e Wiersu hanno riclassificato i fenomeni franosi in campo dinamico. Ci sono diverse categorie che si riferiscono ai diversi meccanismi della classificazione di Varnes.



- I crolli e scorrimenti con disgregazione della massa di frana (movimento veloce, generalmente superficiale, in pendii acclivi)
- II scorrimenti senza disgregazione della massa di frana (movimento meno veloce di quello della categoria precedente, generalmente profondo, in pendii da moderatamente acclivi ad acclivi)
- III espansioni e colate (movimento veloce in pendii da poco a moderatamente acclivi)

Le categorie qui individuate non hanno attinenza con la classificazione sismica dei siti

RICHIAMI DI MECCANICA DELLE ROCCE

Tutte le rocce sono attraversate da piani di debolezza chiamate discontinuità, prodotte da episodi tettonici.

L'ammasso roccioso è composto da una matrice rocciosa intatta e dalle discontinuità che isolano solidi di rocce intatte. Un episodio geologico produce una serie di discontinuità di interno della roccia che si chiama famiglia o sistema di discontinuità composte da discontinuità con più o meno le stesse caratteristiche. Esistono anche discontinuità singolari come le faglie.



Si possono generare fenomeni di scioglimento o ribaltamento causati dalla presenza delle discontinuità.

Devo quindi caratterizzare discontinuità e rocce intatte attraverso il rilievo geo-strutturale.

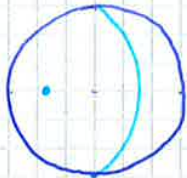
Devo capire come sono ORIENTATE le discontinuità e lo faccio tramite la bussola geomecanica. Per definire l'orientazione delle discontinuità uso 2 parametri:

- dip (ψ): angolo tra orizzontale e la linea di massima pendenza della discontinuità
- dip direction (α): angolo tra il nord geografico e la proiezione sul piano orizzontale della traccia della discontinuità.

Abbiamo conosciuto anche la SPAZIATURA e cioè la distanza tra le discontinuità di una stessa famiglia. La spaziatura è la minima distanza tra 2 discontinuità (è la distanza ortogonale).

Le discontinuità sono il risultato di processi geologici. Le discontinuità possono non essere continue e si deve valutare il GRADO DI CONTINUITÀ della discontinuità detto PERSISTENZA che varia

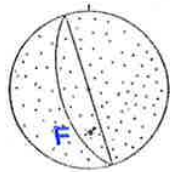
uso le proiezioni stereografiche per determinare l'orientazione. Consideriamo una sfera che ruota e non ruota nello spazio. Traslato la sfera fino a che non incontri il piano con il centro della sfera. Questa intersezione genera un grande cerchio, considero poi solo la metà inferiore della sfera, ho così solo mezzo grande cerchio che proietto sul piano orizzontale.



Se considero lo normale al piano, questo sbuca dalla parte opposta della mezzo sfera disegnando un punto che è il polo del piano che proietto sul piano orizzontale. Uso poi il reticolo per riportare le caratteristiche del piano, posso usare quello equatoriale o polare, sul primo riporto piani e poli, sul secondo solo poli.

Le proiezioni sferiche ci consentono di individuare i diversi cinematismi:

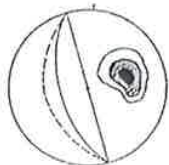
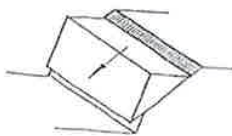
1. SCIOLAMENTO ROTAZIONALE



(a)

Non sono in grado di definire un piano perché non ho una discontinuità vera e propria. Sullo stereogramma riporto il fronte del pendolo. Non so riportare i poli delle discontinuità e quindi li approssimo con tanti puntini che indicano diverse posizioni nello spazio.

2. SCIOLAMENTO PLANARE



(b)

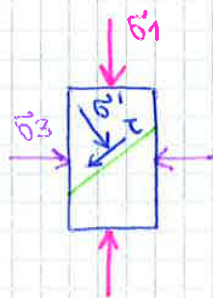
In un sistema di discontinuità queste hanno più o meno le stesse caratteristiche. Riporto i poli dei piani del sistema di discontinuità e uso una concentrazione di questi poli. Non definire un

B → uso è approccio del DISCONTINUO perché mi interessano i movimenti lungo i giunti. caratterizzo la discontinuità con la coesione apparente C_{app} e l'angolo di attrito ϕ ; per tenere conto della deformabilità della discontinuità lavoro in termini di rigidità normale k_n e tangenziale k_t .

C → uso è approccio del CONTINUO EQUIVALENTE, applico la meccanica del continuo ad un mezzo che continuo non è quindi degrado i parametri della roccia intatta per tenere conto della discontinuità: $C^* \phi^*$, stesso caso per la deformabilità: $E^* \nu^*$

→ CRITERI DI RESISTENZA PER MATERIALE OMOGENEO E ISOTROPO
 ↳ CRITERIO DI MOHR-COULOMB

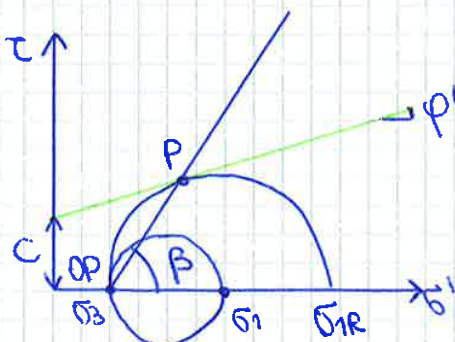
L'ipotesi di Mohr è che la resistenza al taglio τ di un materiale omogeneo ed isotropo sia funzione della tensione normale che agisce sul piano di rottura.



Se applico uno stato di tensione σ_1, σ_3 , la resistenza del materiale si esplica in termini di attrito all'interno. si genera poi una superficie di rottura su cui agiscono una tensione normale σ' ed una tangente τ .

Esiste anche il contributo della coesione c . Il criterio di Mohr - Coulomb è quindi:

$$\tau = c' + \sigma' \operatorname{tg} \phi$$



Applico una tensione σ_3 ed una σ_1 . Tenendo fisso σ_3 aumento σ_1 fino a che il cerchio non tocchi l'involucro di rottura trovando σ_{IR} .

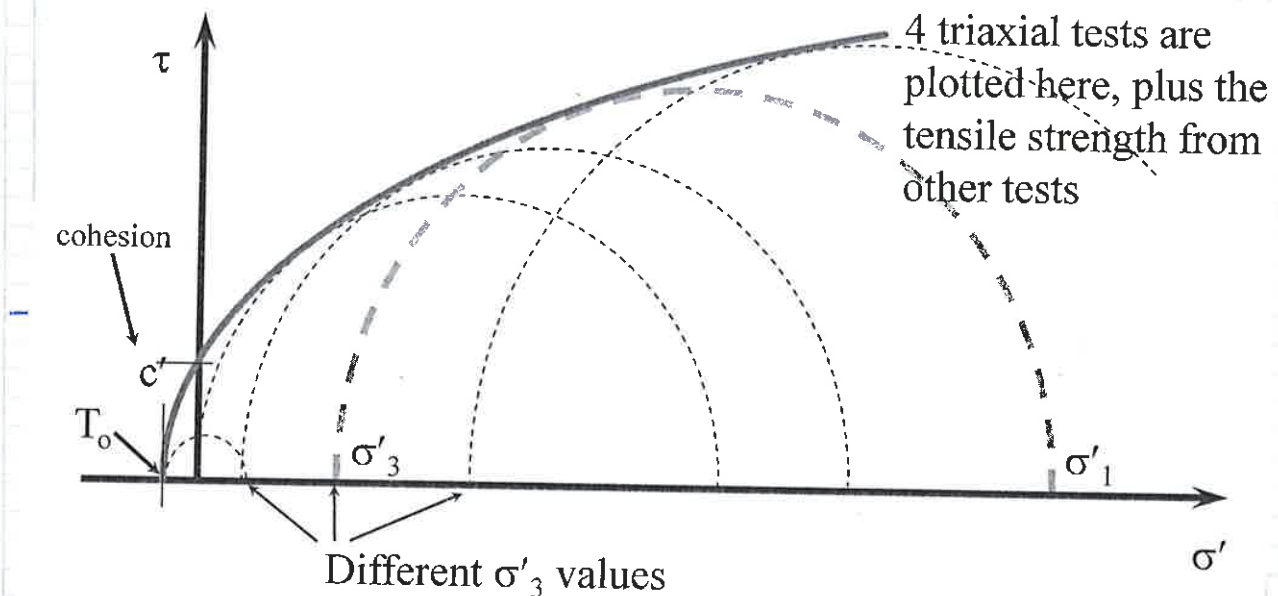
Il rapporto $C_0/T_0 \sim 3$ secondo il criterio di Mohr-Coulomb usando un angolo di attrito $\phi = 30^\circ$

$$\frac{C_0}{T_0} = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'}$$

Il criterio di Mohr-Coulomb sovrastima la resistenza a trazione e lo capisco dalle prove di laboratorio per cui trovo che $C_0/T_0 \sim 10$.

↳ CRITERI EMPIRICI PER ROCCIA INTATTA

Osservando i risultati di 3 prove triassiali eseguite con tensione di confinamento (σ_3) diverse vediamo che



se cerco l'inviluppo di rottura non riesco a disegnare una retta ma ho una curva.

↳ CRITERIO DI HOEK E BROWN

La resistenza a compressione triassiale di picco di un gran numero di rocce isotrope può essere descritta dall'equazione:

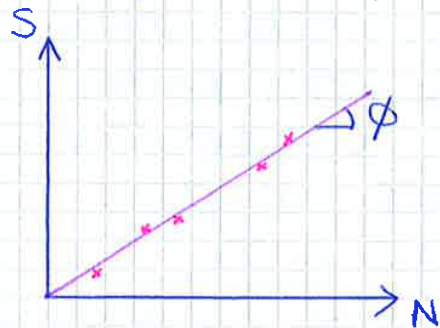
$$\sigma_1' = \sigma_3' + (m C_0 \cdot \sigma_3' + S \cdot C_0^2)^{0.5}$$

C_0 : resistenza a compressione monoassiale della roccia
 m : varia con il tipo di roccia

S : dipende dalle caratteristiche dell'ammasso roccioso ($S=1$ per la roccia intatta).

Non ho il picco. Se eseguo un' altra prova con $N_2 > N_1$ vedo che aumenta la resistenza. Affidarsi all'aumentare di N solo la resistenza.

Se effettuo più di 3 prove e riporto i risultati su un diagramma S-N ottengo una retta interpolante passante per l'origine



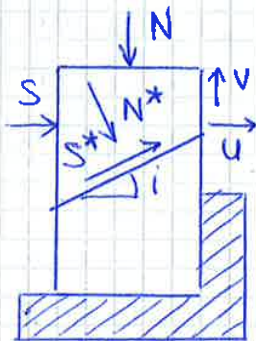
$$\tau = S/A$$

$$\sigma = N/A$$

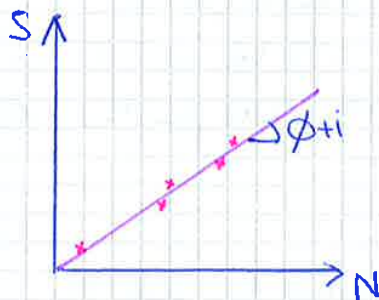
$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} \phi$$

A: area della discontinuità

b. DISCONTINUITÀ LISCIA ED INCLINATA



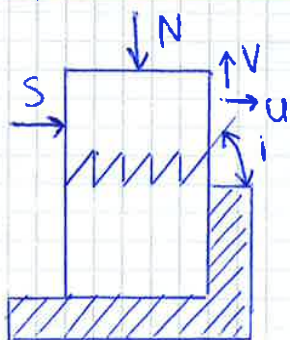
L'inclinazione della discontinuità vale i . Eseguo una prova di taglio e poi riporto i risultati su S-N ed interpolo ottenendo una retta inclinata di un angolo $\phi + i$



$$\tau = \sigma \cdot \operatorname{tg} (\phi + i)$$

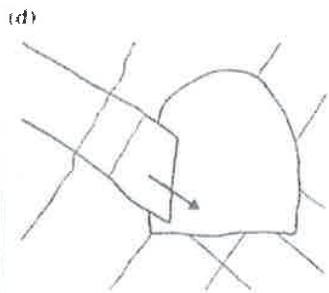
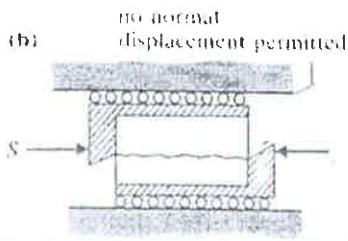
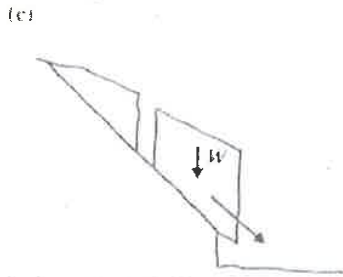
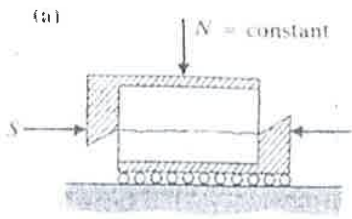
In questo caso ho solo spostamento orizzontale u che verticale v .

c. DISCONTINUITÀ CON DENTI REGOLARI



Affinché si produca uno spostamento di taglio il provino deve dilatarsi e quindi avrà anche uno spostamento v detto DILATANZA.

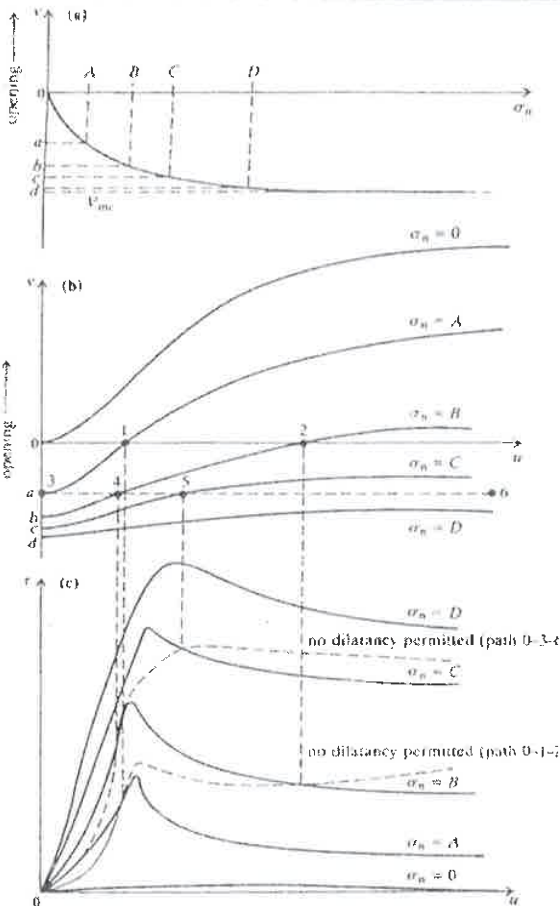
Riporto i risultati della prova su un grafico S, N, poi incremento N ed eseguo un' altra prova. Si ottiene così la BILATERA DI PATTON



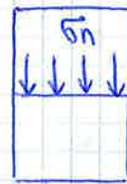
la figura (a) è la schematizzazione di prova del corso reale (c) in cui lo scioglimento avviene sotto la sola forza del peso proprio e lo spostamento verticale non è impedito ed N viene mantenuto costante.

nei casi (b) e (d) invece il blocco è confinato lateralmente e la dilatazione è impedita.

In sito ci possono quindi essere scioglimenti diversi per cui non è previsto la dilatazione.



Nel primo grafico in ascisse ho la tensione normale agente sul piano di discontinuità



mentre sulle ordinate ho la dilatazione v che è maggiore di zero se diretta verso l'alto o negativa se diretta verso il basso.

All'inizio quindi la discontinuità fino a che non è ben indentata.

Analizziamo ora il secondo grafico.

Ipotesi di non applicazione

↳ CRITERIO SEMI-EMPIRICO DI BARTON

$$\tau = \sigma \cdot \tan \phi_B$$

↑ Barton

Ho un criterio non lineare:

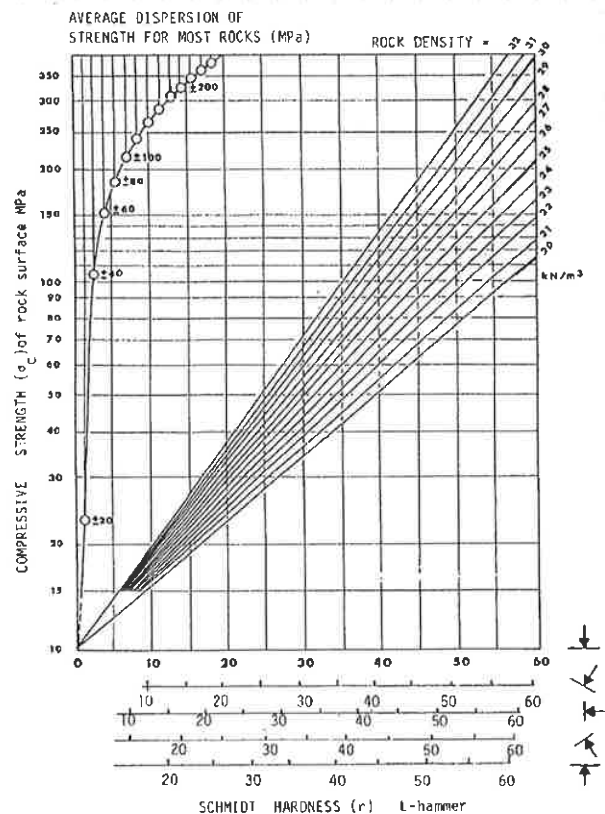
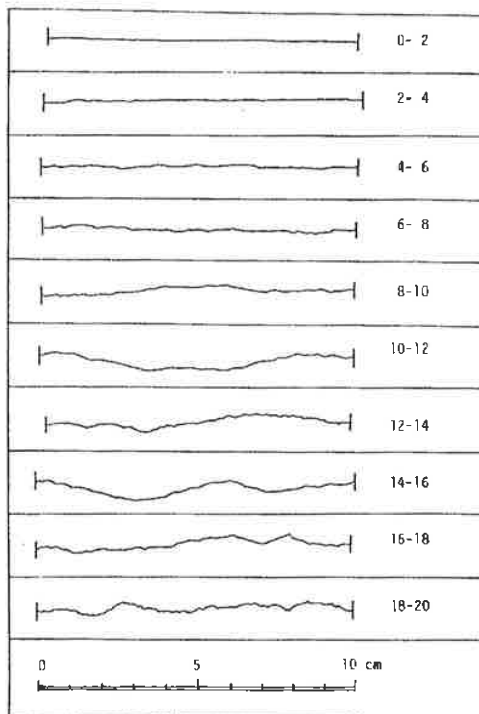
$$\phi_B = \phi_r + JRC \log \frac{JCS}{\sigma}$$

ϕ_r : angolo di resistenza al taglio residuo

JRC: joint Roughness coefficient (coefficiente di rugosità del giunto. Il giunto è una discontinuità: da ora non si è mai verificato uno spostamento), si misura con il pettine di Barton.

JCS: joint compressive strength (resistenza di compressione del giunto, resistenza di parete) si misura con il martello di Schmidt.

Barton fornisce 10 profili standard di rugosità e i valori corrispondenti di JRC

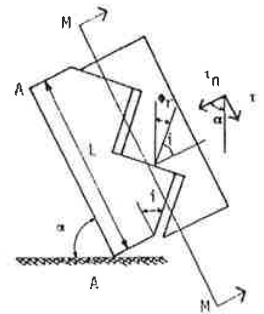
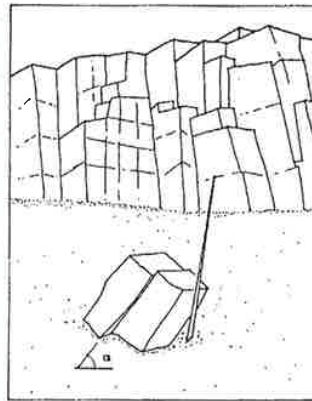


Le diverse rette si riferiscono a porosità diversi, la curva indica che la dispersione [MPa] è molto elevata.

Sulla resistenza al taglio, sulle asperità e sulla dilatazione esiste l'effetto di scala. Il criterio di Barton si riferisce ad un valore di JRC valutato su un provino di 10 cm. Barton ha fornito due soluzioni:

↳ 1. fare prove in sito per determinare JRC:

- tilt test: incli =
 ma un piano
 cui sopra il
 provino fino a
 che non si genera
 il movimento e
 chiamo α quell'
 angolo.

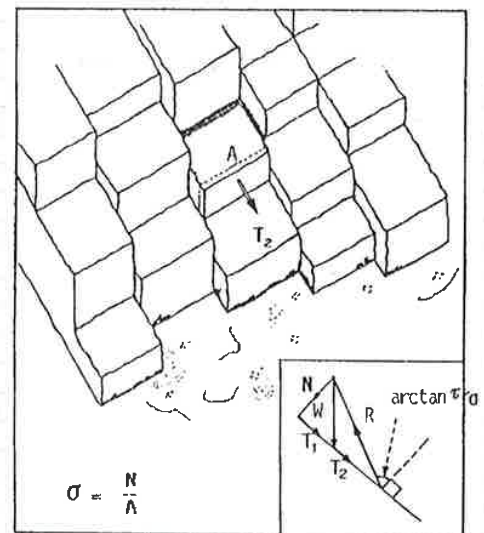


calcolo quindi JRC come:

$$JRC = \frac{\alpha - \phi_r}{\log_{10} \frac{JCS}{\sigma_{ns}}} \quad \sigma_{ns} = W / \sin \alpha$$

- pullout test: devo isolare
 un blocco e lo tiro verso
 l'esterno con forza T_2 .
 Scompungo il peso W in 2
 componenti: N e T_1
 calcolo JRC come:

$$JRC = \frac{\tan^{-1} \left(\frac{T_1 + T_2}{N} \right) - \phi_r}{\log_{10} \left(\frac{JCS \cdot AN}{N} \right)}$$



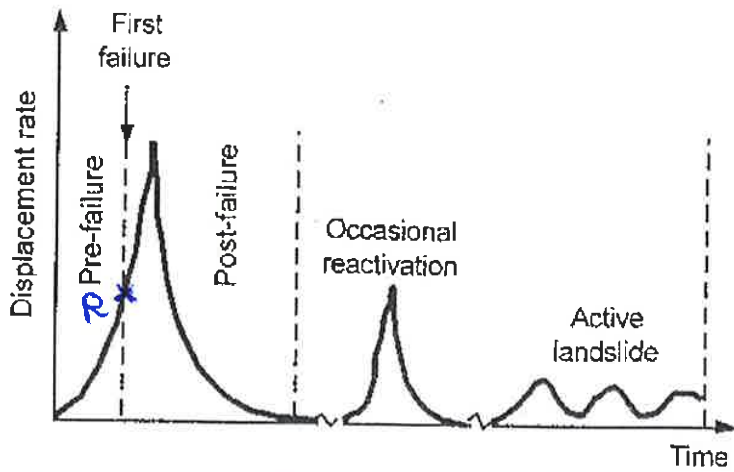
AN: area della discontinuità

↳ 2. uso correlazioni empiriche fornite da Barton

$$JRC = JRC_0 \cdot \left(L_n / L_0 \right)^{-0.02 JRC_0}$$

$$JCS = JCS_0 \cdot \left(L_n / L_0 \right)^{-0.03 JRC_0}$$

JRC₀ valutato
 con pettine di
 Barton o
 tilt test.



Audiziamo ora quello che succede al materiale del pendio. In ascissa ho il tempo mentre in ordinata ho la velocità di spostamento. Ho una prima fase in cui il materiale

è soggetto a deformazioni elastiche, plastiche ed anche viscosi. Questo fase corrisponde a diversi cicli di piogge e periodi asciutti. Questo fase è detta "pre-rottura". Se non posso avere il fenomeno di rottura che si chiama "prima rottura" se il pendio non ha mai subito rottura. A seguito dello rottura (R) aumento la velocità di spostamento.

La frana poi si ferma e torna in posizione di equilibrio, sono in fase post-rottura e la velocità si annulla. Posso poi avere la riattivazione dell'evento franoso e posso contare solo sulla resistenza residua. Posso avere anche fenomeni franos sempre attivi.

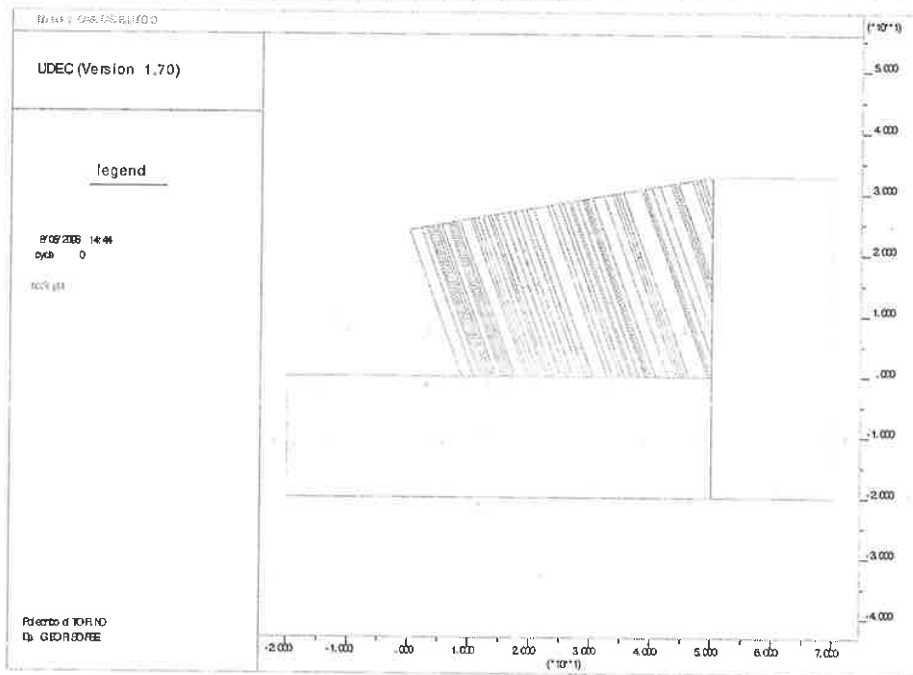
Vediamo ora i diversi metodi di analisi di stabilità sempre considerando le ipotesi di partenza:

↳ 1. METODO DI EQUILIBRIO DELLE FORZE

È il metodo dell'equilibrio limite (LEM) ed è quello più usato in ingegneria ed usato anche prima di tutti i metodi numerici. Si basa sull'equilibrio delle forze e confronto le forze agenti con quelle resistenti. In questo metodo non considero i processi deformativi che portano alla rottura e considero solo l'istante di rottura e le forze presenti alla rottura.

Devo introdurre i parametri di resistenza e di deformazione noti da prove di laboratorio. Il comportamento del materiale dipende dallo stato tensionale che ho avuto e da questo dipendono i parametri di resistenza e deformazione ma non posso inserire lo stato geologico in un modello numerico.

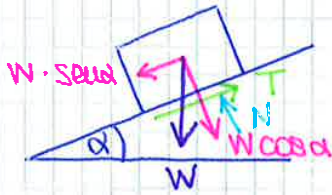
- meccanica del discontinuo: sono i metodi DEM che considerano le forze (F), gli spostamenti (u) e le rigidità dei piani di contatto (k_s, k_n) posso riprodurre sistemi di blocchi o sistemi di particelle
- metodi misti: nell'esempio sotto riportato mi



aspetto un ribaltamento flessionale e per analizzare cosa accade all'interno della losca devo applicare la meccanica del continuo mentre

all'esterno uso la meccanica del discontinuo e valuto la deformazione e la resistenza.

↳ CONDIZIONE DI EQUILIBRIO LIMITE E FATTORE DI SICUREZZA



Consideriamo un piano inclinato di un angolo α . Il blocco è soggetto alla forza peso W .
 Alla base del blocco ho le 2 reazioni normale N e tangenziale

T ; tra blocco e piano inclinato c'è una resistenza puramente attrattiva (angolo ϕ).
 Scegli il criterio di Mohr-Coulomb:

$$T_f = N \cdot \operatorname{tg} \phi$$

$$T = W \cdot \operatorname{sen} \alpha$$

$$N = W \cdot \operatorname{cos} \alpha$$

$$T/N = \operatorname{tg} \alpha \quad (1)$$

$$T_f/N = \operatorname{tg} \phi \quad (2)$$

La condizione di equilibrio limite si raggiunge quando i rapporti (1) e (2) sono uguali:

$$\operatorname{tg} \alpha = \operatorname{tg} \phi \quad \text{CONDIZIONE DI EQUILIBRIO LIMITE}$$

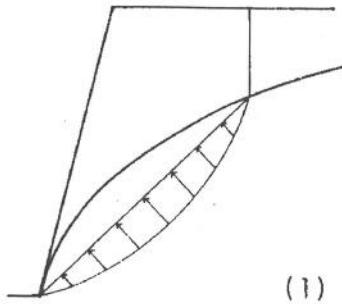
Ora devo introdurre il fattore di sicurezza FS che è il coefficiente per cui divido la resistenza al taglio che è il valore per cui ho incertezza: T_f/FS

In condizioni di equilibrio $FS = 1$

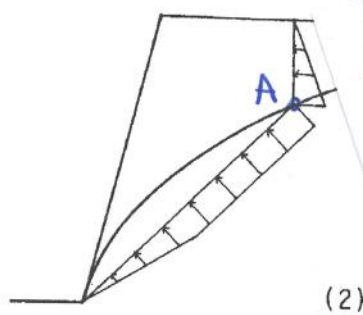
Ho lavorato con le forze ma posso usare anche le tensioni. Janbu definisce FS come:

$$FS = \frac{T_{\text{MOBILITABILE}}}{T_{\text{RICHIESTA ALL'EQUILIBRIO}}} \quad \leftarrow \begin{array}{l} \text{resistenza} \\ \text{tensione di taglio} \end{array}$$

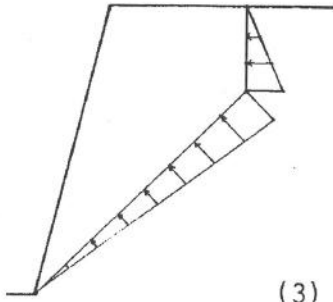
Vediamo ora le possibili distribuzioni di pressione all'interno del pendio.



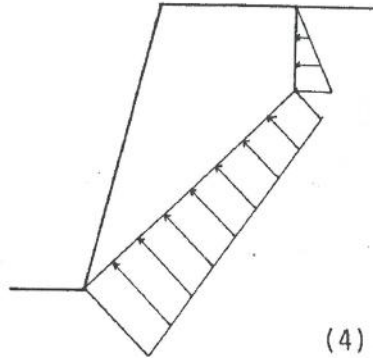
(1)



(2)



(3)



(4)

Nel caso (1) trocchio lo foldo e faccio un'analisi delle pressioni sul piano di scioglimento.

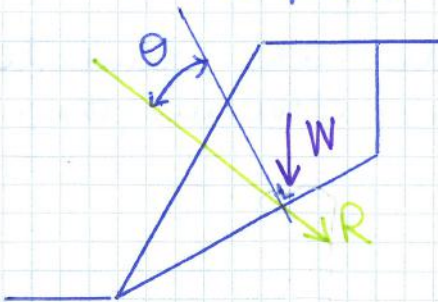
Nel caso (2) ho un quinto di trazione saturata e ribollo nel

punto A il valore di u che ho calcolato nel quinto e poi mantengo costante quel valore per un certo tratto e poi lo faccio andare a zero.

Il caso (3) è quello classico.

Nel caso (4) il piede è occluso e l'acqua non può fuoriuscire.

Possiamo pensare di applicare una forza sul pendio usando un tirante e che rappresentiamo con una forza di trazione R .



Scampando R nelle 2 direzioni

$$FS = \frac{c \cdot A + (W \cos 4\phi + R \cos \theta) \tan \phi}{W \sin 4\phi - R \sin \theta}$$

R aumenta la resistenza di attrito e diminuisce le forze che tendono ad instabilizzare.

→ VEDI ESERCIZIO 10, 11

- SCIVOLAMENTO NEI TERRENI E NELLE ROCCE :
- ↳ LE CARTE DI STABILITÀ DEI VERSANTI
 - ↳ LA DETERMINAZIONE DELLA SUPERFICIE FREATICA

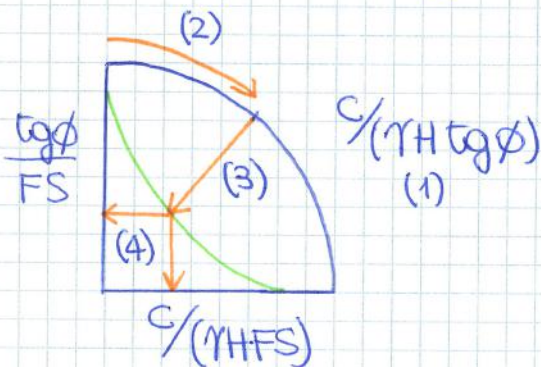
Le carte di stabilità ci consentono di valutare il FS del pendio.

Sono stati sviluppati degli elenchi da cui, inserendo i parametri del problema, ricavo FS.

Devono essere noti c e ϕ del terreno, il peso specifico γ e l'altezza H del pendio.

Ricavo $c/(\gamma H \cdot \text{tg} \phi)$ (1), trovo il suo valore sull'arco di cerchio (2),

scendendo verso il centro interseco la curva con l'inclinazione del pendio (3) ricavo quindi FS scendendo verso il basso o andando verso sinistra (4).



- se $FS < 1$ il versante è in movimento
- se $FS > 1.3$ il versante è stabile
- se $1 < FS < 1.3$ il versante è stabile ma il margine di sicurezza è basso.

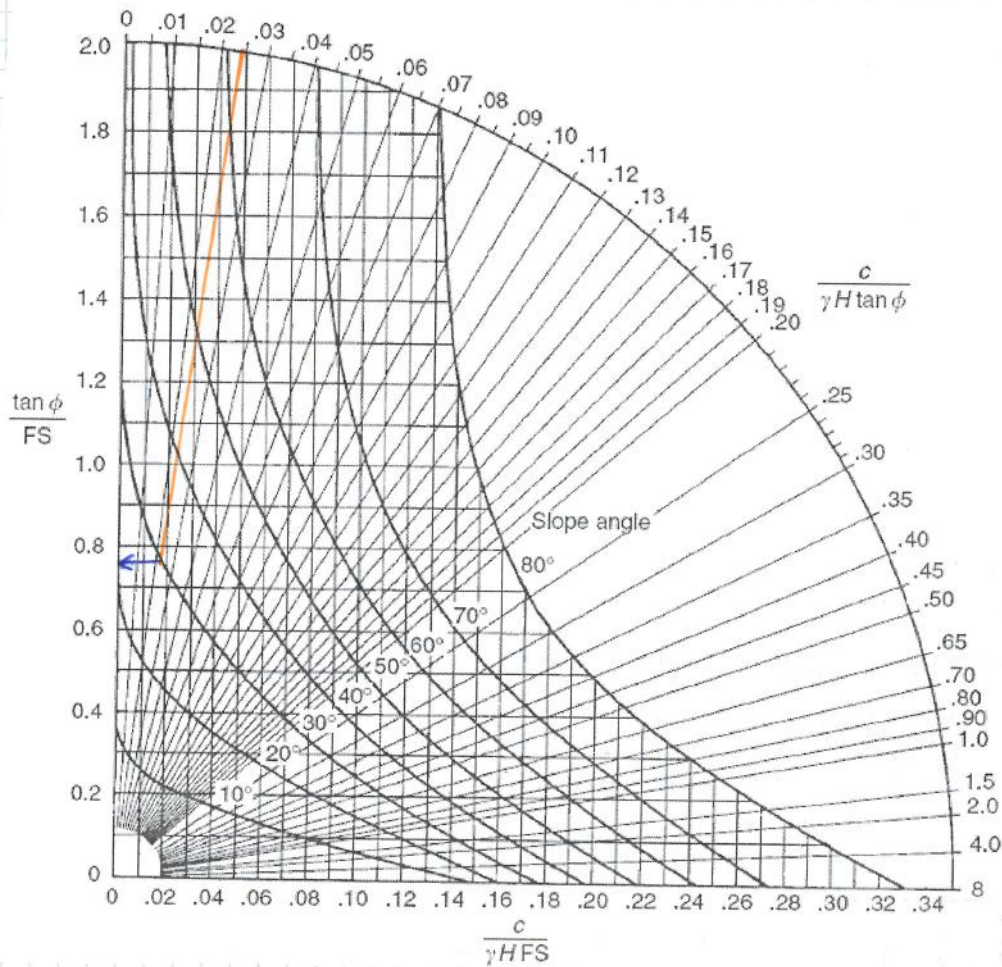
Ground water flow conditions	Chart number
Fully drained slope	1
Surface water 8x slope height behind toe of slope	2
	3

Esistono 5 elenchi diversi per le 5 situazioni diverse riportate qui a lato.

Si posso del caso drenato (1) e quello non drenato (pendio saturo) (5).

L'acqua gioca un ruolo fondamentale nella stabilità del pendio perché riduce FS.

Vediamo l'esempio precedente in caso però di pendio saturo:

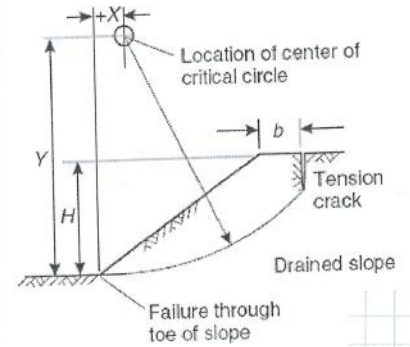
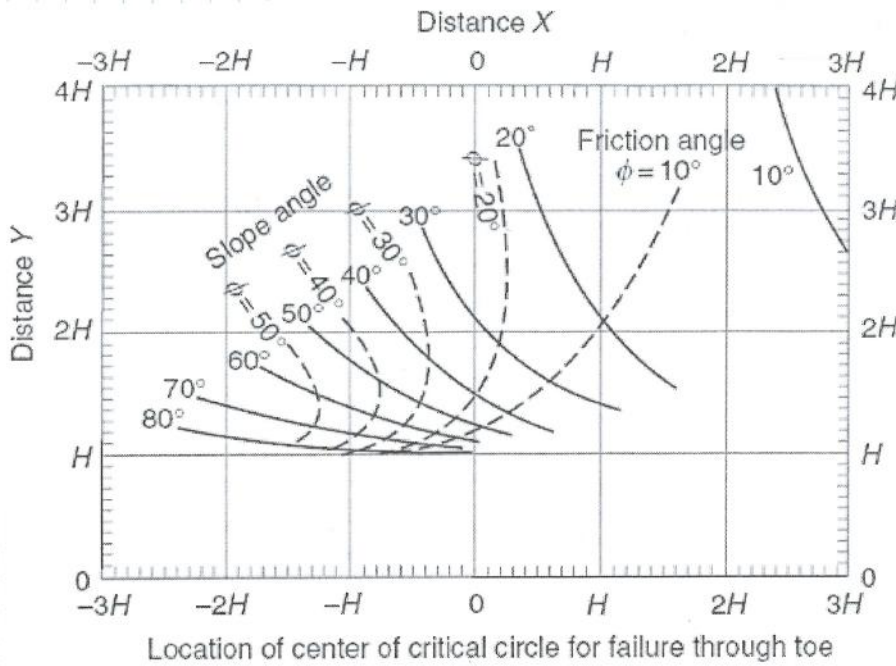


$$\frac{c}{\gamma H \tan \phi} = 0.024$$

$$\tan \phi / FS = 0.75$$

$$\hookrightarrow FS = \frac{\tan 35^\circ}{0.75} = 0.93 < 1$$

L'acqua fa scendere FS da 1.25 a 0.93.
In questo caso un intervento di drenaggio
farebbe aumentare FS.



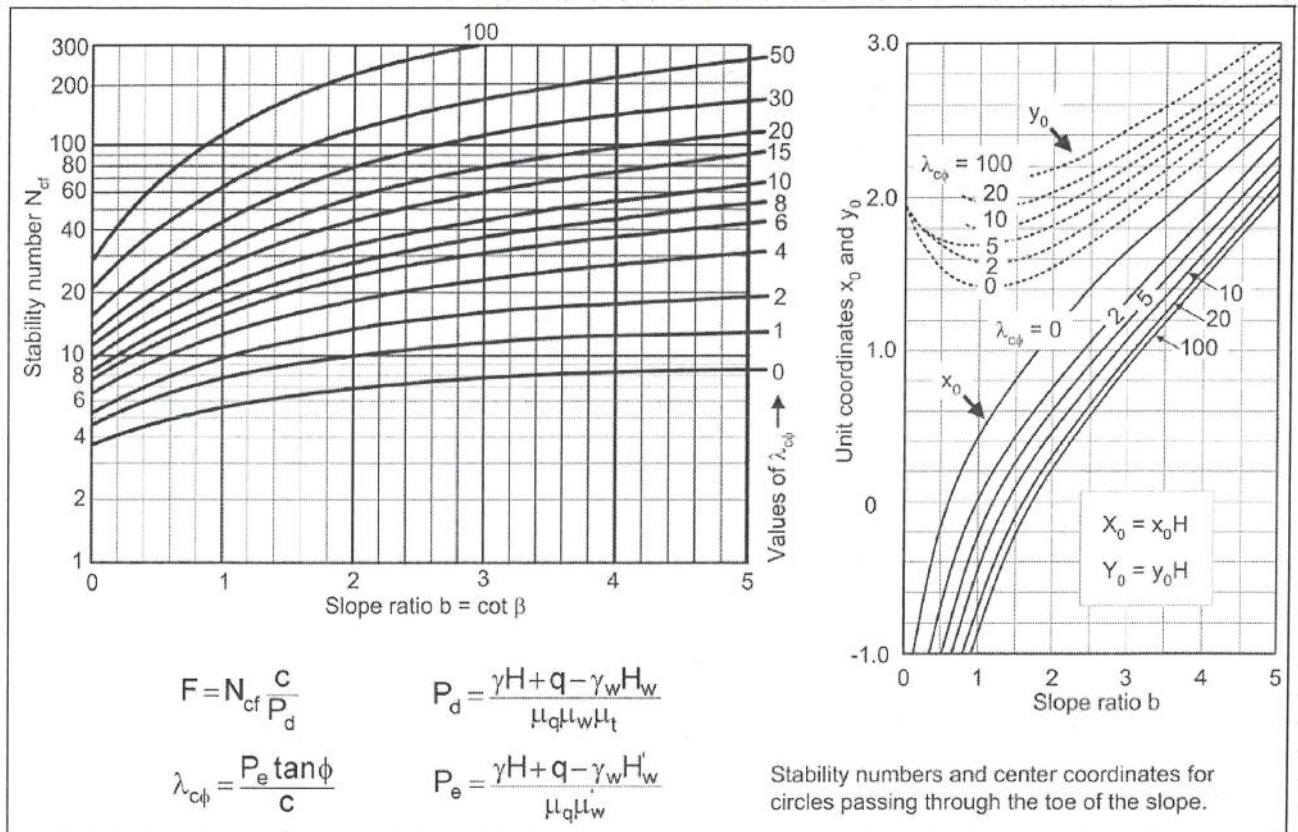
Il grafico ci fa capire di individuare il centro

delle superficie di scioglimento facendo l'ipotesi semplificativa che questa passi per il piede del pendio. Questa ipotesi è valida quando il terreno non è troppo coesivo cioè quando c non è elevata. Se c è alta e ϕ è basso (argille o limi argillosi) la superficie di scioglimento non passa per il piede del pendio ma è più profonda.

È quasi sempre presente una frattura di trazione verticale con concentrazione degli sforzi di tensione in quella zona. La frattura altera l'andamento della superficie di scioglimento che si esaurisce sul vertice della frattura. La frattura è importante anche quando si considera la presenza della falda perché l'acqua può entrare nella frattura di trazione e applicare delle pressioni che producono delle spinte nella direzione di valle che quindi portano ad una diminuzione del FS. La posizione $(x; y)$ del centro si determina a partire dal piede del versante ($x > 0$ verso monte).

la procedura per valutare FS è semplificata, esistono però delle carte che ci permettono di fare un'analisi più dettagliata del problema.

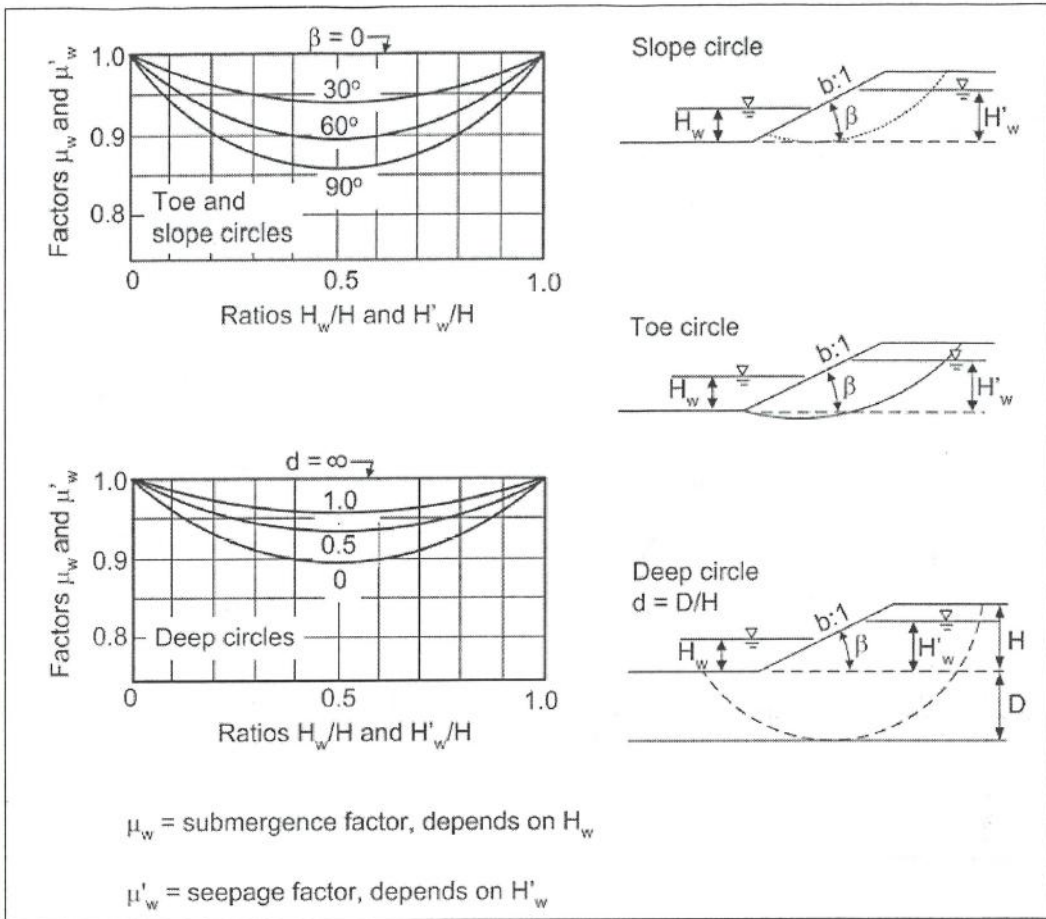
Jambu ha creato dei grafici per tenere conto di diversi fattori. A volte infatti esistono dei carichi a monte (che prima non potevamo considerare). Posso anche considerare superfici di scioglimento più profonde.



Il fattore di sicurezza F dipende dal coefficiente N_{cf} (che è legato alla stabilità del versante) e da P_d .

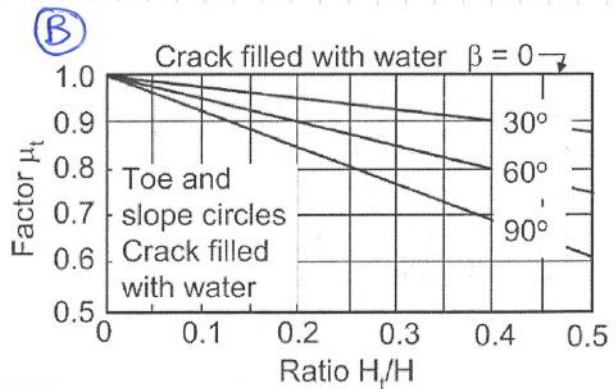
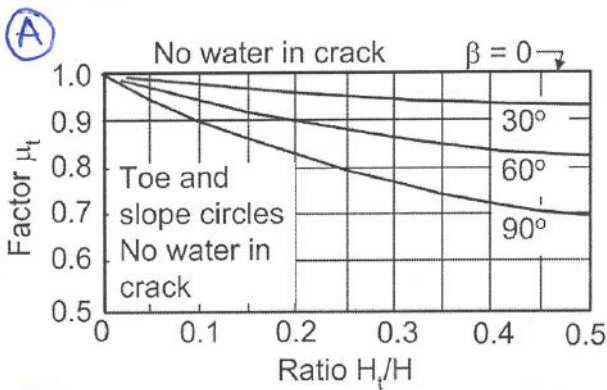
Queste carte possono essere usate solo per terreni coesivi (se $c=0 \rightarrow F=0$), le carte viste in precedenza e create da Hoek potevano invece essere usate anche per terreni non coesivi.

Il coefficiente N_{cf} dipende dalla $\cot \beta$ (inclinazione del versante) e da $\lambda_{c\phi}$ (varia da 0 a 100) che dipende da P_e che a sua volta dipende da H, q e $\gamma_w H'_w$ (termine legato alla presenza di acqua).

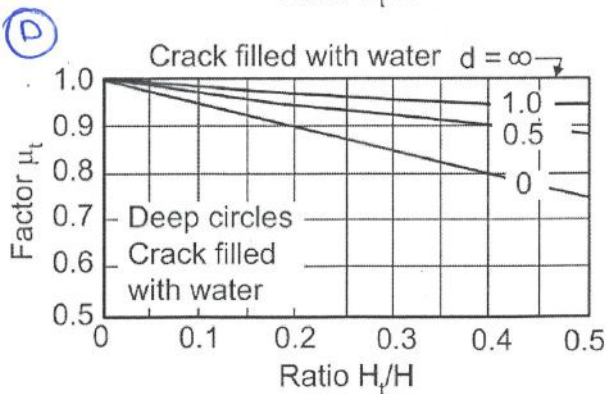
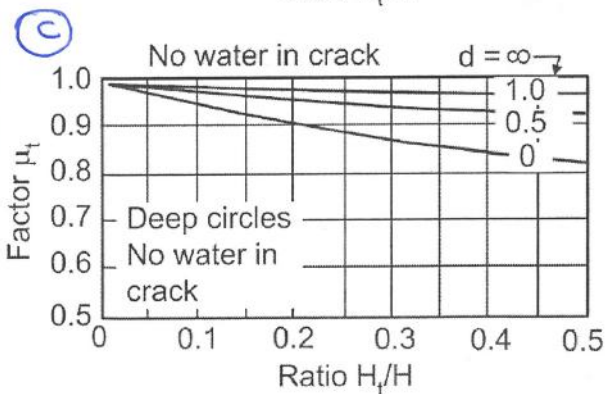


μ_w è legato alla presenza di acqua di falda. Se non ho acqua $H_w = 0 \rightarrow \mu_w = 1$

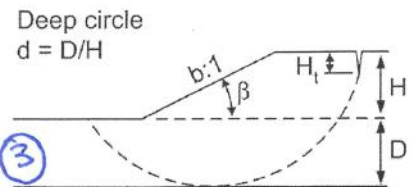
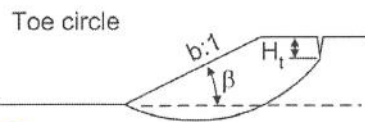
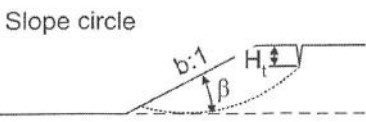
Figure E-3. Submergence and seepage adjustment factors $\phi = 0$ and $\phi > 0$ soils (after Janbu 1968)



①
②



③



①

②

③

Consideriamo ora il caso di pendio non drenato con altezza di falda assunta costante.

Nei casi in cui $H_w \neq H$ devo ricomporre il valore dell'altezza media, entro con H_c/H , ricompono H_w/H nel nostro caso $H_w = H$

Considero il grafico (D), $H_c/H = 0.33$ $d = 0.25$
 $\rightarrow \mu_t = 0.86$

$P_d = 697$

$\mu_w = 1$ (assenza di bacino di valle)

$\mu_q = 1$ (assenza di surcarico a monte)

$P_e = \frac{600 - 10 \cdot 30}{1.1} = 300$

$\mu_w = 1$

$\lambda_{cf} = 21$

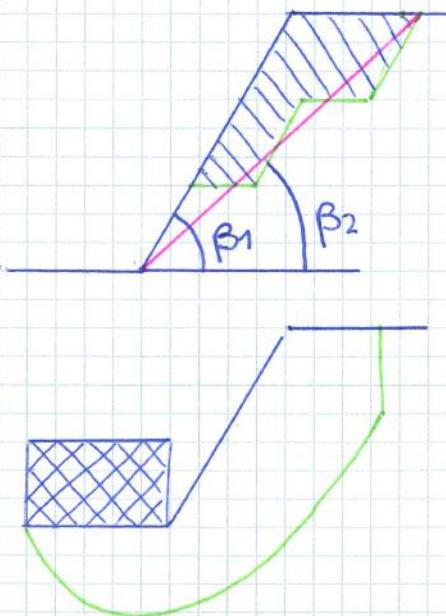
$\cotg \beta = 1.73$

} $\rightarrow N_{cf} = 50$

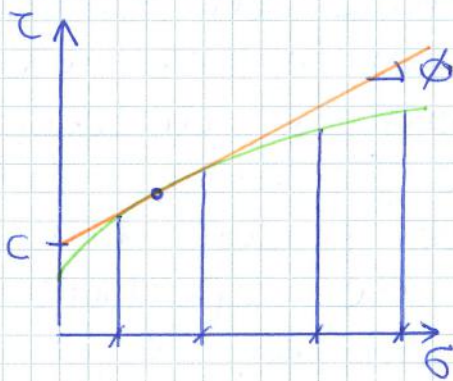
$FS = \frac{50 \cdot 10}{696} = 0.71 < 0.93$ (che avevo prima) (Hoek)

FS può essere aumentato togliendo il surcarico q se questo è presente oppure si può aumentare N_{cf} che si fa se aumento $\cotg \beta$ quindi se diminuisce la pendenza.

L'operazione con cui si diminuisce la pendenza si chiama RIMODELLAMENTO. Si realizza tramite una gradonatura (asportazione di una porzione di versante) $\beta_2 < \beta_1$ avendo lo superfici di scioglimento profonde posso aumentare FS appesentendo lo zona del piede con delle gradonature che sono costituite da materiale drenante.



OSS Il terreno più profondo ha un grado di compattezza maggiore di quello in superficie. Lo stato tensionale influisce sui parametri del terreno che quindi possono cambiare ma le carte di stabilità non tengono conto di questo. (Anche il metodo dell'equilibrio limite considera un parametro costante per il terreno).
 Nei terreni a grano grosso il criterio di rottura mostra una certa curvatura.



Rappresento c e ϕ come l'intercetta e l'inclinazione di una retta tangente in un intorno del valore di σ del nostro problema.

Nelle zone profonde ho stati tensionali più elevati

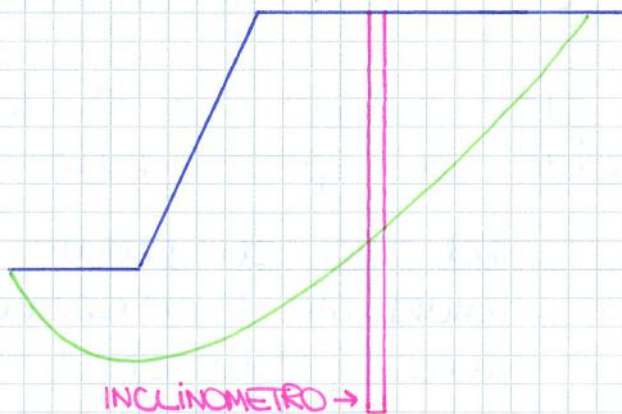
e quindi sono spostate più a destra. Pur essendo lo scivolo reale nullo, posso avere delle coesioni apparenti che sono influenzate dallo stato tensionale.

È utile quindi prevedere valori di c e ϕ variabili in funzione dello stato tensionale che si sviluppa nel terreno.

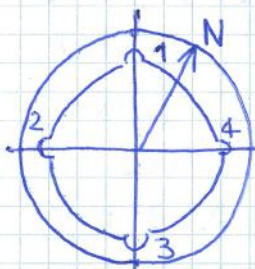
Con i metodi numerici posso simulare lo stato deformativo e tensionale del terreno. In funzione del quale posso attribuire c e ϕ per ogni punto del terreno. Il flusso dell'acqua nei pori influenza lo stato tensionale efficace che a sua volta influisce sulla deformazione del terreno e sulla dimensione dei pori, che fa variare il flusso nei pori. Stato tensionale e flusso sono due aspetti legati tra loro.

Con i metodi numerici non devo solo considerare un criterio di rottura cumulato in cui c e ϕ vengono valutati punto per punto in relazione allo stato tensionale, non solo devo considerare i solchi accoppiati di stato tensionale e flusso nei pori ma devo considerare anche un criterio di rottura di picco ed uno residuo per tenere conto del problema della rottura progressiva e considerare quindi l'eventuale redistribuzione delle tensioni.

OSS Un altro problema è quello della localizzazione spaziale del terreno. Ci servono dei sondaggi per individuare la stratigrafia. A volte però questi non bastano per capire quale è la parte di terreno instabile.



Voluto quindi gli spostamenti tramite gli inclinometri che consistono in fori verticali realizzati lungo il versante in cui si inserisce una tubazione con dei

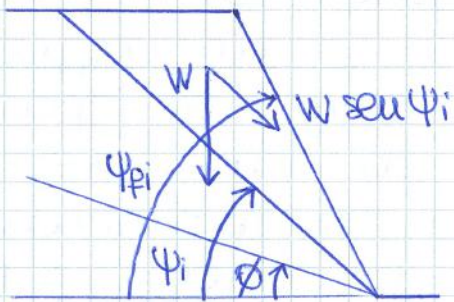
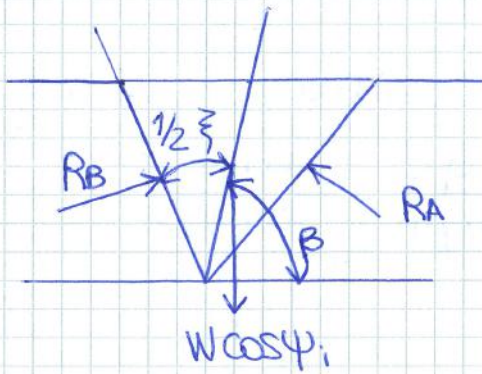


solchi. Si deve fare in modo che 2 solchi siano allineati con la linea di massima pendenza del versante. L'inserto è inclinometro per fare la lettura ob.

si misura l'inclinazione rispetto allo verticale e in risulta una lettura ogni 50 cm.

Nota l'inclinazione a diversi punti posso tracciare la deformata. Si fa l'ipotesi che in fondo alla tubazione lo spostamento sia nullo.

→ SCIVOLAMENTO 3D



ipotesi nulla la coesione sulle superfici di scioglimento, non esiste materiale cementato nella discontinuità il fattore di sicurezza è indipendente dalle dimensioni del blocco e quindi dall'altezza del versante.

RA e RB sono le forze normali che la roccia circostante applica al blocco per reazione. Traccio la bisettrice dell'angolo che ci consente di

riconoscere l'angolo β e la semi-apertura del blocco $\frac{1}{2}\xi$.

Per calcolare FS devo fare il rapporto tra la forza resistente (attrito) e le forze che inducono allo scioglimento. le forze di attrito sono calcolate come forze normali per \tan dell'angolo di attrito.

si ipotizzo che i 2 angoli di attrito ϕ_A e ϕ_B per le 2 superfici siano uguali.

la somma delle componenti verticali di RA e RB deve essere uguale a $W \cos \psi_i$ per l'equazione di equilibrio alla traslazione verticale.

Mettiamoci in direzione della bisettrice e facciamo l'equazione di equilibrio lungo quella linea:

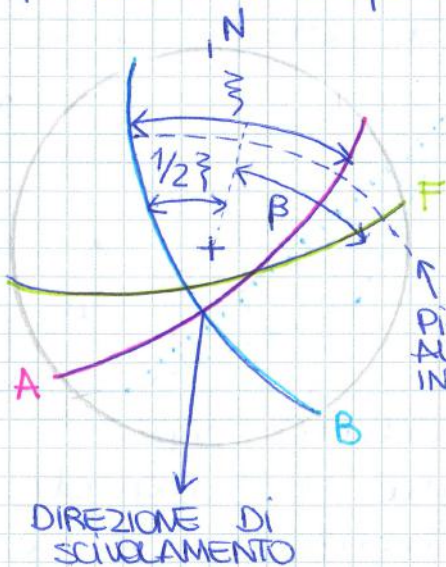
$$(1) \quad W \cos \psi_i \cdot \sin \beta = R_A \sin \frac{1}{2}\xi + R_B \sin \frac{1}{2}\xi$$

$$(2) \quad W \cos \psi_i \cdot \sin \beta = \sin \frac{1}{2}\xi (R_A + R_B)$$

la forza che tende a far muovere il blocco è la componente della forza peso nella direzione del movimento, è la componente di W parallela alle linee di intersezione.

Il caso più semplice è quello per cui $\beta = 90^\circ$ (insettrice verticale), ho il ramo di iperbole più alto. k varia al variare dell'apertura ξ . All'aumentare di ξ , k diminuisce e diventa pari ad 1 quando le due superfici generano un'apertura ξ di 180° , cioè quando ricado nel caso 2D.

A parità di ξ , β ci dice quanto ruotato il blocco rispetto alla linea di intersezione e se varia β cambia l'apertura che considero ($\downarrow \beta \rightarrow \downarrow k$).



Sullo stereogramma, la distanza tra punto di intersezione (di A e B) e centro, fornisce l'inclinazione dell'intersezione.

PIANO ORTOGONALE ALLA LINEA DI INTERSEZIONE.

$$\alpha_i = \text{Tg}^{-1} \left(\frac{\text{Tg} \psi_A \cdot \cos \alpha_A - \text{Tg} \psi_B \cdot \cos \alpha_B}{\text{Tg} \psi_B \cdot \sin \alpha_B - \text{Tg} \psi_A \cdot \sin \alpha_A} \right)$$

$$\text{Tg} \psi_i = \text{Tg} \psi_A \cdot \cos (\alpha_A - \alpha_i) = \text{Tg} \psi_B \cdot \cos (\alpha_B - \alpha_i)$$

↳ ESEMPIO

$$\alpha_A = 30^\circ \quad \psi_A = 40^\circ$$

$$\alpha_B = 330^\circ \quad \psi_B = 40^\circ$$

$$\rightarrow \alpha_i = 0$$

$$\rightarrow \text{Tg} \psi_i = 0,7267 \rightarrow \psi_i = 36^\circ$$

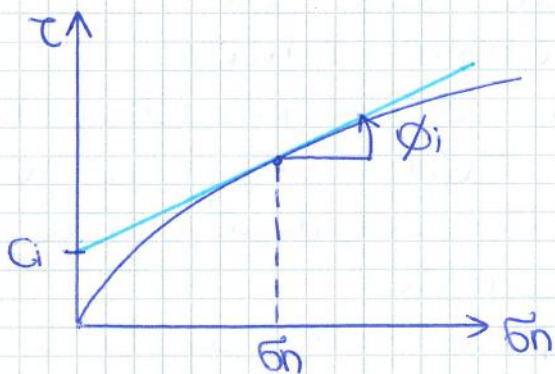
Posso usare il criterio di Barton Bandis per scrivere τ in funzione di $\bar{\sigma}_n$ e dell'angolo di attrito: ϕ_b che si ha quando si fanno scorrere due facce liscie.

$$\tau = \bar{\sigma}_n \cdot \tan(\phi_b + JRC \cdot \log_{10}(JCS/\bar{\sigma}_n))$$

$$JRC_n = JRC_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.02 JRC_0}$$

$$JCS_n = JCS_0 \left(\frac{L_n}{L_0}\right)^{-0.03 JRC_0}$$

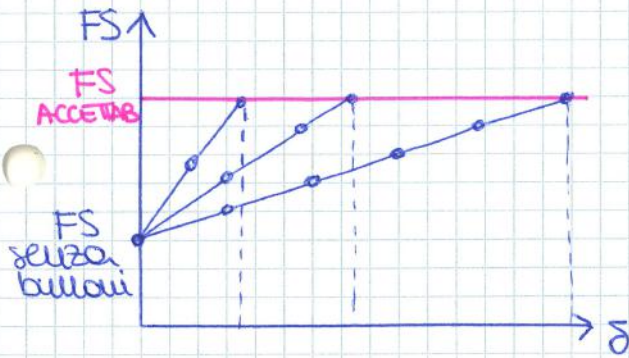
JRC dipende dalle rugosità e JCS dipende dalla resistenza della roccia.



Ho un criterio di rottura curvilineo. Posso avere una coesione apparente per una certa $\bar{\sigma}_n$ anche se realmente non esiste "c" perché il criterio di rottura passa per l'origine.

$\uparrow \bar{\sigma}_n \rightarrow \downarrow \phi$

lungo le superfici di scioglimento ho diverse coppie di c e ϕ in base allo $\bar{\sigma}_n$ che considero. sui vertici della superficie di scioglimento $\bar{\sigma}_n = 0$. nella parte centrale $\bar{\sigma}_n$ è massimo. voluto quindi c e ϕ per $\bar{\sigma}_n = 0$ e $\bar{\sigma}_{max}$



Per quel valore di δ per cui ho FS_{acc} , vedo quali sono N_{max} e T_{max} per ciascun bullone.

Si verifica se ogni bullone ha forze compatibili con la sua resistenza.

Se non lo so vuol dire che l'intervento non è sufficiente e rifaccio il calcolo con bulloni di diametro più grande o usando più bulloni. \uparrow NR bulloni (o \uparrow ϕ dei bulloni) \rightarrow \uparrow pendenze delle rette nel diagramma $(FS; \delta)$.

Il dimensionamento termina quando T ed N sono compatibili con la resistenza del bullone.

Se N e T di 1° tentativo sono \ll della resistenza vuol dire che sto usando troppi bulloni.

Per quantificare un moto sismico considero:

- a_{max} : accelerazione di picco al suolo
- t : tempo di scuotimento

La proiezione in avanti dei rischi viene fatta con le carte e gli studi di pericolosità:

→ PERICOLOSITÀ SISMICA

1. Identificazione delle sorgenti che possono produrre gravi effetti nel sito di interesse
2. Valutazione della MAGNITUDO MASSIMA, considero la sorgente che mi dà i massimi effetti e ricavo l'accelerazione di picco al suolo.
3. Valutazione della DISTANZA sorgente - sito
4. Valutazione degli EFFETTI ATENI in funzione delle leggi di attenuazione regionali
5. Selezione del TERREMOTO di CONTROLLO

Faccendo riferimento ad un periodo di 50 anni valuto quale è la probabilità che venga superata una data accelerazione e da qui traccio le carte di pericolosità.

Non usare un riferimento per passare da uno solo locale ad uno più esteso in quanto il moto sismico può cambiare in base alle condizioni del sottosuolo.

Come riferimento si usa il terremoto di Città del Messico.