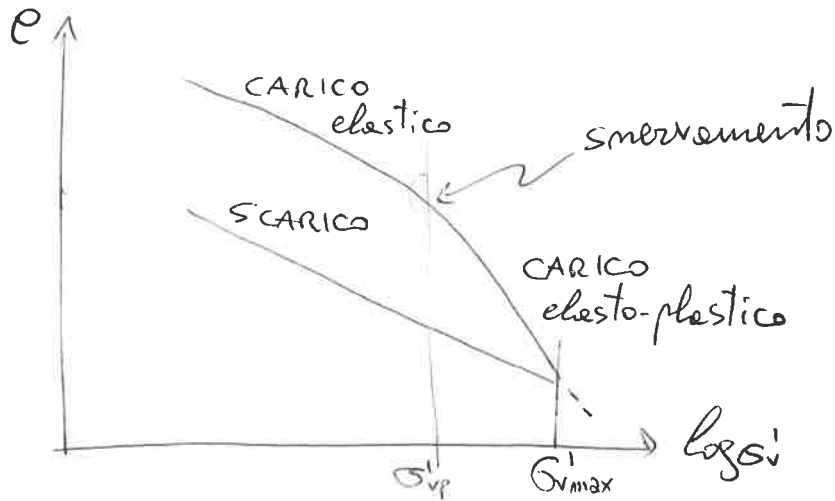


DESCRIZIONE

TERRE

Coefficiente edometrico $e = \frac{V_{vuoti}}{V_{solido}}$



COEFFICIENTE di sovracom consolidamento

$$OCR = \frac{\sigma'_{vmax}}{\sigma'_{vo}}$$

- se $\sigma'_{vmax} > \sigma'_{vo}$, $OCR > 1 \rightarrow$ terreno OC
- se $\sigma'_{vmax} \leq \sigma'_{vo}$, $OCR \leq 1 \rightarrow$ terreno NC

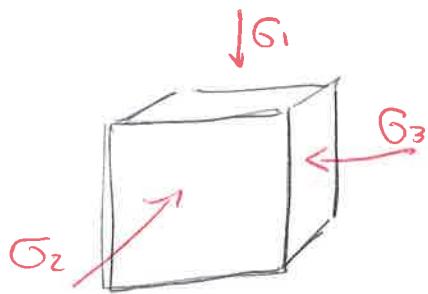
Cause del sovracom consolidamento:

- scarico meccanico
- aging (carico costante)
- cementazione
- essiccamento

Linee:

- NCL = linea di compressione normale (isotropa)
- CSL = linea di stato critico
- TSP = total stress path (prova drenata)
- ESP = effective stress path (prova non drenata)

Classificazione sforzi sul provino



$$\sigma = \sigma_1 + \sigma_3$$

$$\begin{vmatrix} \sigma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{11} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{111} \end{vmatrix} + \begin{vmatrix} 0 & \sigma_{21} & \sigma_{31} \\ \sigma_{12} & 0 & \sigma_{22} \\ \sigma_{13} & \sigma_{23} & 0 \end{vmatrix}$$

p' q'

se $q' = 0$, la compressione è isotropa

⇒ NCL raccoglie i punti di compressione isotropa

* caso non drenato $\sigma = u + \sigma' = u + p' + q'$

$u =$ pressione interstiziale $= p - p'$ (con q' costante)

$(p_0' =$ pressione isotropa iniziale (NCL)

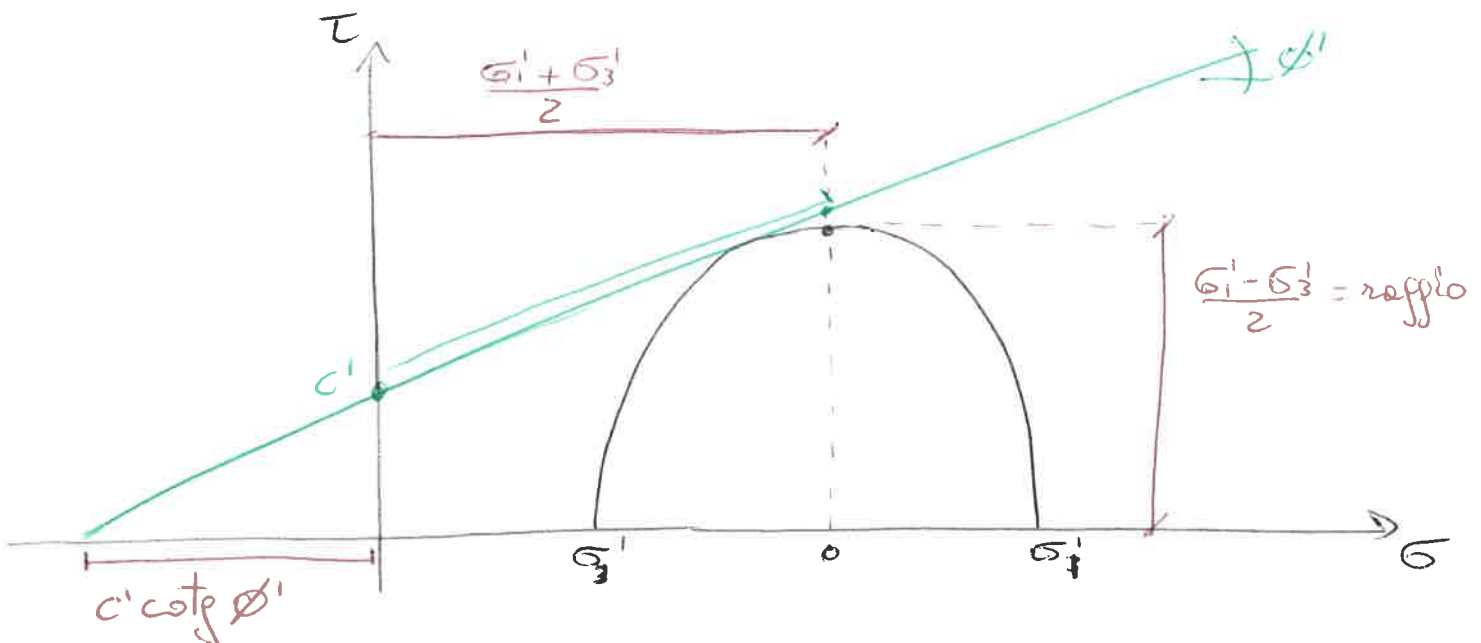
$(p_c' =$ pressione isotropa critica (CSL)

$$\hookrightarrow R_p = \frac{p'_{max}}{p'_c} \begin{cases} > 1 \text{ per OC} \\ = 1 \text{ per NC} \end{cases}$$

$K_0 =$ coefficiente di spinta a riposo $= \frac{\sigma_v'}{\sigma_h'}$
dipende dalla storia tensionale

Criterio di rottura

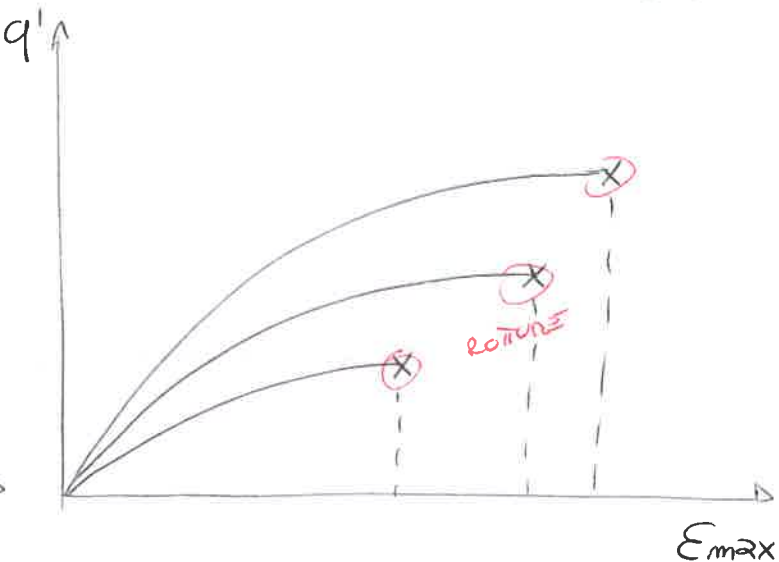
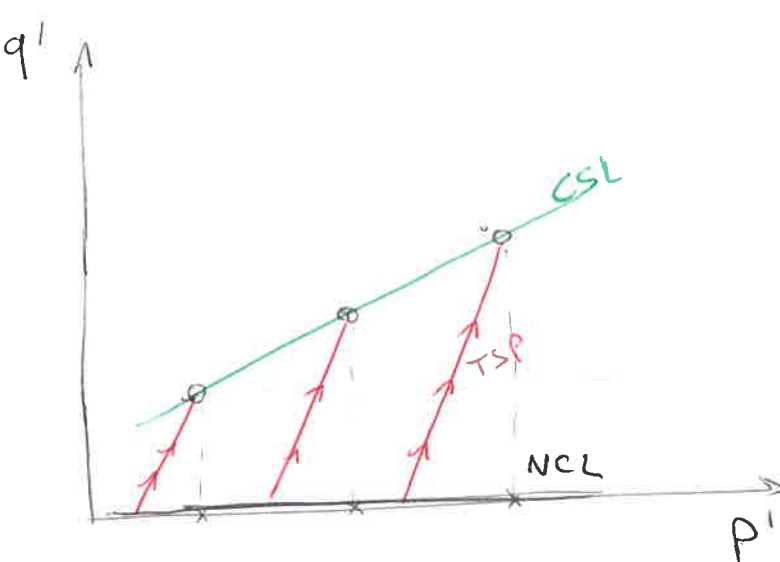
$$\frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi'$$



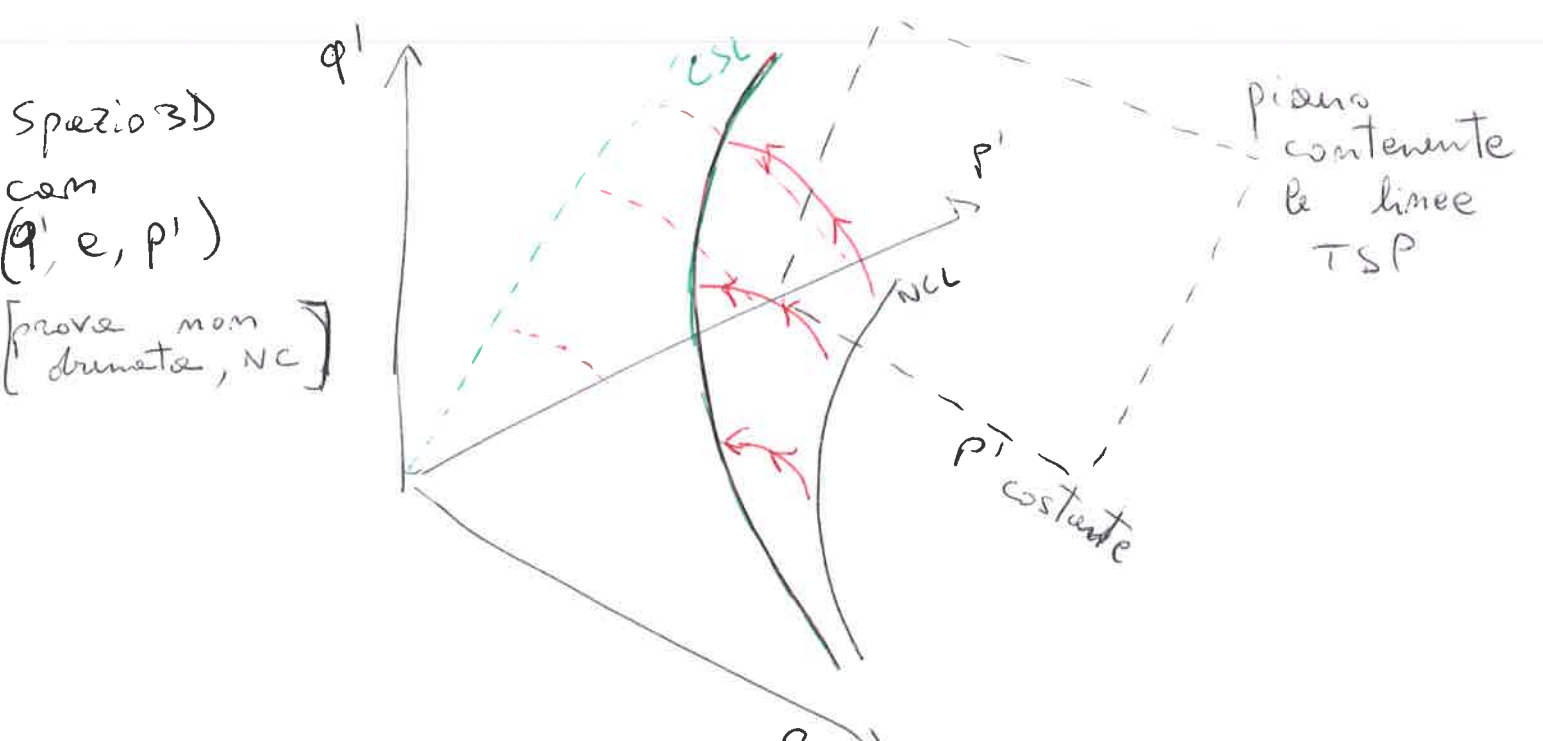
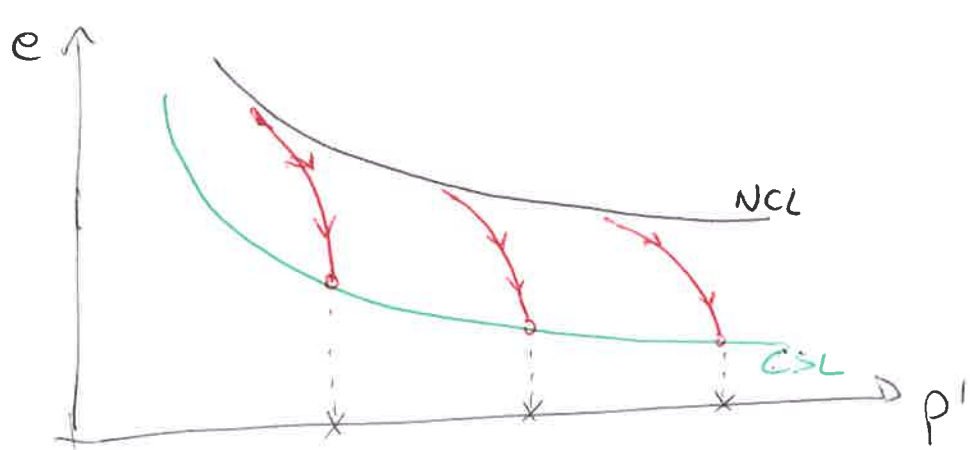
①

COMPORAMENTO ARGILLE

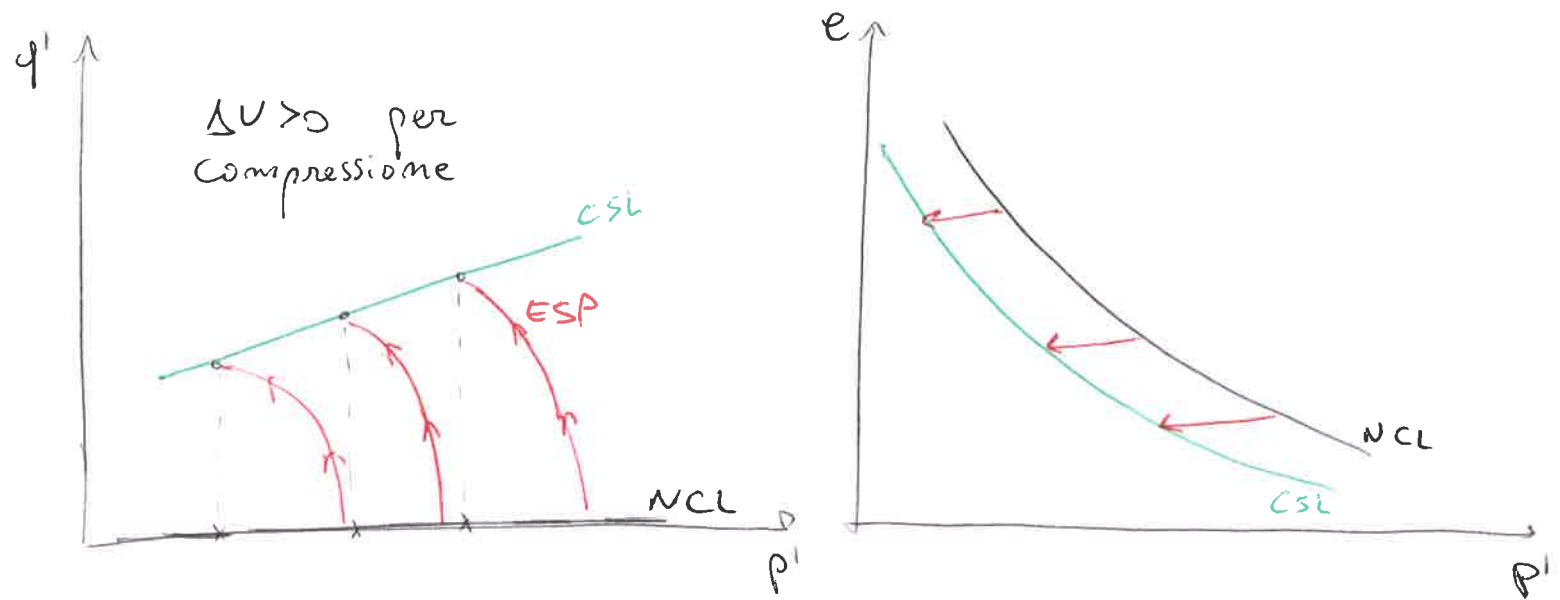
ARGILLA NORMALCONSOLIDATA (NC) DRENATA



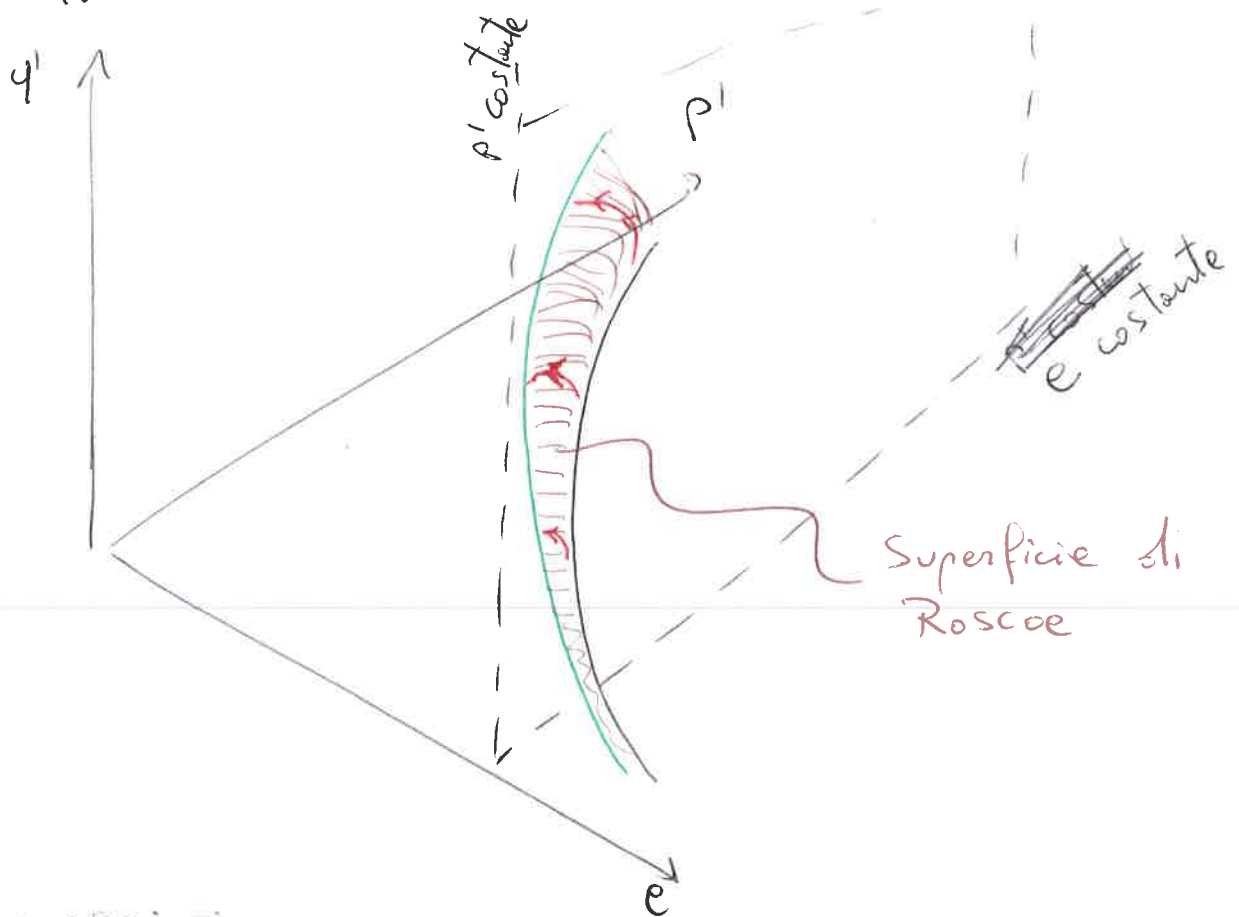
Mentre le sollecitazioni q' aumentano (con p'), il coefficiente edometrico e diminuisce



NON DRENATA



I volumi restano costanti (e) perché si riduce p con il termine di vortici interstiziali u .

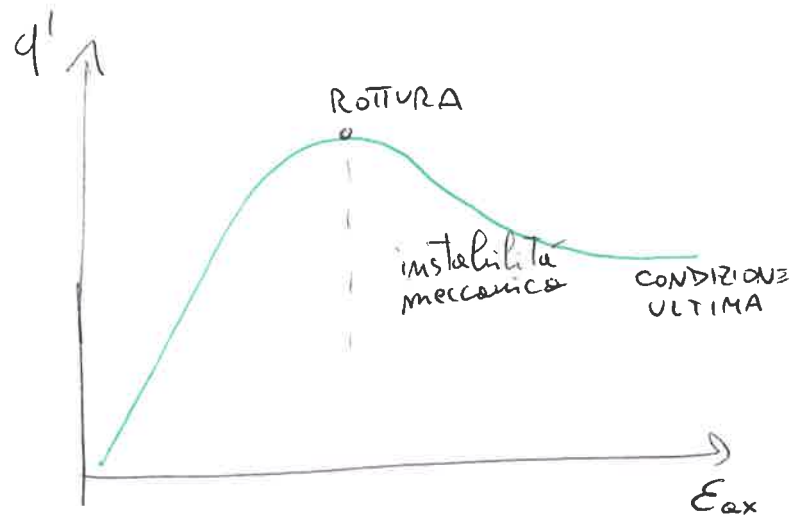


Tensioni maggiori per le prove drenate rispetto alle non drenate

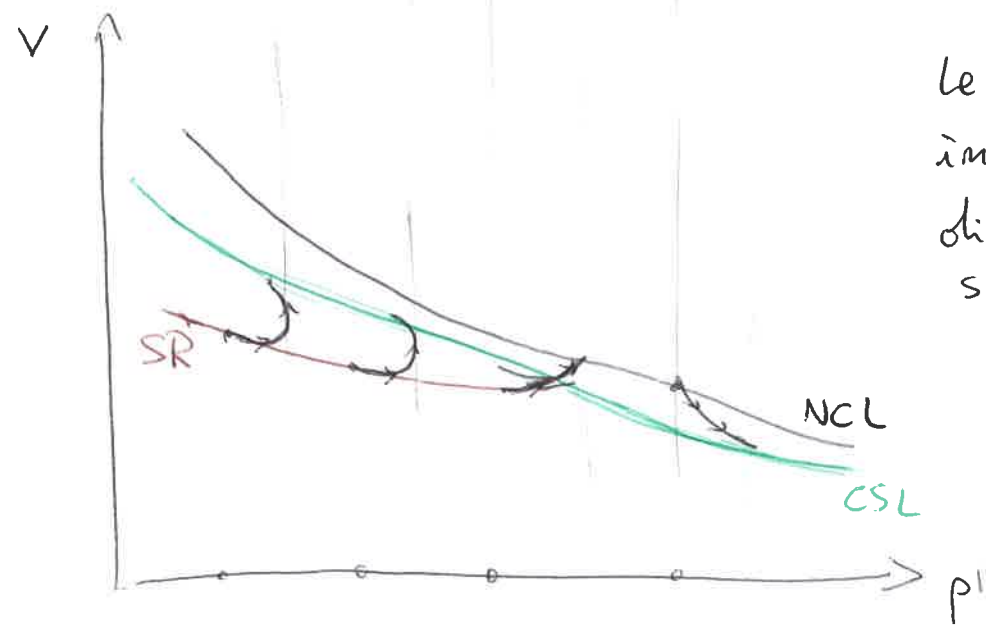
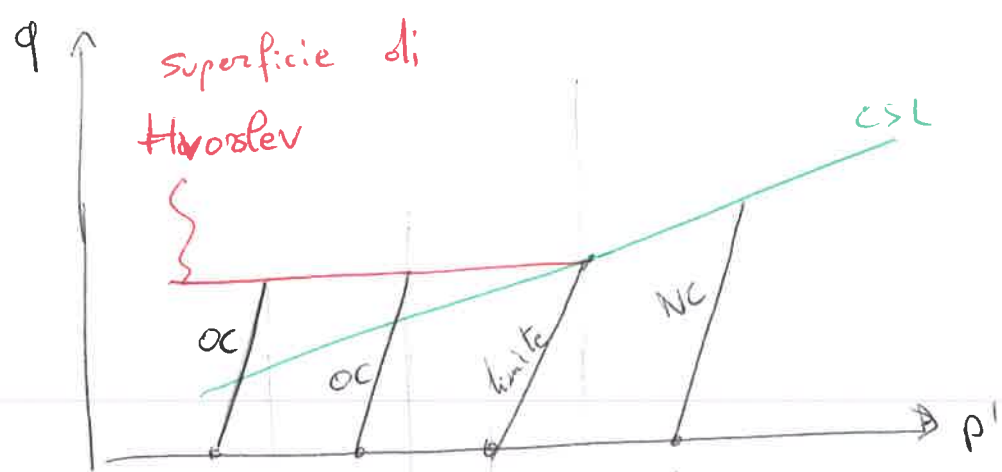
② ARGILLA SOVRACONSOLIDATA (OC) DRENATA

Nelle prove triassiale si hanno due fasi:

1. consolidazione isotropica a P_c' , decompressione isotropica a P_0' ;
2. compressione drenata del provino.



Comportamento di un provino alla prova triassiale

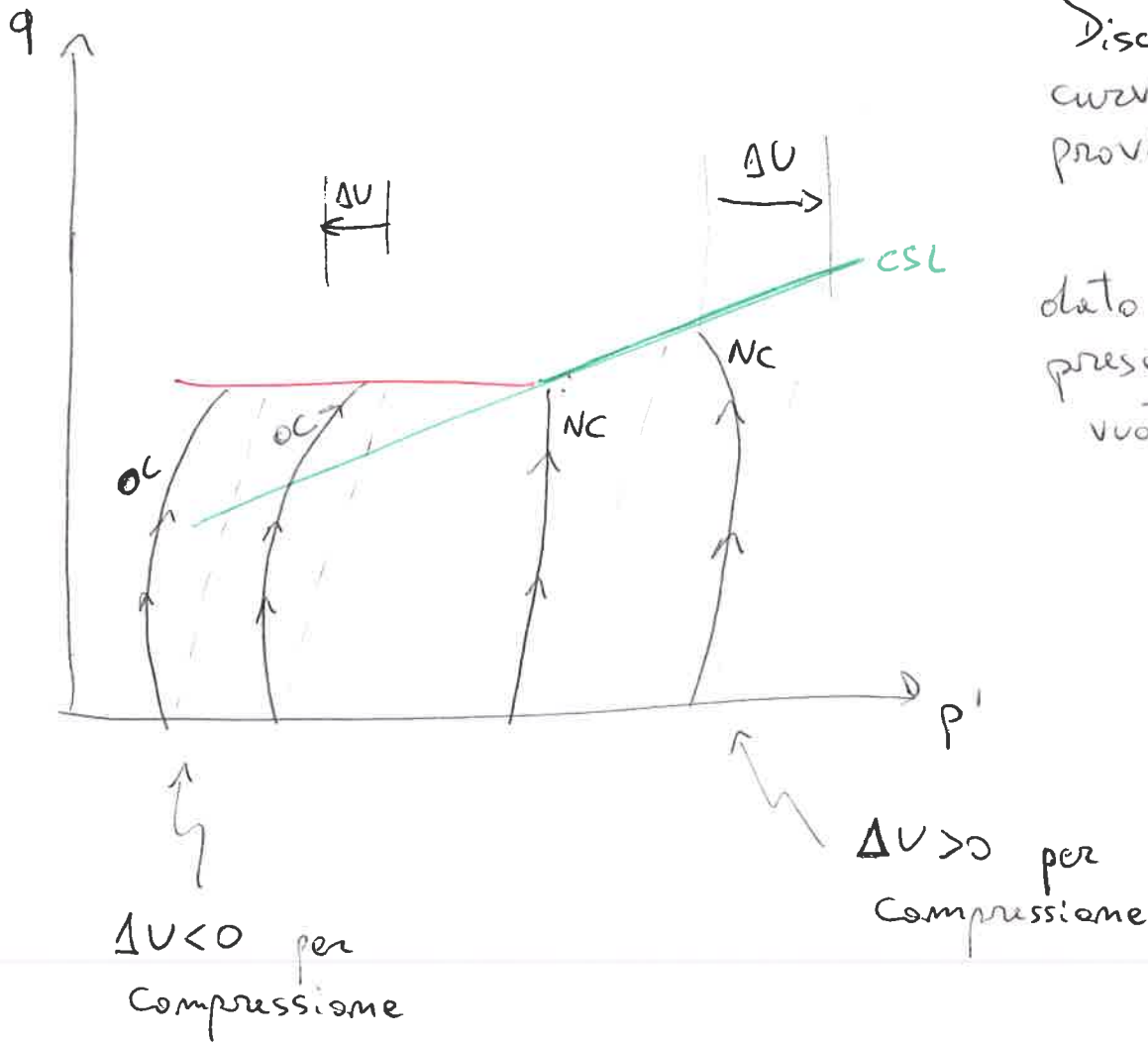


Le argille sovraconsolid. interessano la parte di scarico dopo lo smervamento (SR)

NON DRENATA

Le due fasi della prova triassiale sono:

1. Consolidazione isotropica a P_c' , decompressione isotropica a P_0' ;
2. Compressione non drenata del provino.

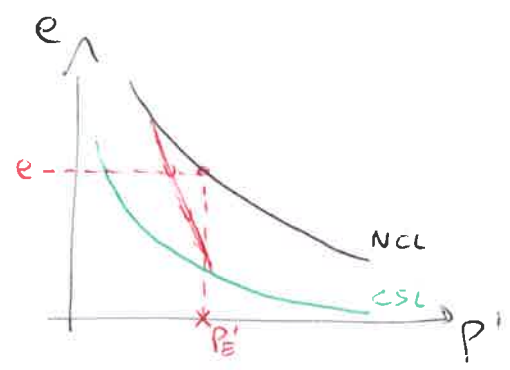
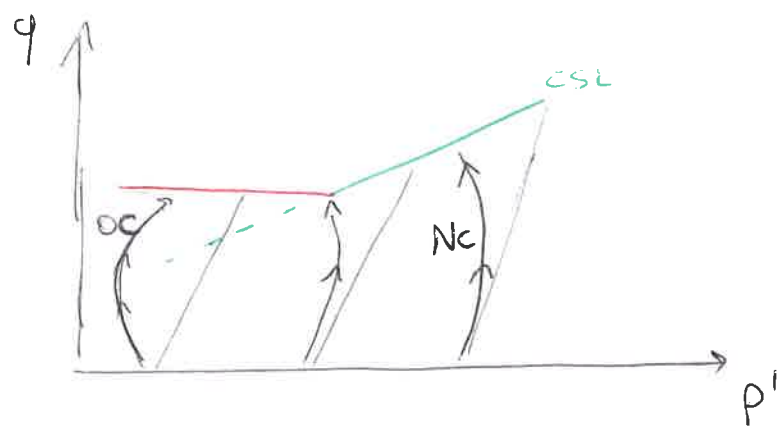


Discostamento delle curve rispetto ai provini drenati
↓
dato dalla presenza di vuoti interstiziali (u)

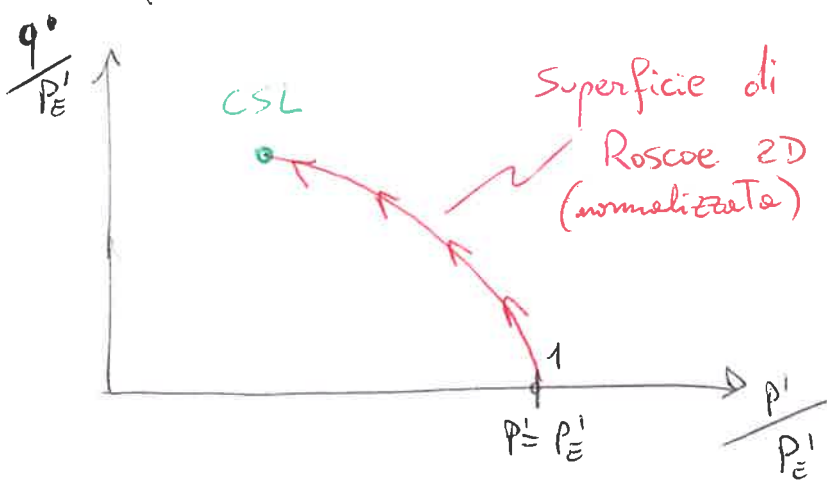
2.1

NORMALIZZAZIONE → Legge di flusso associato

Dal grafico q/p' delle argille NC (o poco OC) con comportamento non drenato

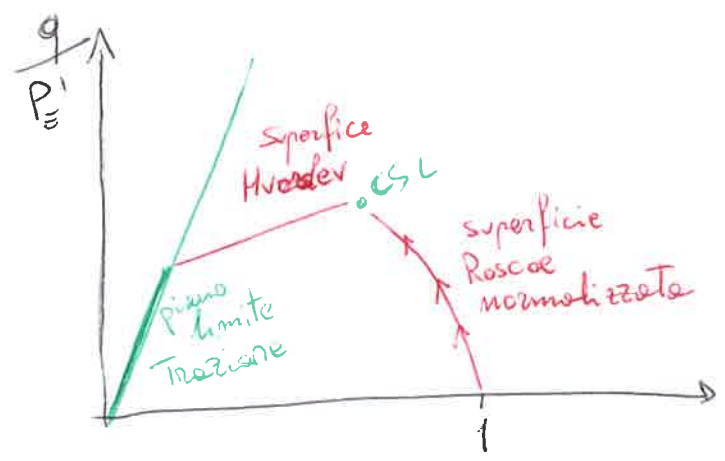


si trovano gli sforzi equivalenti p'_E corrispondente a e costante sulla NCL.



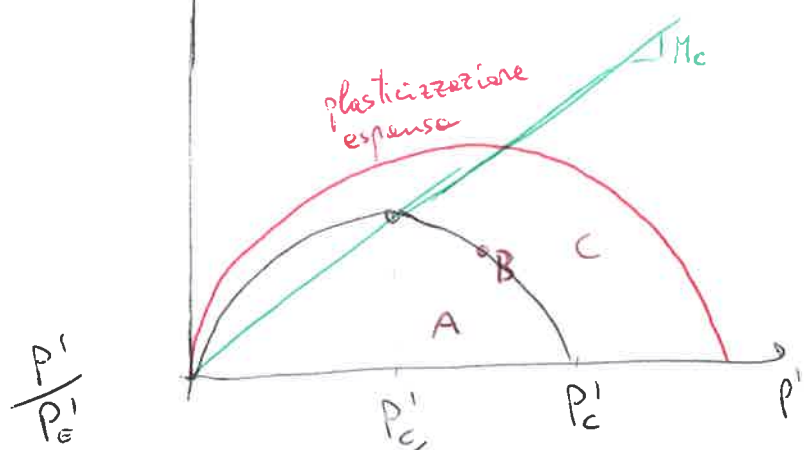
Per argille drenate si costruisce il grafico 3D della superficie di Roscoe con p' costante.

Nel complesso, si analizzano i comportamenti delle prove Triassiale.



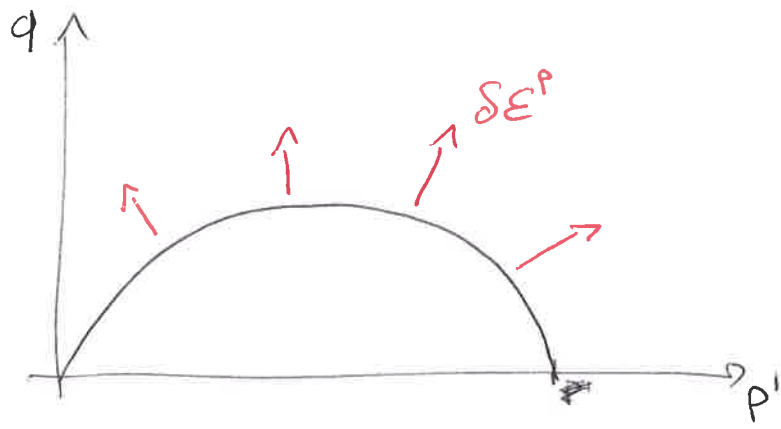
CURVA DI PLASTICIZZAZIONE

ellisse $F = (p')^2 - p'p'_c + \frac{q^2}{M^2} = 0$



- A = stato Tensione elastico
- B = plasticizzazione
- C = stato elasto-plastico

Legge di flusso associata,
cioè deformazione ortogonale
all'ellisse di plasticizzazione



Deformazione plastica $\Delta \epsilon^p$

ipotesi di Taylor = Cam Clay
deformazione equivalente = Cam Clay modificato

Cam Clay

ipotesi $p' \Delta \epsilon_v^p + q \Delta \epsilon_s^p = \Delta \epsilon_s M p'$ → solo attrito

diviso $p' \Delta \epsilon_s^p$: $\frac{\Delta \epsilon_v^p}{\Delta \epsilon_s^p} + \frac{q}{p'} = M$

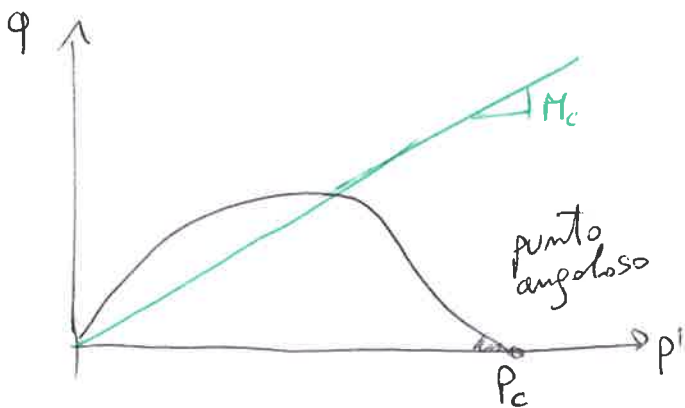
legge di flusso assoc.
dati i
Termini $\left\{ \begin{array}{l} -\frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{\Delta \epsilon_v^p}{\Delta \epsilon_s^p} \\ \frac{q}{p'} = \eta \end{array} \right.$

Allora si ha $\boxed{-\frac{\Delta q}{\Delta p'} + \eta = M}$, con $q = \eta p'$

ovvero $-\frac{d(\eta p')}{dp'} + \eta = M \Rightarrow -\eta \frac{dp'}{dp'} + p' \frac{d\eta}{dp'} + \eta = M$

$\frac{p'}{dp'} = \frac{M}{d\eta} \rightsquigarrow \frac{dp'}{p'} = \frac{d\eta}{M}$ integrato vale $\boxed{\frac{\eta}{M} = \ln\left(\frac{p'}{p_c}\right)}$

funzione
di smorzamento



2.2

Con Chey Modificato

ipotesi $p' \Delta E_v^P + q \Delta E_s^P = P' \sqrt{(\Delta E_v^P)^2 + M^2 (\Delta E_s^P)^2}$

diviso $p' \Delta E_s^P$: $\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P} + \frac{q}{p'} = \sqrt{\left(\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P}\right)^2 + M^2}$

elevato alla II entrambi i termini, con $\eta = \frac{q}{p'}$

$$\left(\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P} + \eta\right)^2 = \left(\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P}\right)^2 + M^2$$

$$\cancel{\left(\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P}\right)^2} + \eta^2 + 2\eta \frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P} = \cancel{\left(\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P}\right)^2} + M^2$$

quindi $\boxed{\frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta}}$

Avendo definito la legge di flusso associata

$$\boxed{-\frac{dq}{dp} = \frac{\Delta E_v^P}{\Delta E_s^P}}$$

quindi $\frac{dq}{dp} = \eta + p' \frac{d\eta}{dp'}$

↓
vale $-\eta - p' \frac{d\eta}{dp'} = \frac{M^2 - \eta^2}{2\eta}$

ovvero $-p' \frac{d\eta}{dp'} = \frac{M^2 + \eta^2}{2\eta}$

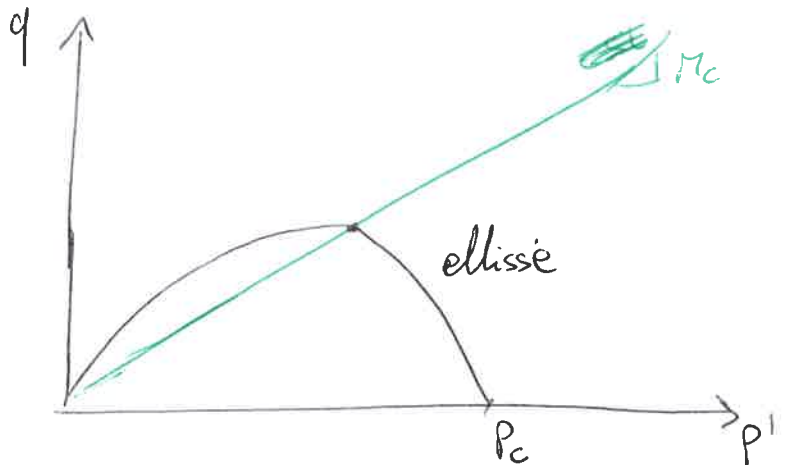
inversa per integrare ...

$$-\frac{dp'}{p'} = \frac{2\eta d\eta}{M^2 + \eta^2}$$

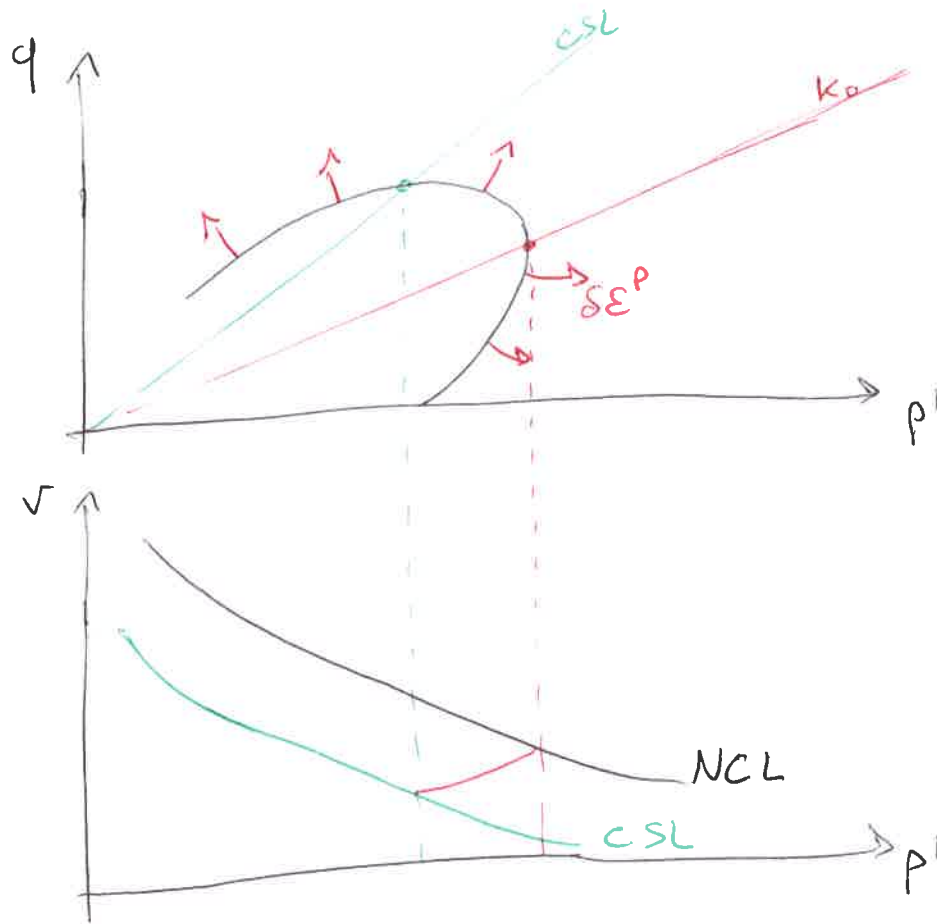
si ottiene $\ln(M^2 + \eta^2) = \ln\left(\frac{P_c}{p'}\right) \rightarrow M^2 + \frac{q^2}{p'^2} = \frac{P_c}{p'}$

⇒ Equazione ellittica

$$\boxed{q^2 = P_c p' - M^2 p'^2}$$



Traslazione dell'ellisse



Comportamento della
Traslazione, in
rotazione solidale
alle pendenze k_0

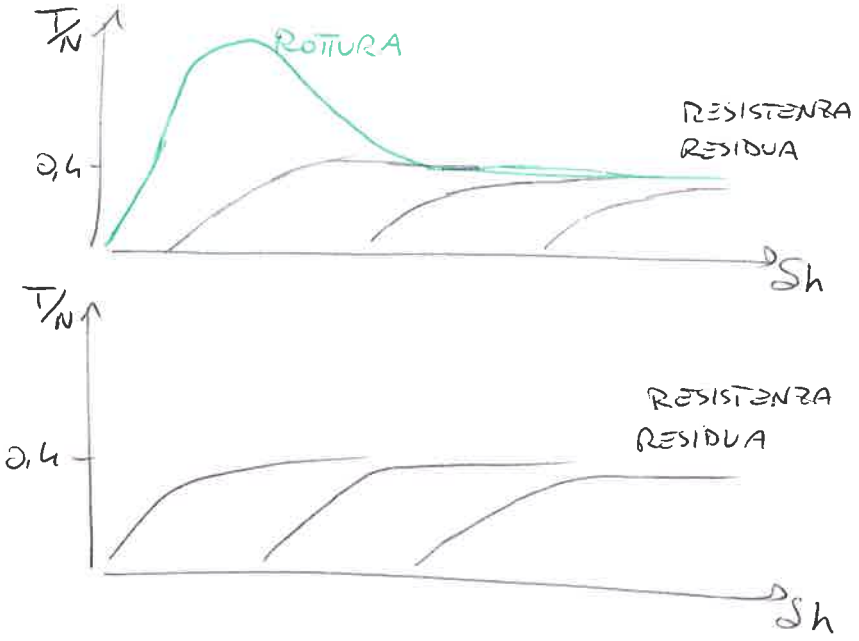
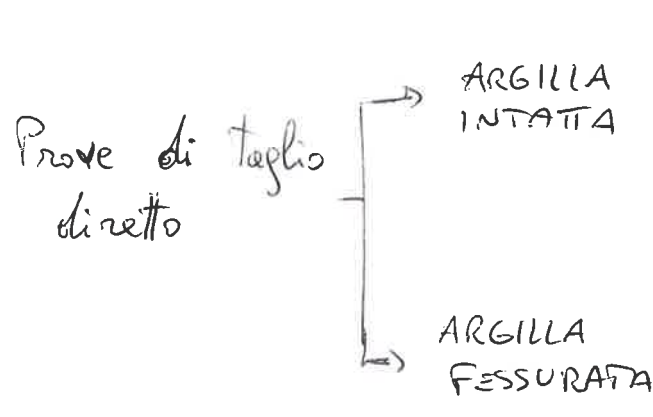
$$\frac{\Delta q}{\Delta p'} = \frac{(1-k_0)^3}{1+2k_0} = f(k_0)$$

Cause della sovraconsolidazione

- scarico meccanico, dopo un sovraccarico;
- aging, per carico costante e prolungato nel tempo;
- formazione di legami di cementazione;
- essiccamento del terreno.

③

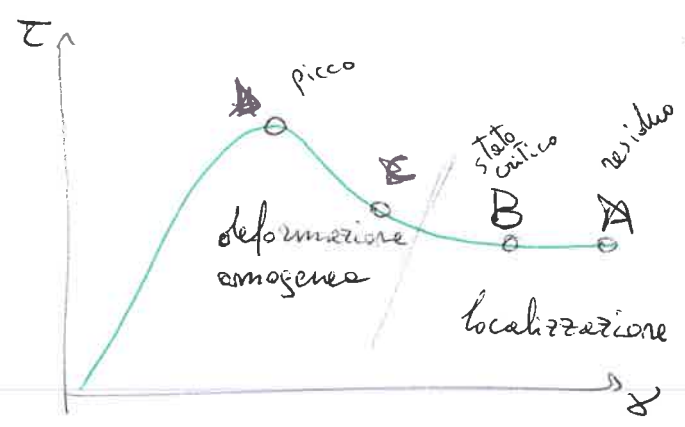
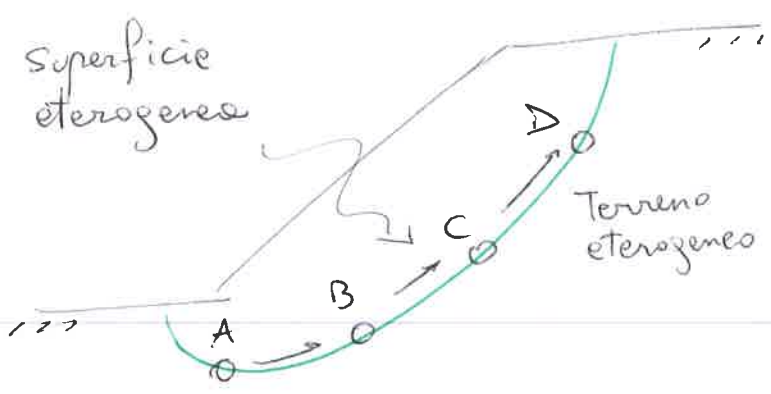
ARGILLA MOLTO OC



Comportamento eterogeneo in base al punto in analisi dell'argilla. Se intatta, necessita del picco per fessurarsi.

→ Rottura progressiva

Rottura lungo la superficie di scorrimento in maniera progressiva del piede alla superficie.

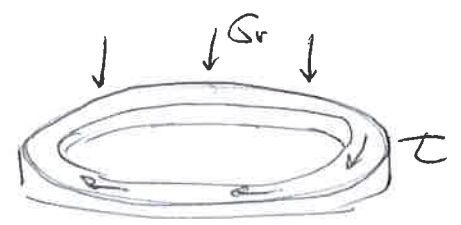


⇒ In genere, argille molto oc sono fessurate, quindi si considera un grande campione contenente giunti, per descrivere un famiglia di fessure.

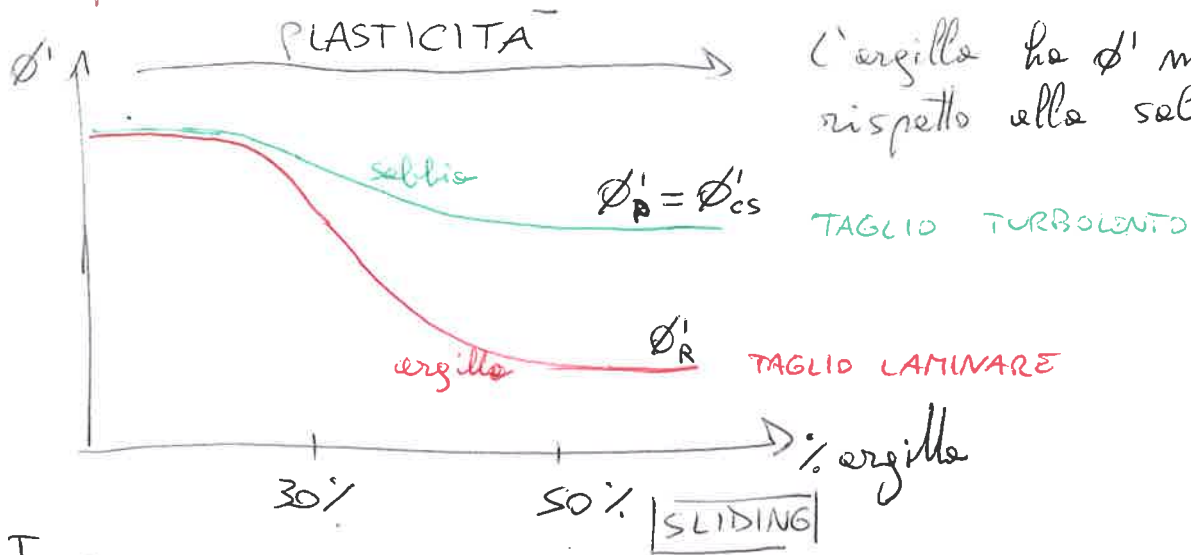
→ Resistenza residua

si valuta la resistenza con argille fratturate a grandi deformazioni.

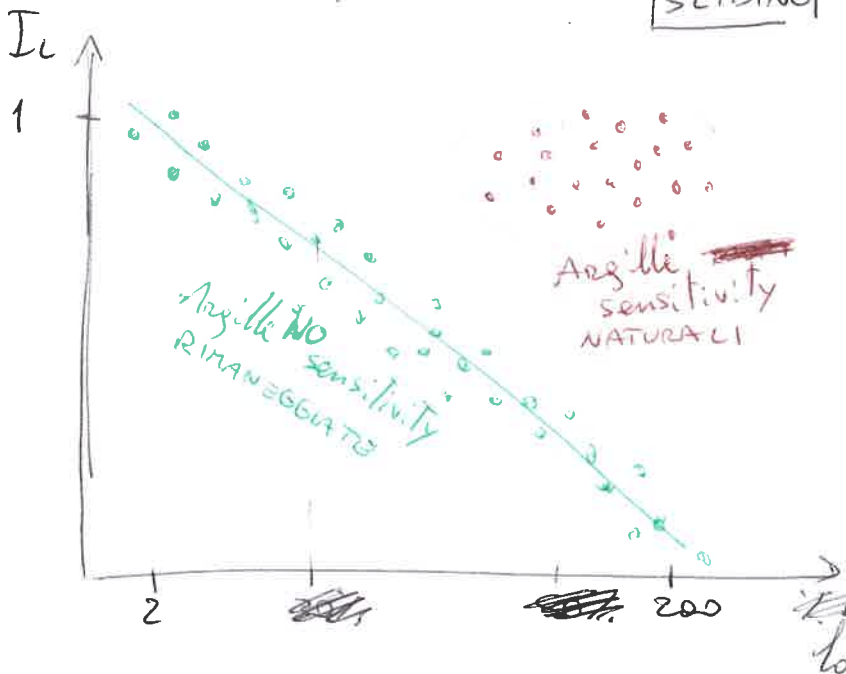
PROVA DI TAGLIO ANULARE



Campione eterogeneo SABBIA + ARGILLA



L'argilla ha ϕ' molto minore rispetto alla sabbia.

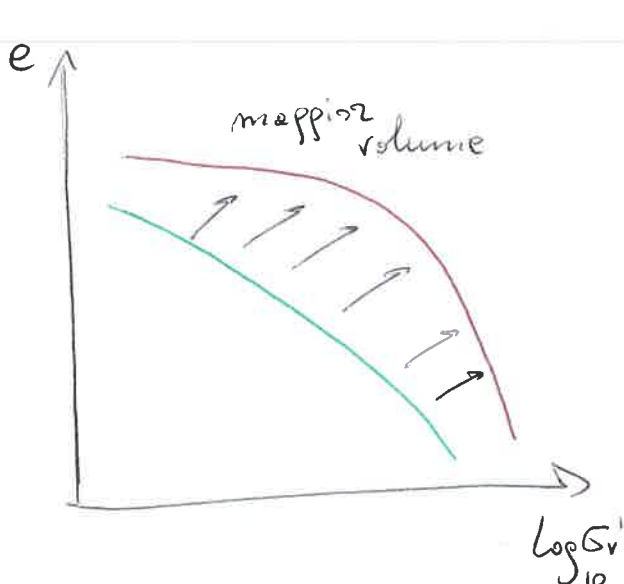


$$S_u = \frac{C_u \text{ naturale}}{C_u \text{ rimaneeggiato}}$$

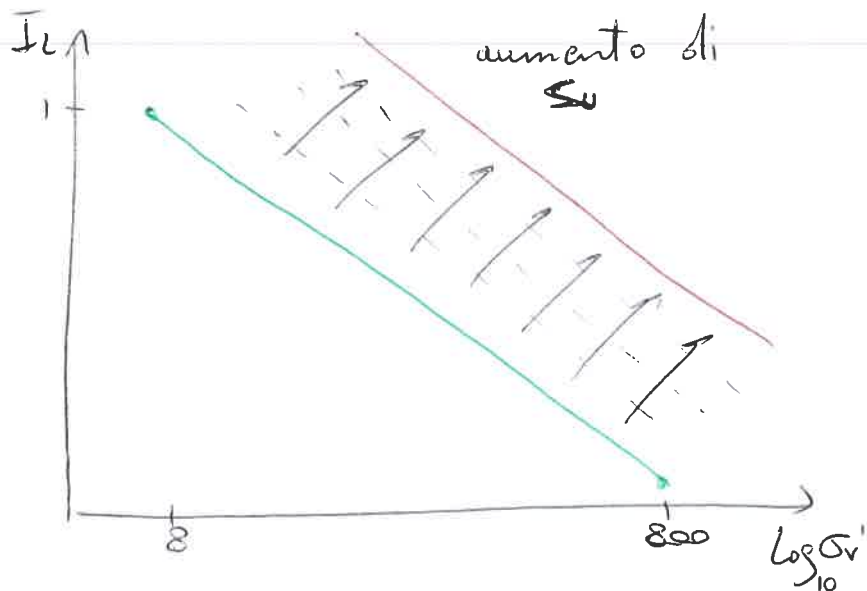
$$S_u \begin{cases} = 1 \text{ naturale} \\ \gg 1 \text{ rimaneeggiato} \end{cases}$$

$$\left[I_L = \frac{w - w_p}{w_L - w_p} \right]$$

* Le argille sensitivity hanno un contenuto d'acqua superiore alle attese, quindi con enormi variazioni in volume.

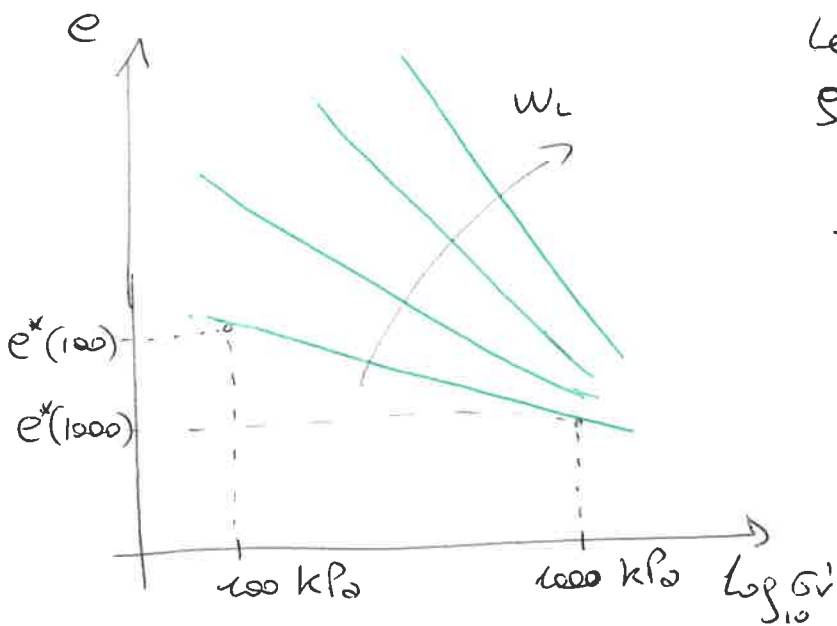


COMPRESSIONE EDOMETRICA



~~ARGILLE~~

3.1 \rightarrow esperimento di Borland (1950) $w_L = 25 \div 127$



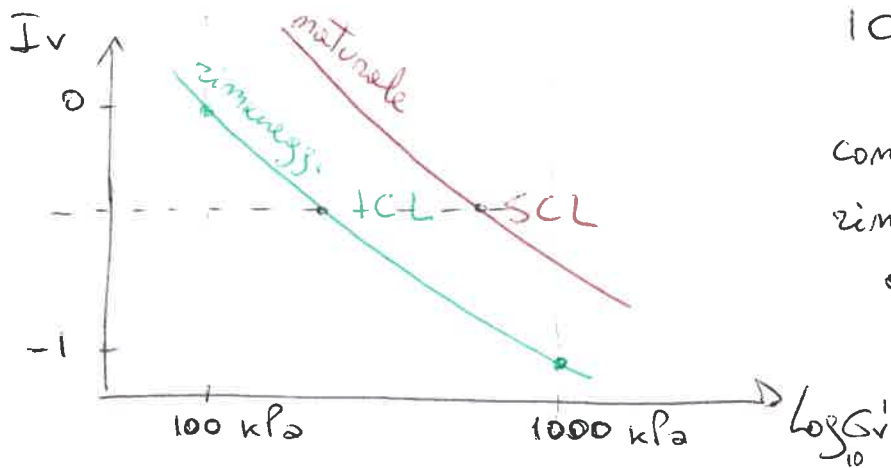
Le argille naturali rimeneeggiate perdono la storia tensionale

$$I_v = \frac{e - e^*(100)}{e^*(100) - e^*(1000)}$$

indice volumetrico



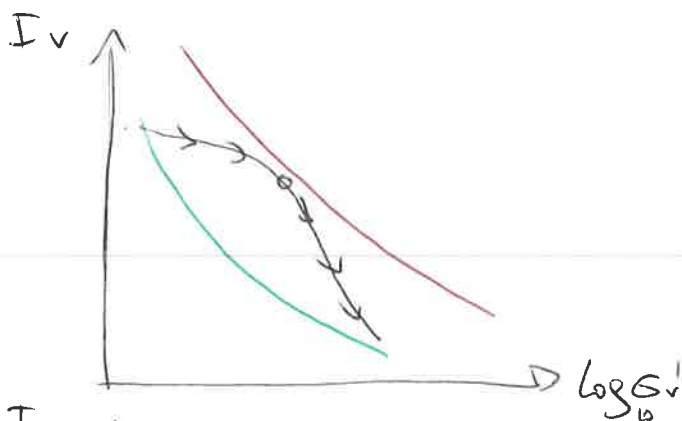
NORMALIZZAZIONE delle CURVE



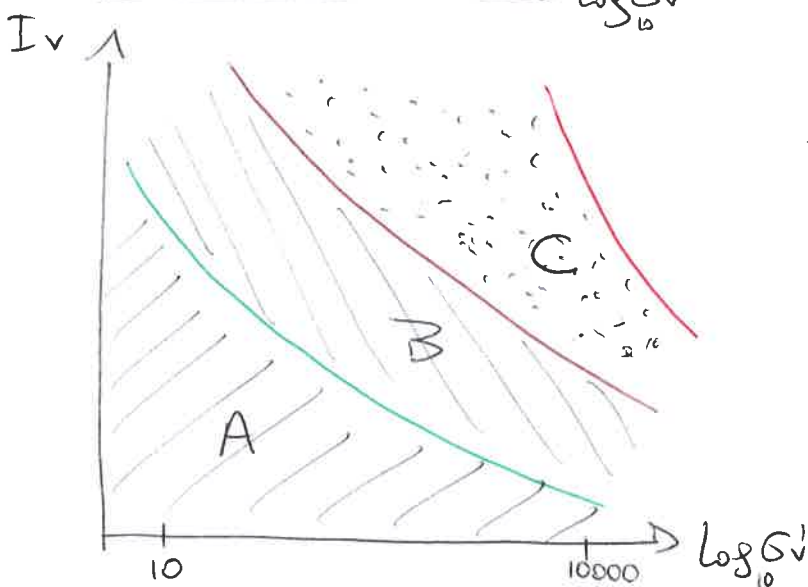
ICL = intrinsic compression line

compressione di argilla rimeneeggiata sottoposta a consolidazione

SCL = sedimentation compression line (A. NATURALE)



La curva di compressione dell'argilla naturale passa dalle SCL alla ICL dopo la tensione di preconsolidazione.



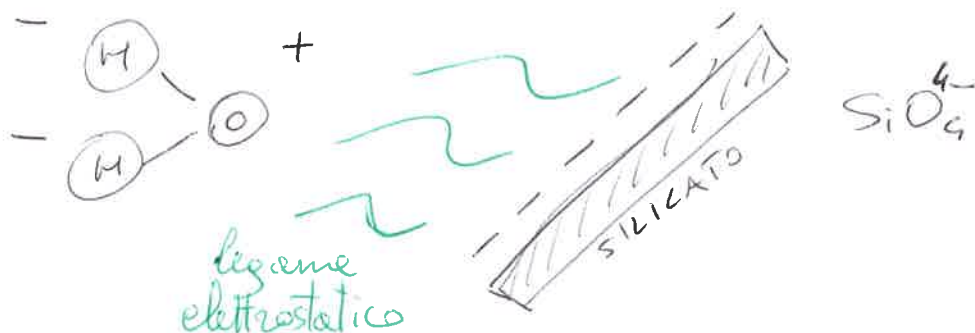
A = campo argille OC

B = campo argille NC

C = campo argille carbonatiche (quick clays)

INTERAZIONI CHIMICHE

Nella parte più esterna dell'argilla si forma uno strato di ioni negativi, essendo composta da silicati, che reagisce con gli ioni positivi e polari dell'acqua -



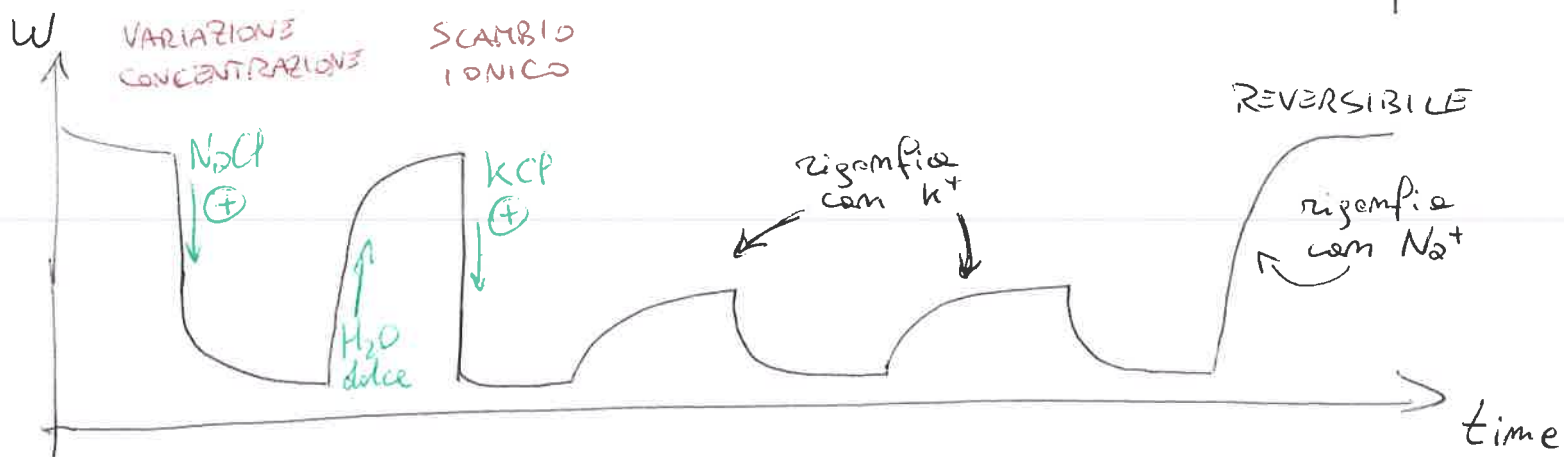
Alterazione del comportamento (Reversibile)

SCAMBIO IONICO

differenza di concentrazione ed elettro negatività

VARIAZIONE CONCENTRAZIONE

compressione del doppio strato per il sale in acqua



Com w bassi, argilla più compatta e d'alto, con più cedimenti -

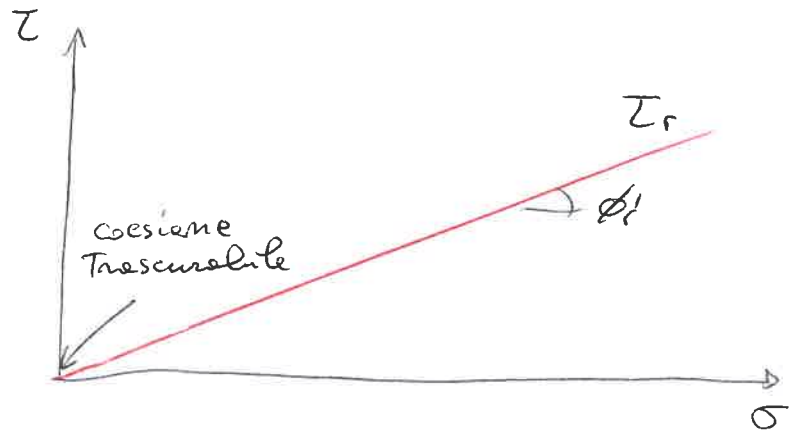
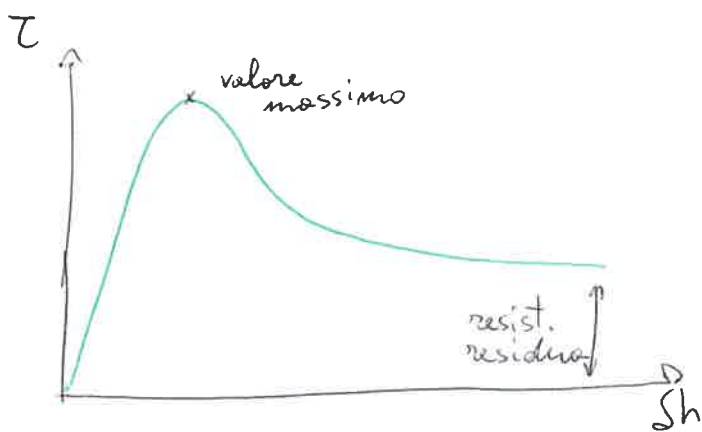
- H_2O dolce \rightarrow aumenta w e si dilata
- H_2O salata \rightarrow diminuisce w e si comprime

④ Prova di taglio anulare

Durante la prova di taglio, per la gran parte dei materiali, la resistenza al taglio raggiunge un valore massimo per poi diminuire conservando un valore limite inferiore come RESISTENZA RESIDUA. Questa permette di conoscere la resistenza minima del terreno sulla quale fare affidamento nella progettazione delle opere di sostegno.

Si traccia un involucro

$$\tau_r = c'_r + \sigma'_n \tan \phi'_r \rightarrow \sigma'_n \tan \phi'_r$$



Lo studio della resistenza al taglio residua, può essere realizzato in laboratorio con:

- le scatole di Casagrande,
- Apparecchiature di taglio torsionale.

Il taglio torsionale accoglie un provino anulare, con uno scorrimento continuo, con i vantaggi:

- invariabilità della superficie di scorrimento,
- univocità del senso di rotazione,
- maggiore uniformità delle tensioni tangenziali,
- tempi di prova nettamente ridotti.

Nella apparecchiatura torsionale la cella di taglio è divisa in due parti, inizialmente collegate tra loro e contenenti il provino anulare:

- la metà inferiore rimane solidale all'apparecchiatura

e ruota a velocità costante,
- la metà superiore viene contrastata da una coppia di
anelli dinamometrici che misurano il momento tor-
cente applicato dalla macchina, equilibrato dalla
resistenza al taglio del terreno.

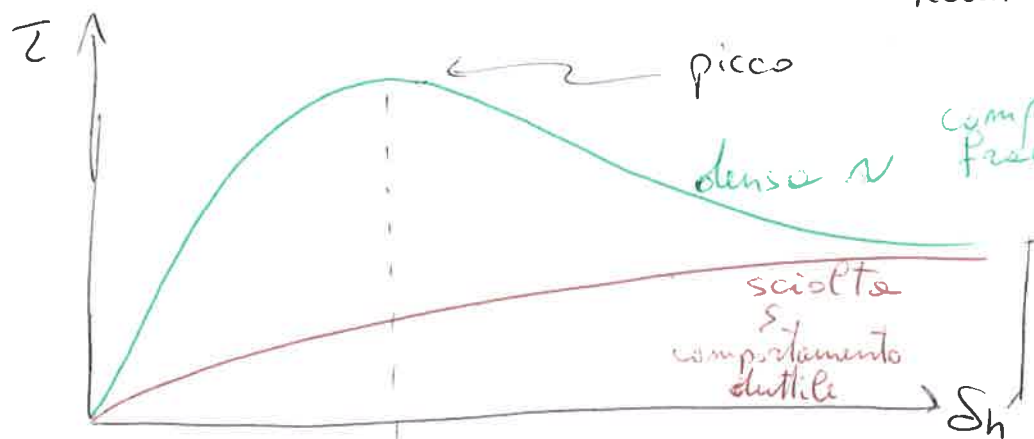
È sufficiente effettuare un minimo di tre prove su un
solo provino, variando la pressione normale ad ogni pro-
vino. La fase di taglio può essere iniziata a velocità
elevata per creare la superficie di rottura. Dopo aver at-
teso la dissipazione delle pressioni mentre, inizia la
fase residua ~~della~~ velocità calcolata in base ai dati del
la fase di consolidazione. La prova finisce quando il
momento torcente ha un valore minimo costante.

La scatola di Casagrande prevede due modalità:
→ la procedura completa, dopo la rottura, procede con
la determinazione della resistenza residua, effettuando
almeno cinque cicli completi di andata e ritorno
della scatola di taglio fino a fondo corsa alla me-
desima velocità di scorrimento adottata per la determi-
nazione della resistenza di picco.
→ la procedura semplificata determina la resisten-
za eseguendo cinque cicli di taglio veloci, fino a
deformazioni del 20% per ciclo, e di un ciclo di
taglio finale con misura della resistenza al taglio
in funzione dello scorrimento orizzontale, condot-
ta alle stesse velocità di scorrimento per il picco.

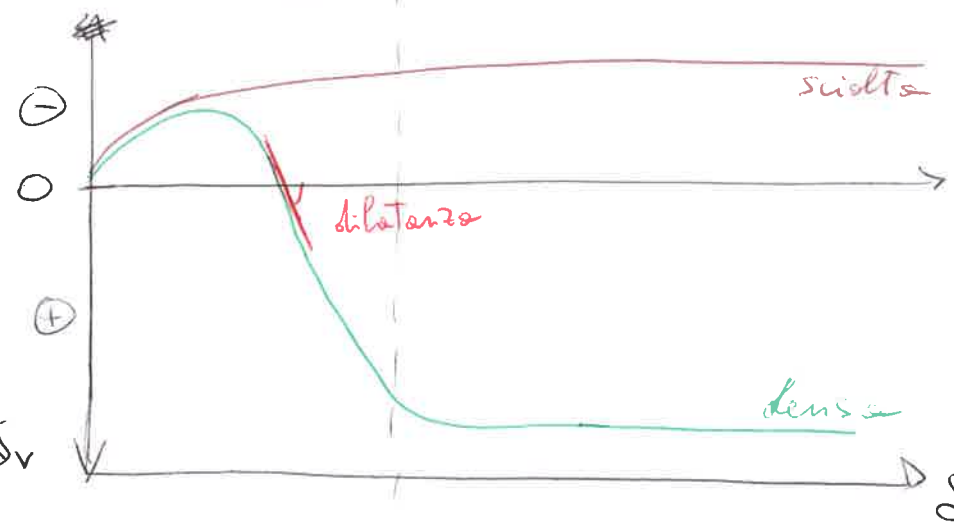
4) COMPORTAMENTO SABBIE

SABBIA DRENATA

$$\text{Densità Relativa} = \frac{e_{max} - e}{e_{max} - e_{min}}$$

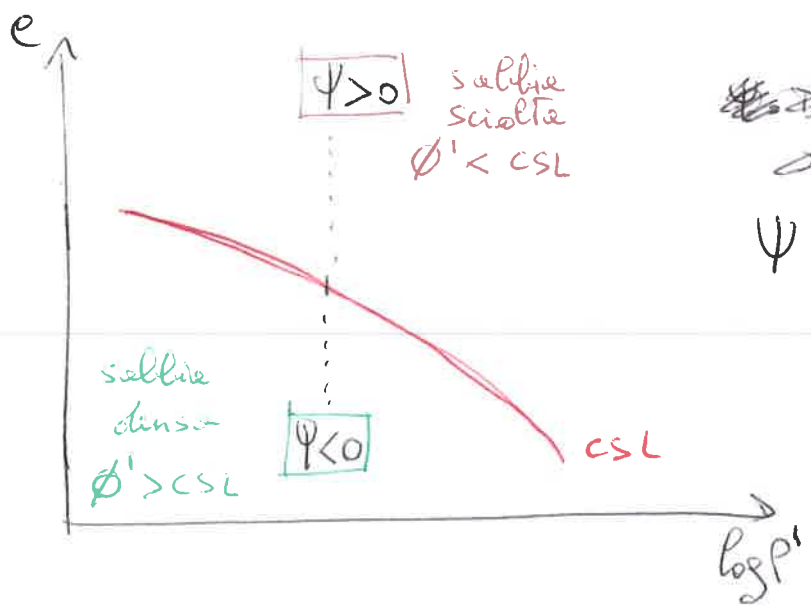


RESISTENZA RESIDUA



sabbie sciolte si comprime

sabbie dense si dilata



~~DILATAZIONE, aumento o riduzione di volume~~

$\Psi = \text{PARAMETRO DI STATO}$
 $= e - e_{CSL}$

DILATAZIONE: variazione di volume rispetto alla

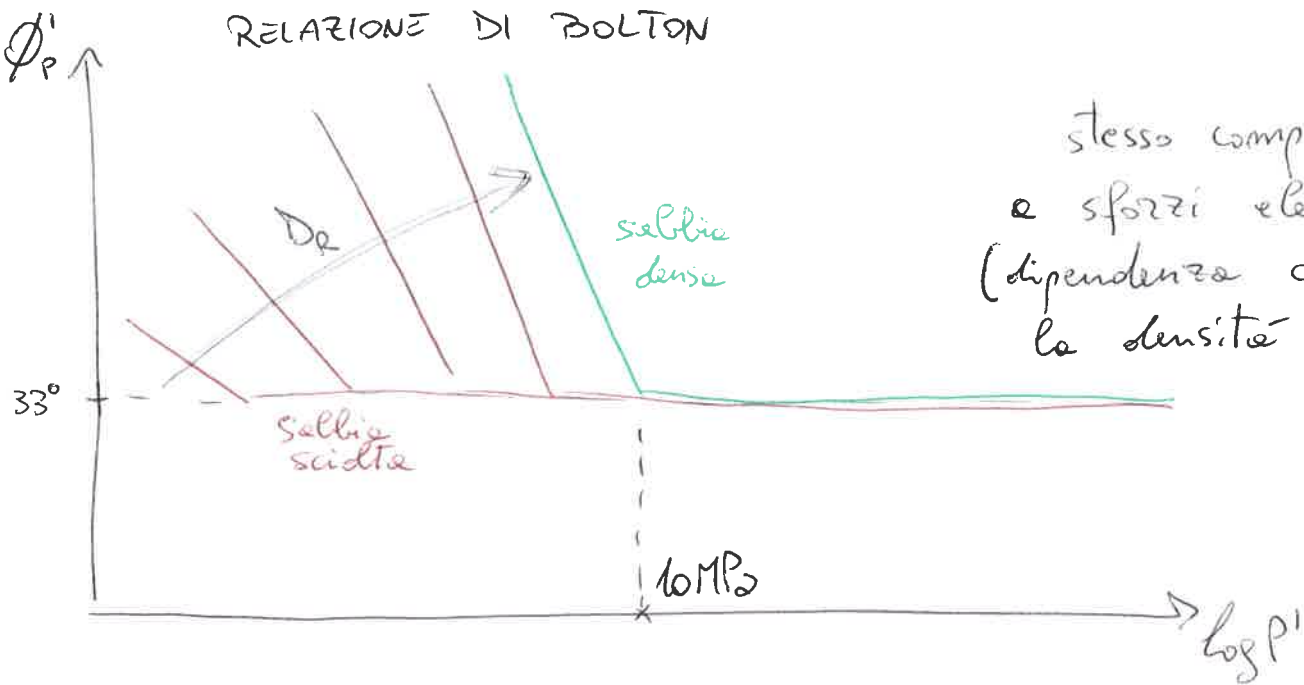
distorsione

$$\frac{\Delta e_v}{\Delta \gamma}$$

← Per sabbie dense

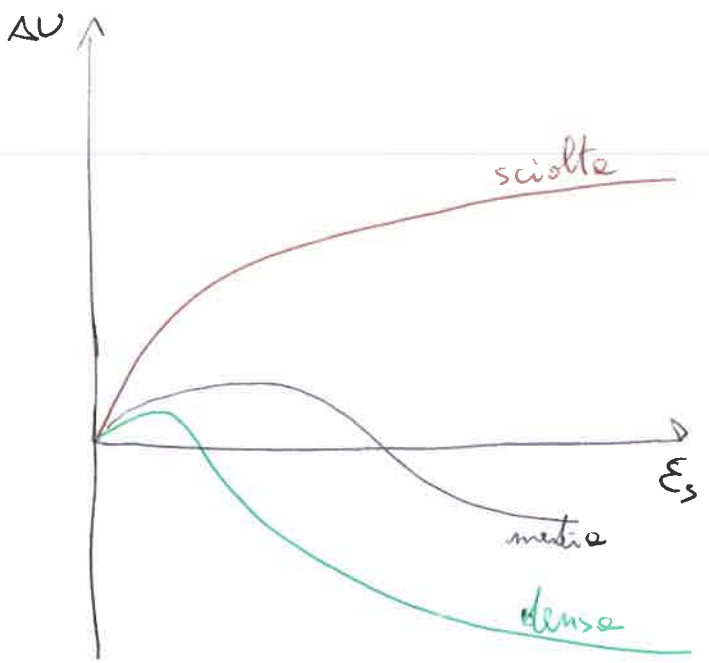
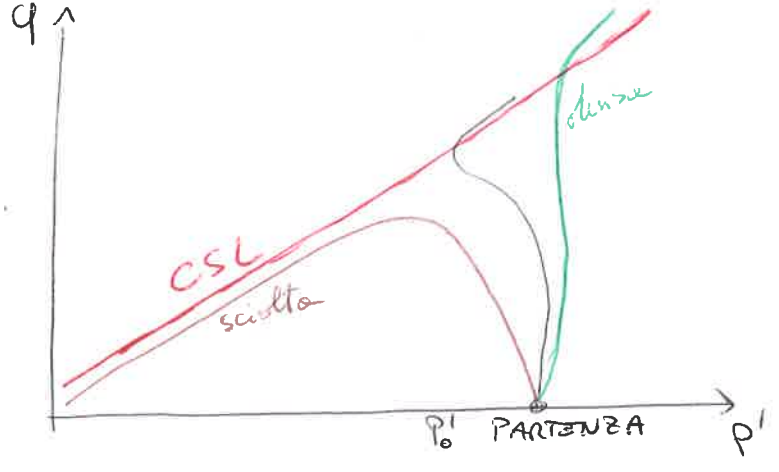
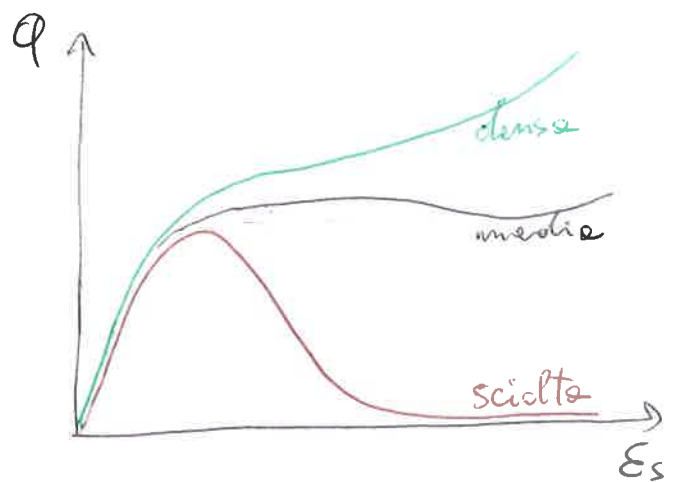
$$\frac{\tau}{\sigma} = \mu + \frac{\Delta e_v}{\Delta \gamma}$$

RELAZIONE DI BOLTON



stesso comportamento
e sforzi elevati
(dipendenza con
la densità D_r)

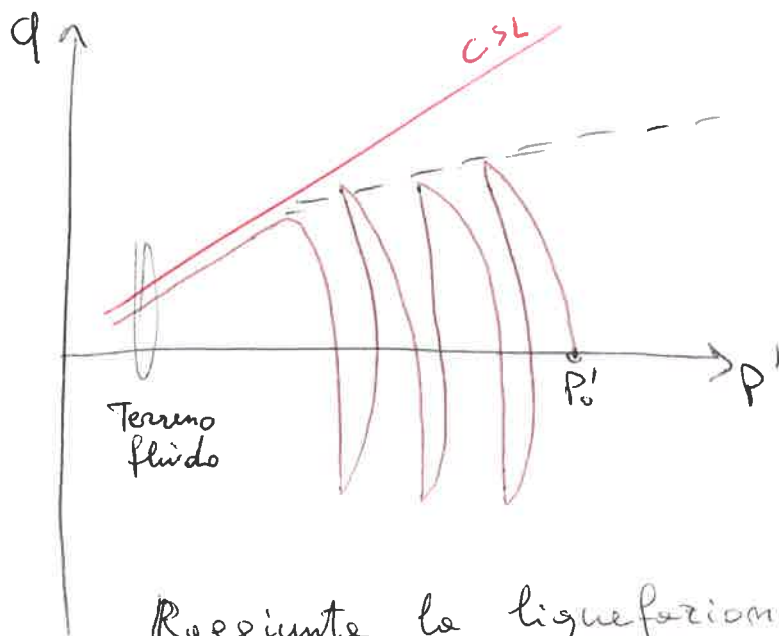
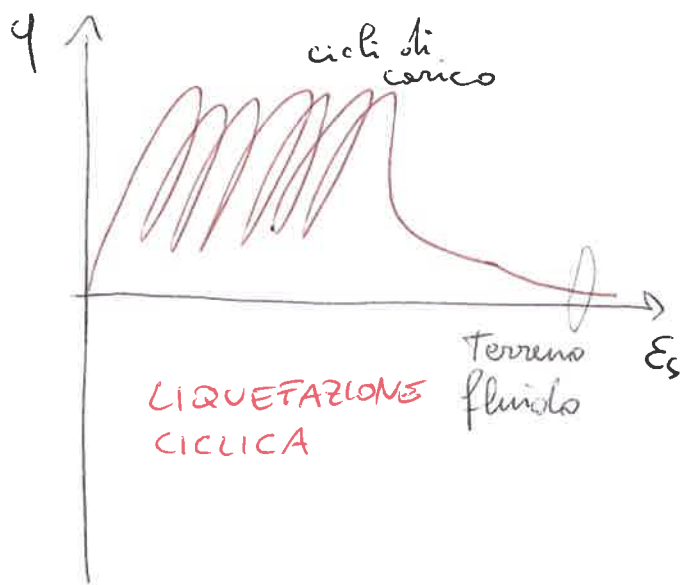
SABBIA NON DRENATA



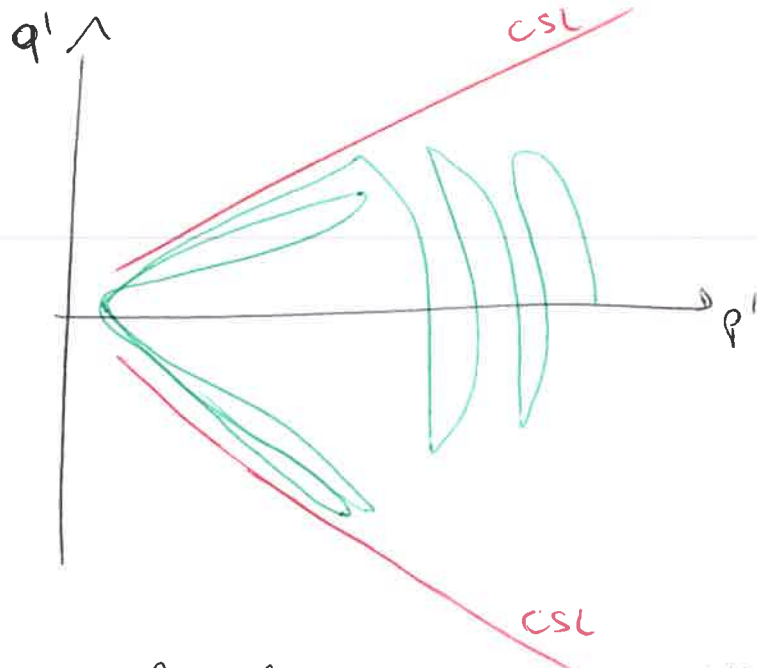
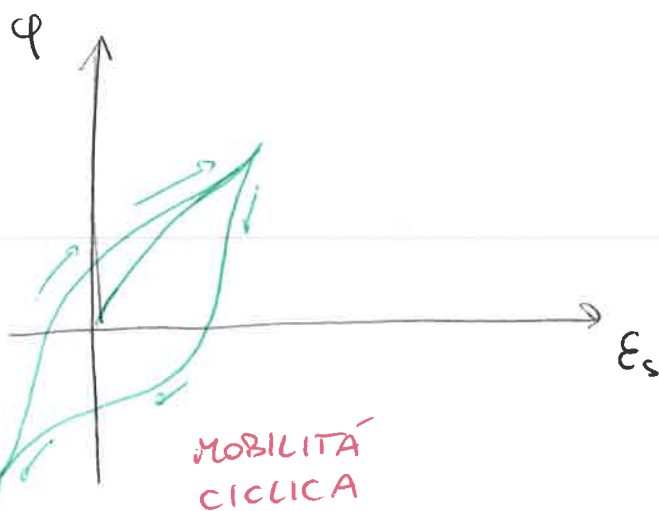
Con A_u alti (molta
acqua) resistenza
Bassissima

⇓
LIQUEFAZIONE
STATICA

5
Prove cicliche



Raggiunta la liquefazione per sabbie non drenate sciolte, per carichi ciclici (sisma) o molto rapidi.



⇒ CAUSA del COMPORTAMENTO è la legge di flusso delle sabbie non associate. l'angolo di dilatanza è molto minore dell'angolo di resistenza.

$$\tilde{\psi} \ll \phi'$$

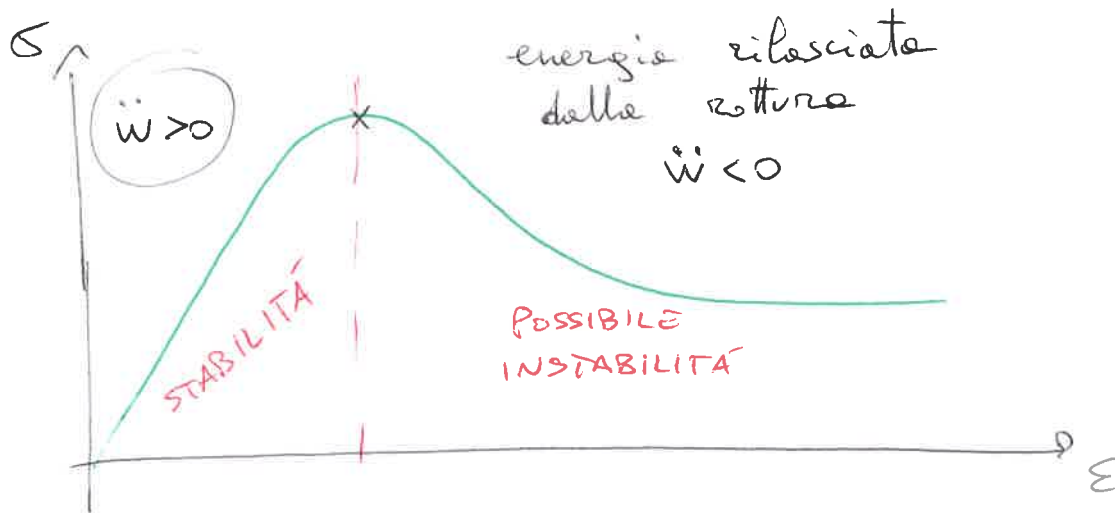
LAVORO del II ORDINE

Primo ordine $\Delta W = \sigma \cdot \Delta \epsilon$

→ Secondo ordine $\Delta W = \Delta \sigma \cdot \Delta \epsilon$

Orvvero rappresenta l'energia da dare al campione per indurre una piccola deformazione.

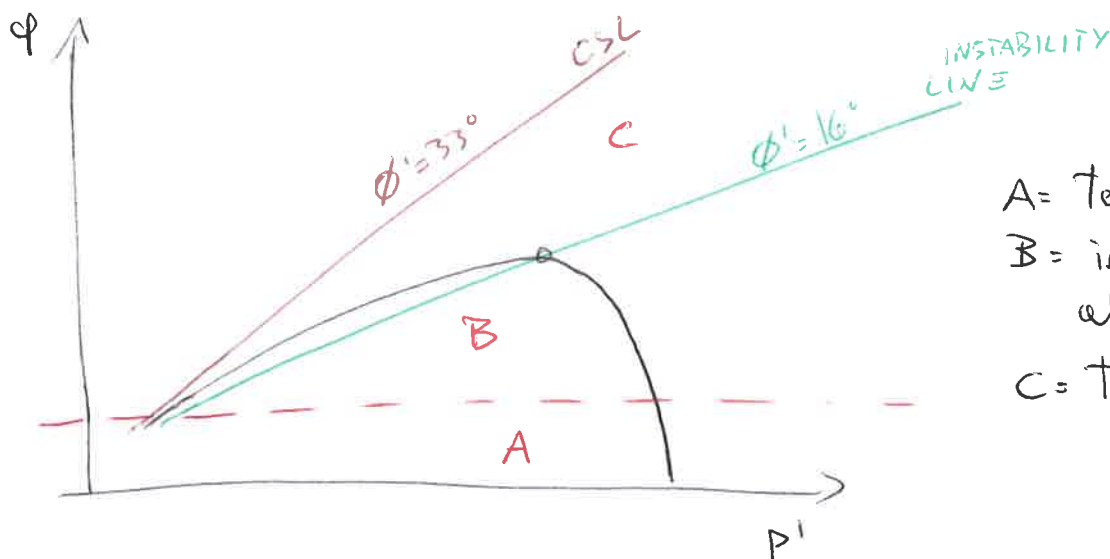
$$\ddot{W} = \int \dot{\sigma} \cdot \dot{\epsilon} dV \quad \text{sempre positiva } > 0 \quad \left(\begin{array}{l} \text{per la} \\ \text{stabilit\`a} \end{array} \right)$$



Si considera anche l'energia dell'apparecchiatura $\ddot{\Omega}$

$$\ddot{\epsilon} = \ddot{W} + \ddot{\Omega} \quad \text{sempre positiva } > 0$$

(Usando dei pesi $\ddot{\Omega} = 0 \rightarrow$ risultato reale $\ddot{\epsilon} = \ddot{W}$,
 Usando un pistone $\ddot{\Omega} > 0 \rightarrow$ risultato falsato con sovrastima di $\ddot{\epsilon}$



- A = Terreno stabile
- B = instabile per numero alto di cicli
- C = terreno instabile

⑥

Il fenomeno della LIQUIDAZIONE è tenuto conto nell'analisi sismica se l'accelerazione è grande ($a_{max} > 0,1g$), la folla è superficiale con acclività, la sabbia è eterogenea.

Si tiene conto di un parametro E_r di rendimento con cui normalizzare le prove dinamiche SPT.

$E_r = 60\%$ quindi $(N_1)_{60}$ è riferito a $G'_v = 100 \text{ kPa}$.

$$(N_1)_{60} = E_r \cdot N_{SPT} \cdot \frac{C_N}{60}$$

in cui $C_N = \left(\frac{98}{\sigma'_{v_0}}\right)^{0,5} < 2$

Anche la prova CPT descrive gli stessi parametri normalizzati trovando $(q_c)_{IN}$.

Infine, il fattore di sicurezza è dato da

$$F_s = \frac{CRR \cdot M_{sf} \cdot K_d}{CSR}$$

con M_{sf} , K_d coefficienti correttivi di magnitudo e pendenza

$\left\{ \begin{array}{l} CRR = \text{funzione della granulometria, resistenza ciclo} \\ CSR = \frac{\bar{I}_{medio}}{\sigma'_v}, \text{ stress ciclo} \end{array} \right.$

Dissipazione plastica di Taylor

$$\text{Lavoro: } \Delta W^P = \sigma' \Delta \epsilon_v^P + \tau \Delta \gamma^P$$

somma effetti

$$\text{relazione taglio } \tau = \sigma' \mu$$

con $\mu = \tan \phi'$

$$\Delta W^P = \sigma' \Delta \epsilon_v^P + \sigma' \mu \Delta \gamma^P$$

normalizzazione in $\sigma' \Delta \gamma^P$

$$\frac{\Delta \epsilon_v^P}{\Delta \gamma^P} + \mu = \frac{\tau}{\sigma'}$$

effetto
dilatazione

massimo al picco

minimo al residuo

4

INDAGINI TERRENO

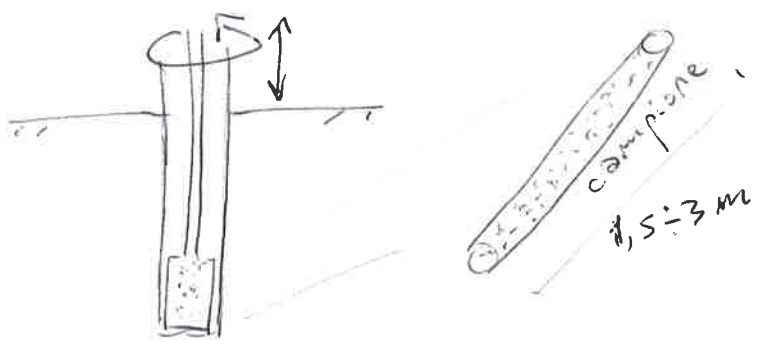
- ~~FAS~~ 1] Raccolta dei dati preliminari con le INDAGINI PRELIMINARI per la fattibilità, il PROGETTO dell'opera e il CONTROLLO durante i lavori e successivo.
- ~~FAS~~ 2] L'indagine è in base all'importanza dell'opera ed al tipo di sottosuolo, essendo costose.
- 3] Lo scopo è di determinare il modello delle caratteristiche con la successione stratigrafica, le proprietà meccaniche ed idrauliche, lo stato tensionale ed il regime del moto di filtrazione.
- 4] Definire l'estensione della profondità e larghezza delle indagini.

Le PROVE si distinguono tra "in sito" e in "laboratorio".
~~Le prime avvengono con~~

PROVE IN LABORATORIO

Traite il prelievo di campioni nel sottosuolo, con un certo grado di disturbo e caratteristiche alterate.

~~FAS~~ In genere si usano SONDAGGI DI PERFORAZIONE A ROTAZIONE, con un coroteggio continuo e l'estrazione di un tubo corotiene.

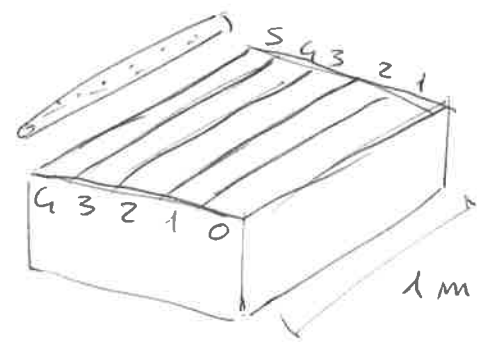


Tecnica usata per l'argilla, con DISTRUZIONE DI NUCLEO se c'è Troppe acqua

Il campione è disposto in cassette per essere valutato dal geologo:

$$\% \text{ carotaggio} = \frac{\sum l_i}{L_{\text{tot}}} = RQD$$

se è basso, c'è Troppa acqua.



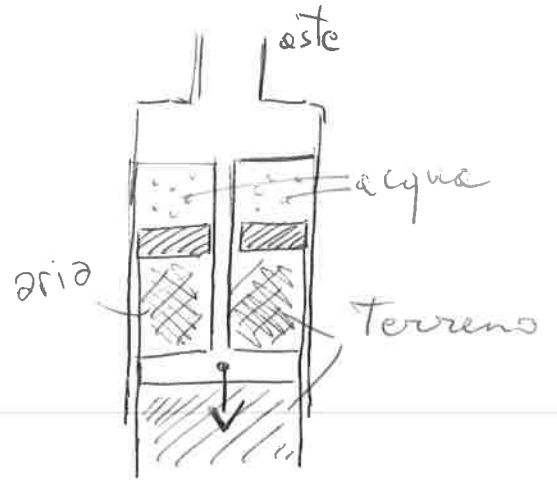
Per prelevare un terreno indisturbato, conservando la granulometria, w e la struttura dei grani, si usa un CAMPIONATORE A FONDO DEL FORO.



Taglia le argille più tenere, detto campionatore SHELBY (aperto). Non ruota e, in risalita, conserva il campione prelevato nella lamiera.

• CAMPIONATORE A PISTONE

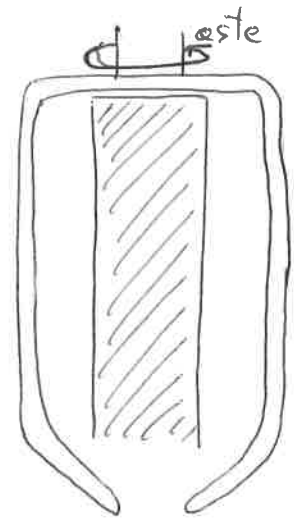
Per terreni meno consistenti e molto teneri ($c_u \approx 100 \text{ kPa}$)



• CAMPIONATORE DOPPIO A ROTAZIONE

Per terreni più consistenti.

La rotazione della parte esterna semplifica l'avanzamento e viene raccolto il terreno nella parte centrale.



② GRADO DI DISTURBO

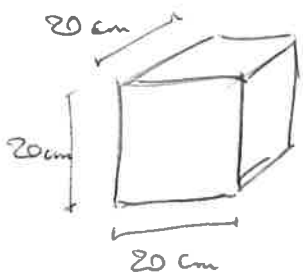
Viene misurato in 5 classi (Bassa ÷ alta qualità)

Q1 massimo disturbo
Q5 minimo disturbo, conserva w e struttura

Il campione di sabbia ha sempre un grado di disturbo, mentre il campione di argilla può essere indisturbato con un campimetro aperto.

CAMPIONI CUBICI

Sono campioni migliori, presi dal fondo di un sondaggio e sagomati.



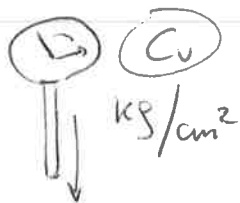
Generalmente è più grande di un carotaggio, quindi meno disturbato.

MISURA DI CONSISTENZA

solo per argille (Cv)

POCKET

VANE TEST



Applicati nei sondaggi molto profondi, ma non sempre affidabili.

PROVE IN SITO

Insieme alle prove di laboratorio, avvengono prove in sito per validare i dati raccolti.

I vantaggi sono che queste sono in continuo con la profondità, più rapide ed immediate, più affidabili per maggior terreno in analisi (con parametri di spinta e rigidità), utili per terreni grossolani e sabbie.

Lo svantaggio è la difficoltà di interpretare il risultato.

→ uso di grafici e tabelle empirici per la relazione tra misurazione e caratteristiche del terreno.

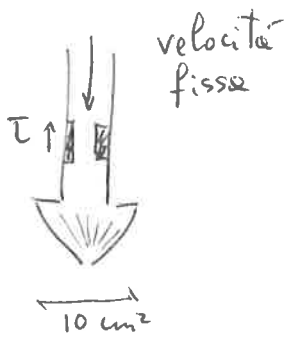
+ PROVE PIEZOMETRICHE - pressione acqua

- piezometri

- celle di pressione → pneumatiche
→ corde vibrante
→ strain gauge

Prove penetrometriche

La prova CPT (come penetration Test) è statica perché a velocità costante (2 cm/sec) -



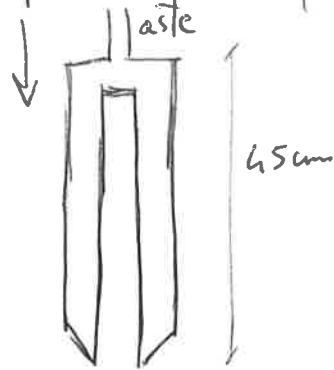
Il risultato è la misura della resistenza alla punta

$$q_c = \frac{R_p}{A}$$

Sul manico si misurano le τ.

- La prova MCPT definisce il cono meccanico, spinto idraulicamente dalle aste.
- La prova CPT è definisce il cono elettrico, grazie ai sensori sulla punta, acquisiti dal cavo in superficie.

La prova SPT (Standard penetration Test) è dinamica perché entra nel terreno grazie alle battiture con colpi in superficie -

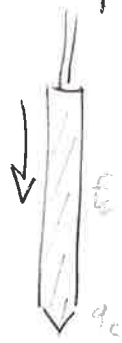


I dati sono il numero di colpi per distanza percorsa -

- $N_1 = 0 \div 15 \text{ cm}$ disturbato
- $N_2 = 15 \div 30 \text{ cm}$
- $N_3 = 30 \div 45 \text{ cm}$

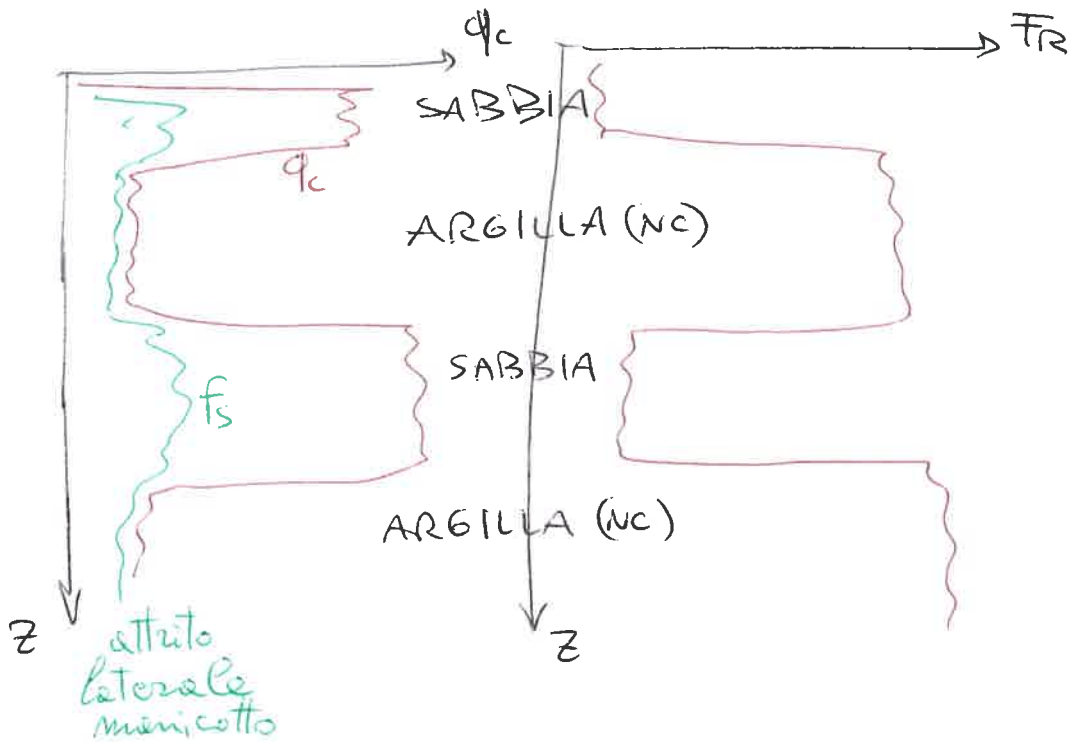
$$N_{SPT} = N_2 + N_3$$

④ Per terreni più grossolani si usa un penetrometro chiuso che registra gli $N_{SPTC} < N_{SPT}$



Lo strumento è più penetrante e ha bisogno di meno colpi.

I dati sono utili alla STRATIGRAFIA



La prova ha profondità massima di 30m per evitare di deviare le aste.

$$F_R = \frac{f_s}{q_c}$$

FRICITION RATIO

Il PIEZOCONO è in grado di misurare le pressioni interstiziali dell'acqua (ΔU) con un trasduttore.



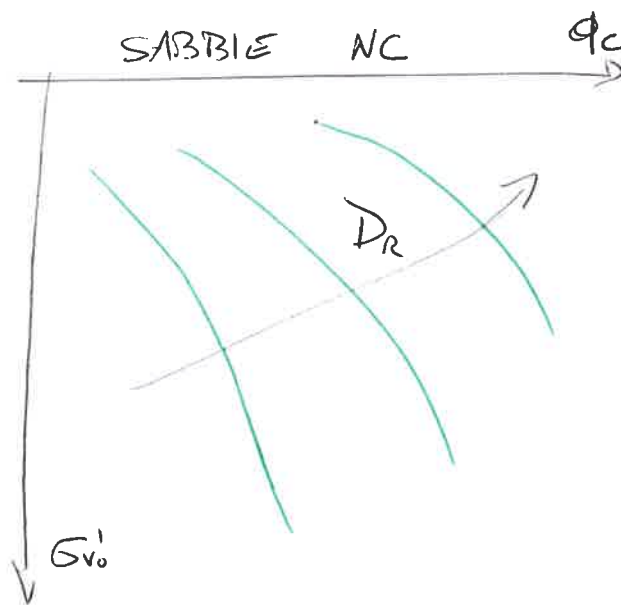
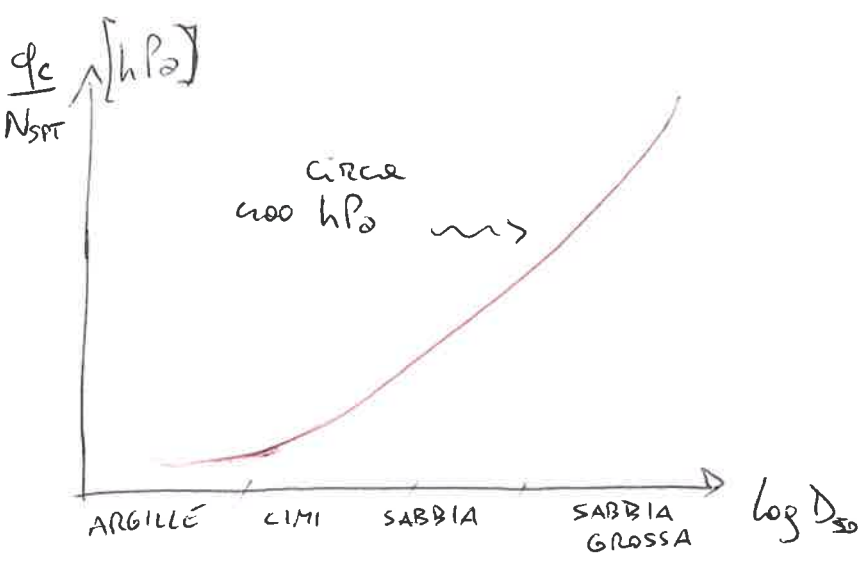
Si è in grado di registrare la differenza delle pressioni nella stratigrafia.

Si riconoscono piccoli strati di sabbie nell'argille e le infiltrazioni. Aiuta a capire i tempi di drenaggio in fase di consolidazione.

→ Interpretazione miscure

Relazione tra i dati raccolti e le caratteristiche del terreno

$q_c < \begin{cases} \text{argille} \\ \text{sabbie} \end{cases}$
 $C_u = \frac{q_c - \sigma_{v0}}{N_c}$
 $q_c = f(\sigma_{v0}, k_0, D_r)$



Il coefficiente $k_0 = \frac{\sigma_{h0}'}{\sigma_{v0}'}$ è costante per sabbie NC, ma varia nelle sabbie OC.

⇒ Alcuni di correlazione per le prove dinamiche. Ma l'errore aumenta se la terra è più sovracconsolidata.

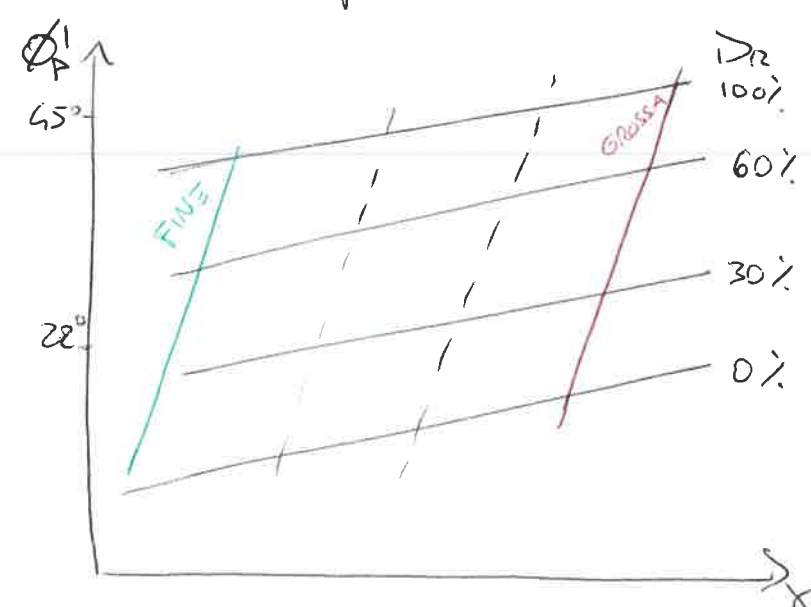
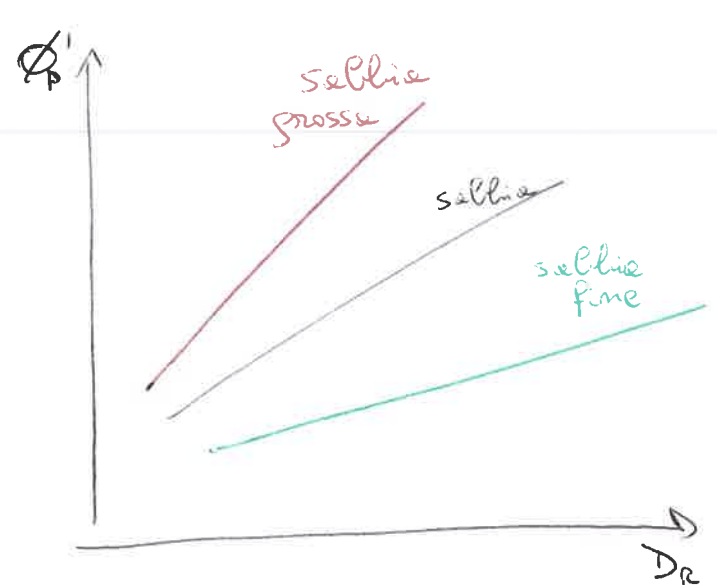
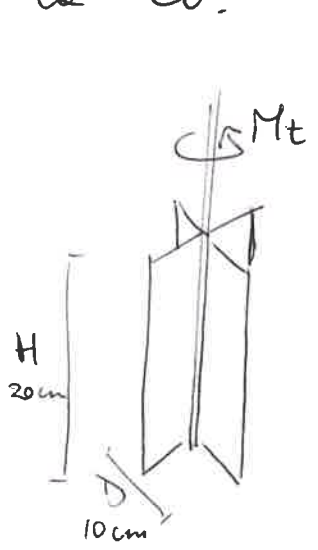


Diagramma di Naval Facilities

5

Prove scissometriche

Per valutare la deformabilità del terreno, per terre argillose tenere - la rottura è non avvenuta, quindi valuta la C_u .

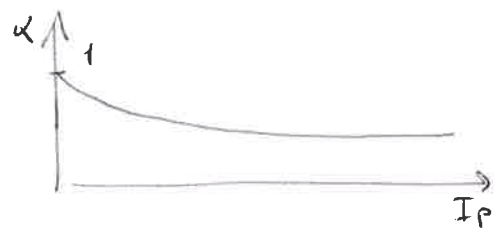


momento Torcente $M_t = C_u^* \pi H \frac{D^2}{2} + 2 \int_0^{D/2} C_u^* 2\pi r dr \cdot r$

Si ricava C_u^* per formula inversa, essendo noto il momento torcente.

↳ l'alta velocità sovrastima il valore reale di C_u .

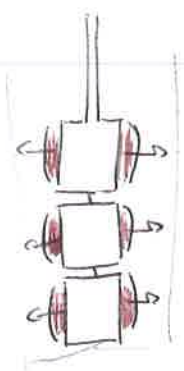
$$C_u = \alpha C_u^*$$



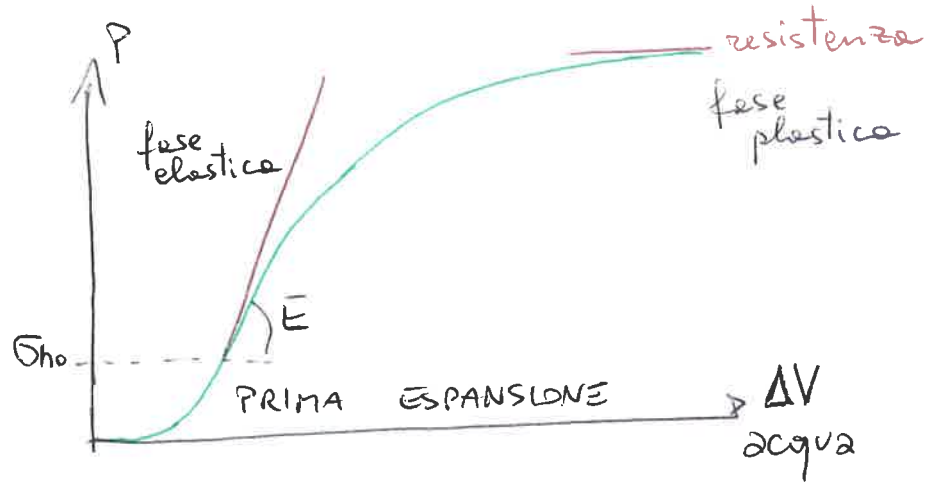
Prove pressiometriche

Per valutare la resistenza all'espansione in un foro di sondaggio.

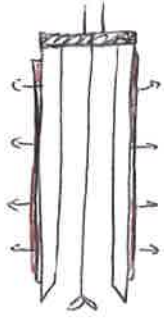
Il PRESSIOMETRO DI MENARD utilizza la pressione in celle dell'acqua.



si registra la resistenza del terreno all'espansione nota per strumento.



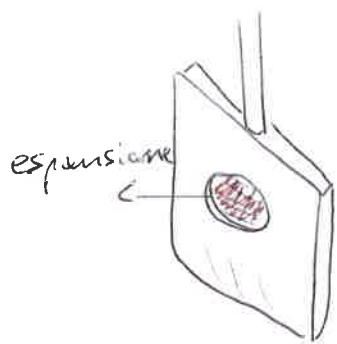
Il PRESSIOMETRO AUTOPERFORANTE è un cilindro con una membrana esterna.



Il disturbo è molto basso e trova una σ_h più precisa.

Prove dilatometriche

Si usa il dilatometro di MARCHETTI, con approccio empirico, che misura la pressione della dilatazione sulla membrana con aria compressa.



Si valutano le pressioni per diverse dilatazioni orizzontali δh .

L'indice dilatometrico identifica il terreno

$$I_D = \frac{P_i - P_0}{P_0 - U_0} \quad \rightarrow \quad K_D = \frac{P_0 - U_0}{\sigma_v'}$$

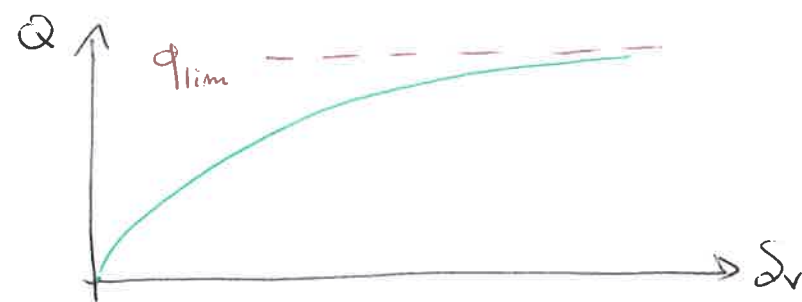
Per correlazioni si stimano i parametri caratteristici

$$K_0 = \left(\frac{K_D}{\beta} \right)^{0,46} - 0,6$$

$$E_D = 37,4 (P_i - P_0) \text{ modulo dilatometrico}$$

Prove di carico

Per valutare il carico limite nel modulo di resistenza col MARTINETTO SU PIASTRA.

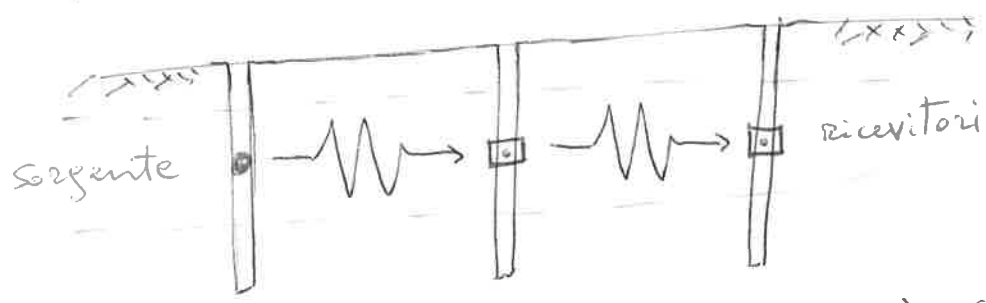


Il carico Q è noto, quindi si ricava la deformazione del cedimento verticale S_v .

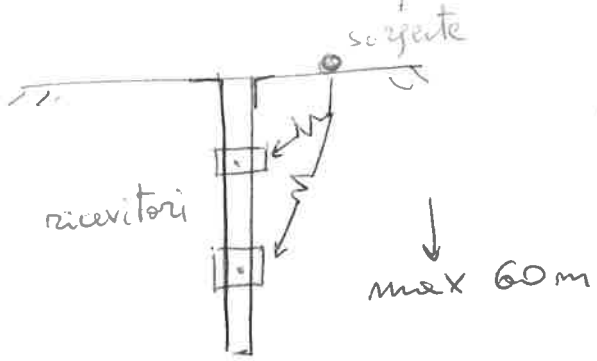
⑥ Prove dinamiche

Definiscono la stratigrafia riconoscendo il terreno attraverso onde elastiche di superficie.

Il metodo CROSS-HOLE sfrutta bassi livelli di energia, misurando il tempo di spostamento delle onde da un punto all'altro nel sottosuolo.



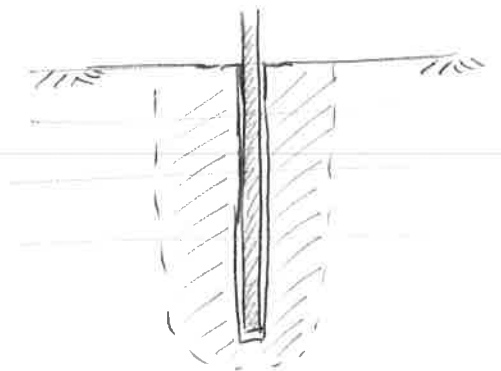
Il metodo DOWN-HOLE (o UP-HOLE) ha un unico foro con ricevitori a profondità diverse.



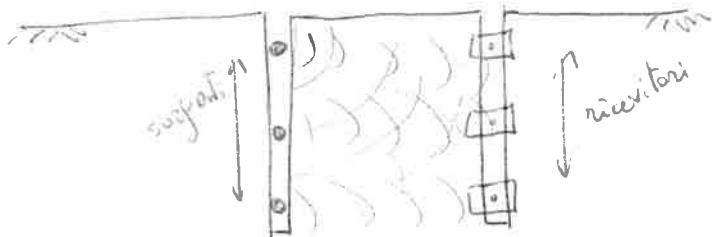
I valori ottenuti di velocità sono puntuali e di qualità minore rispetto alle cross-hole.

Il CAROTAGGIO SONICO identifica

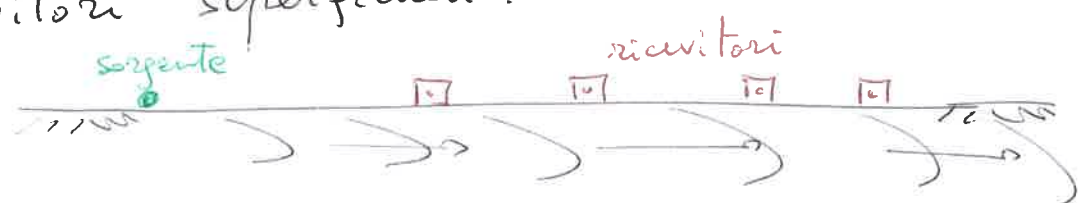
il terreno attorno al foro, formando un diagramma di stratigrafia.



La TOMOGRAFIA SONICA ricostruisce l'andamento di una grandezza fisica all'interno di un materiale attraverso l'analisi delle onde.



La configurazione MASW, da Multi-channel Analysis of Surface Waves, si caratterizza per una serie di ricevitori superficiali.



Grazie alle onde Rayleigh a bassa frequenza si conosce la composizione superficiale del terreno.

Prove di permeabilità

Le prove in FORO DI SONDAGGIO permettono di determinare il coefficiente di permeabilità ($k \geq 10^{-6} \frac{m}{s}$).

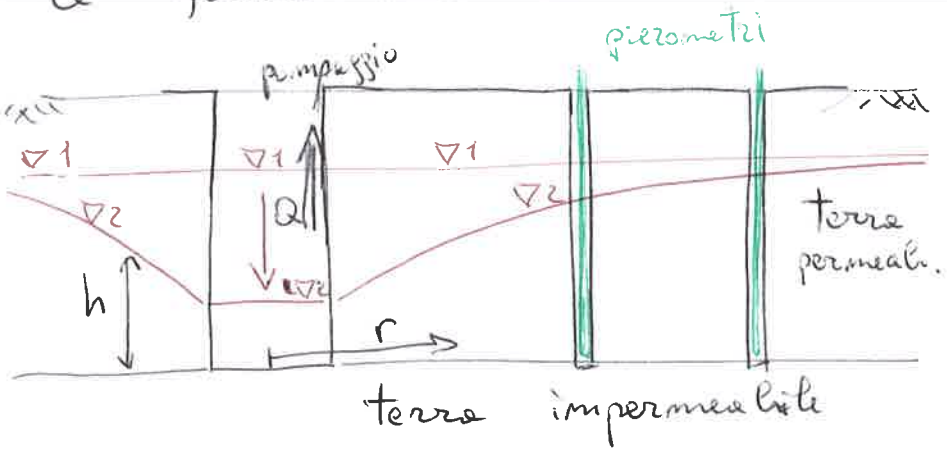
Viene immessa acqua in un foro con tampone impermeabile di bentonite, per attivare la filtrazione.

Dal moto di filtrazione si ha T , quindi si

calcola $K = \frac{Q}{F \cdot h}$ dalla formula di Darcy.

Prove piezometriche

I ~~PIEZOMETRI~~ PIEZOMETRI sono utilizzati per identificare le falde nel terreno.



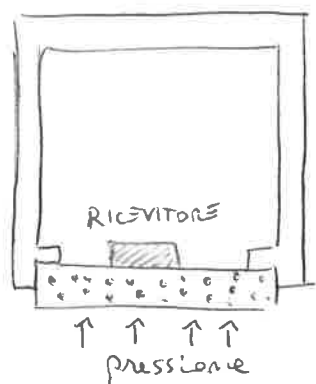
configurazione per determinare k dalle formule della portata

$$Q = (2\pi r h) \left(-k \frac{\partial h}{\partial r} \right)$$

Il piezometro misura le pressioni interstiziali u dell'acqua nell'argilla.

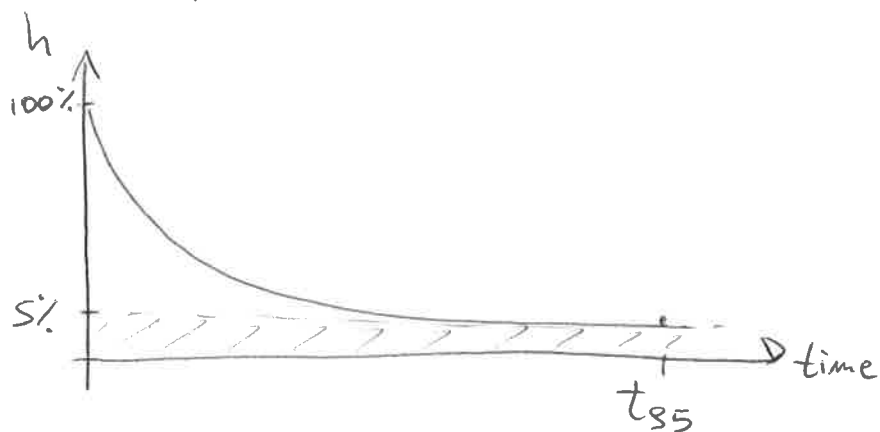
- tipi { a tubo aperto
- di Casagrande

⑦ Si usano le CELLE DI PRESSIONE come piezometri, per una misurazione puntuale attraverso una tecnica pneumatica, a corda vibrante o a "strain gadge".



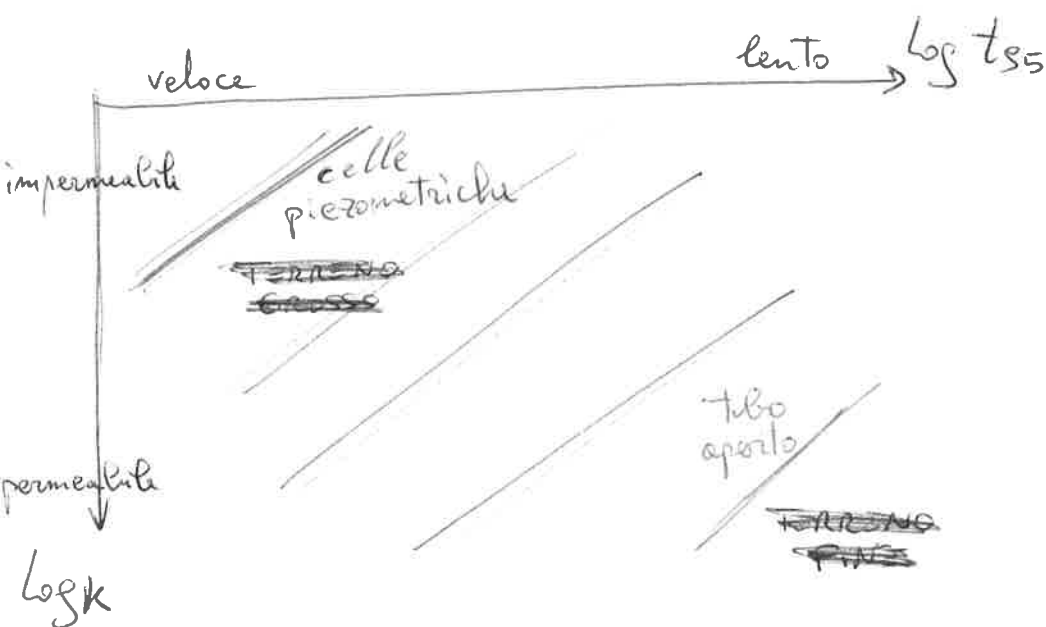
La pressione del terreno va dal suolo allo strumento, mentre il ricevitore registra in maniera analogica o digitale.

→ TEMPO DI RISPOSTA, è diverso per terreni in base alle permeabilità.



Nella ghiaia t_{95} è basso, nell'argilla è alto.

Viene accettato il 95% ~~della~~ del carico idraulico ridotto.



Si usano strumenti adeguati ai parametri di t_{95} e k del terreno.

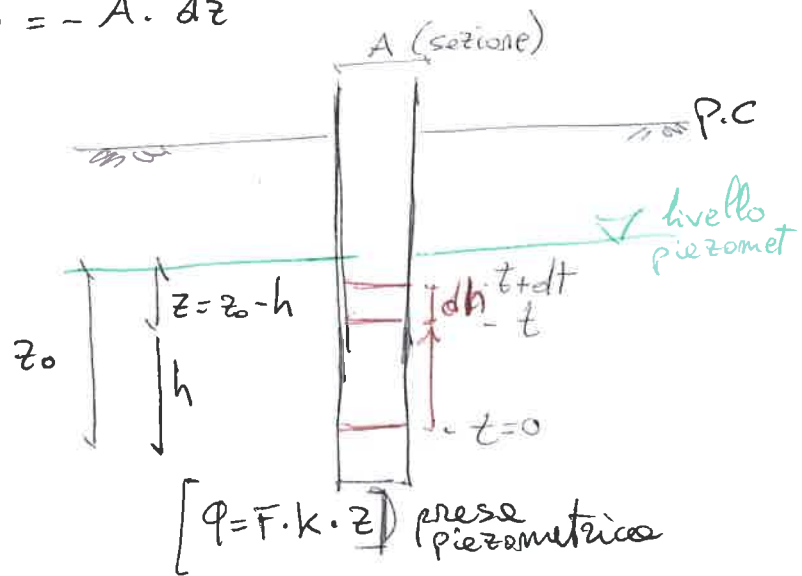
CALCOLO del Tempo di risposta t_{95} :

E. CONTINUITÀ: $q \cdot dt = A \cdot dh = -A \cdot dz$

$$h = \frac{u^* - u}{\gamma_w}$$

$$z_0 = \frac{u - u^*}{\gamma_w}$$

$$\left(z = \frac{u - u^*}{\gamma_w} \right)$$



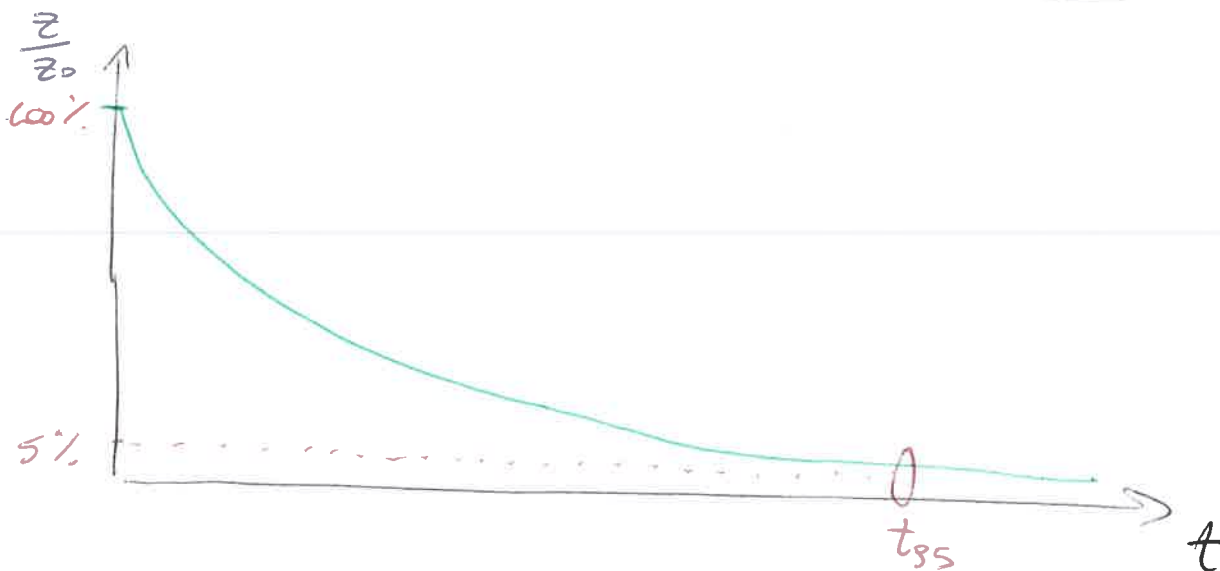
$$q = F \cdot k \cdot z = \frac{dz}{z} = - \frac{F \cdot k}{A} dt$$

$$\int_{z_0}^z \frac{dz}{z} = - \int_0^t \frac{F \cdot k}{A} dt \quad \leadsto \quad \ln\left(\frac{z}{z_0}\right) = - \frac{F \cdot k}{A} t$$

$$\Rightarrow \frac{z}{z_0} = \exp\left(- \frac{F \cdot k}{A} t\right)$$

mentre ~~per~~ per $\frac{z}{z_0} = 0,05$ (85%)

$$t = - \ln(0,05) \frac{A}{F \cdot k}$$



METODO

APPROCCIO

NOTE

POTESSI

F_S

CARATTERISTICHE

ANALISI
LIMITE

EQUILIBRIO
LIMITE

1. Superiore
2. Inferiore

Caso
Rigido

Strisce
(sup. circolare)

Strisce
EQUILIBRIO
FORZE

METODI
RIGOROSI

TBS
TBI

de = di
equilibrio
forze

Equazioni equilibrio e
di rotazione

$$\begin{cases} \frac{\partial Lx'}{\partial x} + \frac{\partial Lx^2}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial Lx^2}{\partial x} + \frac{\partial Gz'}{\partial z} = \gamma \\ \frac{\partial Lz'}{\partial x} = \frac{\sigma_1 + \sigma_1'}{2} \sin \theta' + c' \cos \theta' \end{cases}$$

$$H = \frac{4}{8} C_u$$

$$H = \frac{2}{8} C_u$$

$$F_S = \frac{T_{LHM}}{T_{APP}}$$

$$F_S = \frac{M_{LHM}}{M_{APP}}$$

$$F_S = \frac{T_{LHM}}{T_{APP}}$$

Fellenius

Bishop

Sembu

Lowe
Kore Fiath

Spencer

Morgestain &
Price

Morgestain &
Chaim

GLC

Sarner

$$X(x) = 1 \cdot f(x) \cdot E(x)$$

$$X(x) = 1 (F(x) + F_1(x)) E(x)$$

$$f(x) = 1, zR = 0$$

$$S = \frac{\alpha + i}{2}$$

$$S = 0$$

eq. radiale
 $\Delta x \cos \alpha - \Delta z \sin \alpha = 0$

eq. verticale
 $\Delta x = 0$

spinte globali

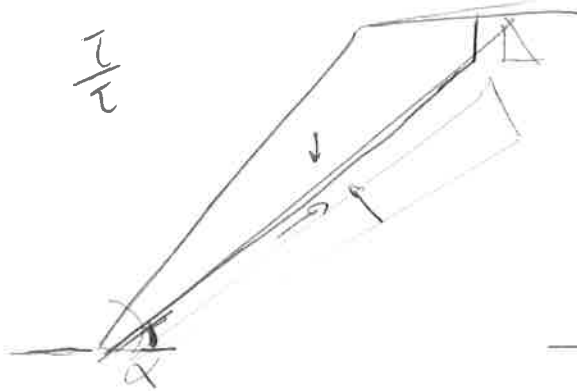
K_h di sisma

$F(S)$

ottimale

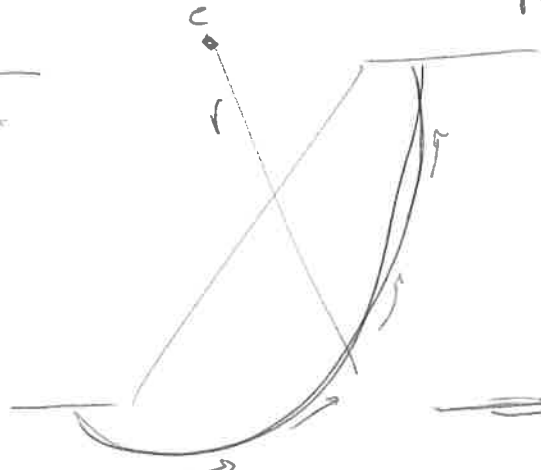
CORPO RIGIDO

sup. piana



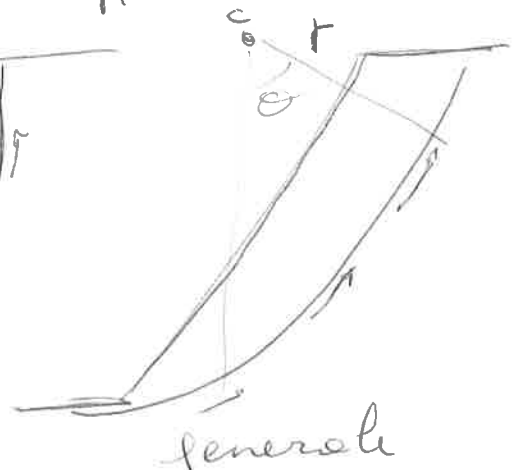
lungo termine
sabbie

sup. circolare

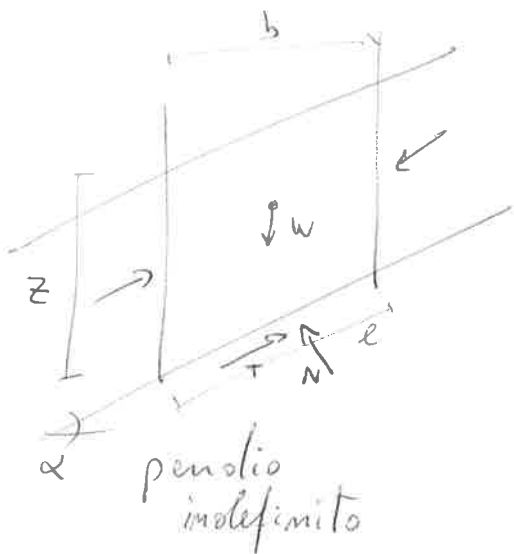


Breve termine
argille

sup. logaritmica



generale
 $r = r_0 \exp(\theta \cdot \frac{tg \phi'}{F})$



pendio
indefinito

$$\bar{F} = \frac{T_{LIM}}{T_{APP}} = \frac{c'l + N tg \phi'}{W \sin \alpha}$$

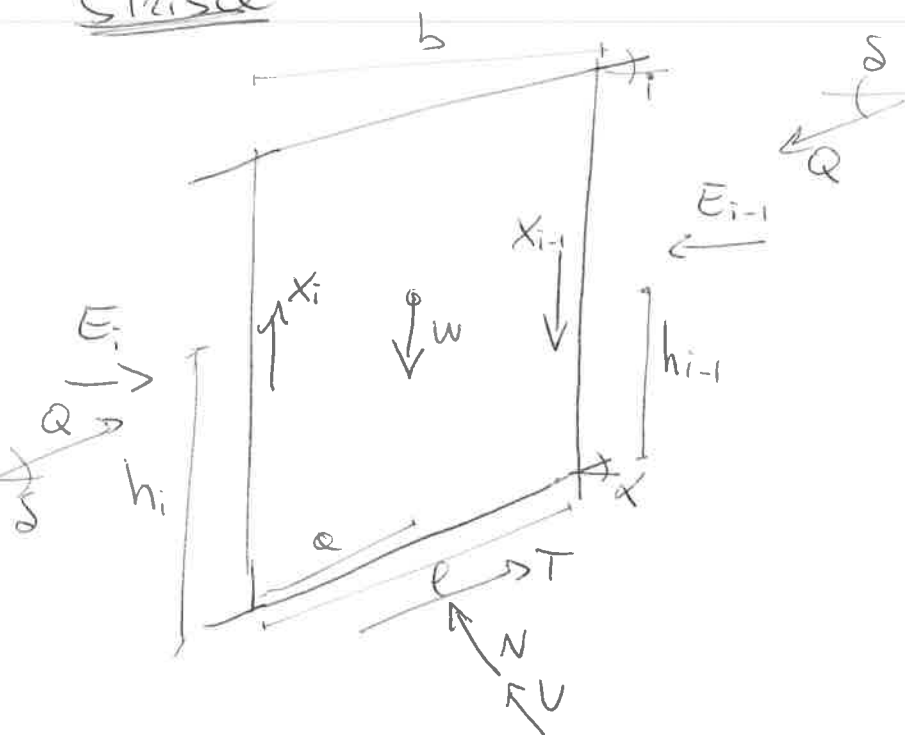
$$N = W \cos \alpha, \quad W = b z \gamma = \rho z \gamma \cos \alpha$$

$$\bar{F} = \frac{c'l + \rho z \gamma \cos^2 \alpha tg \phi'}{\rho z \gamma \cos \alpha \sin \alpha}$$

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

terreno asciutto

strisce



Fellenius $\Delta X \cos \alpha - \Delta E \sin \alpha = 0$

Bishop $\Delta X = 0$

Sambu $\delta = 0$

L & K $\delta = \frac{\alpha + i}{2}$

Spencer $f(x) = 1, \sum Q = 0$

M & P $X = 1 \rho E$

M & C $X = 1 (\rho_i + \rho_0) E$

GLE globali
(corpo rigido)

Sarma $kh \cdot w$ orizzontale

① METODI PER L'ANALISI DELLA SICUREZZA

Il fattore di sicurezza di un pendio viene valutato nelle condizioni di rottura di una superficie di scorrimento. Questa può avere varie forme e causata da diversi fenomeni, che impongono forze e momenti caratterizzati dalle condizioni del terreno stesso.

In normativa, viene applicato lo Stato Limite Ultimo, ovvero la condizione di rottura pericolosa per la vita delle persone, tramite le ipotesi di comportamento rigidamente plastico; il terreno viene studiato sia a breve che a lungo termine data la sua eterogeneità.

TAGLIO A
LUNGO TERMINI

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$$

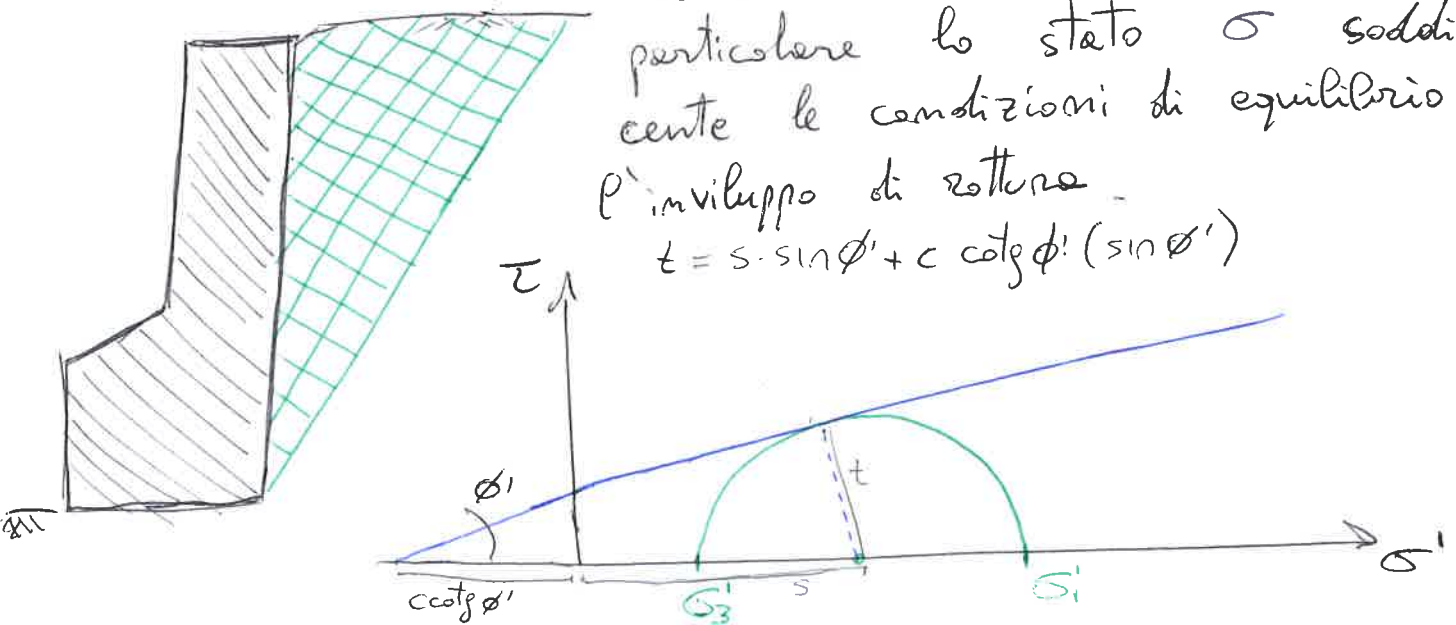
TAGLIO A
BREVE TERMINE

$$\tau = c_u$$

+ Metodo delle caratteristiche

Il metodo delle caratteristiche viene chiamato così perché si ipotizzano linee equipotenziali nella porzione di terreno instabile, in perpendicolare si pongono le linee di scorrimento. Lungo queste linee sono identiche le caratteristiche fisiche del terreno, in particolare lo stato σ soddisfa le condizioni di equilibrio e l'involuppo di rottura.

$$\tau = s \cdot \sin \phi' + c \cot \phi' (\sin \phi')$$

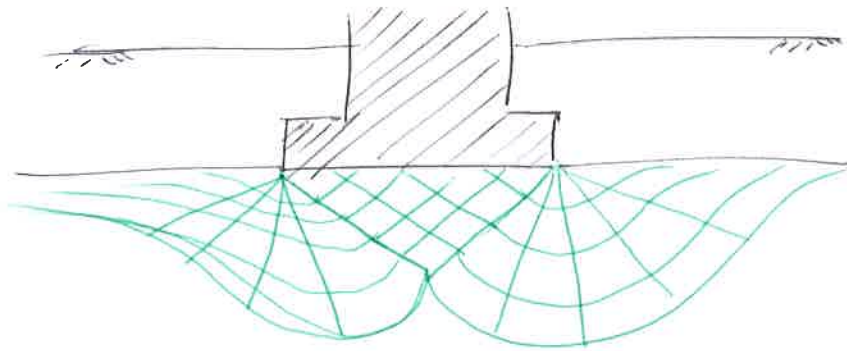


Le equazioni nel sistema di equilibrio sono differenziali iperboliche, con due incognite. Queste sono l'equilibrio indefinito di equilibrio ed il criterio di rottura, unite alle equazioni di congruenza.

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x'}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y'}{\partial y} = +\gamma \\ \frac{\sigma_1' - \sigma_3'}{2} = \frac{\sigma_1' + \sigma_3'}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi' \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \sigma_3' = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \sigma_1' \quad \text{spinta attiva} \\ \sigma_3' = \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \sigma_1' \quad \text{spinta passiva} \end{array} \right.$$

Lo schema delle linee caratteristiche deriva dalla soluzione di Rankine al problema. Il problema è che si conosce la tensione solo nelle regioni delle linee, non si sa se la soluzione è a favore o sfavore di sicurezza.

Per fondazioni, lo schema viene rappresentato verso lo sviluppo orizzontale.



+ Metodo dell'analisi limite

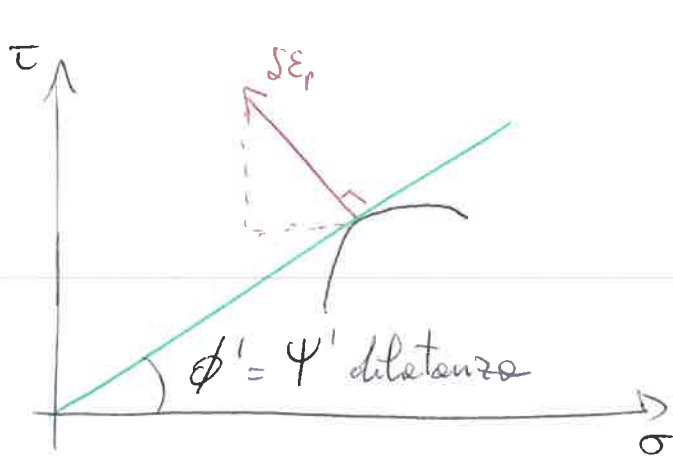
Vengono definiti i due casi di limite superiore ed inferiore. La Teoria del limite Inferiore dice:
 « se è possibile costruire un campo di tensioni σ che soddisfi l'equazioni di equilibrio e le condizioni al contorno e che non violi il criterio di rottura, allora il collasso non può avvenire, le forze esterne applicate rappresentano un limite inferiore o al più ~~più~~ sono uguali al carico di collasso. »

② Mentre la Teoria del Limite Superiore dice: «se in un meccanismo di collasso cinematicamente ammissibile (senza aperture o sovrapposizioni) la potenza dei carichi esterni eguaglia la potenza dissipata dalle forze ~~esterne~~ interne, allora si verifica il collasso; i carichi esterni applicati rappresentano un limite superiore o al più coincidono con essi. ».

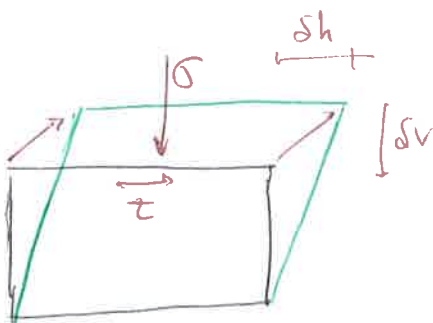
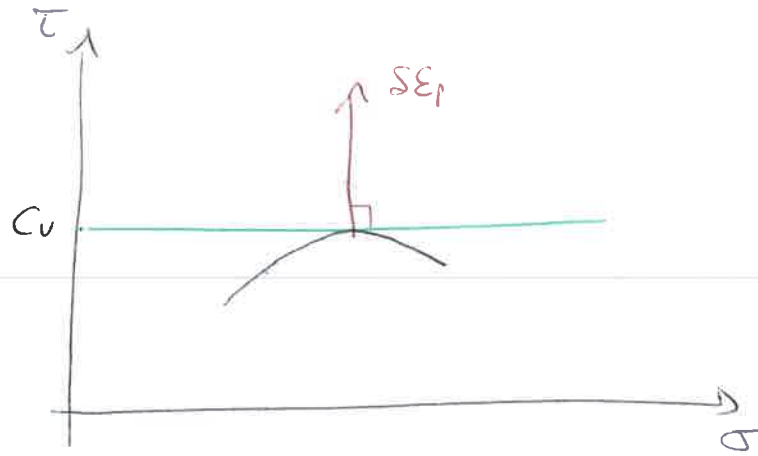
Le principali ipotesi del metodo riguardano la legge reologica:

- la legge di flusso è associata,
- il criterio di resistenza è di superficie convessa,
- la deformazione plastica è ortogonale alla superficie.

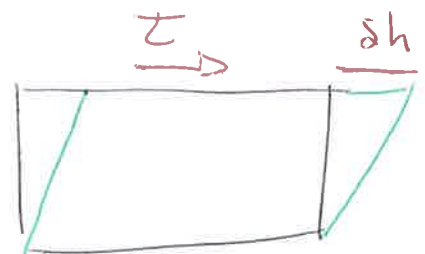
LUNGO
TERMINI



BREVE
TERMINI



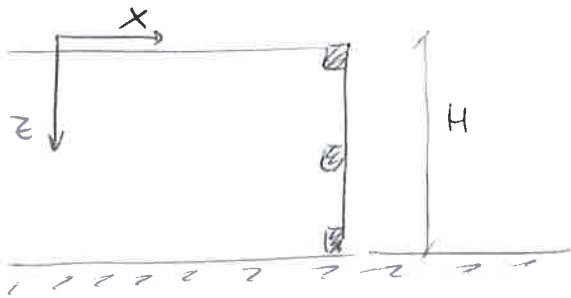
$\Delta e = 0$ deformazione libera



$\Delta e = \tau \cdot \delta h$ deformazione vincolata

- Applicazione TLI, A BREVE TERMINE

L'incognita è la profondità della rottura in un terreno di argilla ($\tau = c_u$).



$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \end{cases} \quad \begin{array}{l} \text{equilibrio} \\ \text{alle forze} \end{array}$$

l'ipotesi è $\frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} = 0$

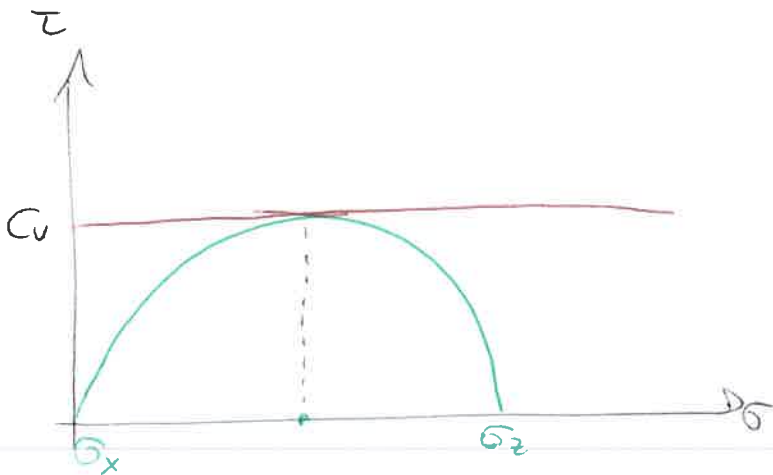
$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0 \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \end{cases}$$

σ_x costante lungo \hat{x}

$$\sigma_z = \gamma z + C$$

per condizione $\sigma_x(z=0) = 0$ si ha

$$\boxed{\sigma_z = \gamma z} \quad \text{alla base } \underline{\underline{\sigma_z = \gamma H}}$$



$$\text{raggio} = c_u = \sigma_z / 2 = \frac{\gamma z}{2}$$

per tutto lo strato

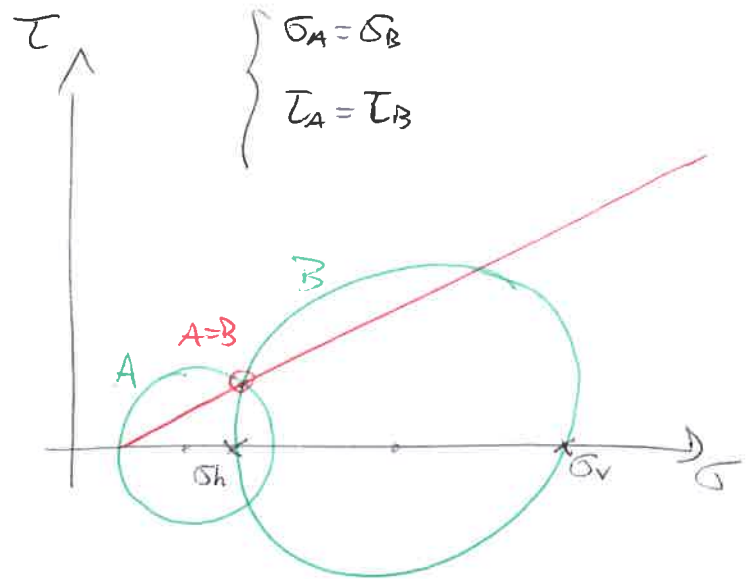
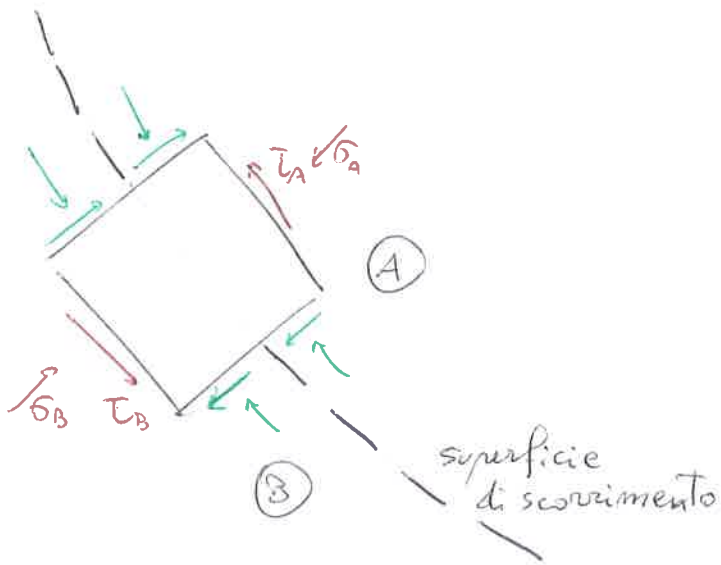
$$\sigma_z = \gamma H \quad \text{e} \quad c_u = \frac{\gamma H}{2}$$

La rottura si ha per $z=H$ come limite inferiore,

quindi $\boxed{H = \frac{2 c_u}{\gamma}}$ è limite inferiore.

③ Applicazione TLI, A LUNGO TERMINE

L'ipotesi è che la rottura avvenga in superfici eterogenee, al contatto di strati diversi, quindi con le discontinuità delle tensioni.



sistemi di equazioni di equilibrio con il criterio di rottura

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi' \end{cases}$$

Dalla teoria di Rankine $\sigma_h = \sigma_v \cdot k_0 = \sigma_v \cdot \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$

k_0 è il coefficiente di spinta attiva (k_{A0})

$$k_{A0} = \frac{\sigma_{hA}}{\sigma_{v0}} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right)$$

Rapporto delle spinte orizzontali e verticali come limite inferiore.

- Applicazione TLS, A BREVE TERMINI

La potenza ~~è~~ dissipata è solo sulla rotture nella superficie critica -

Lavoro = Forza · spostamento

La deformazione solo orizzontale indice $d_e = \tau l \delta h$

mentre il lavoro interno è dato dal peso del conico

$$d_i = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\delta h}{\sqrt{2}}$$

Per il principio dei lavori virtuali $d_i = d_e$

$$\tau l \delta h = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\delta h}{\sqrt{2}} \quad (\text{in cui } l = H\sqrt{2})$$

a breve termine $\tau \rightarrow C_u$: $H = \frac{4 C_u}{\gamma}$ è il limite superiore

- Applicazione TLS, A LUNGO TERMINI

La deformazione libera permette $d_i = 0$

quindi bisogna avere $d_e = d_i = 0$

il lavoro esterno è $d_e = N \delta n + T \delta h = \sigma l \delta n + \tau l \delta h = 0$

si considerano le deformazioni $\left\{ \begin{array}{l} \delta n = \epsilon \text{ normali} \\ \delta h = \gamma \text{ tangenziali} \end{array} \right.$

$$\text{Allora } d_e = \sigma l \epsilon + \tau l \gamma = l h (\sigma \delta \epsilon + \tau \delta \gamma)$$

sull'elemento infinitesimo (δh)

con la dilatazione ψ , si ottiene

$$\tau = - \frac{\sigma \epsilon}{\gamma \tan \psi} \sigma \tan \phi'$$

conferma
l'ipotesi

$$\text{quindi risulta } d_e = l h \tau \delta \gamma \left(1 - \frac{\tan \psi}{\tan \phi'} \right) = 0$$

$$\boxed{\psi = \phi'}$$

① + Metodo dell' Equilibrio limite

Il metodo si basa sull'ipotesi della superficie di rottura nota. Quindi si pone costante il FATTORE DI SICUREZZA F_s su tutta la superficie al valore unitario.

$$F_s = \frac{T_{LIMITE}}{T_{APPLICATO}}$$

- Approccio a Corpo Rigido

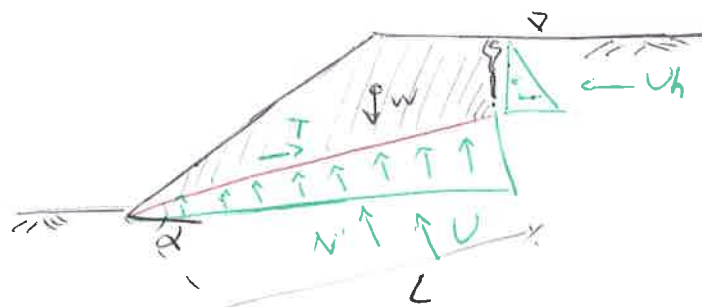
Considerare il terreno in frana come corpo rigido, soggetto a traslazione e rotazione nel suo insieme.

Essendo la superficie ipotizzata, vengono seguiti 3 metodi in base alle caratteristiche del terreno:

- superficie piana
- superficie circolare
- superficie logaritmica

SUPERFICIE PIANA

È soggetta a scorrimenti traslativi, per cui si effettuano verifiche di stabilità alla traslazione perpendicolare e normale alla superficie.



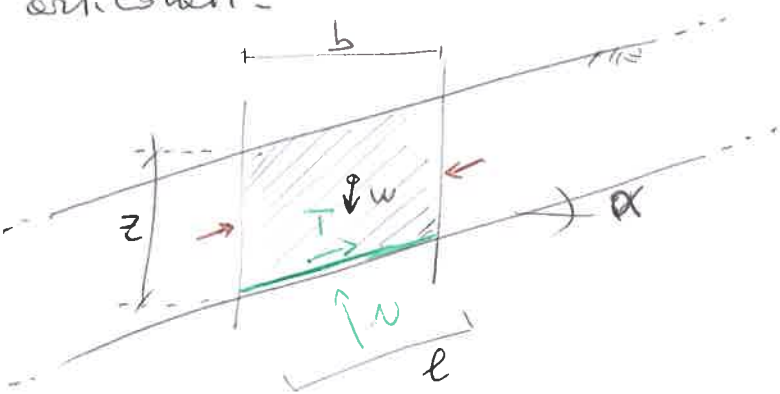
$$F_s = \frac{T_{LIM} \cdot L}{T_{APP} \cdot L}$$

Il rapporto del fattore di sicurezza viene espresso come

$$F_s = \frac{c'L + N' \operatorname{tg} \phi'}{T} = \frac{c'L + (W \cos \alpha - U - U_h \sin \alpha) \operatorname{tg} \phi'}{(W \sin \alpha + U_h \cos \alpha)}$$

La caratteristica principale è la trascurabilità di N' , trovando un rapporto staticamente determinato.

Il caso particolare riguarda un pendio indefinito senza acqua ($U=0$). Si schematizza un sistema ideale con cui confrontare i risultati successivi più articolati.



Viene considerata una parte di pendio in traslazione con lunghezza $l = \frac{b}{\cos \alpha}$, a pendenza costante α .

Essendo asciutto, il peso del corpo rigido è $W = \gamma b z$, quindi le spinte applicate sono $N = W \cos \alpha$ e $T = W \sin \alpha$.

Il rapporto di F_s è sempre il limite sull'applicato:

$$F_s = \frac{\tau_{lim} \cdot l}{\tau_{app} \cdot l} = \frac{c' l + N' \tan \phi'}{T} = \frac{c' l + (\gamma l z \cos^2 \alpha) \tan \phi'}{\gamma l z \sin \alpha \cos \alpha}$$

$$\Rightarrow F_s = \frac{c'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\gamma l z \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma l z \sin \alpha \cos \alpha}$$

Somma di due termini: coesione e Coulomb

$$F_s = \frac{c'}{\gamma z \sin \alpha \cos \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$$

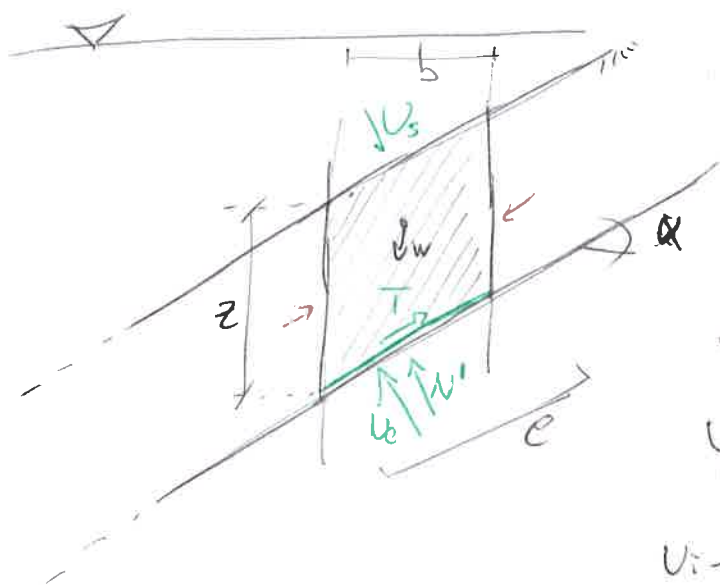
Spesso la coesione è trascurabile $c' \rightarrow 0$, quindi si trova la superficie di rottura (in cui $F_s = 1$) per $\tan \phi' = \tan \alpha$.

La profondità della superficie di rottura viene data anche per

$$z = \frac{c'}{\left(1 - \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}\right) \gamma \sin \alpha \cos \alpha}$$

essendo $F_s = 1$ su tutta la superficie

⑤ Con le stesse geometrie di pendio indefinito, si ipotizza il corpo rigido sommerso ($U \neq 0$) -



Il sistema per l'equilibrio alla traslazione viene dato da

$$\begin{cases} T = W \sin \alpha + (u_{i-1} - u_i) \cos \alpha \\ N' = W \cos \alpha + (u_s - u_p) - (u_{i-1} - u_i) \sin \alpha \end{cases}$$

Per la profondità z

$$u_b - u_s = l(u_b - u_s) = l \gamma_w z$$

Per differenza di punti i -esimi

$$u_i - u_{i-1} = z(u_i - u_{i-1}) = z \gamma_w l \sin \alpha$$

Sostituendo alla traslazione perpendicolare:

$$\begin{aligned} N' &= W \cos \alpha - \gamma_w \frac{z b}{\cos \alpha} + \gamma_w z b \tan \alpha \cdot \sin \alpha \\ &= W \cos \alpha - \gamma_w z b \cos \alpha \end{aligned}$$

Il fattore di sicurezza si basa sulle traslazioni parallel_e alla superficie di rottura

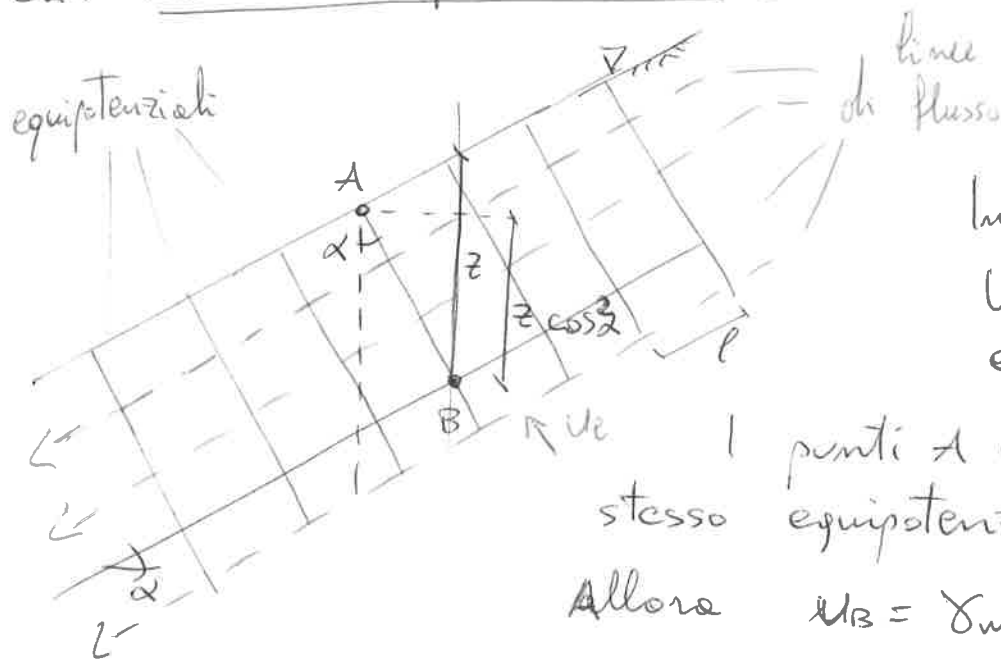
$$\begin{aligned} F_s &= \frac{T_{un} \cdot L}{T_{APP} \cdot L} = \frac{c' l + N' \tan \phi'}{W \sin \alpha - \gamma_w z l \cdot \tan \alpha \cos \alpha} = \\ &= \frac{c' b}{\gamma_w z l \sin \alpha} + \frac{(\gamma_w z l \cos \alpha - \gamma_w z l \cos \alpha) \tan \phi'}{\gamma_w z l \sin \alpha - \gamma_w z l \sin \alpha} \end{aligned}$$

Con terreno immerso il fattore di sicurezza si calcola come

$$F_s = \frac{\frac{c'}{\cos \alpha}}{\gamma' z \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$$

Stesse formule analitiche, ma considerando il peso efficace γ' del terreno.

* Migliore attenzione avrà lo stesso pendio indefinito con moto di filtrazione.



In questo caso u_i e u_{i-1} sono uguali e contrarie.

I punti A e B sono sullo stesso equipotenziale ($h_A = h_B$)
Allora $u_B = \gamma_w (\tilde{z}_A - \tilde{z}_B)$

Il sistema per la traslazione è

$$\begin{cases} T = W \sin \alpha = \gamma z l \sin \alpha \cos \alpha \\ N' = \gamma' z l \cos^2 \alpha \end{cases}$$

Quindi il fattore di sicurezza viene dato dal rapporto:

$$F_s = \frac{T_{c.m.} \cdot L}{T_{APP} \cdot L} = \left| \frac{c'}{\gamma z \cos \alpha \sin \alpha} + \frac{\gamma'}{\gamma} \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha} = F_s \right|$$

In stretta dipendenza col peso specifico del terreno.

Per coesione trascurabile, si ipotizza $\gamma' \approx 10$ e

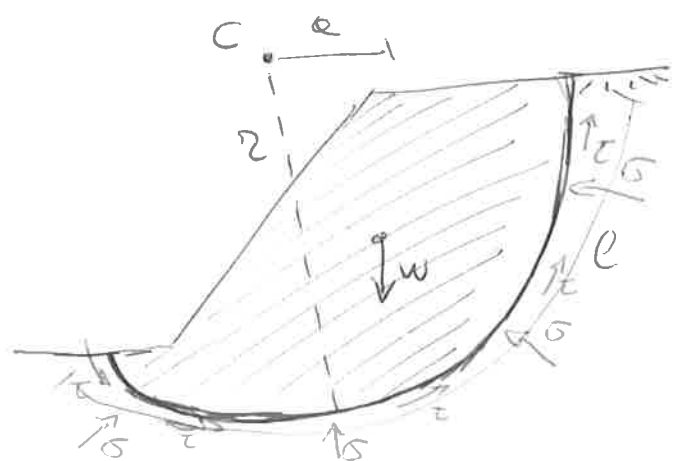
$\gamma \approx 20$, quindi nel caso di moto di filtrazione il fattore di sicurezza risulta la metà del caso

di pendio asciutto $F_s = \frac{1}{2} \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$.

6

SUPERFICIE CIRCOLARE (Swedish circular method)

Questa ipotesi viene adottata per terreni argillosi o anelisi a breve termine, verificando la rotazione del corpo rigido.

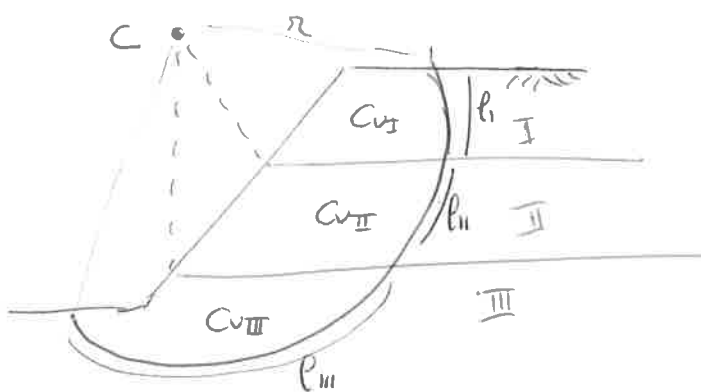


$$F_s = \frac{M_{LIM}}{M_{APP}} = \frac{c_u p r}{W \cdot e} = F_s$$

Il fattore di sicurezza viene calcolato col rapporto dei momenti, in funzione del perimetro e ed r . Quindi implica la ricerca del punto C come centro di rotazione.

Viene preso il punto C nello spazio per cui risulta un fattore di sicurezza minimo.

Per un pendio a più strati, vengono valutati più tipi di terreno.



$$F_s = \frac{\sum_i (c_{ui} p_i) \cdot r}{W \cdot e}$$

SUPERFICIE LOGARITMICA (o spirale)

Ha una variazione del parametro r con l'angolo θ di curvatura, rendendo più plausibile il caso della superficie circolare.

$$r = r_0 \exp\left(\frac{tg \phi'}{F_s} \theta\right)$$

$$\left(\text{per } tg \phi = \frac{tg \phi'}{F_s}\right)$$

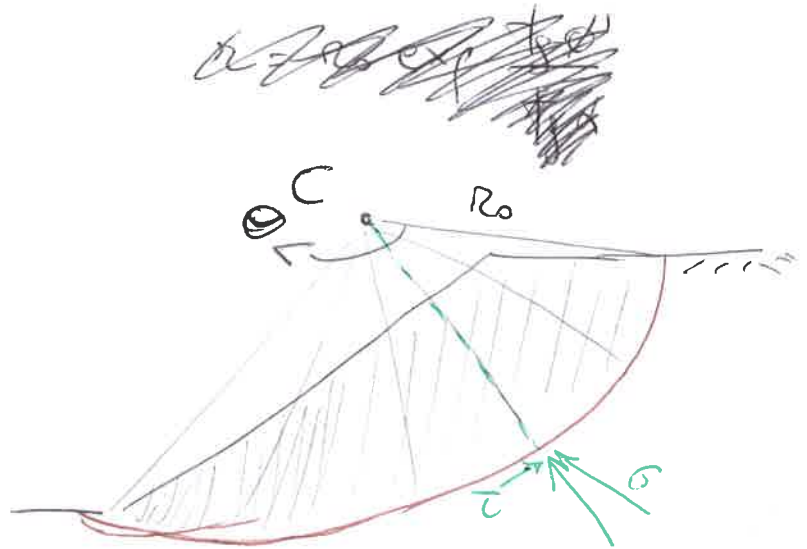
Per costruzione, si ha momento delle spinte nullo.

L'ipotesi è utilizzata particolarmente per le terre rinforzate (o armate) essendo più specifico.

Quindi la somma dei momenti è

$$M_{RES} + M_{APP} = \int \frac{c'}{F_s} r \, dP + W \cdot e = 0$$

L'ipotesi di coesione nulla ($c'=0$) porta alla descrizione del pendio indefinito (superficie piana), mentre l'ipotesi di breve termine ($\phi'=0$) conserva il calcolo a superficie circolare ($r \rightarrow C$).

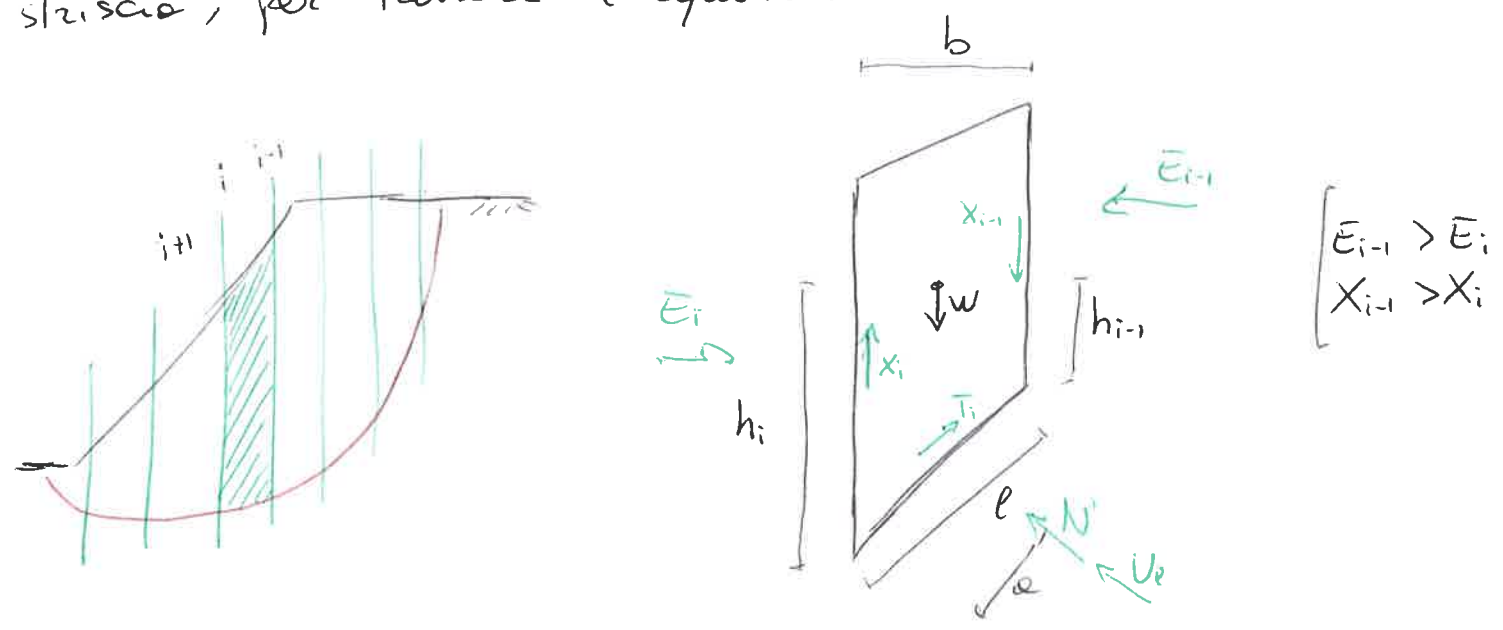


7

- Approccio delle Strisce

Divide il terreno in fette in strisce verticali, discretizzando lo spazio lungo la direzione di traslazione -

Ipotizzando la geometria della superficie di scorrimento, si valuta l'insieme di forze in gioco su una i -esima striscia, per trovare l'equilibrio



Le incognite del problema sono:

- n strisce con N_i ;
- $\bar{\tau}_s$ costante sulla superficie di scorrimento;
- $n-1$ interfacce hanno x_i, h_i, E_i ;
- distanza a_i ;

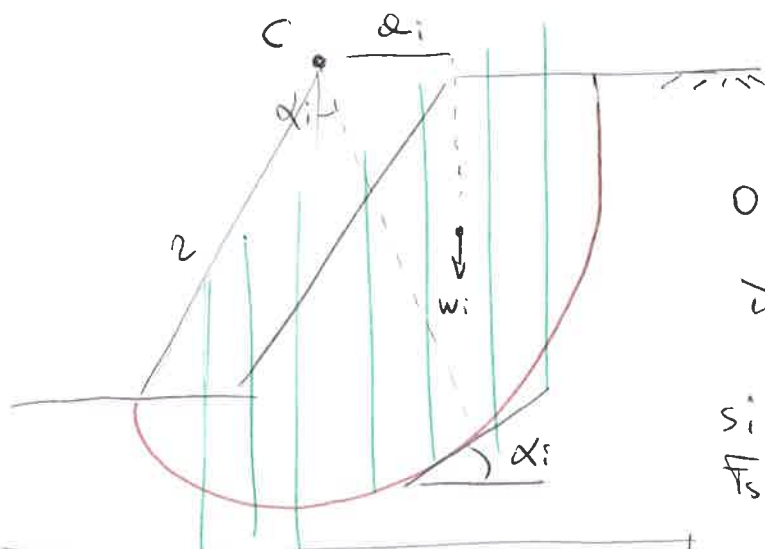
→ $5n-2$ incognite
considerando strisce sottili ($a = \frac{b}{2}$) si avranno $4n-2$ incognite del problema.

Per l'equilibrio si hanno $n-2$ equazioni

La determinatezza del problema dipende dalle ipotesi poste con le condizioni al contorno.

SUPERFICIE CIRCOLARE

Permette la sola verifica alle rotazioni tramite i momenti.



Somma dei momenti nulla per costruzione.

$$0 = \sum_i w_i r \sin \alpha_i + \sum (N_i' + U_i) \cdot 0 - \sum_i T_i r$$

Dato che $T = \frac{c'l + \sigma'l \tan \phi'}{\bar{T}_s}$

si riceve il fattore di sicurezza $\bar{T}_s = T_{lim} / T_{app}$

Grazie all'analisi a lungo termine, la verifica dei momenti è più affidabile.

$$\bar{T}_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + \sigma_i' l_i \tan \phi_i')}{\sum_i (w_i \sin \alpha_i)}$$

Per la verifica alla traslazione vengono posti condizioni più cautelative e meno realistiche.

A breve termine si ha $\bar{T}_s = \frac{\sum_i (c_i \cdot l_i)}{\sum_i (w_i \sin \alpha_i)}$ della soluzione

ne del metodo a corpo rigido a superficie circolare.

• L'equilibrio alla traslazione orizzontale è

$$(E_{i-1} - E_i) - T_i \cos \alpha_i + (N_i' + U_i) \sin \alpha_i = 0$$

ottenendo
$$\bar{T}_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + N_i' \tan \phi_i') \cos \alpha_i}{\sum_i \Delta E_i + \sum_i (N_i' + U_i) \sin \alpha_i}$$

• L'equilibrio alla traslazione verticale è

$$(X_{i-1} - X_i) + W_i - T_i \sin \alpha_i - (N_i' + U_i) \cos \alpha_i = 0$$

ottenendo
$$\bar{T}_s = \frac{\sum_i ((c_i l_i + N_i' \tan \phi_i') \sin \alpha_i)}{\sum_i (\Delta X_i + W_i - (N_i' + U_i) \cos \alpha_i)}$$

⑧ \rightarrow metodo di Fellenius, ordinario delle stisce
 Volge alla ricerca dell'equilibrio di ogni striscia lungo
 il raggio \odot , per la determinazione delle forze N'_i .

$$W_i \cos \alpha_i - (N'_i + U_{e_i}) - \Delta E_i \sin \alpha_i + \Delta X_i \cos \alpha_i = 0$$

$$\bullet N'_i = W_i \cos \alpha_i - U_{e_i} + \Delta X_i \cos \alpha_i - \Delta E_i \sin \alpha_i$$

questa definizione viene inserita nel calcolo del fattore
 di sicurezza, ipotizzando $\Delta X_i \cos \alpha_i - \Delta E_i \sin \alpha_i = 0$

$$F_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - U_{e_i}) t_g \phi'_i)}{\sum_i (W_i \sin \alpha_i)}$$

Per la sostituzione di N'_i data l'ipotesi semplificativa, si ha
 un F_s sottostimato, in favore di sicurezza -

+ ipotesi di Tumbull & Hvorslev (1967)

porre $W'_i = W_i - u_i l_i$ e $N'_i = W_i \cos \alpha_i$

$$b_i = l_i \cos \alpha_i$$

quindi indicare $N'_i = W_i \cos \alpha_i - u_i l_i \cos^2 \alpha_i$

ottenendo

$$F_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + (W_i \cos \alpha_i - U_{e_i} \cos^2 \alpha_i) t_g \phi'_i)}{\sum_i (W_i \sin \alpha_i)}$$

con valori più realistici di N'_i ed un calcolo più
 esatto.

Equilibrio Radiale

+ ipotesi inter-striscia

→ metodo di Bishop completo

Si basa sull'equilibrio di ciascuna striscia in direzione verticale -

$$\begin{cases} W_i - T_i \sin \alpha_i - (N_i + U_i) \cos \alpha_i + \Delta X_i = 0 \\ T_i = \frac{c_i l_i + N_i \tan \phi_i}{F_s} \end{cases}$$

Equilibrio
Verticale

La spinta N_i viene calcolata dal sistema

$$N_i = \frac{W_i - \frac{c_i l_i}{F_s} \sin \alpha_i - U_i \cos \alpha_i + \Delta X_i}{\cos \alpha_i + \frac{\tan \phi_i}{F_s} \sin \alpha_i}$$

↳ parametrizzando il denominatore $m_i = \cos \alpha_i + \frac{\tan \phi_i}{F_s} \sin \alpha_i$

Il fattore di sicurezza viene calcolato per tentativi in modo iterativo

$$F_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + (W_i - U_i \cos \alpha_i) \tan \phi_i + \Delta X_i \tan \phi_i) / m_i}{\sum_i (W_i \sin \alpha_i)}$$

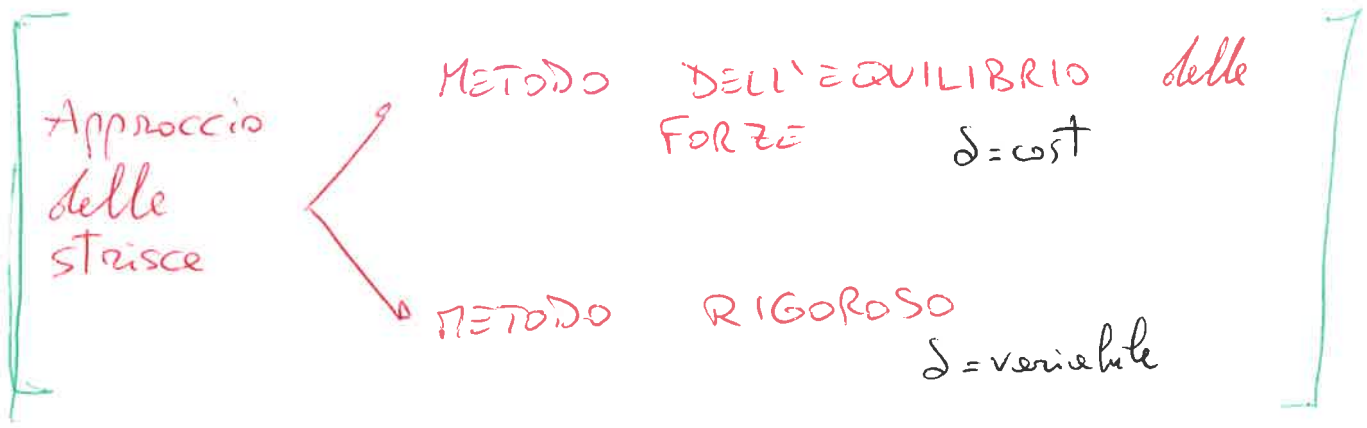
→ metodo di Bishop semplificato

Aggiunge l'ipotesi di $\Delta X_i = 0$, ottenendo

$$\bar{F}_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + (W_i - U_i \cos \alpha_i) \tan \phi_i) / m_i}{\sum_i (W_i \sin \alpha_i)}$$

I metodi di Bishop sono impliciti perché hanno il termine F_s in m_i , quindi necessitano di un calcolo iterativo con valore di primo tentativo.

8



+ Metodo dell' EQUILIBRIO delle FORZE

Tramite le equazioni di stabilità ~~delle~~ dei tre gradi di libertà del concio, si trovano i termini incogniti ipotizzando di conoscere il fattore di sicurezza. Il valore di primo tentativo viene iterato con il calcolo delle forze agenti sulle i-esima striscia.

L'equilibrio alla traslazione ~~verticale~~ è

$$W_i + \Delta X_i - T_i \sin \alpha_i - (N'_i + U_{e_i}) \cos \alpha_i = 0$$

conoscendo T Coulambiana, si riceve

$$N'_i = \frac{W_i + \Delta X_i - \left(\frac{c_i l_i}{F}\right) \sin \alpha_i - U_{e_i} \cos \alpha_i}{M \alpha_i}$$

Viene inserito nell'equilibrio alla traslazione orizzontale

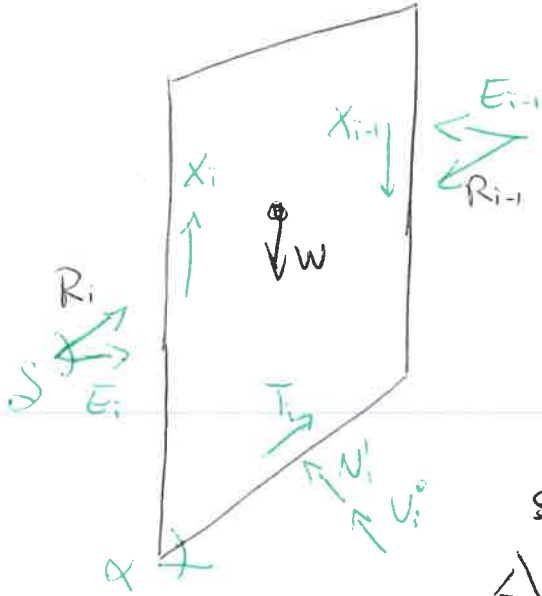
$$\Delta E_i - T_i \cos \alpha_i + (N'_i + U_{e_i}) \sin \alpha_i = 0$$

quindi si trova $\Delta E_i = N'_i \left(\frac{\tan \phi'_i \cos \alpha_i}{F} - \sin \alpha_i \right) + \frac{c_i l_i}{F} \cos \alpha_i - U_{e_i} \sin \alpha_i$

si parametrizza il termine con F di primo tentativo

$$n_i = \frac{\tan \phi'_i \cos \alpha_i}{F} - \sin \alpha_i$$

e si ipotizzano δ costanti, quindi $\Delta X_i = \Delta E_i \tan \delta_i$



$$\Delta E \left(1 - \operatorname{tg} \delta \frac{N_{\alpha_i}}{M_{\alpha_i}} \right) = W_i \frac{N_{\alpha_i}}{M_{\alpha_i}} - \frac{c_i l_i}{F} \left(\sin \alpha_i \frac{N_{\alpha_i}}{M_{\alpha_i}} - \cos \alpha_i \right) - U_{e_i} \left(\cos \alpha_i \frac{N_{\alpha_i}}{M_{\alpha_i}} + \sin \alpha_i \right)$$

→ La soluzione è iterativa del valore di ΔE ,

$\left\{ \begin{array}{l} \text{se } E_n > 0 \text{ si ha } T_i \text{ bassa} \rightarrow F \text{ da ridurre} \\ \text{se } E_n < 0 \text{ si ha } T_i \text{ alto} \rightarrow F \text{ da aumentare} \end{array} \right.$

→ metodo di Sambru

L'ipotesi semplificativa è $\delta = 0$, quindi $x_i = 0$ per le interfacce degli strati.

L'equilibrio verticale trova la spinta normale

$$N'_i = \frac{W_i - \frac{c_i l_i}{F} \sin \alpha_i - U_{e_i} \cos \alpha_i}{M_{\alpha_i}}$$

L'equilibrio orizzontale trova il termine ΔE_i :

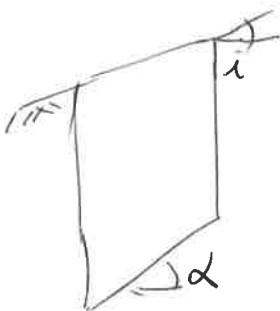
$$\Delta E_i + W_i \operatorname{tg} \alpha_i = \frac{c_i l_i}{F} \frac{1}{\cos \alpha_i} + \frac{W_i - U_{e_i} \cos \alpha_i - \frac{c_i l_i}{F} \sin \alpha_i}{M_{\alpha_i} \cos \alpha_i} \operatorname{tg} \phi'_i$$

Il fattore di sicurezza è valutato per la sommatoria delle strisce.

$$F_s = \frac{\sum_i (c_i l_i + (W_i - U_{e_i} \cos \alpha_i) \operatorname{tg} \phi'_i)}{\sum_i W_i \operatorname{tg} \alpha_i}$$

→ metodo di Lowe & Karafiath

L'ipotesi è sull'angolo δ come media della pendenza superficiale (piano campesano) e superficie di scorrimento.



$$\delta_i = \frac{\alpha_i + \lambda_i}{2}$$

⑩ \rightarrow metodo Corps of Engins

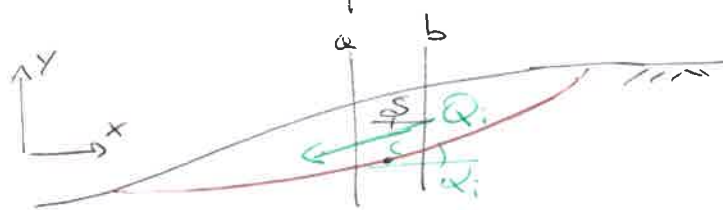
Ipotesi parametrica dell'angolo δ rispetto alla superficie del terreno. Può essere il valore medio, il massimo oppure l'esatta pendenza della i -esima striscia.

+ Metodo RIGOROSO

Insieme di metodologie basate sulla ricerca delle esatte caratteristiche e forze, su strisce speciali e sul complesso, attraverso l'equilibrio dei momenti.

\rightarrow metodo di Spencer

Ipotesi uno spessore trascurabile delle strisce



sistema di equilibrio normale e parallelo

$$\begin{cases} W_i \cos \alpha_i = (N_i + U_i) + Q_i \sin(\alpha_i - \delta) \\ W_i \sin \alpha_i + Q_i \cos(\alpha_i - \delta) = T_i \end{cases}$$

con T_i Coulombiana

Con origine in C, l'equilibrio alle rotazioni dei momenti è $\frac{1}{2} Q_i \cos \delta - \frac{1}{2} Q_i \cos \delta = 0$

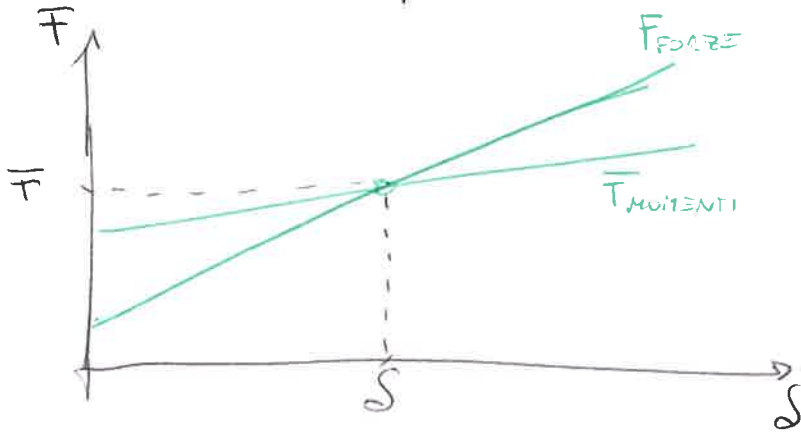
$$M_{oi} = (x_a - x_b) Q_i \cos \delta$$

L'obiettivo è ricavare Q_i del sistema, imponendolo nullo nel complesso.

$$Q_i = \frac{\frac{c_i l_i}{F} - W_i \left(\sin \alpha_i - \frac{\cos \alpha_i}{F} \tan \phi_i' \right) - U_i \frac{\tan \phi_i'}{F}}{\cos(\alpha_i - \delta) + \frac{\sin(\alpha_i - \delta)}{F} \tan \phi_i'}$$

$$\sum_i Q_i = 0$$

si ottengono 2 equazioni con le 2 incognite δ e F_0 ,
in forma implicite. Quindi bisogna iterare



si utilizzano
diversi metodi per
la parametrizzazione
dell'angolo δ

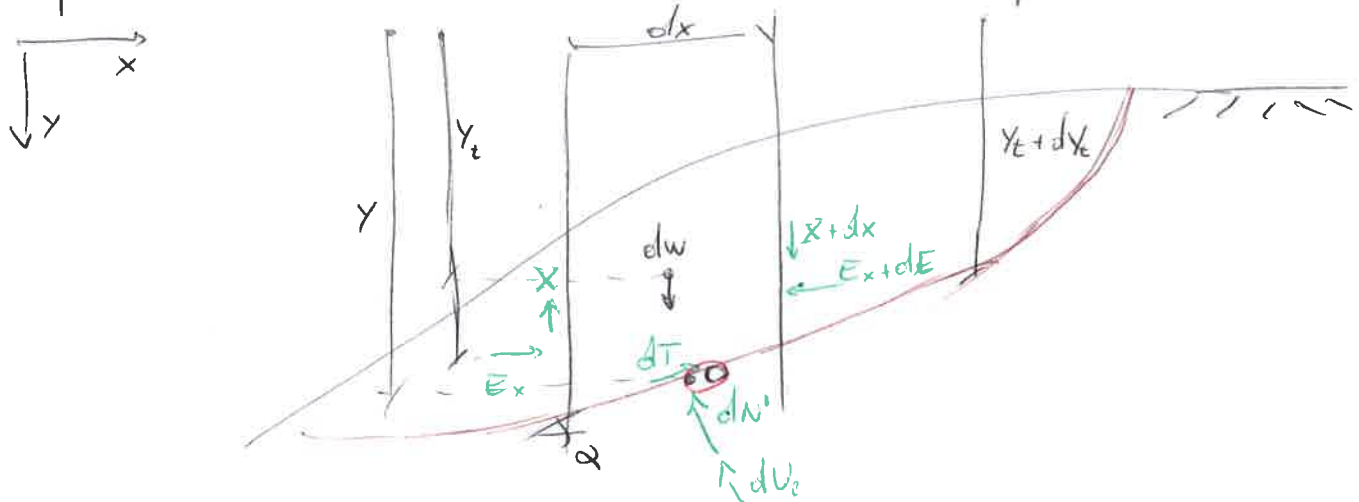
Nel breve termine il raggio r_u cambia in base
alle differenze dei metodi.

}	$\bar{T}_{BISHOP} - F_{SPENCER} \leq 0,5\%$	$r_u = \frac{u}{\delta h} \approx 0,2$	
	$\bar{T}_{BISHOP} - F_{SPENCER} \approx 3\%$	$r_u > 0,25$	sup. piena circolare
	$\bar{T}_{BISHOP} \rightarrow F_{SPENCER}$	$r_u \approx 0$	sup. circolare

con c' elevato ~~lungo~~ (breve termine) le forze vengono applicate fuori dal concio, con zone di fessurazione.

metodo di Morgenstern & Price

si valutano le forze sulle ~~spalte~~ striscie di spessore
infinitesimo dx discretizzato nello spazio.



11

Com origine O , si valutano i momenti agenti

$$X \frac{dx}{2} + (X+dx) \frac{dx}{2} + E(Y-Y_t) - (E+dE)(Y-Y_t - dY_t) + dW g_1 + dN' g_2 + dU g_3$$

$$\rightarrow X dx + E dy_t - dE (Y - Y_t) = 0$$

quindi la forza $X = y \frac{dE}{dx} - \frac{d(E - Y_t)}{dx}$

L'equilibrio alla traslazione ortogonale alle striscia restituisce il valore di dN'

$$dW \cos \alpha + dx \cos \alpha - dE \sin \alpha = dN' + dU'$$

mentre l'equilibrio alla traslazione parallela alle striscie calcola il fattore F in funzione alle T Coulombiane.

$$dT = dW \sin \alpha + dX \sin \alpha + dE \cos \alpha = \frac{c' dP + dN' \tan \phi'}{F}$$

si ottiene un sistema di 2 equazioni con 3 incognite:

$$\begin{cases} X = y \frac{dE}{dx} - \frac{d(E - Y_t)}{dx} \\ \frac{dE}{dx} \left(1 + \frac{dy}{dx} \frac{\tan \phi'}{F}\right) + \frac{dX}{dx} \left(\frac{dy}{dx} - \frac{\tan \phi'}{F}\right) = \frac{c'}{F} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right) + \frac{dW}{dx} \left(-\frac{dy}{dx} + \frac{\tan \phi'}{F} - \nu \left(1 + \left(\frac{dy}{dx}\right)^2\right) \frac{\tan \phi'}{F}\right) \end{cases}$$

Le ipotesi riguardano una variazione del coefficiente di sicurezza -

$$X(x) = \lambda \cdot f(x) \cdot E(x)$$

se $f(x) = 1 \rightarrow$ metodo di Spencer
se $f(x) \neq 1 \rightarrow$ variazione decimale

$\delta = \lambda \cdot f(x)$ angolo delle forze di interstriscia

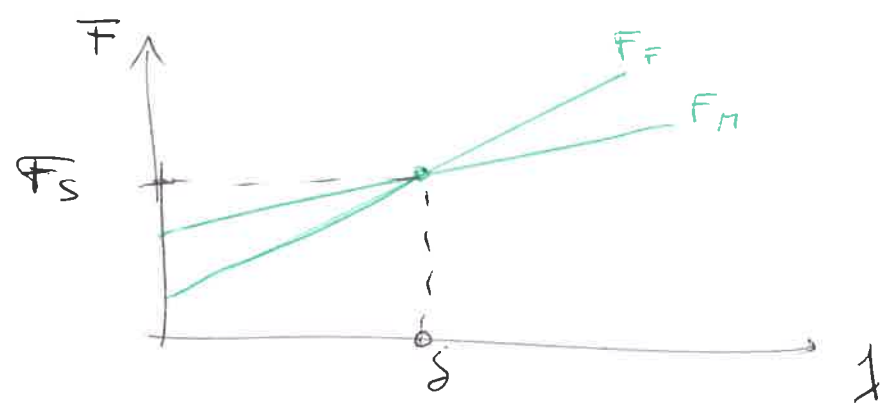
→ metodo di Morgenstein & Chaim

Migliore dettaglio nella scelta della funzione per il fattore di sicurezza.

$$X(x) = \lambda (f_1(x) + f_0(x)) E(x)$$

$f_0 \rightarrow$ fisso alle estremità
 $f_1 \rightarrow$ varia in sin

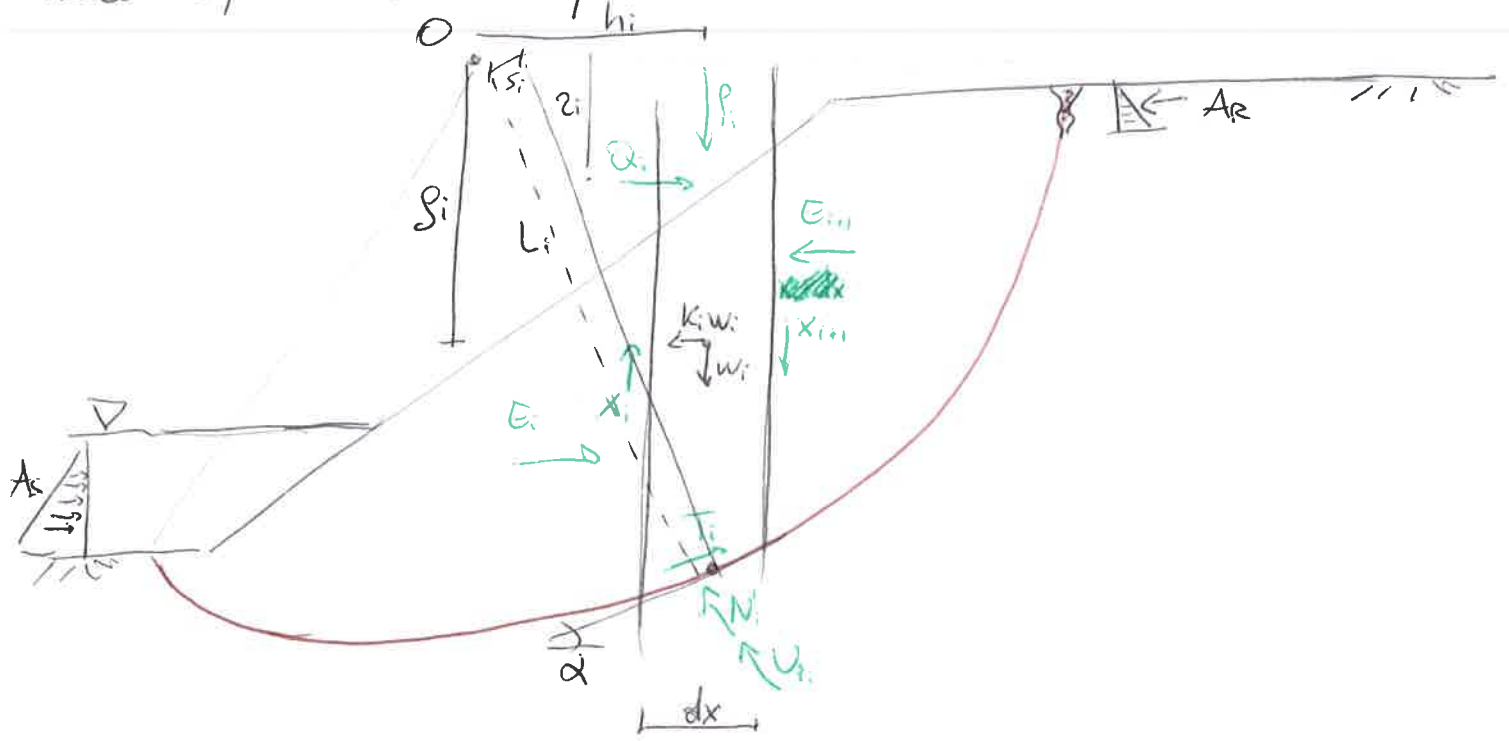
λ è il parametro libero e si trova con le equazioni di equilibrio.



→ Global Equilibrium Method (GLE)

Dalle stesse condizioni proposte da Morgenstein e ~~Love~~ Price di lunghezze infinitesime (dx) e dipendenza delle forze secondo $X(x) = \lambda \cdot f(x) \cdot E(x)$

vengono equilibrate le spinte nel globale con le sommatorie delle equazioni di equilibrio.



12) L'equilibrio alla traslazione verticale è dato da

$$W_i + P_i + \Delta X = (N_i + U_i) \cos \alpha + \frac{c_i l_i + N_i' T_g \phi_i'}{F} \sin \alpha$$

in cui si calcola la spinta normale

$$N_i' = \frac{W_i + P_i + \Delta X - U_i \cos \alpha - c_i l_i / F \cdot \sin \alpha}{\cos \alpha + \sin \alpha \frac{T_g \phi_i'}{F}}$$

L'equilibrio alla traslazione orizzontale trova ΔE con

$$\Delta E + k W_i - Q_i = \frac{c_i l_i + N_i' T_g \phi_i'}{F} \cos \alpha - (N_i + U_i) \sin \alpha$$

in cui
$$\Delta E = \frac{c_i l_i + N_i' T_g \phi_i'}{F} \cos \alpha - (N_i + U_i) \sin \alpha + Q_i - k W_i$$

Allora l'equilibrio alle TRASLAZIONI GLOBALI si considera

$$\sum_i \Delta E + A_R - A_S = 0 \quad \text{con i termini esterni}$$

$$\sum_i \left(\frac{c_i l_i + N_i' T_g \phi_i'}{F} \cos \alpha - (N_i + U_i) \sin \alpha + Q_i - k W_i \right) + A_R - A_S = 0$$

si trova il fattore di sicurezza per le forze F_F

$$F_F = \frac{\sum_i (c_i l_i + N_i' T_g \phi_i')}{\sum_i (k W_i - Q_i + (N_i + U_i) \sin \alpha - (A_R - A_S))}$$

Allo stesso modo si valuta l'equilibrio alle ROTAZIONI GLOBALI

$$\sum_i W_i h_i + \sum_i k_i W_i g_i + \sum_i P_i h_i - \sum_i Q_i z_i + \sum_i (N_i + U_i) s_i - \frac{\sum_i (c_i l_i + N_i' T_g \phi_i')}{F} L_i + \Delta A \alpha_i = 0$$

In cui si ricava il fattore di sicurezza per i momenti F_M

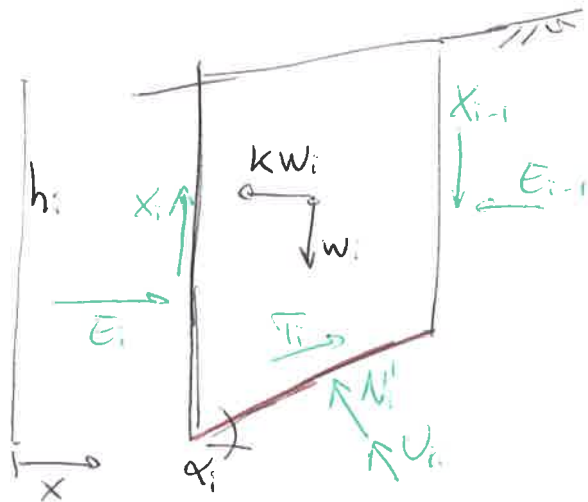
Il fattore di sicurezza globale è il confronto grafico dei due termini in funzione di λ .

→ metodo di Sarma

È utilizzato per tenere conto degli effetti sismici, valido in lungo e breve termine della definizione del legame

$$X(x) = \lambda f(x) X_d$$

per cui $X_d = \begin{cases} \frac{C_u h_i}{F} \\ \frac{c_i h_i + E_i T_i \theta_i}{F} \end{cases}$



L'equilibrio alla traslazione verticale è dato da

$$W_i + \Delta X_i = N_i \cos \alpha_i + \frac{c_i l_i + N_i T_i \theta_i}{F} \sin \alpha_i$$

mentre l'equilibrio alla traslazione orizzontale vede

$$\Delta E_i + kW_i + N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i = 0$$

Le incognite del problema sono molte, quindi valgono le ipotesi dell'equilibrio globale

$$\Delta E = -kW_i - N_i \sin \alpha_i + T_i \sin \alpha_i = 0 \quad \text{senza forze di estremità}$$

È dato un baricentro globale in cui

$$\sum_i (N_i \cos \alpha_i + T_i \sin \alpha_i) (x_i - x_G) + \sum_i (N_i \sin \alpha_i - T_i \cos \alpha_i) (y_i - y_G) = 0$$

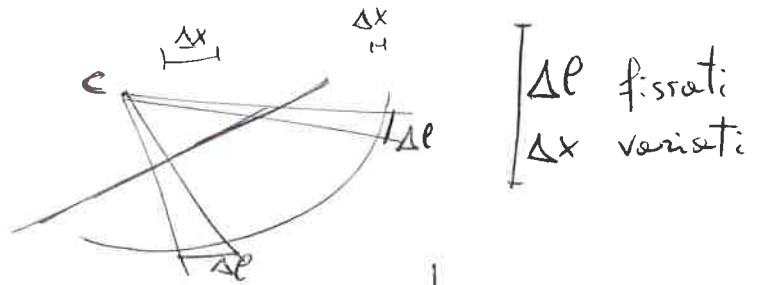
Le uniche incognite restano $k(F)$ e $\lambda(F)$, trovando i valori per cui il fattore di sicurezza è minimo.

Le geometrie trovate ~~non~~ devono essere verificate nel legame $X(x)$ iniziale, anche nel caso di diversi strati di terreno eterogeneo.

PROBLEMI NUMERICI

⚠ Usare un numero di strisce sufficiente

{	10 ÷ 12	se calcolo manuale
	30 ÷ 60	se calcolo con codice



Δe fissati
 Δx variati

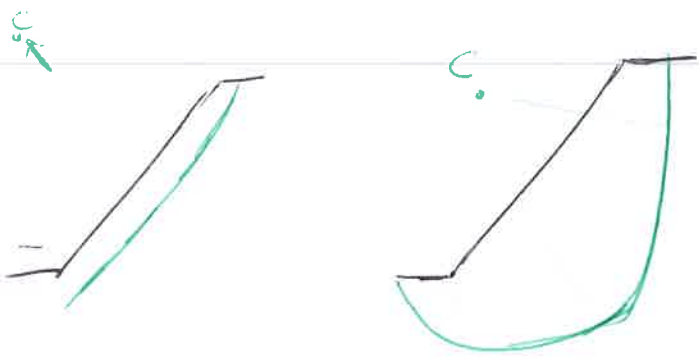
CARTE DI STABILITÀ

AFFIDABILITÀ CODICE VERIFICHE

SABBIA
 (Bishop)
 $c' = 0$
 $\phi' \neq 0$
 $c \rightarrow \infty$
 superficie
 parallela
 piena

ARGILLA
 (Taylor)
 $c' \rightarrow c_u$
 $\phi = 0$
 c vicino
 superficie
 circolare
 profonda

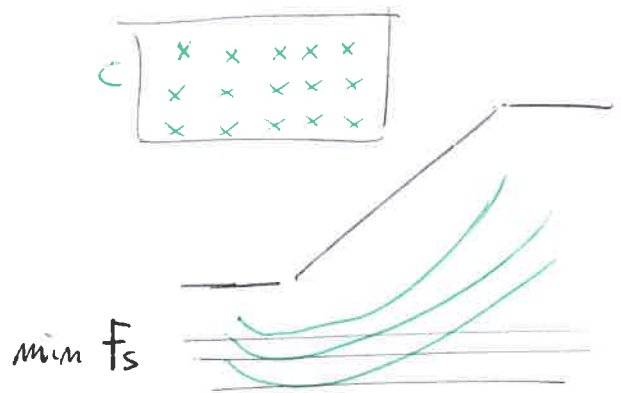
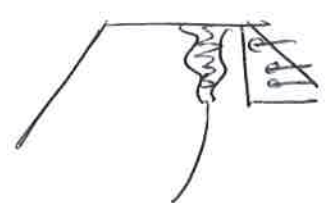
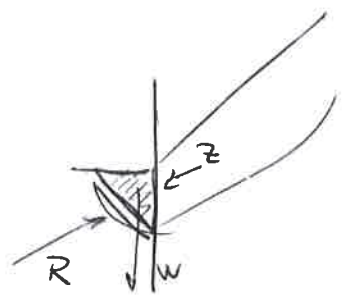
- confronto con letteratura
- pendio sommerso confrontato con diverso γ
- terreno rinforzato confronto con terreno normale
- rotazione sistema di riferimento per analisi sismica



N_i

> 0
 molto
 compresso
 al piede

< 0
 trazione
 in superficie
 ↓
 FESSURAZIONE
 pressione u
 c' elevato

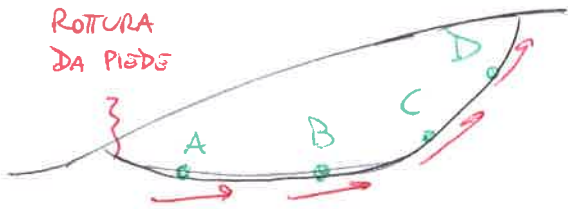


CASI PARTICOLARI

**ROTTURA
PROGRESSIVA**

Pendi poco pendenti,
molto oc (argille)

ROTTURA
DA PIEDE



caso inverso

ROTTURA
DA MONTE

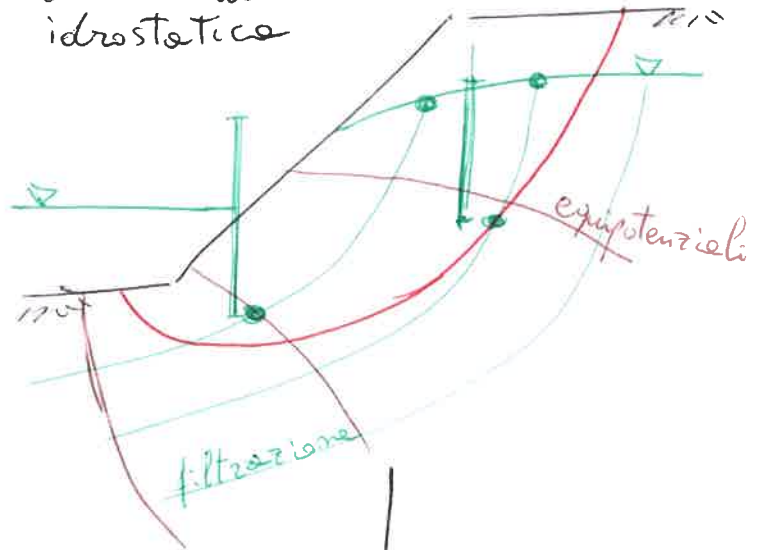


COMPRESSIONE
AL PIEDE

**PRESENZA DI
ACQUA**

valutazione di linee
equipotenzioli

diverso da
idrostatica



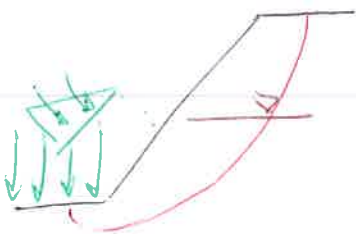
PENDII SOMMERSI

METODO 1

METODO 2

METODO 3

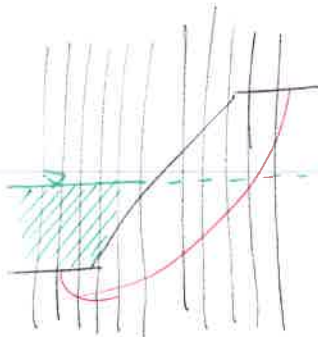
METODO 4



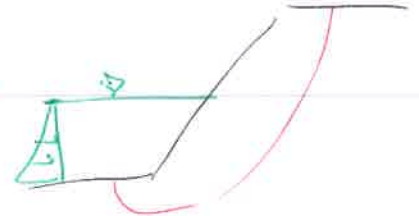
↑
pressioni
v acqua
superficie



↑
senza acqua
com 2 terreni

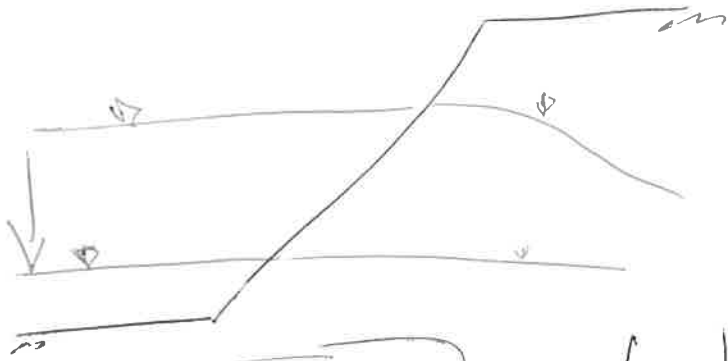


↑
acqua
come terreno



↑
spinta laterale
in equilibrio
(orizzontale)

→ SVASO RAPIDO



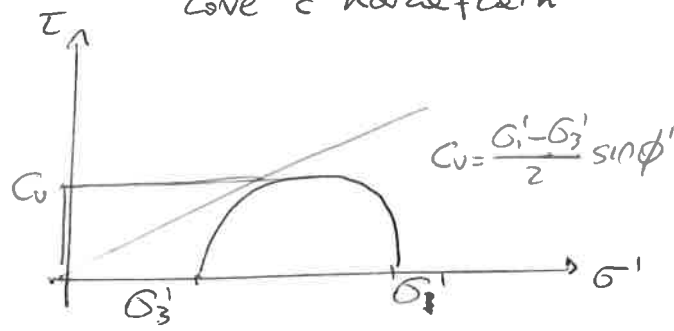
metodo per
Tensioni
efficaci

c_v deriva dalla differenza
di superficie d'acqua e
dalle τ di taglio

Tempo di svasso
 $T_v > 3 \rightarrow \Delta u$ piccole
 $T_v < 0,01 \rightarrow \Delta u$ grande

⚠ transizione difficile da determinare

Love & Karzfiedt



metodo per
tensioni Totali

c_v sulla superficie
di scorrimento



Valutazione di Δu e
velocità di svasso

$$T_v = \frac{c_v \cdot t}{s^2}, \quad c_v = \frac{kH}{\gamma_w}$$

① DEFINIZIONE DEL FATTORE DI SICUREZZA

Rapporto tra il valore limite di resistenza ed il valore applicato

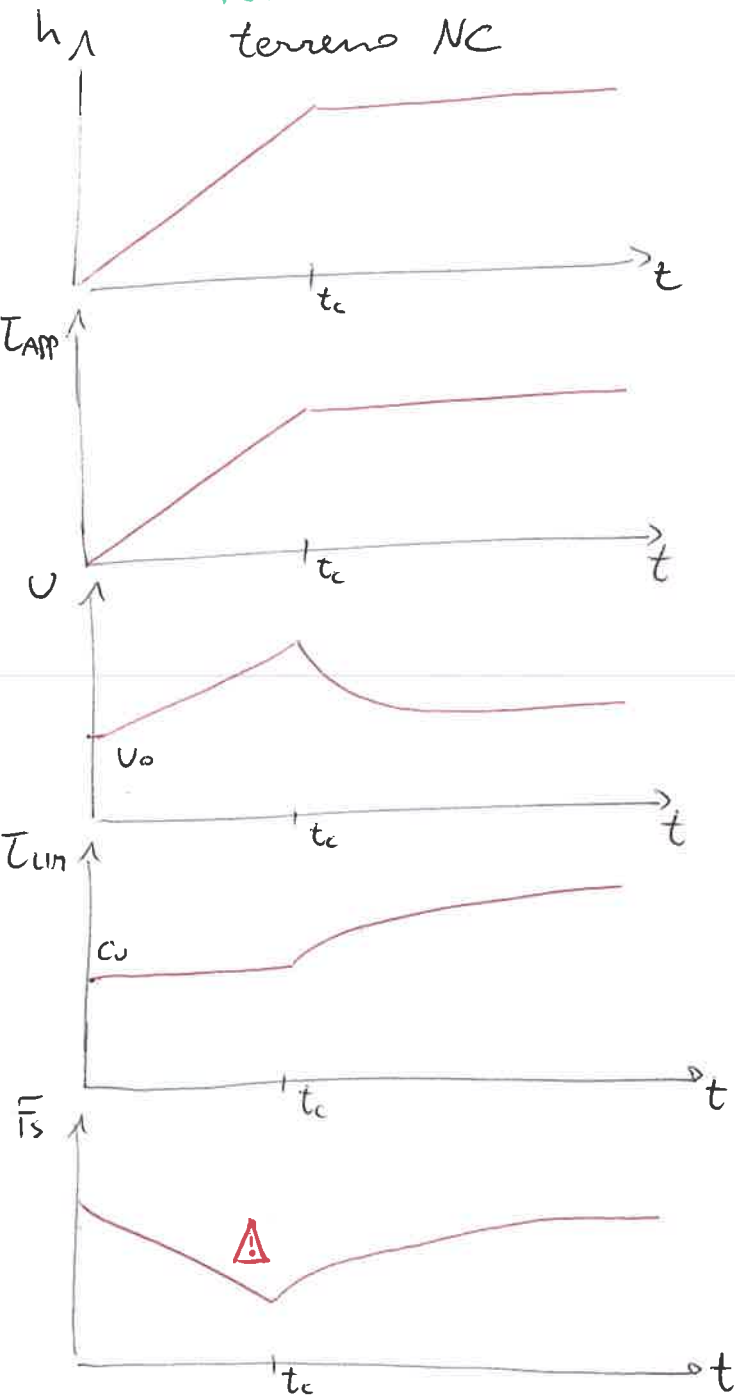
$$\bar{F}_s = \frac{Z_{LIM}}{Z_{APPL}} = \frac{Q_{LIM}}{Q_{APPL}} = \frac{M_{LIM}}{M_{APPL}}$$

In termini di sforzo di taglio, di carico o momento.

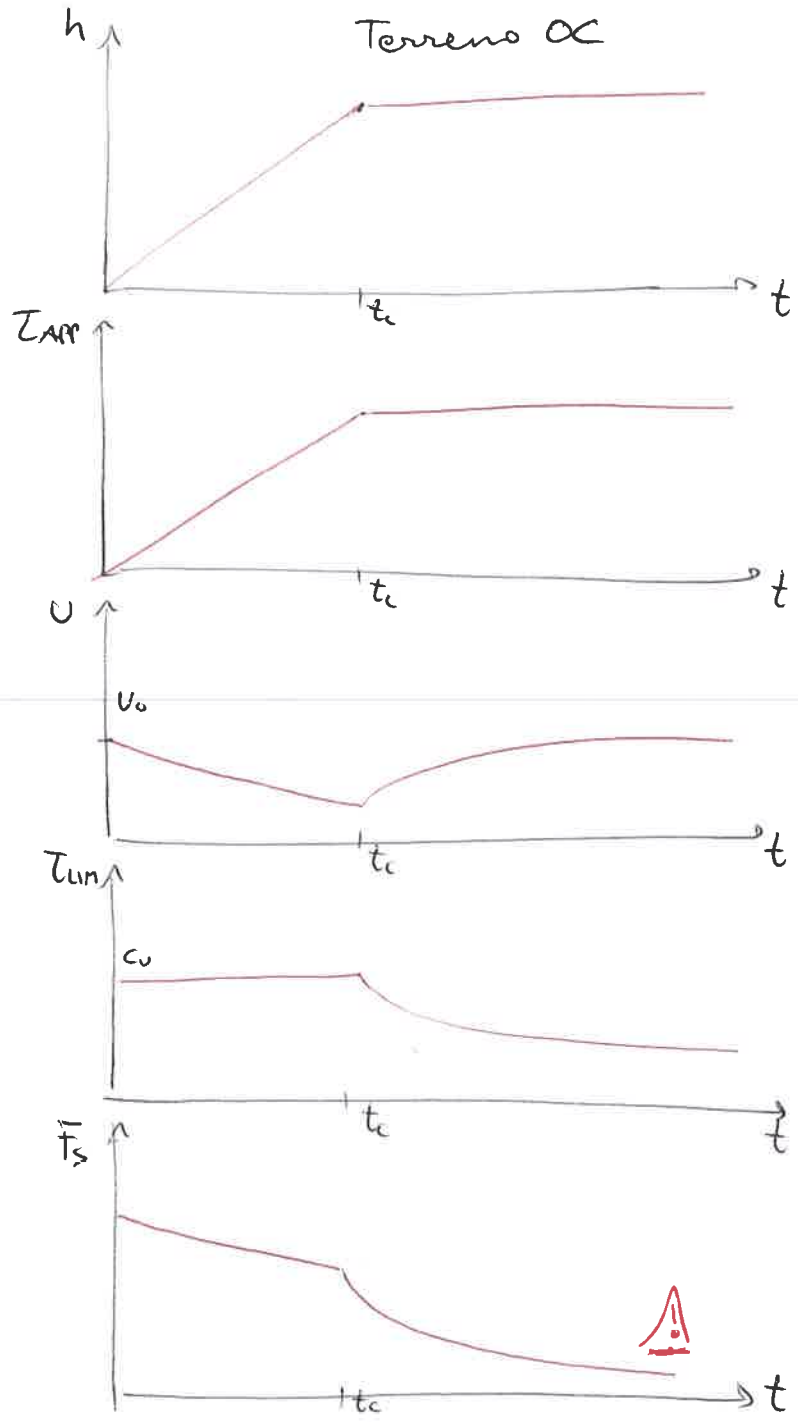
→ D.M. 1988 prima definizione, aggiornato nel 2008 -

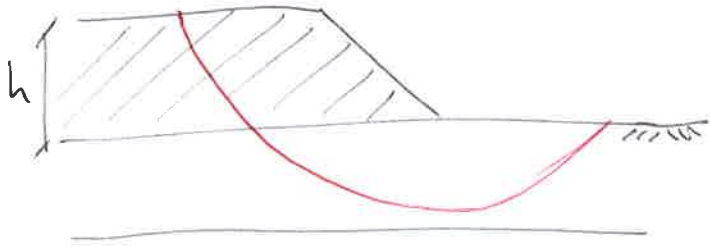
Variazione nel tempo della sicurezza

COSTRUZIONE RILEVATO (+h)
terreno NC



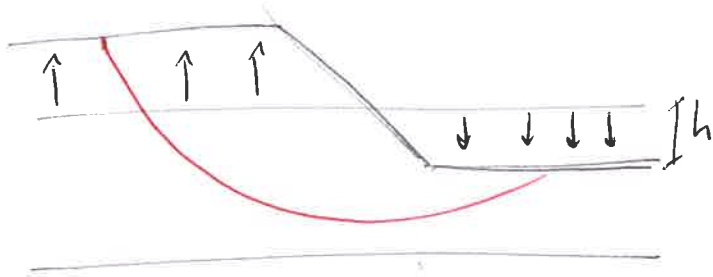
OPERA DI SCAVO (-h)
Terreno OC





La costruzione di un rilevato vede la sua condizione peggiore alla fine della costruzione (t_c).

Nei giorni successivi si ha la consolidazione dell'opera quindi si applica l'analisi a BREVE TERMINE.

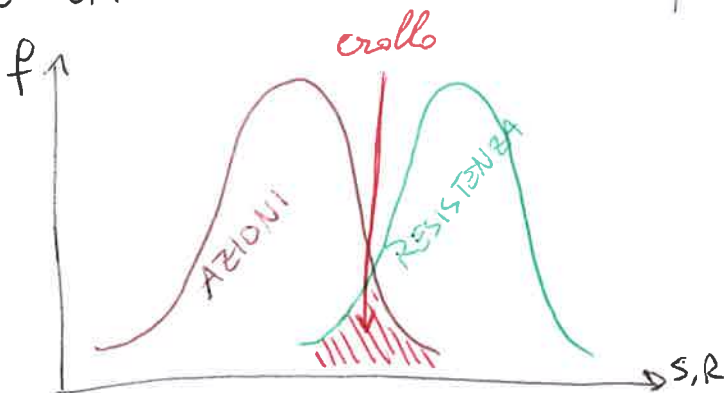


Nello scavo si ha la condizione peggiore dopo molto tempo dalla realizzazione. Quindi si applica l'analisi a LUNGO TERMINE.

L'ipotesi principale è che F_s è costante lungo tutta la superficie di scorrimento, quindi il terreno è omogeneo.

$$\text{In genere } T_{APP} = \frac{T_{LIM}}{F_s} = \begin{cases} \text{BREVE TERMINE} & = \frac{C_u}{F_s} \\ \text{LUNGO TERMINE} & = \frac{c' + \sigma' \tan \phi'}{F_s} \end{cases}$$

Il NUOVO APPROCCIO è di tipo semi-probabilistico, accettando un rischio di crollo percentuale.



si definisce un livello di soglia accettabile in funzione all'opera e al costo economico.

② Per definizione, si impongono le azioni inferiori al 85% delle probabilità, mentre le resistenze superiori al 5% delle probabilità.

↳ utilizzo dei coefficienti

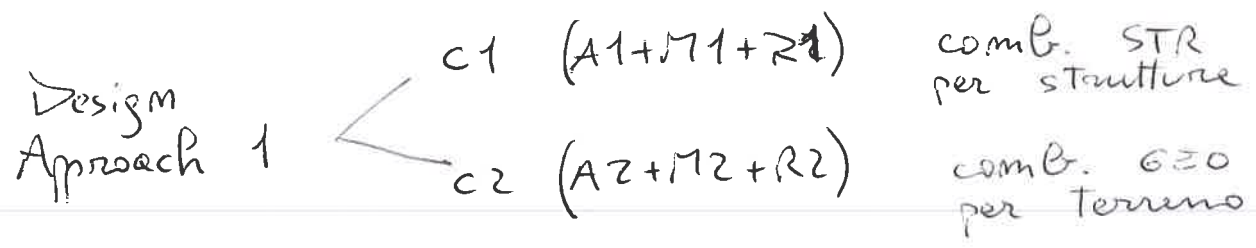
Al limite di sicurezza per valori caratteristici $S_k \leq R_k$ si aggiungono i coefficienti di sicurezza:

$$\gamma_F S_k \leq \frac{R_k}{\gamma_R}$$

⇒ si definisce $E_d \leq R_d$ come termini di progetto (design).

$$\begin{cases} E_d = f(\gamma_F \bar{F}_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; \alpha_d) & \text{effetti delle azioni} \\ R_d = \frac{1}{\gamma_R} \cdot f(\gamma_R \bar{F}_k; \frac{X_k}{\gamma_M}; \alpha_d) & \text{resistenza di calcolo} \end{cases}$$

Da Normativa (NTC ed EC) sono tabulati i coefficienti per utilizzare la combinazione di carico adeguata.



		A1	A2
carichi permanenti	Favorevoli	1	1
	Sfavorevoli	1,3	1
carichi variabili	Favorevoli	0	0
	Sfavorevoli	1,5	1,3

	M1	M2
$\tan \phi'$	1	1,25
c'	1	1,25
c_u	1	1,4

A causa delle incertezze del valore reale nella probabilità,

Nei metodi di calcolo della sicurezza, vengono utilizzati i coefficienti γ_m e γ_R in maniera differente:

il metodo di Fellenius pone $F_s = \gamma_R \gamma_m$, per cui il rapporto di sicurezza è

$$\bar{F}_s = (\gamma_m \gamma_R)_{\text{molitante}} = \frac{\sum_i \left(\frac{c'_i b_i + (\gamma_c W_i - \gamma_c U_i b_i) \tan \phi'_i}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \cdot \tan \phi'_i / (\gamma_m \gamma_R)} \right)}{\sum_i (\gamma_c W_i \sin \alpha_i)} \geq 1,1 \cdot 1,25$$

il metodo di Bishop pone $F_s = \gamma_R$, per cui il rapporto di sicurezza è

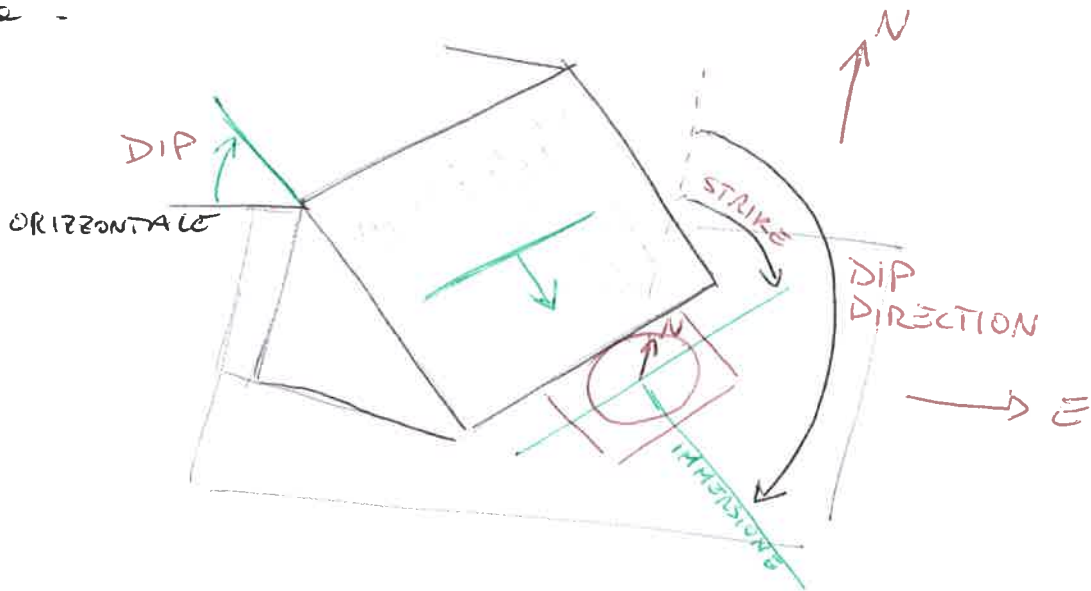
$$F_s = (\gamma_R)_{\text{molitante}} = \frac{\sum_i \left(\frac{c'_i b_i + (\gamma_c W_i - \gamma_c U_i b_i) \tan \phi'_i}{\cos \alpha_i + \sin \alpha_i \cdot \tan \phi'_i / (\gamma_R)} \right)}{\sum_i (\gamma_c W_i \sin \alpha_i)} \geq 1,1$$

① DISCONTINUITÀ NELLE ROCCE

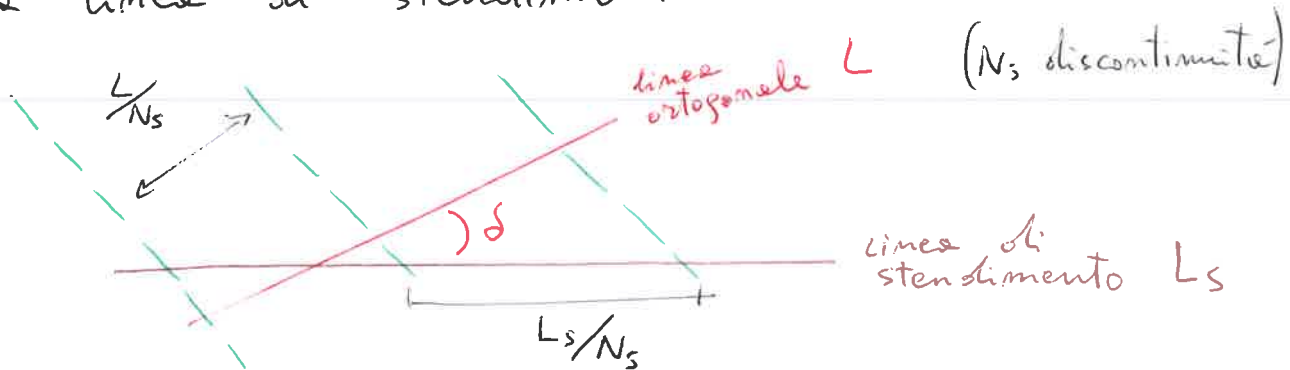
Tipicamente, un ammasso roccioso è formato da blocchi intatti e discontinuità dette GIUNTI e FAGLIE, rispettivamente piccoli e grandi spostamenti relativi.

Proprietà

- ORIENTAZIONE, sviluppo nello spazio delle discontinuità.



- SPAZIATURA, distanza ortogonale tra le discontinuità lungo la linea di stendimento



Si applica una correzione con $w = \frac{1}{\cos \delta}$ in peso.

$N_w = N \cdot w$ (discontinuità con peso)

Valutazione per famiglie di discontinuità grazie

al rapporto $N:L = N_s:L_s \rightarrow N = N_s \frac{L}{L_s}$

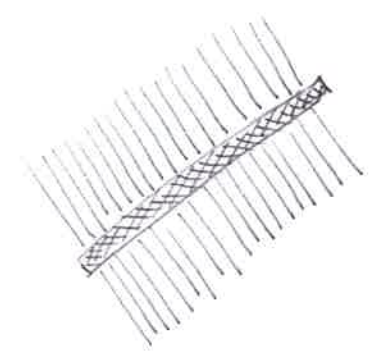
$\rightarrow w^* = \left(\frac{\sum N}{\sum N_w} \right) \cdot w$

- CONTINUITÀ (o PERSISTENZA), estensione della discontinuità in lunghezza.



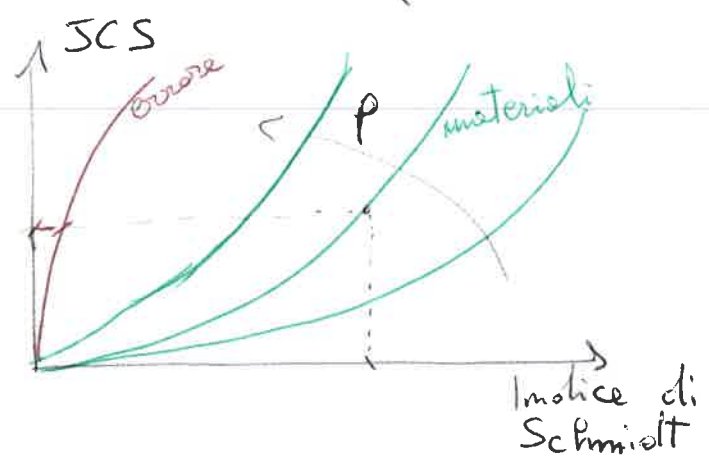
- SCABREZZA, rugosità del piano in movimento, detta "scabrezza" per piccola scala, "ondulazione" su grande scala.

Misurata col pettine di Barton che danno il profilo della discontinuità.

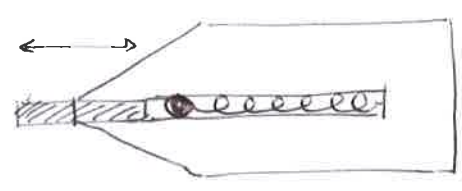


La scala JRC (Joint Roughness Coeff.) da 0 a 20.

- RESISTENZA DI PARETE, misura l'alterazione tramite la prova di compressione semplice. Si usa lo sclerometro (o martello di Schmidt)



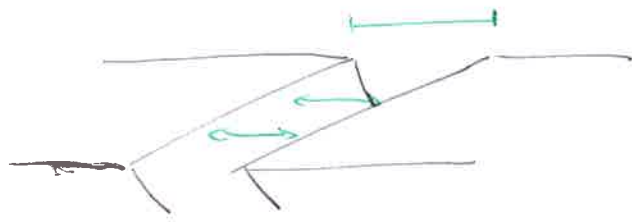
dato in JCS (Joint Compression Strength)



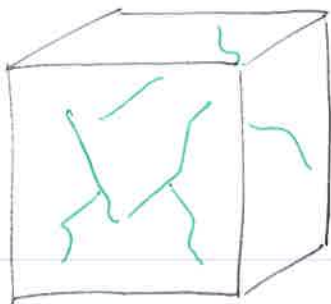
La misura può essere effettuata solo su rocce non alterate, ottenendo gli stessi risultati se si ripete.

$$\left[\text{GRADO DI ALTERAZIONE} = \frac{\text{JCS alterato}}{\text{JCS inalterato}} \right]$$

- ② - APERTURA, distanza fra i lembi di una discontinuità
- t_c < $1/10$ mm molto stretta
- > 100 mm molto larga



- MATERIALE DI RIEMPIMENTO, (se presente) si valuta se questo è naturale, per frantumazione, oppure artificiale, posto in sito. Può essere limo, sabbie o argilla in base alle caratteristiche globali.
- DIMENSIONI BLOCCHI, si valuta la densità delle discontinuità nello spazio.



J_v = numero di discontinuità per ogni m^3

> 30 blocchi piccoli

< 1 blocchi grandi

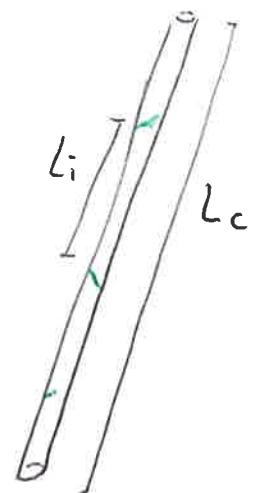
- Parametro **RQD** (Rock Quality Degree) per valutare la qualità della roccia da un sondaggio

$$RQD = \frac{\sum L_i^*}{L_c}, \quad L_i^* = L_i > 10 \text{ cm}$$

(0 = fessurate, 1 = integra)

$$RQD = 115 - 3,3 J_v$$

minore J_v , migliore è la qualità RQD

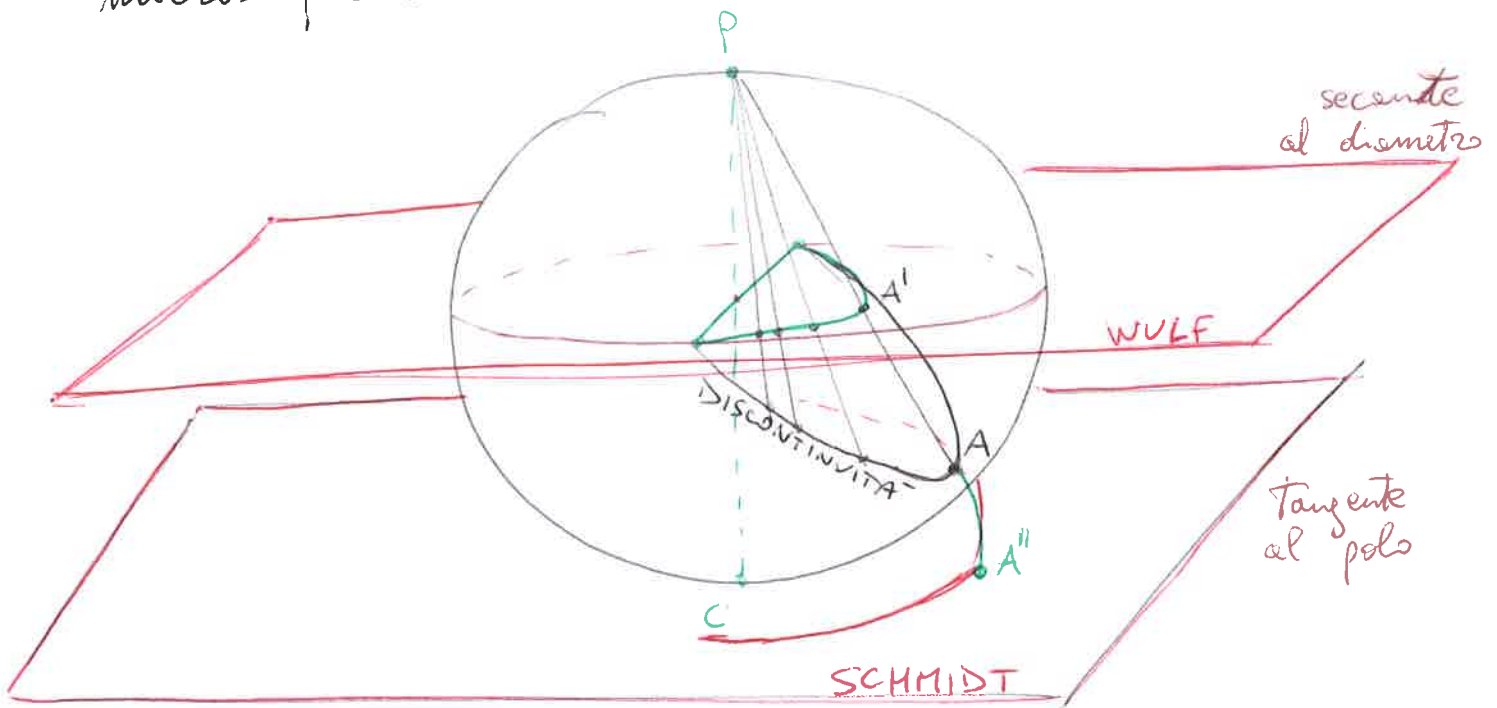


Reticoli Stereografici

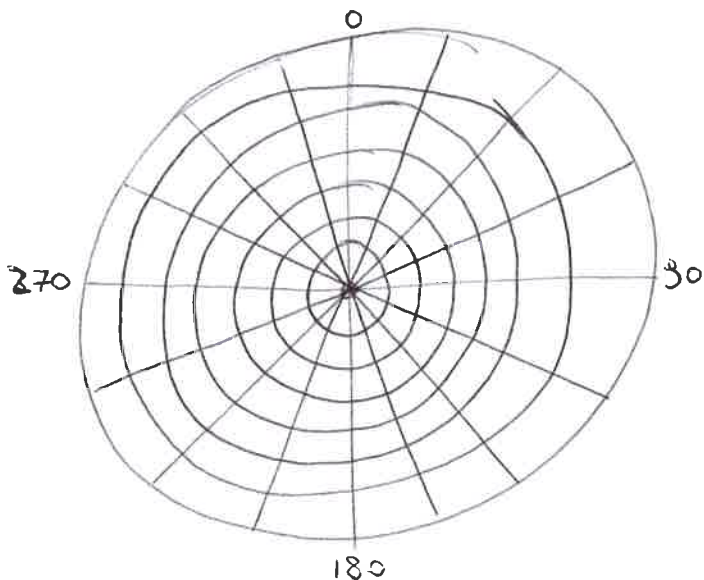
Esistono due metodi per rappresentare graficamente le discontinuità su una sfera -

→ PROIEZIONE DI SCHMIDT, conserva l'area quindi c'è una distorsione delle forme, usato per la struttura geologica;

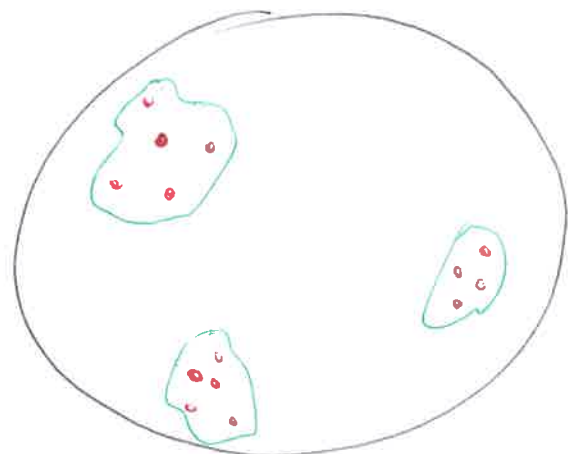
→ PROIEZIONE DI WULF, conserva l'angolo quindi ~~non~~ varia l'espansione delle forme, usato per i cristalli microscopici.



RETICOLLO POLARE



Raggruppamento per famiglie di poli con stesso peso w^*



③ La differenza tra le proiezioni è ~~la~~ sull'orientazione delle tracce ciclografiche che rappresentano i piani.

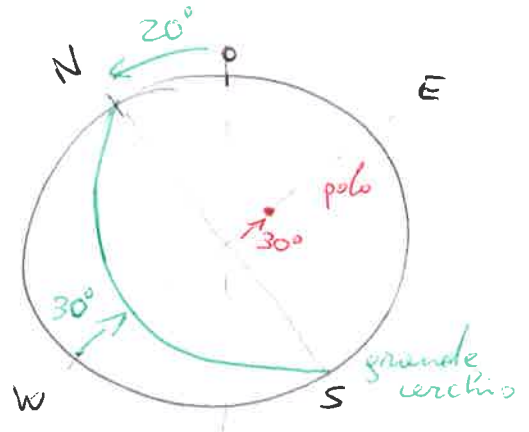
Gli elementi sono:

- POLO, punto opposto la discontinuità;
- GRANDE CERCHIO, verticale tra i poli ~~non~~ spostata dal meridiano centrale.

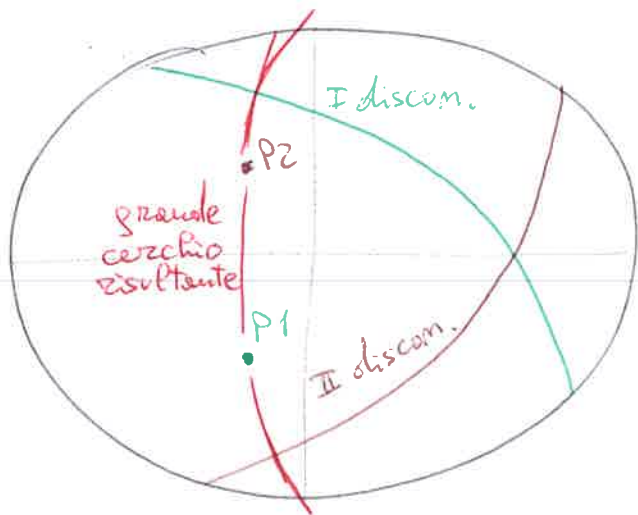
Rappresentazione sul reticolo

immersione angolo
~~N20~~
 [N340/30]

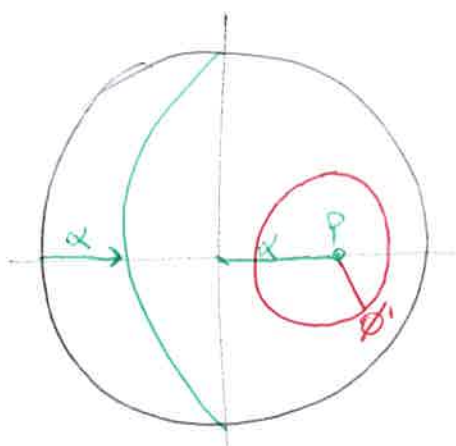
STRIKE N20°W
 DIP 30° SW



Intersezione delle discontinuità rappresentate da un punto di incontro dei cerchi.



Sono possibili più discontinuità interseccate nello spazio; ci consente di calcolare gli angoli in complesse famiglie di discontinuità.

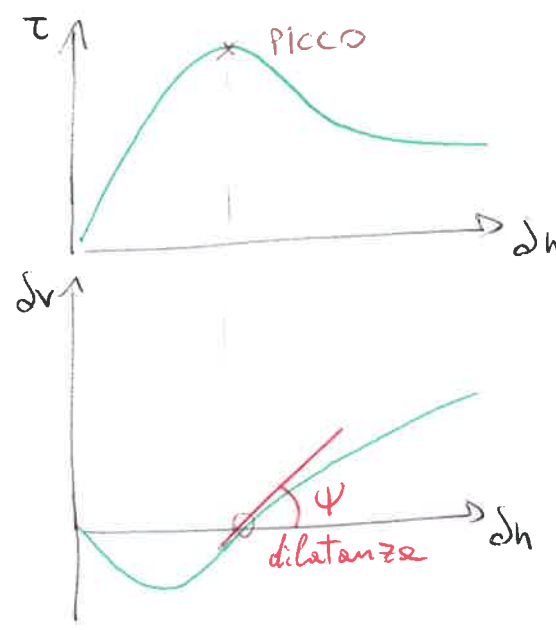
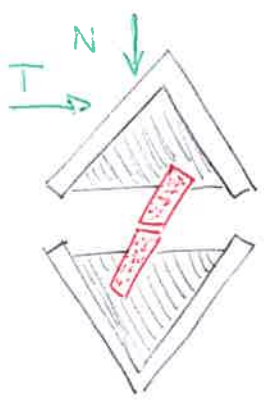


Dato che α è l'angolo DIP, inclinazione del piano, viene confrontato

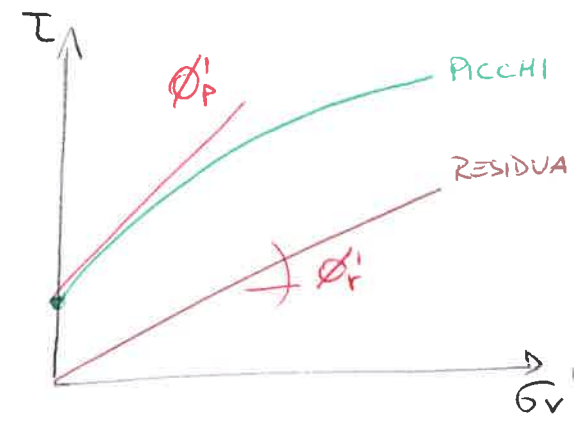
- se $\alpha > \phi'$ NON STABILE
- se $\alpha < \phi'$ STABILE

Resistenza delle discontinuità

La resistenza si misura con la prova di taglio diretto in laboratorio.

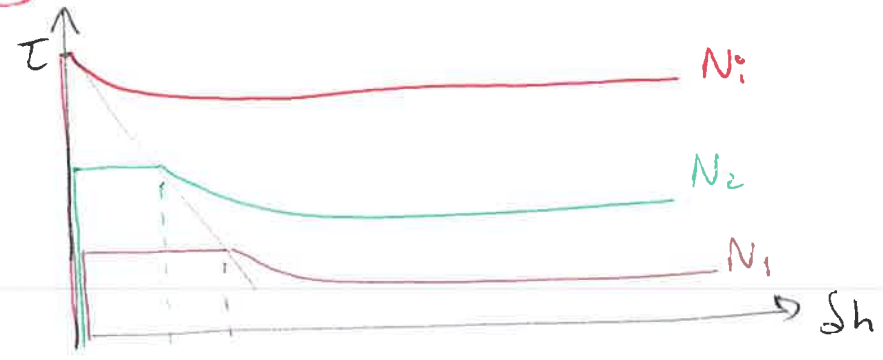
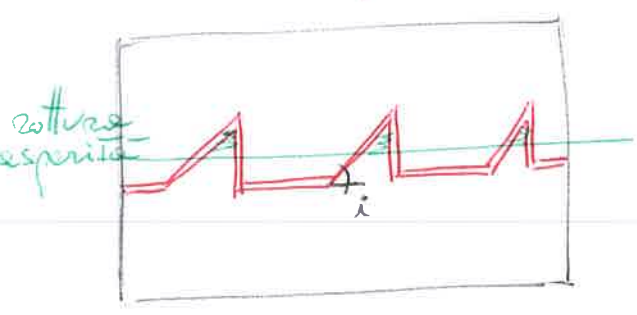


INVILUPPO DELLE PROVE TRIASSIALI

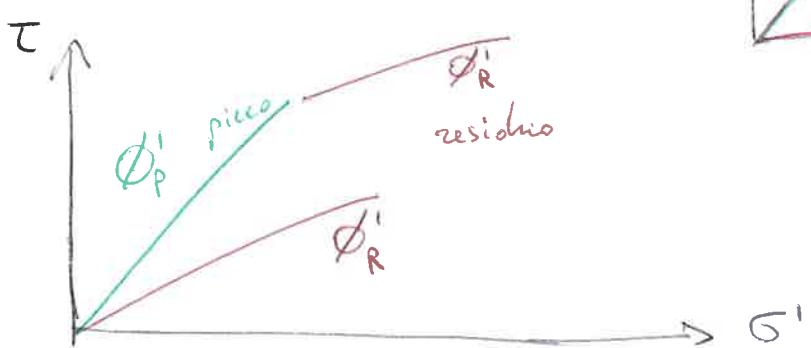


Se la discontinuità è naturale presenta un picco, mentre la discontinuità artificiale non ha il picco e neanche la deformazione verticale.

Valutazione del giunto



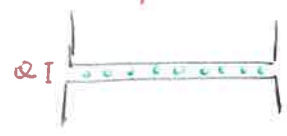
si confrontano prove diverse con N diversi.
($N_1 < N_2 < N_3$)



angolo i = dilatazione
 $\phi_p^i = i + \phi_r^i$

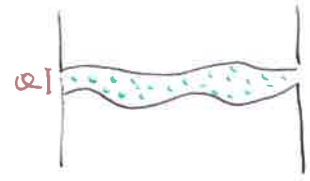
④ \rightarrow Valutazione del riempimento dei giunti:

- non interfering



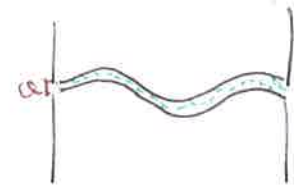
solo resistenza riempimento

- interfering



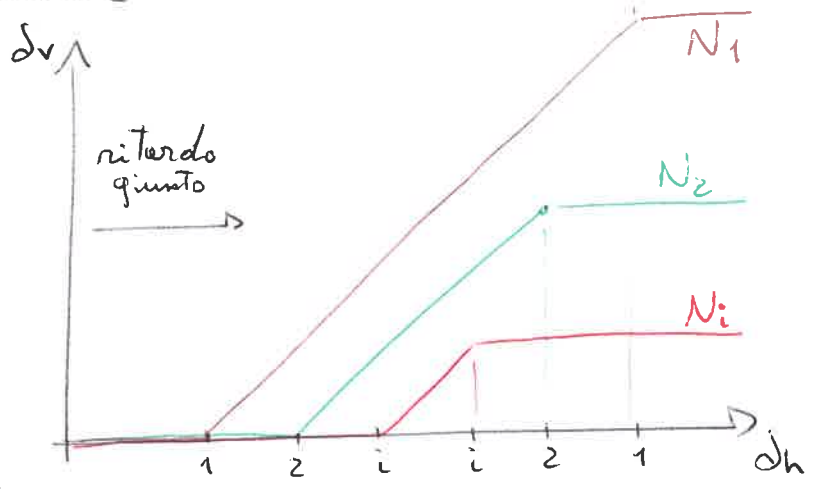
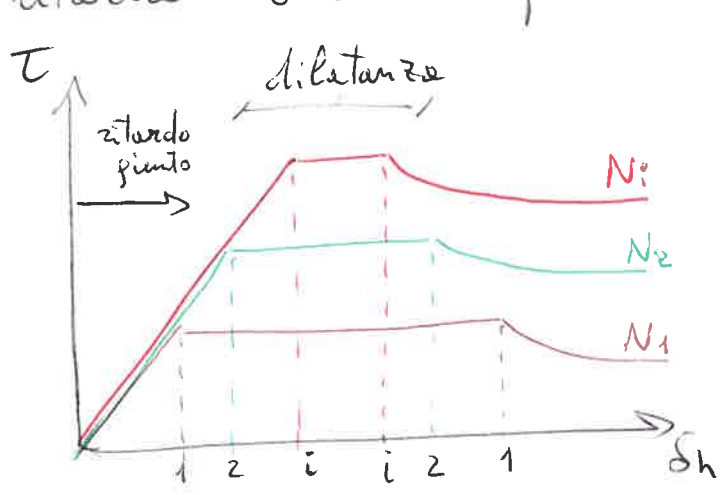
altezze asperità corrispondenti all'apertura

- interlocking



altezze asperità maggiore dell'apertura

Nelle prove triassiali, il riempimento provoca un "ritardo" del comportamento.



L'angolo efficace tra ϕ'_p e ϕ'_R è i_{eff} valutato:

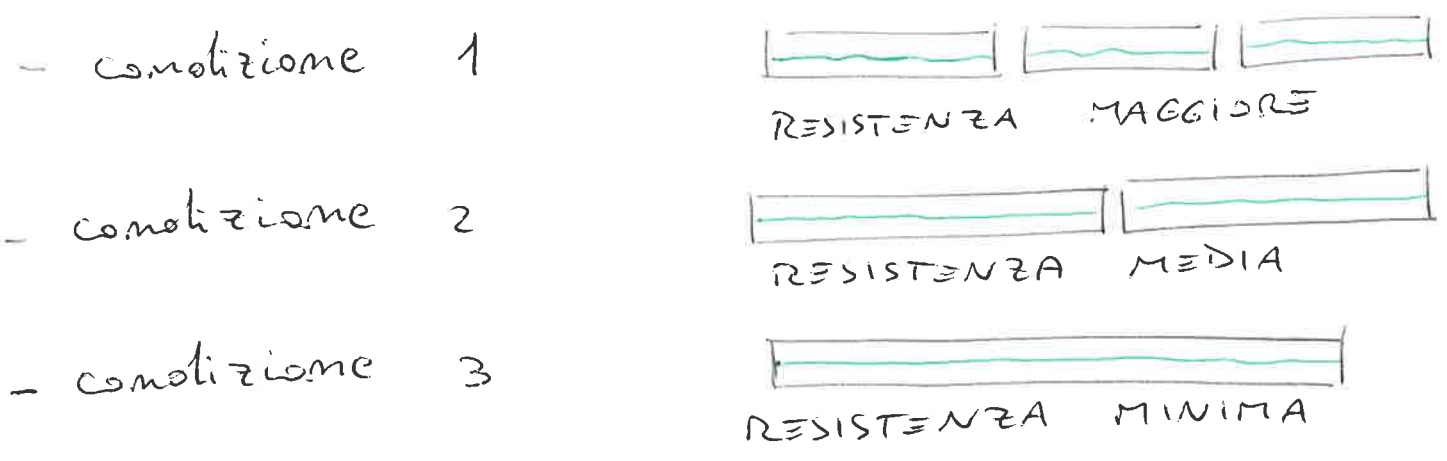
$$i_{eff} = SRC \log_{10} \left(\frac{SCS}{\sigma'_v} \right)$$

\rightarrow Il modello di Barton valuta diverse asperità in cui il taglio $\tau = \sigma' \tan(\phi'_R + i)$

Allora $\tau = \sigma' \tan \left(\phi'_R + SRC \log_{10} \left(\frac{SCS}{\sigma'_v} \right) \right)$

con ϕ'_R e SCS nelle relazioni empiriche trovate con le prove di sclerometria e la rugosità.

Nelle analisi di laboratorio si ha un **effetto scala**



Per L maggiori ~~aumentano~~ diminuiscono SRC (rugosità) e SCS (resistenza) -

l'equazione di Barton & Bandis

$$\tau = \sigma_n' \tan \left(\phi_n' + SRC_n \log_{10} \left(\frac{SCS_n}{\sigma_n'} \right) + i \right)$$

in cui

$$\begin{cases} i = \text{ondulazione} \\ SRC_n = SRC_0 \left(\frac{L_n}{L} \right)^{-0,62} \\ SCS_n = SCS_0 \left(\frac{L_n}{L} \right)^{-0,03} SRC_0 \end{cases}$$

Deformabilità della discontinuità

Le discontinuità sono elastiche per semplicità

$$\begin{vmatrix} \Delta \sigma_n \\ \Delta \tau \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} k_n & 0 \\ 0 & k_s \end{vmatrix} \cdot \begin{vmatrix} \Delta s_n \\ \Delta s_s \end{vmatrix}$$

quindi le deformazioni sono date dalla parte elastica k_n e k_s

$$k_n = k_{ni} \left(1 - \frac{\sigma_n}{\sqrt{m} k_{ni} + \sigma_n} \right)^{-2}$$

(Leggi empiriche)

$$k_s = \sigma_n \cdot \begin{cases} \tan \left(\frac{0,75 \cdot \phi_R}{0,2 \cdot v_f} \right) \cdot L_n & , \text{ se } \frac{v}{v_f} < 0,2 \\ \tan \left(\frac{0,25 \cdot \phi_R}{0,1 \cdot v_f} \right) \cdot L_n & , \text{ se } \frac{v}{v_f} > 0,2 \end{cases}$$

5) Classificazione degli ammassi rocciosi

si applicano le classificazioni delle rocce per:

- dividere l'ammasso in zone omogenee;
- identificare i parametri significativi;
- confrontare con altri casi;
- formulare delle linee guida.

Il parametro più usato per le gallerie è **RMR** (Rock Mass Rating), da 8 a 100 secondo i parametri:

P1	resistenza compressione	max 15 min 0	$\sigma_c > 250 \text{ MPa}$ $\sigma_c < 1 \text{ MPa}$
P2	RQD qualità roccia	max 20 min 3	RQD = 100 RQD < 25
P3	spaziatura	max 20 min 5	$L_s > 2 \text{ m}$ $L_s < 6 \text{ mm}$
P4	discontinuità	max 6 min 0	carattere naturale
P5	venute d'acqua	max 15 min 0	$q < 10 \text{ l/min}$ $q > 125 \text{ l/min}$
P6	orientazione galleria	max 5 min -12	ortogonale parallelo

Per la stabilità dei pendii si usa **SMR**

(Slope Mass Rating) utilizzando i primi 5 parametri con 4 fattori specifici

$$\text{SMR} = \sum_i P_i + F_1 \cdot F_2 \cdot F_3 + F_4$$

F1	angolo immersione pendio (strike)	max 1 min 0,15
F2	angolo discontinuità (dip)	max 1 min 0,15
F3	inclinazione discontinuità e pendio	max 0 min -60
F4	interventi artificiali sul pendio	max 15 min -8

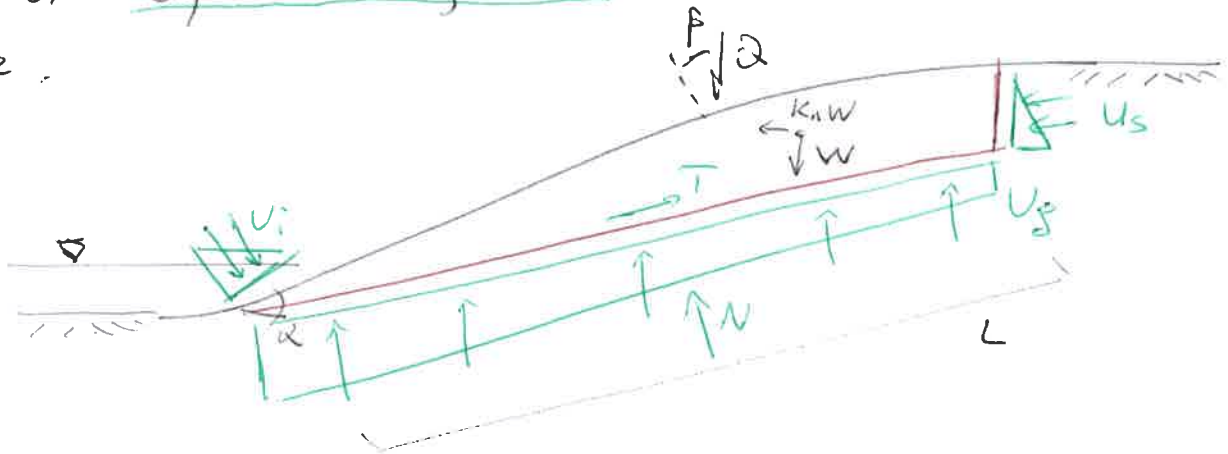
CLASSIFICAZIONE della valutazione

I classe	molto stabile	$81 \leq SMR \leq 100$
II classe	stabile	$61 \leq SMR \leq 80$
III classe	normale	$41 \leq SMR \leq 60$
IV classe	instabile	$20 \leq SMR \leq 40$
V classe	forte instabilità	$SMR < 20$

Gli interventi sono scelti in funzione alla classe, quindi alla valutazione di SMR.

① ANALISI DI STABILITÀ CUNEI IN ROCCIA

I cunei in roccia sono studiati come corpi rigidi con un equilibrio globale di traslazione e rotazione.



Equilibrio traslazione ortogonale alla superficie

$$N' + U_p = W \cos \alpha - k_n W \sin \alpha - U_s \sin \alpha + Q \cos \beta - U_i \cos(i - \alpha)$$

Equilibrio traslazione parallelo alla superficie

$$T = W \sin \alpha + k_n W \cos \alpha + U \cos \alpha + Q \sin \beta - U_i \sin(i - \alpha)$$

Il rapporto di sicurezza è per definizione $F_s = \frac{T_{LIM}}{T_{ASP}}$

quindi si usa la T di Coulomb come resistente

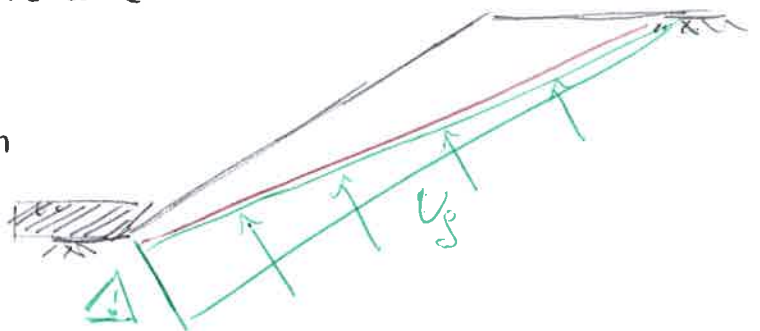
$$F_s = \frac{L \left(c' + \frac{N'}{L} \tan \phi' \right)}{W \sin \alpha + k_n W \cos \alpha + U \cos \alpha + Q \sin \beta - U_i \sin(i - \alpha)}$$

Effetto dell'acqua

È necessario verificare la ~~fratturazione~~ fratturazione della roccia che favorisce il moto di filtrazione.

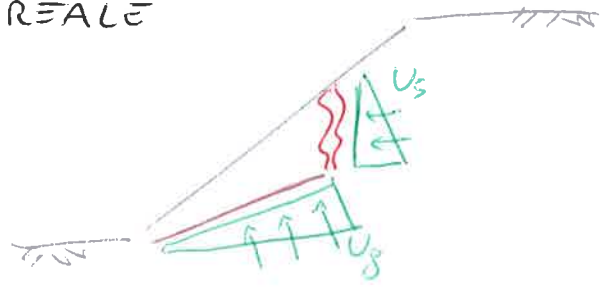
Si valuta la spinta dell'acqua in condizioni idrostatiche; la condizione

peggiore è un deflusso impedito al piede, con spinta massima da valle.

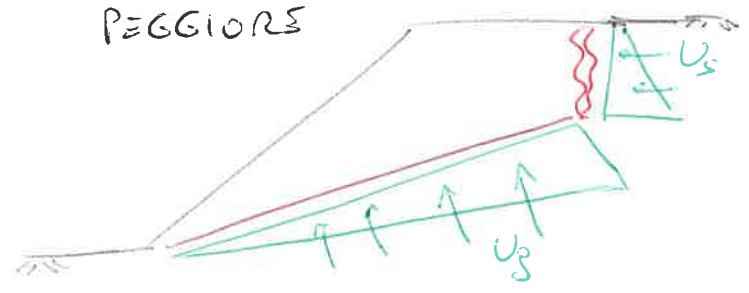


La posizione di calcolo della fessura a monte è la meno sicura, ma anche la meno probabile.

CASO REALE



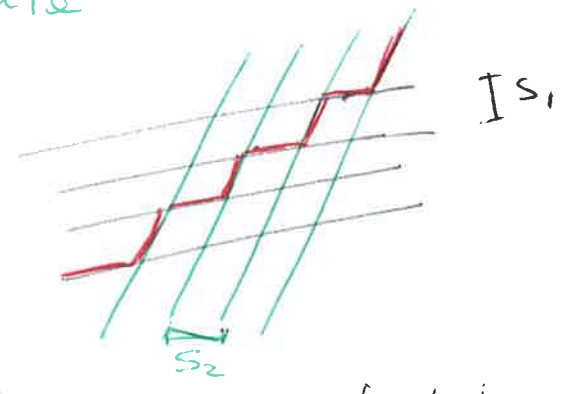
CASO PEGGIORE



Diversi piani di discontinuità

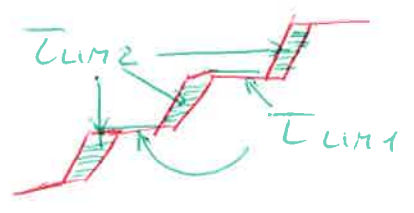
l'angolo di rottura è intermedio, calcolato come

$$\frac{s_2}{s_1} = \frac{\sin(\psi_2 - \psi_m)}{\sin(\psi_m - \psi_1)}$$



quindi si ha lo scorrimento lungo ψ_1 e il distacco lungo ψ_2 , rispettivamente con τ_{lim1} e τ_{lim2} .

l'area è $A_1 = A \frac{\sin(\psi_2 - \psi_m)}{\sin(\psi_2 - \psi_1)}$

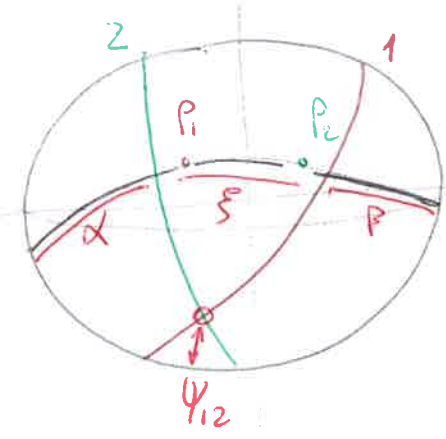
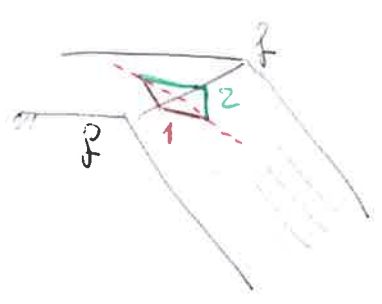


quindi il fattore di sicurezza $F_s = \frac{A_1 \tau_{lim1} \left(\frac{W \cos \psi_1}{A_1} \right)}{W \sin \psi_1}$

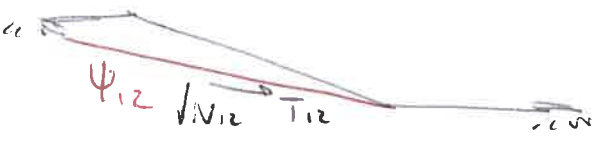
* in grandi dissesti l'angolo ψ_m ha un incremento di rugosità con $JRC \approx 20$

→ Per n corpi rigidi distaccati, il problema viene reso determinato ponendo F_s uguale in tutte le superfici di rottura.

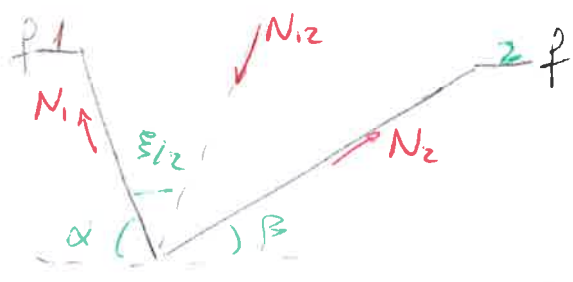
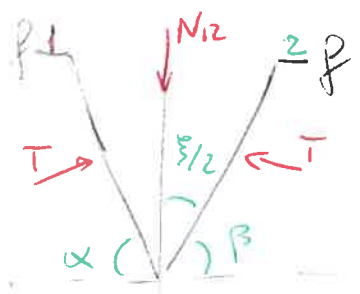
② → Nello studio 3D si usano i reticoli



ψ_{12} è l'inclinazione dello scorrimento



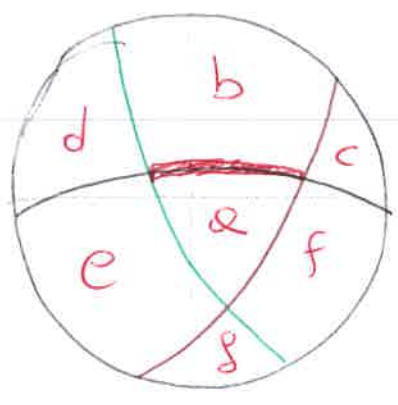
l'intersezione può essere simmetrica o inclinata



Globalmente il fattore di sicurezza è

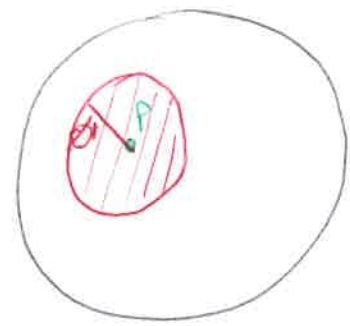
$$F_s = \frac{\sin(\beta + \frac{\epsilon}{2}) \tan \phi_1 + \sin(\beta - \frac{\epsilon}{2}) \tan \phi_2}{\sin \epsilon \cdot \tan \psi_{12}}$$

Il reticolo è diviso in zone; la stabilità è solo sulla LINEA ROSSA.



- a) scivola in ψ_{12}
- b) in su in ψ_{12}
- c,d) verso l'alto lungo uno dei due pendii
- e,f) verso il basso lungo uno dei due pendii
- g) distacco gravitazionale

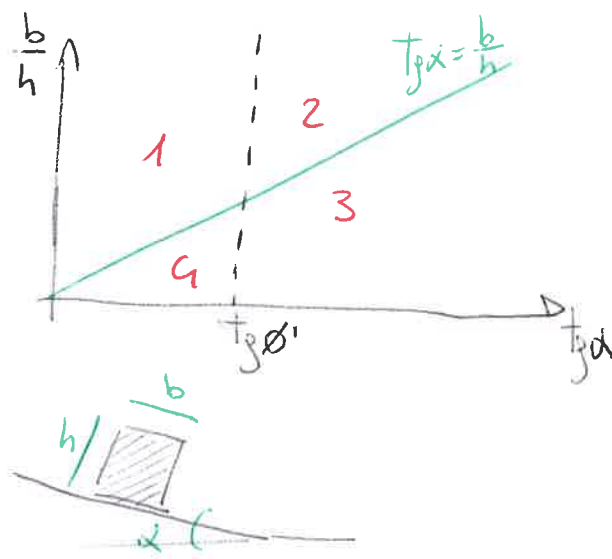
* l'attrito conferisce un'area di circonferenza con raggio ϕ'



Problemi di ribaltamento

Studiando la geometria di un blocco sul pendio si definiscono

- 1) stabile
- 2) scivolamento
- 3) scivolamento + ribaltamento
- 4) ribaltamento



I meccanismi composti sono studiati con metodi ad elementi discreti (DEM), con lo schema di pattini, molle normali e Tangenziali (elementi cinematici)



Cadute massi

Dopo il distacco si valuta la caduta in fasi:

VOLO - IMPATTO - ROTOLAMENTO - SCIVOLAMENTO

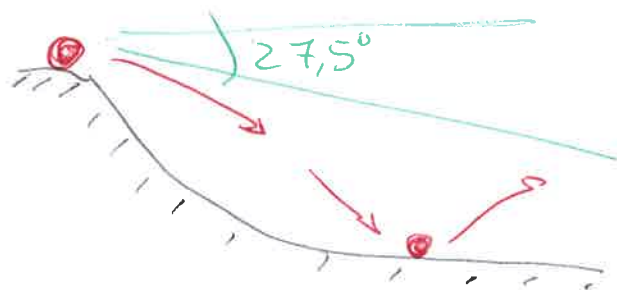
Ipotesi di massa puntuale senza inerzia $m\vec{a} = m\vec{g}$

L'impetto è valutato con coefficienti di restituzione:

$$\left\{ \begin{aligned} R_n &= \frac{\text{velocità } \vec{n} \text{ uscite}}{\text{velocità } \vec{n} \text{ ingresso}} \\ R_t &= \frac{\text{velocità } \vec{t} \text{ uscite}}{\text{velocità } \vec{t} \text{ ingresso}} \end{aligned} \right.$$

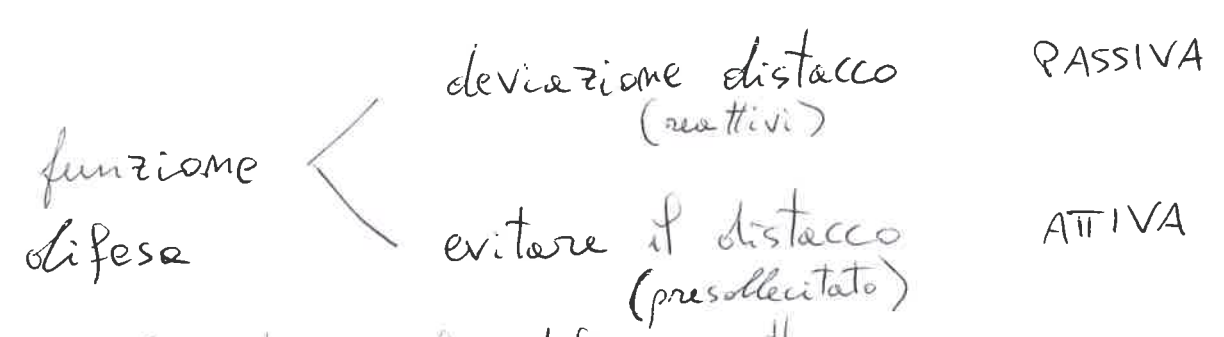
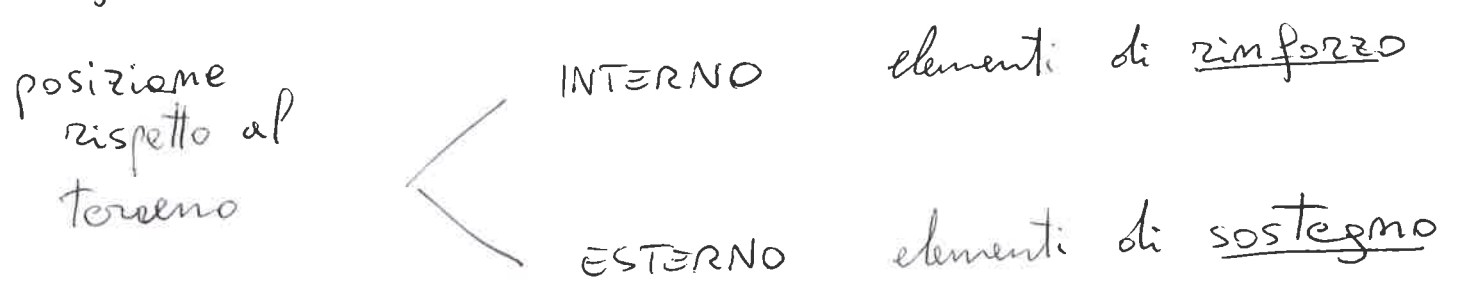
dipendente dal tipo di suolo; l'energia si dissipa nella parte normale $R_n < R_t$

→ STATISTICAMENTE si ottiene una caduta contenuta nei $27,5^\circ$ dell'orizzontale.



① OPERE DI STABILIZZAZIONE

In generale, le opere si classificano:



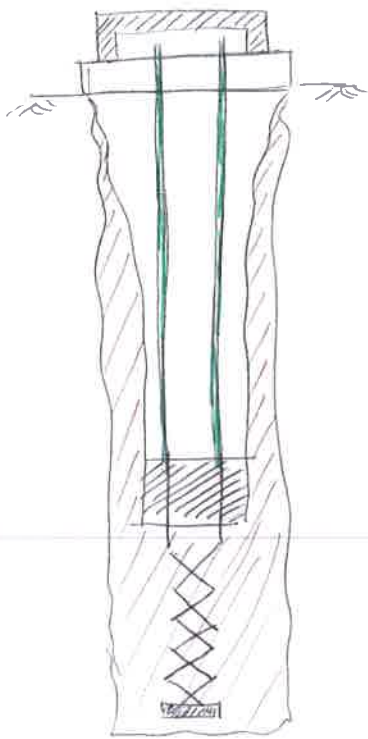
Gli elementi per la difesa attiva vengono presollecitati ed entrano in funzione dalla posa in opera, mentre gli elementi di difesa passiva sono in sforzo solo con un distacco del terreno per reazione alla deformazione.

L'applicazione di un'opera di stabilizzazione è in funzione con il tipo di terreno, l'acclività del pendio, gli elementi antropici circostanti e le disponibilità di costo. Quindi si distinguono le opere per la stabilizzazione superficiale, le opere di sostegno di un pendio, per la difesa della caduta di massi, in presenza di acque si usano opere di drenaggio e opere speciali ad alto costo per il miglioramento delle caratteristiche del terreno.

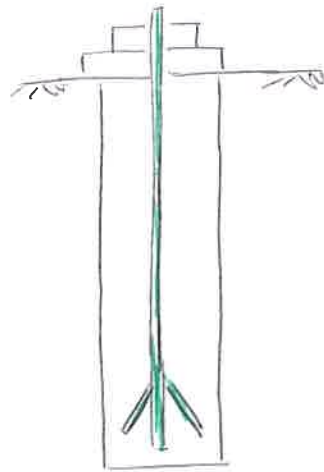
Versanti rocciosi

Per la stabilizzazione dei versanti rocciosi vengono utilizzati TIRANTI, CHIODI e BULLONI infissi nel terreno, con delle RETI superficiali ed evitare la caduta di massi. Dato che servono a migliorare le caratteristiche del terreno, sono chiamate opere attive, evitando la rottura ed il distacco. Mentre i tiranti e i chiodi lavorano principalmente a trazione, i bulloni hanno uno sforzo anche di compressione e taglio.

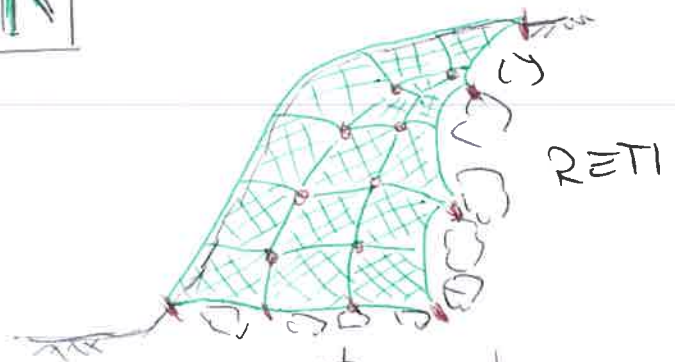
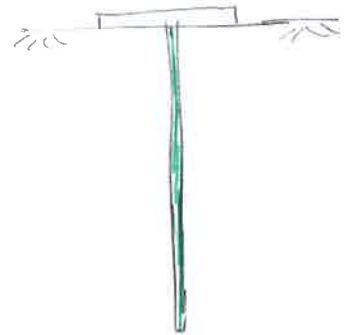
TIRANTI



BULLONI



CHIODI



RETI

Questi elementi possono essere permanenti o temporanei, quindi vengono fissati in modo diverso sulla testa. La lunghezza per l'ancoraggio va in base alle sollecitazioni sopportate.

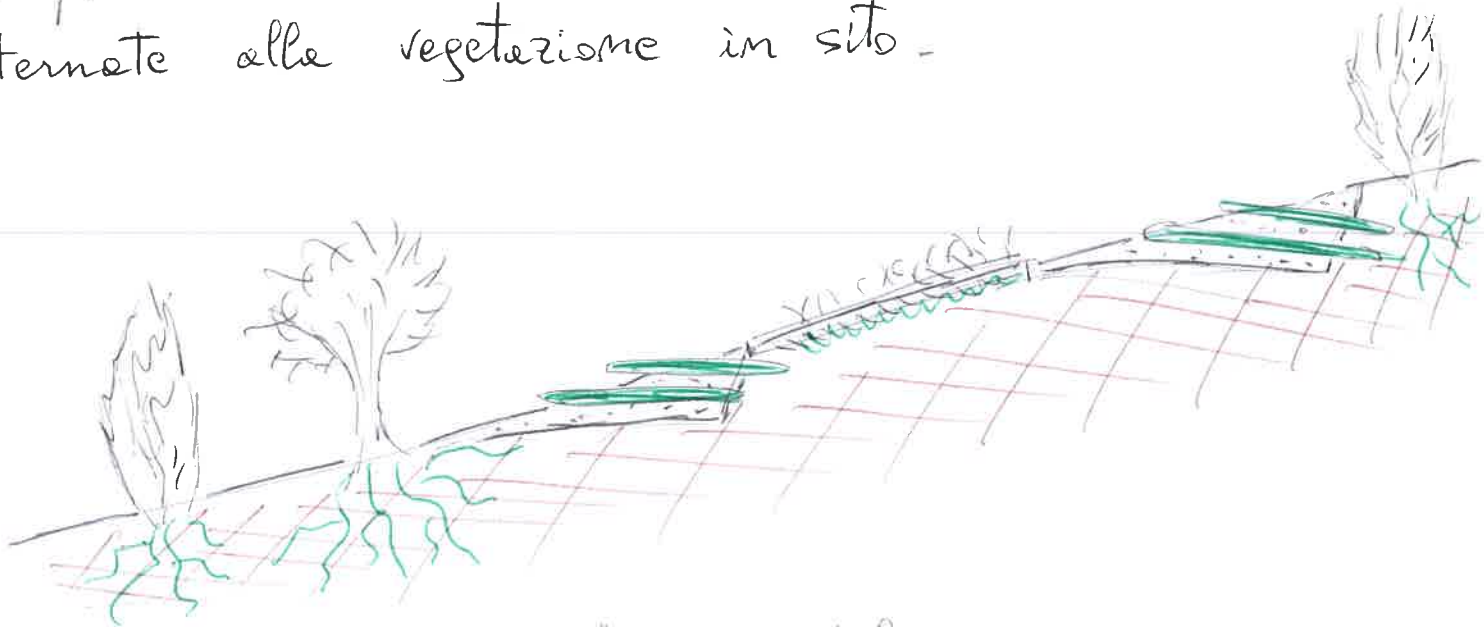
② Terreni sciolti

Sui terreni sciolti esiste una serie di interventi che si differenziano in base all'importanza dell'opera e all'impatto col sistema ambientale.

→ controllo superficiale

Gli interventi naturalistici si basano sull'attaccamento e la crescita della vegetazione sulle scarpate attraverso materiali biodegradabili, sintetici o metallici. I primi sono provvisori, mentre i secondi sono utili ad interventi successivi, la terza categoria migliora anche il deflusso dell'acqua in superficie.

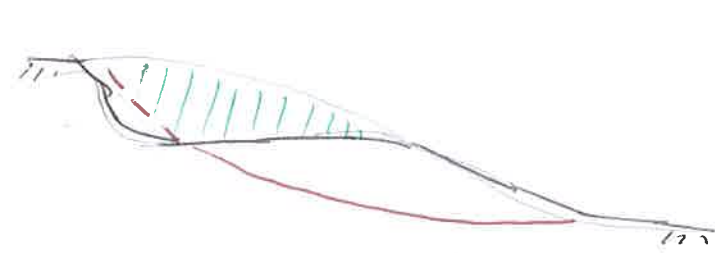
L'utilizzo di vegetazione arborea consente lo sviluppo dell'apparato radicale, migliorando la stabilità all'interno del pendio. Sono utilizzate anche delle palificate vive alternate alla vegetazione in sito.



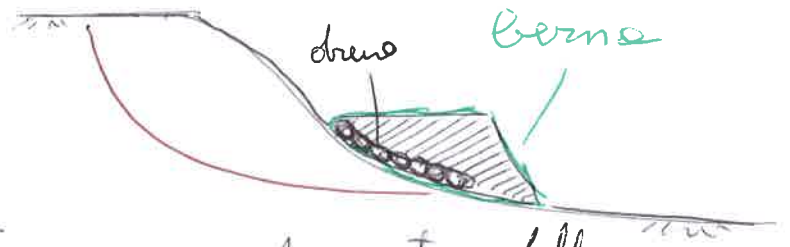
Per gli incrementi gli impatti ambientali sono minimi, con recupero di aree di particolare pregio paesaggistico; la stabilizzazione superficiale non necessita di mobilità di terreno, senza arrecare danni all'ambiente.

→ riprofilatura

Si utilizza con pendii a superficie di rottura poco profonda, intervenendo a monte o a valle.



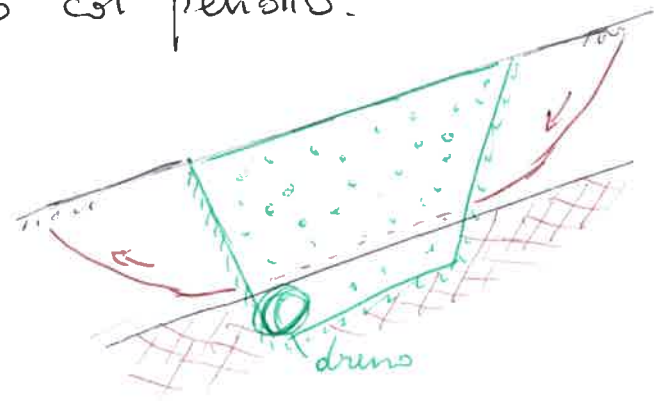
Riduzione dello sforzo applicato



Aumento della resistenza

La **BERNA** è costituita da materiale grossolano e spesso rivestita dalla vegetazione. Necessita di una zona di drenaggio a contatto col pendio.

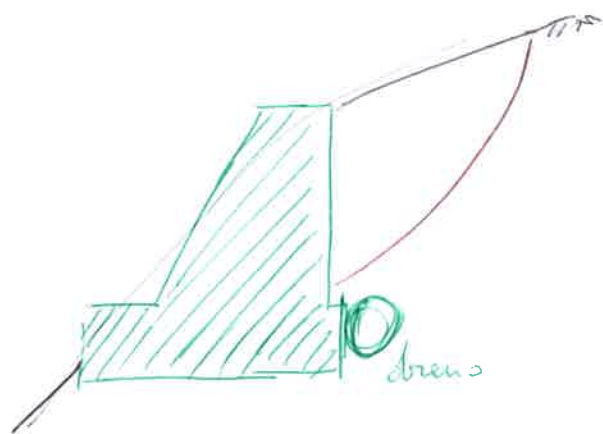
La **CHIAVE DI TAGLIO** serve ad interrompere la superficie di scorrimento se poco profonda.



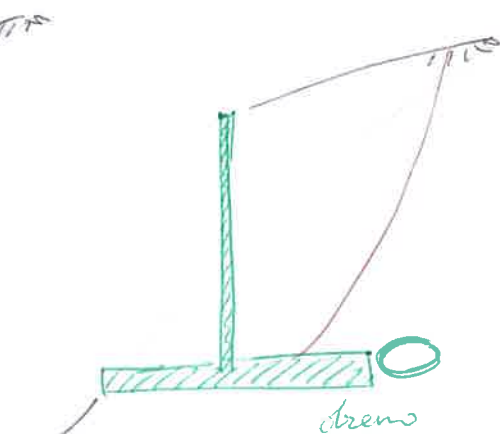
Questi interventi possono essere provvisori e vengono fatti nella ~~st~~ stagione secca, per essere vegetati successivamente la posa in opere.

③ → opere di sostegno

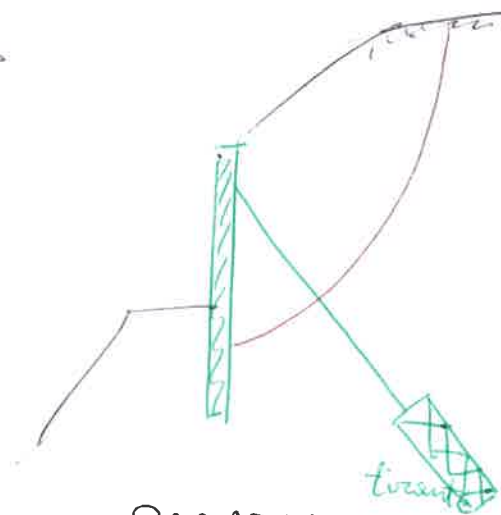
Sono interventi più invasivi e spesso funzionano a gravità. Possiamo essere combinazioni di più elementi.



MURO A GRAVITÀ

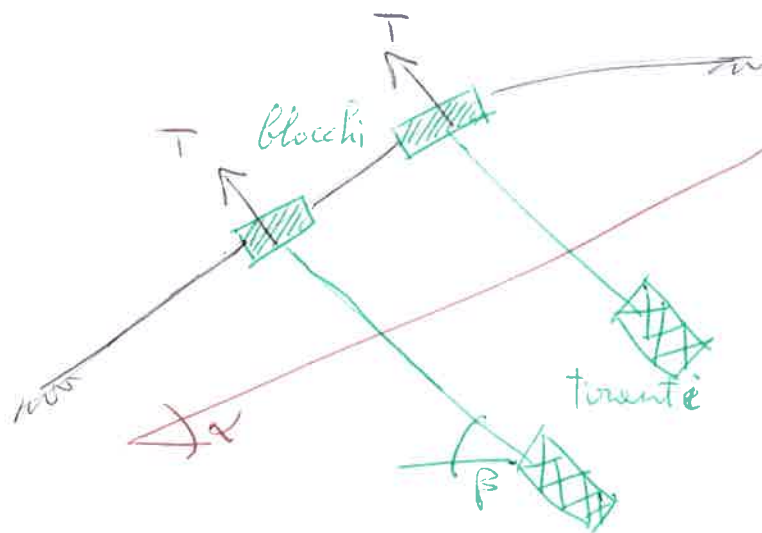
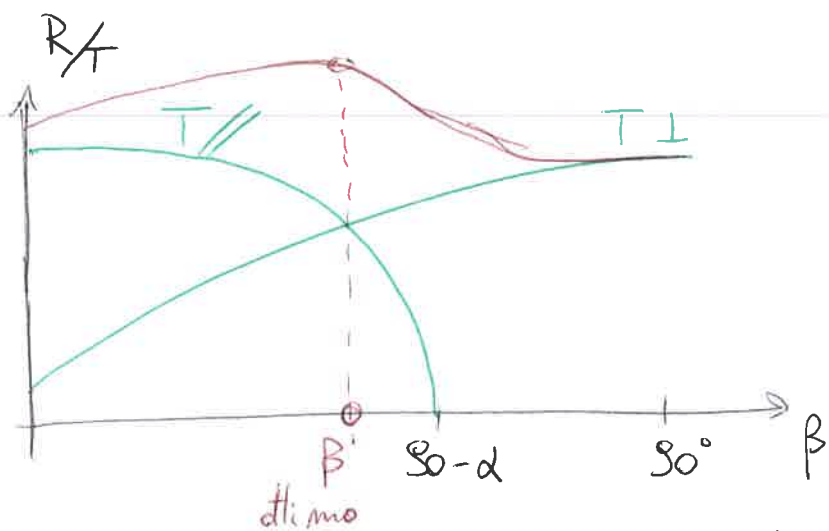


MURO A MENSOLA



PARATIA

Il dimensionamento e progetto dei tiranti e ancoraggi è fatto in modo da ottimizzare gli sforzi



Le componenti del tirante sono divise in parallelo e ortogonale al pendio [$T_{//}$, T_{\perp}].

Le opere possono essere rigide o flessibili in relazione alla capacità di adattarsi alla deformazione dei cedimenti del terreno.

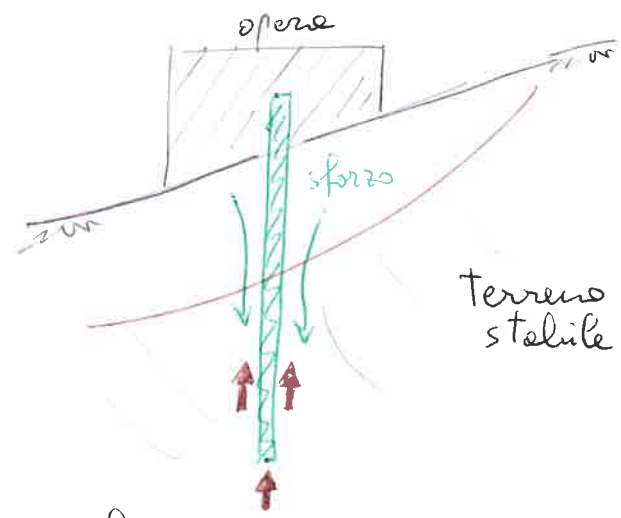
Nella progettazione bisogna tener conto delle spinte attive e passive che incidono sull'opera - Quindi utilizzare la maggiore tra le due seguendo il metodo di Rankine di spinta orizzontale -

$$\sigma_{HA} = K_{OA} \sigma'_{V0} + 2c' \sqrt{K_{OA}}$$

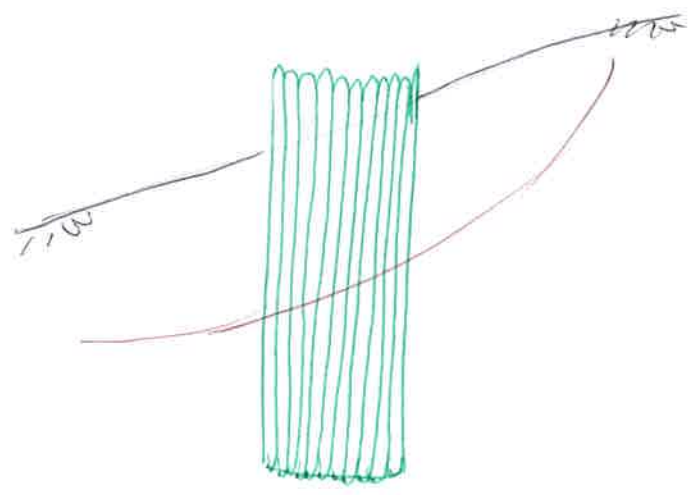
In base all'importanza dell'opera, si possono usare i PALI, ovvero strutture lunghe, cilindriche o prismatiche, per terreni di scarsa capacità portante, per migliorarne la resistenza o trasferire il carico nello strato più stabile.

In base al funzionamento si dividono in:

- resistenti per effetto punta
- resistenti per attrito laterale
- resistenti per entrambi

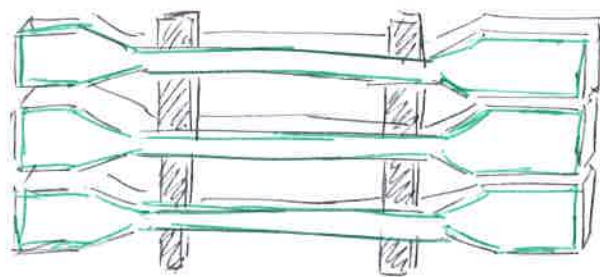
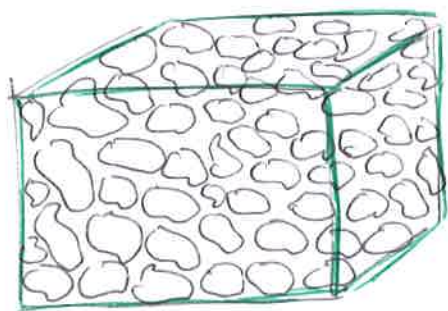
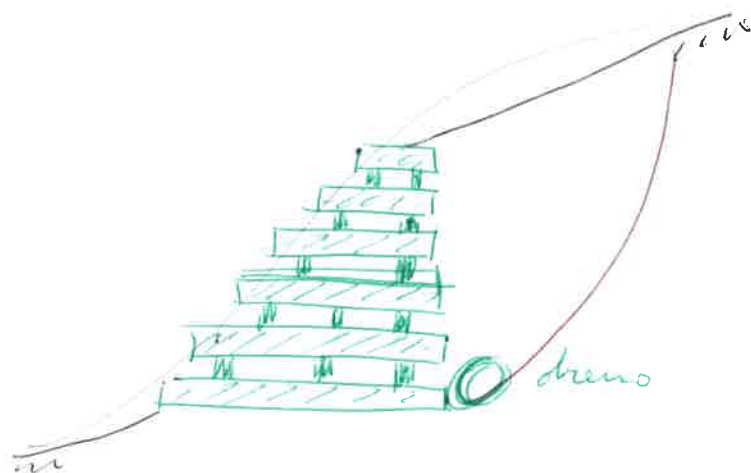
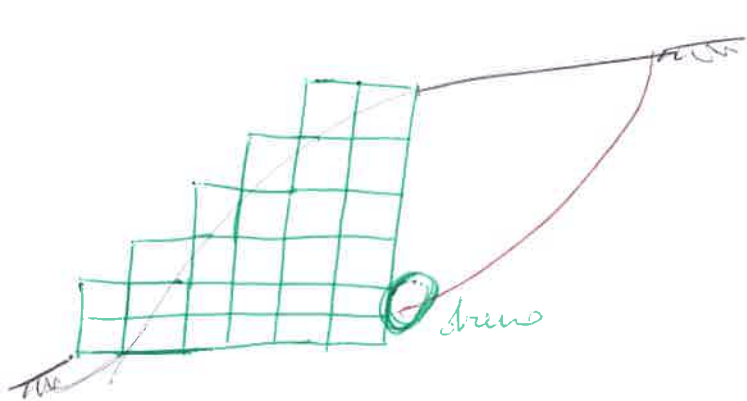


In alternativa all'alto numero di pali, si può porre un pozzo composto da una serie di pali ~~tra~~ posti in circolo, definite CORONA DI MICROPALI.

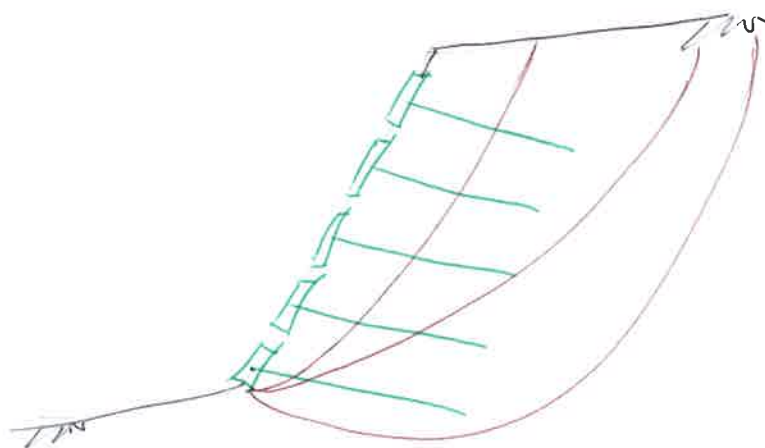


Questa tecnica evita di porre troppi pali vicini tra loro, che immescano delle interazioni di spinte date dalle deformazioni in serie.

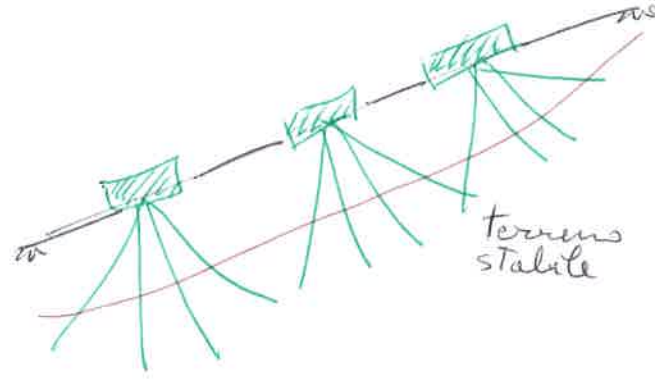
④ Elementi altamente elastici e resistenti sono i MURI A GABBIONI e i CRIB WALLS, ovvero muri cellulari capaci di assorbire gli sforzi per piccole deformazioni. Sono elementi composti prefabbricati montati a maglia e riempiti con materiale grossolano incoerente.



In alternativa, viene utilizzata la tecnica del SOIL NAILING, ovvero la chiodatura del terreno, distinta in interne, esterne ed intermedie, in base alla posizione della superficie di scorrimento rispetto ai chiodi.

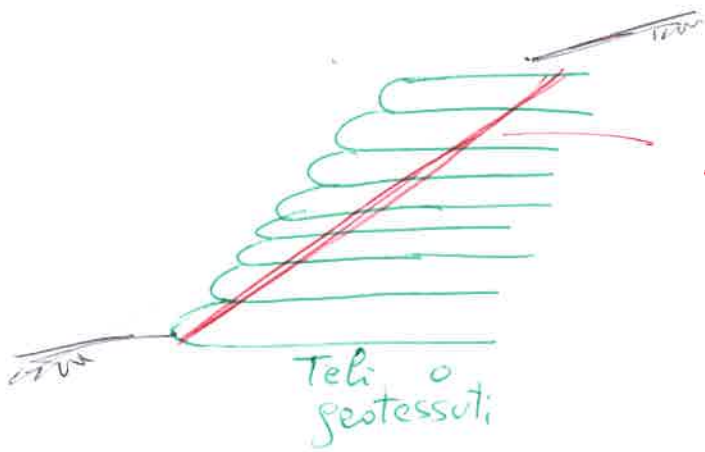


I MICROPALI vengono utilizzati con una superficie di scorrimento poco profonda in serie lungo il pendio.

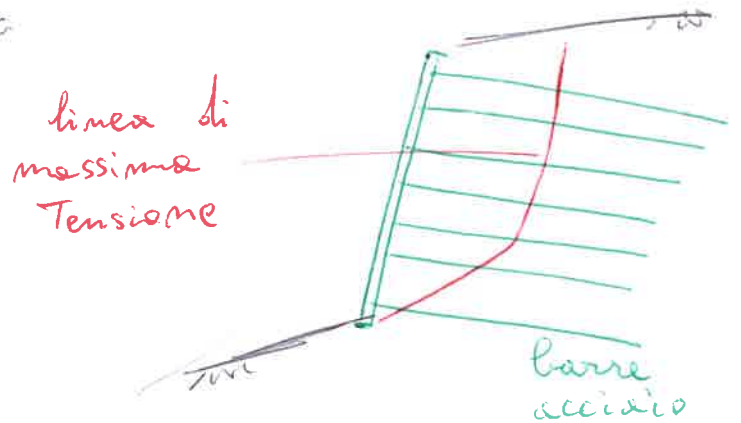


Lo stesso funzionamento è dato dalle TERRE RINFORZATE in grado di contenere il terreno rispondendo alle esigenze di salvaguardia ambientale. In genere sono durenti e flessibili, con uno sforzo massimo all'interno dell'opera di trazione.

TERRE RINFORZATE

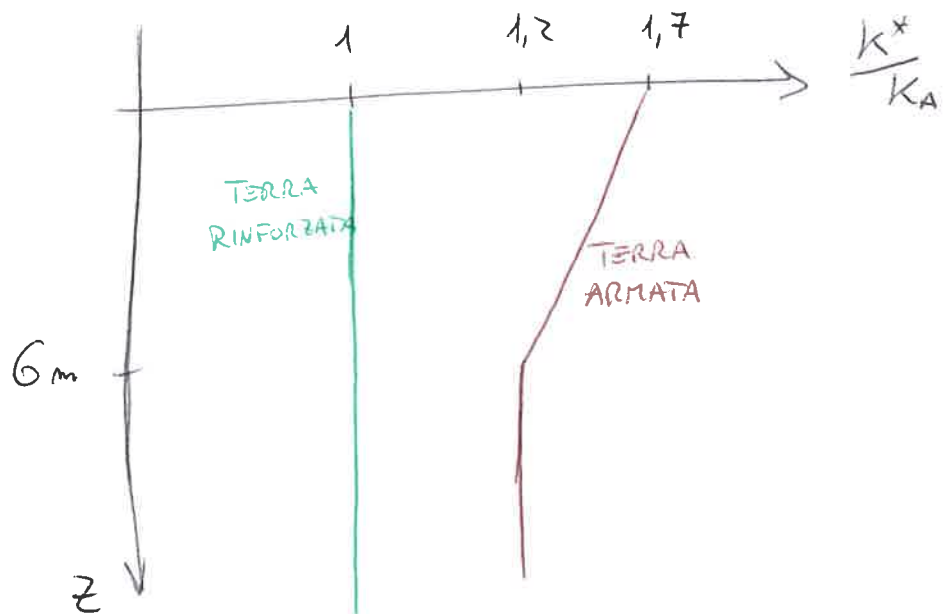


TERRE ARMATE



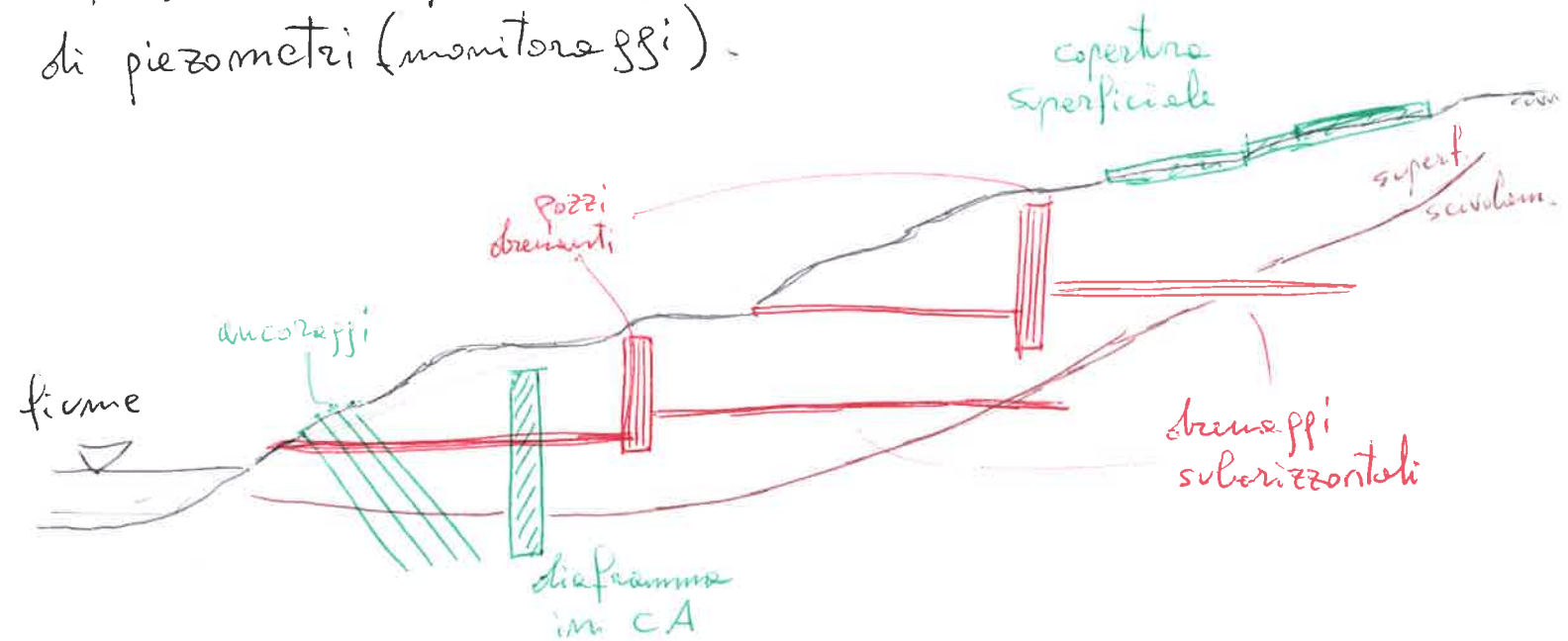
Coefficiente di spinta orizzontale

$$\sigma_h' = K^* \sigma_v'$$



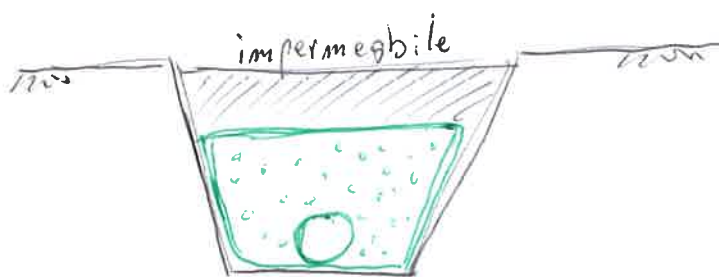
⑤ → drenaggio

In presenza di falda superficiale e terreno bagnato si richiede l'utilizzo delle opere di drenaggio insieme a quelle di sostegno, in grado di ridurre le pressioni dell'acqua e quindi lo sforzo destabilizzante. Queste possono essere temporanee o permanenti e superficiali o profonde; l'efficacia è valutata dall'uso di piezometri (monitoraggi).



I DRENI SUBORIZZONTALI sono tubazioni fessurate in PVC posti verso valle con l'asse angolazione (circa 10°) e collegati dai pozzi.

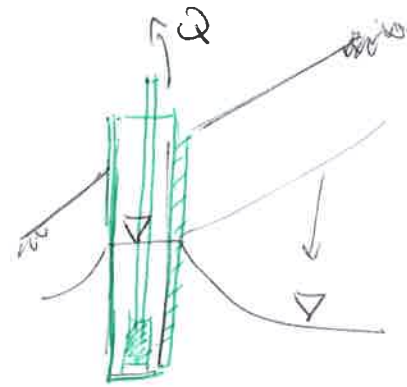
Le TRINCEE DRENANTI sono più complesse, generalmente parallele alle linee di massima pendenza del versante.



Sono opere efficaci per il drenaggio profondo delle acque di infiltrazione e quelle di falda.

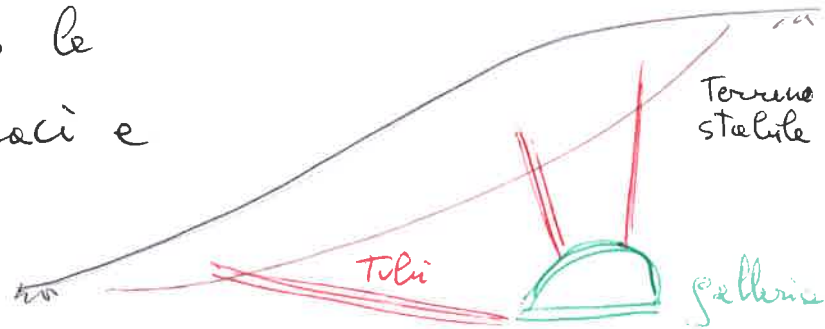
In base alla permeabilità del terreno, viene differenziato il livello di falda circostante, quindi la portata sarà funzione del k di permeabilità e del grado di saturazione.

L'utilizzo di pozzi avviene in casi di alta presenza di acque, essendo costosi per il pompaggio e la manutenzione.

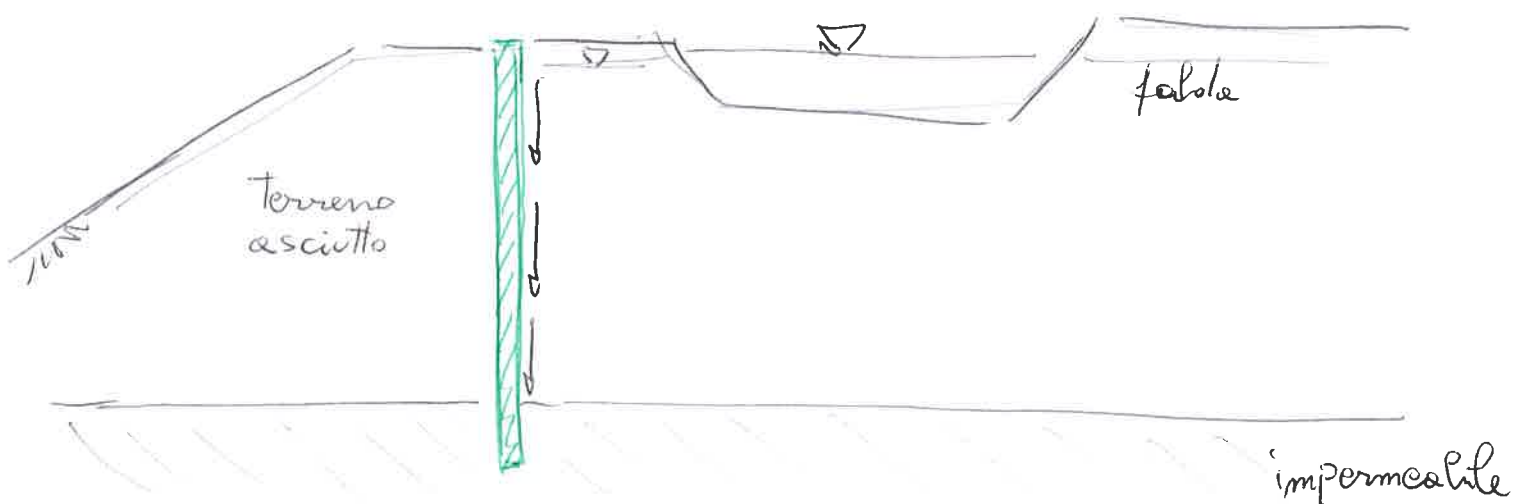


In alternativa vengono utilizzati i WELL POINTS, lontani da aree urbanizzate o manifatture, con lo stesso funzionamento dei pozzi ma più economici.

Per grandi opere si usano le GALLERIE DRENANTI, efficaci e permanenti.



In fine, esistono opere in grado di deviare la superficie di falda verso zone più stabili, come le BARRIERE IMPERMEABILI.

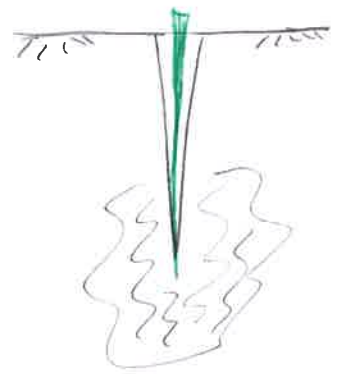


⑥ → miglioramento del terreno

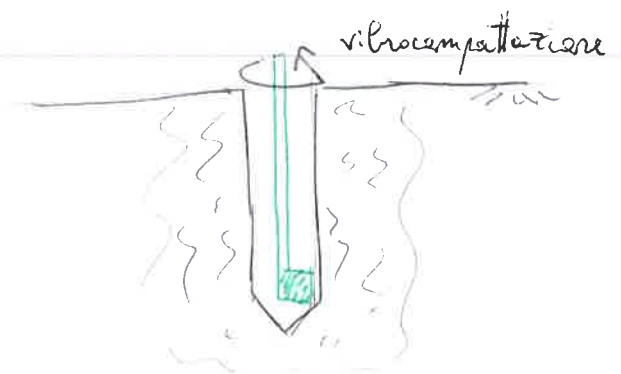
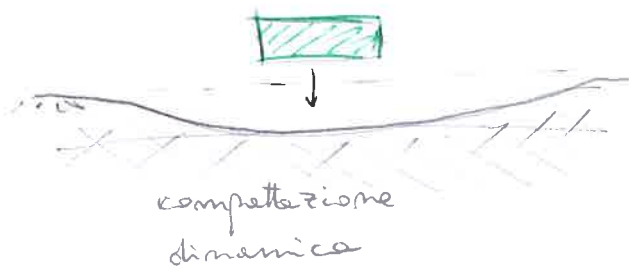
Le opere speciali sono volte a migliorare le caratteristiche fisiche e meccaniche del terreno, ma richiedono costi elevati e indagini molto approfondite.

Per la compattazione del terreno sono utili le INIEZIONI, la ~~VIBRO~~COMPATTAZIONE DINAMICA e la VIBROCOMPATTAZIONE.

Le iniezioni sfruttano le caratteristiche dell'argilla attiva di modificare le sue proprietà con i sali. In particolare si usa il jet grouting in calce oppure liquidi salini o soluzioni di potassio.

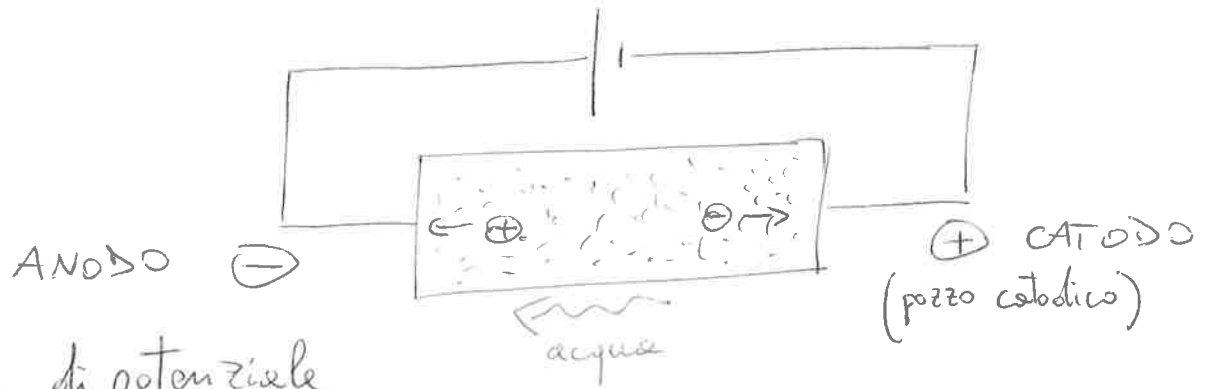


La compattazione dinamica si basa sulla percussione di un'incudine al suolo, la vibrocompattazione è data dalla rotazione di una massa eccentrica. Entrambe incrementano la densità con abbassamento del suolo.



L'ELETTROSMOSI si basa sull'effetto polarizzante della corrente elettrica sull'acqua di imbibizione. Si effettua installando un certo numero di elettrodi nel terreno da stabilizzare.

e facendo passare una corrente elettrica continua tra loro.



La differenza di potenziale genera un flusso d'acqua per moto degli elettroni.

Allo stesso tempo, la parte anodica diventa basica e la parte catodica acida.

$$\left\{ \begin{array}{l} v_w = -k_e \nabla E \quad \text{elettromagn.} \\ \phi_w = -k_D \nabla h \quad \text{Darcy} \end{array} \right.$$

→ si deve avere $k_e \gg k_D$ per favorire il moto

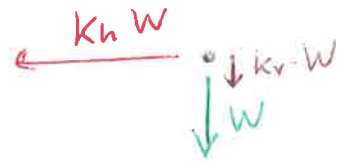
TRATTAMENTI TERMICI possono essere:

- di congelamento, facendo circolare un liquido refrigerante costituito da soluzione raffreddato costantemente da uno scambiatore termico ad azoto liquido; la resistenza ottenuta è funzione della granulometria, dell'umidità e della temperatura.
- con alte temperature, con l'effetto di eliminare l'acqua in eccesso migliorando sensibilmente le proprietà fisico-meccaniche.

① ANALISI SISMICA

L'analisi sismica viene attuata seguendo diversi metodi in base alle informazioni del sito e all'importanza di un'opera.

Il sisma aggiunge un termine di accelerazione orizzontale al centro di massa ($k_v = \frac{1}{2} k_h$).



Le conseguenze principali sono:

- nuove forze inerziali alla stabilità;
- riduzione della τ limite con incremento delle sovrappressioni su.

L'ipotesi principale è che la rottura si ha in maniera contemporanea in tutti i punti.

Il peggioramento delle condizioni di stabilità può essere momentaneo, in cui si accumulano le deformazioni, oppure permanente, con l'attivarsi di una frana.

→ La verifica deve essere effettuata prima del sisma in condizioni drenate, durante in condizioni non drenate (cicli di carico) e dopo in condizioni drenate.

Metodo pseudo-statico (di forze agenti)

Si basa sui parametri $\left\{ \begin{array}{l} k_h \text{ valore del coefficiente sismico} \\ F_s \text{ valore del coefficiente di sicurezza} \end{array} \right.$

È noto il pendio, quindi geometrie e caratteristiche naturali, ma ha delle semplificazioni nel descrivere l'azione sismica.

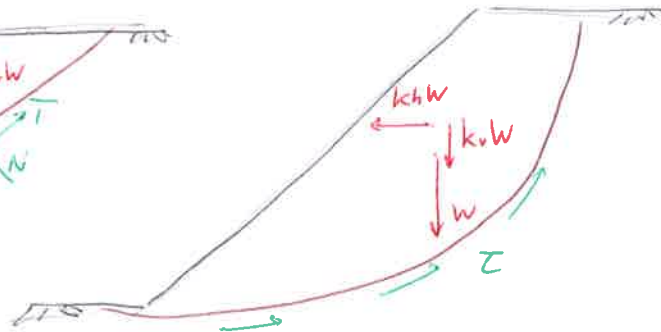
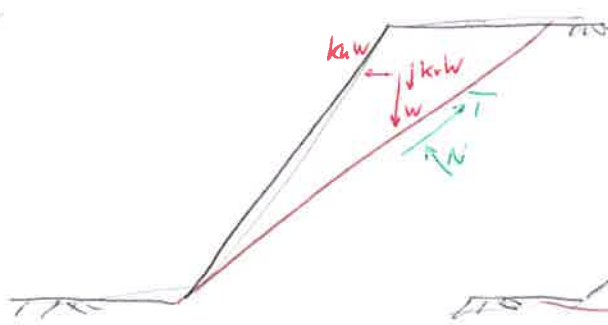
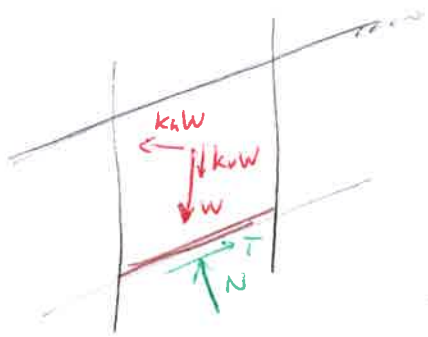
Il fattore di sicurezza è dato dal rapporto tra lo sforzo limite ammissibile e lo sforzo applicato:

- pendio indefinito $F_s = \frac{T_{LIM}}{T_{APP}}$

- cuneo piano $F_s = \frac{T_{LIM}}{T_{APP}}$

- spirale logaritmica $F_s = \frac{M_{LIM}}{M_{APP}}$

Per ogni geometria ~~si~~ si fa riferimento allo schema 2D con metodi globali dell'equilibrio limite o dell'analisi limite con terreni omogenei, altrimenti si usano i metodi all'equilibrio limite delle strisce.



→ Coefficiente sismico k_h

$$k_h = \beta_s \frac{a_{max}}{g}$$

mentre $k_v = \frac{1}{2} k_h$

β_s = coefficiente riduttivo, in funzione dell'accelerazione e in base al tipo di pendio (da 0,1 a 0,5).

g = gravità

a_{max} = accelerazione massima = $S_s \cdot S_T \cdot a_g$

in funzione della stratigrafia, topografia e accelerazione del sito.

② COEFFICIENTE STRATIGRAFICO S_s

dipende dalla granulometria e dalla velocità delle onde

A	rocce	$S_s = 1$	$v_s \geq 800 \frac{m}{s}$
B	rocce tenere	calcolato $F_0, \alpha g$	$v_s = 360 \div 800 \frac{m}{s}$
C	intermedi	calcolato $F_0, \alpha g$	$v_s = 180 \div 360 \frac{m}{s}$
D	frane grosse, D_r piccolo frane fine teneri	$(F_{10}, \alpha g)$ $(F_0, \alpha g)$	$v_s = 100 \div 180 \frac{m}{s}$
E	C, D con piccolo spessore	$(F_0, \alpha g)$	$v_s < 100 \frac{m}{s}$

→ calcolo $S_s = A - B \frac{F_0 \alpha g}{g}$ in cui F_0 e αg dipendono del sito (normativa)

COEFFICIENTE TOPOGRAFICO S_T

dipende dalla presenza di rilievi del terreno

T1	pianura	$i \leq 15^\circ$	$S_T = 1$
T2	pendio	$i \geq 15^\circ$	$S_T = 1,2$
T3	rilievo a cresta piccola	$i > 15^\circ$	$S_T = 1,2$
T4	rilievo a cresta piccola	$i > 30^\circ$	$S_T = 1,4$

Con l'analisi pseudo-statica inversa, si pone il fattore di sicurezza nella superficie di scorrimento mota ($F_s = 1$) e si ricava k_h con calcolo motenne =

Tico inverso.

Metodo dinamico degli spostamenti

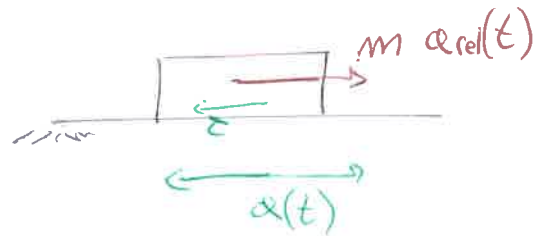
Si basa sui parametri $\left\{ \begin{array}{l} a(t) \text{ accelerogramma di progetto} \\ S_{adm} \text{ spostamento ammissibile.} \end{array} \right.$

Si ha una migliore interpretazione del fenomeno di terremoto, ma pesanti semplificazioni nelle caratteristiche del terreno.

L'analisi segue le fasi di

1. scelta dell'accelerogramma,
2. scelta della superficie di scorrimento e relativo coefficiente sismico $k_h = k_c$,
3. calcolo spostamenti dall'accelerazione,
4. verifica di ammissibilità.

Si definisce l'accelerazione relativa del blocco rispetto al suolo e se ne calcola lo scivolamento.



Per il II principio della dinamica

$$M \cdot a_{rel}(t) = W [k_h(t) - k_c] = m g [k_h(t) - k_c]$$

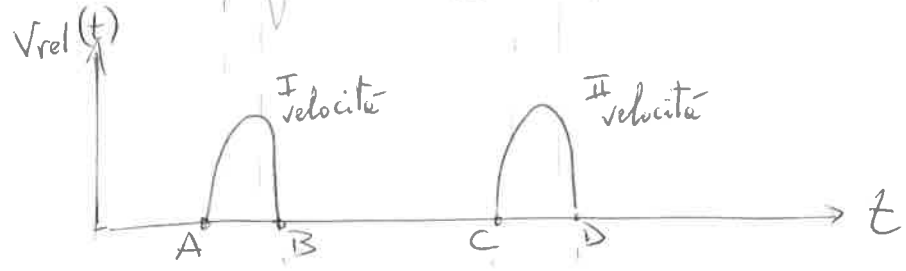
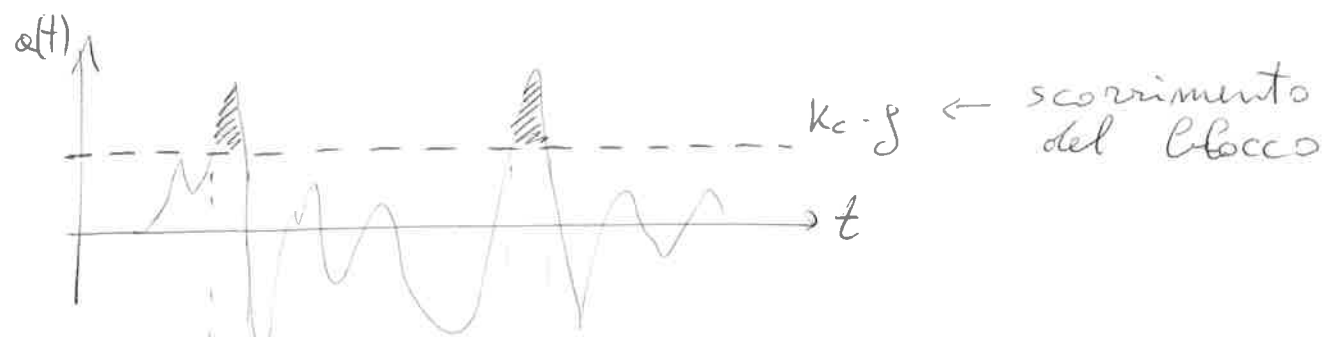
$$\Rightarrow a_{rel}(t) = g [k_h(t) - k_c]$$

in cui k_c è il coefficiente in moto incipiente ($\ddot{a} = 0$).

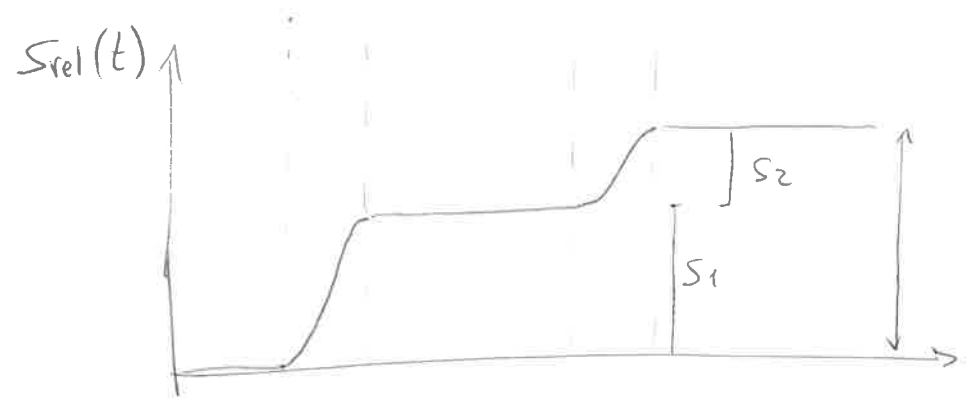
Il doppio integrale di a_{rel} è lo spostamento S_{rel}

$$S_{rel}(t) = \iint g [k_h(t) - k_c] dt = \frac{1}{2} g [k_h(t) - k_c] \Delta t^2$$

③



$$v_{rel}(t) = \int a_{rel}(t) dt$$



spostamento totale
come somma
degli effetti

$$s_{rel}(t) = \int v_{rel}(t) dt$$

Data la geometria del pendio, la formula finale dello spostamento relativo comprende termini dipendenti dalla pendenza e dalla stratigrafia.

Nel pendio indefinito (metodo delle strisce)

$$a_{rel}(t) = [kh(t) - k_c] g (\cos \beta + \sin \beta \tan \phi')$$

la superficie orizzontale ha $S_0 = W [kh(t) - k_c]$; ($\beta = 0$)

quindi in generale si ha $S_{rel} = S_0 \cdot A$

dato dal termine di amplificazione da 1 a 1,3.

Per trovare S_0 esistono alcune formule empiriche dipendenti dalle caratteristiche descritte dai parametri di accelerazione.

$$S_{rel} < S_{amm} \quad \text{Verifica ammissibilità}$$

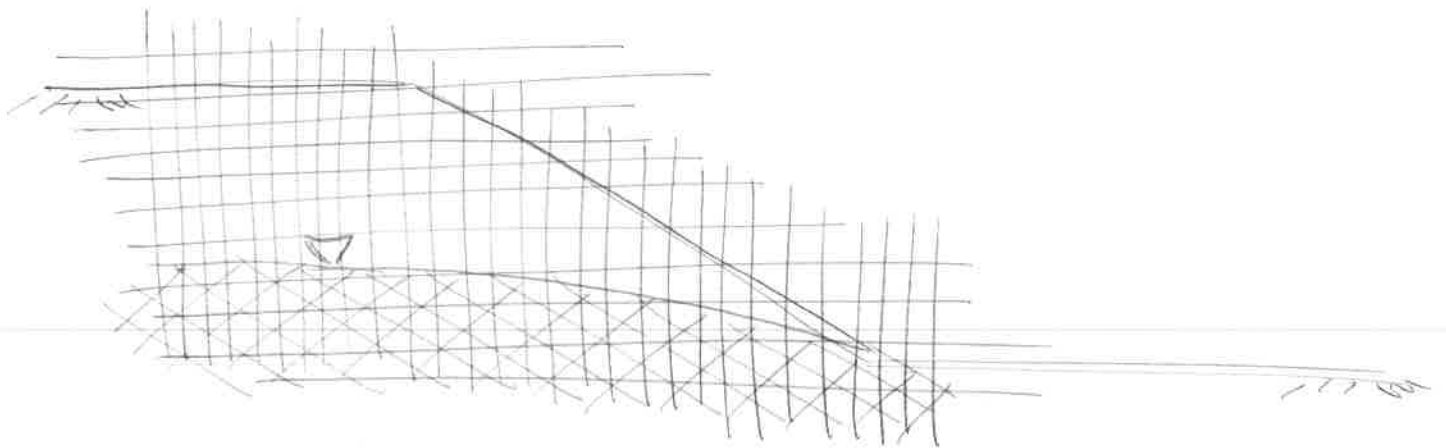
Metodo dinamico sforzi-deformazioni

Sono modelli pluri-dimensionali del tipo elementi finiti, che descrivono lo spazio e la geometria con maggior dettaglio. Sono usati con pendii altamente eterogenei ed accoppiando le fasi di solido e fluido.

Quindi si richiede la conoscenza di:

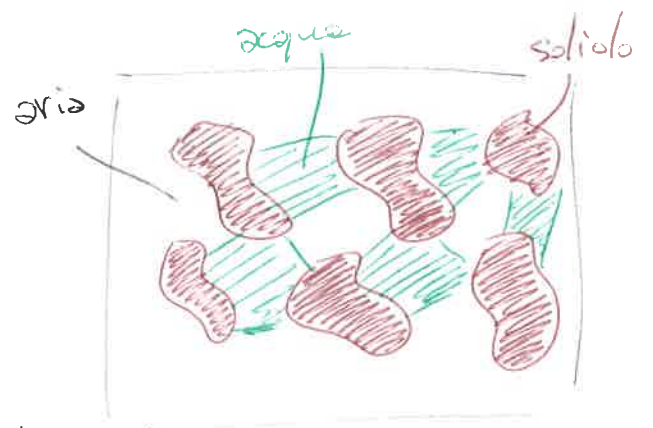
- stratigrafia
- stato tensionale efficace
- storia del carico sismico
- regime delle pressioni interstiziali
- caratteristiche di rigidità del terreno.

Si richiede un livello di dettaglio molto superiore, applicate sono in pendii artificiali.



① TERRENO NON SATURO

Nella realtà, il terreno risulta difficilmente completamente saturo d'acqua. Tra i grani di un campione c'è sempre una parte d'aria del volume dei vuoti, con la parte liquida variabile nel tempo.

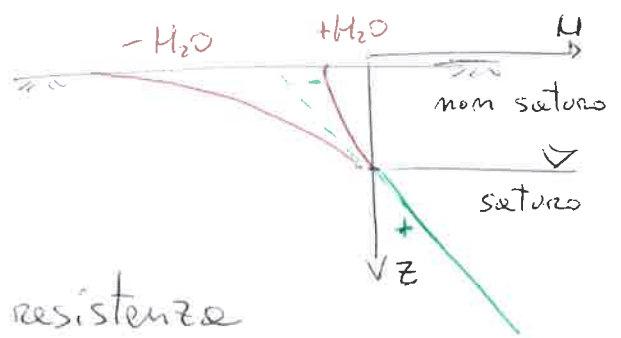


In questo caso la distribuzione non è idrostatica delle u .

Varia in base alle condizioni:

- + H₂O : pioggia, riduzione della resistenza
- - H₂O : secco, aumento della resistenza

⇒ La variazione non è lineare e dipende da molti fattori ambientali e chimici del terreno.



Problematica principale: descrizione delle variabili di sforzo, quindi la tensione efficace ($\sigma - u_a$) e la tensione interstiziale ($u_a - u_w$) detta SUZIONE.

↳ filtrazione = fenomeno di sifonamento

↳ resistenza taglio = stabilità rilevati

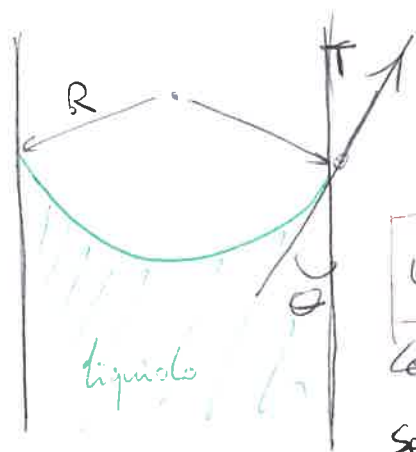
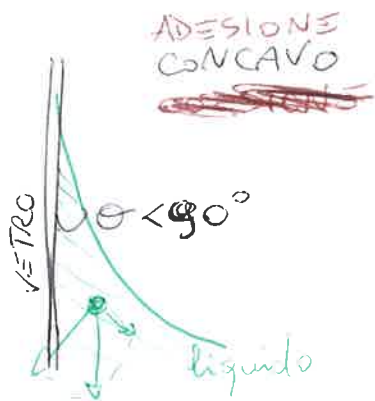
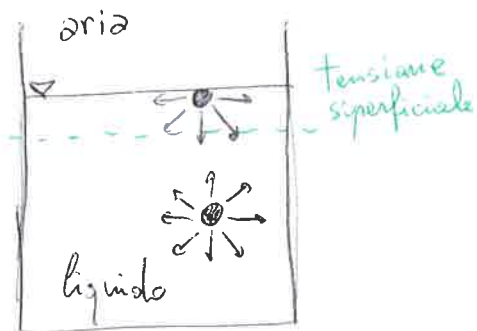
↳ cambiamento volumi = consolidazione, cedimenti, collasso, deformazione.

Tensione superficiale e Capillarità

Coesione: Forza attrattiva tra geni dello stesso tipo.

Tensione superficiale: Forza attrattiva tra due particelle.

Adesione: Forza attrattiva tra molecole di diverso tipo.



EFFETTO della CURVATURA di SUPERFICIE (θ)

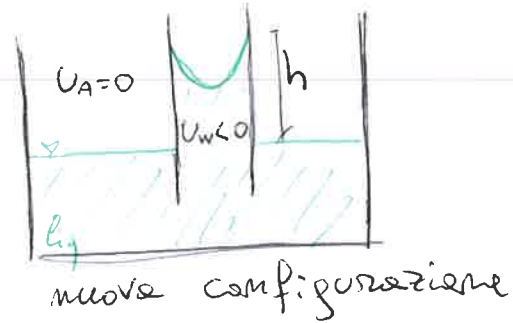
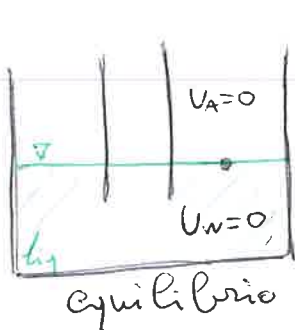
Equilibrio meccanico

$$U_w - U_a = \frac{-2T \cos \theta}{r} = -\frac{2T}{R}$$

La pressione è inversa al raggio di curvatura
 se $\theta < 90^\circ$ (concavo) la pressione dell'aria
 è sostenuta dal menisco ($U_a > U_w$).

EFFETTO di CAPILLARITÀ

La forma del menisco cambia in base alle pressioni dei fluidi (RISALITA CAPILLARE)

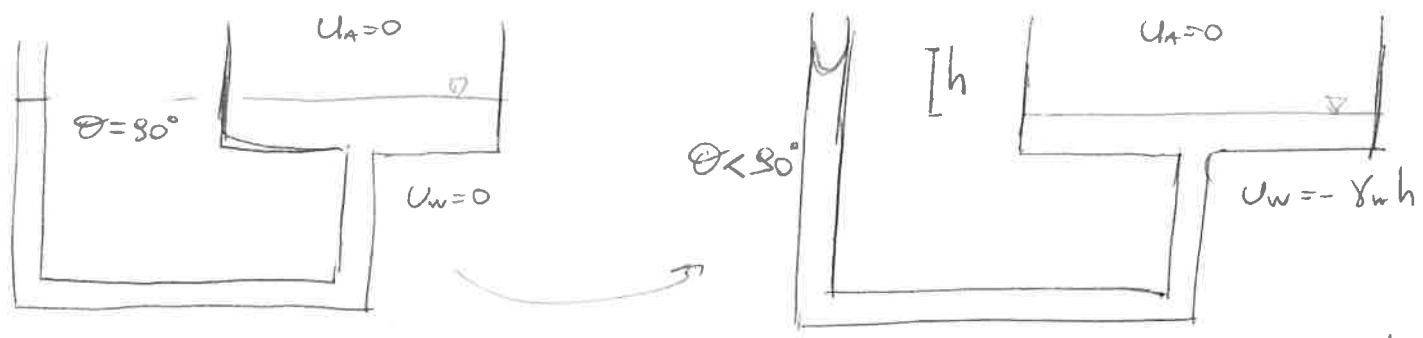


$$U_w = -\gamma_w h = -\frac{2T \cos \theta}{r}$$

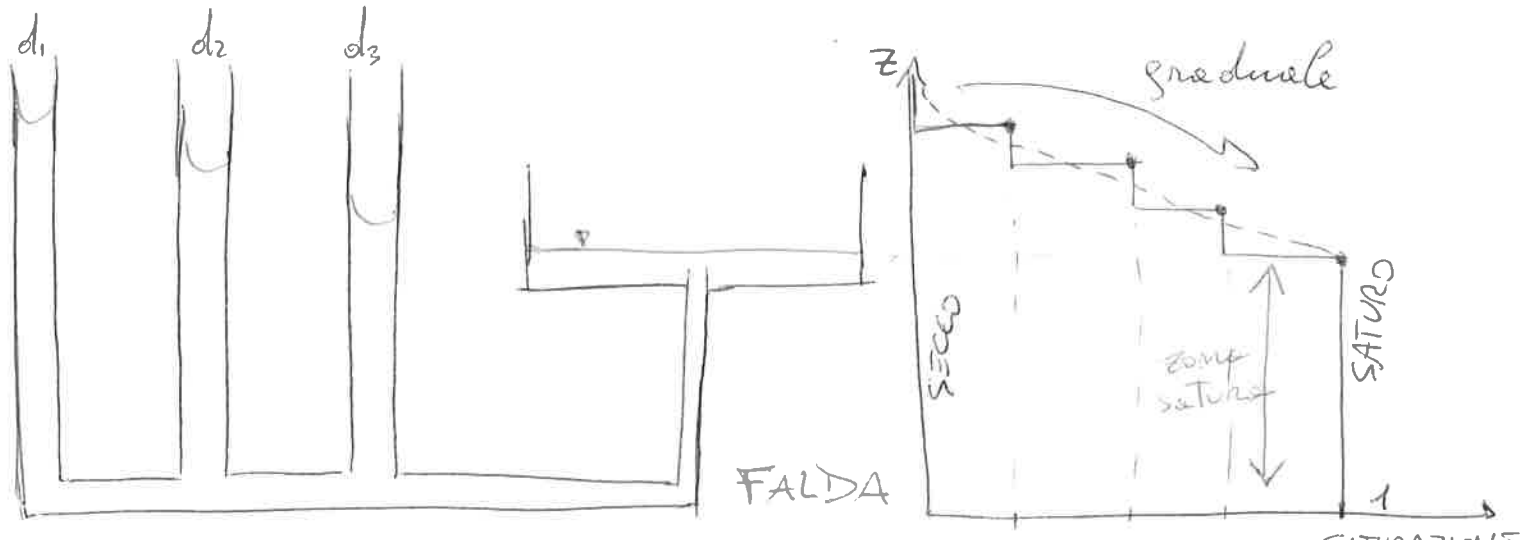
↳ l'altezza di risalita è $h = \frac{2T \cos \theta}{\gamma_w r}$

L'EVAPORAZIONE incrementa U_a , con una nuova configurazione di equilibrio.

② PRINCIPIO dei VASI COMUNICANTI



il menisco si crea con l'abbassamento di U_w , quindi aumenta il dislivello h , nel caso di $\theta < 90^\circ$ per coesione.



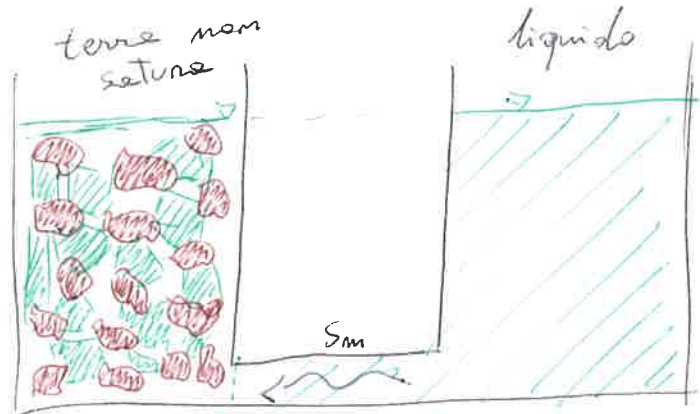
$d_1 \neq d_2 \neq d_3$ simulano un terreno eterogeneo, in cui c'è parziale saturazione

Bisogna considerare una zona saturata anche sopra il livello di falda.

Suzione

È la pressione interstiziale somma degli effetti osmotici

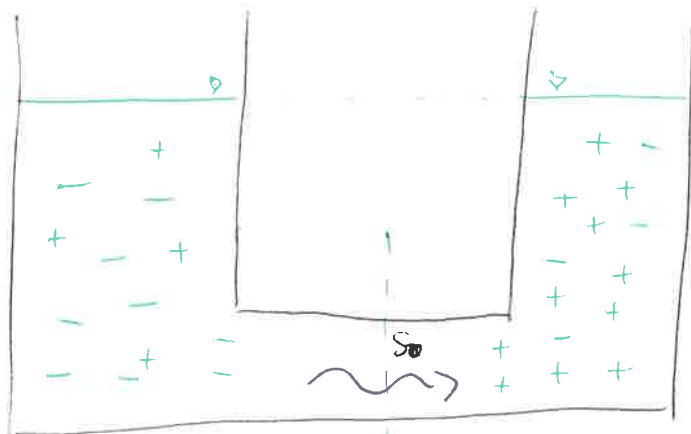
• SUZIONE DI MATRICE



per la differenza di pressione, ~~che~~ genera un gradiente idraulico

Prevalle in alta saturazione. ($v_w \rightarrow v_r$)

• SUZIONE OSMOTICA



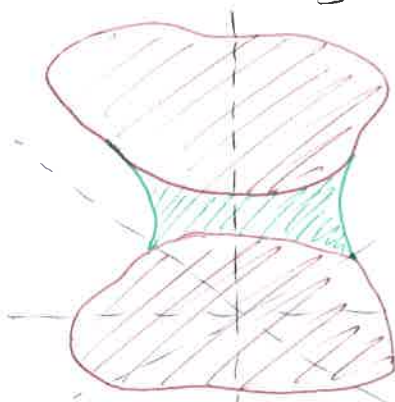
per la differenza di concentrazione, genera un gradiente chimico

Prevalle in bassa saturazione. ($v_w \leftarrow v_r$)

$$S_{tot} = S_m + S_o$$

↳ si definisce **SUZIONE** l'energia libera in funzione all'acqua di porosità; ovvero la capacità di assorbire l'acqua attraverso la fase fluida.

Dipende dalla geometria dei menischi (grani)

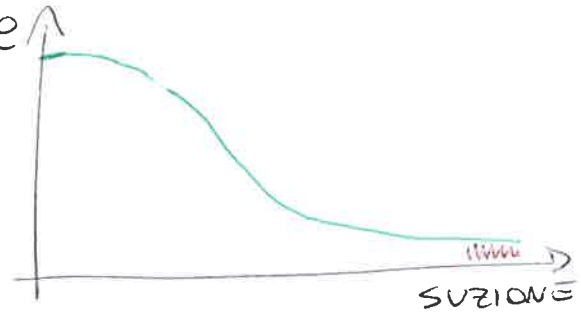


$$\frac{N}{A} = \left[\frac{1}{A} \left(A_w + P_w \left(\frac{bc}{b-c} \right) \right) \right] (U_a - U_w) = \frac{2T}{r} \frac{1}{1 + \tan(\beta/2)}$$

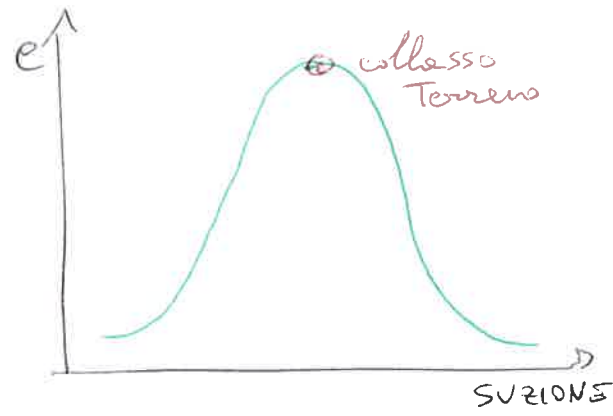
EQUILIBRIO NELLA
SUZIONE INTERMEDIA

③ Nella terra non satura, la suzione dipende dal numero di menischi presenti nel campione; aumentando la suzione, decresce la saturazione ($\frac{V_w}{V_v}$), quindi si generano nuovi menischi, riducendo le zone d'acqua.

• DRYING riduzione di acqua e si riduce $e = \frac{V_v}{V_s}$, aumenta suzione fino a un limite di ritiro tipico del terreno.



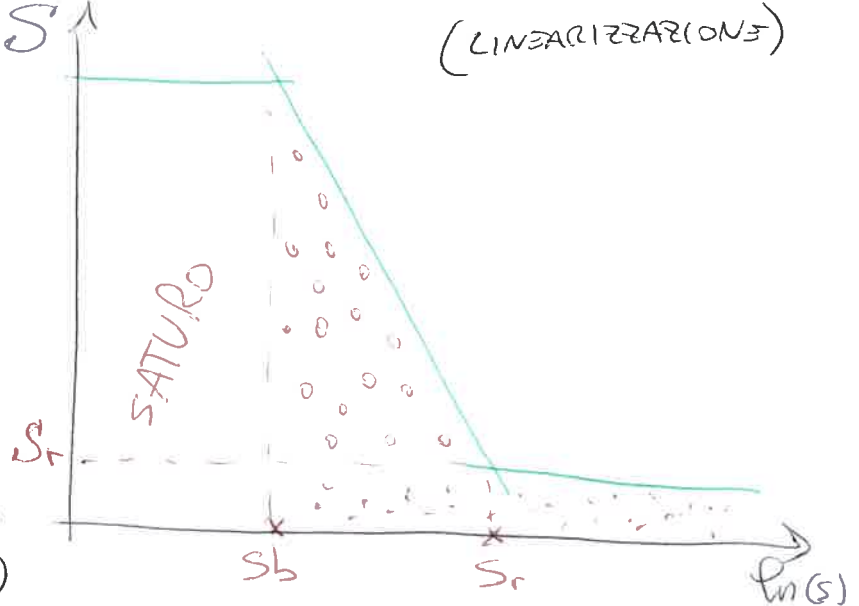
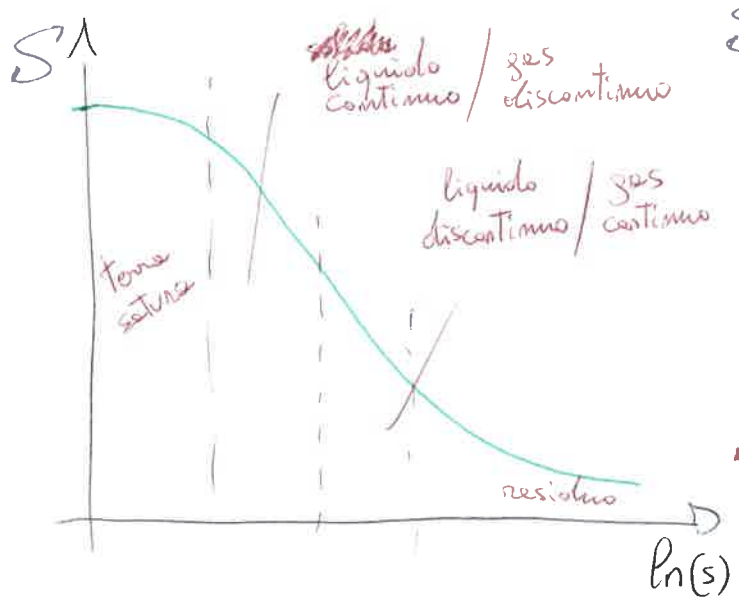
• WETTING aumento di acqua aumenta la $S = \frac{V_w}{V_v}$, si riduce la suzione, destabilizzando il terreno. (~ liquefazione)



Data la porosità $n = \frac{V_v}{V}$, si definisce contenuto d'acqua volumetrico $\Theta = S \cdot n$

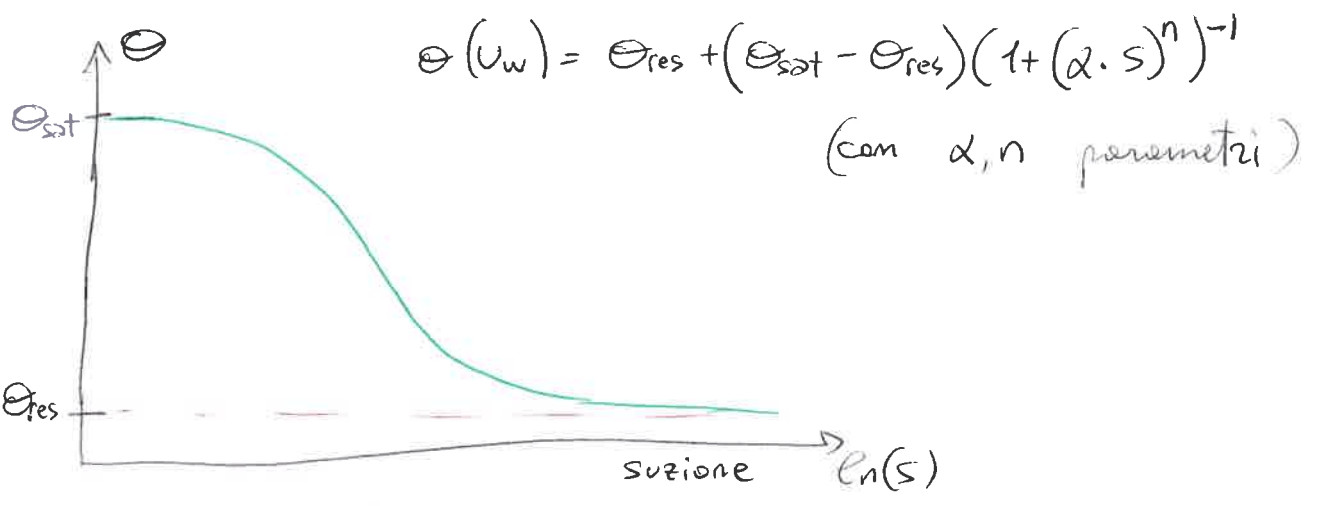
(prodotto tra saturazione e porosità $\frac{V_w}{V_v} \cdot \frac{V_v}{V} \Rightarrow \frac{V_w}{V}$)

Curve di ritenzione ciclica con ESSICCAZIONE + IMBIBIZIONE (LINEARIZZAZIONE)

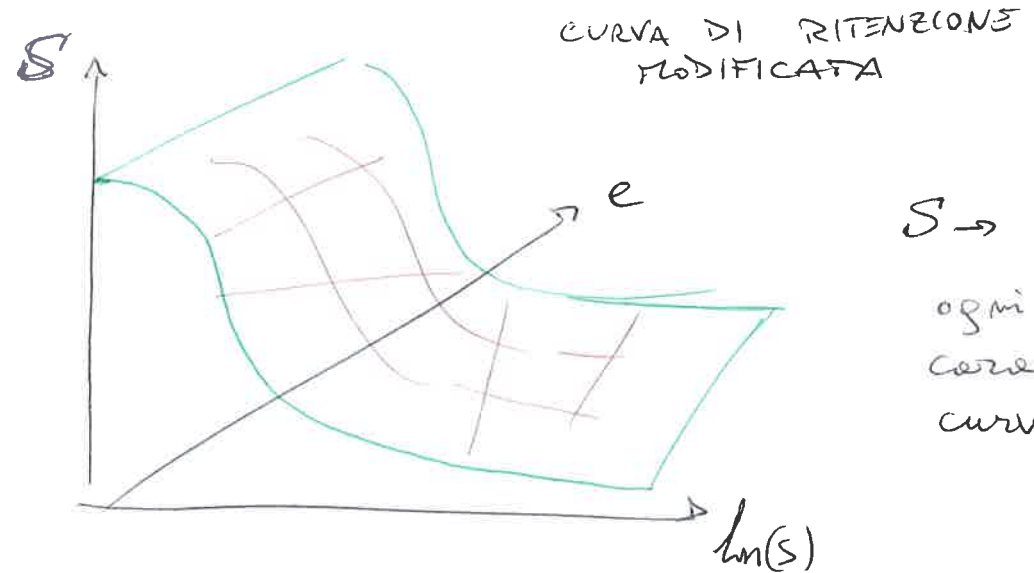
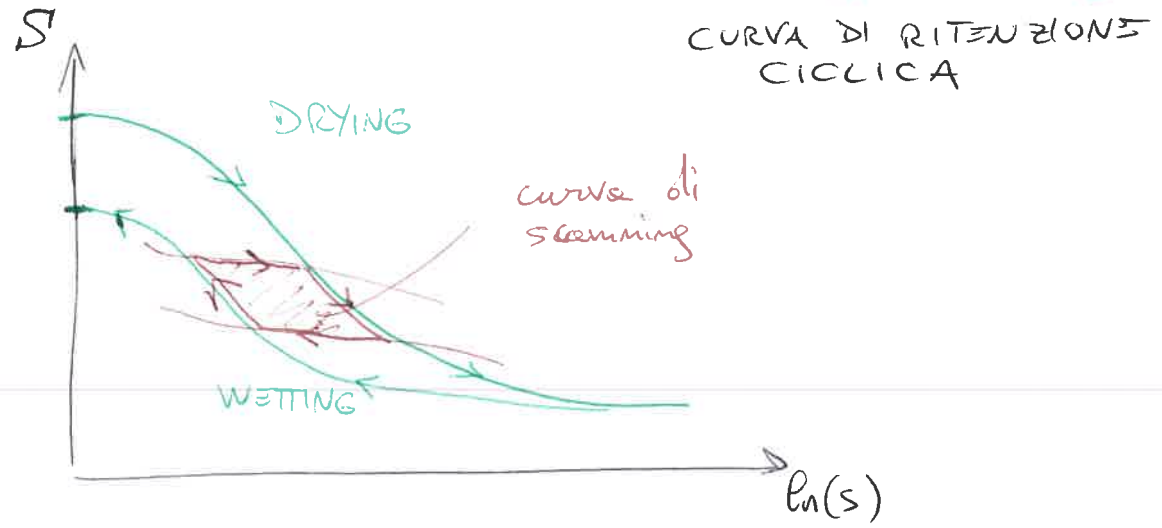


S_b : valore di ingresso di aria, inizio della riduzione del grado di saturazione. \rightarrow dipende dai grani.
 (sabbia $S_b = 10 \text{ kPa}$; argilla $S_b = 1000 \text{ kPa}$)
 S_r : suzione residua, ALTA per terra eterogenea, BASSA per terra omogenea.

CONTENUTO D'ACQUA VOLUMETRICO



Isteresi, con cicli di Wetting - Drying



con l'indice e diventa una superficie
 $S \rightarrow S_{effettivo}$
 ogni terreno ha S_b caratteristico, con curve diverse.

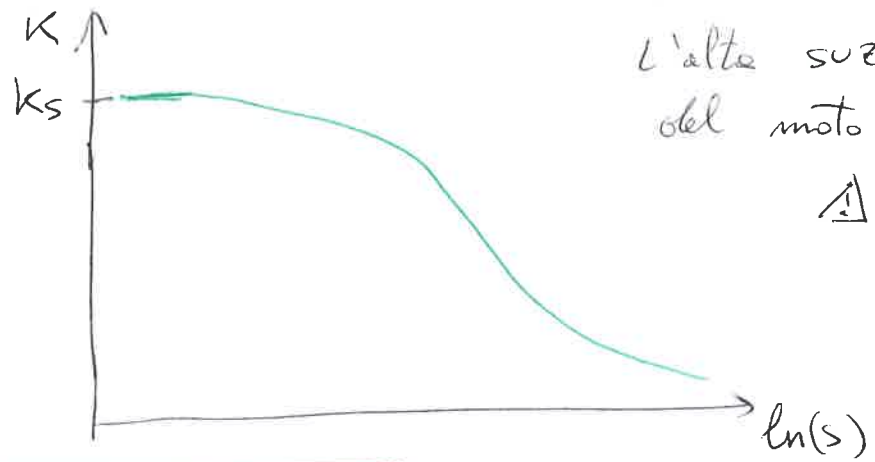
④ Legge di Darcy

Genericamente la velocità è $v = -k \cdot \frac{\partial h}{\partial x}$

ma in terreni non saturi $q = v \cdot \alpha = k(S) \nabla \left(\frac{u_w}{\gamma_w} + z \right)$

quindi il coefficiente di permeabilità k non è costante e dipende dal grado di saturazione S .

$k = f(S) = f(S(s))$ dipende dalla suzione



L'alta suzione provoca riduzione del moto d'acqua

$\Delta S \rightarrow \psi$ definite saturazione

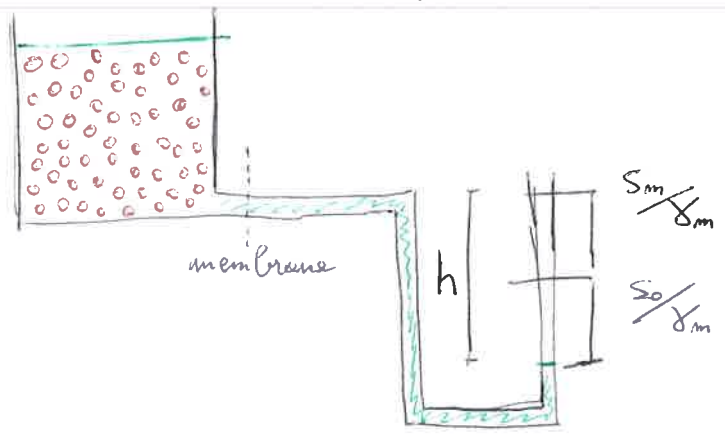
$k(\psi)$

$$k(\psi) = k_s \cdot k_r(\psi)$$

k_r : conducibilità idraulica relativa (0-1)

Misura della suzione

SUZIONE TOTALE = suzione di matrice + suzione osmotica
 $(S_m = u_o - u_w)$ (S_o)



$$\frac{S_t}{\gamma_m} = \frac{S_m}{\gamma_m} + \frac{S_o}{\gamma_m}$$

misurazione del dislivello che indica

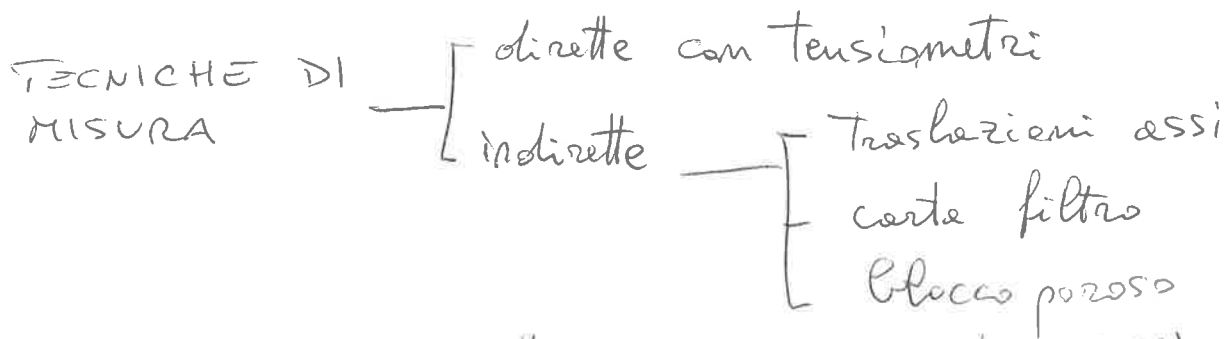
$$h = \frac{S_t}{\gamma_m}$$

oppure con l'equilibrio

di VAPORE con il gradiente di concentrazione

Legge psicometrica

$$S_t = - \frac{RT}{v_m} \ln \left(\frac{P_v}{P_v^0} \right) = - \frac{RT}{v_m} \ln(RH)$$



La misurazione diretta è condizionata dall'effetto di cavitazione nel terreno non saturo, aumentando il valore di suzione rispetto al reale.

La misurazione indiretta non risente della cavitazione ed ha capacità di pressione maggiore.

- estrattore di volume, per suzione di matrice;
- piastra di tensione, comportamento drying;
- Thermal block, per suzione di matrice;
- equitensiometri, capacità termica.

Gli PSICOMETRI calcolano il valore di suzione dell'equilibrio di vapore (legge psicometrica), grazie ai

- transistor, con la differenza di temperatura;
- termocoppie, con la differenza di umidità;
- carta da filtro, per la suzione di matrice.

⑤ Resistenza a taglio

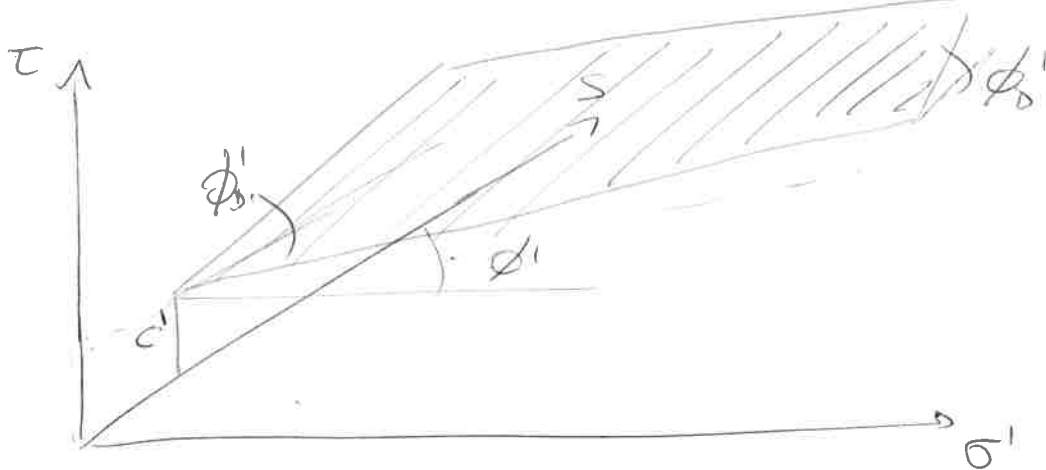
La legge coulombiana per terreno saturo $\tau = c' + \sigma' \tan \phi'$ viene modificata per terreno non saturo nella definizione di tensione efficace.

$$\sigma' = \sigma_{tot} - u = \sigma_{tot} - (u_2 - u_w)$$

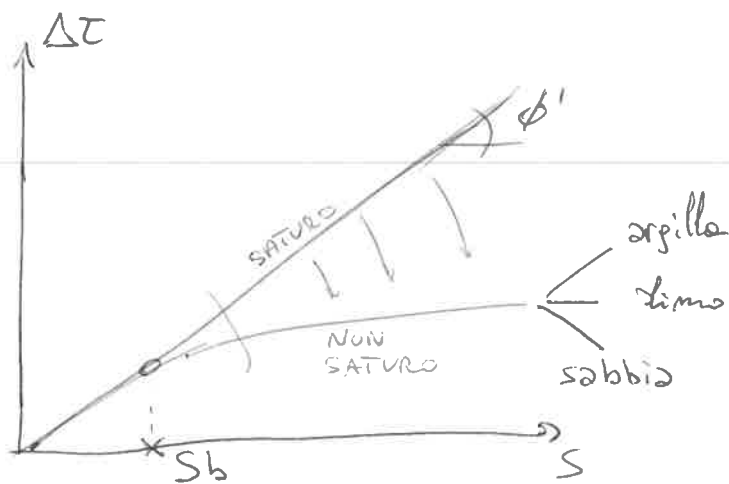
quindi $\tau = c' + (\sigma - u_2) \tan \phi' + (u_2 - u_w) \tan \phi'_D$

con un grafico a Tre dimensioni (τ, σ', s)

$$\tau = c' + \sigma' \tan \phi' + s \tan \phi'_D$$



Nel piano $\tau - s$ si considera $\Delta\tau = \tau - \sigma' \tan \phi'$



Bishop's modification

$$\tau = c' + (\sigma - s r u_w - (1 - s r) u_2) \tan \phi'$$

Carico meccanico e idraulico

Siccome la risposta tensionale non è idrostatica, ma è non lineare, si usa l'equazione di Richards

$$c \frac{\partial h}{\partial t} = \nabla (k \cdot \nabla h)$$

dove $c = \gamma_w \frac{\partial \theta}{\partial u_w}$

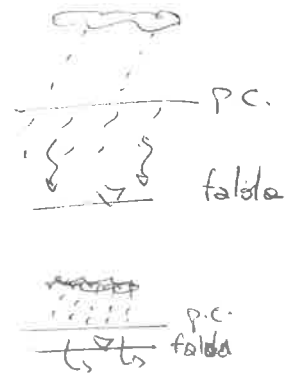
capacità idrica allo variazione di θ

Il flusso 1D varia per precipitazioni intense e durate

$$c \frac{\partial h}{\partial t} = \frac{\partial}{\partial y'} \left[k \frac{\partial h}{\partial y'} \right] + \frac{\partial}{\partial z'} \left[k \frac{\partial h}{\partial z'} \right]$$

Pioggia

- alta durata + bassa intensità → falda profonda
- bassa durata + alta intensità → falda superficiale



Nel caso di frane, il taglio limite è

$$\tau = c' + [(\sigma - u_2) + \lambda(u_2 - u_w)] \tan \phi'$$

con $\lambda = 0$ se secco, $= 1$ se ~~secco~~ saturo

$\lambda = f(\text{saturazione, stratigrafia, storia})$

con involucro non lineare

DIMOSTRAZIONI

- prova edometrica	1
- prova taglio diretto	2
- prove taglio triassiale	3
- Cam-clay	4
- costruzione 3D superfici	5
- metodo lim superiore	6
- metodo lim inferiore	7
- metodo caratteristiche	8
- metodi corpo rigido (3 superfici)	9
- metodi Fellenius	10
- " Bishop	11
- " Sarma	12
- " Lowe & Karfiath	13
- " Spencer	14
- " Morgenstern & P	15
- " Morgenstern & C	16
- " GLE	17
- " Sarma	18
- Reticoli stereografici	19
- Sismica M. pseudo-statico	20
- Sismica M. spostamenti	21

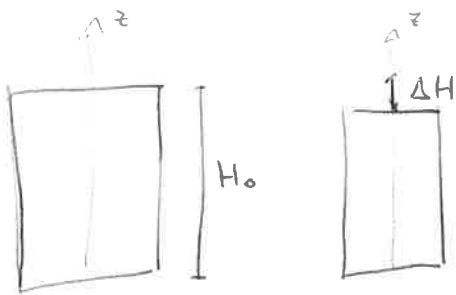
DIM: PROVA EDDOMETRICA

Valutare la comprimibilità con compressione isotropa (p).

→ Prova a Incremento di Carico (IL).

Grafico $e = \frac{V_v}{V_s}$ con $\log p'$ in carico, smernamento e scarico.

Misurazione altezza provino ad ogni applicazione di carico



$$\epsilon_z = \frac{-\Delta H}{H_0} = -\frac{\Delta V}{V_0} = -\frac{\Delta(V_s + V_v)}{V_s + V_{v0}}$$

$$\begin{cases} V = V_s + V_v \\ V_0 = V_s + V_{v0} \end{cases}$$

← si riducono i vuoti V_v

$$= \frac{-\Delta \left(\frac{V_v}{V_s} \right)}{\frac{V_s}{V_s} + \frac{V_{v0}}{V_s}} \rightarrow \frac{\Delta e}{1 + e_0} = \epsilon_z$$

cedimenti verticali

Trebbi:

- ramo di ricompressione

elastico

NC (OCR=1)

- ramo di compressione

~~non elastico~~

plastico

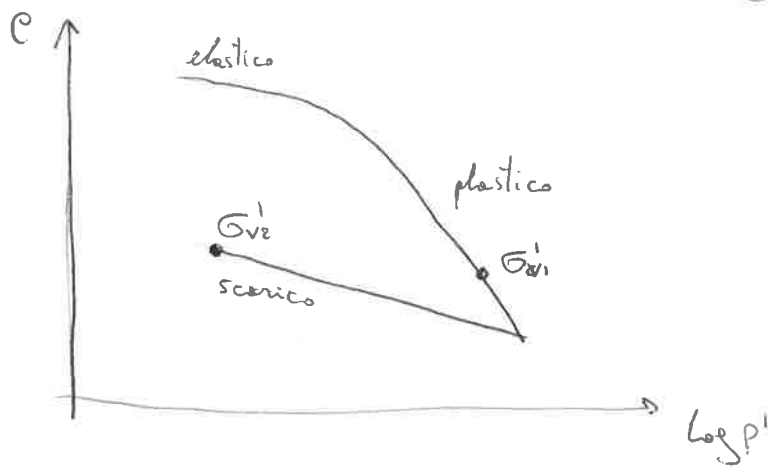
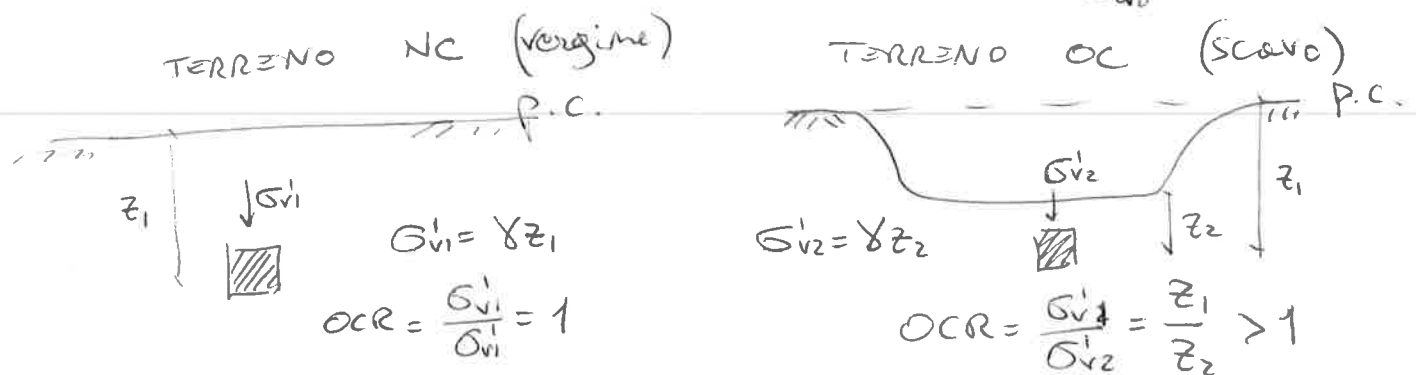
NC (OCR=1)

- ramo di scarico

elastico

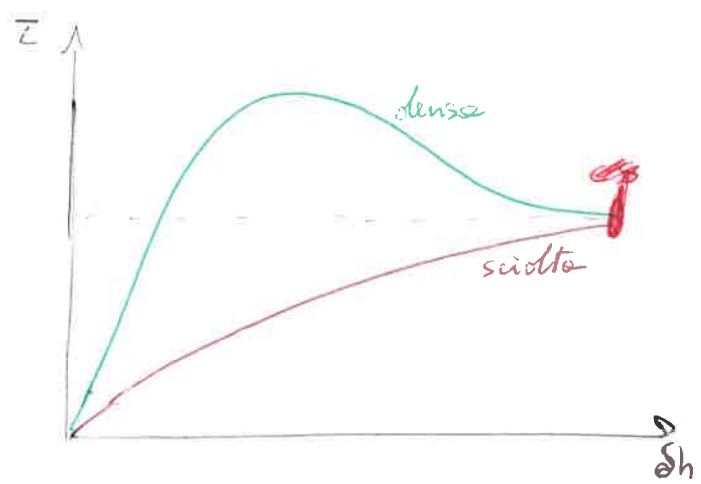
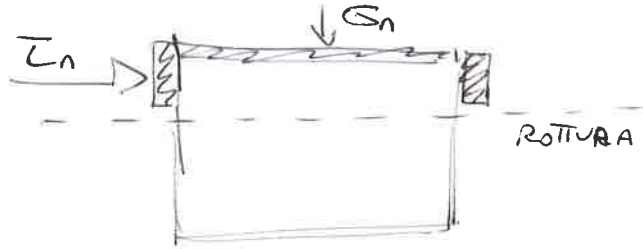
OC (OCR > 1)

⇒ Grado di sovracconsolidamento $OCR = \frac{\sigma_{vmax}'}{\sigma_{v0}'}$

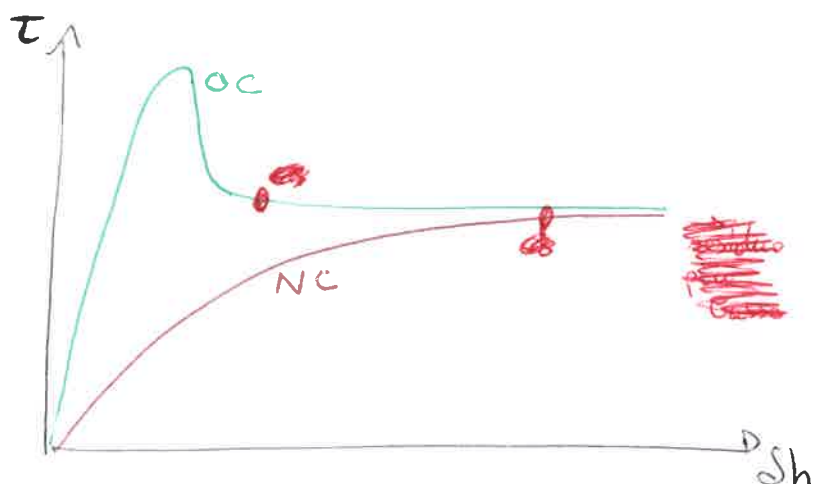


DIM: PROVA TAGLIO DIRETTO

Applicazione σ_n e τ_n \longrightarrow Deformazioni δ_n e δ_h

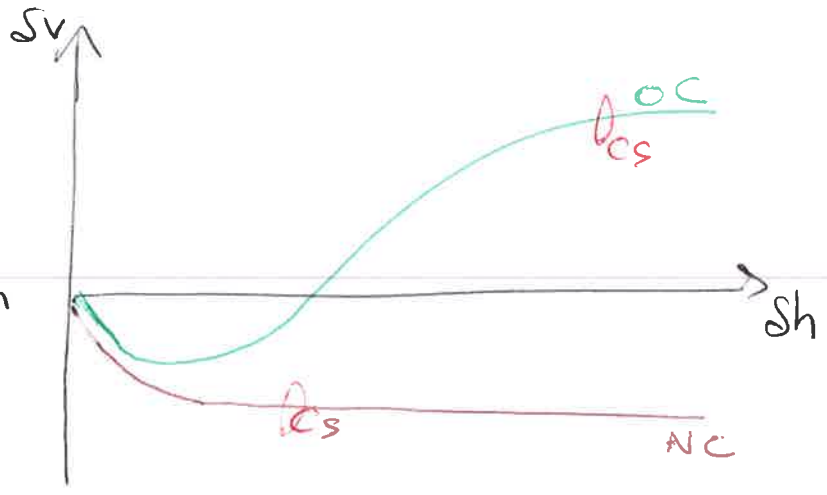
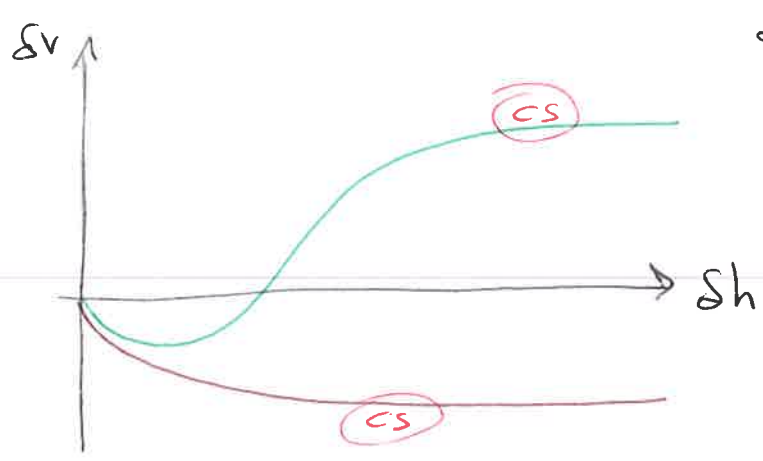


SABBIE



ARGILLE

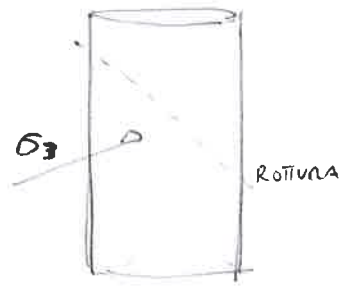
CS: Stato Critico per cui non si hanno variazioni volumetriche all'aumentare del carico.



DIM: PROVA TAGLIO TRIASSIALE

Applicazione σ_1 e $\sigma_3 \rightarrow$ pressioni interstiziali u
 sforzo taglio τ
 risposte (p, q)

$\downarrow \sigma_1 + \Delta\sigma$



FASI

- saturazione
- consolidazione

- applicazione carichi $\sigma_1 = \sigma_3$ (isotropo p)
- applicazione carico $\Delta\sigma$ in σ_1 (deviatorico q)

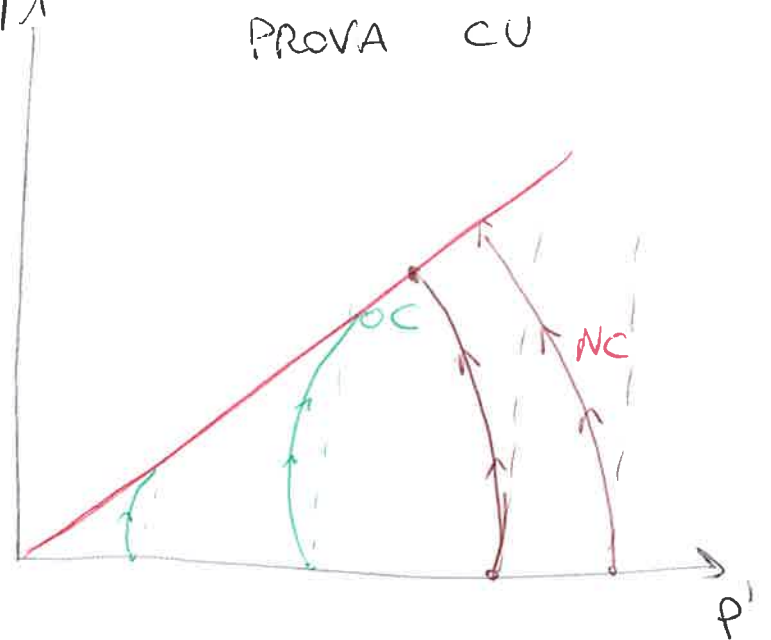
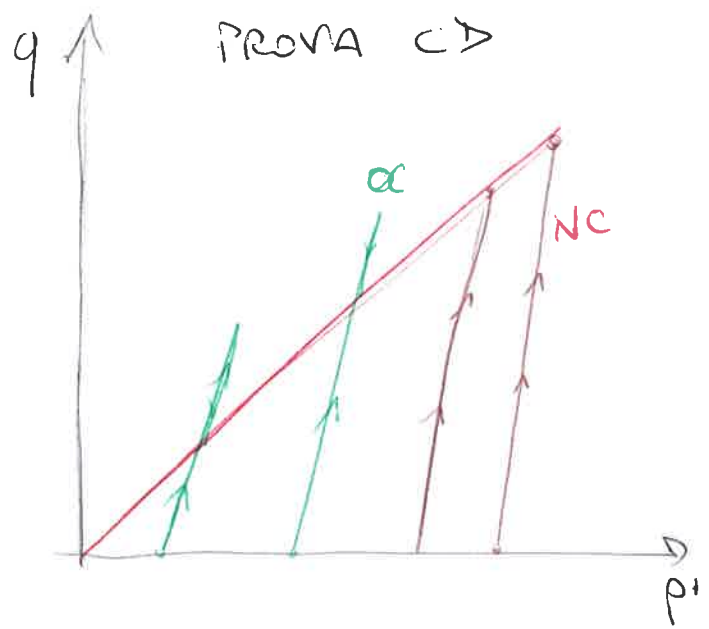
TIPOLOGIE

	consolidato	non consolidato
deformato	lungo termine CD	$(U \sigma)$ $\sigma_3 = 0$
non deformato	breve termine CU	UU breve termine

- ARGILLA NC : $\Delta U \neq 0$
- ARGILLA OC : $\Delta U \neq 0$
- SABBIA : $\Delta U = 0$

$$\sigma'_s = \sigma_{tot} - \Delta U$$

t. efficaci t. totali press acqua



DIM: CAM-CLAY e CAM-CLAY MODIFICATO

Relazione costitutiva: $\dot{\epsilon} = - \frac{\dot{v}}{v}$ deformazione volumetrica incrementale (elastica + plastica)

$\hookrightarrow \dot{\epsilon}_v = \dot{\epsilon}_v^e + \dot{\epsilon}_v^p = \frac{k}{v} \frac{\dot{p}_c}{p_c} + \frac{1-k}{v} \frac{\dot{p}_c}{p_c}$

ipotesi: deformazioni infinitesime, legge di flusso associato

I) CAM-CLAY

Lavoro $\frac{\delta W}{v} = p' \delta \epsilon_v^e + q \delta \epsilon_v^p = \delta \epsilon_v^p q$ solo attrito (deviatorico, def. plastica)

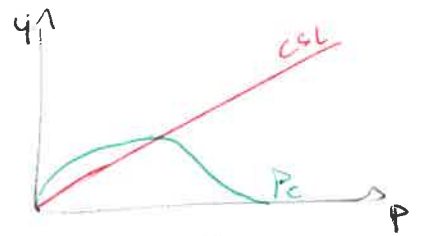
stato critico: $q = Mp'$

$p' \delta \epsilon_v^e + q \delta \epsilon_v^p = \delta \epsilon_v^p Mp'$ \leftarrow diviso $p' \delta \epsilon_v^p$

$\frac{\delta \epsilon_v^e}{\delta \epsilon_v^p} + \frac{q}{p'} = M$

definizione ~~DILATAZIONE~~
FLUSSO ASSOCIATO $\frac{\delta \epsilon_v^e}{\delta \epsilon_v^p} = - \frac{\delta q}{\delta p'}$

$\frac{q}{p'} = M + \frac{\delta q}{\delta p'} \rightarrow \boxed{q + Mp' \ln\left(\frac{p}{p_c}\right) = 0}$



II) CAM-CLAY MODIFICATO

Lavoro $\frac{\delta W}{v} = p' \delta \epsilon_v^e + q \delta \epsilon_v^p = p' \sqrt{(\delta \epsilon_v^e)^2 + M^2 (\delta \epsilon_v^p)^2}$ deformazione equivalente

stato critico: $q = Mp'$

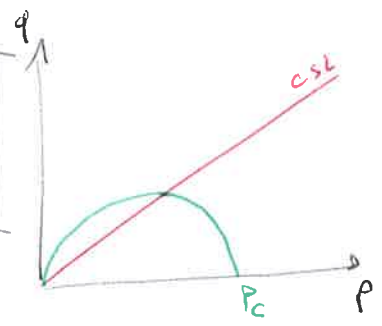
diviso $p' \delta \epsilon_v^p \rightarrow \frac{\delta \epsilon_v^e}{\delta \epsilon_v^p} + \frac{q}{p'} = \sqrt{\frac{(\delta \epsilon_v^e)^2}{(\delta \epsilon_v^p)^2} + M^2}$ elevato al II grado

$2 \frac{q}{p'} \frac{\delta \epsilon_v^e}{\delta \epsilon_v^p} + \frac{q^2}{p'^2} = M^2$

definizione FLUSSO ASSOCIATO $\frac{\delta \epsilon_v^e}{\delta \epsilon_v^p} = - \frac{\delta q}{\delta p'}$

$\frac{q^2}{p'^2} \left(1 - 2 \frac{\delta q}{\delta p'}\right) = M^2$

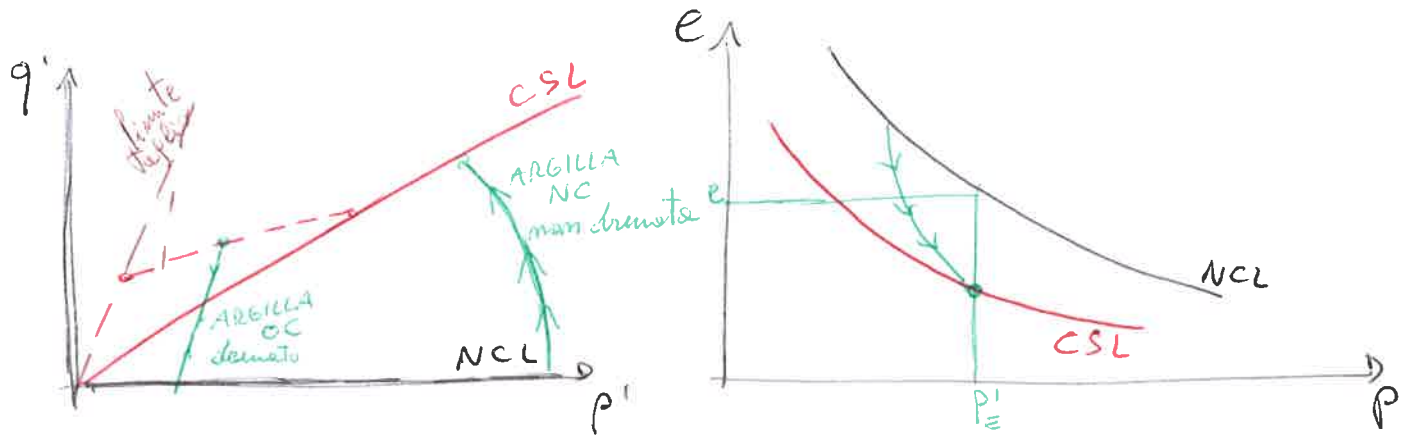
$\rightarrow \boxed{\frac{q^2}{M^2} + p(p - p_c) = 0}$



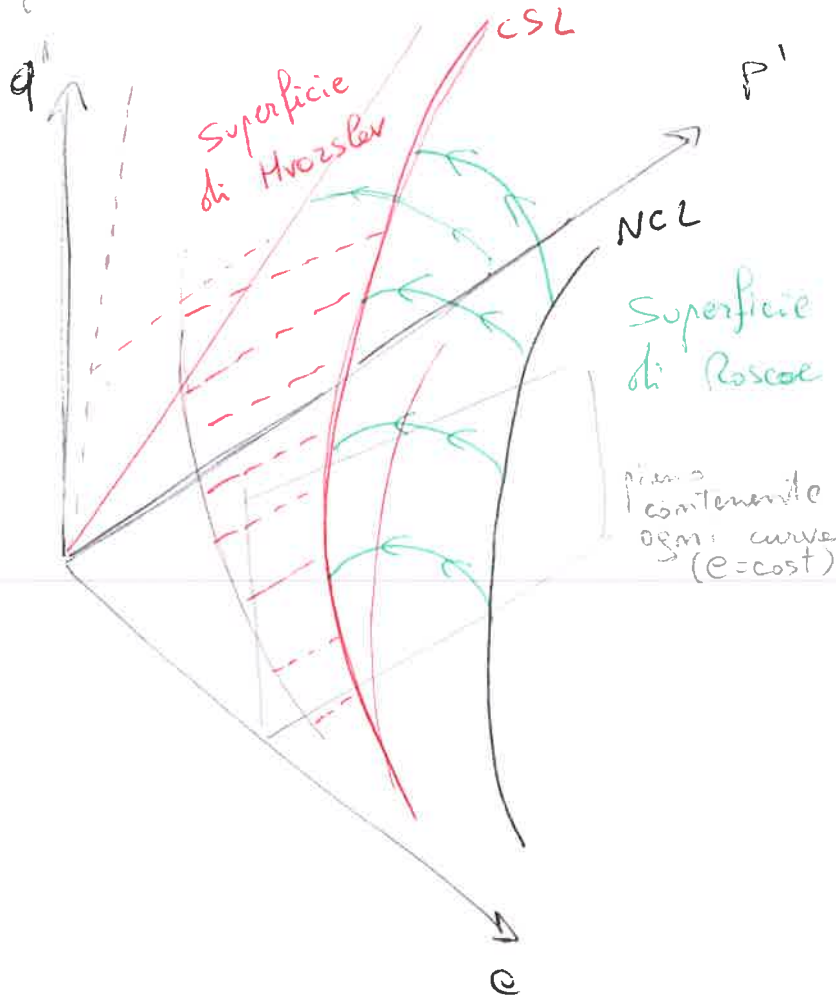
DIM: SUPERFICI 3D

Dalle prove triassiali si definiscono gli andamenti $q-p'$, $e-p'$ e $e-p$.

→ Normalizzazione delle prove per P'_e (equivalente)



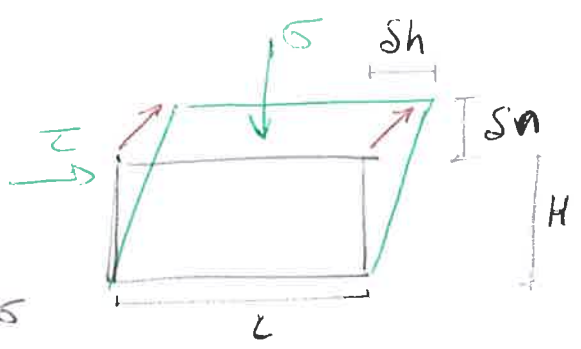
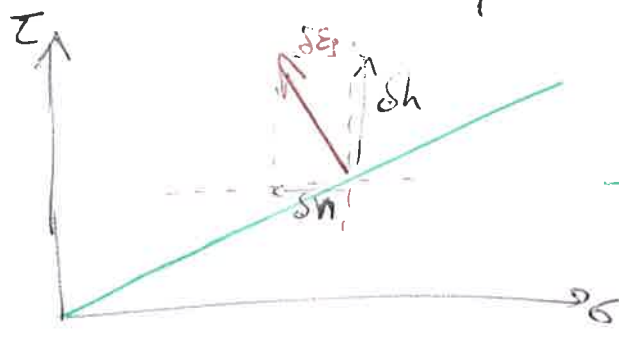
Nello spazio si grafica (q, p', e)



DIM: METODO ANALISI LIMITE SUPERIORE

→ Potenza dei carichi esterni eguaglia la potenza dissipata delle forze interne. ⇒ Principio dei lavori virtuali.

LUNGO
TERMINE
Legge di flusso associato



Deformazione libera $\dot{\alpha}_i = 0$

$$\dot{\alpha}_e = \dot{\alpha}_n \cdot \delta n + \dot{\alpha}_t \cdot \delta h = \sigma L \cdot \delta n + \tau \cdot L \delta h$$

sostituzione: $\delta h = \gamma$, $\delta n = \epsilon$; sull'elementino $h \cdot l$

$$\dot{\alpha}_e = l h \left(\sigma \frac{\epsilon}{h} + \tau \frac{\gamma}{h} \right) \Rightarrow l h (\sigma \delta \epsilon + \tau \delta \gamma)$$

Da definizione di dilatazione porta a $\tau = - \frac{\delta \epsilon}{\delta \gamma \tan \psi} \sigma \tan \psi'$

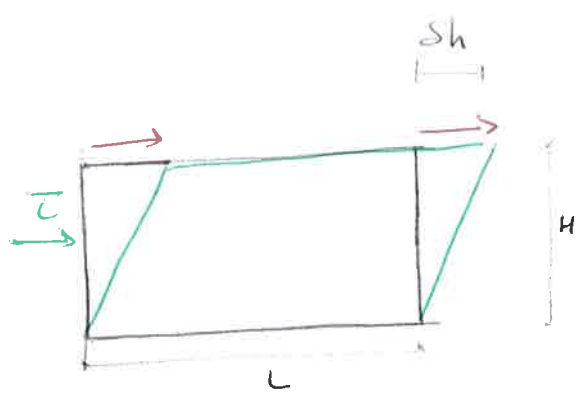
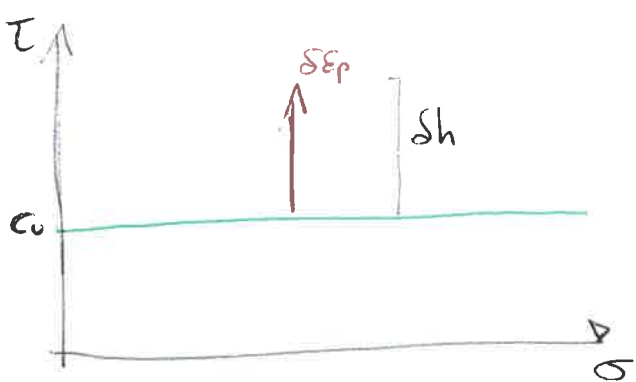
~~$\dot{\alpha}_e = l h \left(\sigma \frac{\delta \epsilon}{h} - \frac{\sigma \tan \psi'}{\delta \gamma \tan \psi} \delta \gamma \right)$~~ $\hookrightarrow \boxed{\delta \epsilon = \sigma}$

$$\dot{\alpha}_e = l h \left(- \frac{\tau \delta \gamma \tan \psi'}{\tan \psi} + \tau \delta \gamma \right)$$

$$\dot{\alpha}_e = l h \tau \delta \gamma \left(1 - \frac{\tan \psi'}{\tan \psi} \right) = 0 \quad \text{quindi } \boxed{\psi = \psi'}$$

l'angolo di dilatazione eguaglia l'angolo di resistenza al taglio

BREVE
TERMINE
Legge di flusso associato



Deformazione forzata: $\dot{\alpha}_e = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\delta h}{\sqrt{2}}$

$$\delta e = N \delta n + T \delta h = \tau l \delta h$$

solo componente di Taglio
 $\delta n = 0$

Principio dei lavori virtuali $\delta i = \delta e$

$$\tau l \delta h = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\delta h}{\sqrt{2}}$$

A breve termine $\tau \rightarrow c_0$, $l = H \sqrt{2}$

$$c_0 H \sqrt{2} \delta h = \frac{1}{2} \gamma H^2 \frac{\delta h}{\sqrt{2}}$$

$$c_0 \sqrt{2} = \frac{1}{2} \gamma H \frac{1}{\sqrt{2}}$$

$$H = \frac{4 c_0}{\gamma}$$

è il limite superiore

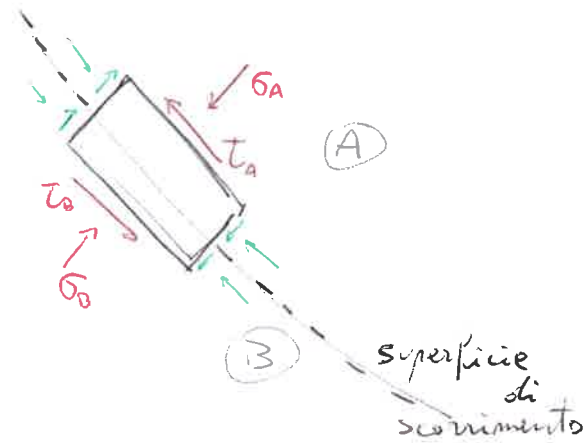
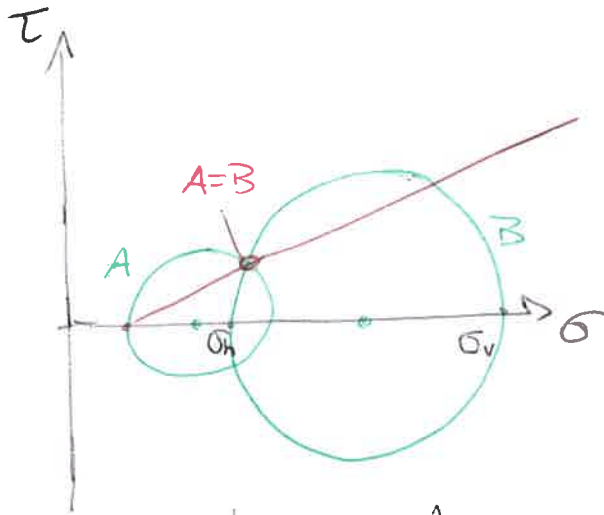
$$H < \frac{4 c_0}{\gamma}$$

DIM: METODO ANALISI LIMITE INFERIORE

→ Il campo di tensioni soddisfa l'equazione d'equilibrio ed il criterio di rottura.

LUNGO TERMINI

cerchio di Mohr



si trova il punto $\begin{cases} \tau_A = \tau_B \\ \sigma_A = \sigma_B \end{cases}$

equazioni di equilibrio e criterio di rottura

$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{zx}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = 0 \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi' \end{cases}$$

Dalla teoria di Rankine $\sigma_h = \sigma_v k_0 = \sigma_v \cdot (1 - \sin \phi')$

$t = s \sin \phi' \rightarrow \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \sin \phi'$ senza coesione

quindi $\sigma_h = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} \sigma_v = k_0 \sigma_v$

coefficiente di spinta attiva

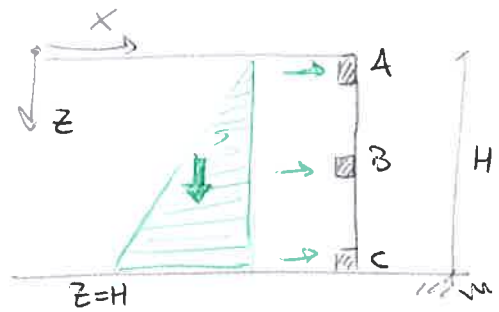
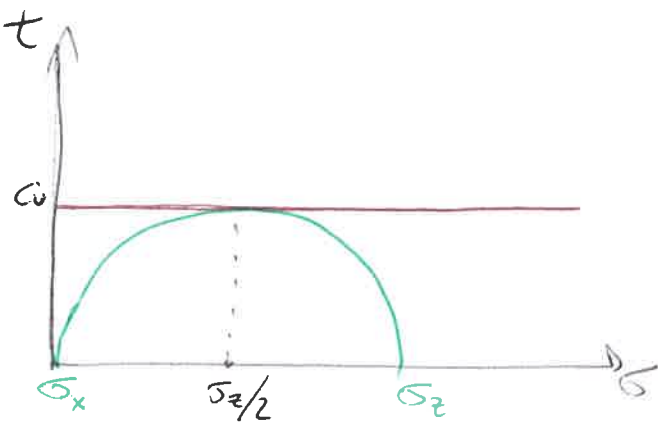
$$k_0 = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right)$$

Rapporto delle spinte orizzontali e verticali

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_v} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right)$$

BREVE
TERMINI

Cerchio
di Mohr



equazioni di
equilibrio e
criterio di
rottura

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \\ \frac{\sigma_1 - \sigma_3}{2} = \frac{\sigma_1 + \sigma_3}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi' \end{array} \right.$$

Per ipotesi di breve termine si ha $\tau_{xz} = \tau_{zx} = 0$

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} = 0 \quad \text{costante sull'orizzontali} \\ \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \quad \text{cresce con } z \end{array} \right.$$

in A ($z=0$) $\sigma_x = 0$, quindi anche in B e C.

$$\sigma_z = \int_0^H \gamma dz = \gamma z + C$$

in A ($z=0$) $\sigma_z = \gamma \cdot 0 + C = 0$ per condizione al contorno σ_x

quindi $\boxed{\sigma_z = \gamma z}$

in C ($z=H$) $\rightarrow \sigma_z = \gamma H$ massimo sforzo

il raggio del cerchio è $\frac{\sigma_z}{2} = \frac{\gamma H}{2}$

$$c_u = \frac{\gamma H}{2}$$

$$\leadsto H = \frac{2c_u}{\gamma}$$

è il limite inferiore

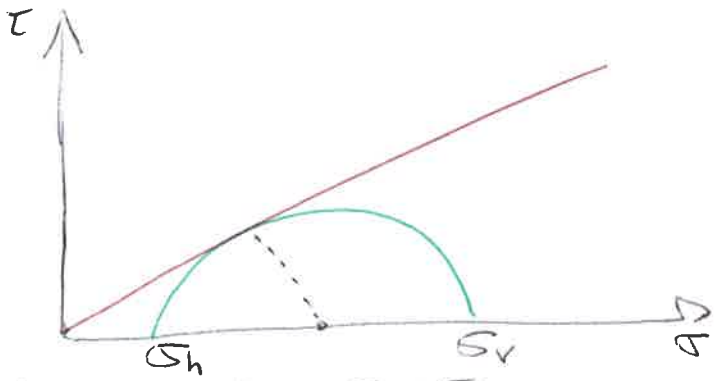
$$\boxed{H > \frac{2c_u}{\gamma}}$$

DIM: METODO DELLE CARATTERISTICHE

Definizione delle linee equipotenziati tramite la teoria di Rankine delle spinte attive e passive.

$$\sigma_h = K_0 \sigma_v \begin{cases} \text{s. attiva} & \sigma_{ho} = K_{oa} \sigma_v \\ \text{s. passiva} & \sigma_{hp} = K_{op} \sigma_v \end{cases}$$

sistema di equilibrio



$$\begin{cases} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} = 0 \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} = \gamma \\ \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \sin \phi' + c' \cos \phi' \end{cases}$$

s = centro $\frac{\sigma_v + \sigma_h}{2}$
 r = raggio $\frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}$

$$\Rightarrow \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2} = \frac{\sigma_v + \sigma_h}{2} \sin \phi'$$

$$\sigma_{ho} (1 + \sin \phi') = \sigma_{vo} (1 - \sin \phi')$$

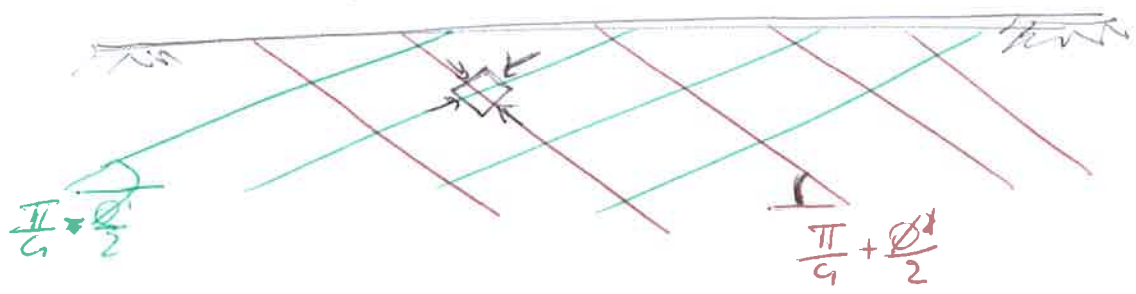
~~$\sigma_v - \sigma_h = (\sigma_v + \sigma_h) \sin \phi'$~~
 ~~$\sigma_h = \sigma_v - (\sigma_v + \sigma_h) \sin \phi'$~~
 ~~$\sigma_h = (1 - \sin \phi') \sigma_v$~~

$$\sigma_{ho} = \sigma_{vo} \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'}$$

$$K_{oa} = \frac{1 - \sin \phi'}{1 + \sin \phi'} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} - \frac{\phi'}{2} \right) \text{ inclinazione delle caratteristiche } \underline{\text{ATTIVA}}$$

$$K_{op} = \tan^2 \left(\frac{\pi}{4} + \frac{\phi'}{2} \right) \text{ inclinazione delle caratteristiche } \underline{\text{PASSIVA}}$$

$$\left(= \frac{1 + \sin \phi'}{1 - \sin \phi'} \right)$$

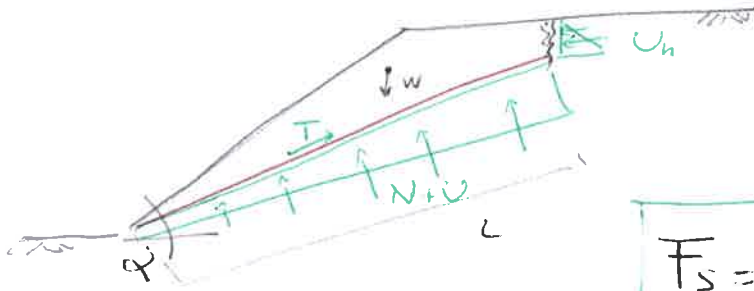


DIM: MET. EQ. LIMITE, CORPO RIGIDO

• ipotesi di superficie piana

lungo la superficie di scorrimento si

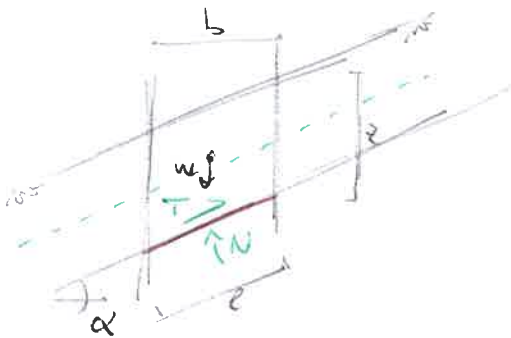
$$k_0 \quad F_s = \frac{T_{LIMITE}}{T_{APPLICATO}} = 1$$



$$F_s = \frac{c'L + N' \tan \phi'}{W \sin \alpha + U_h \cos \alpha}$$

con $N' = W \cos \alpha - U - U_h \sin \alpha$

→ CASO DI PENDIO INDEFINITO ASCUTTO



$$F_s = \frac{c'L + N' \tan \phi'}{W \sin \alpha}$$

per $\rho = \frac{b}{\cos \alpha}$

$$N' = \rho h \cos \alpha$$

$$w = b z \gamma = \rho \cos \alpha z \gamma$$

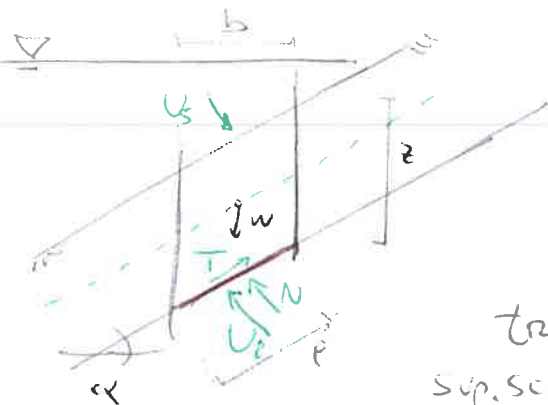
$$\gamma z \cos^2 \alpha$$

$$F_s = \frac{c' \rho + \gamma \rho z \cos^2 \alpha \tan \phi'}{\gamma \rho z \cos \alpha \sin \alpha}$$

$$= \frac{c'}{\gamma z \cos \alpha \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$$

coesione Coulomb

→ CASO DI PENDIO INDEFINITO SOMMERSO



$$F_s = \frac{c' \rho + N' \tan \phi'}{T}$$

per $\rho = \frac{b}{\cos \alpha}$

effetto dell'acqua $\left\{ \begin{array}{l} U_s - U_p = \rho \gamma_w z \\ U_i - U_{i-1} = \rho \gamma_w z \sin \alpha \end{array} \right.$

traslazioni $\left\{ \begin{array}{l} T = W \sin \alpha + (U_i - U_{i-1}) \cos \alpha \\ \text{sup. scorrimento} \end{array} \right.$

$$N = W \cos \alpha + (U_s - U_p) - (U_i - U_{i-1}) \sin \alpha$$

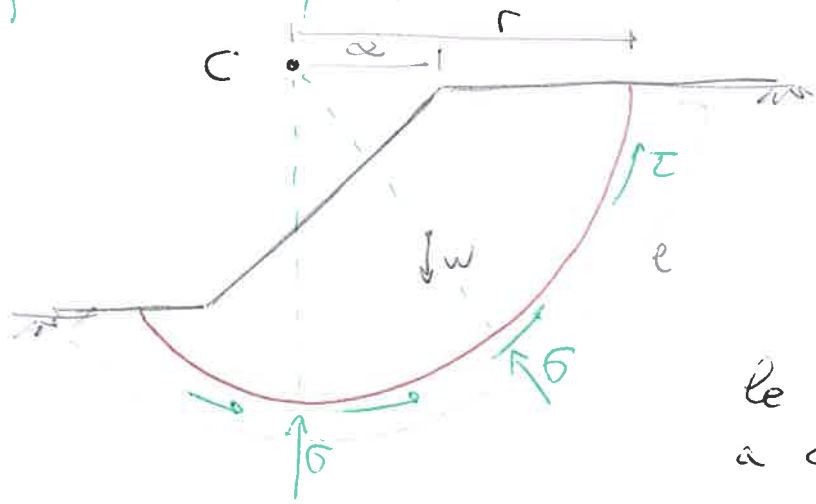
$$\Rightarrow \left\{ \begin{array}{l} T = W \sin \alpha + \rho \gamma_w z \sin \alpha \cos \alpha \\ N' = W \cos \alpha + \rho \gamma_w z - \rho \gamma_w z \sin^2 \alpha = W \cos \alpha + \frac{\rho b \gamma_w}{\cos \alpha} - \frac{b \gamma_w z \tan \alpha \sin \alpha}{\cos \alpha} \end{array} \right.$$

$$F_s = \frac{c' \rho + (\gamma z \rho \cos^2 \alpha - \gamma_w z \rho \cos \alpha) \tan \phi'}{\gamma z \rho \sin \alpha - \gamma_w z \rho \sin \alpha}$$

$$= \frac{\frac{c'}{\cos \alpha}}{\gamma z \sin \alpha} + \frac{\tan \phi'}{\tan \alpha}$$

coesione Coulomb

ipotesi di superficie circolare



lungo la superficie di scorrimento si ha

$$F_s = \frac{M_{RESISTENTE}}{M_{RIBALTANTE}} = 1$$

le σ sono in direzione e C a componente nulla

$$M_{RESIS} = \tau \cdot l \cdot r \quad , \quad M_{RIBAL} = W \cdot a$$

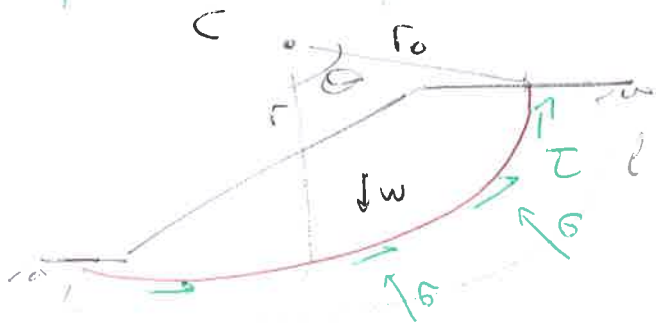
$$F_s = \frac{\tau \cdot l \cdot r}{W \cdot a}$$

($\tau \rightarrow c_u$)

metodo per terreni argillosi e a breve termine

$$F_s = \frac{c_u \cdot l \cdot r}{W \cdot a}$$

ipotesi di superficie logaritmica



lungo la superficie di scorrimento si ha

$$F_s = \frac{M_{RESIS}}{M_{RIBAL}} = 1$$

$$\text{ma } r = r_0 \cdot \exp\left(\frac{\tan \phi' \cdot \theta}{F_s}\right)$$

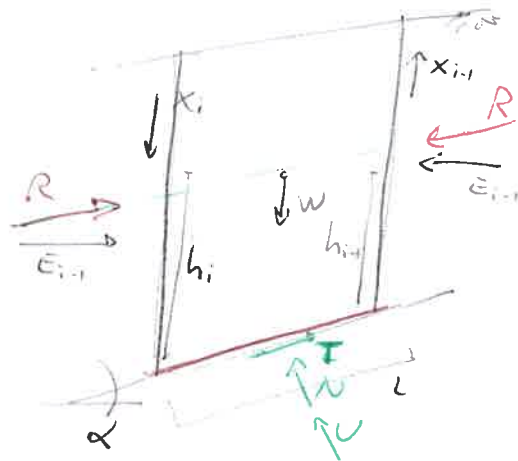
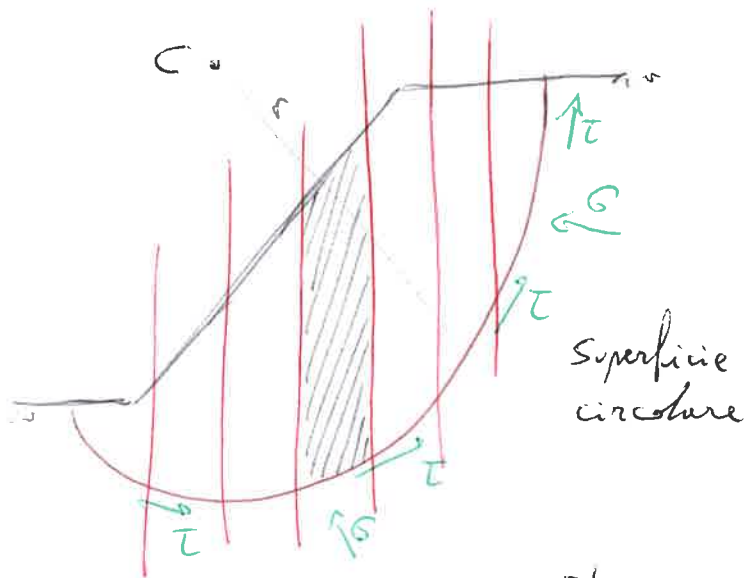
Per l'equilibrio $M_{RESIS} + M_{RIBAL} = 0$

$$M_{RESIS} = \int_l \frac{c'}{F_s} r \, dl \quad , \quad M_{RIBAL} = W \cdot a$$

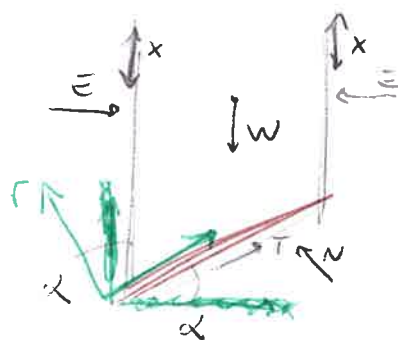
$$\Rightarrow \int_l \frac{c'}{F_s} r \, dl + W \cdot a = 0 = \int_l \frac{c'}{F_s} \left(r_0 \exp\left(\frac{\tan \phi' \cdot \theta}{F_s}\right) \right) dl + W \cdot a$$

- CASO LIMITE $c' = 0 \rightarrow$ superficie piana
- CASO LIMITE $\phi' = 0 \rightarrow$ superficie circolare

DIM: METODO DI FELLENIUS, stisce



SISTEMA DI RIFERIMENTO
~~orizzontale e verticale~~
 radiale



Sommatoria delle i strisce

$$\bar{T}_S = \frac{\sum_i T_{LIMi}}{\sum_i T_{APPi}}$$

$$\bar{T}_S = \frac{\sum (c'l + N' \tan \phi')}{\sum (W \sin \alpha)}$$

EQUILIBRIO RADIALE (r)

$$W \cos \alpha - (N' + UL) - \Delta E \sin \alpha + \Delta X \cos \alpha = 0$$

Si ricava $N' = W \cos \alpha - UL + \Delta X \cos \alpha - \Delta E \sin \alpha = 0$

ipotesi di Fellenius: $\Delta X \cos \alpha - \Delta E \sin \alpha = 0$

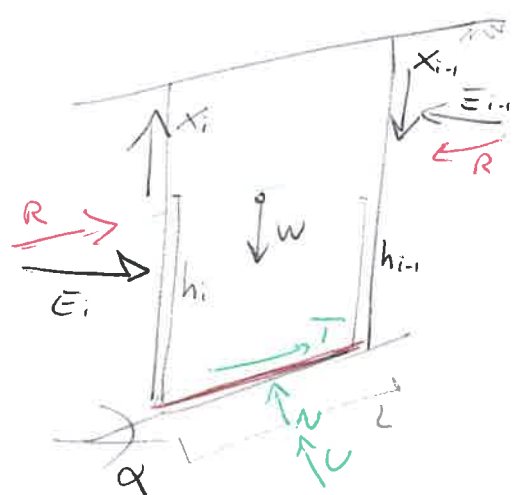
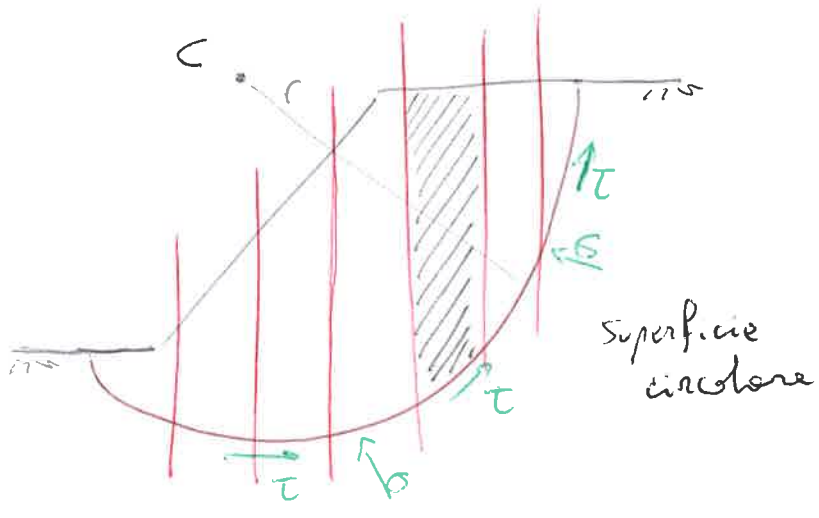
↳ forze di interstria nulle per equilibrio (direzione radiale)

$$N' = W \cos \alpha - UL$$

$$\bar{T}_S = \frac{\sum (c'l + (W \cos \alpha - UL) \tan \phi')}{\sum (W \sin \alpha)}$$

* fattore di sicurezza sottovalutato, in favore di sicurezza

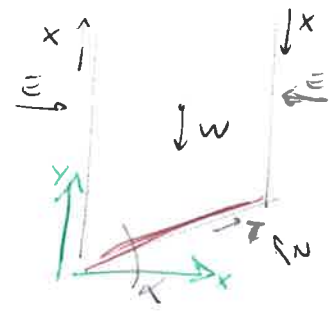
DIM: METODO DI BISHOP, strisce



$$\bar{F}_s = \frac{\sum_i T_{lim i}}{\sum_i T_{app i}} \quad \begin{array}{l} \text{somma} \\ \text{delle } i \text{ strisce} \end{array}$$

SISTEMA DI RIFERIMENTO orizzontale e verticale

$$\bar{F}_s = \frac{\sum (c'l + N' \tan \phi)}{\sum (W \sin \alpha)}$$



EQUILIBRIO ORIZZONTALE (F_x)

$$\Delta E - T \cos \alpha + (N' + UL) \sin \alpha = 0$$

EQUILIBRIO VERTICALE (F_y)

$$\Delta X + W - T \sin \alpha - (N' + UL) \cos \alpha = 0$$

$$\left\{ \begin{array}{l} \bar{F}_y = 0 \\ T = \frac{T_{lim}}{\bar{F}_s} \end{array} \right.$$

ipotesi di Bishop: $\Delta X = 0$

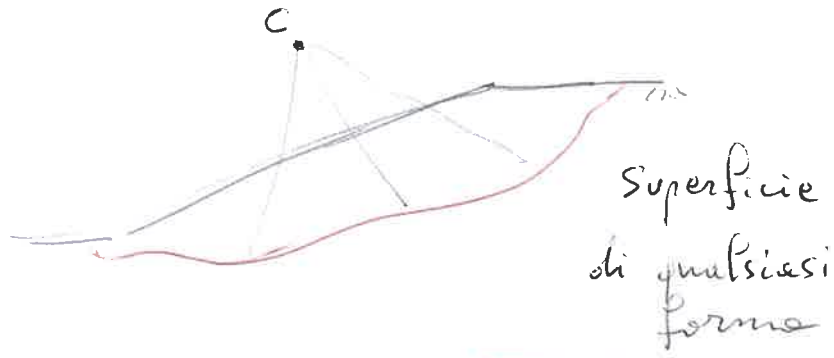
↳ equilibrio verticale interstriscia

$$N' = \frac{W - \frac{c'l}{\bar{F}_s} \sin \alpha - UL \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi}{\bar{F}_s} \sin \alpha}$$

$$\bar{F}_s = \frac{\sum (c'l + (W - UL) \tan \phi)}{\sum (W \sin \alpha)}$$

metodo implicito che si risolve per iterazioni di calcolo, con primo tentativo dato da Fellenius.

DIM: METODO DI JAMBU, equilibrio di forze



Valutazione allo spigolo di ogni striscia per il braccio variabile

ipotesi di Janbu: $\delta = 0, x = 0$
 stessa condizione di Bishop.

EQUILIBRIO VERTICALE (F_y)

$$N' = \frac{W - \frac{c'l}{F_s} \sin \alpha - Ul \cos \alpha}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi'}{F_s} \sin \alpha}$$

EQUILIBRIO ORIZZONTALE (F_x)

$$\Delta E = \frac{c'l}{F_s} \frac{1}{\cos \alpha} - W \tan \alpha + \frac{W - Ul \cos \alpha - \frac{c'l}{F_s} \sin \alpha}{\left(\cos \alpha + \frac{\tan \phi'}{F_s} \sin \alpha\right) \cos \alpha} \cdot \tan \phi$$

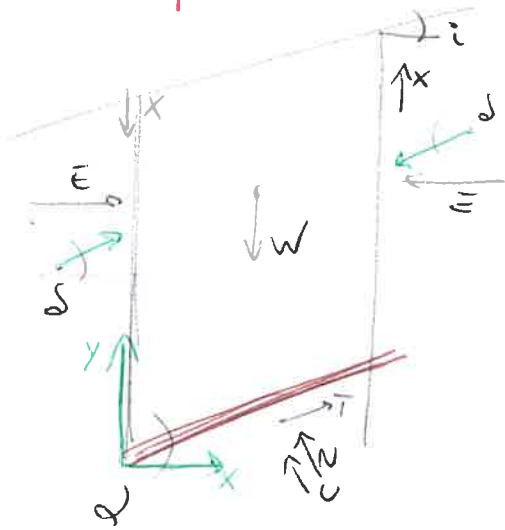
Quindi si ricava il fattore di sicurezza da F_x

$$F_s = \frac{\sum \left(c'l + (W - Ul \cos \alpha) \tan \phi \right)}{\sum \left(W \cdot \tan \alpha \right)}$$

metodo implicito come Bishop, con iterazioni per F_s .



DIM: METODO DI LOWE & KARAFIATH, equilibrio di forze



date le pendenze

α = superficie di scorrimento
 i = piano campagna

ipotesi di Lek:

$$S = \frac{\alpha + i}{2}$$

EQUILIBRIO VERTICALE \bar{T}_y

$$N^i = \frac{W - \frac{c'l}{F_s} \sin \alpha - Ul \cos \alpha - \Delta X}{\cos \alpha + \frac{\tan \phi}{F_s} \sin \alpha}$$

ΔX legato alla
pendenza α

EQUILIBRIO ORIZZONTALE \bar{T}_x

$$\Delta E = \frac{c'l}{F_s} \frac{1}{\cos \alpha} - W \tan \alpha + \frac{W - Ul \cos \alpha - \frac{c'l}{F_s} \sin \alpha}{\left(\cos \alpha + \frac{\tan \phi}{F_s} \sin \alpha\right) \cos \alpha} \tan \phi$$

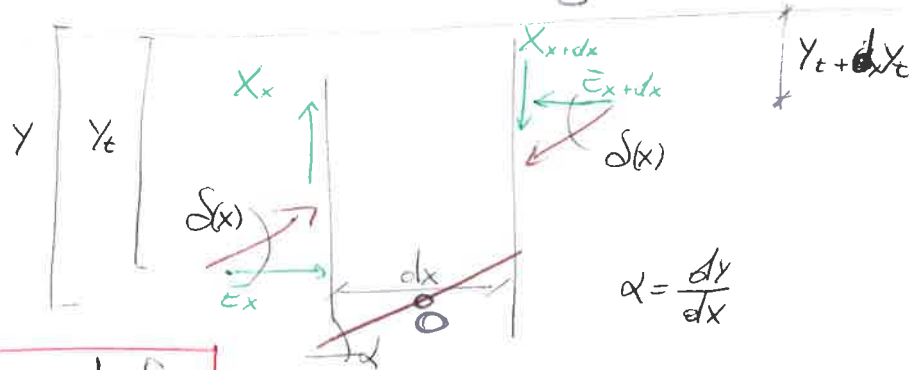
$$F_s = \frac{\sum \left(\left(\frac{c'l}{F_s} + (W - Ul \cos \alpha - \Delta X) \tan \phi' \right) / \left(\cos \alpha + \frac{\tan \phi}{F_s} \sin \alpha \right) \cos \alpha \right)}{\sum (W \tan \alpha)}$$

metodo iterativo legato alla pendenza S fissa
in ogni striscia.

DIM: METODO DI MORGESTEIN & PRICE, rigoroso



superficie qualsiasi
con discretizzazione
spaziale in dx
 S varia lungo x



$$\alpha = \frac{dy}{dx}$$

ipotesi di M&P: $S(x) = 1 \cdot f(x)$

quindi la funzione $X(x) = 1 \cdot f(x) \cdot E(x)$ relazione e forze interstiziali.

EQUILIBRIO ROTAZIONE IN O

$$X \frac{dx}{2} + (X+dx) \frac{dx}{2} + E(Y - Y_t) - (E+dE)(Y - Y_t - dY_t) + dW \cdot g_1 + dN' g_2 + dU g_3$$

$$\Rightarrow X dx + E dY_t - dE (Y - Y_t) = 0$$

$$\leadsto X(x) = 1 \cdot f(x) \cdot E(x)$$

per conoscere $f(x)$ bisogna applicare gli equilibri:
ORTOGONALE ALLA SUPERFICIE

$$dN' = -dU - dE \sin \alpha + dX \cos \alpha + dW \cos \alpha$$

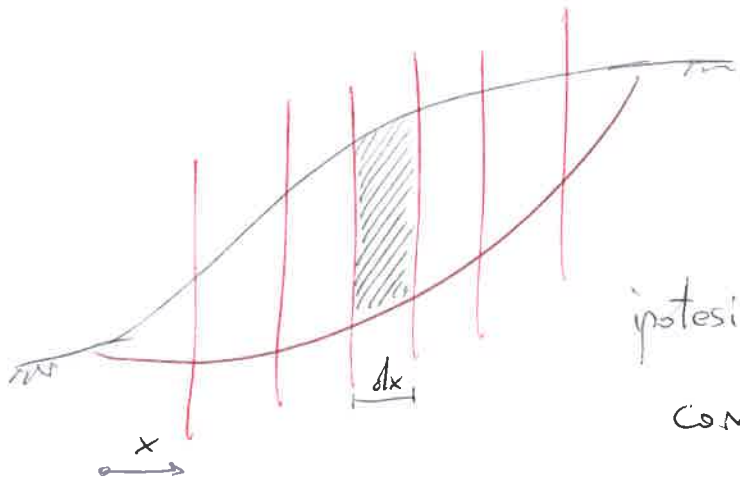
PARALLELO ALLA SUPERFICIE

$$dT = dW \sin \alpha + dX \sin \alpha + dE \cos \alpha = \frac{c' dP + dN' \tan \phi'}{F_s}$$

$$\frac{dE}{dx} \left(1 + \frac{dy}{dx} \frac{\tan \phi'}{F_s} \right) + \frac{dX}{dx} \left(\frac{dy}{dx} - \frac{\tan \phi'}{F_s} \right) = \frac{c'}{F_s} \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) + \frac{dW}{dx} \left(-\frac{dy}{dx} + \frac{\tan \phi'}{F_s} - \gamma \left(1 + \left(\frac{dy}{dx} \right)^2 \right) \frac{\tan \phi'}{F_s} \right)$$

Equazione delle forze

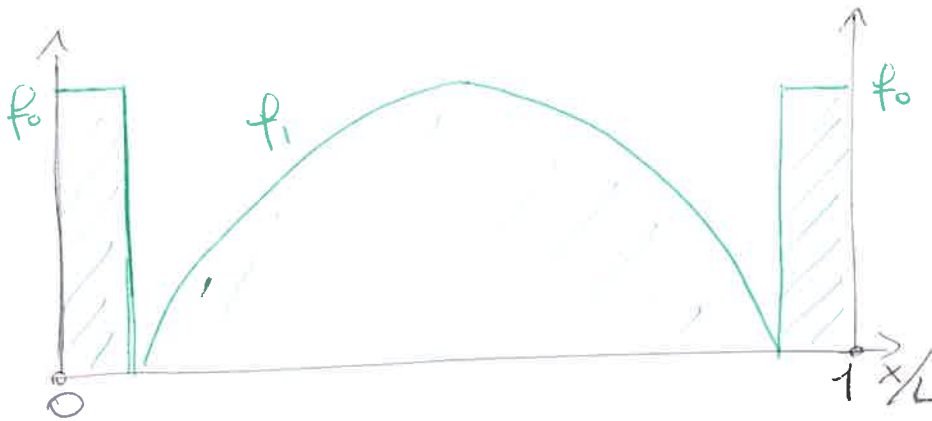
DIM: METODO DI MORGESTEIN & CHAIN, rigoroso



Superficie qualsiasi con discretizzazione spaziale in dx δ varia lungo \hat{x}

ipotesi di M&C: $X(x) = \lambda (f_0 + f_1(x)) \cdot E(x)$
 con $\delta = \lambda (f_0 + f(x))$

La variazione dell'angolo δ è in funzione di x secondo:

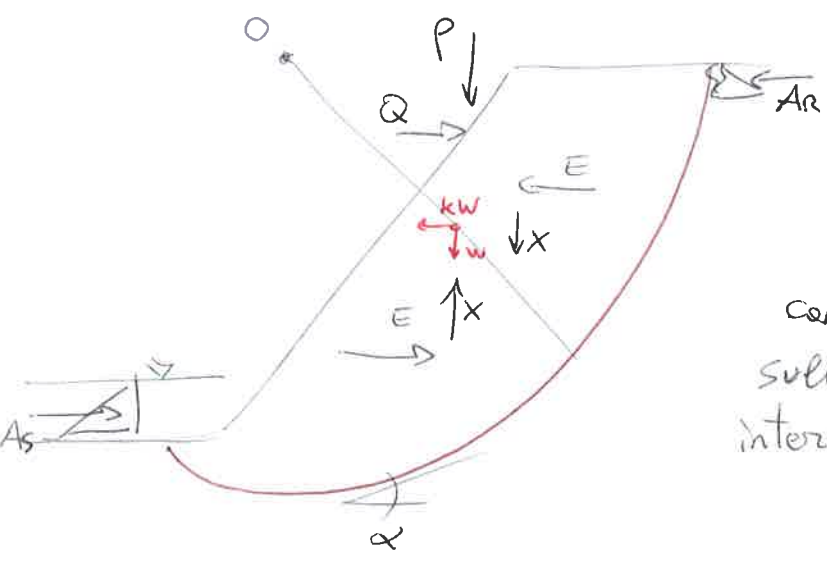


f_0 costanti ai bordi,
 f_1 varia $\sin(x)$
 con massimo in f_0

Si determinano λ degli equilibri con $\lambda = \frac{X_x}{E(x)(f_0 + f_1(x))}$

ottenendo $F(\text{forze}) = F(\text{mom}) = F_s$

DIM: METODO GLOBAL EQUILIBRIUM, rigoroso



Si considere l'insieme di forze agenti sul pendio nel suo complesso

so con le stesse ipotesi di M&P sull'angolo delle forze di interstriscia

$$X(x) = \lambda f(x) E(x)$$

EQUILIBRIO TRASLAZIONE VERTICALE

$$W + P + \Delta X = (N' + UL) \cos \alpha + \frac{c'l + N' \tan \phi'}{F_s} \sin \alpha \rightarrow N'$$

EQUILIBRIO TRASLAZIONE ORIZZONTALE

$$\Delta E + kW - Q = \frac{c'l + N' \tan \phi'}{F_s} \cos \alpha - (N' + UL) \sin \alpha \rightarrow \Delta E$$

EQUILIBRIO TRASLAZIONE GLOBALE

$$\sum \Delta E + A_R - A_R = 0 \rightarrow F_s \text{ (forze)}$$

EQUILIBRIO ~~TRASLAZIONE~~ ROTAZIONE GLOBALE

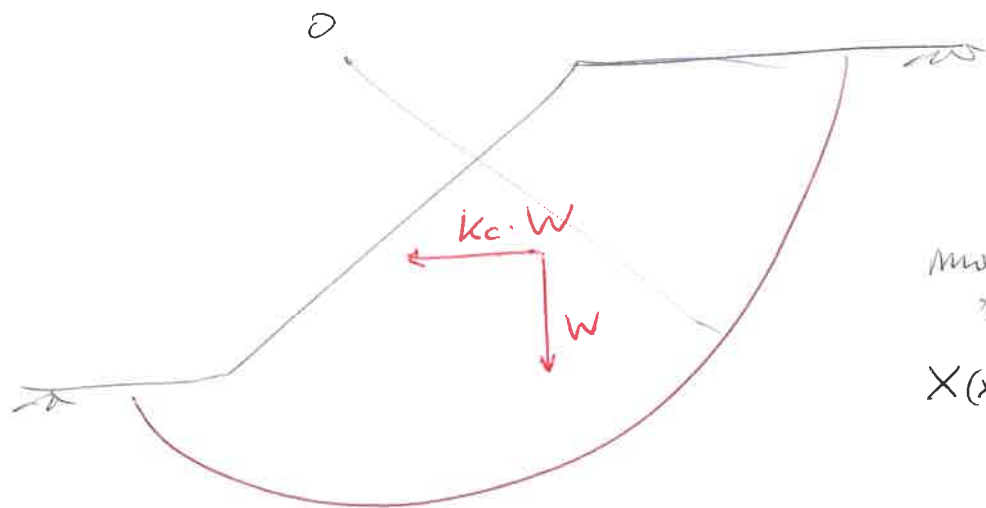
$$\sum w_h + \sum w_k g + \sum P_h - \sum Q R + \sum (N' + UL) s - \frac{\sum (c'l + N' \tan \phi')}{F_s} L_i + \Delta A \cdot e = 0 \rightarrow F_s \text{ (mom)}$$

$$F_s = F_s \text{ (forze)} = F_s \text{ (mom)}$$

con cui si trova lo stesso λ , quindi lo stesso S .

DIM: METODO DI SARMA, rigoroso

Dal Global Equilibrium Method ipotizza $k = k_c$
coefficiente sismico allo stato critico.



mantenendo la
relazione

$$X(x) = \lambda f(x) E(x)$$

EQUILIBRIO TRASLAZIONE VERTICALE $\rightarrow N'$
EQUILIBRIO TRASLAZIONE ORIZZONTALE $\rightarrow \Delta E$

~~EQUILIBRIO TRASLAZIONE GLOBALE~~

L'ipotesi k_c permette di conoscere ~~F_s~~ $F_s = f(k_c)$
con l'analisi sismica.

Allo stesso modo si identifica il legame $\lambda = f(k_c)$ dato
da un baricentro (x_0, y_0)

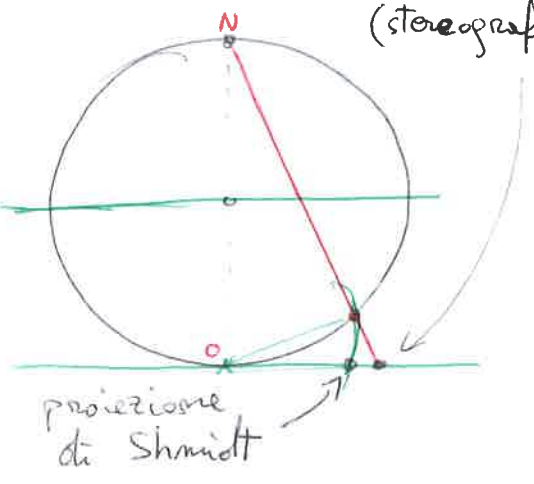
$$\sum (N \cos \alpha + T \sin \alpha) (x_i - x_0) + \sum (N \sin \alpha - T \cos \alpha) (y_i - y_0) = 0$$

Quindi si trovano i valori di ~~k~~ ~~per cui~~

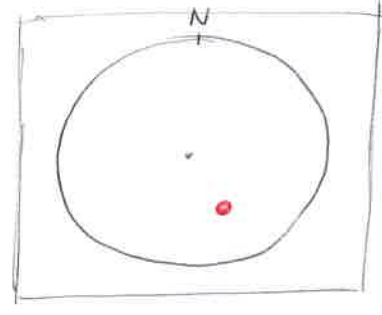
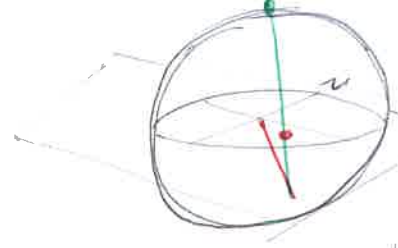
k e λ per cui F_s è lo stesso.

DIM: RETICOLI | STEREO GRAFICI

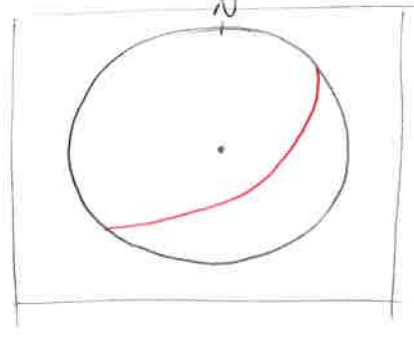
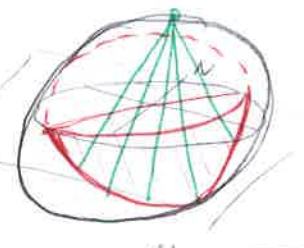
Proiezioni zenitali
(stereografica)



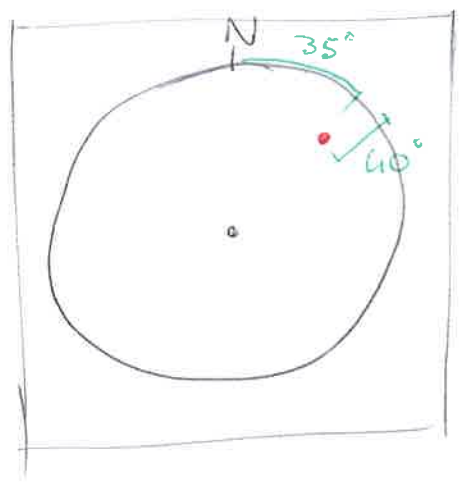
linea
zenit



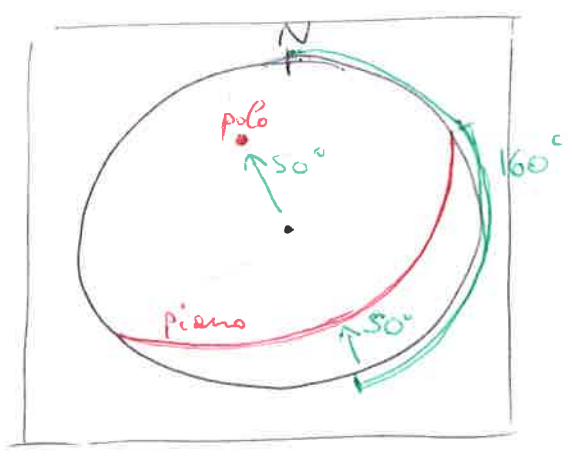
piano
zenit



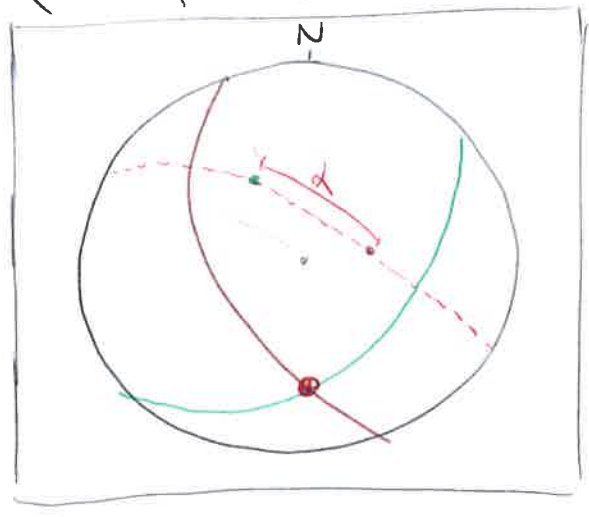
Linea N35/40



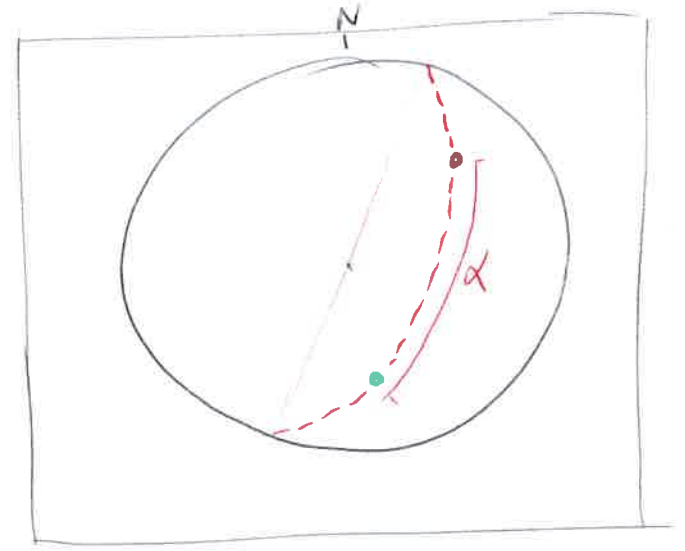
traccia ciclografica N160/50



Intersezione piani
(α tra piani)



Angolo linee α
(stesso piano)

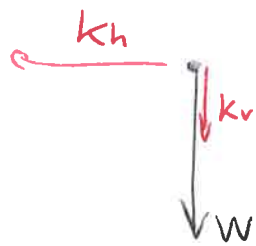


DIM: METODO PSEUDO-STATICO, sismico

Nota: geometrie e caratteristiche pendio

Approssima: segnale del sisma

Basato su (k_h) e (F_s) ← Usati nei metodi di sicurezza



$$k_h = 2 k_v$$

$$k_h = \beta \frac{Q_{max}}{g}$$

$$F_s = \frac{\text{sfuerzo limite}}{\text{sfuerzo applicato}}$$

• β coeff di riduzione, perché l'accelerazione sismica nella realtà non è sempre al massimo (0,1 ÷ 0,5).

$$Q_{max} = S_s \cdot S_T \cdot Q_g$$

mentre Q_g è in funzione del sito (normativa)

S_s = coeff. stratigrafico calcolato con (T_0, α_g, g)

S_T = coeff. topografico [1 ÷ 1,4]

Valutati per classi di terreno e pendenza.

DIM: METODO SPOSTAMENTI, sistema

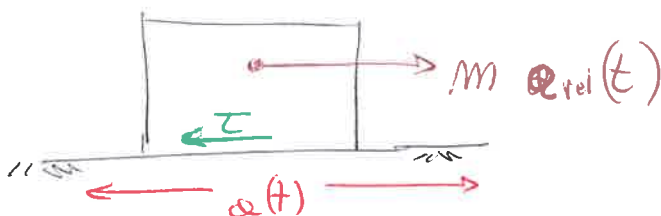
Nota: segnale del sistema

Approssimazione: geometrie e caratteristiche del pendio

Basato su $a(t)$ e $S_{relativo}$ ← confronto con lo spostamento ammissibile

$$S_{rel} = S_0 \cdot A$$

S_0 è lo spostamento calcolato in geometria piana



$$S_{rel} < S_{amm}$$

Per incipienza di moto ($F_s=1$), $k_h \rightarrow k_c$

$$\begin{aligned} \text{Forze } m \cdot a_{rel}(t) &= W \cdot k_h(t) - W k_c \\ &= W \cdot (k_h(t) - k_c) = mg (k_h(t) - k_c) \end{aligned}$$

$$\text{quindi } a_{rel}(t) = g (k_h(t) - k_c)$$

$$v_{rel} = \int_T a_{rel}(t) dt ; \quad S_{rel} = \int_T v_{rel}(t) dt = \iint_T a_{rel}(t) dt$$

$$v_{rel} = g (k_h(t) - k_c) \Delta t ; \quad S_{rel} = \frac{1}{2} g (k_h(t) - k_c) \Delta t^2$$

Lo Accelerogramma definisce gli spostamenti accumulati

A: coeff di geometria con gli angoli di pendenza del pendio e di resistenza a taglio

$$a_{rel}(t) = g (k_h(t) - k_c) (\cos \beta + \sin \beta \tan \phi')$$