



Appunti universitari

Tesi di laurea

Cartoleria e cancelleria

Stampa file e fotocopie

Print on demand

Rilegature

NUMERO: 2143A-

ANNO: 2017

A P P U N T I

STUDENTE: Aimar Mauro

MATERIA: Stabilità dei pendii - Prof. Pirulli

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

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

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

STABILITÀ DEI PENDII

1 Pendio instabile

Un pendio si definisce instabile quando è potenzialmente o sostanzialmente soggetto a una forma di MOVIMENTO DI TERRENI o ROCCE, dovuto alla gravità o al regime delle acque superficiali e sotterranee.

2 TIPI DI PENDIO

Esistono due tipi di pendio.

→ pendio artificiale

È un pendio realizzato dall'uomo, che ne stabilisce il materiale costituente, l'altezza e l'inclinazione dei fianchi.
Alcuni esempi sono

- rilevato stradale, che subisce sollecitazioni da parte dei veicoli
- argine, che subisce una sollecitazione dinamica per effetto del flusso d'acqua
- diga in terra, che è soggetta all'effetto della filtrazione dell'acqua.

In questa situazione, il problema è più semplice perché

- il materiale è scelto e le caratteristiche di resistenza sono note
- la geometria è semplice e può essere analizzata come una superficie piana, poiché in genere la dimensione longitudinale è preponderante rispetto alle altre.
- le condizioni di sollecitazione cui l'opera è soggetta sono in genere delle condizioni che possono variare molto velocemente nel tempo, ad es. per effetto del passaggio di un treno o di un'ondata di piena.
In altri termini, avviene una variazione molto rapida dello stato di sollecitazione dell'opera.

→ pendio naturale

Questo può includere situazioni a pendenza ridotta o pareti pseudoverticali.

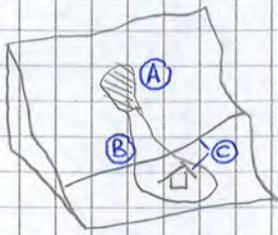
La differenza è nella morfologia superficiale e profonda, che ora è complessa perché esiste una grande variabilità spaziale delle proprietà fisico-meccaniche dei terreni e, in genere, una meno rapida variazione delle condizioni di carico.

● problematiche che possono interessare i pendii artificiali.

⇒ ci si focalizza sui PENDII NATURALI

3 Fenomeni franosi

Dato un pendio, occorre capire quali tipi di fenomeno franoso possano svilupparsi in relazione al pendio, materiale, etc. in modo da orientare le indagini e stabilire gli i tipi di intervento.



In genere, i Fenomeni franosi presentano più elementi.

(A) Zona di distacco

(B) Zona di propagazione e deposito (o zona di run-out)

(C) Elementi a rischio (edifici o infrastrutture), che non devono subire danni

La distinzione tra zona di distacco e di run-out è importante perché, nella modellazione numerica, non esistono programmi in grado di studiare il fenomeno dall'inizio alla fine.

I codici possono analizzare solo i meccanismi di innesco e vedere la possibilità di innesco oppure analizzano la propagazione e il deposito, dando come associata la possibilità di innesco.

4 OBIETTIVI DELL'ANALISI DI STABILITÀ DEI PENDII

→ comprensione delle caratteristiche del versante di un pendio naturale

→ analisi delle condizioni di stabilità del versante a breve termine (durante le fasi di costruzione dell'opera) e a lungo termine.

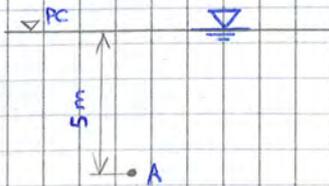
→ valutazione della possibilità che un'instabilità si sviluppi sul versante

→ comprensione dei meccanismi di collasso e dell'influenza dei fattori ambientali.

→ previsione di interventi di stabilizzazione, prevenzione e protezione del versante

→ eventuale analisi dell'effetto dell'attività sismica sul pendio.

Il principio degli sforzi efficaci fa capire il ruolo dell'acqua.

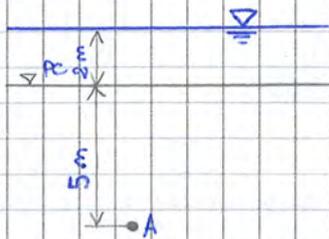


Si valuti ad es. la tensione verticale nel punto A, posto all'interno di un deposito di argilla ($\gamma = 20 \text{ kNm}^{-3}$) con falda posta al piano campagna.

$$E_{v0} = 20 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 5 \text{ [m]} = 100 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 10 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 5 \text{ [m]} = 50 \text{ kPa}$$

$$E'_{v0} = E_{v0} - u_0 = 100 \text{ [kPa]} - 50 \text{ [kPa]} = 50 \text{ kPa}$$



Si ripete l'operazione immaginando che il livello di Falda cresca.

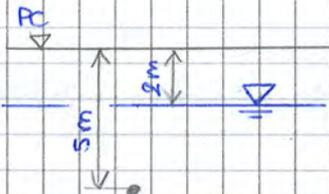
$$E_{v0} = 10 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 2 \text{ [m]} + 20 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 5 \text{ [m]} =$$

$$= 120 \text{ kPa}$$

$$= 10 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 7 \text{ [m]} = 70 \text{ kPa}$$

$$E'_{v0} = E_{v0} - u_0 = 120 \text{ [kPa]} - 70 \text{ [kPa]} = 50 \text{ kPa}$$

Ai diversi livelli di Falda, la tensione efficace in A e il comportamento è lo stesso.



Si ripete l'operazione immaginando che il livello di falda diminuisca e vada al di sotto del piano campagna.

$$E_{v0} = 20 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 5 \text{ [m]} = 100 \text{ kPa}$$

$$u_0 = 10 \text{ [kNm}^{-3}\text{]} \cdot 3 \text{ [m]} = 30 \text{ kPa}$$

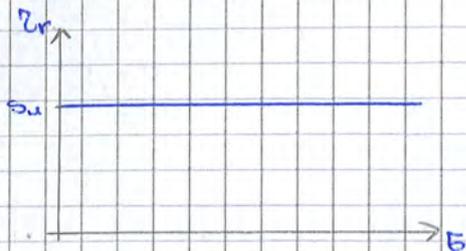
$$E'_{v0} = E_{v0} - u_0 = 100 \text{ [kPa]} - 30 \text{ [kPa]} = 70 \text{ kPa}$$

In questo caso, la riduzione del livello di Falda determina un incremento di tensione efficace e dunque un miglioramento delle caratteristiche di resistenza.

Alla luce di questo, le variazioni del livello di falda sono importanti finché questa rimane all'interno del deposito di terreno. Se il terreno è completamente saturo (falda almeno al piano campagna), qualunque variazione del livello di falda non ha effetti sulle caratteristiche di resistenza del terreno.

L'analisi di stabilità richiede l'introduzione di un criterio di resistenza, al fine di definire il termine di resistenza.
Esistono due diversi criteri di resistenza.

→ **criterio di Tresca**

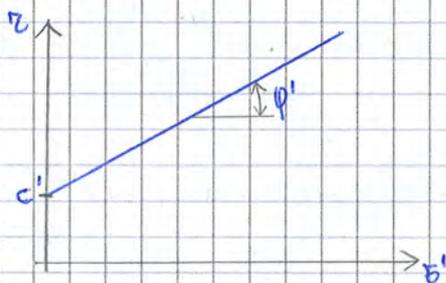


La resistenza a taglio τ_r disponibile su un piano di scorrimento è pari alla RESISTENZA A TAGLIO NON DRENATA s_u .

$$\tau_r = s_u$$

Questo criterio è usato in condizioni non drenate, in cui non si possono determinare le tensioni efficaci e bisogna ragionare in termini di tensioni totali.

→ **criterio di Mohr-Coulomb**



Il criterio è impiegato in condizioni drenate, dove le tensioni efficaci sono note.

$$\tau_r = c' + (\sigma - u) \tan \phi'$$

Nella selezione del criterio di rottura, occorre tenere conto che i materiali sono divisi in classi e sottoclassi e da questo dipende il criterio, poiché il comportamento è diverso.

→ **TERRENI SABBIOSI (materiali a grana grossa)**

→ sabbie dense $DR > 65\%$

→ sabbie sciolte $DR < 35\%$

→ **TERRENI ARGILLOSI (materiali a grana fine)**

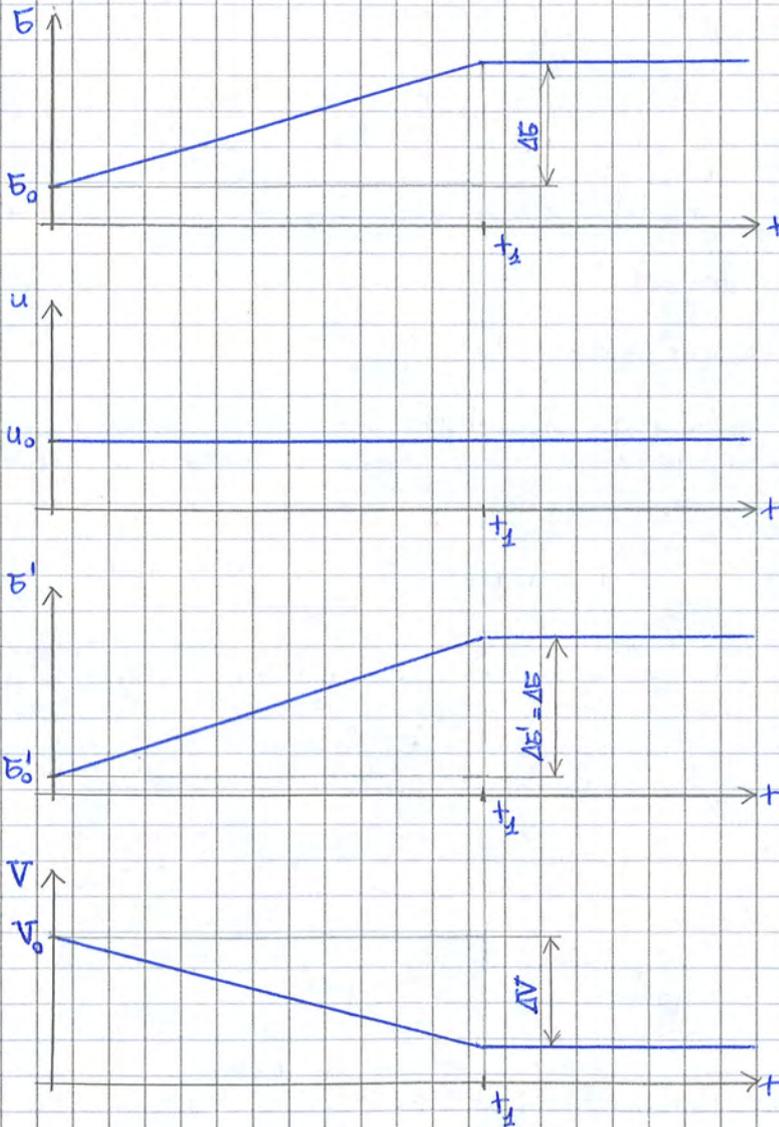
→ argille NC $OCR = 1$

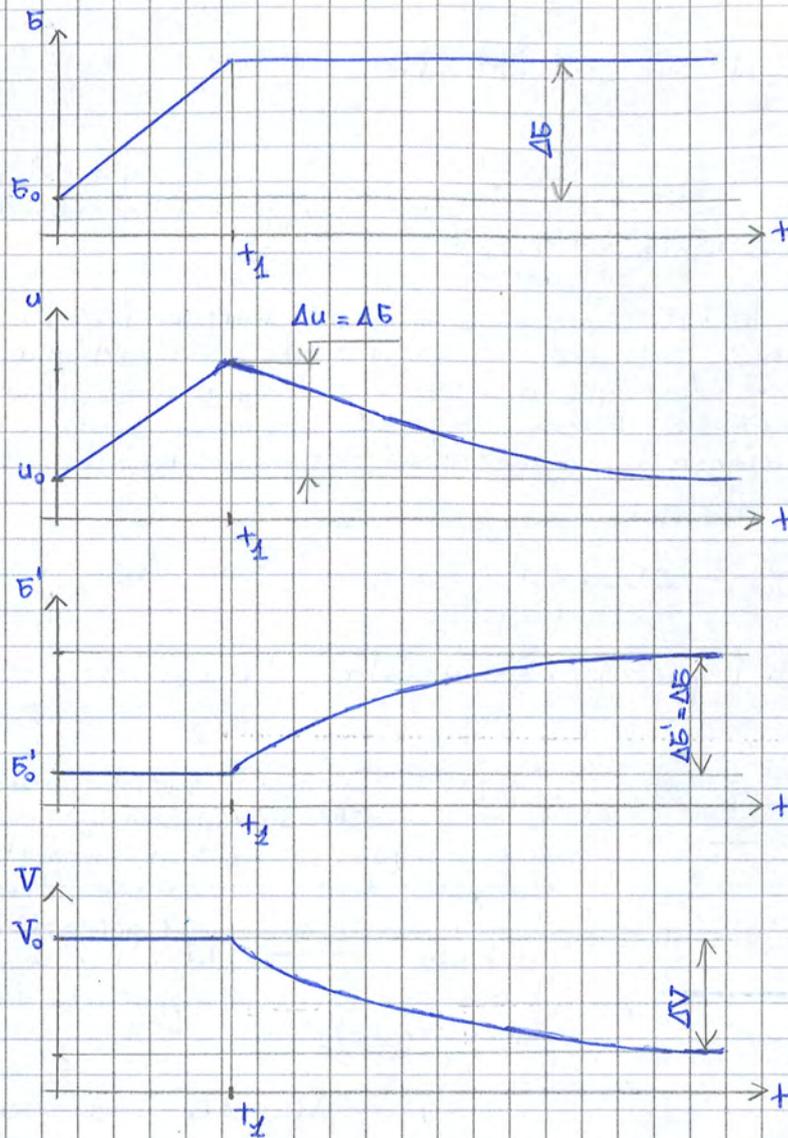
→ argille oc $OCR > 1$

di tensione totale per effetto del carico si trasforma immediatamente in una variazione di tensione efficace.

$$\Delta \sigma = \Delta \sigma' \quad \Delta u = 0$$

Per effetto della corrispondenza tra la variazione di tensioni totali e la variazione di tensioni efficaci, il mezzo subisce un cedimento immediato e progressivo nel tempo.

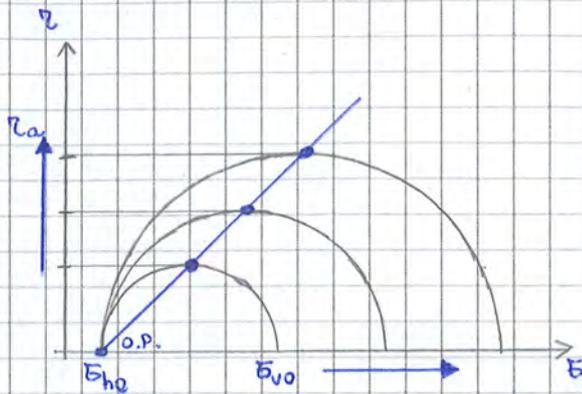




Le condizioni drenate sono tipiche delle sabbie, mentre le condizioni non drenate sono tipiche delle argille.
 Ci si focalizzerà sui meccanismi differiti nel tempo, che preoccupano di più.

Non c'è variazione nella componente orizzontale perché il punto è posizionato lungo l'asse e si assume che il dominio sia infinitamente esteso nelle altre direzioni.

$$\Delta \sigma_v = \Delta \sigma \quad \Delta \sigma_h = 0$$



Se si valuta cosa succede al punto in termini di cerchi di Mohr, si parte dal cerchio iniziale $\sigma_{h0} - \sigma_{v0}$. Per effetto della progressiva applicazione del carico, la tensione orizzontale si mantiene costante e pari a σ_{h0} , mentre la tensione verticale aumenta. Ciò si traduce in una crescita del cerchio di Mohr.

In questo caso, l'origine dei piani coincide con σ_{h0} e la tensione agente nel punto è data dall'intersezione del cerchio con la retta parallela al piano tangente alla superficie di rottura nel punto e passante per l'origine dei piani. In particolare, l'ordinata restituisce la tensione tangenziale agente nel punto.

Si nota che la tensione tangenziale agente τ_a cresce perché il cerchio si sta ingrandendo e poi si attesta a un valore costante, visto che il carico è tutto applicato e il cerchio non cresce più.

La tensione tangenziale resistente τ_r è valutata secondo il criterio di Mohr-Coulomb.

$$\tau_r = \sigma' \tan \varphi' = (\sigma - u) \tan \varphi'$$

L'andamento della tensione totale σ sul punto è noto.

Per quanto riguarda la pressione interstiziale u , siccome il materiale è a grana fine e si opera in condizioni non drenate, questa aumenta in una prima fase e poi la sovrappressione si annulla in una seconda fase.

Pertanto, la tensione efficace σ' rimane costante nella prima fase e poi aumenta.

Sapendo che il fattore di sicurezza si esprime come

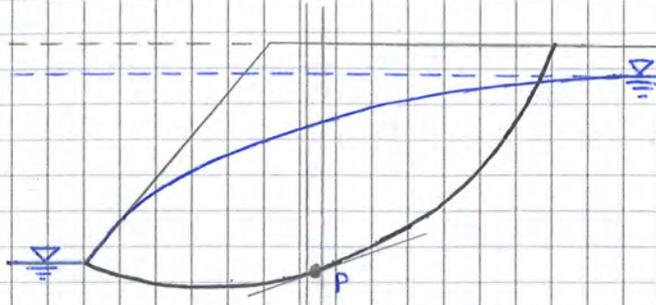
$$FS = \frac{\tau_r}{\tau_a} = \frac{(\sigma - u) \tan \varphi'}{\tau_a}$$

come evolve nel tempo?

Nella prima fase, la tensione efficace si mantiene costante, mentre la tensione tangenziale agente aumenta. Dunque il fattore di sicurezza diminuisce.

IIb) Scavo in terreno a grana fine

La situazione originaria prevede piano campagna orizzontale e il livello di falda posto a una certa profondità.



Si realizza dunque uno scavo e ciò innesca un meccanismo di filtrazione, con incurvamento della falda.

In questa situazione, bisogna analizzare la rete idrodinamica di flusso.

Un possibile meccanismo di rottura prevede lo sviluppo di una superficie di rottura circolare e, lungo essa, si considera un punto P.

Lo scavo induce una riduzione di tensione totale nel tempo, che poi si attesta a un valore costante.

Viceversa, nonostante lo scarico tensionale, la tensione tangenziale agente cresce e poi si mantiene costante.



L'incremento della tensione tangenziale agente sulla superficie si può spiegare facendo riferimento a uno schema semplificato di scavo, in cui si analizza un punto posto su uno dei fianchi. In quel punto, la tensione geostatica è

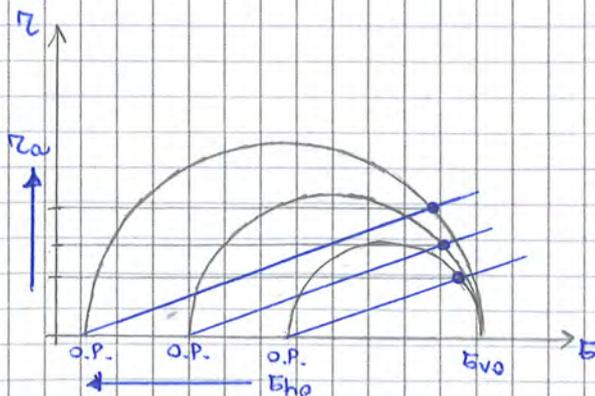
$$\sigma_{v0} \quad \sigma_{h0}$$

Lo scavo equivale a uno scarico tensionale e, siccome c'è minore contenimento sui lati verticali, avviene una riduzione di tensione orizzontale. D'altra parte, la tensione verticale non cambia perché dipende dalla profondità e questa è sempre la stessa.

$$\Delta \sigma_v = 0$$

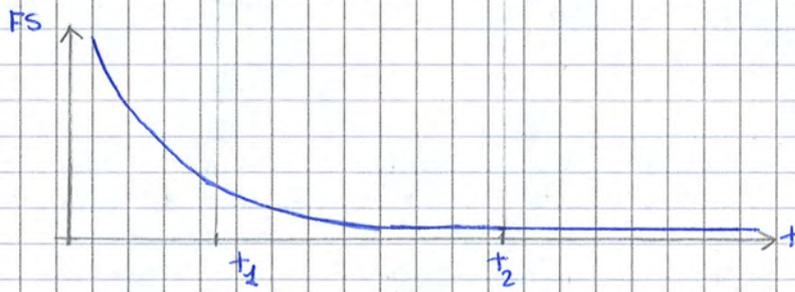
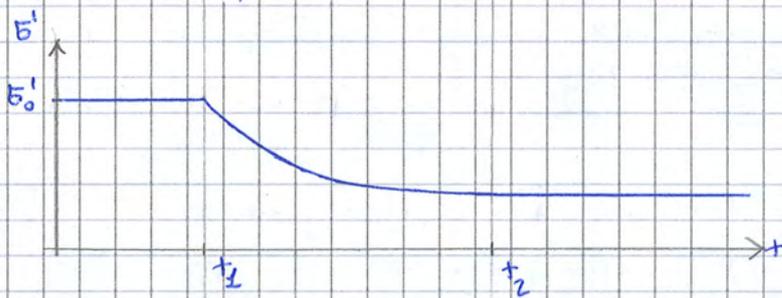
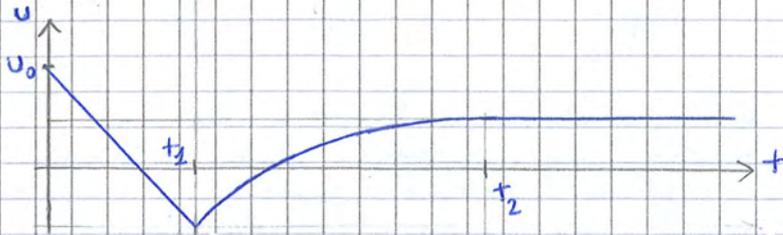
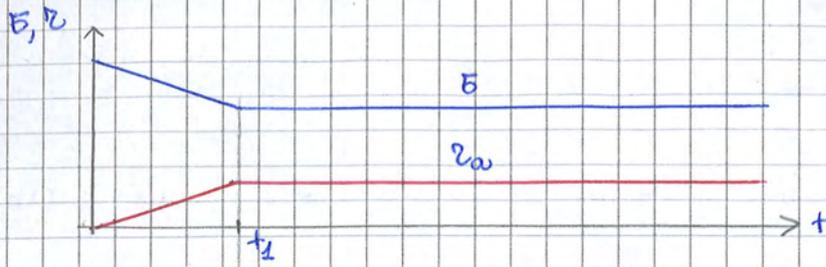
$$\Delta \sigma_h = \Delta \sigma$$

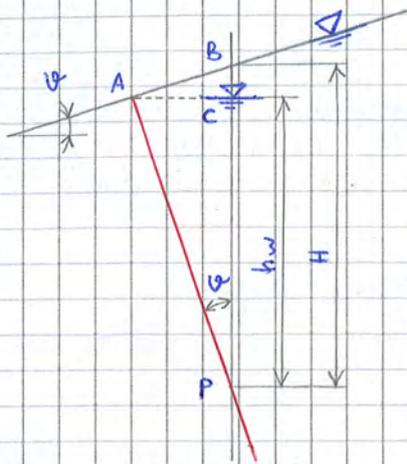
$\Delta \sigma$ = variazione di tensione per effetto dello scavo.



Se si ragiona con i cerchi di Mohr, si parte dal cerchio iniziale $\sigma_{h0} - \sigma_{v0}$.

Per effetto dello scavo, la tensione verticale si mantiene costante e pari a σ_{v0} , mentre la tensione orizzontale diminuisce. Ciò si traduce in una crescita del cerchio di Mohr.





Per trovare la relazione con la profondità H rispetto alla superficie di Falda, detto ψ l'angolo di inclinazione del pendio e delle linee di flusso, si nota che

$$\begin{cases} \overline{AP} = \overline{BP} \cos \psi & \Rightarrow \overline{AP} = H \cos \psi \\ \overline{CP} = \overline{AP} \cos \psi & \Rightarrow h_w = (H \cos \psi) \cdot \cos \psi \end{cases}$$

$$\Rightarrow h_w = H \cos^2 \psi$$

In questo modo, si può esprimere la pressione in funzione dell'approfondimento H rispetto al livello di Falda.

$$u = \gamma_w h_w = \gamma_w H \cos^2 \psi$$

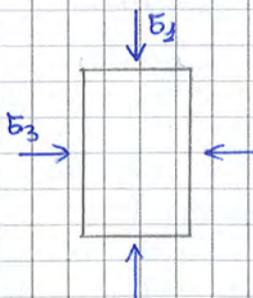
$$u = \gamma_w H \cos^2 \psi$$

4. Stima delle sovrappressioni interstiziali

È possibile eseguire una stima dell'entità e dell'evoluzione temporale delle sovrappressioni interstiziali in laboratorio, visto che si opera in condizioni controllate.

D'altra parte, in sito non si dispongono di strumenti per conoscere l'andamento reale nel tempo delle sovrappressioni interstiziali.

Dall'interpretazione dei risultati di prove triassiali condotte in condizioni non drenate, Skempton ha individuato una relazione tra le sovrappressioni interstiziali Δu e gli incrementi tensionali $\Delta \sigma_1$ e $\Delta \sigma_3$ imposti.



$$\Delta u = B \left[\Delta \sigma_3 + A (\Delta \sigma_1 - \Delta \sigma_3) \right] \quad \text{Formula di Skempton}$$

B = parametro legato al grado di saturazione

$B = 0$ materiale secco

$B = 1$ materiale saturo

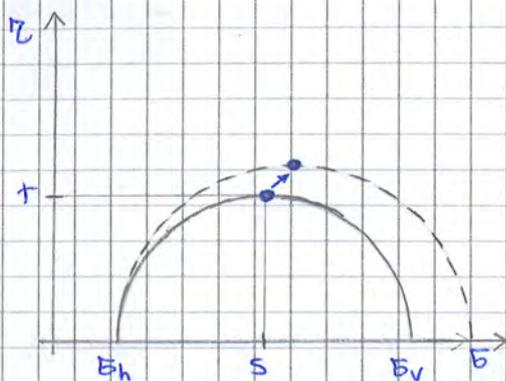
A = parametro legato al grado di sovraconsolidazione, variabile tra $-0,5$ e $1,0$.

5 Verifiche di resistenza nei terreni

A questo punto, è possibile vedere come si impasta l'analisi di resistenza.

(I_b) Costruzione di rilevato su terreno a grana grossa

Si studia il comportamento nel piano τ - σ



s = tensione normale media (centro del cerchio di Mohr)

$$s = \frac{\sigma_h + \sigma_v}{2}$$

t = tensione tangenziale massima (raggio del cerchio di Mohr)

$$t = \frac{\sigma_v - \sigma_h}{2}$$

In questo modo, a un cerchio nel piano σ - σ corrisponde un punto nel piano τ - σ (il punto di massimo del cerchio).

Il vantaggio è che, nel piano τ - σ , si può rappresentare lo STRESS PATH, ossia la variazione dello stato tensionale nel punto in esame.

Prima dell'applicazione del carico, in un punto al di sotto del piano campagna si trova in condizioni geostatiche, con tensioni

$$\sigma_h \quad \sigma_v$$

Le tensioni efficaci sono date dalle tensioni efficaci meno le pressioni interstiziali e, in condizioni geostatiche, si tratta del punto A al punto A' di una quantità u_0 .

Se si applica un carico che incrementa progressivamente la tensione verticale, con tensione orizzontale costante, il cerchio di Mohr cresce e il punto di massimo si sposta.

Unendo le diverse posizioni del punto di massimo, si ottiene una linea che rappresenta la successione dei cerchi di Mohr.

In condizioni drenate, la variazione di tensione totale si traduce subito in una variazione di tensione efficace, poiché non nascono sovrappressioni interstiziali e la differenza è sempre u_0 .

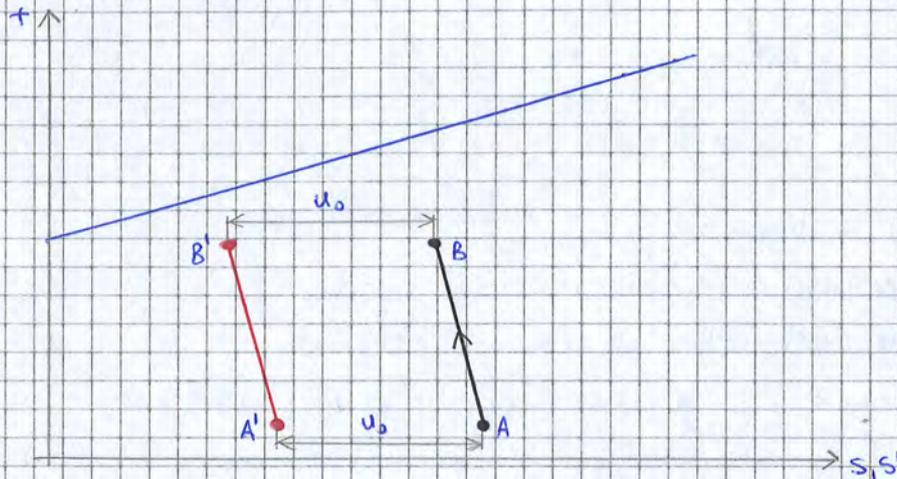
IIa) Scavo in terreno a grana grossa

La situazione in caso di scavo è simile.

Nello scavo, avviene una riduzione di tensione orizzontale, che si traduce in una riduzione di tensione totale.

Si come non si manifestano sovrappressioni interstiziali, avviene la stessa variazione di tensioni efficaci.

Il controllo è effettuato in termini di tensioni efficaci, che sono note in condizioni drenate.



IIb) Costruzione di rilevato su terreno a grana fine

In un materiale a grana fine, quando si applica un carico, si sviluppano delle sovrappressioni interstiziali.

L'involuppo di rottura è lo stesso e, applicando il carico, il TSP parte dalla condizione geostatica e si muove verso destra.

In condizioni drenate, l'ESP sarebbe parallelo al TSP; in questo caso, si sviluppano delle sovrappressioni interstiziali e l'ESP si sposta diversamente.

Per capire come si evolve, si fa riferimento alla formula di Skempton.

→ terreni normal consolidati o poco sovraconsolidati

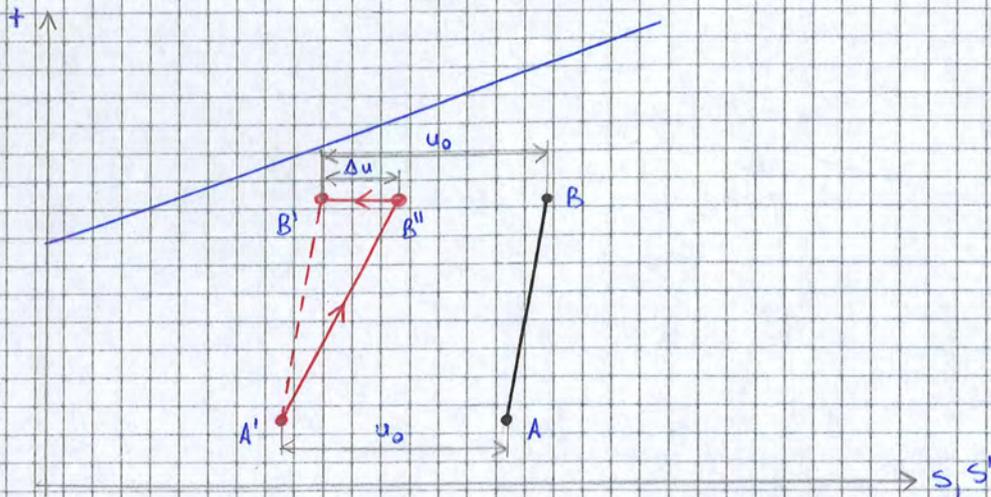
In questo caso, si sviluppa una sovrappressione positiva.

$$\Delta u > 0$$

Quando si applica il carico, se la tensione totale subisce una certa variazione, tale variazione si trasforma in sovrappressione interstiziale Δu .

In tal modo, l'ESP e il TSP non si differenziano di u_0 ma di $u_0 + \Delta u$ e l'ESP giunge al punto B'' (e non B').

In seguito, lasciando applicato il carico, la sovrappressione Δu si annulla nel tempo e si giunge al punto B'.



IIb) Scavo in terreno a grana fine

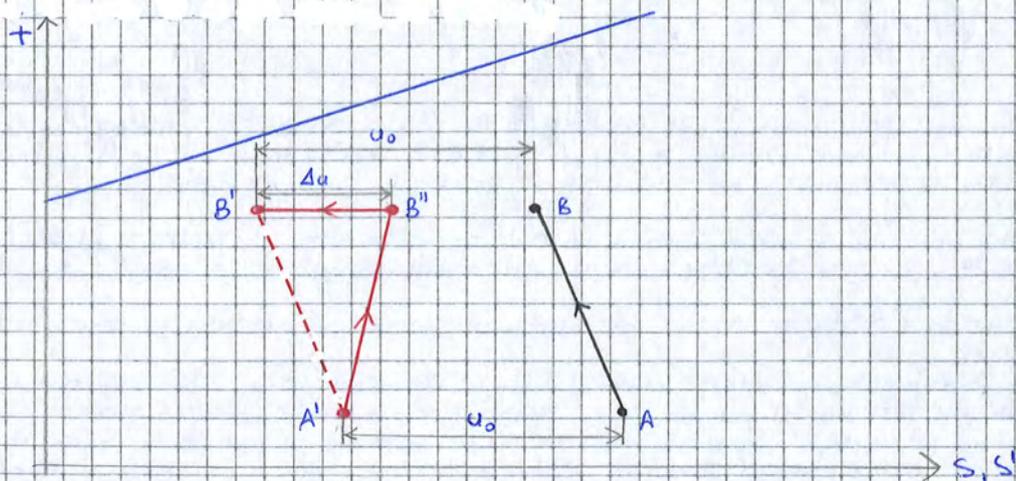
Lo scavo è assimilabile a uno scarico tensionale.

Alivello di tensioni totali, si parte da una situazione iniziale e lo scarico determina un andamento del TSP verso sinistra.

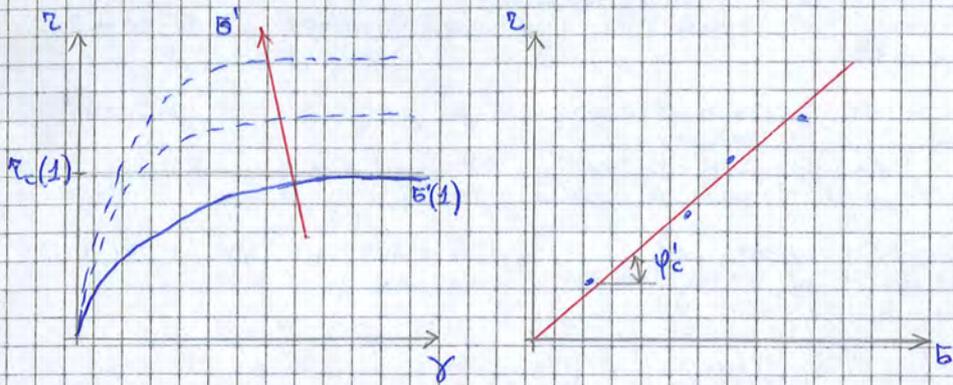
In condizioni drenate, la variazione delle tensioni totali si tradurrebbe in una variazione delle tensioni efficaci e si giungerebbe al punto B'.
In un terreno a grana fine soggetto a scarico, si sviluppa una sovrappressione negativa, indipendentemente dalle caratteristiche del terreno.

Pertanto, la pressione interstiziale si riduce di una quantità Δu rispetto al valore u_0 e l'ESP si porta al punto B'', più a destra.

Nel tempo, la sovrappressione interstiziale si riduce, e l'ESP si muove al punto B'.



Il criterio di rottura è caratterizzato da un'angolo critico di resistenza al taglio φ'_c e da coesione nulla (si è in sabbie)



→ **Sabbia densa** (DR > 65%)

In questo caso, quando si applica il carico, si nota che è dapprima necessario raggiungere un valore molto elevato di resistenza e poi occorre ridurre il carico.

Questo risultato è apprezzabile in una prova di taglio a controllo di deformazione, in cui la velocità di deformazione è costante. Infatti, in questo caso, non si vogliono accelerazioni e, quando si trova resistenza maggiore, si incrementa la tensione; quando si trova resistenza minore, si riduce la tensione.

Il risultato è una tensione tangenziale di picco τ_p e una tensione tangenziale critica τ_c .

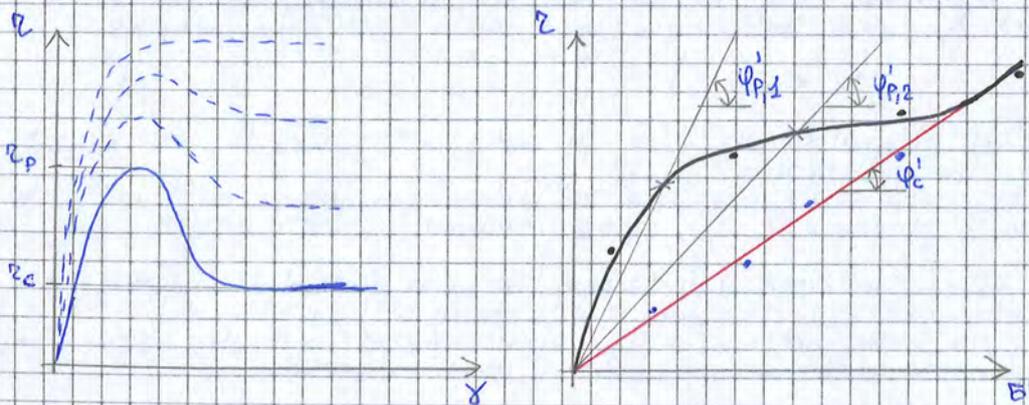
Le curve sono definite per diversi livelli di sforzo normale σ' e, all'aumentare della tensione normale, la differenza tra il picco e il critico si attenua progressivamente.

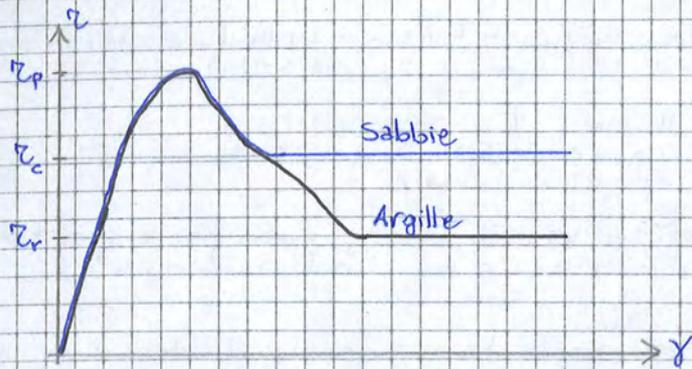
Infatti, il comportamento a taglio si caratterizza di due meccanismi

→ scavalcamento delle asperità

→ troncamento delle asperità

All'aumentare della tensione normale, lo scavalcamento è sempre più impedito e ciò si traduce in una riduzione della differenza tra picco e condizione critica, fino alla situazione in cui la curva tende direttamente alla condizione critica, come nelle sabbie sciolte.





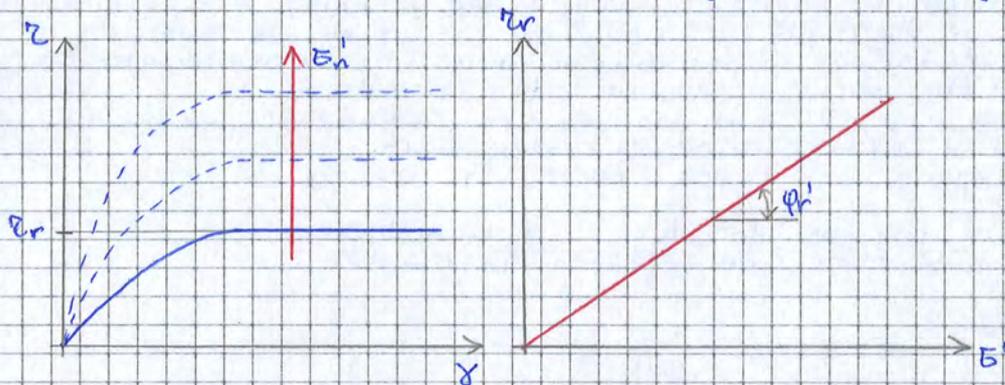
Di conseguenza, il valore minimo di resistenza al taglio non è il valore allo stato critico, bensì il valore residuo.

Tale comportamento si lega al riorientamento delle particelle che costituiscono l'argilla.

In base a questo, per le argille si definiscono più criteri di resistenza.

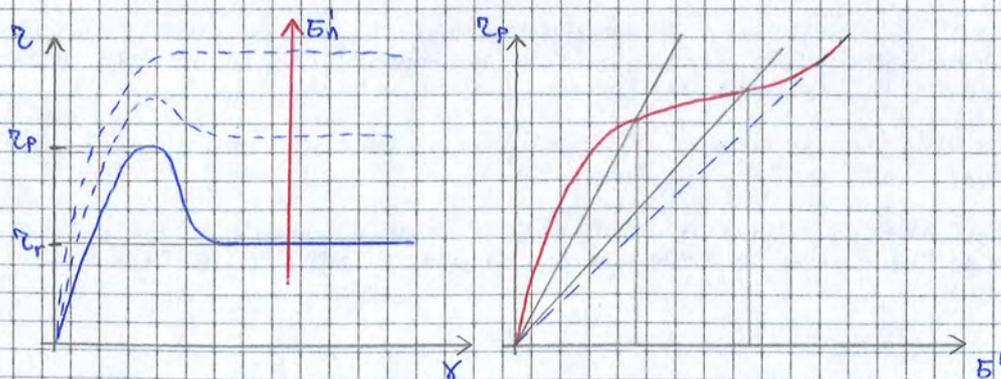
→ **resistenza residua**

Le coppie tensione normale σ'_n - tensione tangenziale residua τ_{res} definiscono un'interpolante, la cui inclinazione è indicata con ϕ'_r .
Si nota che il valore è lo stesso sia in argille NC sia in argille OC.



→ **resistenza di picco**

Nelle argille OC, anche se queste tendono allo stesso valore residuo delle argille NC, è prima presente un valore di picco.



→ PROVA TRIASSIALE CU

In questo caso, dopo consolidazione (C), il campione è portato a rottura in condizioni non drenate (U).

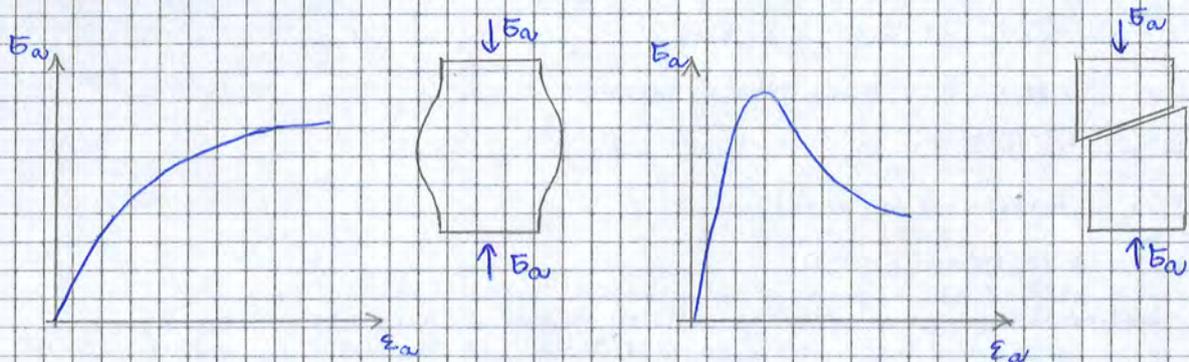
Di fatto, si impedisce il deflusso e si sviluppa una sovrappressione interstiziale.

Il vantaggio è che la prova è condotta molto più rapidamente.

Nelle prove, il campione può assumere un comportamento incrudente, che porta al valore residuo, oppure un comportamento rammollente, che porta a un picco e residuo.

I due comportamenti portano a due diversi schemi di rottura in laboratorio.

Nel comportamento incrudente, il campione si deforma a botte e non si individua un'unica superficie di rottura, bensì si genera un reticolo di rottura, cioè c'è fratturazione diffusa all'interno del campione. Nel comportamento rammollente, il picco e residuo si evidenziano in laboratorio attraverso lo sviluppo di una superficie di scivolamento netta.



II Parametri di Tresca S_u

Essi si determinano mediante

→ PROVA TRIASSIALE UU

In questo caso, non c'è consolidazione (U) e il campione è portato a rottura in condizioni non drenate (U). Ne consegue che la prova è molto rapida.

La prova restituisce i risultati in termini di tensioni totali e, nel piano $\sigma - \tau$, si ottengono dei cerchi a rottura relativi a più campioni del materiale.

I campioni sono prelevati alla stessa profondità e danno luogo a un cerchio delle tensioni efficaci a rottura che non è noto ed è unico. Pertanto, non si potrebbe ricavare da tale cerchio l'involuppo di rottura in termini di tensioni efficaci (la condizione di tangenza richiede più cerchi).

Ragionando in tensioni totali, i cerchi a rottura sono traslati e presentano la stessa dimensione.

Di conseguenza, il criterio di rottura è una retta orizzontale che è tangente ai cerchi delle tensioni totali a rottura e avente intercetta S_{uf} che corrisponde al raggio del cerchio.

$$\tau_r = S_{uf}$$

$$\frac{\sigma_u^{(1)}}{\sigma_c^{(1)}} = \frac{\sigma_u^{(2)}}{\sigma_c^{(2)}} = \frac{\sigma_u^{(3)}}{\sigma_c^{(3)}} = \text{cost} \quad \sigma_c = \text{tensione di consolidamento}$$

Essendo il rapporto costante, si valuta questa grandezza.
In seguito, moltiplicando per il valore di profondità di interesse, si ricava il valore σ_u per il materiale.

Fase I - attività conoscitiva: censimento frane

La prima fase è l'attività conoscitiva del territorio e, a livello nazionale, esiste l'**Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia** (IFFI).

L'IFFI è il risultato di un progetto definito dopo una serie di eventi occorsi in Sud Italia negli anni '90, che diedero impulso a migliorare la conoscenza e la pianificazione del territorio e alle attività di riduzione del rischio da frana e idraulico.

Il progetto IFFI costituisce il primo inventario omogeneo ed aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio italiano e ha diversi scopi.

- raccolta e aggiornamento delle informazioni relative a fenomeni di dissesto esistenti (rilievo del territorio) con omogeneizzazione a livello nazionale, in modo da fornire un **quadro della distribuzione dei fenomeni di dissesto**.
- realizzazione di un **Sistema Informativo Territoriale** costituito da una cartografia informatizzata e database alfanumerico e iconografico.
- realizzazione di uno **strumento conoscitivo di base** da utilizzare, in integrazione con altri strumenti, nella valutazione qualitativa, quantitativa e tipologica della pericolosità e del rischio da frana, per la programmazione degli interventi e per la pianificazione territoriale.
Chiaramente, questo strumento deve essere accessibile e dunque, in ogni comune, occorre poter riconoscere le zone potenzialmente instabili.

Il progetto consiste sostanzialmente nella redazione di una **scheda di censimento dei fenomeni franosi**.

Le schede sono redatte secondo tre livelli di approfondimento.

- **I LIVELLO** (obbligatorio per ogni fenomeno franoso), che contiene le informazioni di base.
 - localizzazione del fenomeno
 - tipo di fenomeno
 - stato di attività
- **II LIVELLO**, che prevede un approfondimento sulla geologia e sulla morfologia del territorio.
 - morfometria
 - geologia
 - litologia
 - destinazione d'uso della zona
 - cause
 - date di precedenti attivazioni

PROGETTO IFFI – INVENTARIO DEI FENOMENI FRANOSI IN ITALIA

PRINCIPI DEL PROGETTO IFFI

La prima attività che interviene nel processo di mitigazione del rischio frane è l'attività conoscitiva del territorio.

A livello nazionale, tale attività è compiuta grazie all'*Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia* (IFFI)

L'IFFI è il risultato di un progetto che si è sviluppato in seguito a una serie di eventi franosi che hanno interessato il Sud Italia negli anni '90, i quali hanno determinato l'impulso a migliorare le conoscenze sul territorio e a creare un inventario dei fenomeni franosi, tale da consentire di individuare tutti i fenomeni franosi che interessano il territorio nazionale.

Di fatto, il Progetto IFFI costituisce il primo inventario omogeneo e aggiornato dei fenomeni franosi sull'intero territorio nazionale.

Il progetto IFFI segue alcuni principi.

- Fornire un *quadro certo ed aggiornato della distribuzione dei fenomeni di dissesto gravitativo* sull'intero territorio nazionale attraverso la revisione e l'omogeneizzazione dei dati già disponibili e la loro integrazione nelle aree scarsamente indagate.
- Realizzare un *Sistema Informativo Territoriale Nazionale* costituito da una cartografia informatizzata alla scala 1 ÷ 25000 ed il relativo database alfanumerico e iconografico, contenente tutti i dati censiti sulle frane in Italia.
- Fornire un *strumento conoscitivo di base* da utilizzare nel quadro più ampio degli strumenti necessari nella valutazione qualitativa, quantitativa e tipologica della pericolosità e del rischio da frana, per la programmazione degli interventi di difesa del suolo e per la pianificazione territoriale. A tal scopo, tale strumento deve essere accessibile: in ogni comune, bisogna essere in grado di poter riconoscere le zone potenzialmente instabili.

Il progetto prevede la realizzazione di una *scheda di censimento dei fenomeni franosi*, la quale si articola su tre livelli di approfondimento progressivo.

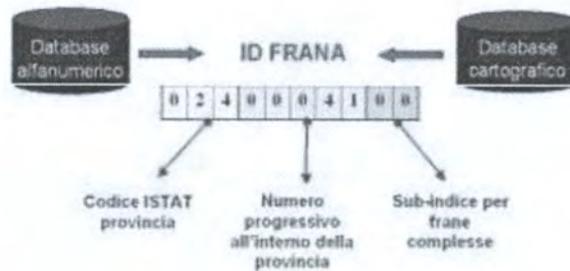
- *Livello 1*
Tale livello deve essere compilato obbligatoriamente per ogni frana e contiene le informazioni di base, ossia localizzazione del fenomeno, tipologia di fenomeno e stato di attività.
- *Livello 2*
Tale livello prevede un approfondimento sulla geologia e sulla morfologia del territorio, in termini di morfometria, geologia, litologia e uso del suolo, al fine di individuare le cause del fenomeno.
- *Livello 3*
Tale livello contiene le informazioni sui danni, sulle indagini e sugli interventi di sistemazione già messi in atto, fornendo un livello di conoscenza dettagliato.

DATI ALFANUMERICI DEGLI ELEMENTI RELATIVI ALLA CARTOGRAFIA IFFI

| Frana 1 | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------------------|---------------------|---------------------------|--------------------|---------------|---|-------|------------------------------------|--------------------------|---|------------|
| IDFrana | Regione | Provincia | Comune | Autorità di Bacino | Tipo di movimento | Attività | Litologia | Uso del suolo | Metodo usato per la valutazione del movimento e dell'attività | Danno | Area della frana (m ²) | Data evento (gg/mm/aaaa) | Causa | Interventi |
| 0720001200 | | BARI | | Fugla | Crollo/Ribaltamento | Attivo/nattivato /sospeso | rocce carbonatiche | | Rilevamento sul terreno | n.d. | | | materiale fratturato, emissione marna base versante | |

| Frana 1 | | | | | | | | | | | | | | |
|------------|---------|-----------|--------|--------------------|-------------------|---------------------------|--------------------------------------|---------------|---|--|------------------------------------|--|---|------------|
| IDFrana | Regione | Provincia | Comune | Autorità di Bacino | Tipo di movimento | Attività | Litologia | Uso del suolo | Metodo usato per la valutazione del movimento e dell'attività | Danno | Area della frana (m ²) | Data evento (gg/mm/aaaa) | Causa | Interventi |
| 0010217201 | | TORINO | | Po | Complesso | Attivo/nattivato /sospeso | r. metamorfiche poco o nulla foliate | | Fotointerpretazione, Dato storico/archivio | Infrastrutture di servizio, Terreno agricolo | | 22/09/1971 //1889 28/05/1890 //1891 22/05/1895 //05/1897 11/1/1916 //07/1920 12/05/1942 //1948 //04/1958 //1960 //1965 06/05/1975 | precipitazioni brevi ed intense, fusione cuneata di neve/ghiaccio, materiale fratturato | |

Ciascun evento è descritto tramite un codice identificativo alfanumerico che costituisce l'elemento di collegamento tra il database alfanumerico e il database cartografico. L'ultimo sub-indice è posto pari a 00 nelle frane ordinarie, mentre diventa un numero progressivo nel caso di frane complesse, ossia fenomeni caratterizzati dalla somma di fenomeni semplici.





D'altra parte, all'interno del database, è possibile eseguire una ricerca per comune, cliccando sull'icona *Ricerca alfanumerica* . Il sistema, in output, elenca automaticamente tutti i fenomeni che interessano il territorio comunale in esame.

A ciascun fenomeno, il database associa le seguenti informazioni (v. immagine alla pagina seguente).

- Codice identificativo.
- Localizzazione.
- Tipologia.
- Stato di attività.
- Litologia.
- Tipologia di suolo.
- Modalità di interpretazione.
- Danni rilevati.
- Data dell'evento, con successione degli eventi storici.
- Cause del fenomeno.
- Interventi di stabilizzazione realizzati.

Attivando l'opzione di visualizzazione, si evidenzia l'area che si sta analizzando.

Le informazioni ricavate sono poi esportabili in formato PDF.

→ III LIVELLO che prevede informazioni sui danni e su interventi e richiede una conoscenza dettagliata del territorio.

→ danni nella zona

→ interventi strutturali già messi in atto

→ indagini già svolte

La stesura delle schede di censimento utilizza la raccolta di informazioni svolta a più livelli.

→ **dati storici e ricerche d'archivio** che consentono di ricostruire gli eventi di frana del passato, valutandone l'evoluzione, il tempo di ricorrenza e l'intensità del fenomeno.

→ **fotointerpretazione**, che consente l'analisi di vaste aree di territorio a livello geomorfologico, tramite foto satellitari e a questo modo, è possibile individuare e perimetrare i principali fenomeni franosi.

→ **rilevamento di campagna:**

nel caso si identifichi un possibile fenomeno di instabilità in zona tramite fotointerpretazione, occorre ottenere informazioni relative al caso specifico ed eseguire rilievi locali (es. via drone).

Sono necessari diversi passi a causa della complessità del territorio, in quanto la realtà non è mai perfettamente nota e si può realizzare solo un modello, ma il modello è buono solo quando coglie tutti gli aspetti che hanno un ruolo determinante sulla dinamica del fenomeno.

D'altra parte, questa procedura di realizzazione delle carte di pericolosità ha dei limiti.

→ DIFFICOLTÀ DI RICAVARE INFORMAZIONI sulla previsione tipologica, spaziale, temporale, dell'evoluzione e dell'intensità delle frane, visto che ci si focalizza su fenomeni naturali.

→ il principio base è che, IN AREE SOGGETTE A FENOMENI DI INSTABILITÀ IN PASSATO, LA POSSIBILITÀ CHE SI VERIFICHINO ALTRE INSTABILITÀ PERMANENTI A MENO DI VARIAZIONI NEI FATTORI AMBIENTALI, es. variazioni climatiche, cambio di uso del suolo e attività antropiche. Pertanto, gli elementi predisponenti possono variare rapidamente nel tempo e, se è occorso un evento, non è detto che ne avvenga un altro in futuro.

→ difficoltà di definizione della pericolosità a causa della natura discontinua delle frane nel tempo e nello spazio. La difficoltà di identificazione delle cause e dei fattori di innesco e l'assenza di dati storici completi.

In particolare, la complessità è maggiore nell'analisi temporale (è più facile capire dove si sviluppi una frana) e, per questo motivo, spesso le carte di pericolosità sono sostituite da **carte di suscettibilità**, che presentano delle differenze nell'aspetto temporale.

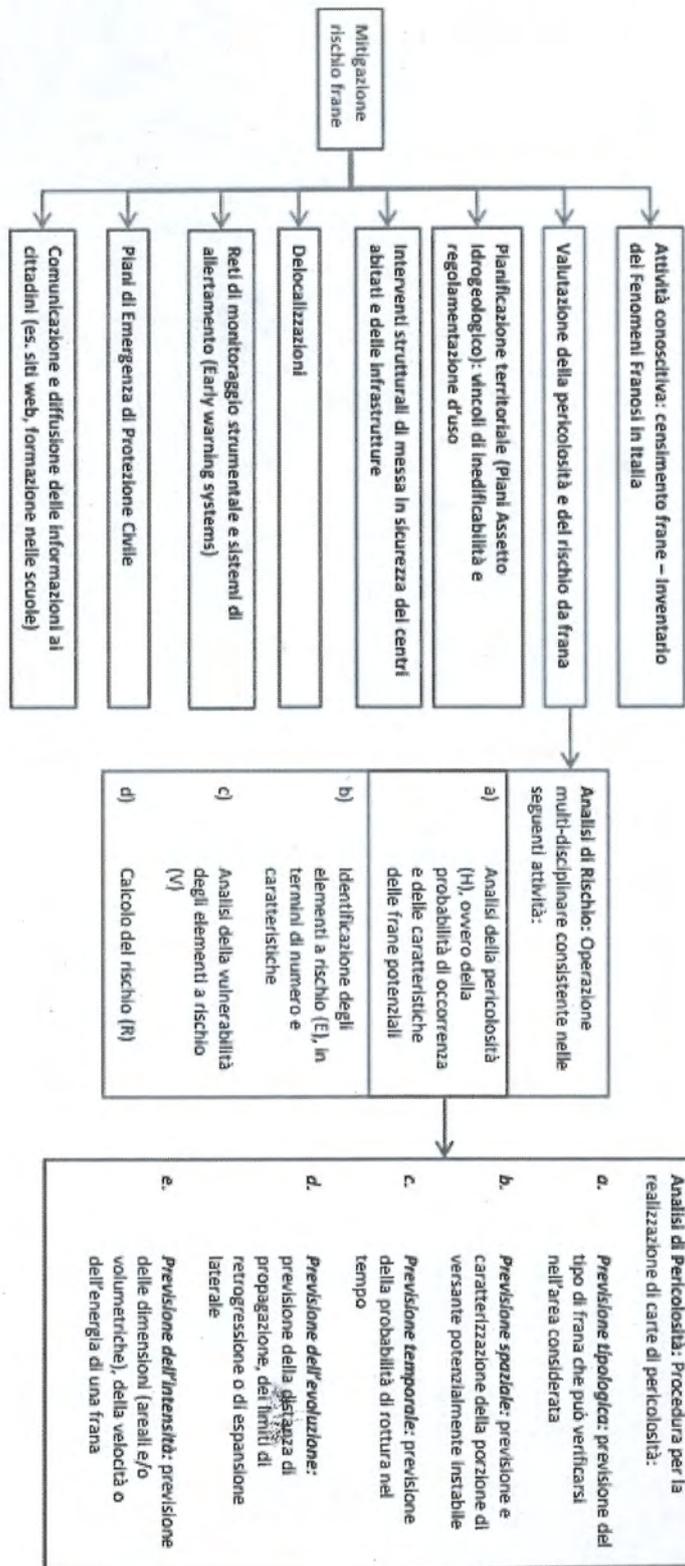
PERICOLOSITÀ include la localizzazione, il volume coinvolto, la tipologia e la velocità delle frane potenziali nonché la probabilità di accadimento nel tempo.

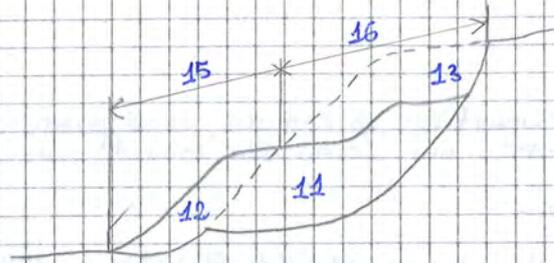
VS

SUSCETTIBILITÀ include la localizzazione, il volume coinvolto, la tipologia e la velocità delle frane potenziali ma il fattore tempo non è esplicitamente considerato.

Dunque la carta di pericolosità introduce la probabilità di localizzazione nello spazio e nel tempo, mentre la carta di suscettibilità introduce una probabilità di occorrenza solo spaziale. D'altra parte, dove la probabilità spaziale (cioè la suscettibilità) è maggiore, tendenzialmente è probabile che l'evento si verifichi in un arco di tempo più stretto, ma non è detto.

SCHEMA DI MITIGAZIONE DEL RISCHIO FRANE: STATO CORRENTE





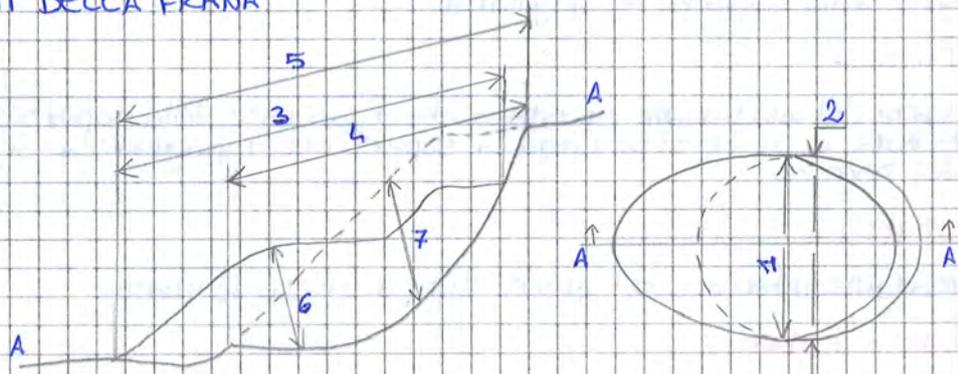
15) **Zona di accumulo** =

parte della frana entro la quale il materiale franato giace al di sopra della superficie originale del versante.

16) **Zona di abbassamento** =

parte della frana entro la quale il materiale franato giace al di sotto della superficie originale del versante.

DIMENSIONI DELLA FRANA



1) **Larghezza della massa franata** =

larghezza massima della massa instabilizzata

2) **Larghezza della superficie di rottura** =

larghezza massima tra i fianchi della massa franata

3) **Lunghezza della massa franata** =

distanza tra punto sommitale e punto distale

4) **Lunghezza della superficie di rottura** =

distanza tra il coronamento e l'unghia della superficie di rottura

5) **Lunghezza totale** =

distanza tra il coronamento e il punto distale

6) **Profondità della massa franata** =

massima distanza tra superficie di rottura e superficie della massa franata (ortogonale al piano 1-4)

7) **Profondità della superficie di rottura** =

massima profondità della superficie di rottura rispetto alla configurazione topografica originaria (ortogonale al piano 2-4)

VELOCITÀ DI UNA FRANA

Esistono delle classi di velocità delle frane, in cui i termini hanno un significato quantizzabile.

| | |
|-------------------------------------|---|
| Classe 1: Frana estremamente lenta | $v < 5 \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$ |
| Classe 2: Frana molto lenta | $v = (5 \div 50) \cdot 10^{-4} \text{ mm/s}$ |
| Classe 3: Frana lenta | $v = (5 \div 50) \cdot 10^{-3} \text{ mm/s}$ |
| Classe 4: Frana moderata | $v = (5 \div 50) \cdot 10^{-2} \text{ mm/s}$ |
| Classe 5: Frana rapida | $v = (5 \div 500) \cdot 10^{-1} \text{ mm/s}$ |
| Classe 6: Frana molto rapida | $v = (5 \div 500) \cdot 10^1 \text{ mm/s}$ |
| Classe 7: Frana estremamente rapida | $v > 5 \cdot 10^3 \text{ mm/s}$ |

Si nota che il volume esprime la magnitudo e la velocità esprime l'intensità.

Il volume indica un valore globale, mentre la velocità è un'informazione locale che serve per descrivere localmente l'energia del fenomeno.

2. Classificazione dei movimenti di versante

La descrizione tipologica si basa su una classificazione dei movimenti di versante.

Esistono diversi sistemi di classificazione, che si focalizzano su aspetti diversi.

Il fatto che non esista un unico sistema evidenzia la complessità del fenomeno, che può essere analizzato sotto diversi punti di vista.

Il sistema di classificazione più noto è la **classificazione di Varnes (1978)**, usata per l'analisi di diversi tipi di fenomeno. Essa utilizza una tabella in cui ci sono due voci principali.

→ TIPO DI MOVIMENTO: crollo, ribaltamento, scivolamento, espandimento, calata o fenomeno complesso.

→ TIPO DI MATERIALE, in cui c'è la classica distinzione

→ roccia (rock)

→ detrito (debris), con prevalenza di componente a grana grossa

20 ÷ 80 % grana grossa ($\phi > 2 \text{ mm}$)

→ terreno (earth), con prevalenza di componente a grana fine

> 80 % grana fine ($\phi < 2 \text{ mm}$)

Il nome del singolo evento è combinazione del tipo di movimento e del tipo di materiale.

Si nota che non tutte le combinazioni hanno la stessa probabilità di accadimento perché esistono movimenti più tipici della roccia e movimenti più tipici del terreno.

Le frane da crollo posso essere

- caduta di singoli blocchi in roccia, con volume totale inferiore a 1000 m^3
- crolli in massa, nel caso di distacchi di grosse dimensioni (volume superiore a 1000 m^3).

CAUSE

→ CAUSE PREDISPONENTI

Le principali cause predisponenti sono pareti in roccia pseudoverticali denudate (non c'è la copertura vegetale che può stabilizzare il versante) con un sistema di discontinuità che si intersecano.

A questo si aggiungono l'erosione al piede, che forma una parete strapiombante, e la presenza di riempimenti argillosi nelle discontinuità, che possono rigonfiare e aumentare la pressione laterale.

→ CAUSE SCATENANTI

- infiltrazioni d'acqua nelle discontinuità, che può andare in pressione
- cicli di gelo - disgelo, che inducono stati tensionali
- azione delle radici degli alberi
- sisma, che è un'azione istantanea che varia lo stato tensionale locale
- transito di mezzi o vibrazioni di origine antropica, che inducono variazioni di tensione nel tempo
- scalzamento al piede da parte di corsi d'acqua o moto ondoso
- azione edifica.

Ad es. la parete interessata dalla caduta di acqua nelle Cascate del Niagara ha subito un progressivo arretramento del fronte.

La stratigrafia presenta blocchi di dolomia fratturata posta sopra materiale di deposizione.

L'acqua non agisce direttamente sui blocchi di dolomia, bensì erode il materiale più tenero sottostante.

Lo scalzamento al piede, unito all'infiltrazione e allo sviluppo di pressioni interstiziali, determinano la caduta dei blocchi e l'arretramento del fronte.

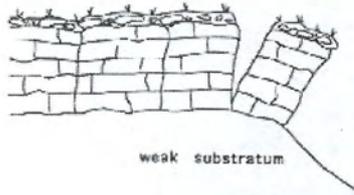
CARATTERI DIAGNOSTICI (parti costituenti del fenomeno franoso)

→ ZONA DI DISTACCO

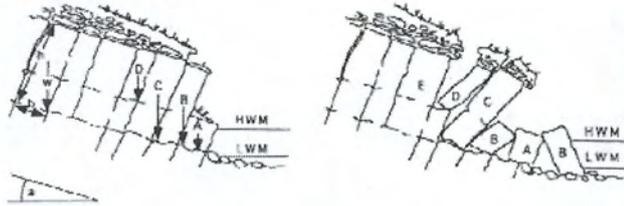
- NICCHIA DI DISTACCO: parete rocciosa pseudovericale denudata, con presenza di fratture e sistemi di discontinuità
- SCARPATA PRINCIPALE: non esiste una vera e propria geometria con caratteristiche marcate. In genere, è verticale, denudata e non alterata e corrisponde a superfici di discontinuità o taglio.

FRANE DA RIBALTAMENTO

(a) Single Topple



(b) Multiple Topples



→ CAUSE SCATENANTI

- pressione idrostatica all'interno delle discontinuità
- cicli di gelo - disgelo
- radici delle piante
- scalzamento al piede
- sisma e vibrazioni di origine antropica

Le cause sono le stesse delle frane da crolla ma il diverso orientamento delle discontinuità fa sì che il primo meccanismo sia il ribaltamento e non il distacco (non c'è una fase di volo del blocco).

CARATTERI DIAGNOSTICI

→ ZONA DI DISTACCO

- NICCHIA DI DISTACCO: parete rocciosa denudata, con presenza di fratture aperte e sistemi di discontinuità prevalentemente verticali.
- SCARPATA PRINCIPALE: in genere, è verticale, denudata e non alterata.

→ ZONA DI ACCUMULO

- TESTA: non ben definita
- CORPO DI FRANA: è costituito dai blocchi ribaltati.

Anche in questo caso, si fatica a trovare tutti gli elementi della nomenclatura.

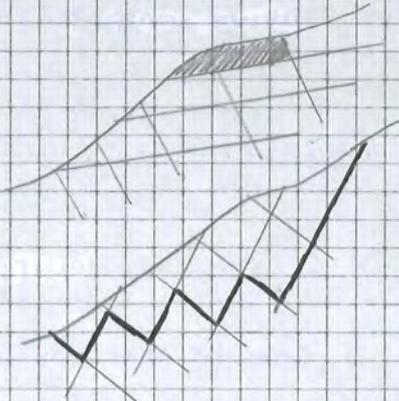
La soluzione consiste nello stabilizzare la colonna o eliminarla tramite esplosivo, se consentito dall'estensione del fenomeno e dall'area sottostante.

II Frane da scivolamento traslativo

MATERIALE COINVOLTO: roccia, terreno non coesivo, detrito di versante

CINEMATISMO

Si genera una superficie di rottura per effetto di un'eterogeneità nel terreno, es. discontinuità, terreno meno resistente o confine materiale alterato - non alterato.



Nel caso di versanti in roccia, può essere presente un sistema di discontinuità che si intersecano tra di loro, dando luogo a un cuneo. In genere, in presenza di infiltrazioni d'acqua, il versante si può instabilizzare.

D'altra parte, le discontinuità possono essere orientate diversamente, generando una diversa superficie.

In altri termini, si può avere una superficie a rottura piana o a gradoni (coinvolge diverse superfici).

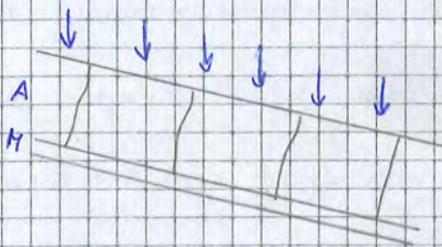
L'instabilità si manifesta lungo le discontinuità perché la stabilità è garantita finché esistono PUNTI DI ROCCIA, che sono i punti di contatto tra le porzioni in roccia. Il problema è che l'infiltrazione d'acqua, la presenza di materiale rigonfiante e le radici delle piante riducono gradualmente i collegamenti, fino a un punto tale che la porzione di materiale non può più essere tenuta in posto.

Durante lo scivolamento, la massa si mantiene intatta nella struttura e stratigrafia fino alla prima rottura di pendenza, dove inizia a fratturarsi. Inoltre, nelle fasi iniziali, si genera una frattura di trazione verticale, aperta e profonda. Questa ha un ruolo importante perché segnala una possibile instabilità, visto che il distacco è il frutto di un processo deformativo nel tempo.

↓ i fenomeni estesi danno nel tempo dei segnali (meno nei fenomeni più piccoli)

Questi fenomeni sono tipicamente estremamente rapidi.

Le frane da scivolamento traslativo interessano anche le terre.



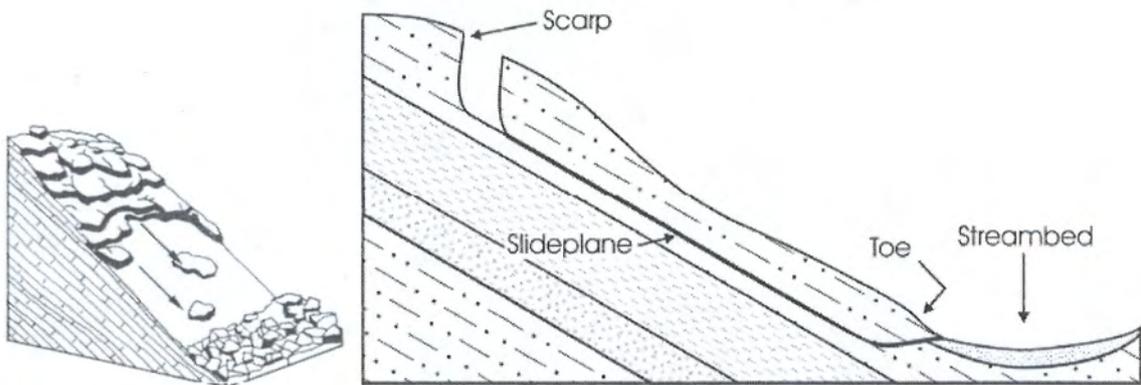
Ad es. il fenomeno interessa pendii poco acclivi costituiti da una successione di arenarie e marne (argille cementate rigonfianti).

Questi derivano da depositi marini posti vicino alla piattaforma continentale, da cui si staccavano frane e si depositava materiale.

Nel tempo, con i movimenti tettonici, il fondo si è incurvato e si sono sviluppate colline con pendenze ridotte, costituite da arenaria fratturata in superficie.

Con le piogge, l'acqua si infiltra attraverso le discontinuità e interessa lo strato di marna.

FRANE DA SCIVOLAMENTO TRASLATIVO

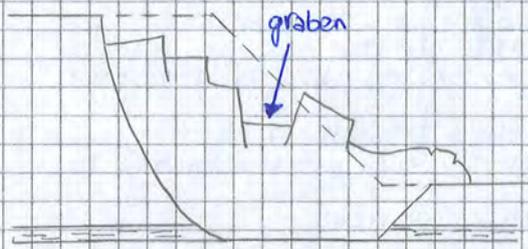


In presenza d'acqua, la resistenza a scorrimento della massa crolla e, già con un'inclinazione di 20° , il materiale si instabilizza.

Pertanto, non è necessaria una superficie di rottura dettata dalle discontinuità, ma è sufficiente uno strato con basse caratteristiche di resistenza.

In questo, è importante conoscere la successione stratigrafica, mediante indagini e monitoraggio.

III Frana composta



Essa è combinazione di un meccanismo di rotazione e di un meccanismo di scivolamento lungo uno strato avente caratteristiche di resistenza scadenti.

La variazione di direzione durante il movimento e la variazione di meccanismo genera distorsione e fratturazione nella massa.

Lo scorrimento interno delle diverse parti costituenti la massa induce lo sviluppo di zone di sprofondamento, dette GRABEN.

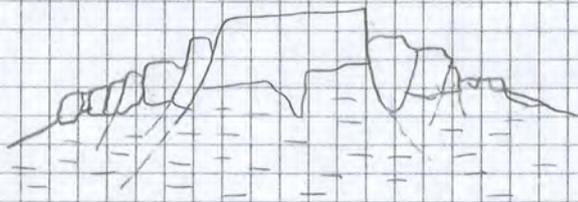
Un esempio è la frana del Vajont, che ha coinvolto uno scorrimento e una rotazione nella parte terminale.

CAUSE PREDISPONENTI: presenza di discontinuità orientate a frangimento (a favore di gravità), che rappresentano una zona di debolezza lungo cui può svilupparsi lo scivolamento. È anche sufficiente la presenza di uno strato di terreno con caratteristiche più scadenti.

CAUSE SCATENANTI: acqua

6 Frane per espansione laterale

Queste sono un fenomeno particolare, in cui non è presente né una superficie di scorrimento né una zona di deformazioni plastiche ben definita.



L'espansione laterale si manifesta tipicamente dove una massa rocciosa rigida e fratturata giace su materiali a minore resistenza e più deformabili.

Il materiale sottostante può subire deformazioni plastiche o liquefazione e il materiale sopra, che è fragile e può subire minore deformazione, si frattura in modo da seguire la geometria.

Il risultato è un sistema di porzioni isolate che si distaccano dalla bancata principale e subiscono movimenti differenziali, prevalentemente in direzione orizzontale. La velocità è bassa o molto bassa.

FRANA PER COLATA

| Material | Water content ¹ | Special condition | Velocity | Name |
|--|------------------------------|---|--------------------------|---|
| Silt, sand, gravel, and debris (talus) | Dry, moist, or saturated | No excess pore-pressure Limited volume | Various | <i>Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow</i> |
| Silt, sand, debris, and weak rock ² | Saturated at rupture surface | Liquefiable material ³ Constant water content | Extremely rapid | <i>Sand (silt, debris, rock) flow slide</i> |
| Sensitive clay | At or above liquid limit | Liquefaction <i>in situ</i> ³ Constant water content ⁴ | Extremely rapid | <i>Clay flow slide</i> |
| Peat | Saturated | Excess pore-pressure | Slow to very rapid | <i>Peat flow</i> |
| Clay or earth | Near plastic limit | Slow movements Plug flow (sliding) | Less than rapid | <i>Earth flow</i> |
| Debris | Saturated | Established channel ⁵ Increased water content ⁴ | Extremely rapid | <i>Debris flow</i> |
| Mud | At or above liquid limit | Fine-grained debris flow | Greater than, very rapid | <i>Mud flow</i> |
| Debris | Free water present | Flood ⁶ | Extremely rapid | <i>Debris flood</i> |
| Debris | Partly or fully saturated | No established channel ⁵ Relatively shallow, steep source | Extremely rapid | <i>Debris avalanche</i> |
| Fragmented rock | Various, mainly dry | Intact rock at source Large volume ⁷ | Extremely rapid | <i>Rock avalanche</i> |

¹ Water content of material in the vicinity of the rupture surface at the time of failure.

² Highly porous, weak rock (examples: weak chalk, weathered tuff, pumice).

³ The presence of full or partial *in situ* liquefaction of the source material of the flow slide may be observed or implied.

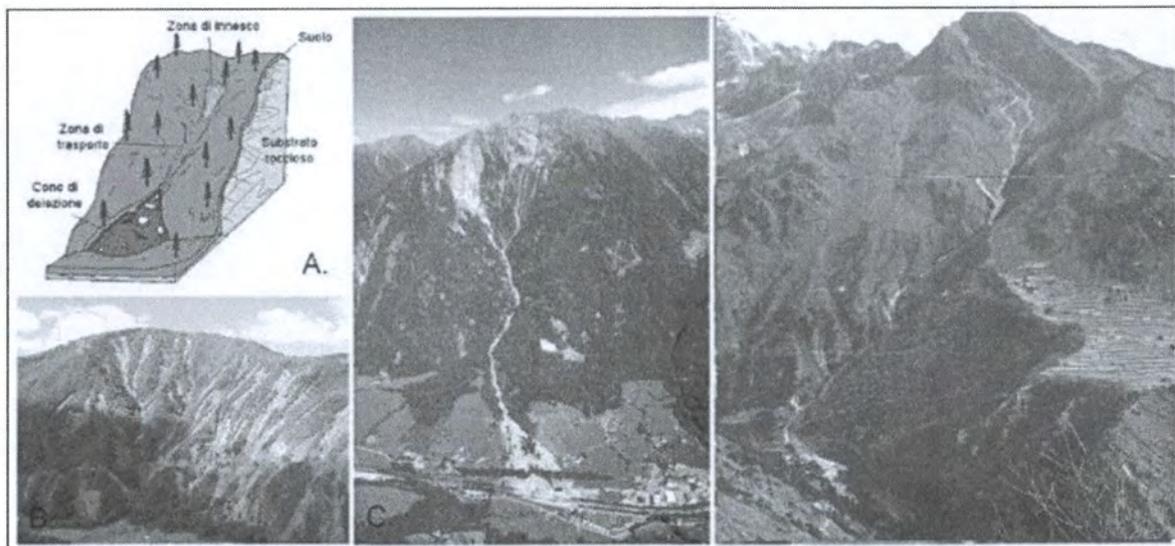
⁴ Relative to *in situ* source material.

⁵ Presence or absence of a defined channel over a large part of the path, and an established deposition landform (fan). *Debris flow* is a recurrent phenomenon within its path, while *debris avalanche* is not.

⁶ Peak discharge of the same order as that of a major flood or an accidental flood. Significant tractive forces of free flowing water. Presence of floating debris.

⁷ Volume greater than 10,000 m³ approximately. Mass flow, contrasting with fragmental rock fall.

Mud flow

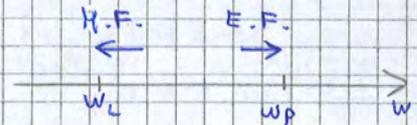


→ se $w_n \rightarrow w_L$, si parla di MUD FLOW

$$IL > 0,5$$

→ se $w_n \rightarrow w_p$, si parla di EARTH FLOW

$$IL < 0,5$$



Siccome l'earth flow è plastico, esso è un fenomeno più lento. Il diverso comportamento si traduce in diversa velocità e diversi danni.

Infatti, se la velocità è bassa, il fenomeno può generare danni alle strutture ma non alle persone, poiché hanno il tempo di allontanarsi.

Se la velocità è elevata, non c'è tempo di allontanarsi e ci sono danni sia a strutture che persone.

IV Debris avalanche

Esso è un fenomeno di flusso superficiale estremamente rapido di detrito saturo o parzialmente saturo, che si sviluppa in versante aperto (non è in canalato).

In questo caso, non si identifica una vera e propria nicchia di distacco e la dinamica è dettata dall'acqua.

V Rock avalanche

Il fenomeno interessa materiale intatto alla fase di innesco, che si frattura durante la propagazione.

Ad es. nella frana di Val Pola, una porzione di struttura è scivolata e, per effetto dell'evoluzione dinamica e dei cambi di pendenza e di direzione, si è fratturata lungo il versante, diventando valanga detritica.

FENOMENI COMPLESSI

1^ fase: SCIVOLAMENTO ROTAZIONALE (SLUMP)

2^ fase: EARTH FLOW

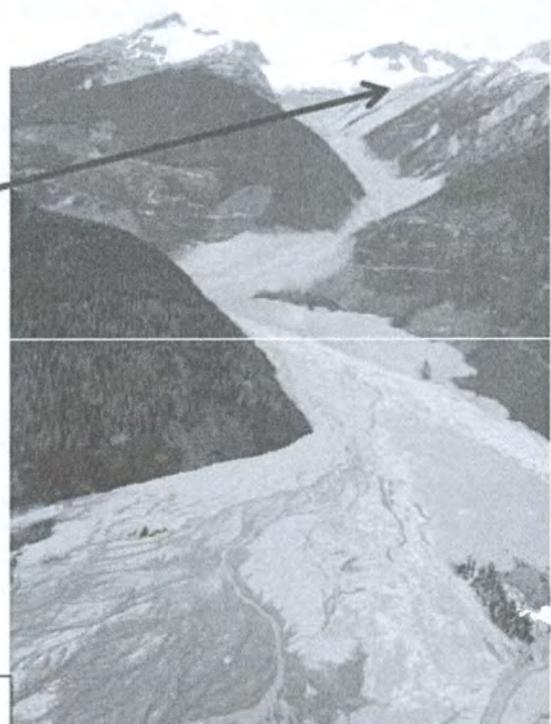
La Conchita, California, 1995



Rock slide

1^ fase: SCIVOLAMENTO TRASLATIVO (SLIDE)

2^ fase: ROCK AVALANCHE



Rock avalanche

Analisi della pericolosità: previsione spaziale

1 Previsione spaziale:

essa è la previsione e caratterizzazione del versante o della sua porzione potenzialmente instabile.

La previsione spaziale consente di definire un **modello di innesco** per l'analisi di stabilità, la cui costruzione si articola in più passi.

- **modello geometrico** (definizione dell'area e volume potenzialmente instabile)
- **cinematismo**
- **modello geomeccanico**, con cause e parametri di resistenza
- **analisi di stabilità**, secondo un metodo di calcolo basato sul fattore di sicurezza o sul creep.

2 Modello geometrico

La costruzione del modello geometrico si articola in più passi

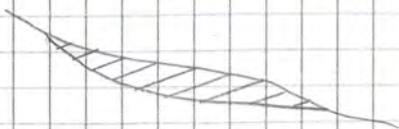
Ⓘ Definizione dell'area potenzialmente instabile

Bisogna delimitare l'area potenzialmente instabile, attraverso diversi strumenti.

- **segni di dissesto** sul versante, come fratture nel terreno, lesioni di edifici, crolli su vie di comunicazione, etc.
- **Foto aeree e indagini SAR** (tecnica RADAR), che permettono di individuare aree instabili
- **indagine storica**

Ⓜ Identificazione del volume potenzialmente instabile

Si analizza in profondità il versante, mediante indagini in profondità.

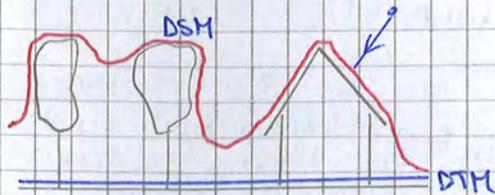


Dato un versante, infatti, è necessario conoscere la topografia (la superficie) e sapere dove si colloca la superficie di scivolamento, per poter determinare il volume potenzialmente instabile.

Esistono due tipologie di modello

→ **Modello digitale del terreno (DTM)**, che è un modello alla quota del terreno, ripulito della vegetazione e degli edifici.

→ **Modello digitale di superficie (DSM)**, che è un modello misurato sulle quote massime, cioè su tetti, chiome degli alberi e su quello che è al di sopra del piano topografico.



In entrambi i casi, l'informazione topografica è ricavata dall'informazione RADAR da satellite, in cui il segnale arriva, è riflesso contro il terreno od oggetti e torna indietro.

Generalmente, si utilizza il DTM.

D'altra parte, in caso di flusso (ossia un movimento che non distrugge edifici e segue le strade e si ramifica in base agli accessi), interessa il DSM in modo da integrare l'informazione degli edifici e valutare l'energia di impatto sugli edifici.

Il problema è che, nel modello DSM, i punti della vegetazione sono sopra la chioma e sono rappresentati dalla quota, mentre sotto è "tutto pieno", come se ci fosse un ostacolo chiuso e invalicabile. Questo non è realistico in caso di flusso, in cui bisogna valutare il percorso per definire l'intervento di mitigazione.

⇒ si utilizza il DTM, eventualmente integrato con dati provenienti dal DSM, a seconda del fenomeno in analisi

Si descrivono ora gli strumenti di monitoraggio, tenendo conto che l'ingegnere non realizza in prima persona lo stendimento, ma deve poter dire quale sistema di monitoraggio sia adatto al problema in esame:

bisogna dare un elenco di tecniche ritenute necessarie per monitorare il sito in esame e dunque bisogna conoscere gli strumenti. L'interpretazione diretta, infatti, non è fatta dall'ingegnere perché gli strumenti restituiscono subito il risultato, ma bisogna saper scegliere il tipo di strumentazione da installare in sito.

Si distinguono due tipi di strumenti di monitoraggio.

I Monitoraggio di superficie

Esso è lo studio della cinematica dei movimenti e della geometria del corpo di frana e permette di delimitare l'AREA della zona in movimento.

II Monitoraggio di profondità

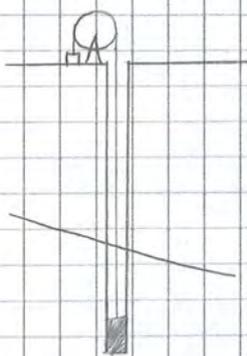
Esso serve a determinare il campo deformativo in profondità e a identificare la profondità della superficie di scivolamento, in modo da capire la VOLUME in gioco.

III Monitoraggio di profondità

Esso ricava informazioni su ciò che succede in profondità, anche mediante sistemi installati in superficie.

→ estensimetro di profondità a filo

Il dispositivo si compone di uno o più cavi inseriti in fori e fissati a diverse profondità.



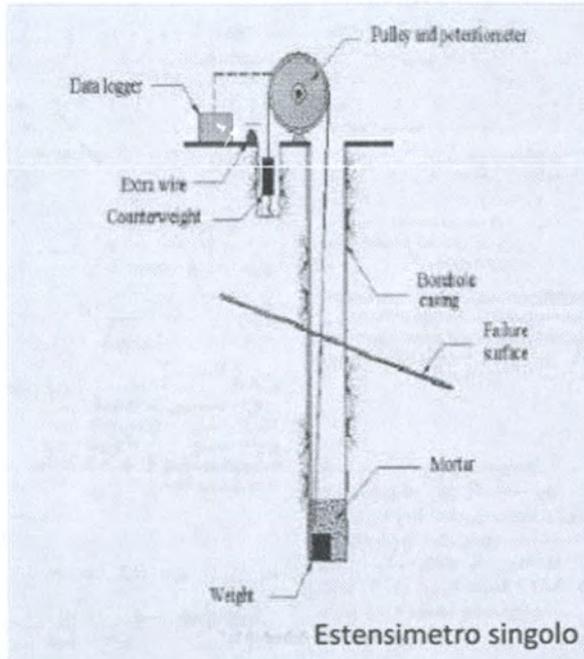
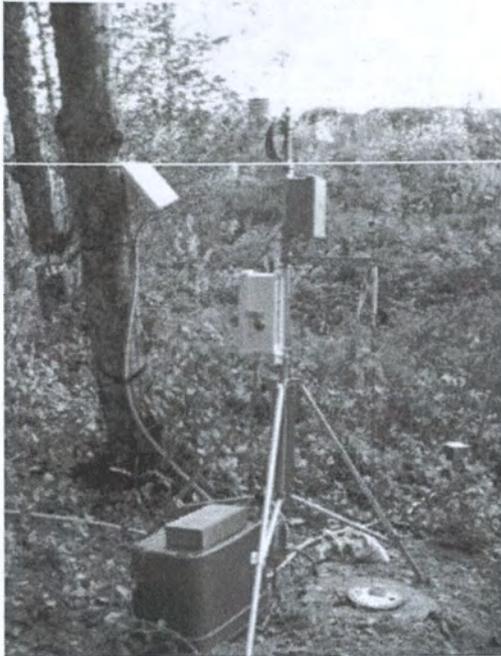
L'ESTENSIMETRO SINGOLO è un cavo ancorato a fondo foro e messo in tensione mediante una puleggia in superficie.

Se il foro è attraversato da una superficie di scivolamento e c'è movimento, avviene un disassamento e il sistema chiama il cavo per la lunghezza L di scorrimento.

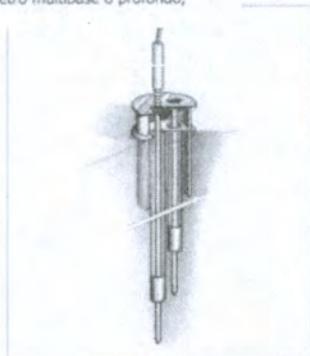
In base alla lunghezza di richiamo, si conosce l'entità dello spostamento avvenuto.



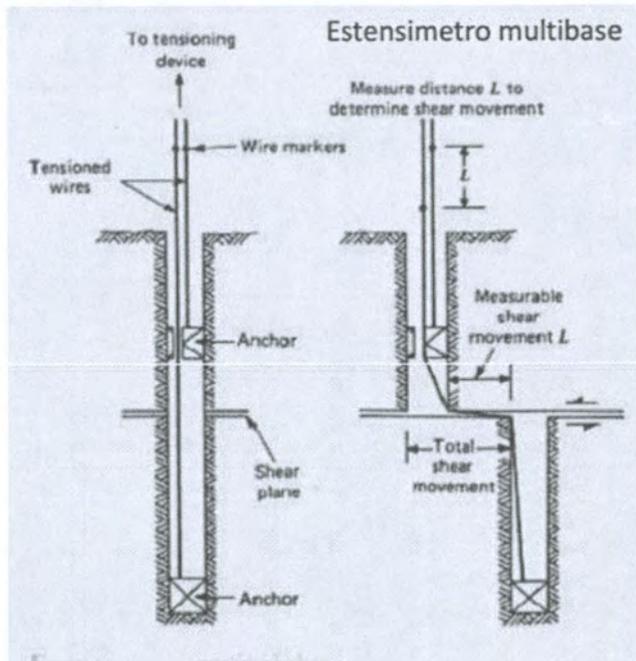
ESTENSIMETRO A FILO



Testa di lettura di estensimetro multibase o profondo, Loc. Campo Francia



Schema di un estensimetro multibase, per il controllo della componente di spostamento in profondità



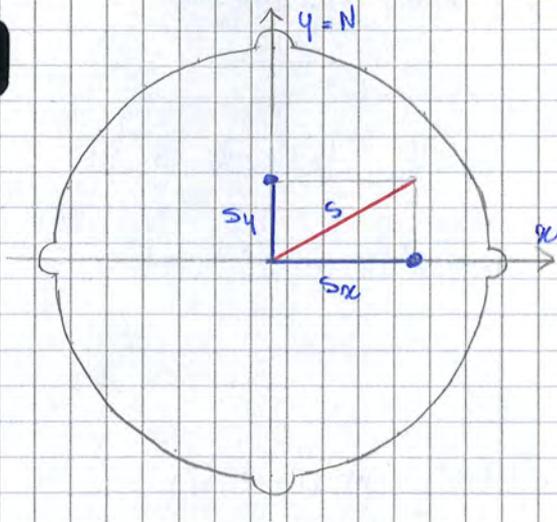
→ inclinometro

Esso è lo strumento più comune per il monitoraggio delle frane in profondità e consente di misurare

→ velocità e direzione del movimento

→ profondità e spessore della superficie di rottura.
Lo strumento, infatti, consente di capire se lo scorrimento avviene su una discontinuità netta o su un materiale con caratteristiche scadenti che si sta deformando.

L'inclinometro è costituito da un tubo inclinometrico in alluminio o PVC che è installato nel foro di carotaggio. A fondo foro, si applica un tappo di chiusura per evitare che vi siano infiltrazioni d'acqua.



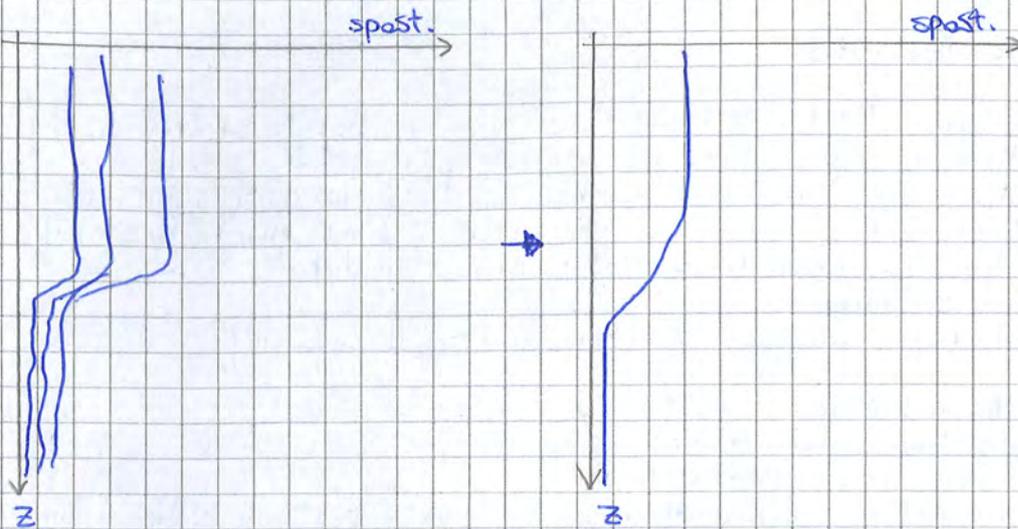
La sezione presenta due coppie di guide verticali poste in direzione x e y (in genere, è il Nord). Queste consentono di calare la sonda, dotata di apposite ruote che si innestano nelle guide, lungo la direzione x e y .

La sonda presenta un pendolo, che mantiene sempre la verticale. In questo modo, posizionando la sonda a una certa profondità, si misura l'angolo che il pendolo forma rispetto all'asse e si ottengono le componenti di spostamento.

→ calando lungo la direzione x , lo spostamento misurato è S_x

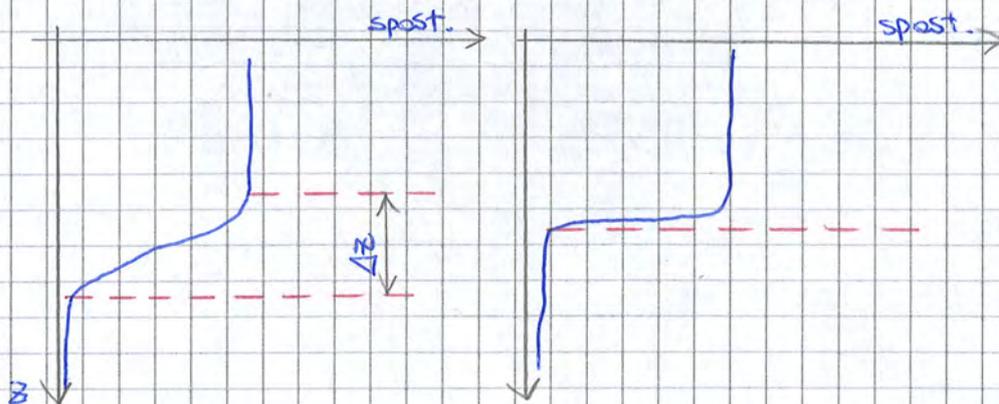
→ calando lungo la direzione y , lo spostamento misurato è S_y

Combinando le due componenti, si trovano direzione ed entità dello spostamento complessivo S .



Tipicamente, si riconoscono due situazioni

- il grafico mostra una CRESCITA PROGRESSIVA di spostamento e la curva riparte verticale da un certo punto.
In questo caso, si potrebbe avere uno scorrimento non su una superficie di rottura netta ma si potrebbe avere uno strato - da verificare da analisi stratigrafica - con caratteristiche più scadenti, che si deforma progressivamente.
Si parla allora di **deformazioni estese a tutto il corpo di frana.**
- si identifica uno spostamento netto, con un tratto quasi orizzontale.
In questo caso, la superficie di rottura è netta e può essere l'interfaccia tra strati di materiali diversi e una discontinuità (in versanti in roccia).
Si parla allora di **superficie di scorrimento evidente.**

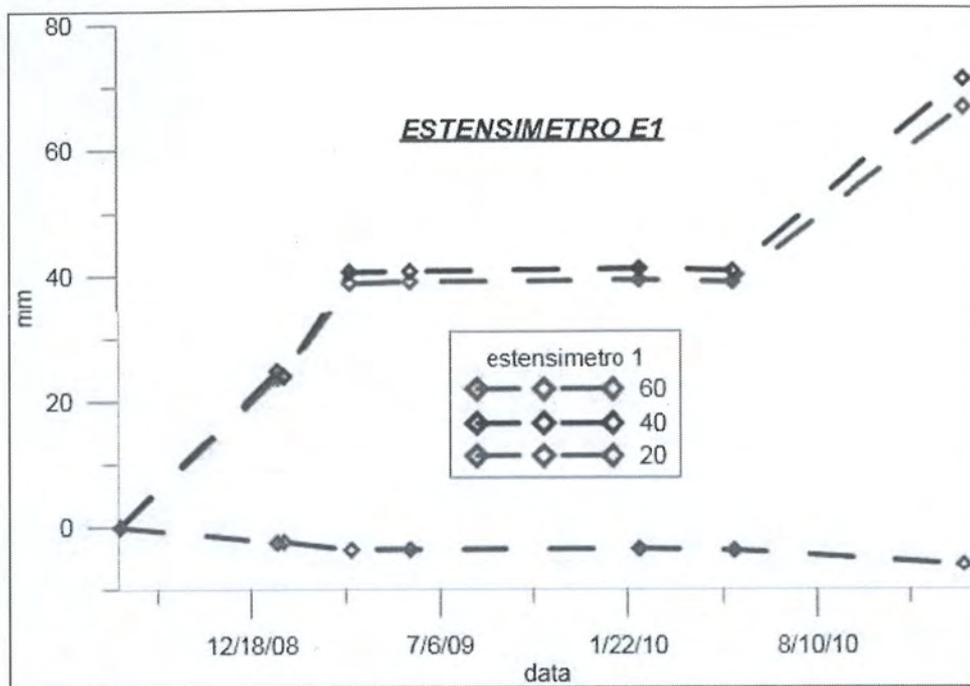


L'inclinometro fornisce così, in modo puntuale, la posizione o l'intervallo di profondità a cui si colloca la superficie di scivolamento.

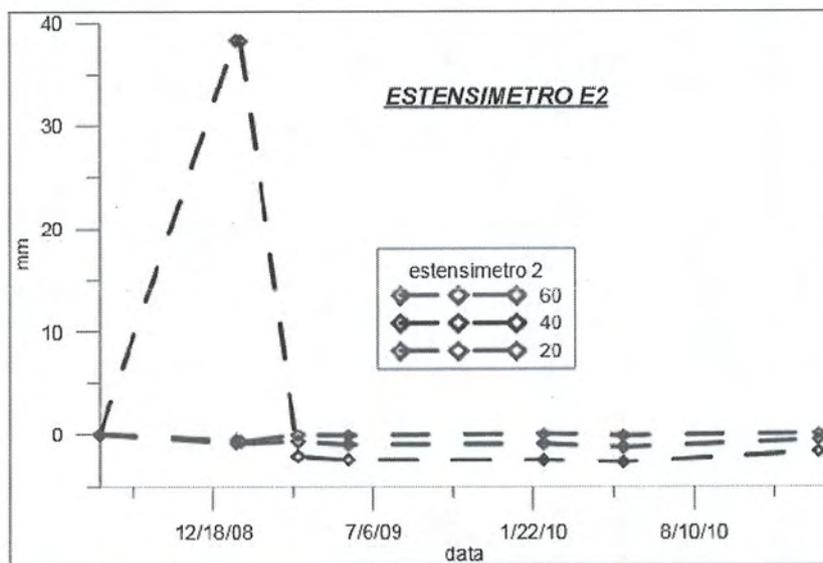
FRANA DI LASES



È stata individuata un'area di versante in movimento, sulla quale si è installato un sistema di monitoraggio.



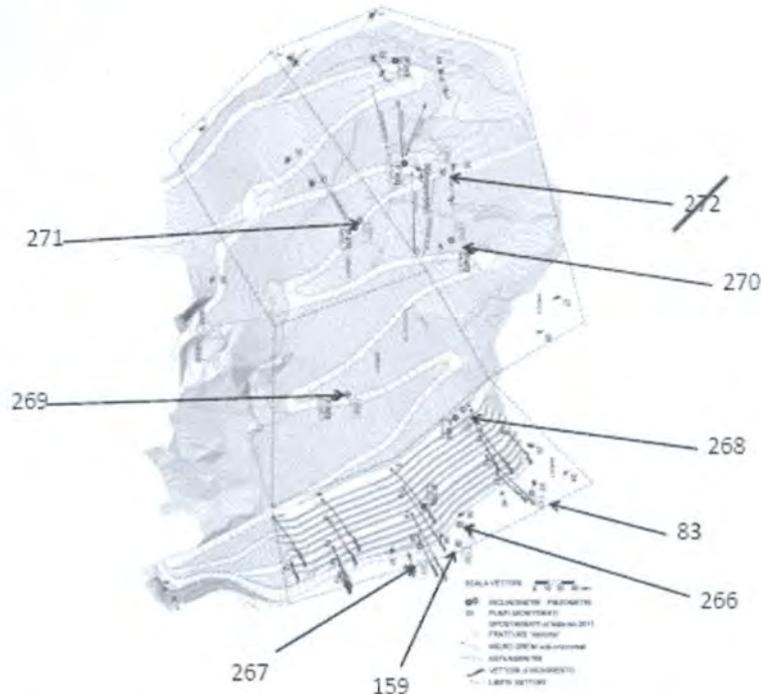
L'estensimetro E2 è un estensimetro multiplo a 3 cavi, i quali sono ancorati a 20 m, 40 m e 60 m, rispettivamente. Nel grafico spostamenti-tempo, si osserva che i cavi ancorati a 20 m e 60 m non segnalano movimenti, mentre il cavo ancorato a 40 m presenta un picco di spostamento. Questo è un risultato anomalo, segnale di un errato funzionamento del sistema.



L'estensimetro E3 è un estensimetro multiplo a 3 cavi, i quali sono ancorati a 20 m, 40 m e 60 m, rispettivamente. Nel grafico spostamenti-tempo, si osserva che tutti e tre i cavi subiscono uno spostamento. Ciò significa che, nella posizione E3, la superficie di scivolamento si attesta a meno di 20 m di profondità.

Inclinometri

Il sistema di monitoraggio presenta 9 inclinometri.



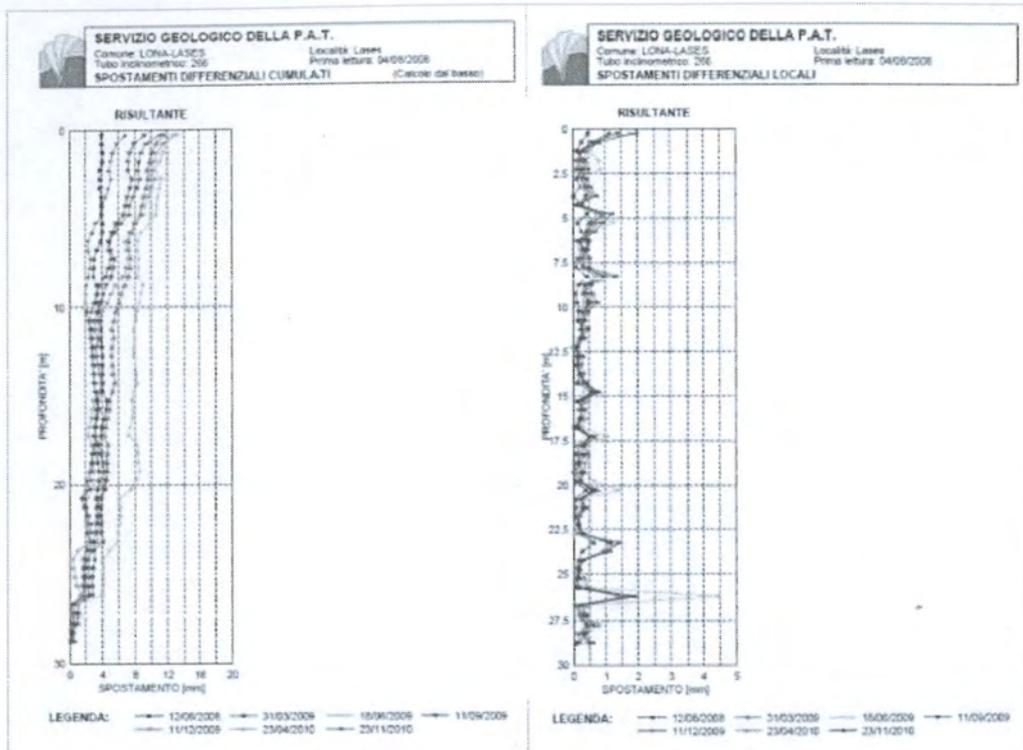
Questi sono georeferenziati e uno è indicato con un numero barrato, per indicare che lo strumento è divenuto inutilizzabile poco dopo l'installazione a causa dell'eccessivo movimento.

Al fine di integrare le diverse strumentazioni sul versante, si considera una sezione longitudinale che intercetta le posizioni dei punti di monitoraggio, ossia inclinometri e piezometri che danno i movimenti e la posizione della falda lungo la sezione. Incrociando i dati di profondità dello spostamento con l'informazione stratigrafica, si è in grado di tracciare l'eventuale superficie di scivolamento.

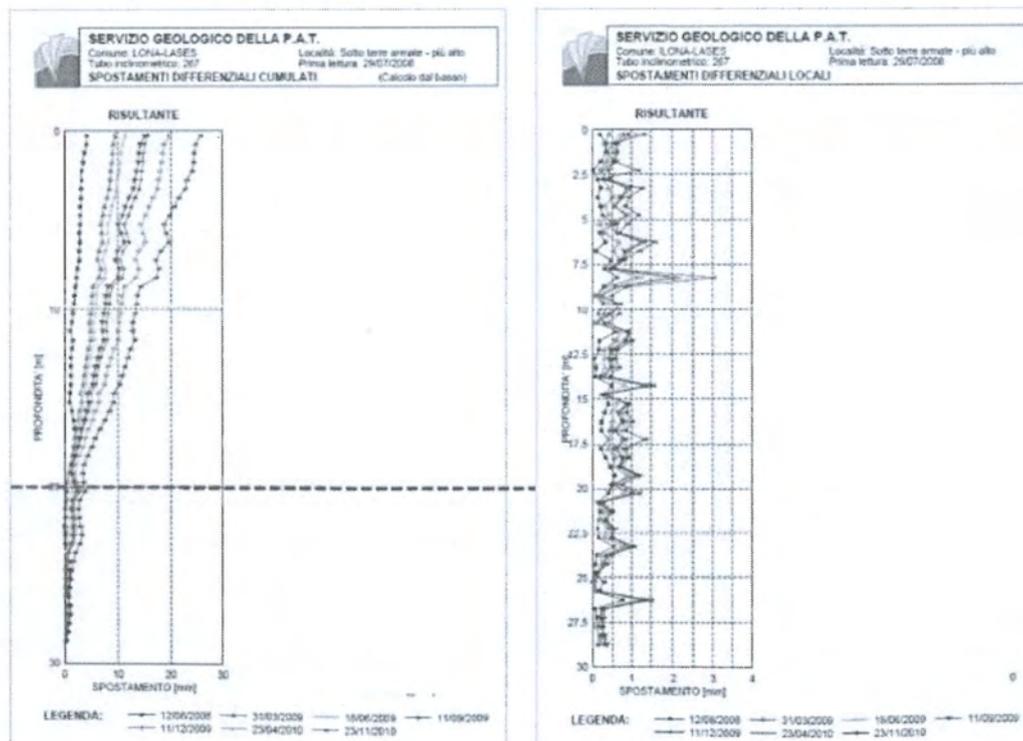
Gli inclinometri 83, 159, 266, 267 e 268 sono stati installati nell'area del rilevato in terra armata e, per ognuno di essi ciascuna curva rappresenta una lettura, che restituisce gli spostamenti differenziali locali e cumulati, ossia gli spostamenti locali e cumulati rispetto alla condizione iniziale di installazione dello strumento.

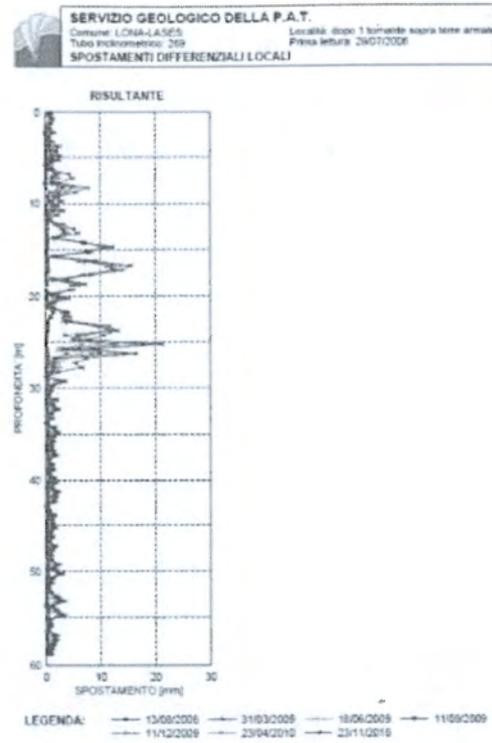
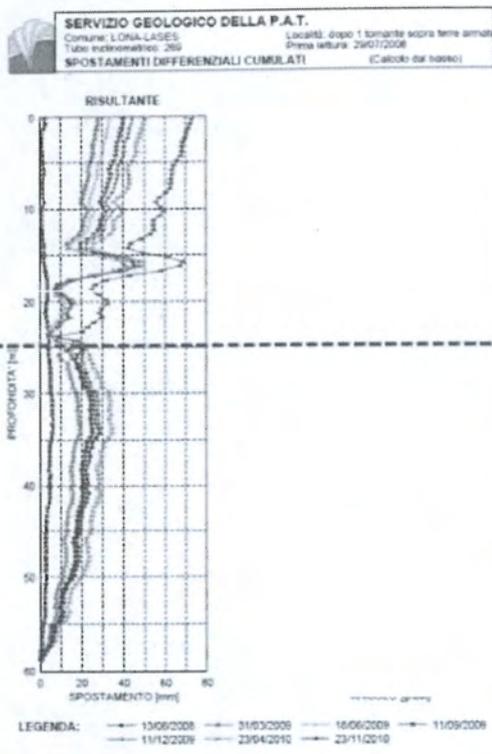
Nell'inclinometro 83, focalizzandosi sul piano campagna, dove si sommano gli spostamenti, le curve tendono a confondersi. In particolare, è presente uno spostamento ma, nelle ultime letture, questo non aumenta ulteriormente. Ciò si deve all'installazione di dreni, in quanto si è ritenuto che il versante rispondesse alle venute d'acqua visto che gli inclinometri mostravano delle accelerazioni durante gli eventi piovosi. Dopo l'installazione, il monitoraggio è continuato al fine di valutare l'efficacia dell'intervento e l'efficienza nel tempo. Il fatto che lo spostamento non incrementi più nel tempo è indicatore di una buona risposta dell'intervento eseguito.

Al sensore 266, non si rilevano spostamenti particolari in quanto lo strumento è collocato nella zona stabile.

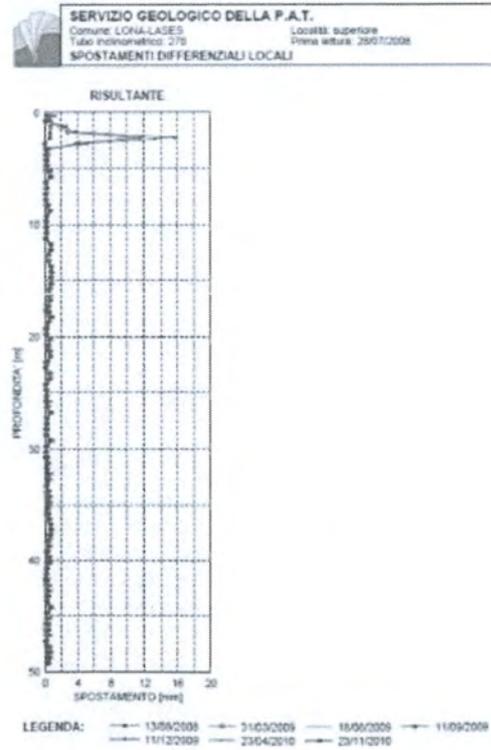
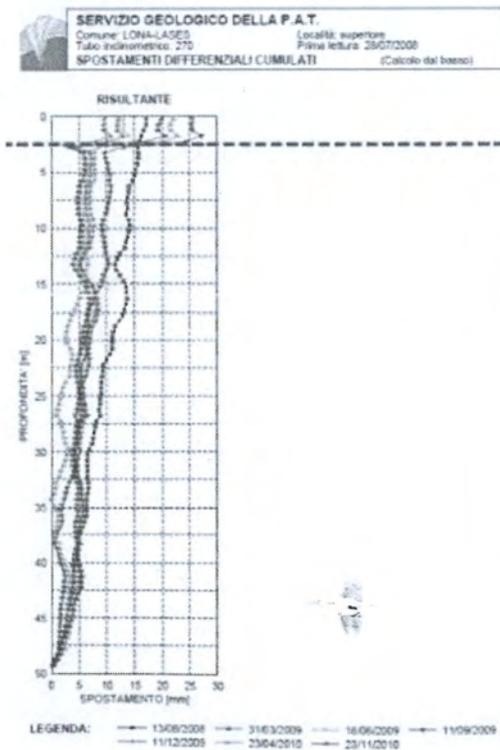


Al sensore 267, si rilevano spostamenti piccoli sull'intero spessore del materiale.



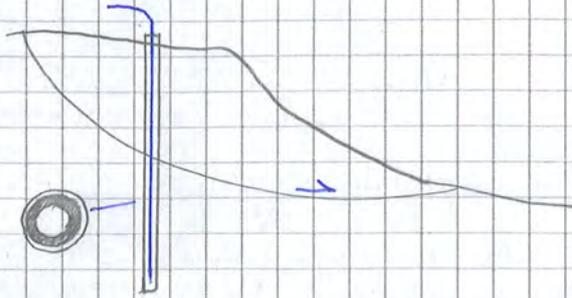


Al sensore 270, l'anomalia si manifesta nuovamente, ma il picco si manifesta a pochi metri di profondità dal piano campagna.



→ Time Domain Reflectometry (TDR)

Esso è uno strumento costituito da cavi coassiali formati da un materiale conduttore ricoperto da dielettrico e installati nel terreno.



Il cavo è attraversato da una corrente elettrica in continua e ogni alterazione della geometria per effetto della deformazione del terreno induce una variazione di impedenza elettrica e tale variazione genera un'onda riflessa, misurata con un oscilloscopio.

Nota la velocità di propagazione dell'onda, dal segnale di ritorno si ottiene la profondità dell'anomalia e l'intensità della deformazione.

→ indagini geofisiche

Le indagini geofisiche presentano una serie di vantaggi

- alcune indagini sono NON INVASIVE, cioè sono indagini di superficie che permettano di dare un'informazione di profondità
- l'informazione non è puntuale ma è data un'INFORMAZIONE LUNGO UNA SEZIONE.

I metodi più usati sono

- **metodi geoelettrici**, che si basano sulla misura di resistività del materiale attraversato
- **metodi geosismici**, che sfruttano la trasmissione delle onde sismiche prodotte artificialmente all'interno del terreno e ne valutano la velocità di propagazione.

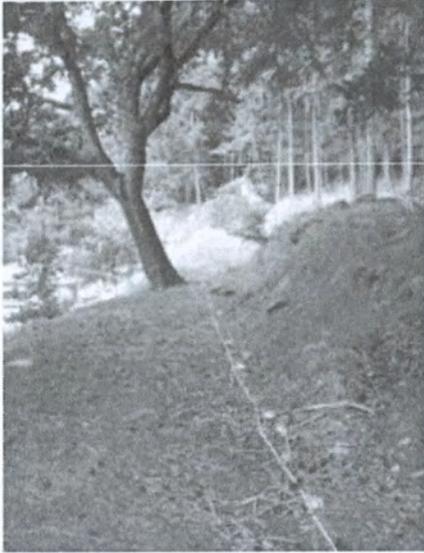
Da una parte, le prove in foro permettono di individuare i campi di velocità delle onde sismiche.

Il **metodo Down-Hole** prevede una sorgente in superficie e il ricevitore in profondità.

Il **metodo Cross-Hole** prevede sia sorgente sia ricevitore in profondità, in modo da ricostruire il campo delle velocità delle onde elastiche dell'area compresa tra i fori adiacenti.

PROVE GEOFISICHE

Prova geoelettrica

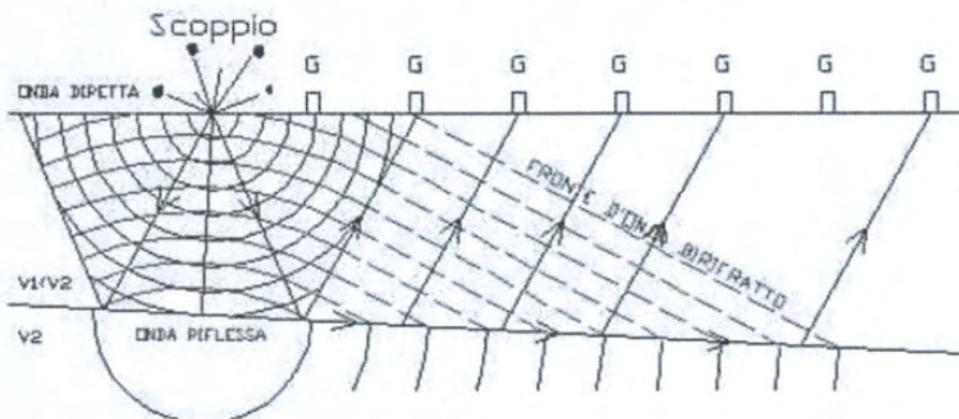


Linea geoelettrica eseguita sul corpo di frana

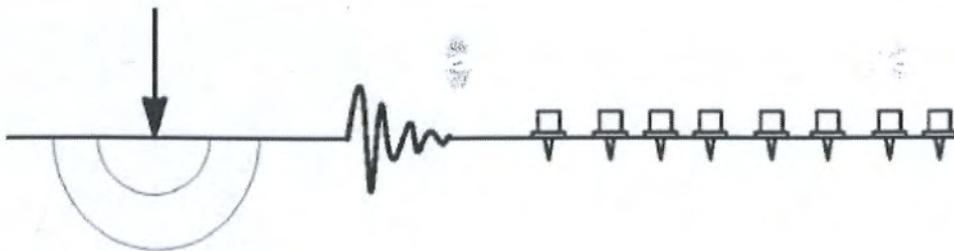


Particolare di uno degli elettrodi utilizzati

Prova sismica a rifrazione



Metodo SASW

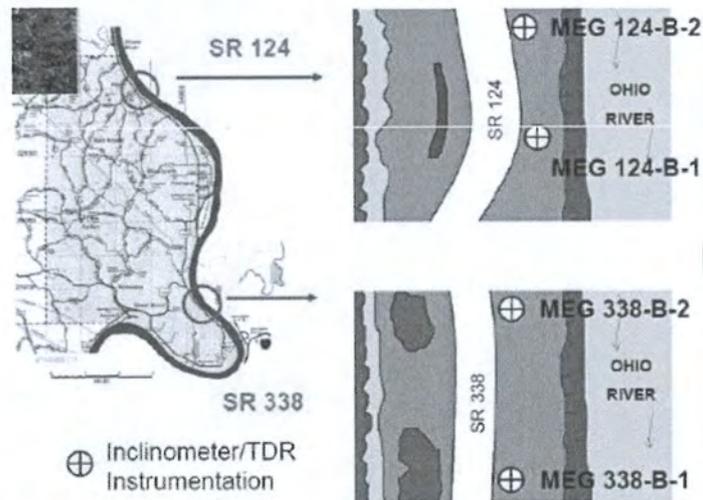


FRANA DI OHIO

La massicciata di una strada è soggetta a un fenomeno di instabilità.

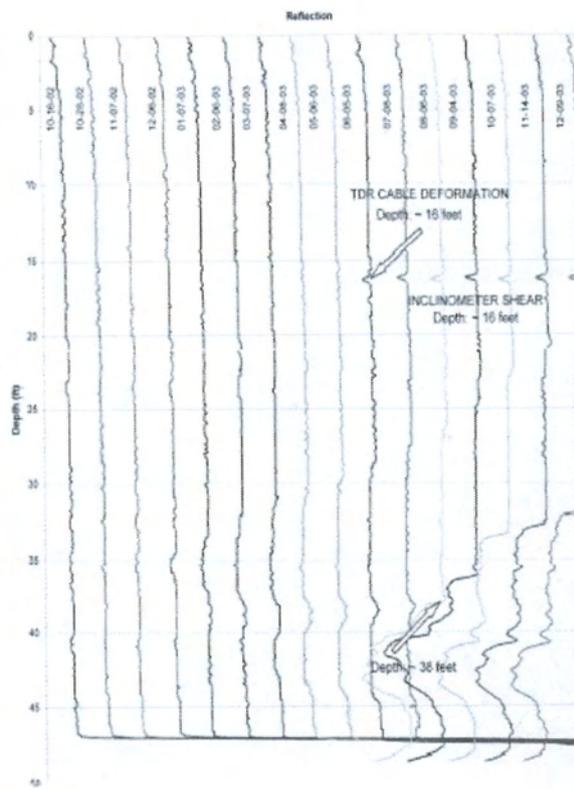
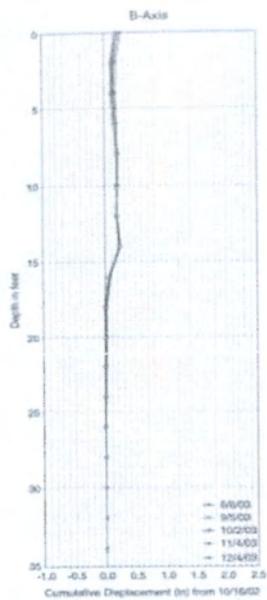
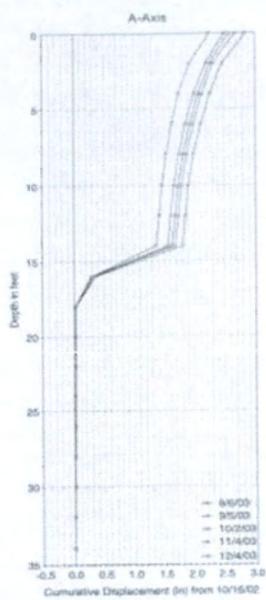


Per questo motivo, lungo due tratti, sono stati installati due inclinometri e due TDR, ancorati in superficie.



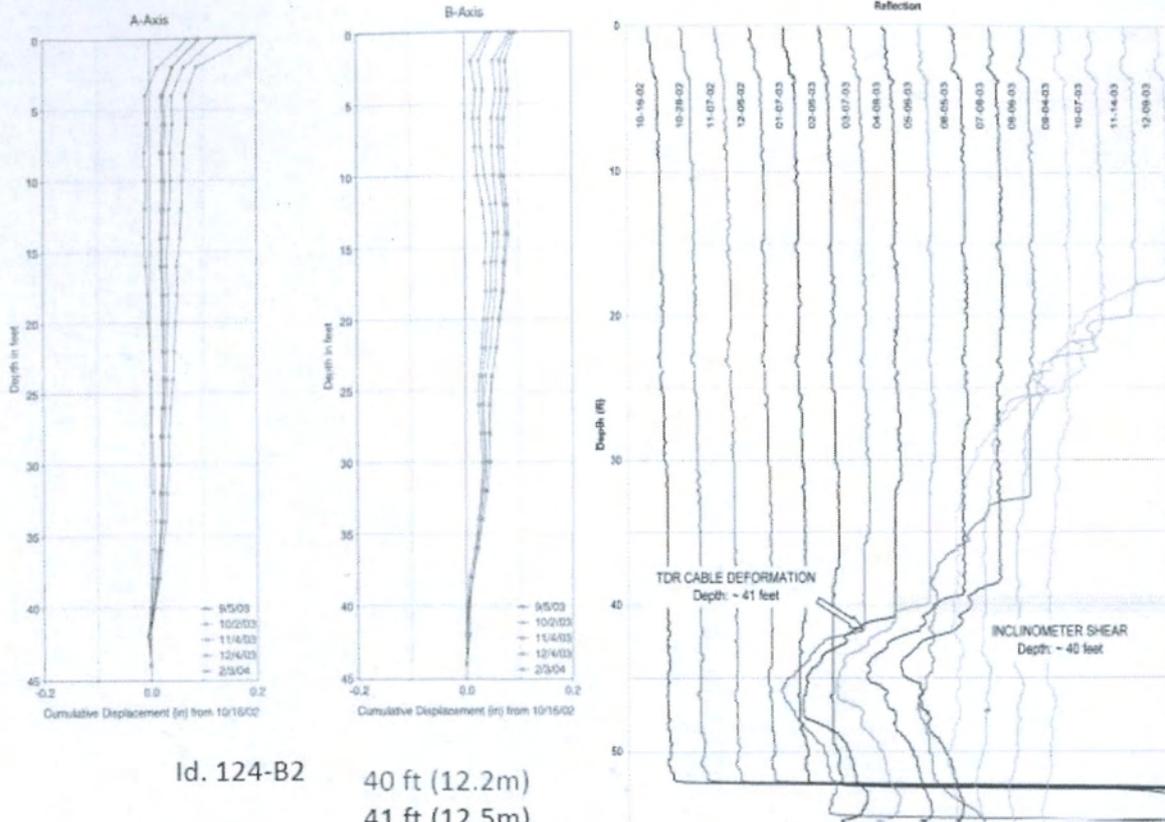
Il TDR restituisce le informazioni in un certo modo: in presenza di due strati che scorrono l'uno sull'altro, la lettura del TDR presenta una variazione nel segnale.

Se poi lo scorrimento è tale da provocare la rottura nel flusso del segnale, si nota uno "sbandieramento" del segnale e la perdita del segnale. La prima interruzione del segnale avviene in corrispondenza della profondità della superficie di scorrimento.



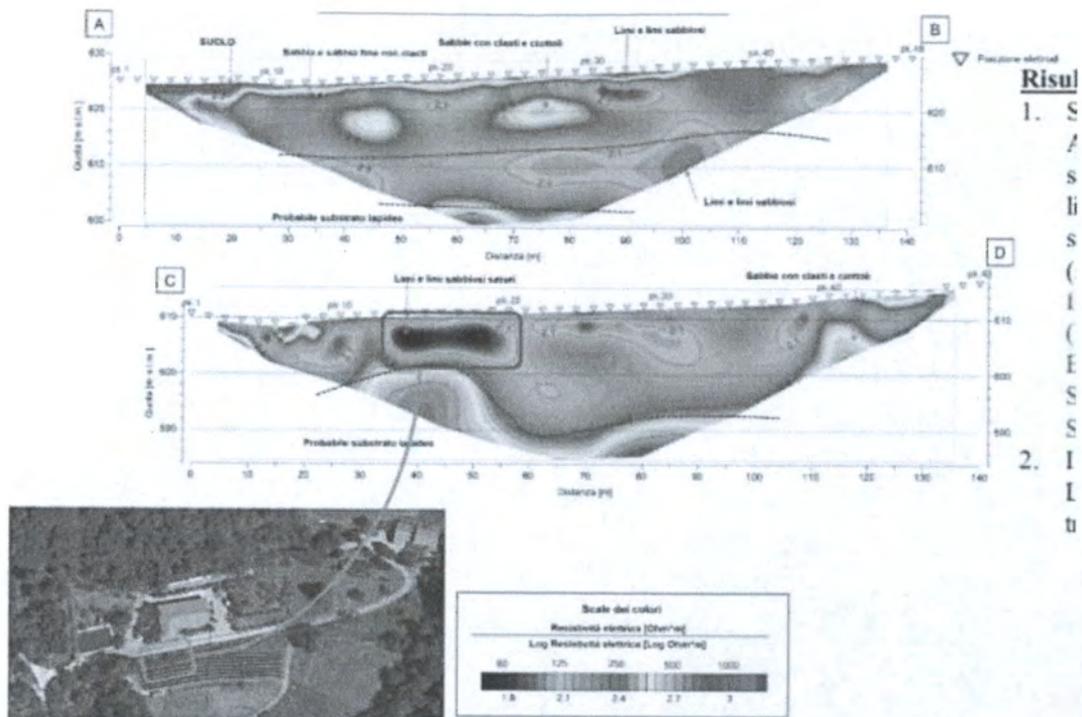
Id. 338-B1

16 ft (4.9m)
38 ft (11.6m)

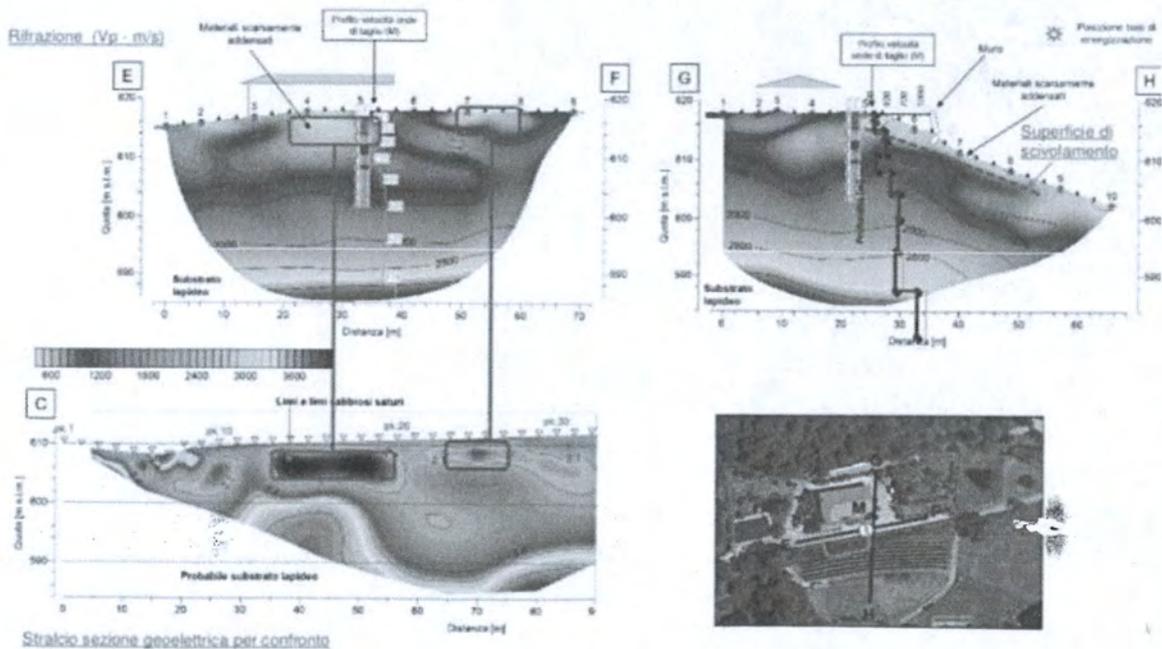


Id. 124-B2

40 ft (12.2m)
41 ft (12.5m)

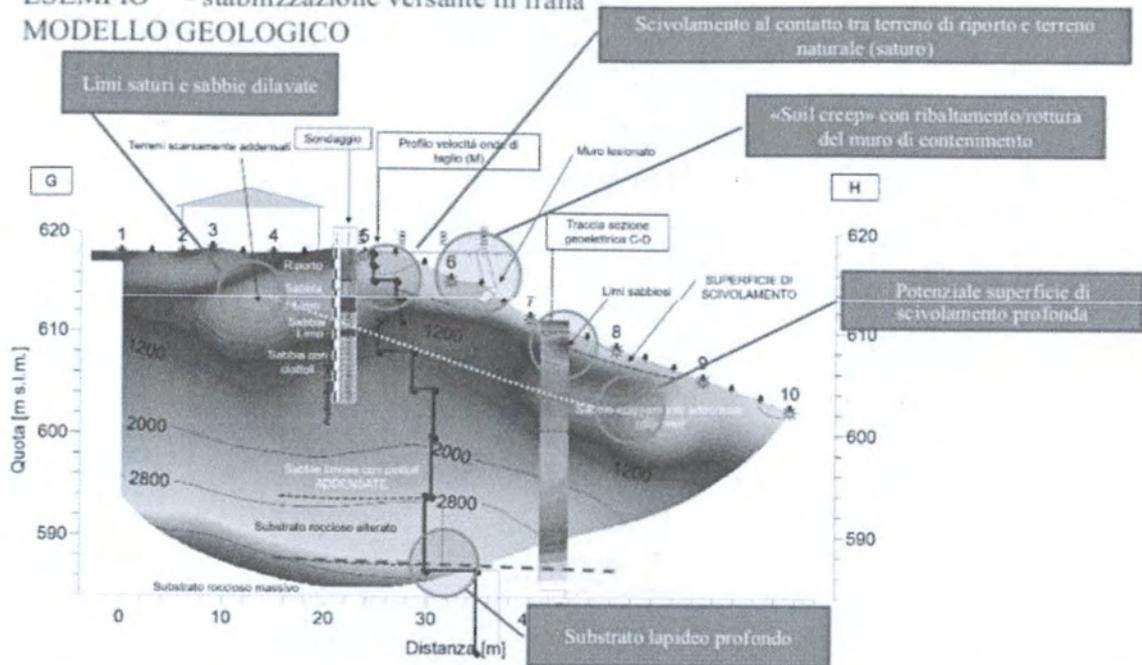


L'indagine sismica a rifrazione dà una rispondenza con quanto visto nell'indagine geoelettrica, in quanto si individua un'area a bassa velocità di propagazione delle onde sismiche. Questo, infatti, indica la presenza di un materiale poco denso e dunque con probabile presenza d'acqua. Nell'altra sezione, si evidenzia una zona superficiale a bassa velocità di trasmissione del segnale e dunque costituita da materiale poco denso.



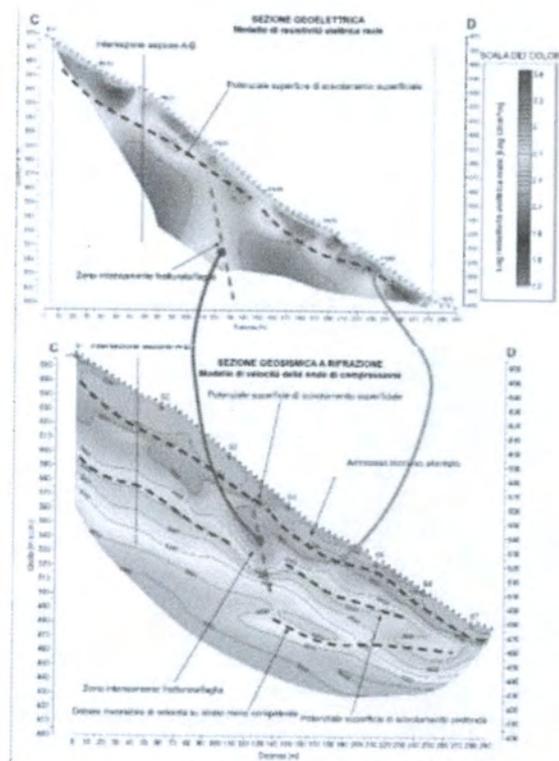
Il profilo MASW sfrutta la propagazione delle onde superficiali per ricavare in maniera indiretta il profilo della velocità di propagazione delle onde di taglio con la profondità.

ESEMPIO - stabilizzazione versante in frana
MODELLO GEOLOGICO



In base a questo modello, il muro preesistente poggiava direttamente sul terreno di riporto, avente bassa resistenza ed elevato contenuto d'acqua, e pertanto è collassato.

In questa situazione, occorre valutare come il versante risponde alle variazioni del livello d'acqua ed, eventualmente, intervenire con un sistema di drenaggio, prima di procedere con altri interventi di stabilizzazione.



L'esecuzione di più sondaggi è fondamentale perché permette di accoppiare un dato indiretto con un dato certo, in quanto lo conferma – avviene una taratura del sistema.

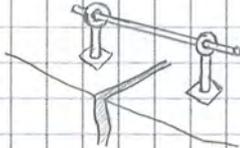
È così possibile definire il profilo, ma localmente è necessario eseguire almeno un sondaggio geognostico per effettuare l'accoppiamento del dato indiretto con il dato certo, ossia il dato del sondaggio, che restituisce il tipo di materiale. I metodi indiretti, del resto, forniscono un'informazione estesa ma indiretta e necessita di una conferma.

II Monitoraggio di superficie

Esso è impiegato nello studio della cinematica dei movimenti e della geometria del corpo di frana.

→ Estensimetri di superficie

Essi sono impiegati per misurare lo spostamento relativo tra due punti di misura posti ai due lati di una FRATTURA. Le due estremità sono ancorate sui lati della frattura.



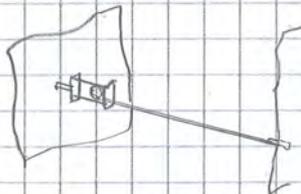
Si usano estensimetri a barra quando la distanza tra i due punti è $1 \div 3$ m.
Si usano estensimetri a filo per distanze più elevate ($5 \div 50$ m).

Lo spostamento di uno dei punti di misura modifica la lunghezza del filo e lo spostamento è registrato da un sensore che lo trasmette alla centralina.

Lo strumento può essere monodirezionale, bidirezionale o tridirezionale, in quanto la discontinuità può presentare un movimento di apertura, scorrimento o abbassamento. In questo modo, si ottiene l'informazione sul meccanismo di possibile instabilizzazione.

→ Distometri a nastro

È uno strumento di misura manuale e l'operatore, periodicamente, prende almeno 3 misure manuali. La media costituisce il valore di riferimento.



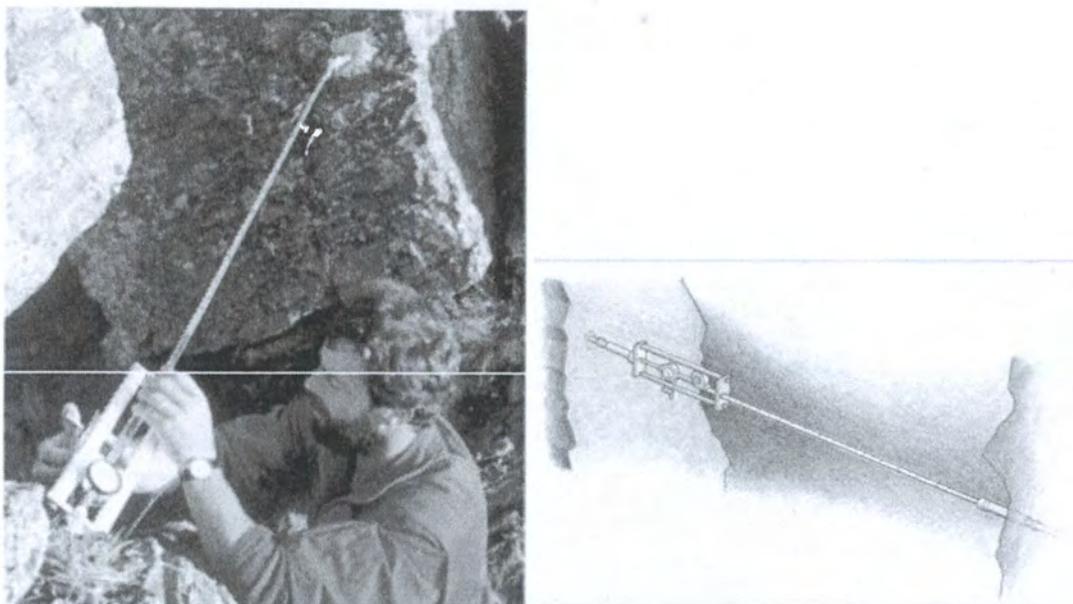
Di fatto, lo strumento è installato in sito e si esegue periodicamente la misura.

Anche se economico, il sistema presenta un problema di accessibilità dell'opera.

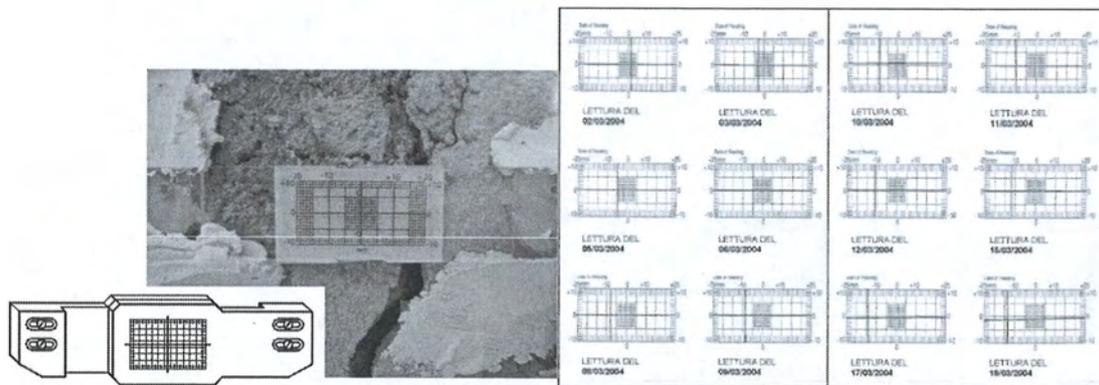


la scelta è dettata da costi, accessibilità e allerta

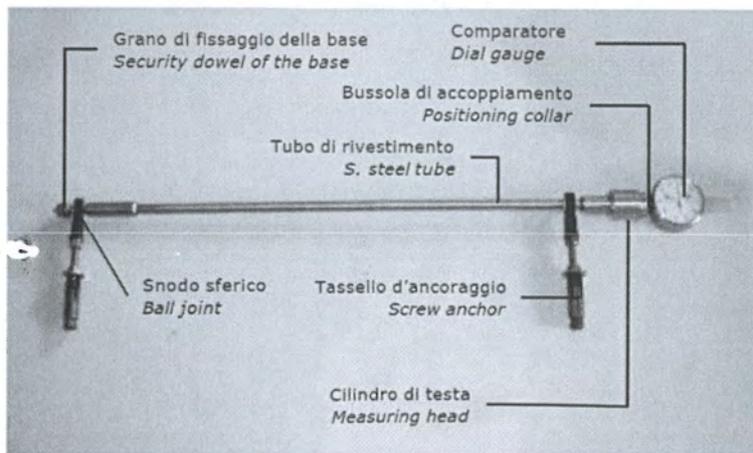
Distometri a nastro



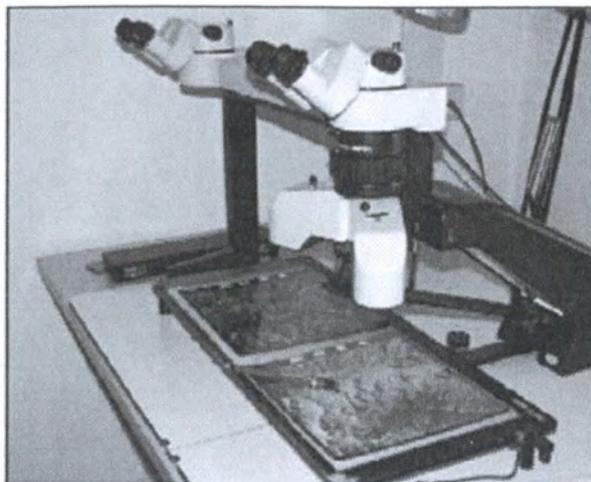
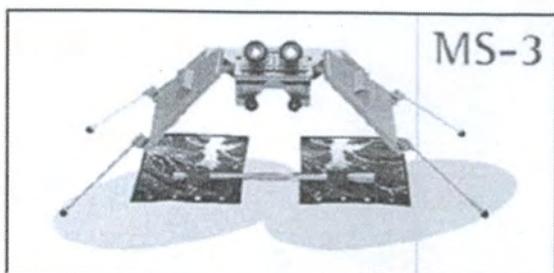
Fessurimetri lineari



Fessurimetri meccanici



FOTOGRAMMETRIA





Il sistema opera in continuo, in modo da avere una previsione del crollo e il tempo necessario per intervenire, in quanto è fissato un livello di allerta. Siccome il livello di allerta è elevato, a causa della presenza di zone direttamente esposte, è necessario un sistema di trasmissione automatica dell'informazione, in grado di dare anche l'eventuale allerta.

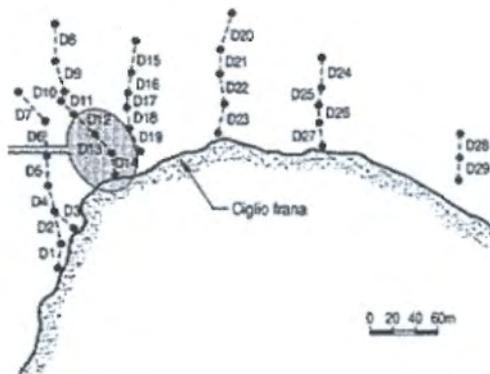
In questo caso, la soglia associata al livello d'allerta corrisponde a un determinato valore di apertura delle fratture, tale che porti all'attenzione ma non ancora all'instabilizzazione. La soglia d'allerta è piccola e pari a 2,5 mm.

I dati di spostamento nel tempo degli estensimetri sono stati sovrapposti con l'andamento della temperatura, che presenta le fluttuazioni connesse all'andamento giornaliero.

Si nota che due strumenti non risentono dell'andamento della temperatura (almeno nel periodo in esame), mentre il terzo strumento presenta un'oscillazione smorzata di apertura-chiusura giornaliera.

ESTENSIMETRI DI SUPERFICIE: CIGLIO DELLA FRANA DI VAL POLA

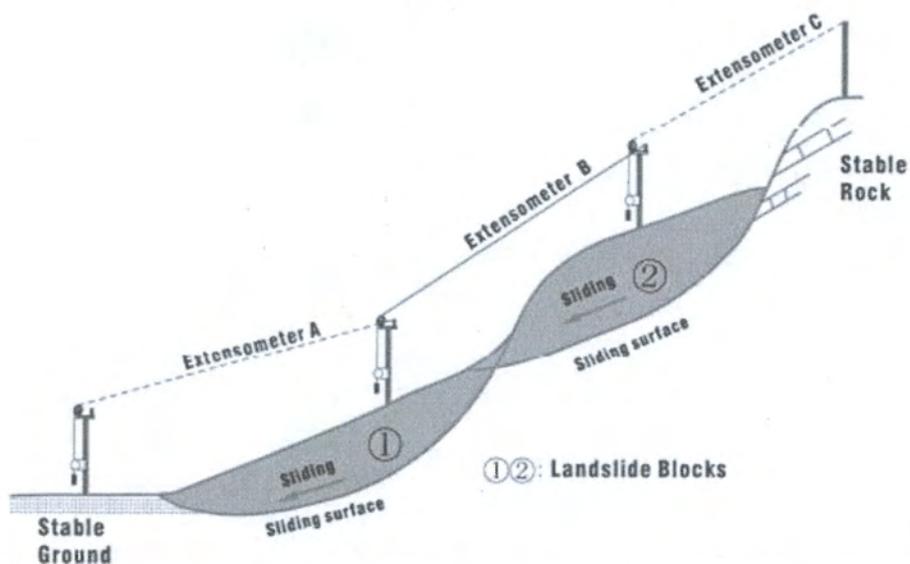
All'interfaccia tra il coronamento e la scarpata principale si è individuata una serie di fratture che tendono a separare un volume di roccia, dopo il distacco della frana principale nel 1987. È stato allora installato un sistema di estensimetri per misurare la variazione di apertura delle fratture.



Queste, a un certo punto, hanno messo in evidenza una marcata accelerazione nell'apertura, seguita qualche giorno dopo da un crollo.



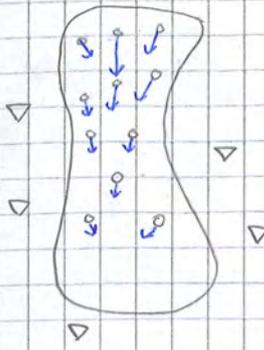
Del resto, l'estensimetro rappresenta un utile strumento per i sistemi d'allerta nelle frane attive in versante.



In questo caso, si è optato per installare degli estensimetri a filo per il monitoraggio degli spostamenti. Del resto, non è presente una specifica frattura da monitorare, bensì si valuta lo spostamento di una massa più estesa.

Gli ancoraggi degli strumenti sono collocati nella zona stabile a monte e a valle del corpo di frana, cui si aggiungono due ancoraggi all'interno dei due blocchi, in modo da vedere gli effetti dello spostamento di versante e identificare le accelerazioni delle due porzioni.

Di fatto, esiste una quasi perfetta rispondenza tra accelerazioni e piogge, che si è evidenziata incrociando l'informazione di precipitazione con l'informazione dello spostamento.



Il metodo prevede di realizzare una rete di prismi riflettenti collocati sul corpo di frangente e dei capisaldi nella zona intorno al movimento, come punti di riferimento.

Periodicamente, si eseguono misure di azimut, inclinazione e distanza dei prismi dai capisaldi e si valuta come si evolve lo spostamento nel tempo.

Lo spostamento è rappresentato da frecce che danno la direzione di spostamento e di lunghezza proporzionale all'entità.

Il sistema topografico è utile a capire se ci sono movimenti

→ FRECCE CASUALI: la massa non è in movimento

→ FRECCE ISO-ORIENTATE: è indice di un movimento in corso. L'entità della freccia aiuta a definire le diverse porzioni del corpo frangente (l'area attiva, dove il movimento è più rapido).

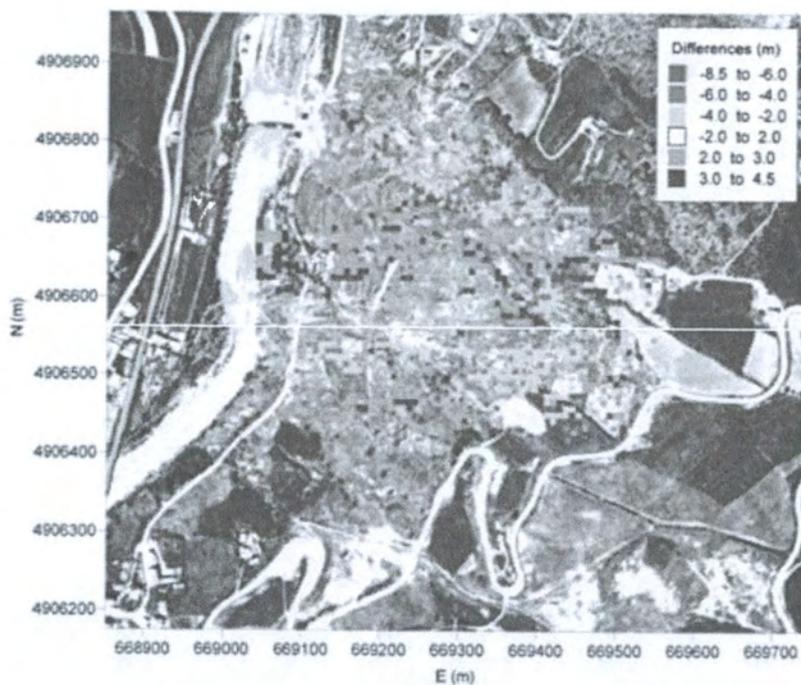
Il sistema ha un limite tecnico, legato alla possibilità di disporre di una posizione opposta in cui installare il sistema di misura.

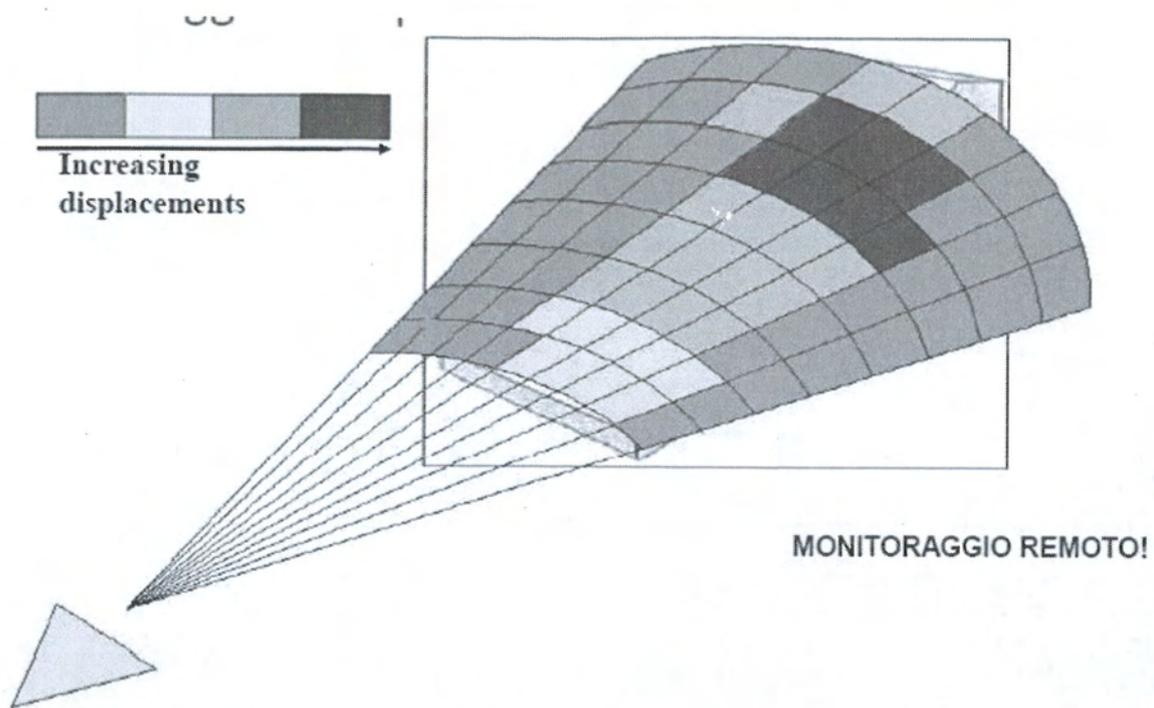
→ Fotogrammetria

Questo è un sistema che sfrutta immagini analogiche o digitali riprese da aereo o satellite.

Le immagini sono sovrapposte almeno del 60% e, con un sistema ottico, si riesce a visualizzare un'immagine 3D.

Il sistema è utile per l'analisi di aree di versante e valutare e identificare le tracce di evoluzione nel tempo.





→ SAR:

Il SAR (Synthetic Aperture Radar) consiste in un'antenna RADAR montata su una piattaforma mobile e segue lo stesso principio di funzionamento dei sistemi RADAR.

Il SAR è impiegato per ricostruire l'andamento topografico e deve dare un'informazione quanto più dettagliata possibile. Il grado di taglio è tanto più grande quanto più è grande l'apertura dell'antenna del RADAR e, per ottenere una precisione metrica, sarebbe necessario usare un'antenna di dimensioni chilometriche, ma questo non è possibile.



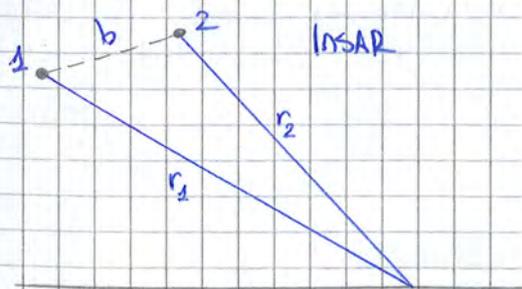
Il SAR, però, sintetizza la dimensione di un'antenna chilometrica attraverso lo spostamento di un'antenna di dimensioni inferiori.

In questo modo, l'antenna lancia l'onda da una certa posizione e, quando torna la componente riflessa, l'antenna si è spostata un poco e la tocca in un punto diverso, come se toccasse un punto diverso di un'antenna più grande.

Il fatto di toccare non lo stesso punto fa sì che cambi l'apertura dell'antenna.

Come si sfrutta il SAR per il monitoraggio di superficie?

Una tecnica di trattamento dei dati SAR è l'interferometria SAR e questa permette di ricostruire l'andamento altimetrico della superficie terrestre.



Lo schema di riferimento prevede di considerare due satelliti (o un satellite che si sposta) a distanza b molto inferiore rispetto alle distanze misurate r_i

$$b \ll r_i$$

Nella posizione 1, il satellite manda il segnale. Questo impatta contro la superficie (assunta orizzontale) nel punto in esame a distanza r_1 . Il segnale poi torna nella posizione 2.

Si nota che la Fase φ del segnale è composta da due parti

→ termine di propagazione φ_p

→ termine di retrodiffusione φ_b

Sequendo il ragionamento, dal segnale si può ottenere l'**interferogramma differenziale**, che è un diagramma contenente i soli contributi di spostamento del suolo. Per ottenerlo, si rimuove la quota dell'angolo di incidenza e la quota della topografia, che sono noti dai dati sulla traiettoria del sensore e dal DEM.

$$\varphi_d = \varphi - \varphi_t - \varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} \Delta r$$

$$\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$$

$$\varphi_f = \frac{4\pi}{\lambda} b \sin(\alpha' - \beta)$$

$$\varphi_t = \frac{4\pi}{\lambda} b_2 \frac{z}{r_2 \sin \theta}$$

Il DInSAR consente una misura areale dello spostamento del suolo, raggiungendo buone accuratèzze di misura (fino al mm). D'altra parte, lo spostamento è misurato solo rispetto alla linea di vista e indica solo se c'è allontanamento o avvicinamento. Per poter avere le componenti di spostamento nelle diverse direzioni, occorre integrare l'informazione di spostamento con misure localizzate, ad es. GPS.

Un ulteriore sistema è il **permanent scatterers interferometria SAR (PS - InSAR)**.

La tecnica prevede di installare non prismi sul territorio, bensì di usare dei riflettori naturali stabili, detti permanent scatterers.

Di fatto, si realizza una rete geodetica naturale in cui si analizzano gli elementi per identificare dove avvengono gli spostamenti e le variazioni di quota.

In questo modo, si identificano immediatamente zone di subsidenza o di frana, senza fare sopralluoghi.

Il PS-InSAR consente di fare misure 3D e avere un dato areale a elevata risoluzione, ma è costoso e l'interpretazione dei dati è complessa.

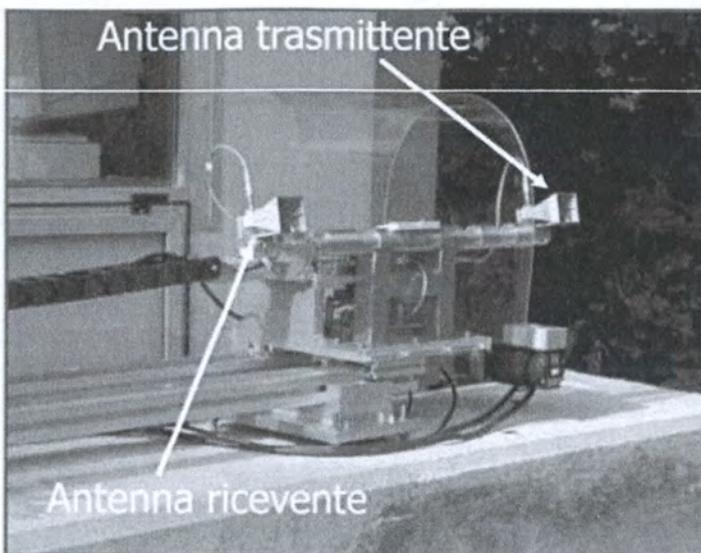
Il **ground-based interferometria SAR (GB-InSAR)** è un sistema RADAR che sfrutta lo stesso meccanismo dei satelliti RADAR, però a scala ridotta a terra.



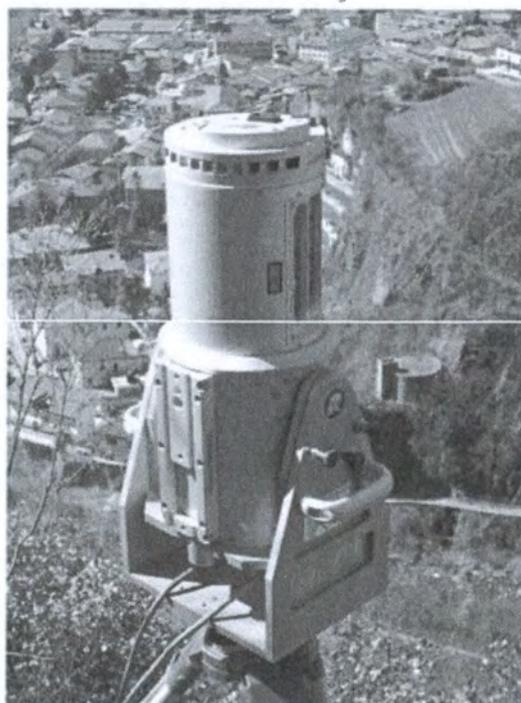
La sintesi di apertura RADAR, infatti, è ottenuta con un movimento di un'antenna più piccola posta a terra, in cui un sensore RADAR è costituito da due antenne che emettono e ricevono segnali e sono spostate lungo un binario rettilineo lungo qualche metro.

Si ricrea così, a piccola scala, il moto dell'antenna rispetto al punto osservato.

GB-InSAR

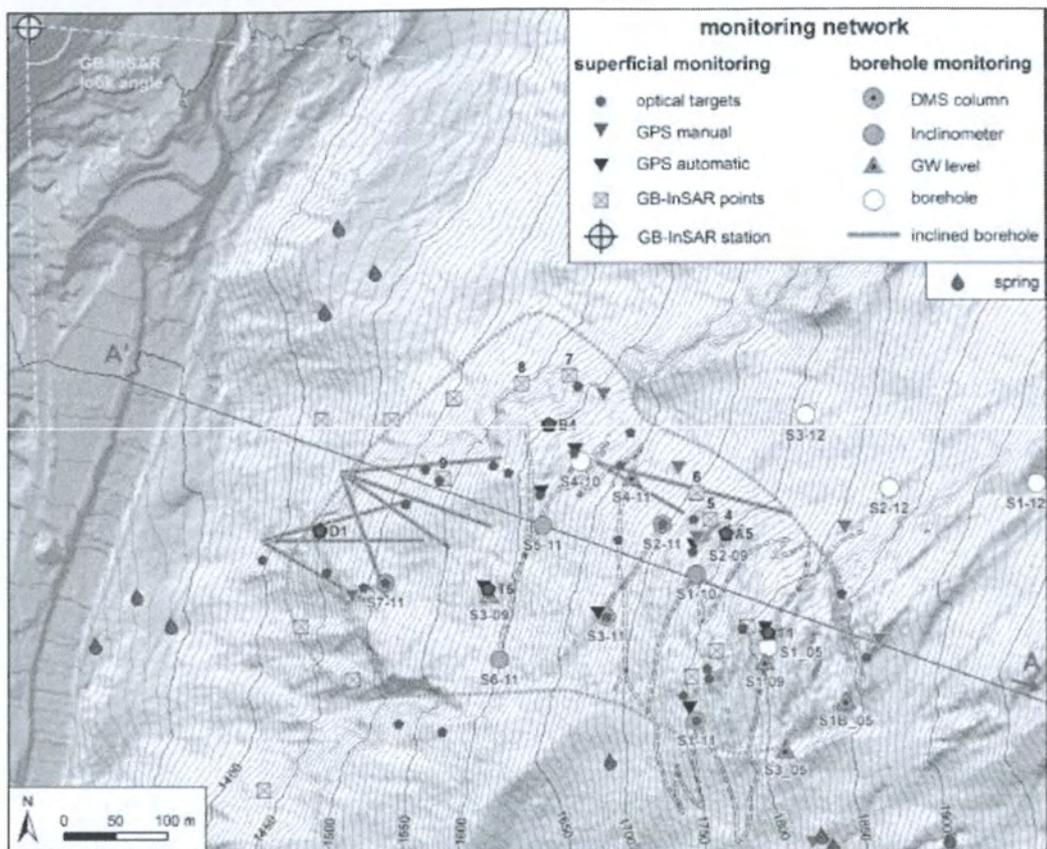


Laser scanner

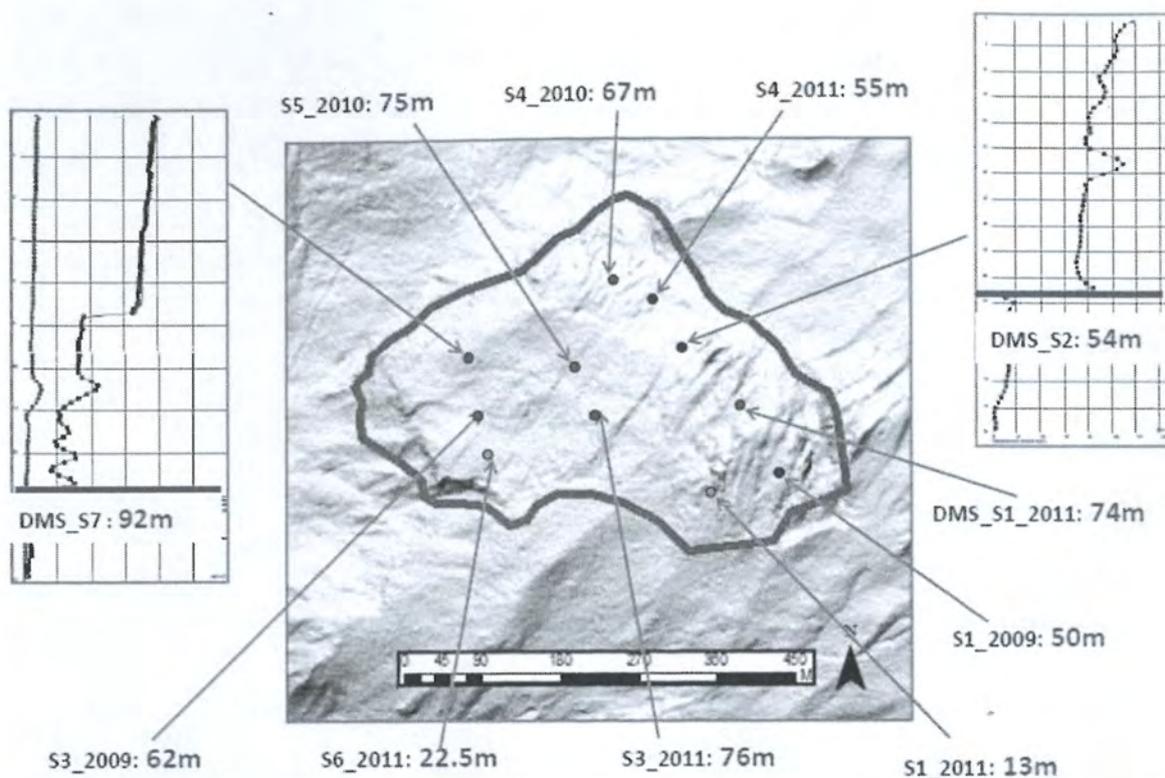


FRANA DI LA SAXE

Per questo movimento franoso, è stata installata una rete di monitoraggio costituita da strumentazione di diverso tipo.



A ciascuno strumento installato in foro è associato uno storico, che indica la profondità del foro di sondaggio, il tipo di strumentazione installata in foro e la profondità alla quale si è rilevata la superficie di scivolamento, ove possibile.

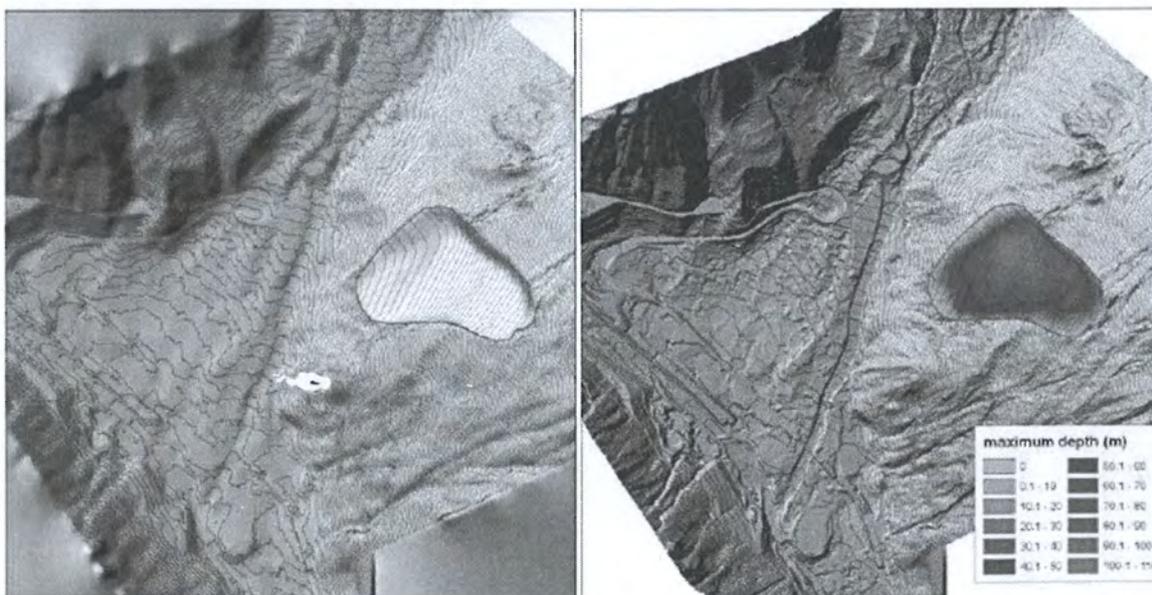


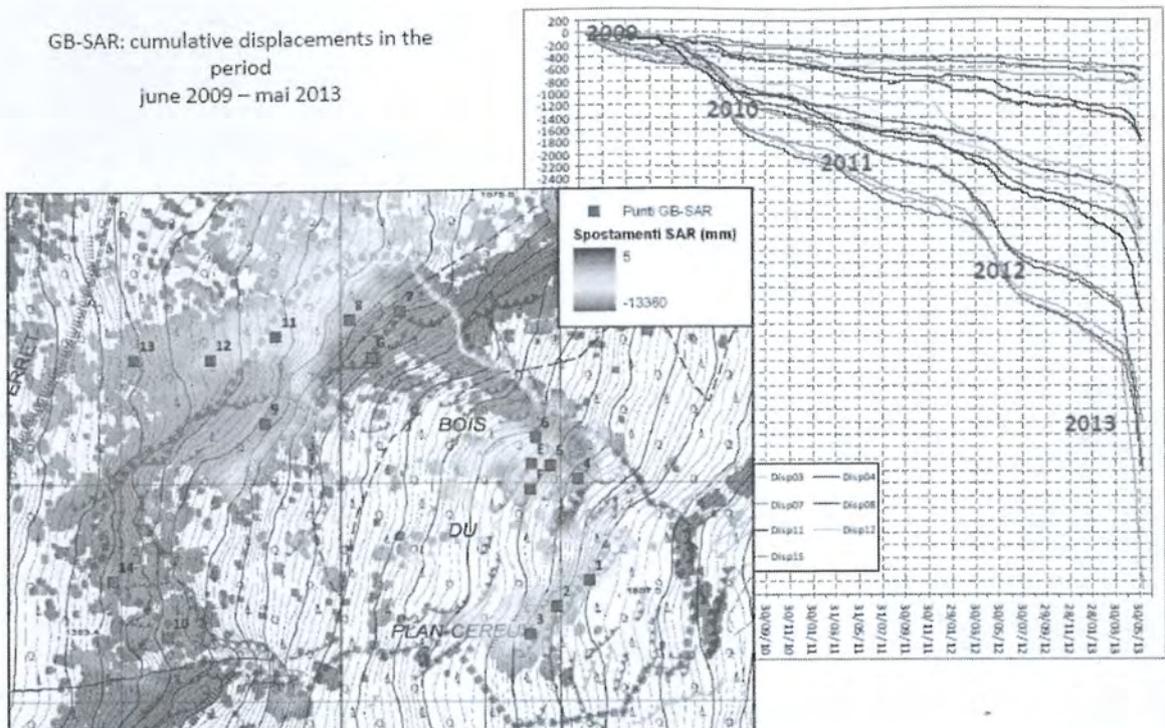
In questo modo, si ha a disposizione una maglia di punti ai quali si associa una profondità della superficie di scivolamento e da qui si può interpolare un modello che restituisce l'andamento possibile della superficie di scivolamento.

Accoppiato all'andamento topografico, il modello permette di ricavare la distribuzione degli spessori del corpo frana e avere una stima della volumetria potenzialmente instabile, che è circa 8,3 milioni di m³.

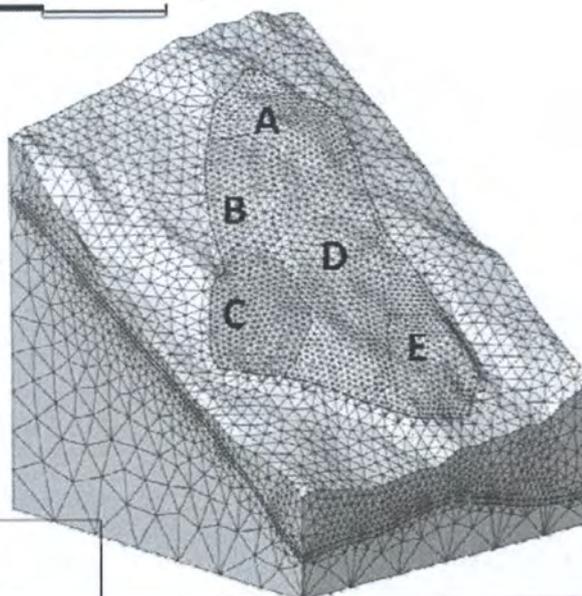
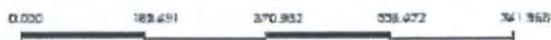
Andamento superficie di rottura

Carta degli spessori





L'incrocio dei dati di superficie e in profondità, integrata con le conoscenze geologiche sull'andamento stratigrafico della zona, ha permesso di ricostruire le caratteristiche del versante. In particolare, l'area complessiva di frana è stata suddivisa in sottoporzioni aventi un diverso grado di attività e diversa volumetria, delle quali le zone B e C sono le zone più attive. Da ciò, è stato possibile definire degli *scenari di distacco*, cui si associano le stime delle relative volumetrie.



SCENARIO 1: B + C: 650.000 m³
SCENARIO 2: A+B+C+D+E: 8.300.000 m³

5 Costruzione del modello geomeccanico

Il passaggio dal modello geometrico al modello geomeccanico prevede di aggiungere, alle informazioni geometriche, altri due elementi.

- **cause** (sisma, pressioni interstiziali, decadimento della resistenza)
- **parametri di resistenza dell'ammasso** che costituisce il versante:

è necessario caratterizzare il materiale che costituisce il versante, tramite prove di laboratorio o in sito, in modo da identificare la **LEGGE COSTITUTIVA**, cioè il legame sforzi - deformazioni. Nel modello e nel codice di calcolo, infatti, bisogna indicare come si comporta il materiale.

I Cause

I principali fattori che influenzano la franosità sono

- **fattori geologici**, come la sovrapposizione di strati di materiale e presenza di faglie e fratturazione.
- **fattori morfologici**, cioè la pendenza dei versanti
- **fattori idrogeologici**, cioè la condizione di falda all'interno del versante, la presenza di movimenti dinamici di falda e i meccanismi di circolazione idrica all'interno del versante.
- **fattori climatici** (variazioni di temperatura, piogge) e **vegetazionali** (disboscamenti e incendi).
- **fattori antropici**, come scavi, riporti (variazioni di morfologia del versante), disboscamenti e abbandono delle terre.

Più in generale, le cause possono essere classificate con e

- **cause predisponenti**, che danno luogo alla configurazione potenzialmente instabile e sono connesse ai fattori geologici, morfologici e idrogeologici.
- **cause scatenanti**, che sono il singolo evento che ha portato all'instabilizzazione del versante e sono connesse ai fattori climatici, vegetazionali, antropici e ad eventi sismici o vulcanici.

Interviene anche la DIMINUZIONE DI RESISTENZA AL TAGLIO DEL TERRENO:

se si considera una certa superficie potenzialmente instabile, nei diversi punti che la costituiscono sussiste equilibrio tra azioni e resistenze.

Quando avviene l'instabilizzazione della zona, non c'è la riduzione del fattore di sicurezza al di sotto di 1 su tutta la superficie nello stesso istante, ma si manifesta una **rottura progressiva**.

Ad es. nella zona al piede, per effetto della variazione delle condizioni di tensione, si può giungere all'equilibrio limite (tensione agente eguaglia la resistenza). se poi il fattore di sicurezza scende sotto l'unità, comincia la propagazione della possibile rottura ma la restante parte del versante si trova in condizioni di resistenza superiore all'azione.

La variazione di stato tensionale al piede ha come effetto la redistribuzione degli sforzi nelle zone limitrofe del versante, con parziale trasferimento della domanda a un'altra parte, meno sollecitata, della superficie di scivolamento.

Questa redistribuzione, da sola o abbinata ad altre cause scatenanti, porta un'altra porzione di versante all'instabilità.

se si considera il grafico resistenza - scorrimento, questo indica la presenza di una RESISTENZA DI PICCO, corrispondente al primo innesco, seguita da un decadimento a una RESISTENZA RESIDUA.

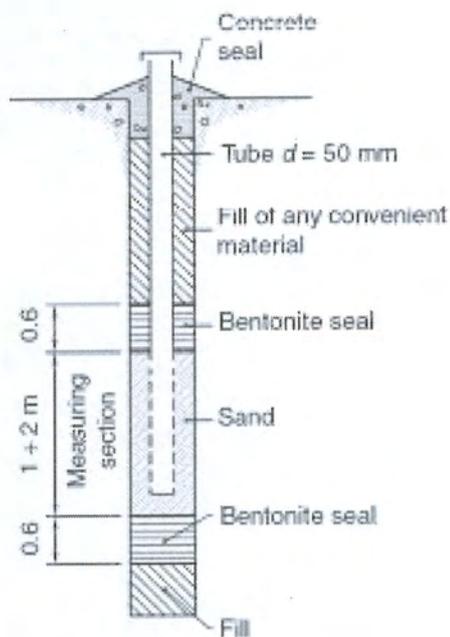
Il primo scorrimento richiede uno sforzo maggiore perché interviene lo scavalcamento delle asperità, mentre dopo l'innesco le asperità giocano un ruolo minore e la resistenza diminuisce.

A un certo punto, è presente una serie di potenziali superfici di scivolamento che si trovano sotto la condizione di sicurezza e da lì il movimento si innesca.

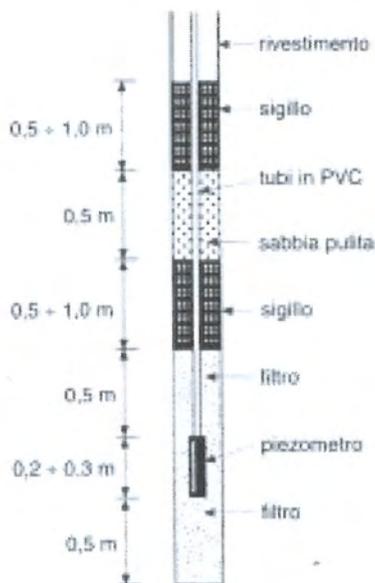
In condizioni di equilibrio limite del pendio, il valore medio pesato della resistenza al taglio mobilitata lungo la superficie di scorrimento è intermedio tra la resistenza di picco e la resistenza residua.



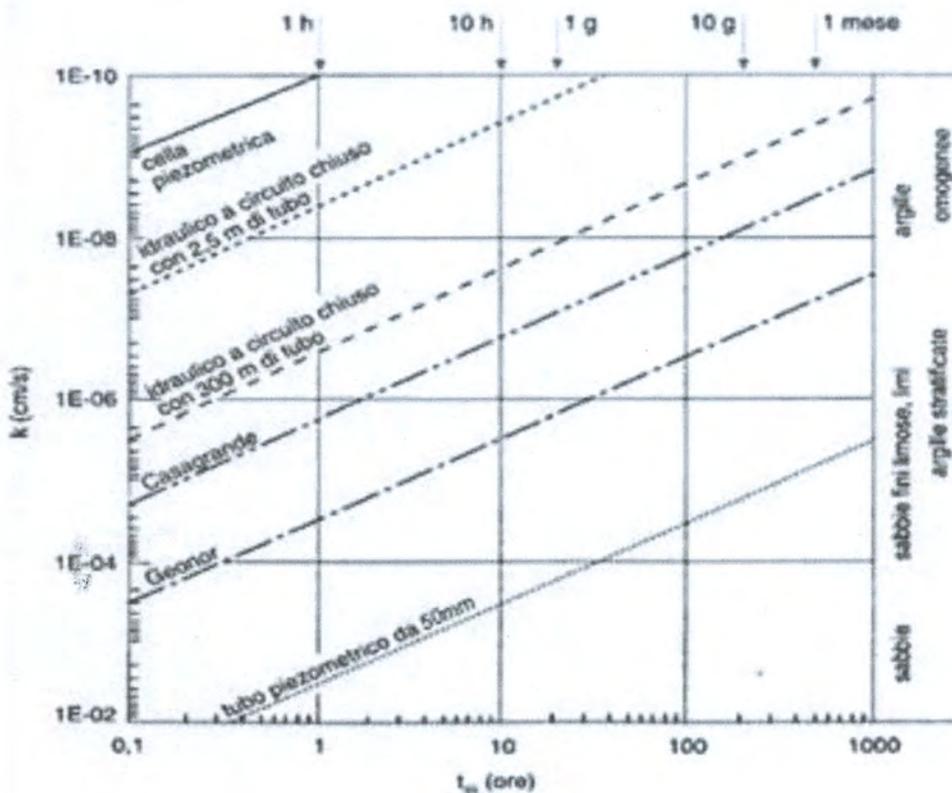
PIEZOMETRI



A tubo aperto



Casagrande



II Parametri di resistenza

I parametri della legge costitutiva del materiale si ricavano tramite

→ PROVE DI LABORATORIO (parametri di resistenza c' , φ')

→ PROVE IN SITO:

esse sono applicate specialmente su sabbie, che non sono materiali campionabili e caratterizzabili in laboratorio in quanto, al prelievo, si modifica la struttura. Ciò si traduce in una variazione di densità relativa, da cui dipendono le proprietà. Le prove in sito hanno diversi obiettivi.

→ ricostruzione del profilo stratigrafico mediante sondaggi, prove penetrometriche e dilatometri.

→ individuazione del livello di falda, mediante piezometri, sondaggi e pozzi.

→ definizione delle caratteristiche di permeabilità.

→ definizione dei parametri di deformabilità.

→ definizione dei parametri di resistenza al taglio.

→ definizione della pressione orizzontale a riposo.

Dalle prove in sito, la determinazione dei parametri può essere diretta o indiretta. Per es. la ricostruzione della stratigrafia con il penetrometro è indiretta perché è ottenuta interpretando il dato di resistenza a infissione del terreno.

Da qui, si dispone di tutti gli elementi per costruire il modello geomeccanico

$$\begin{array}{r}
 \text{Area} \quad \text{Volume} \quad \text{Cinematismo} \\
 + \\
 \text{Cause} \quad \text{Proprietà geotecniche} \\
 = \\
 \text{Modello geomeccanico}
 \end{array}$$

⊖ Metodi dell'equilibrio limite

Questi metodi sono impiegati allo studio di innesco di diversi cinematismi.

⊖ Ia) Toppling

Il fenomeno di ribaltamento si divide in due tipologie.

→ **ribaltamento di tipo primario**, in cui il cinematismo avviene singolarmente.

→ **block toppling**:

è il ribaltamento di una successione di blocchi di roccia adiacenti e scanditi da un sistema di discontinuità che immerge nel versante e lo divide in colonne e un sistema ortogonale che delimita superiormente e inferiormente le colonne.

Il fenomeno è tipico di rocce sedimentarie o rocce vulcaniche.

→ **flexural toppling**:

è un ribaltamento che avviene in formazioni rocciose con un unico sistema di discontinuità pseudoverticale, che divide in "fette" il versante.

Ogni colonna è assimilabile a una trave soggetta a flessione.

Il meccanismo è diverso e deve essere studiato con un codice diverso rispetto al block toppling.

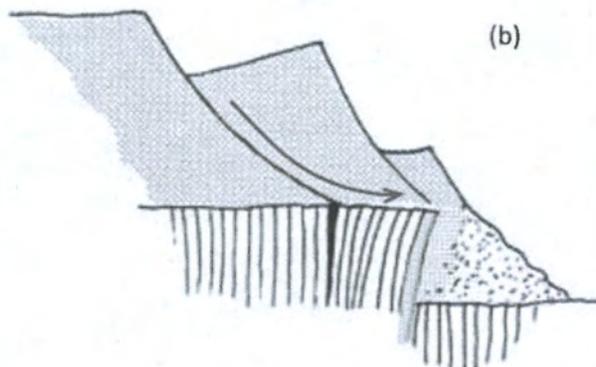
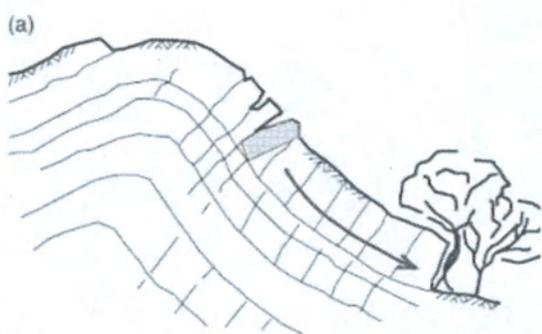
Il fenomeno è tipico delle ardesie, filladi e scisti.

→ **block-flexure toppling**:

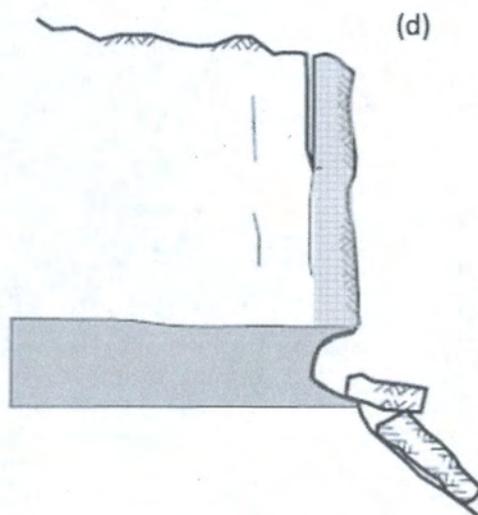
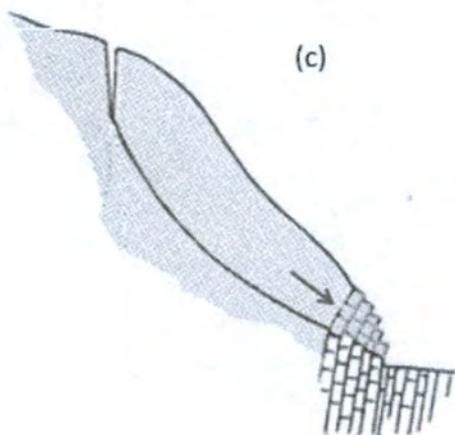
è un ribaltamento che avviene in un ammasso diviso da due sistemi di giunti ortogonali in colonne formate da blocchi sovrapposti.

Questo è un doppio meccanismo, in cui l'inflessione delle colonne si manifesta attraverso una graduale rotazione dei blocchi che le costituiscono.

Slide-head-toppling e slide-base-toppling



Slide-toe-toppling e toppling and slumping of columnar rock



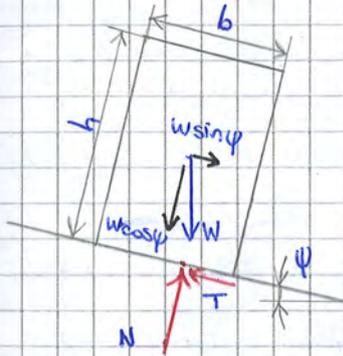
Noto il meccanismo, occorre valutare tutte le sollecitazioni agenti sulla porzione in esame.
 Nell'analisi dei fenomeni di ribaltamento, si possono affrontare due tipi di problemi,

- stabilità del singolo blocco
- stabilità di una scarpata costituita da più blocchi

Si parte dall'analisi di **Stabilità del singolo blocco**.

Per il singolo blocco, esistono due modalità di instabilizzazione, che devono essere entrambe verificate

- ribaltamento
- scorrimento



Dato un blocco di forma parallelepipedica, esso è soggetto alla forza peso w e alla reazione del blocco a contatto con il terreno, secondo le componenti T e N .

Ci si focalizza sulla **VERIFICA A SCORRIMENTO**;

il fattore di sicurezza nei confronti dello scorrimento si calcola come

$$FS = \frac{T_R}{T_A} = \frac{N \tan \psi}{T} \quad (1)$$

Le forze di reazione N e T sono note dalle equazioni di equilibrio alla traslazione

Traslazione in direzione parallela al piano d'appoggio

$$W \sin \psi - T = 0$$

Traslazione in direzione normale al piano d'appoggio

$$W \cos \psi - N = 0$$

$$\Rightarrow T = W \sin \psi \quad N = W \cos \psi$$

Combinando le due condizioni, si ottiene

$$\left. \begin{array}{l} \text{scorrimento} \quad \tan \varphi > \tan \psi \\ \text{ribaltamento} \quad \tan \psi \leq \frac{b}{h} \end{array} \right\} \Rightarrow \tan \varphi > \frac{b}{h}$$

$$\tan \varphi > \frac{b}{h}$$

Condizione limite di ribaltamento che previene lo scivolamento.

Per vedere come i meccanismi di scorrimento e ribaltamento interagiscono, si considera un diagramma con

asse $y =$ rapporto b/h

asse $x =$ inclinazione ψ del piano di appoggio

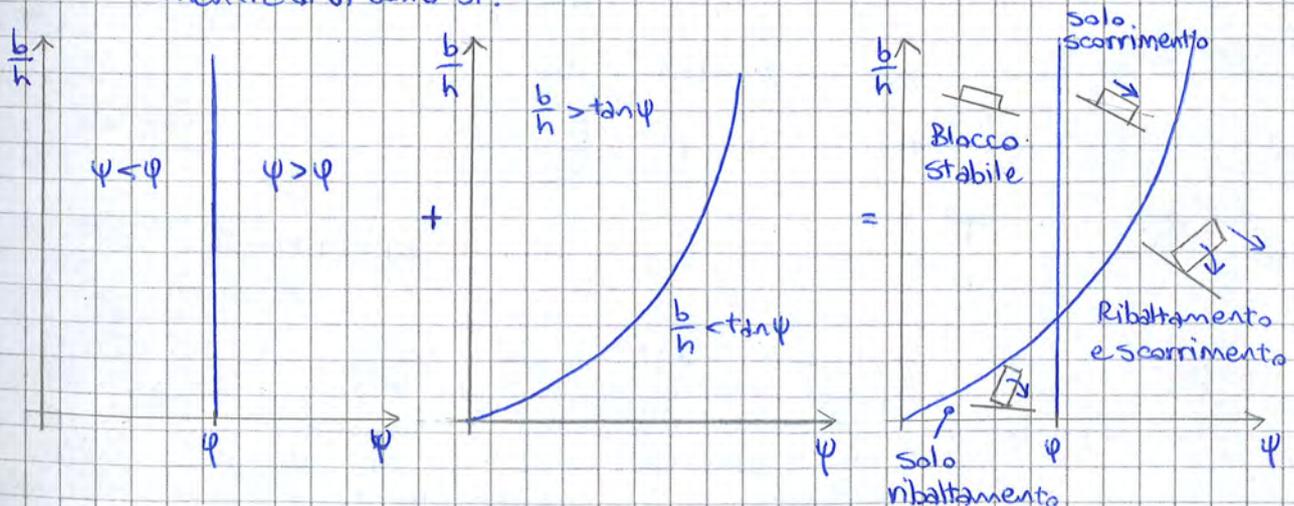
Se si analizza la condizione di scivolamento, la condizione di equilibrio limite è data dal valore φ che equaglia la resistenza a taglio φ .

A sinistra ($\psi < \varphi$) non c'è scorrimento, a destra ($\psi > \varphi$) si è in condizione di instabilità per scorrimento.

Se si analizza la condizione di ribaltamento, la relazione

$$\frac{b}{h} = \tan \psi$$

definisce una curva, al di sopra della quale non c'è ribaltamento, mentre al di sotto sì.



Combinando i grafici, si individuano delle regioni che corrispondono ai diversi meccanismi di instabilità.

→ blocco stabile a fronte di scorrimento e ribaltamento

Si passa dunque all'analisi di **stabilità di una scarpata costituita da blocchi**.

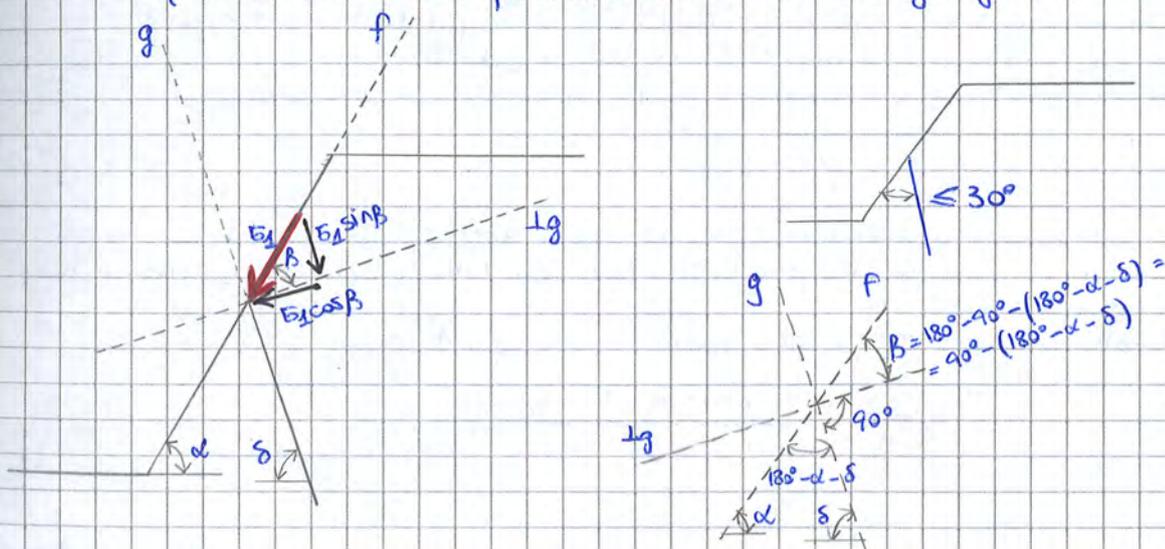
In genere, un versante si trova in una condizione complessa, con diversi gradi di combinazione tra i blocchi.

Si introduce innanzitutto la **verifica preliminare di stabilità per flexural toppling**:

nel flexural toppling, è presente un'unica famiglia di discontinuità che divide il versante in colonne che sono schematizzate come travi incastrate soggette a flessione.

Occorre eseguire una verifica preliminare all'analisi di stabilità del versante che consiste nel verificare che, lungo i giunti, esista cinematicamente la possibilità di scorrimento lungo i giunti. Questa è infatti una condizione necessaria per il ribaltamento, poiché il blocco ribalta al piede ma scivola anche lungo il giunto.

La verifica preliminare si esegue quando la direzione dei giunti rispetto al fronte del versante forma un angolo massimo di 30° , perché solo così è possibile lo scorrimento lungo i giunti.



Si assume che lo sforzo principale massimo E_1 sia parallelo al fronte. Esso è scomposto in direzione parallela e normale al giunto.

$$E_1 \sin \beta \quad E_1 \cos \beta$$

L'angolo β si calcola come

$$\beta = \frac{\pi}{2} - (\pi - \alpha - \delta) = \alpha - (90^\circ - \delta)$$

dove α è la giacitura del fronte e δ è la giacitura dei giunti.

Si introduce poi l'analisi all'equilibrio limite del block toppling.

A tal scopo, si ricorre al metodo di Goodman & Bray:

in questo metodo, un generico blocco può subire un cinematico di scorrimento o di ribaltamento, ma non entrambi.

⇒ un singolo blocco si trova in equilibrio precario per scorrimento o ribaltamento

L'obiettivo è analizzare le condizioni dei singoli elementi che costituiscono il versante, in modo da capire dove localizzare gli interventi.

Di fatto, l'elemento chiave per la stabilizzazione del versante è l'elemento al piede del versante.

IPOTESI → la base di appoggio delle colonne è costituita da gradoni

→ Sono presenti due sistemi di discontinuità mutuamente ortogonali e con spaziatura regolare, che implica uguale larghezza dei blocchi

→ coesione nulla lungo le discontinuità

→ l'attrito che si sviluppa tra l'elemento e la superficie inferiore è uguale all'attrito che si sviluppa tra l'elemento e i blocchi che lo confinano lateralmente.

→ il pendio è in condizioni drenate, cioè non c'è acqua lungo i giunti

→ assenza di forze orizzontali

LIMITAZIONI → la condizione di instabilità è espressa attraverso il fattore di sicurezza, che è riferito alla stabilità del blocco al piede ma è esteso a tutto il pendio

→ la superficie di rottura è scelta a priori e imposta.

L'altezza degli elementi si definisce a partire da 3 parametri costanti, legati alla larghezza e pendenza media.

→ differenza di altezza dei blocchi a valle della cresta

$$a_1 = \Delta x \tan(\vartheta - \alpha)$$

→ differenza di altezza dei blocchi a monte della cresta

$$a_2 = \Delta x \tan(\alpha - \varepsilon)$$

→ altezza della gradonatura su cui poggiano gli elementi.

$$b = \Delta x \tan(\beta - \alpha)$$

In questo modo, l'ALTEZZA dei singoli blocchi è calcolata geometricamente.

→ se il blocco è sotto cresta

$$y_n = n(a_1 - b)$$

→ se il blocco è sopra cresta

$$y_n = y_{n-1} - a_2 - b$$

Si nota che questa descrizione è poco precisa, poiché la differenza di altezza non è mai costante e la spaziatura del sistema di discontinuità non è mai tale che la larghezza delle colonne sia uguale, ma il modello è comunque in grado di cogliere gli aspetti principali e semplifica la realtà.

Nell'analisi, si identificano le forze agenti sul generico blocco n

→ Forza peso W_n

→ componente normale P_n e componente tangenziale Q_n delle forze esercitate dal blocco superiore sul blocco in esame

→ componente normale P_{n-1} e componente tangenziale Q_{n-1} delle forze esercitate dal blocco a valle sul blocco in esame.

↳ passando all'elemento a valle, queste forze assumono pedice n per il nuovo elemento ($n-1$ per le forze a valle; n per le forze a monte)

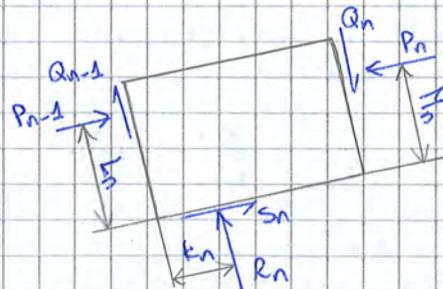
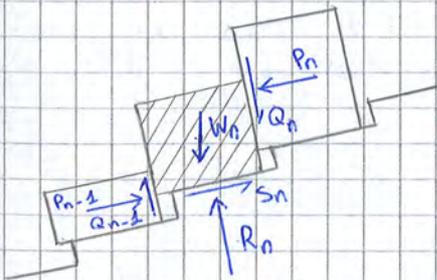
→ componente normale R_n e componente tangenziale S_n agenti alla base del blocco.

Le forze presentano dei bracci che intervengono nell'analisi a ribaltamento

L_n = braccio della forza P_{n-1}

M_n = braccio della forza P_n

k_n = braccio della forza R_n rispetto allo spigolo inferiore del blocco



Nella condizione di equilibrio limite a ribaltamento, i bracci sono noti perché, ragionando sul blocco isolato, l'equilibrio limite è raggiunto quando la risultante delle forze si trova in corrispondenza dello spigolo inferiore, rispetto al quale ruota il blocco ruotato. Ciò significa che

$$k_n = 0$$

poiché le forze R_n e S_n sono agenti sullo spigolo inferiore.

A questo punto, si può avviare l'analisi di stabilità, valutando l'equilibrio a ribaltamento e scorrimento per ogni blocco:

perché l'elemento sia stabile nei confronti del ribaltamento, è sufficiente che la snellezza non sia eccessiva.

$$\frac{\Delta x}{y_n} > \tan \alpha$$

Verifica preliminare a ribaltamento (9)

In queste condizioni, il blocco non ribalta grazie alla sua geometria.

Allo stesso tempo, occorre verificare che il blocco non sia soggetto a scivolamento:

il blocco è stabile nei confronti dello scorrimento se il fattore di sicurezza relativo alla base è tale che

$$FS = \frac{T_r}{T_u} = \frac{R_n \tan \varphi}{S_n} > 1 \Rightarrow \frac{S_n}{R_n} < \tan \varphi$$

$$\frac{S_n}{R_n} < \tan \varphi$$

Verifica preliminare a scorrimento (10)

La verifica preliminare è applicata elemento per elemento ed è eseguita nelle prime colonne della classica tabella di output del metodo di Goodman & Bray.

| Blocco | $\Delta x / y_n$ | $\tan \alpha$ | $\frac{S_n}{R_n} < \tan \varphi$ |
|--------|------------------|---------------|----------------------------------|
| 5 | | > | |
| 4 | | > | |
| 3 | | < | |
| 2 | | | |
| 1 | | > | |

verifica a ribaltamento

verifica a scorrimento

$$\left[W_n \cos \alpha + (P_n - P_{n-1}) \tan \varphi \right] \tan \varphi = W_n \sin \alpha + P_n - P_{n-1} \quad (9)$$

Si ricava la forza P_{n-1} .

$$(P_n - P_{n-1})(1 - \tan^2 \varphi) = W_n (\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha)$$

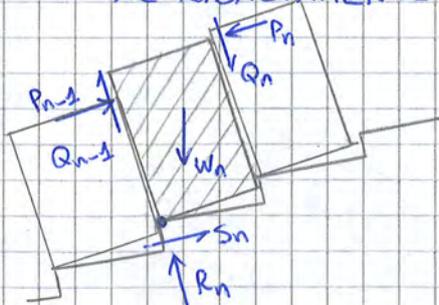
$$\Rightarrow P_{n-1} = P_n - \frac{W_n (\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \varphi}$$

$$P_{n-1,s} = P_n - \frac{W_n (\cos \alpha \tan \varphi - \sin \alpha)}{1 - \tan^2 \varphi} \quad (12)$$

La forza $P_{n-1,s}$ è la componente di sforzo normale tra il blocco n e il blocco a valle in condizione limite di scivolamento.

⇒ siccome il blocco a monte esercita la forza $P_{n-1,s}$ sul blocco a valle in condizione limite di scivolamento, la forza $P_{n-1,s}$ è la forza minima che bisogna opporre al blocco per evitare il meccanismo di scorrimento.

In seguito, si considera la condizione di EQUILIBRIO LIMITE AL RIBALTAMENTO.



Si scrive l'equazione di equilibrio alla rotazione attorno allo spigolo inferiore.

$$P_n M_n - Q_n \Delta x + W_n \sin \alpha \cdot \frac{y_n}{2} - W_n \cos \alpha \frac{\Delta x}{2} - P_{n-1} L_n = 0 \quad (13)$$

All'equilibrio limite, le facce laterali sono in condizione di equilibrio limite a scorrimento.

$$Q_n = P_n \tan \varphi \quad (7)$$

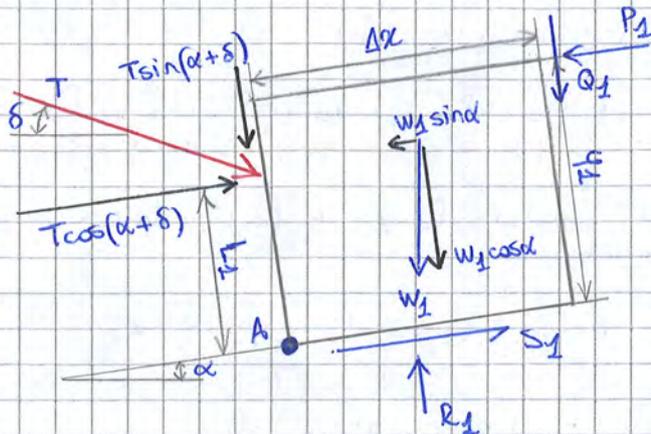
$$Q_{n-1} = P_{n-1} \tan \varphi \quad (8)$$

$$\Rightarrow P_n (M_n - \Delta x \tan \varphi) + W_n \sin \alpha \frac{M_n}{2} - W_n \cos \alpha \frac{\Delta x}{2} - P_{n-1} L_n = 0$$

Si ricava P_{n-1}

Si valuta ora l'effetto dei **tiranti di ancoraggio**, andando a eseguire un'analisi di sollecitazione sul blocco al piede:

se il blocco 1 presenta una forza $P_{n-1} > 0$, esso è tendenzialmente instabile e si può installare un ancoraggio, avente inclinazione δ verso il basso. Il tirante si ancora nella zona stabile ed è rappresentato da una forza T .



Nell'analisi del blocco, si esegue l'equilibrio alla traslazione in direzione normale e tangenziale alla base, includendo le componenti del tiro.

Equilibrio in direzione parallela alla base $T \cos(\alpha + \delta) - w_1 \sin \alpha + S_1 - P_1 = 0$ (15)

Equilibrio in direzione normale alla base $T \sin(\alpha + \delta) + w_1 \cos \alpha + Q_1 - R_1 = 0$ (16)

La forza Q_1 è la componente di sforzo agente sulle facce laterali, in cui vale la condizione di equilibrio limite.

$$Q_1 = P_1 \tan \varphi \quad (17)$$

L'equazione (16) così diventa

$$T \sin(\alpha + \delta) + w_1 \cos \alpha + P_1 \tan \varphi - R_1 = 0$$

$$\Rightarrow R_1 = T \sin(\alpha + \delta) + w_1 \cos \alpha + P_1 \tan \varphi \quad (17)$$

$$\Rightarrow L_1 T \cos(\alpha + \delta) + W_1 \cos \alpha \frac{\Delta x}{L} - W_1 \sin \alpha \frac{y_1}{L} + P_1 \tan \varphi \Delta x - P_1 y_1 = 0$$

Si ricava la forza T

$$T_T = \frac{P_1 (y_1 - \Delta x \tan \varphi) + \frac{W_1}{2} (y_1 \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha)}{L_1 \cos(\alpha + \delta)}$$

$$T_T = \frac{P_1 (y_1 - \Delta x \tan \varphi) + \frac{W_1}{2} (y_1 \sin \alpha - \Delta x \cos \alpha)}{L_1 \cos(\alpha + \delta)} \quad \text{Forza nel tirante per ribaltamento (21)}$$

La forza T_T rappresenta la forza nel tirante necessaria per impedire il ribaltamento.

Perché il tirante resista sia a scorrimento sia a ribaltamento, a esso si applicherà il massimo delle due forze.

$$T = \max \{ T_S ; T_T \} \quad \text{Forza minima nel tirante (22)}$$

Riepilogando, esistono due condizioni da verificare

→ ribaltamento

→ scorrimento

L'obiettivo è ora individuare il valore di angolo d'attrito φ_{LE} che porterebbe in condizioni di equilibrio limite, rispetto al valore φ caratteristico del materiale.

Infatti, da tale valore si può valutare il **fattore di sicurezza del versante**, che descrive il grado di stabilità del versante ed è dato dal valore reale rispetto al valore a equilibrio limite.

$$FS = \frac{\mu_{disp}}{\mu_{LE}} \quad (23)$$

μ_{disp} = coefficiente d'attrito disponibile $\mu = \tan \varphi$

μ_{LE} = coefficiente d'attrito a equilibrio limite (con $FS = 1$) $\mu_{LE} = \tan \varphi_{LE}$

Il software RocTopple fornisce sia il valore di fattore di sicurezza così calcolato sia il riepilogo della distribuzione degli sforzi, che è calcolata all'equilibrio limite. In particolare, dai valori del primo blocco, si può dedurre μ_{LE} .

$$\frac{S_n}{R_n} = \frac{R_n \tan \varphi_{LE}}{R_n} \Rightarrow \mu_{LE} = \frac{S_n}{R_n}$$

A questo punto, si introducono gli **interventi di stabilizzazione per il toppling**.

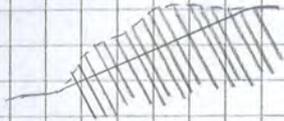
A fronte del meccanismo di ribaltamento, è possibile intervenire in due modi

→ **riduzione del momento ribaltante sulle colonne**

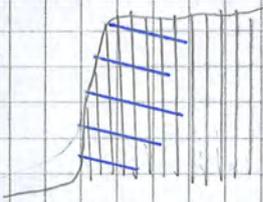
→ **diminuzione della snellezza delle colonne**

Questo intervento richiede una completa analisi del versante, per vedere se è possibile farlo e quali elementi debbano essere abbattuti.

Da una parte, si può procedere con l'**abbattimento controllato di colonne**, soprattutto se il blocco coinvolto nel meccanismo è piccolo e localizzato.



D'altra parte, si può eseguire la **riprofilatura della scarpata**, partendo da un fronte iniziale a un nuovo profilo più stabile.



Un sistema diverso è la **cucitura**, che agisce sulla snellezza andando a unire artificialmente degli elementi in un elemento più tozzo che, geometricamente, tenderà a non ribaltare.

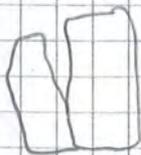
La cucitura avviene con bulloni o barre passive.

→ **abbattimento delle pressioni al giunto**

L'intervento consiste nell'installazione di una serie di **drenaggi**.

I dreni devono essere sub-orizzontali e inclinati verso l'alto, in modo da favorire il deflusso dell'acqua.

Essi devono essere localizzati in modo efficace, poiché devono intercettare il sistema di giunti paralleli al fronte, tenendo conto che questi possono chiudersi nella parte inferiore.



Il sistema deve avere tempi di reazione rapidi perché esso è sollecitato quando ci sono piogge intense e deve agire in quel momento.

Per questo, occorre conoscere le caratteristiche del versante.

ANALISI DEL TOPPLING: ROCSCIENCE ROCTOPPLE

L'interfaccia del software è divisa in due parti: la parte a sinistra mostra la sezione dello schema di instabilità, la parte a destra mostra una rappresentazione tridimensionale nella quale, tramite trascinamento con il mouse, è possibile osservare il cinematismo dei blocchi.

Tra l'altro, ciascun blocco assume una colorazione diversa in funzione della condizione in cui esso si trova, che può essere stabilità, ribaltamento e scivolamento.

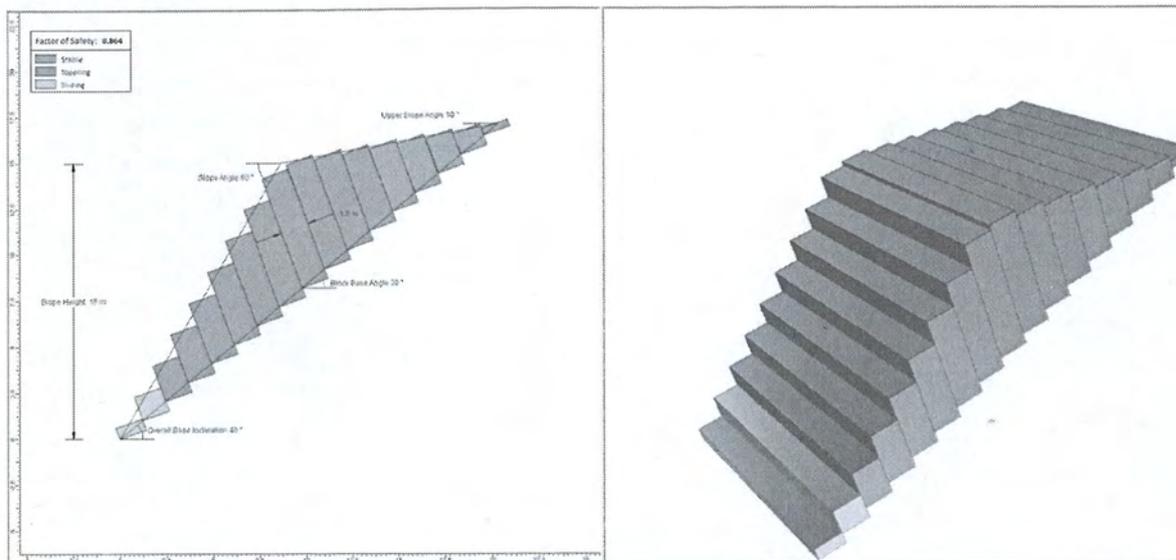


Figura 1. Interfaccia del software RocTopple

- *Slope – Angle*: angolo del pendio.
- *Slope – Height*: altezza del pendio.
- *Upper Slope – Angle*: inclinazione sopra cresta.
- *Toppling Joints – Spacing*: spaziatura delle discontinuità di separazione dei blocchi.
- *Toppling Joints – Dip*: inclinazione delle discontinuità di separazione dei blocchi.
- *Overall Base Inclination*: inclinazione media della base di appoggio della successione dei blocchi.
- *Rock Unit Weight*: peso per unità di volume della roccia.

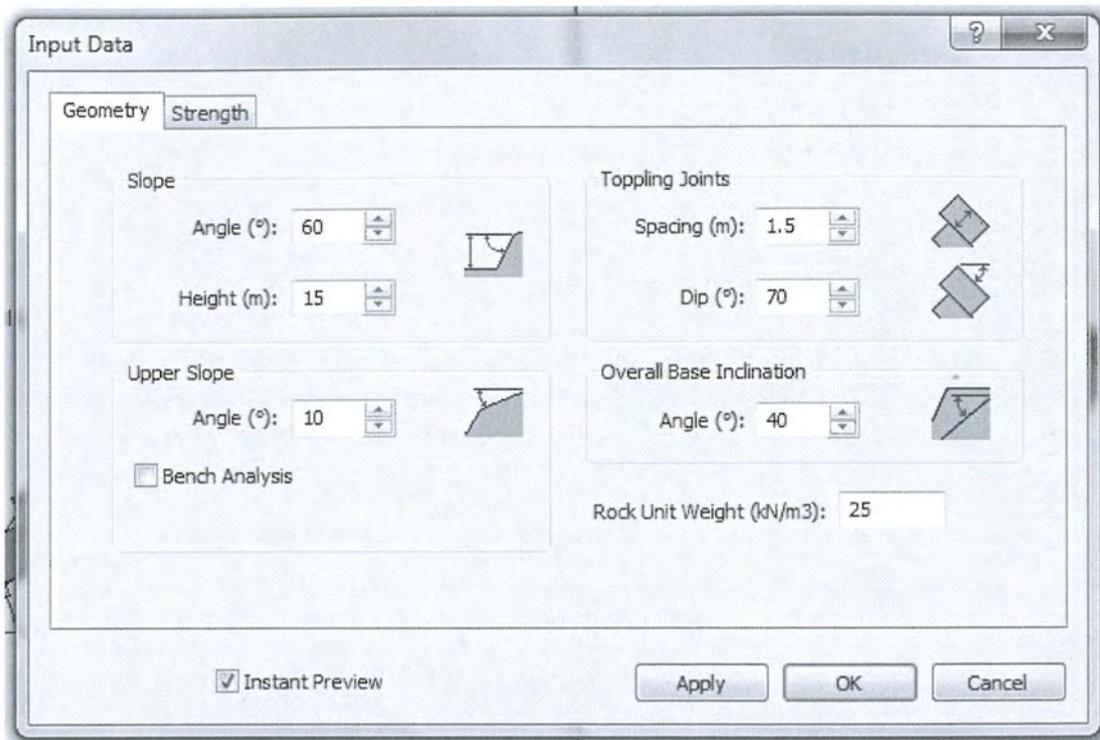


Figura 3. Finestra di dialogo per la definizione dei dati geometrici

Nella sezione *Strength*, il software permette di inserire tutte le informazioni necessarie per definire le caratteristiche meccaniche del materiale.

Il software consente di inserire i parametri di resistenza delle discontinuità basali (*Base Joints*) e discontinuità laterali (*Toppling Joints*), ignorando i parametri di deformabilità e di resistenza propri del materiale, in quanto il software opera secondo un approccio all'equilibrio limite.

| | |
|---|----------|
| Factor of Safety: 0.864 | |
|  | Stable |
|  | Toppling |
|  | Sliding |

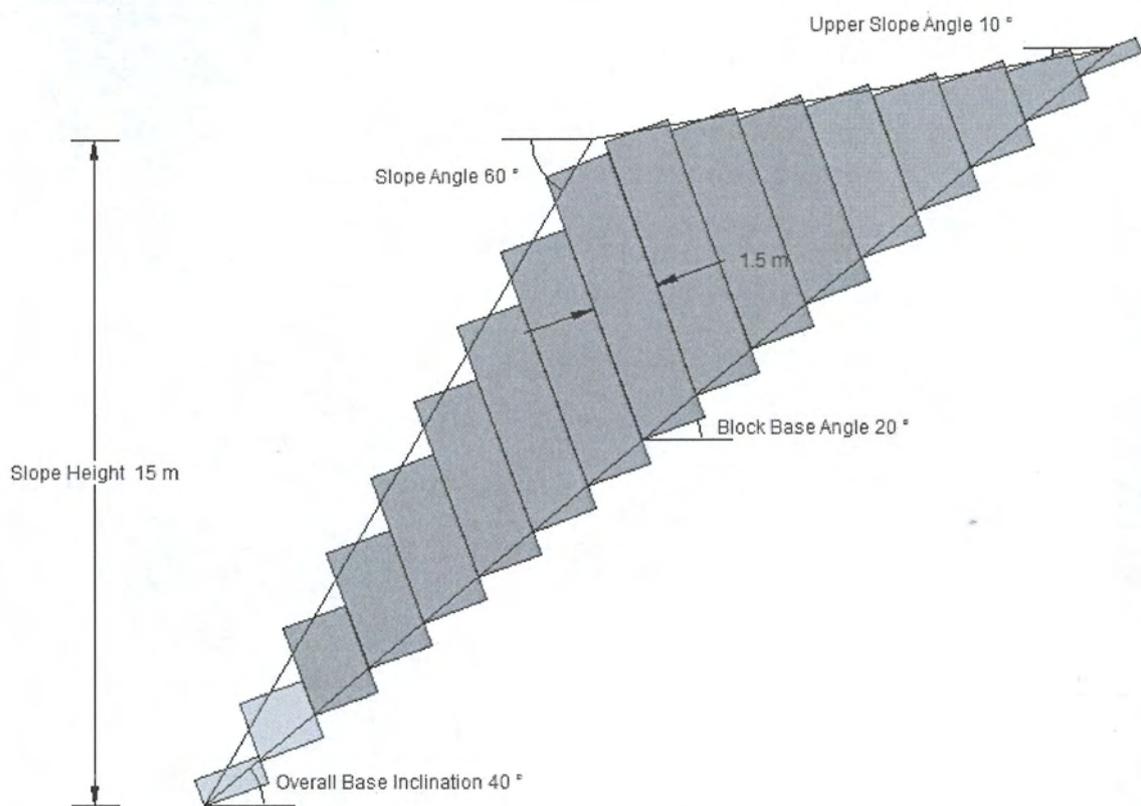


Figura 5. Modello geomeccanico

sicurezza che si ottiene è inferiore all'unità ma la tabella non cambia, poiché è calcolata all'equilibrio limite.

Pertanto, il programma automaticamente fornisce la tabella di valori all'equilibrio limite.

Se, infatti, si sostituisce il valore di angolo d'attrito corrispondente a $\frac{S_n}{R_n}$, si ottiene un fattore di sicurezza unitario.

Factor of Safety vs. Slope Angle (°)

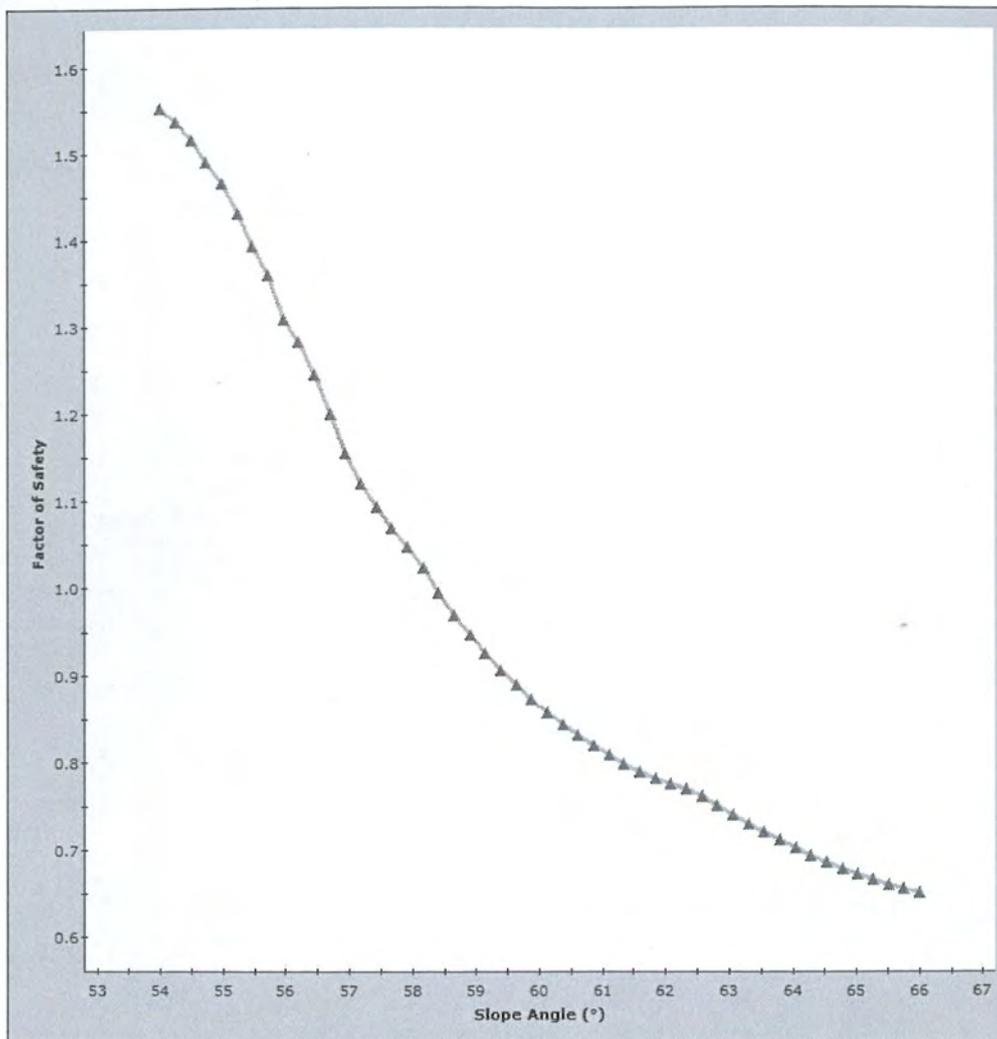


Figura 8. Diagramma di sensibilità

Si può anche eseguire un'analisi multi-variabile, in cui si valuta l'effetto sulla stabilità di due o più variabili in contemporanea.

In questo caso, il software restituisce un diagramma che associa il fattore di sicurezza non al valore della variabile, in quanto sono presenti più variabili con scale diverse, che non possono essere poste su un unico asse. Al fine di avere un asse comune sullo stesso grafico, come ascissa il software inserisce il valore percentuale nell'intervallo di variazione, che si calcola nel seguente modo.

$$\% = \frac{\text{valore} - \text{min}}{\text{max} - \text{min}}$$

Il software, in questo modo, fissa un valore per ciascuna variabile, cui corrisponde una certa percentuale, e valuta il fattore di sicurezza corrispondente.

Il grafico presenta un numero di curve, ciascuna corrispondente alle singole variabili.

ALTRE OPZIONI

Il software consente di tenere conto dell'effetto dell'acqua eventualmente presente nelle discontinuità, mediante il comando *Water > Water Pressure Options*.

Il software consente di introdurre l'acqua mediante due opzioni.

- *Pore pressure in joints*: l'acqua è introdotta attraverso la definizione della percentuale di riempimento con acqua delle discontinuità.
- *Use phreatic surface*: l'acqua è introdotta assegnando la superficie di falda freatica, che è aggiunta mediante tracciamento diretto sulla sezione del modello.

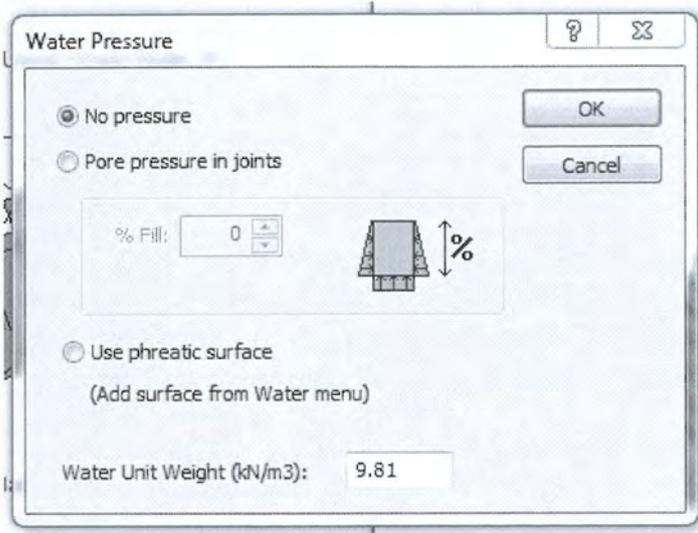


Figura 10. Finestra di dialogo per l'introduzione dell'acqua

È anche possibile applicare il carico sismico, che è trattato secondo l'approccio pseudostatico. Con il comando *Loading > Seismic Loading*, infatti, è possibile inserire i coefficienti pseudostatici in direzione orizzontale e verticale.

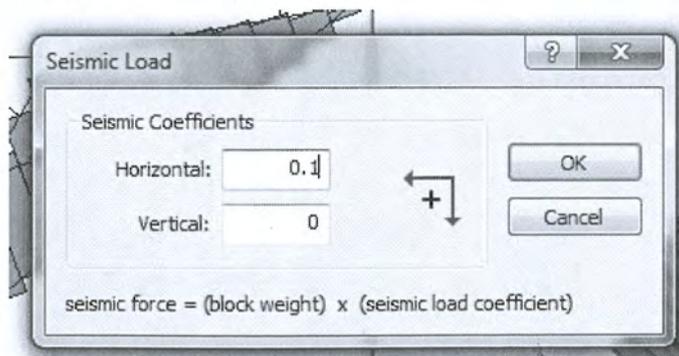


Figura 11. Finestra di dialogo per l'introduzione del carico sismico

Il software consente di inserire anche un carico distribuito lineare, mediante il comando *Loading > Add Line Load*. Nella finestra di dialogo è necessario specificare intensità, direzione e punto di applicazione rispetto alla base o alla cresta.

L'elemento *bolt* consente invece di simulare sia un elemento ancorato sia la cucitura tra blocchi, purché si attivi l'opzione *Internal bolts act as a force couple* nel menu *File > Preferences*, in modo che il software consideri questi elementi come cuciture interne.

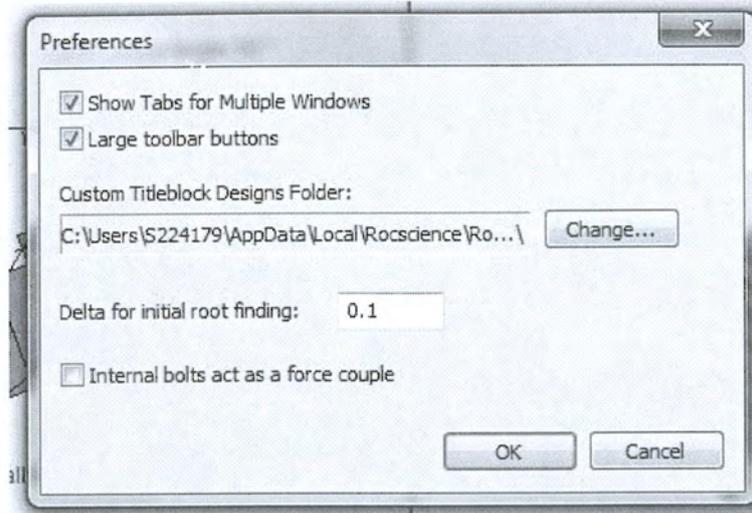
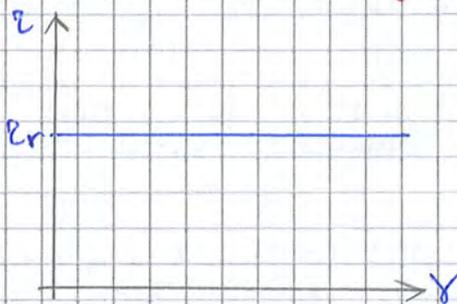


Figura 14. Finestra di dialogo per le preferenze

$$\tau_a = \frac{\tau_r}{FS} = \frac{c'}{FS} + \frac{(b-u) \tan \varphi'}{FS}$$

Il fattore di sicurezza così ottenuto può essere pensato come un fattore di sicurezza medio poiché è rapporto tra sforzo medio resistente e sforzo medio agente, in virtù dell'ipotesi che tutti i punti della superficie di rottura si trovano nella stessa condizione. Nella realtà, esistono punti in condizione limite e punti non in condizione limite, per effetto dell'evoluzione progressiva del fenomeno.

Ignorare il processo deformativo equivale ad assumere un **modello costitutivo rigido perfettamente plastico**.



All'aumentare dello sforzo di taglio, inizialmente non avviene deformazione, fino a quando lo sforzo non eguaglia il valore τ_r . Lì si è in condizione di rottura e da lì la deformazione si evolve in condizione di taglio agente pari a τ_r .

Si come non si segue il processo deformativo, il blocco è un corpo RIGIDO e non si deforma.

Il fatto che si consideri il blocco come un corpo rigido consente di valutare il fattore di sicurezza attraverso le equazioni di equilibrio del corpo rigido

⇒ l'analisi dell'equilibrio del sistema è compiuta tramite le equazioni dell'equilibrio dei corpi rigidi

$$\sum V_i = 0$$

$$\sum H_i = 0$$

$$\sum M_i = 0$$

In fine, si ricorda che un metodo dell'equilibrio limite non individua la superficie di rottura come output ma si esegue l'analisi di una serie di superfici definite in input e, per ciascuna di esse, si calcola il fattore di sicurezza. Il metodo definisce come superficie critica quella cui compete il fattore di sicurezza minimo.

A questo si aggiunge il TIPO E NUMERO DI EQUAZIONI DISPONIBILI UTILIZZATE:

L'ipotesi di corpo rigido fornisce tre equazioni di equilibrio ma alcuni metodi non le usano tutte contemporaneamente. A questo si aggiunge il fatto che il sistema di equazioni non sia sempre staticamente determinato, ossia esistono casi dove

$$n_{eq} < n_{inc}$$

I metodi propongono allora diverse ipotesi per far fronte a questo problema.

Il problema non si pone nel caso di superficie di scivolamento piana, dove il sistema è staticamente determinato; il sistema è invece indeterminato nel caso di superficie curva o composta e i metodi propongono equazioni aggiuntive o semplificazioni, che hanno dei limiti di validità.

In base a quest'ultimo aspetto, il problema di analisi è diviso in due

- SUPERFICIE DI SCIOLAMENTO PIANA, dove il problema del calcolo del fattore di sicurezza è staticamente determinato.
- SUPERFICIE DI SCIOLAMENTO CURVA, dove il problema del calcolo del fattore di sicurezza è staticamente indeterminato e non sono sufficienti le equazioni della statica dei corpi rigidi.

$$F_s = \frac{T_r}{T} = \frac{N \tan \varphi'}{T} \quad (1)$$

Dall'equilibrio alla traslazione, si ottiene

Traslazione in direzione normale alla superficie

$$N - W \cos i = 0 \Rightarrow N = W \cos i$$

Traslazione in direzione parallela alla superficie

$$T - W \sin i = 0 \Rightarrow T = W \sin i$$

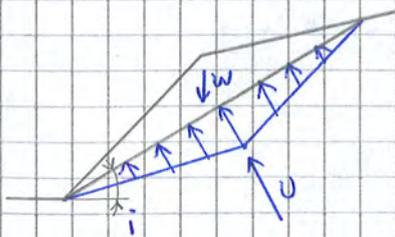
$$\Rightarrow F_s = \frac{N \tan \varphi'}{T} = \frac{W \cos i \tan \varphi'}{W \sin i} = \frac{\tan \varphi'}{\tan i}$$

$$F_s = \frac{\tan \varphi'}{\tan i} \quad \& \quad \text{Fattore di sicurezza allo scorrimento del blocco (c' = 0)} \quad (25)$$

Si nota che il fattore di sicurezza dipende solo dalla pendenza del fronte e dalle caratteristiche del materiale ed è indipendente dall'altezza del fronte. C'è stabilità se l'inclinazione è minore di φ' .

È possibile generalizzare il risultato ad altre situazioni

→ presenza d'acqua nel giunto



È assunta una distribuzione delle pressioni lungo la superficie del giunto, descritta da un triangolo che assume valore nullo agli estremi poiché questi sono a contatto con l'atmosfera. La distribuzione è normale alla superficie perché l'acqua non prende sforzi di taglio e ha risultante U.

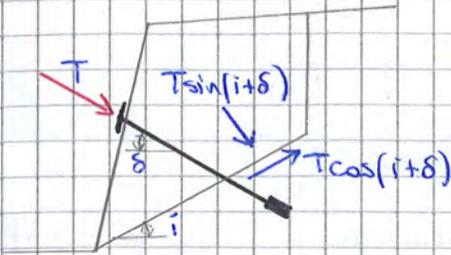
Si parte dall'espressione del fattore di sicurezza a scorrimento

$$F_s = \frac{N \tan \varphi'}{T} \quad (1)$$

L'acqua interviene solo nell'equilibrio alla traslazione in direzione normale alla superficie, mentre quella in direzione parallela è immutata.

→ **tirante**

Un possibile intervento di stabilizzazione del blocco è l'inserimento di un tirante di ancoraggio.



Nell'analisi, si scompone la forza imposta dal tirante nelle componenti rispetto alla superficie di scorrimento e le si introducono nell'equazione di equilibrio.

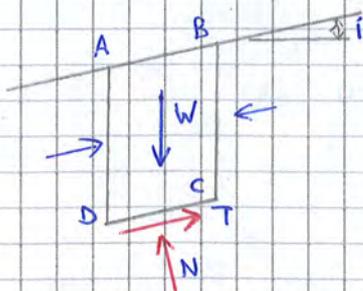
In questo caso, l'incognita non è il fattore di sicurezza, ma questo è imposto a un valore maggiore di 1 e da qui si ricava la forza T.

Il valore assunto del fattore di sicurezza dipende dalla situazione, in quanto è influenzato dalle incertezze nei parametri di resistenza e inclinazione geometria e dall'entità delle conseguenze di un eventuale collasso.

L'installazione di un ancoraggio è fatta quando le volumetrie in gioco non sono importanti. Eventualmente, si potrebbe ricorrere al disaggio.

Si valuta ora il caso di **pendio indefinito**, in cui si può limitare l'analisi a un elementino.

Si parte dalla situazione di **terreno incoerente asciutto**.



La base CD dell'elemento è posta in corrispondenza della superficie di scorrimento in analisi.

Le risultanti delle azioni sulle facce laterali sono uguali e contrarie. Di conseguenza, intervengono solo il peso dell'elemento e le reazioni N e T.

Si impostano le equazioni di equilibrio alla traslazione.

Traslazione in direzione normale alla superficie

$$N = W \cos i$$

Traslazione in direzione parallela alla superficie

$$T = W \sin i$$