

**Accordo tra il CSLPP ed il Consorzio ReLUIS
attuativo dei DM 578/2020 e DM 204/2022**

Attività di formazione per i tecnici degli Enti Locali

Modulo II - Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

coordinatori Proff. Edoardo Cosenza e Mauro Dolce

**Napoli
18 settembre 2024**

Lezione 3 Problematiche di tipo geologico

Giuseppe Sappa e Gerardo Grelle

Corso di aggiornamento professionale
ReLUIS

Problematiche Geologiche associate all'Instabilità di Versante

Parte 1: **Geologia di base**



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Giuseppe Sappa

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Area di Geologia Applicata

Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale

Email: giuseppe.sappa@uniroma1.it

Programma corsi di aggiornamento professionale ReLuis

1. Elementi di geologia di base

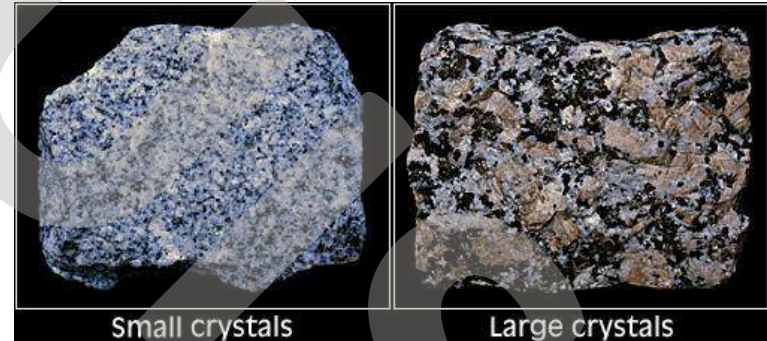
- 1.1 Tipologia di classificazione delle rocce- *elementi*
- 1.2 Deposizione e ambienti deposizionali - *elementi*
- 1.3 Strutture Geologiche - *elementi*
- 1.4 Discontinuità e Giunti - *elementi*
- 1.5 Formazioni Geologiche e Litologie
- 1.6 Formazioni Lito-strutturalmente complesse
- 1.7 Idrogeologia - *elementi*

Tipologia di classificazione delle rocce

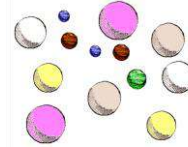
Definizione di roccia

Una **roccia** è il prodotto dell'aggregazione di uno o più minerali e/o materiale organico.

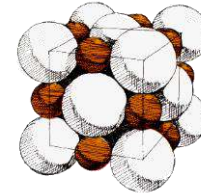
Le rocce sono la testimonianza più diretta dell'evoluzione geologica del sottosuolo: i processi geologici condizionano le proprietà fisiche, meccaniche e chimiche dei materiali rocciosi che producono e determinano l'assetto strutturale degli ammassi rocciosi con i quali le opere di ingegneria e le attività antropiche si confrontano.



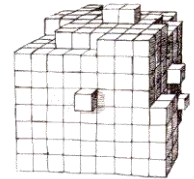
Gli atomi costituiscono gli elementi



Gli elementi si uniscono per formare composti

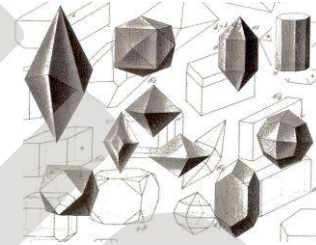


Composti naturali ed elementi si uniscono per formare minerali



Per noi i minerali sono le unità elementari fondamentali che formano le rocce

Le rocce formano la TERRA



Tipologia di classificazione delle rocce

Definizione di roccia

Le rocce si distinguono le une dalle altre per diversi fattori:

- ❑ **COMPOSIZIONE MINERALOGICA:** cioè per la natura dei minerali che le costituiscono, la distribuzione percentuale con cui questi intervengono nella formazione della roccia, ed infine se si trovano allo stato cristallino o meno.
- ❑ **TESSITURA:** intesa come la configurazione che i minerali assumono, a livello macroscopico, nel formare la roccia stessa, le dimensioni che essi presentano, l'aspetto che singolarmente e complessivamente conferiscono al materiale roccioso.
- ❑ **ROCCE SCIOLTE:** perdono lo stato di aggregazione dei minerali e dei granuli che la costituiscono, dopo più o meno prolungata immersione in acqua.
- ❑ **ROCCE LAPIDEE:** non perdono tale stato di aggregazione neanche dopo prolungata immersione in acqua.



*Sabbia di origine
eolica
del Deserto del
Sahara settentrionale*



*Granito della
Sardegna
sud-occidentale*

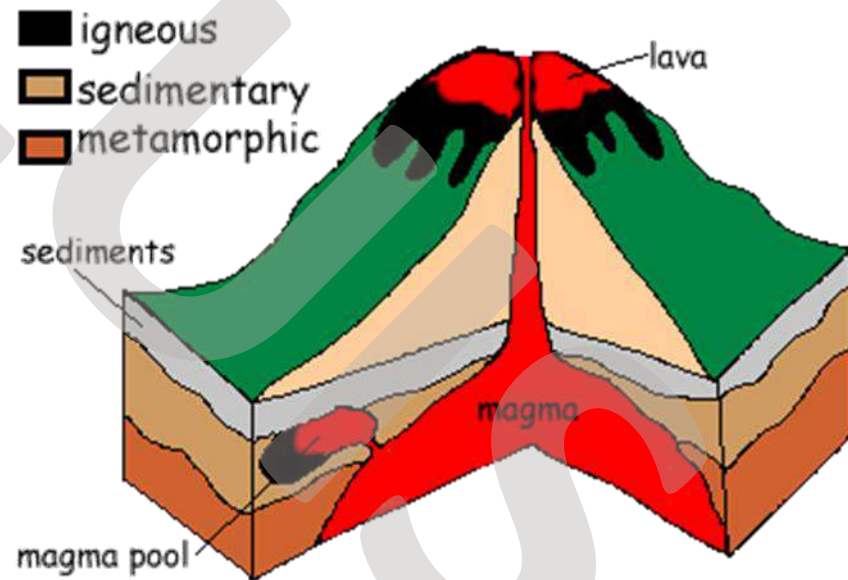
Tipologia di classificazione delle rocce

Origine delle rocce

In questa sede si tratterà della classificazione genetica delle rocce, ovvero della caratterizzazione in funzione dell'origine, cioè delle tipologie di processo geologico che hanno condotto alla formazione di un determinato tipo di roccia.

La classificazione genetica delle rocce prevede la loro suddivisione in:

- Rocce ignee
- Rocce sedimentarie
- Rocce metamorfiche

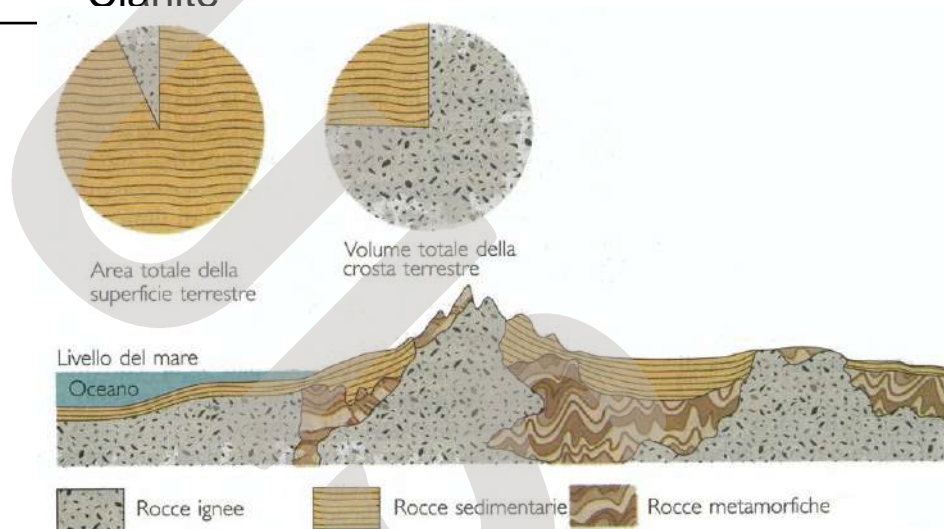


Tipologia di classificazione delle rocce

Ciclo delle rocce

Rocce ignee	Rocce sedimentarie	Rocce metamorfiche
Quarzo	Quarzo	Quarzo
Feldspati	Minerali argillosi	Feldspati
Miche	Feldspati	Miche
Pirosseni	Calcite	Pirosseni
Anfiboli	Dolomite	Granato
Olivina	Gesso	Staurolite
	Salgemma	Cianite

Nella caratterizzazione delle rocce un ruolo di primaria importanza è rivestito dai minerali.



Le rocce ignee si formano dalla solidificazione di un magma, proveniente dalle zone più profonde della crosta terrestre, dove le temperature raggiungono frequentemente valori di 700 °C e più.

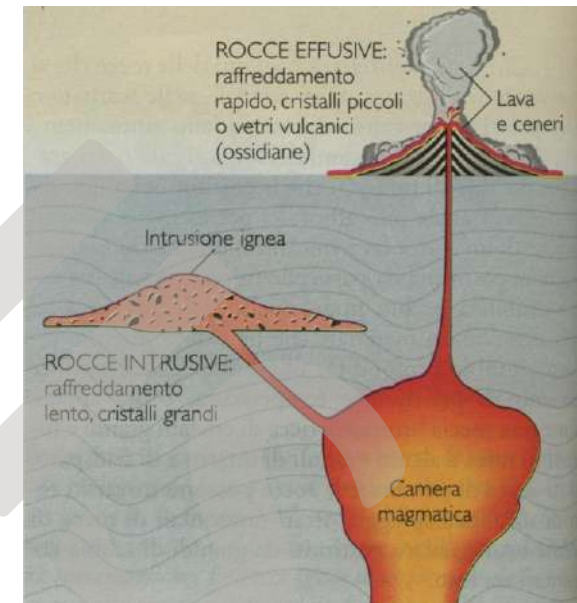
Le modalità e l'ambiente di solidificazione del magma inducono a distinguere queste rocce in:

ROCCE INTRUSIVE

- ✓ Raffreddamento lento
- ✓ Si formano grandi cristalli

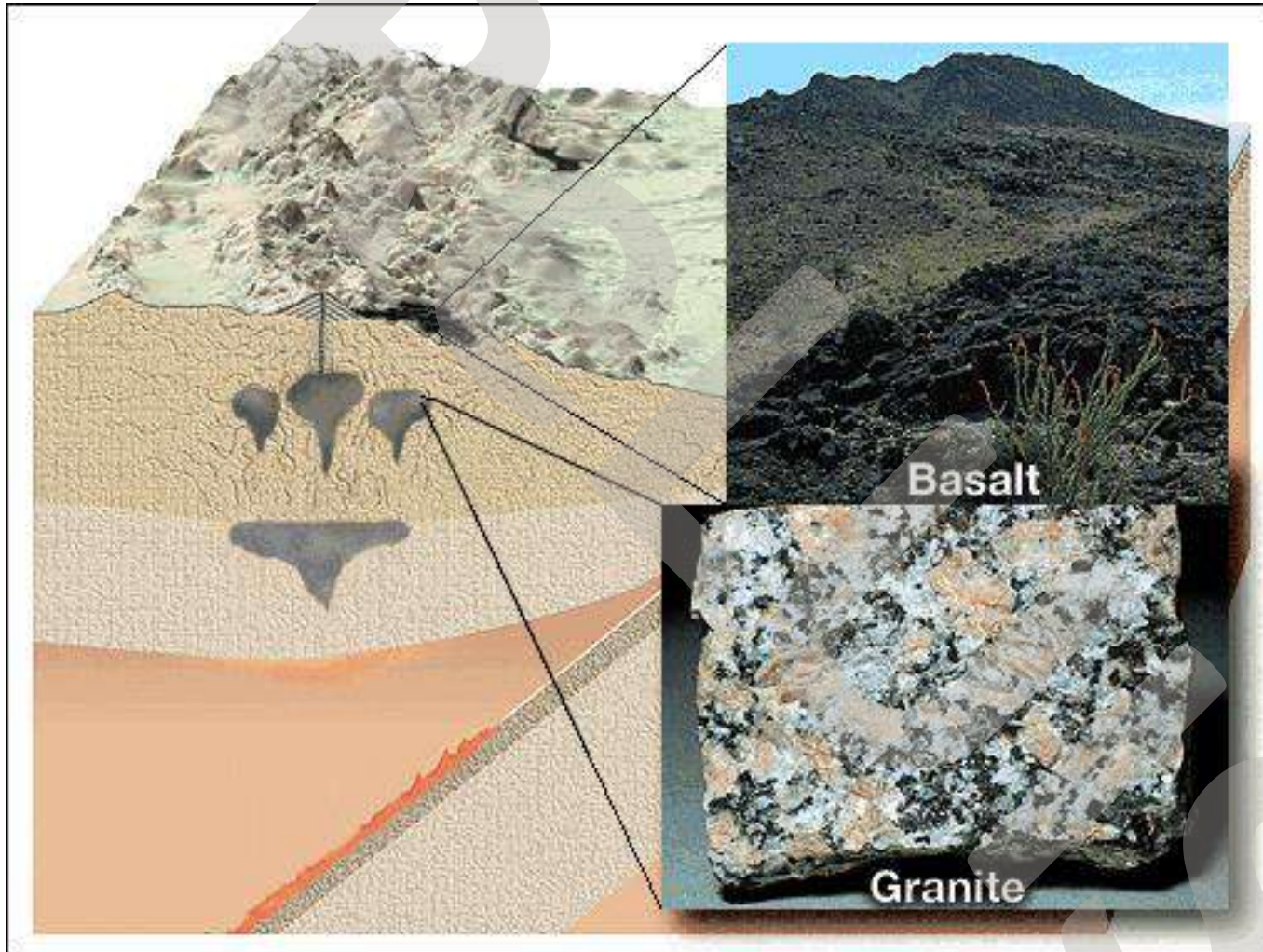
ROCCE VULCANICHE

- ✓ Raffreddamento veloce
- ✓ Si formano piccoli cristalli



Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce ignee



Effusive

Intrusive

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce ignee

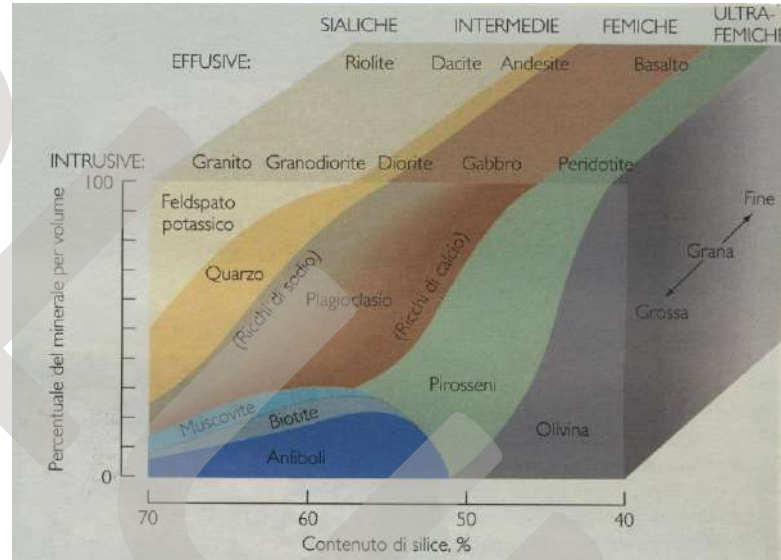
Le rocce ignee sono costituite in massima parte da silicati, dei quali i più comuni sono:

Sialici

- Quarzo
- Plagioclasti
- Feldspati alcalini
- Muscovite

Mafici

- Biotite
- Ornblanda
- Pirosseno
- Olivina



Una roccia ignea si definisce:

- **Sialica:** quando è costituita prevalentemente da minerali sialici
- **Mafica:** quando è costituita prevalentemente da minerali mafici
- **Ultramafica:** quando la percentuale in peso di minerali mafici costituente una roccia è superiore al 90%

Tipologia di classificazione delle rocce

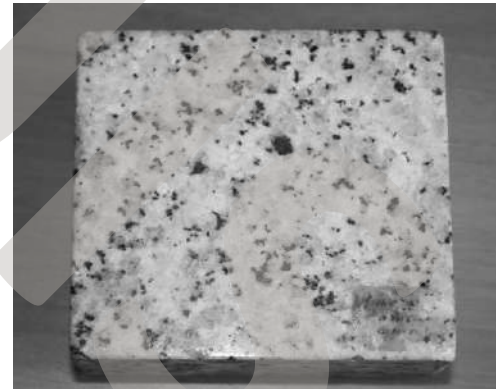
Rocce ignee intrusive

Le **ROCCE IGNEE INTRUSIVE** si formano per raffreddamento del magma all'interno della crosta terrestre.

In queste condizioni termodinamiche è proprio la lenta diminuzione di temperatura, e la progressiva evoluzione delle condizioni di pressione a consentire la cristallizzazione dei minerali che raggiungono, tutti, dimensioni macroscopiche, e diventano i costituenti della roccia.

Ciò che caratterizza principalmente queste rocce è proprio questo essere composte tutte e solo da minerali, allo stato cristallino, compenetrati gli uni rispetto agli altri, a formare una sorta di mosaico tridimensionale.

Il **GRANITO** è la roccia ignea intrusiva più diffusa sulla crosta terrestre.



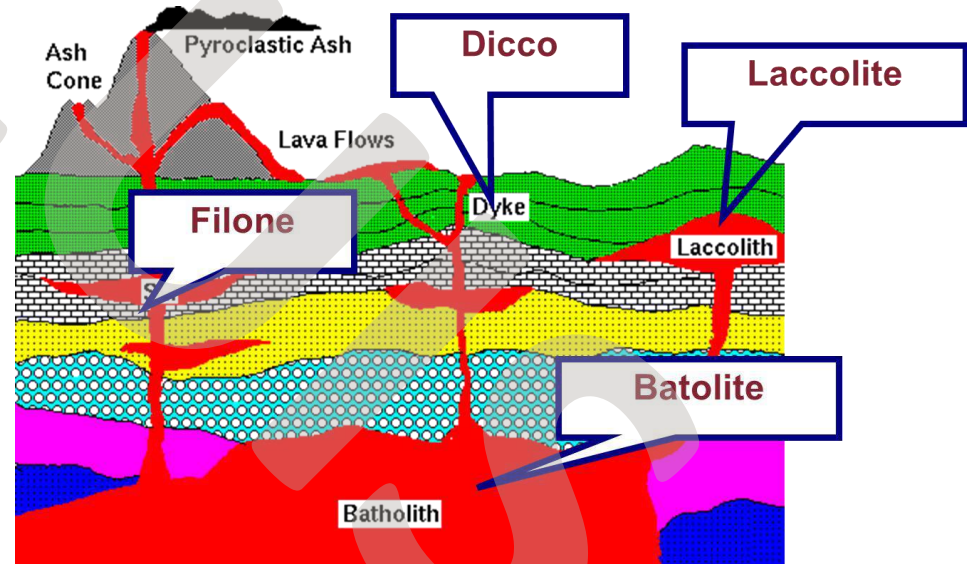
Tipologia di classificazione delle rocce

Morfologia dei corpi geologici intrusivi

Nel percorso verso la superficie, il magma trova maggiore o minore facilità a muoversi oppure ad accumularsi localmente, in funzione dei seguenti fattori:

- Composizione chimica originaria del magma
- Volatilità del magma
- Viscosità del magma

Le diverse forme che i corpi geologici intrusivi possono assumere dipendono dallo spazio che il magma si crea durante la sua risalita.



Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce ignee effusive

Le **ROCCE IGNEE EFFUSIVE** hanno origine dalla solidificazione del magma, che esce al di sopra della superficie topografica allo stato liquido o semisolido, e qui raffredda in tempi molto più rapidi rispetto a quanto avviene per le rocce ignee intrusive. La condizione necessaria perché ciò avvenga è che il magma stesso trovi o crei esso stesso una via diretta di accesso in superficie. La rapida solidificazione determina un'ampia variabilità costitutiva di queste rocce, che influisce poi sul comportamento fisico meccanico di esse.

L'**OSSIDIANA** è una tipica roccia ignea effusiva.



Tipologia di classificazione delle rocce

Morfologia dei corpi geologici effusivi

La composizione chimica del magma, da cui si formano i diversi tipi di rocce effusive, condiziona anche la morfologia dei corpi geologici, che le rocce vanno a configurare.

- Colate di lava
- Vulcani a scudo
- Vulcano strato o vulcano composto

**Eruzione effusiva:
flusso di lava**



**Eruzione esplosiva
piroclastica**

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce piroclastiche

Le **rocce piroclastiche** sono le rocce vulcaniche che si formano in ambiente atmosferico, o in prossimità di esso, quando un episodio esplosivo mette in diretta comunicazione l'interno della crosta terrestre con la superficie.

Il meccanismo che determina l'esplosione è in genere causato dal crescere della pressione all'interno della camera magmatica per effetto dei gas che si separano dal magma ed espandono all'interno di essa.

Il magma è proiettato in atmosfera sotto forma di particelle, di dimensioni variabili da qualche mm fino a svariati cm:

<i>Rocce piroclastiche sciolte</i>	<i>Diametro medio</i>
Ceneri	< 2 mm
Lapilli	2 mm < D < 64 mm
Bombe	>64 mm

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce sedimentarie

Dallo smantellamento di rocce preesistenti, per azione fisica e/o chimica, si formano i sedimenti che, dopo eventuale trasporto, vanno a depositarsi fisicamente, oppure a precipitare chimicamente, per costituire le rocce sedimentarie.



Distribuzione percentuale fra rocce ignee e rocce sedimentarie nella crosta e sulla superficie terrestre

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce sedimentarie

“La degradazione meteorica (wheathering) produce la disgregazione e l’alterazione dei minerali della superficie terrestre in modo da portare a prodotti che sono in equilibrio con le nuove condizioni imposte...”

- Weathering fisico**
- Weathering chimico**
- Weathering biologico**

A meno di condizioni climatiche estremamente fredde, oppure estremamente secche, i processi chimici, fisici e biologici agiscono insieme, e risulta spesso difficile distinguere gli effetti da essi prodotti.



Il **Brice Canyon** è un esempio di effetto della combinazione di weathering chimico e fisico.

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce sedimentarie

I fattori che concorrono alla formazione delle rocce sedimentarie sono:

- **Erosione:** è il fattore che mobilizza le particelle prodotte dalla degradazione meteorica e le estrae dalla propria posizione originaria.
- **Trasporto**
- **Deposizione o sedimentazione**
- **Seppellimento**
- **Diagenesi**

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce sedimentarie

Esiste una distinzione delle rocce sedimentarie in funzione della natura costitutiva:

- ❑ **SILICOCLASTICHE:** sono formate prevalentemente da minerali silicatici o da frammenti o clasti di rocce silicatiche e provengono dallo smantellamento fisico e/o chimico di rocce ignee, metamorfiche o sedimentarie più antiche.
- ❑ **CHIMICHE O BIOCHIMICHE:** sono composte da minerali precipitati principalmente nei bacini oceanici o lacustri per effetto di processi organici o inorganici.
- ❑ **CARBONIOSE:** contengono in percentuale superiore al 15% i resti di sostanze vegetali ed animali, costituiti principalmente da carbonato di calcio.

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce sedimentarie

Una diversa classificazione prevede la suddivisione delle rocce sedimentarie in funzione della origine:

- DETRITICA O MECCANICA:** sono le rocce formate dalla deposizione fisica di sedimenti prodotti dallo smantellamento chimico e/o fisico di rocce preesistenti.
- CHIMICA O BIOCHIMICA**
- EVAPORITICA**

La distinzione tra rocce chimiche ed evaporitiche è data dalle condizioni termodinamiche, in cui avviene la precipitazione chimica dei minerali. Infatti queste ultime si formano in ambienti in cui la pressione idrostatica è sensibilmente più bassa rispetto a quanto si verifica nei processi di formazione delle rocce definite di origine chimica o biochimica.

Ambiente sedimentario: è il contesto ambientale nel quale si è svolta la deposizione dei sedimenti e la successiva, eventuale, diagenesi.

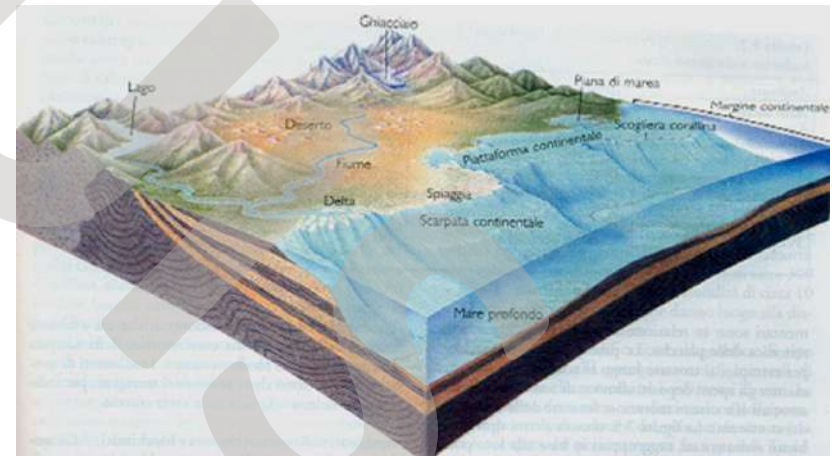
Ciò che distingue un ambiente sedimentario da un altro è:

- la presenza, il tipo e la quantità di acqua (mare, oceano, lago, corso d'acqua)
- la forma della superficie topografica (bassopiano, pianura costiera, fondale marino)

Ambiente continentali: alluvionale, desertico, lacustre, glaciale

Ambiente costieri: delta fluviali, piane di marea, spiaggia

Ambiente marini: di piattaforma, delle scogliere organogene, dei margini continentali, di mare profondo o pelagico



Tipologia di classificazione delle rocce

Ambiente continentale alluvionale

L'ambiente alluvionale è tipico dei corsi d'acqua, nei loro regimi di magra, di morbida e di piena e comprende:

- Alveo del fiume
- Zona golenale
- Piana interessata dai fenomeni di esondazione

In corrispondenza dei diversi regimi del fiume sono trasportate e depositate particelle di dimensioni differenti, secondo i criteri di selezione granulometrica, nel trasporto e nella deposizione.



Tipologia di classificazione delle rocce

Ambiente continentale lacustre

L'ambiente lacustre è caratterizzato da ridotti valori della velocità dell'acqua, che si distingue principalmente per il moto ondoso sostanzialmente modesto.

Le modalità di deposizione delle particelle, nei laghi, è fortemente condizionato dal regime dei corsi d'acqua immissari.

- Laghi d'acqua dolce: si ha una forma di sedimentazione chimica dovuta alle sostanze organiche presenti.
- Laghi d'acqua salata: l'evaporazione dell'acqua produce la precipitazione di minerali evaporitici come l'Alite.

Ambiente continentale glaciale

L'ambiente glaciale è governato dal movimento verso il basso dei ghiacciai, che trascinano sedimenti di ogni dimensione, conducendo alla formazione di depositi sedimentari ad ampissimo assortimento granulometrico.

Ambiente costiero: delta fluviale

Gli ambienti deltizi corrispondono alle zone di immissione dei corsi d'acqua nel mare, caratterizzate dalla ciclica alternanza fra l'ingressione marina ed il normale corso dell'acqua dolce alla foce.

Il diverso contenuto di energia di questi corpi idrici in movimento determina le dimensioni delle particelle che si depositano:

- Dimensioni maggiori: quelle sedimentate nella fase di ingressione marina.
- Dimensioni minori: quelle depositate dal corso d'acqua

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

Il termine metamorfismo si riferisce all'insieme di trasformazioni mineralogiche, tessiturali e di composizione chimica, che interessano le rocce all'interno di un ampio intervallo di condizioni termodinamiche.

Il metamorfismo ha luogo quando una roccia è esposta ad un ambiente chimico o fisico decisamente differente rispetto a quello di originaria formazione. Perciò ogni fattore che può modificare sensibilmente l'ambiente può essere la causa del metamorfismo. Fra questi c'è la **TEMPERATURA**, la **PRESSIONE**, la **NATURA DELLA FASE FLUIDA** e lo **STATO DI SOLLECITAZIONE**.

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

Il metamorfismo è un processo, prevalentemente allo stato solido, che produce modificazioni nella composizione mineralogica, nella tessitura e spesso nella costituzione chimica di una roccia.

Il processo metamorfico può interessare, tanto le rocce ignee, quanto quelle sedimentarie, ed anche le stesse metamorfiche.



Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

Il metamorfismo ha inizio per valori di temperatura intorno ai 150-200.

- ❑ $T < 200^{\circ}\text{C}$: la maggior parte dei minerali è stabile (basso o nullo metamorfismo).
- ❑ $T > 200^{\circ}\text{C}$: la velocità di reazione aumenta all'aumentare della temperatura e si formano nuovi minerali.
- ❑ $T > 600^{\circ}\text{C}$: molti minerali cominciano a fondere.

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

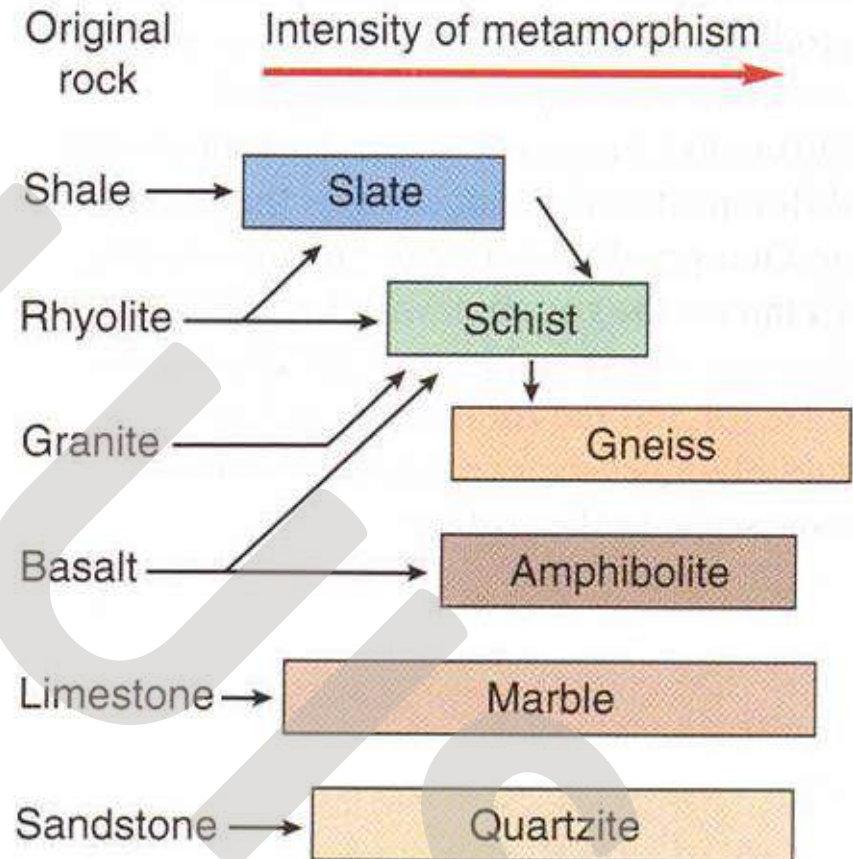
Un sistema di classificazione delle rocce metamorfiche privilegia il fattore dominante nel processo metamorfico:

- ❑ **METAMORFISMO TERMICO:** è il processo di formazione che produce una roccia metamorfica per azione della temperatura.
- ❑ **METAMORFISMO DINAMICO:** è il processo di formazione in cui sono le pressioni, orientate o meno, che determinano la sensibile trasformazione delle rocce preesistenti.
- ❑ **METAMORFISMO TERMO-DINAMICO:** è la combinazione di temperatura e pressione a determinare il processo metamorfico.

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

- Innalzamento di temperatura e condizioni di bassa pressione: si producono minerali che hanno una bassa densità.
- Innalzamento di temperatura e condizioni di alta pressione: si producono minerali che hanno una maggiore densità.



Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche



Basso grado di metamorfismo
Ardesia



Grado intermedio di metamorfismo
Fillade



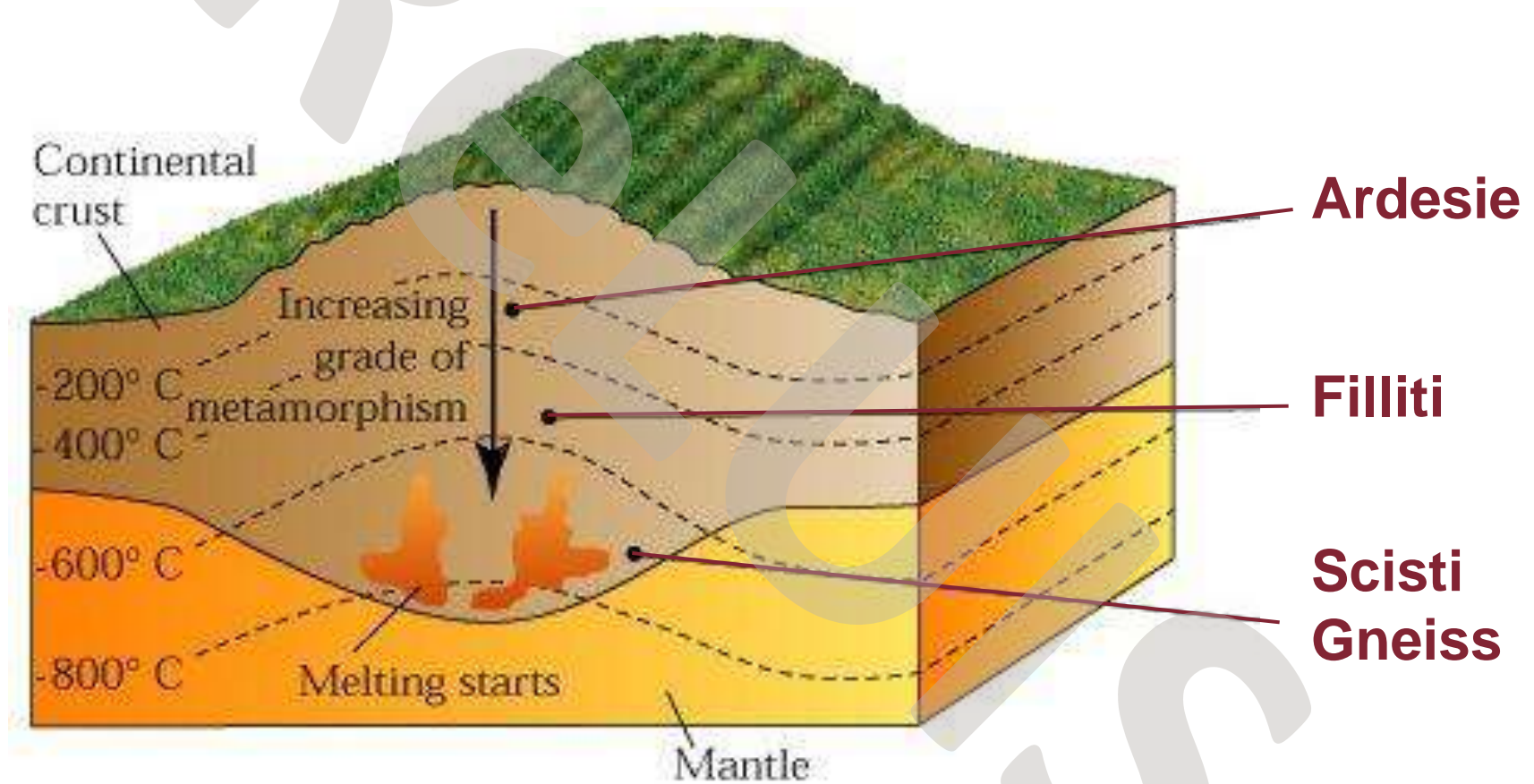
Alto grado di metamorfismo
Scisti



Alto grado di metamorfismo
Gneiss

Tipologia di classificazione delle rocce

Metamorfismo regionale



Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

Quando la pressione esercitata a determinate profondità assume valori sensibilmente superiori in una direzione dello spazio, rispetto alle altre due, si parla di **PRESSIONE DEVIATORICA**.

L'azione di una pressione deviatorica produce una risposta deformativa o di sforzo da parte del materiale cui è sottoposta.

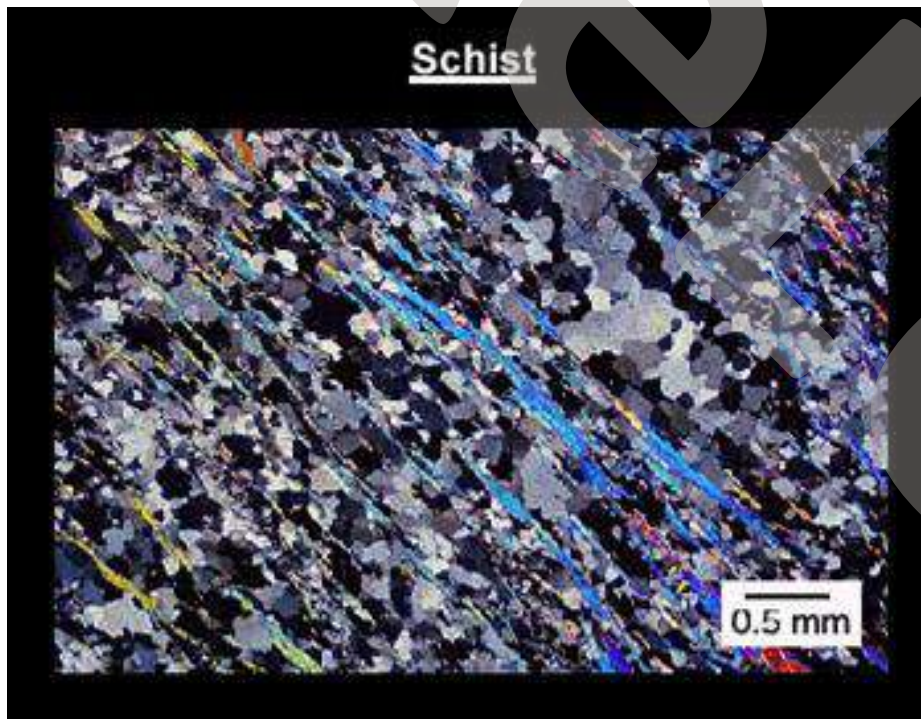
In particolare se fra i minerali costituenti la roccia, soggetta a pressione deviatorica, sono presenti in percentuale significativa i fillosilicati, essi tenderanno a far assumere alla roccia una particolare **tessitura** planare, detta **scistosa**, che è tipica delle rocce metamorfiche e conferisce ad esse un caratteristico comportamento meccanico di tipo anistropo.

Tipologia di classificazione delle rocce

Rocce metamorfiche

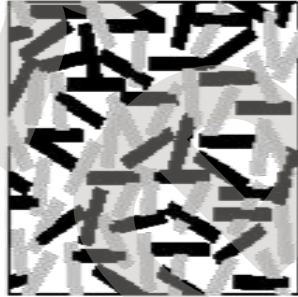
Rocce foliate: **scisti**

Rocce non foliate: **marmo**

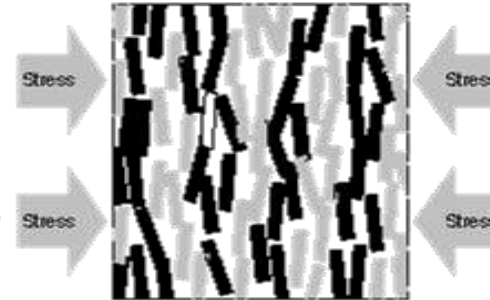


Tipologia di classificazione delle rocce

Differenza nella tessitura e nell'aspetto fra un granito (a) ed uno gneiss (b)



Prima del metamorfismo



Dopo il metamorfismo



Strutture geologiche

Le **strutture geologiche** sono il prodotto delle deformazioni permanenti e delle fratture determinate, nelle formazioni rocciose, dai diversi stati di sollecitazione che si succedono, all'interno di esse, nell'arco dei tempi di geologici.

I processi tettonici sono responsabili delle superfici di discontinuità quali **faglie, diaclasi, fratture** che permeano gli ammassi rocciosi condizionando la resistenza, la deformabilità e l'attitudine di essi ad essere attraversati dalle acque sotterranee, oltre che essere sede di giacimenti di idrocarburi

Strutture geologiche

Strutture geologiche fragili: sono testimoni del comportamento elasto-fragile delle rocce in passato.

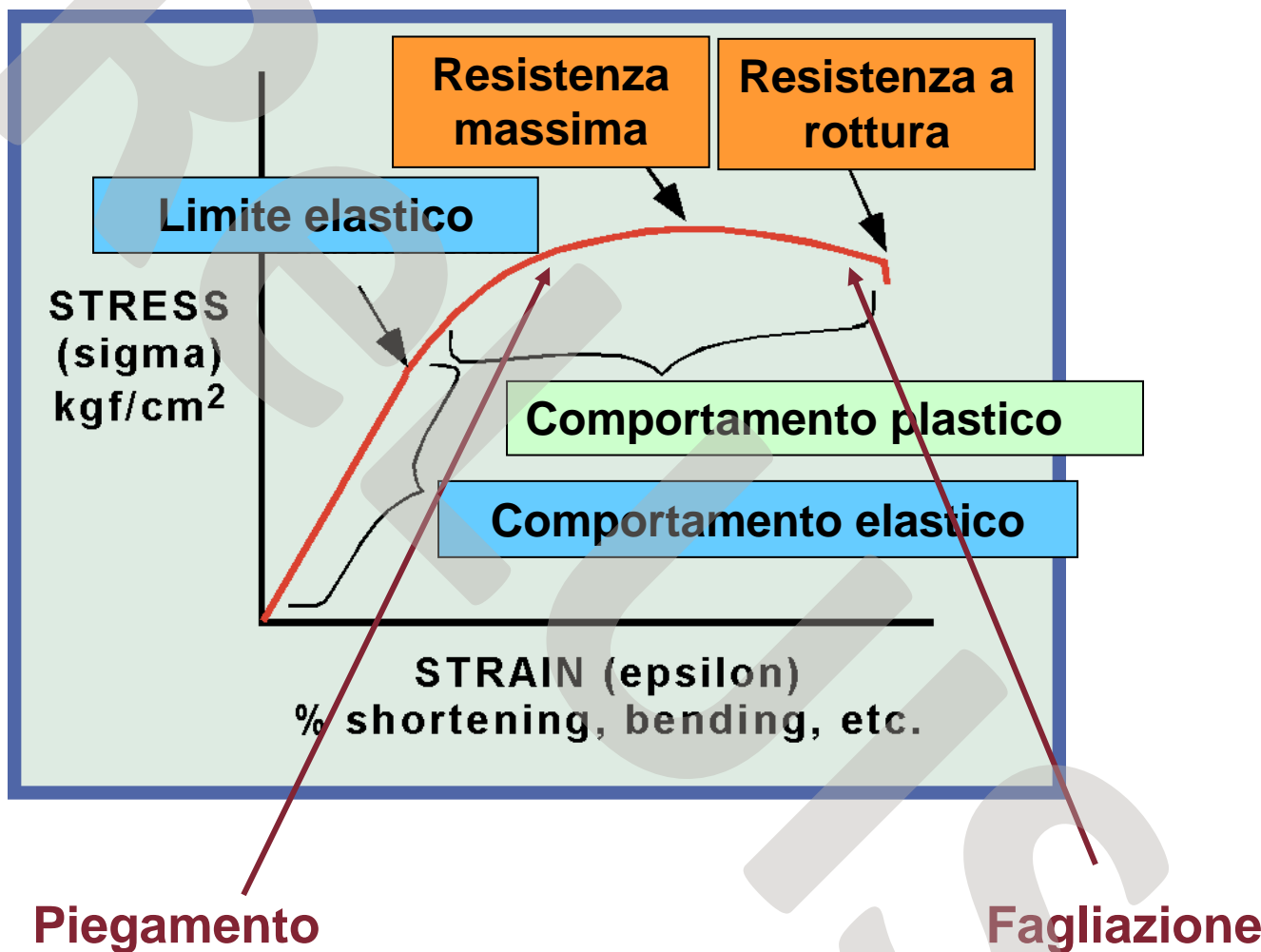
- Faglie**
- Diaclasi**
- Giunti**

Strutture geologiche duttili: hanno conservato nei tempi geologici la capacità di deformarsi in modo visco-plastico permanente.

- Pieghe**
- Scistosità**
- Foliazione**

Tale distinzione è funzione dell'entità della sollecitazione applicata, del tempo in cui si esercita e della natura costitutiva della roccia.

Strutture geologiche



Sollecitazioni

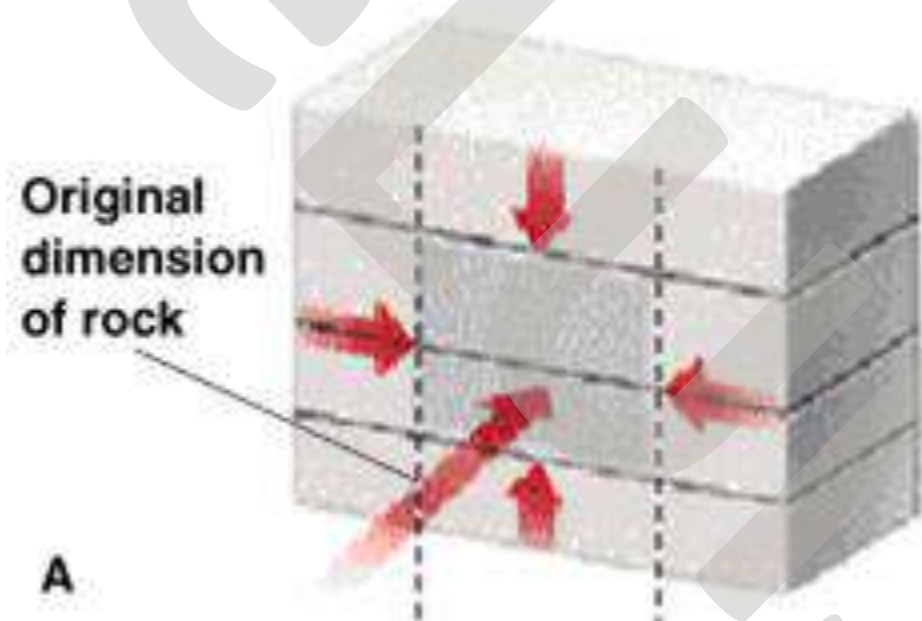
Le formazioni rocciose, per effetto dei processi tettonici, sono sottoposte a:

- **Sollecitazioni di compressione**
- **Sollecitazioni di trazione**
- **Sollecitazioni di taglio**

Tali sollecitazioni, in funzione del tempo in cui hanno agito e delle caratteristiche costitutive dell'ammasso roccioso, possono produrre solo deformazione, oppure solo rottura, oppure, ancora, rottura con movimento relativo fra le parti, precedentemente solidali.

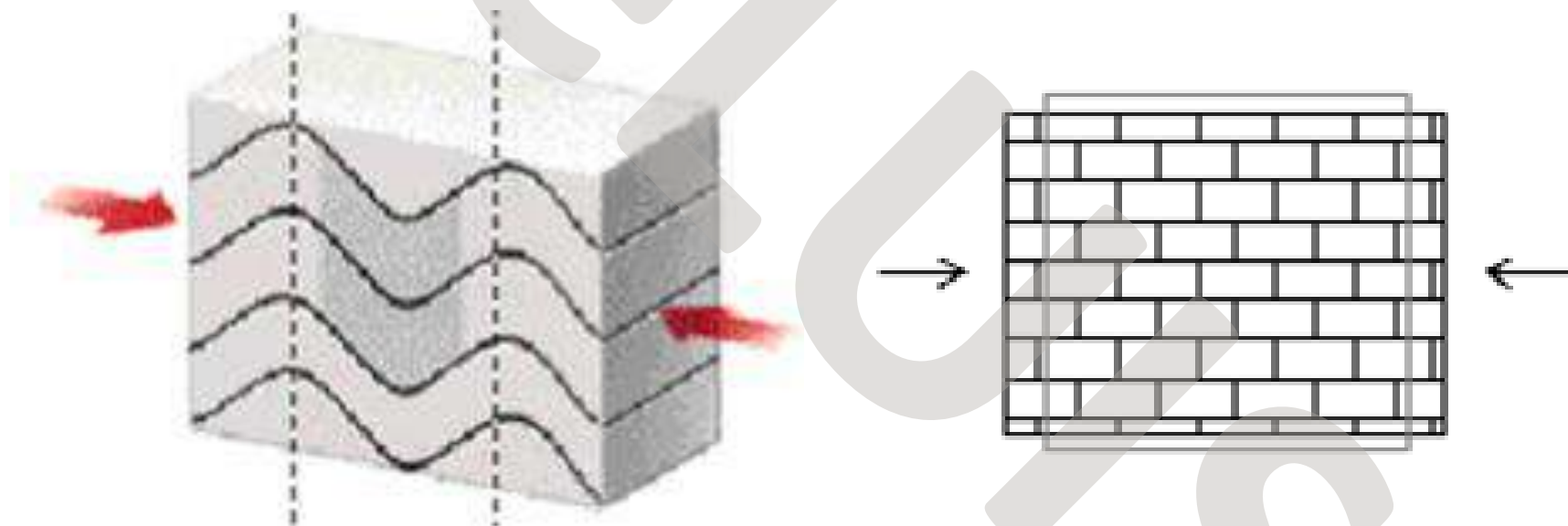
Sforzo di confinamento

La pressione di confinamento è simile alla pressione che si percepisce sul corpo quando ci si immerge in profondità sott'acqua, essa riduce il volume del corpo senza deformatarlo.



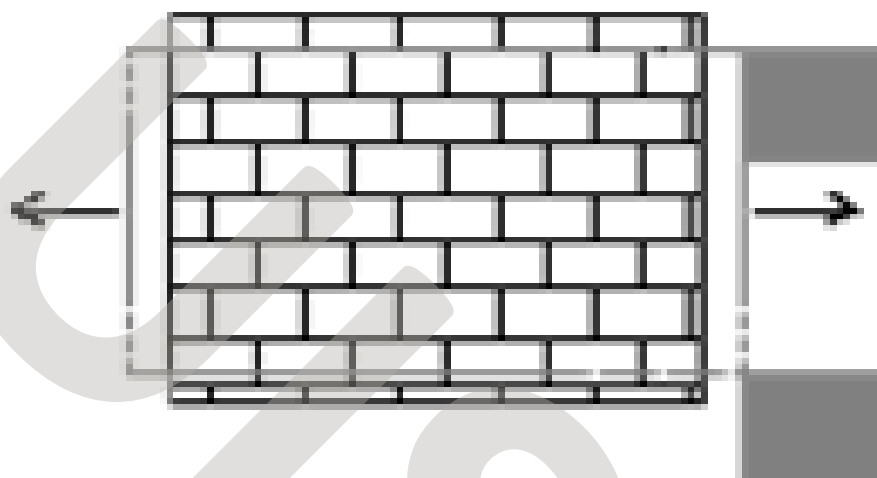
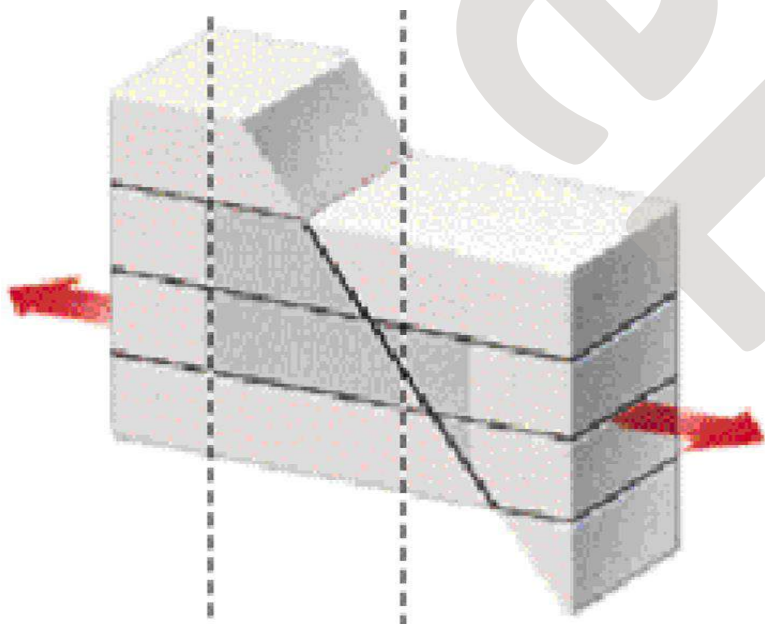
Sforzo di compressione

Le forze sono applicate secondo una particolare direzione (compressione tettonica). Lo sforzo di compressione deforma la roccia e porta ad una riduzione della distanza originale tra due punti.



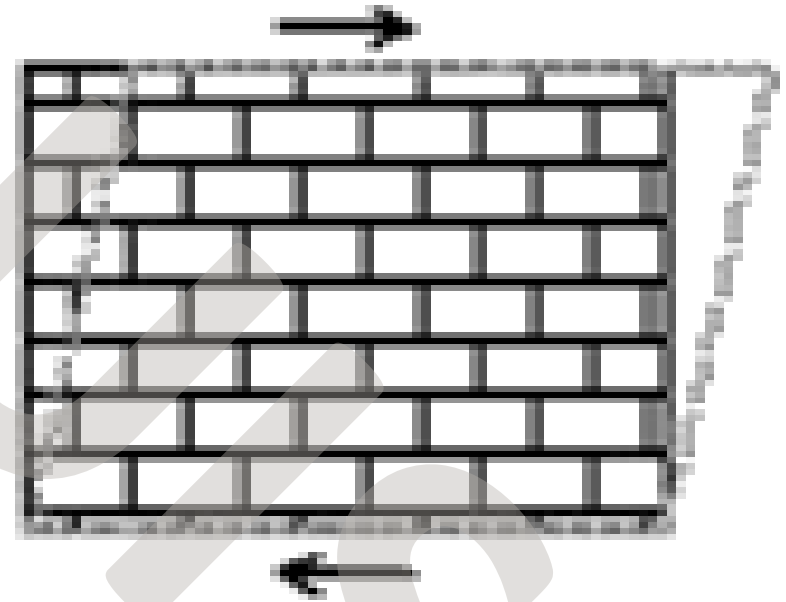
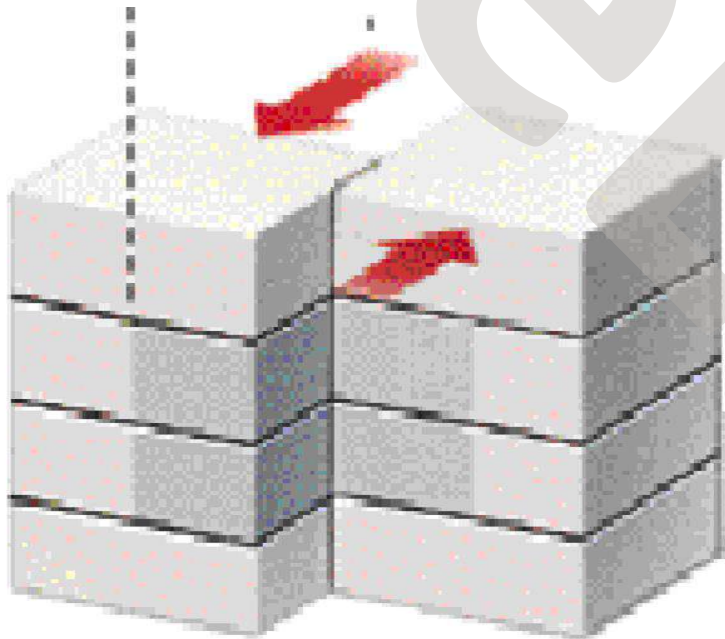
Sforzo di distensione

Lo sforzo di distensione frattura la roccia e tende ad allungare un corpo e ad assottigliarlo.



Sforzo di taglio

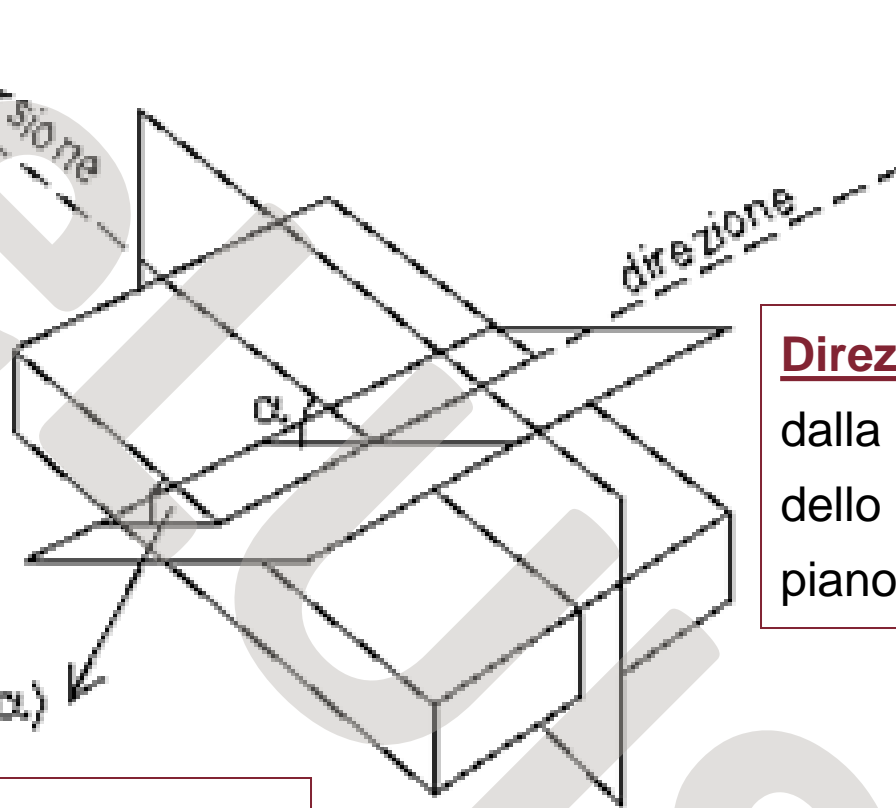
Lo sforzo di taglio agisce secondo direzioni parallele, ma opposte; le due parti scorrono l'una rispetto all'altra. Comporta deformazioni.



Immersione: è data dall'orientazione, rispetto al Nord geografico, del piano verticale, contenente la linea di massima pendenza dello strato.

inclinazione (α)

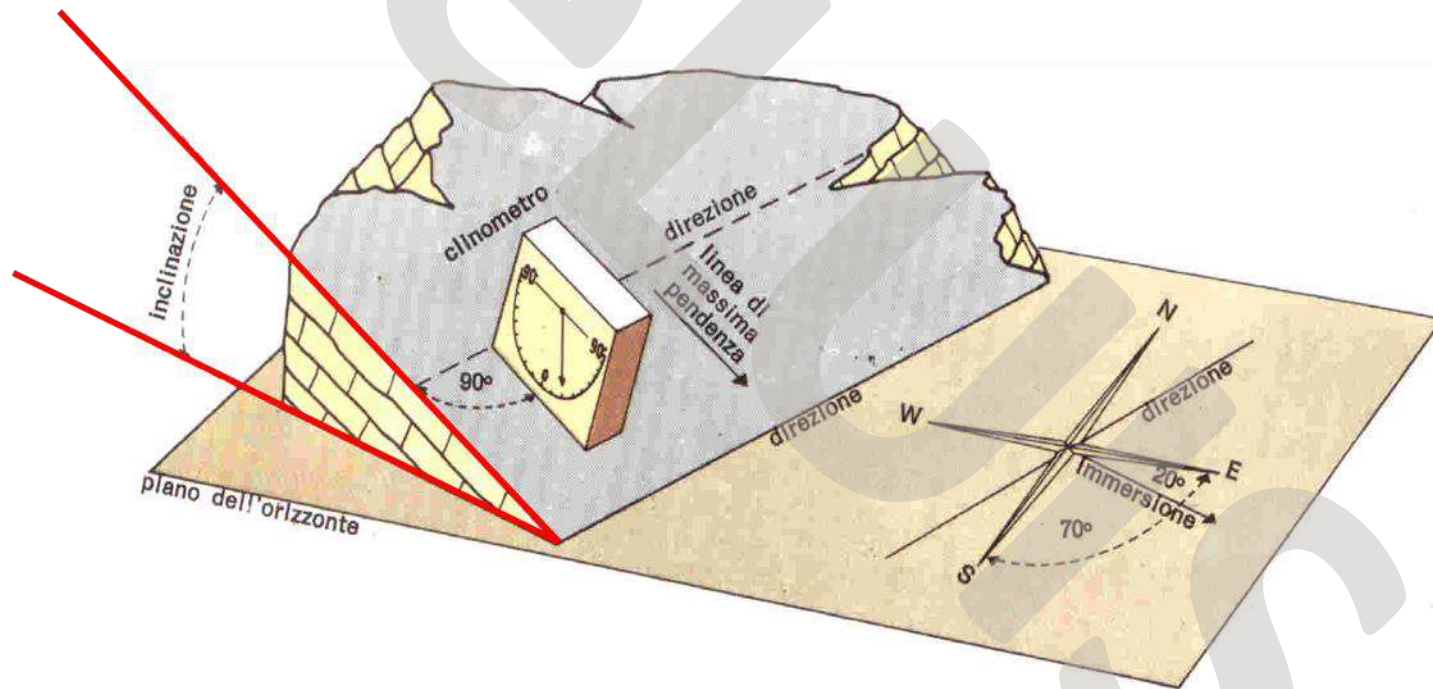
Inclinazione: è l'angolo formato dallo strato con il piano orizzontale.



Direzione: è data dalla intersezione dello strato con un piano orizzontale.

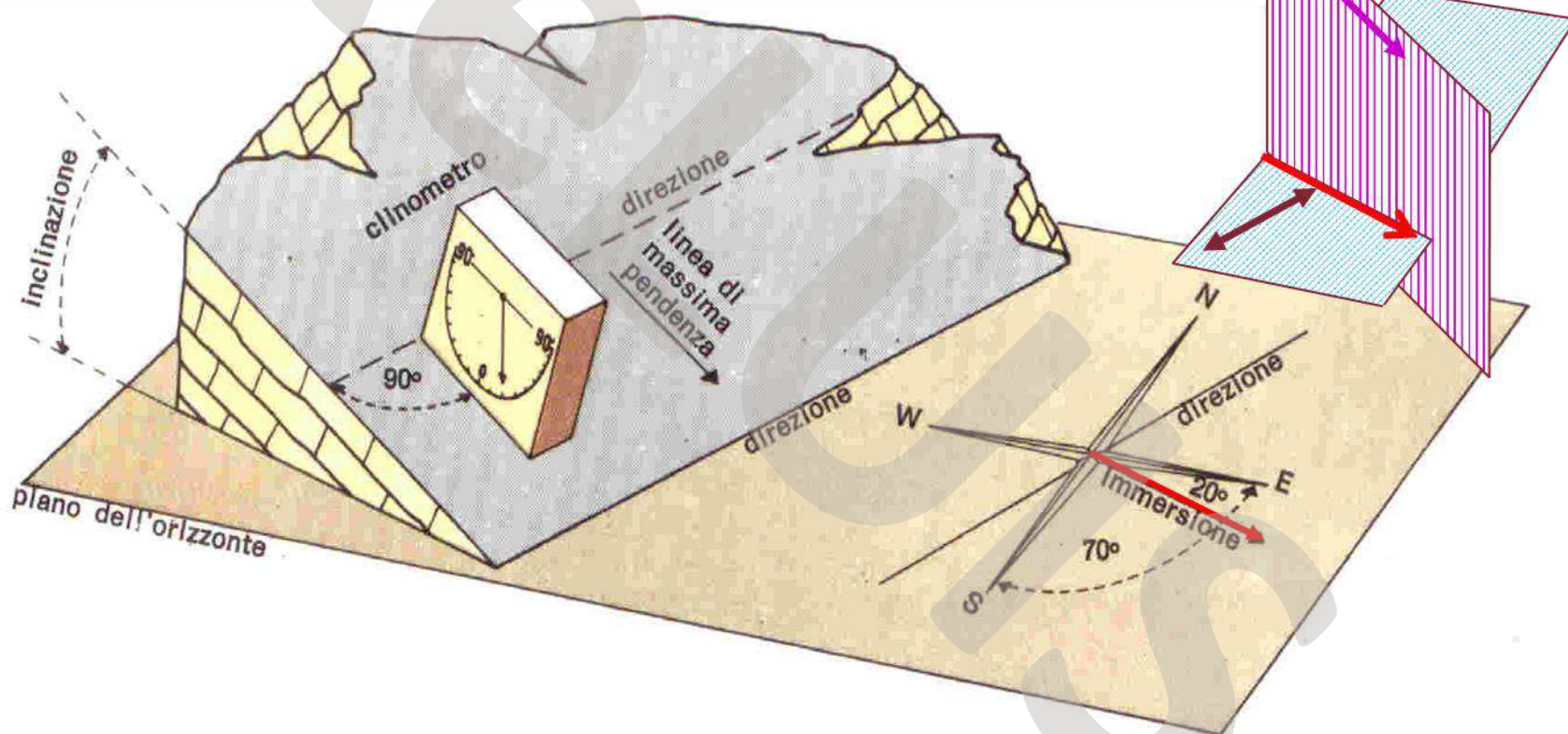
Inclinazione (pendenza) di uno strato

Inclinazione: è l'angolo zenitale (da 0° a 90° , misurato con il clinometro in un piano verticale) formato dalla retta di massima pendenza del piano dello strato con un piano orizzontale



Immersione di uno strato

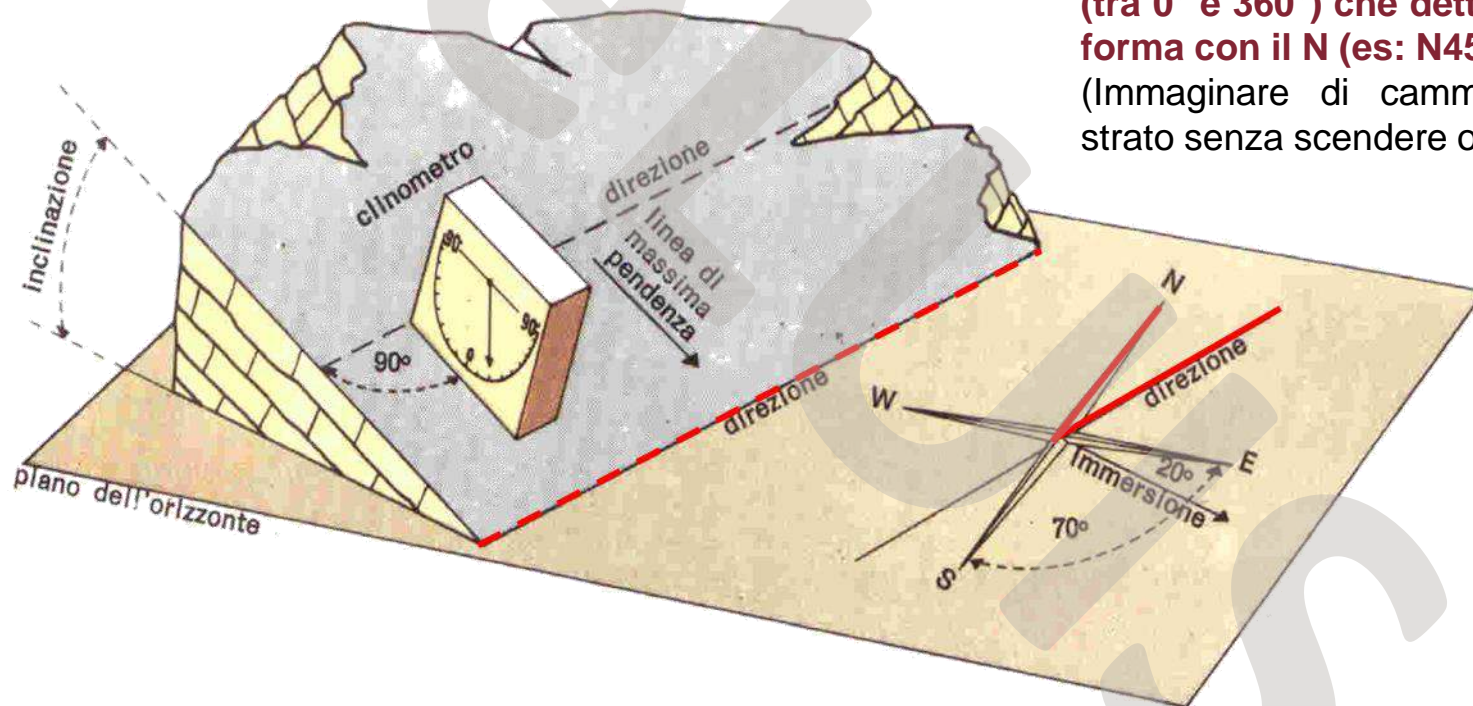
Immersione: è l'orientazione rispetto al Nord del piano verticale che contiene la retta di massima pendenza.



Direzione (strike) di uno strato

Direzione: è la direzione della retta che risulta dall'intersezione del piano dello strato con un piano orizzontale.

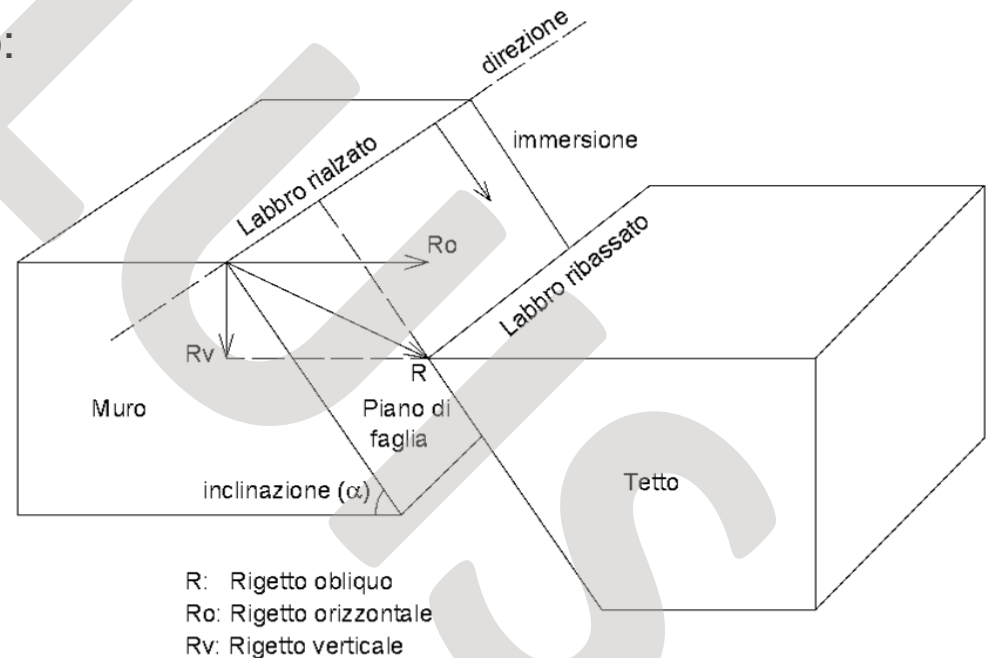
È determinata dall'angolo azimutale (tra 0° e 360°) che detta intersezione forma con il N (es: N45°E)
 (Immaginare di camminare su uno strato senza scendere o salire)



Le **faglie** sono fratture di un ammasso roccioso, accompagnate da un movimento relativo delle due parti lungo la superficie di rottura, che prende il nome di **superficie di faglia** oppure **piano di faglia**.

La caratterizzazione geometrica di tale piano, che approssima la superficie, avviene attraverso:

- la **direzione**,
- l'**immersione**
- l'**inclinazione**.
- un labbro superiore, appartenente al blocco rialzato, definito **tetto** della faglia,
- un labbro inferiore, relativo al blocco ribassato, chiamato **muro** della faglia



Classificazione delle faglie

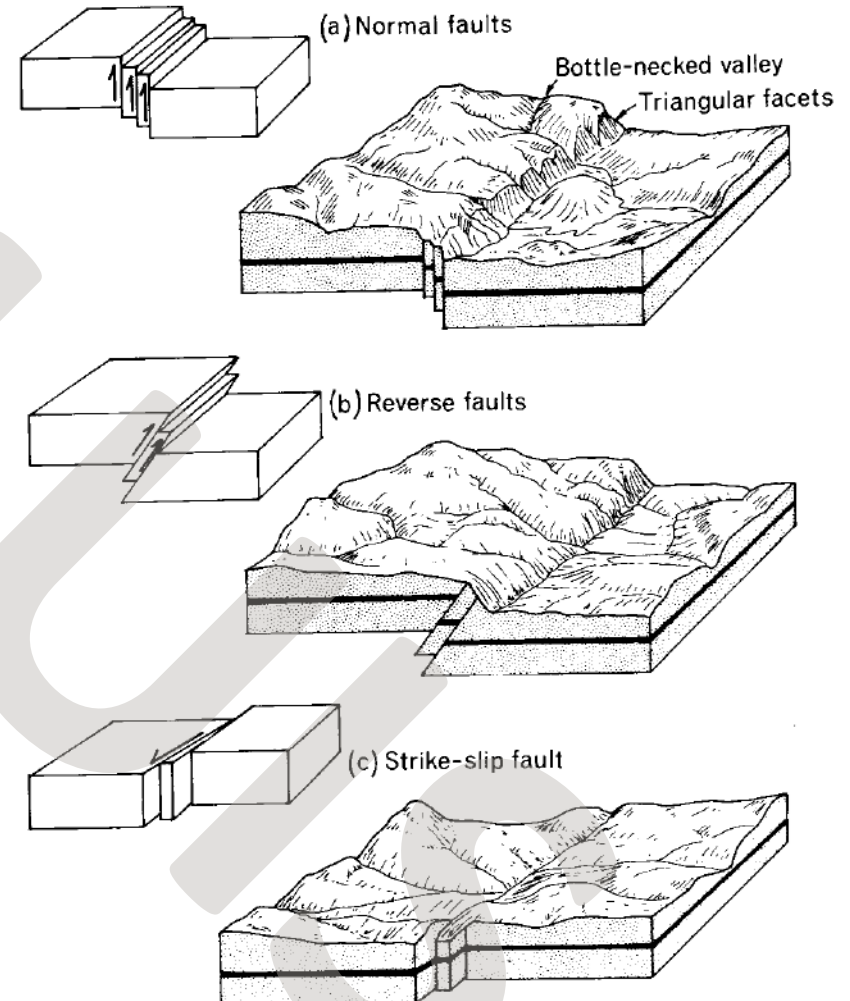
- **Faglie trascorrenti**: le parti opposte scorrono l'una rispetto all'altra.
- **Faglie dirette o normali o distensive**: le parti opposte si allontanano l'una dall'altra.
 - ❑ Le rocce sovrastanti il piano di faglia (**tetto**) si muovono **verso il basso** rispetto alle rocce sottostanti (**muro**), causando una distensione ed un conseguente assottigliamento crostale.
 - ❑ **Faglie inverse o di compressione o convergenti**: le parti opposte si muovono l'una verso l'altra.
 - ❑ Le rocce sovrastanti (tetto) il piano di faglia si muovono verso l'alto rispetto alle rocce sottostanti (muro) causando un accorciamento crostale.

Classificazione delle faglie

•Le **faglie normali** sono prodotte da **forze di distensione**.

•Le **faglie inverse** sono prodotte da **forze di compressione**.

•Le **faglie trascorrenti** sono prodotte da **forze di taglio**.



Pieghe (sinclinali ed anticlinali)

Per effetto delle sollecitazioni di compressione, orientate, gli strati che compongono una formazione sedimentaria possono deformarsi, assumendo la configurazione di una piega che, in funzione dell'aspetto, può essere definita in modi diversi.

Sinclinale: la concavità della piega è verso l'alto

Anticlinale: la concavità della piega è verso il basso

A queste strutture si aggiunge l'attributo erosa, quando abbiano subito processi di erosione, tali da portare in affioramento tutte le stratificazioni che le costituiscono.

Proprietà degli ammassi rocciosi

L'insieme degli effetti prodotti dalla storia geologica sulle formazioni rocciose concorre alla caratterizzazione del comportamento meccanico ed idraulico di queste in risposta ai cambiamenti tensionali imposti dall'opera dell'uomo.

Tali effetti si traducono nelle proprietà degli ammassi rocciosi e possono essere ricondotti:

- Allo stato del materiale roccioso ed al suo grado di alterazione.
- Alla presenza di discontinuità.

Caratterizzazione delle discontinuità

Le discontinuità presenti all'interno di un ammasso roccioso sono superfici che costituiscono:

- Soluzioni di continuità meccaniche (Fratture)
- Soluzioni di continuità geologiche (Giunti di strato)

che, approssimativamente, possono essere rappresentate per mezzo di piani, variamente orientati nello spazio.

La caratterizzazione geometrica e meccanica dei giunti è uno degli aspetti propedeutici alla corretta impostazione della previsione del comportamento tecnico dell'ammasso roccioso, nel quale tali discontinuità sono presenti.

Caratterizzazione delle discontinuità

I parametri che concorrono alla caratterizzazione delle discontinuità sono:

- Rilievo
- Orientazione
- Spaziatura e persistenza
- Scabrezza
- Resistenza a compressione
- Apertura e riempimento

Caratterizzazione delle discontinuità

Rilievo

Il **criterio soggettivo** prevede che siano rilevate solo le discontinuità che sembrano svolgere un ruolo importante nei riguardi delle caratteristiche meccaniche dell'ammasso.

Il **criterio oggettivo** prevede il campionamento di tutte le discontinuità che intersecano una certa linea di riferimento (linea di scansione) o che ricadono all'interno di una certa area di campionamento.

L'approccio soggettivo è il più rapido ed economico, ma richiede una preliminare conoscenza dell'area in esame e l'individuazione preventiva dei domini di discontinuità.

Caratterizzazione delle discontinuità

Rilievo

Il rilievo di campagna può essere effettuato:

- Superficialmente, su pareti di roccia esposte che possono appartenere ad attività estrattive, oppure possono essere il prodotto di scavi a cielo aperto precedentemente eseguiti.
- In profondità, ricorrendo ai risultati di perforazioni meccaniche a carotaggio continuo.

L'esame delle discontinuità riscontrabili lungo le singole carote, estratte nel corso della perforazione, è un utile strumento di valutazione della distribuzione delle fratture presenti all'interno dell'ammasso roccioso, fino alla profondità raggiunta da questo tipo di indagine.

Caratterizzazione delle discontinuità

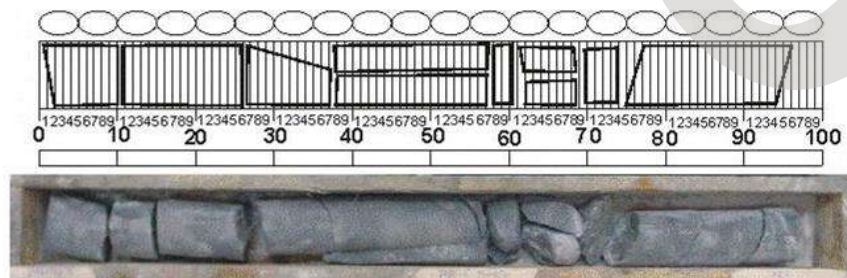
RQD - Rock Quality Designation

Dalla valutazione delle carote estratte è possibile definire l'indice **RQD** (**Rock Quality Designation**) espresso dalla relazione:

$$RQD = \frac{\sum L_c}{L_T} \times 100$$

L_c : lunghezza dei singoli pezzi di carota di estensione superiore al diametro di perforazione

L_T : lunghezza totale del tratto di perforazione rispetto al quale sono stati considerati i pezzi di carota per il calcolo dell'RQD



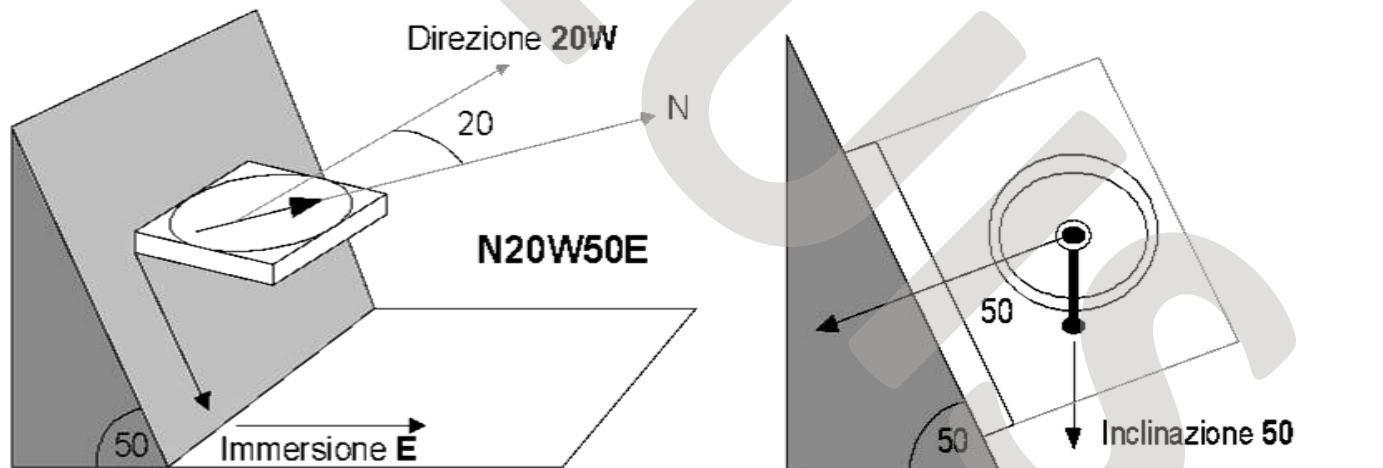
$$RQD = \frac{16+11+19+19}{100} = 65\%$$

Caratterizzazione delle discontinuità

Orientazione delle discontinuità

I parametri che sono in grado di identificare, univocamente, un piano rappresentativo di una superficie di discontinuità sono:

- Inclinazione
- Immersione
- Direzione



Caratterizzazione delle discontinuità

Orientazione delle discontinuità

Il rilevamento dell'orientazione delle fratture può avvenire in campagna per mezzo di una bussola, per la definizione dell'immersione e della direzione, e di un goniometro per la misura dell'inclinazione.

Generalmente si utilizza una bussola giroscopica con goniometro.

Il rilievo dell'orientamento delle fratture consiste nella loro identificazione e nel riportare su una carta topografica il punto di rilevazione ed i valori di inclinazione, immersione e direzione riscontrati per ognuna di esse.



Caratterizzazione delle discontinuità

Spaziatura delle discontinuità

La **spaziatura** fra le fratture è la distanza che intercorre fra due discontinuità successive, presenti nell'ammasso roccioso.

La spaziatura è definita dalla lunghezza del segmento perpendicolare che unisce la traccia di una frattura con la traccia di quella successiva.



Caratterizzazione delle discontinuità

Classificazione della spaziatura dei giunti

La distribuzione delle spaziature può essere rappresentata per mezzo di istogrammi in cui ogni blocco si riferisce ad un intervallo di spaziatura ed in ordinata il numero o la percentuale relativa di discontinuità comprese in ogni intervallo di spaziatura rilevato.

Classificazione	Spaziatura $\delta_{m,j}$ (mm)
Estremamente stretta	< 20
Molto stretta	20 - 60
Stretta	60 - 200
Moderata	200 - 600
Larga	600 - 2.000
Molto larga	2.000 - 6.000
Estremamente larga	> 6.000

Caratterizzazione delle discontinuità

Frequenza delle discontinuità

Per indicare la densità delle fratture presenti in una porzione di ammasso roccioso viene utilizzato il parametro **frequenza delle discontinuità**, definito come il numero di giunti per unità di lunghezza rilevata.

Si tratta di un parametro adimensionale, in grado di fornire in modo sintetico il grado di fratturazione dell'ammasso roccioso.

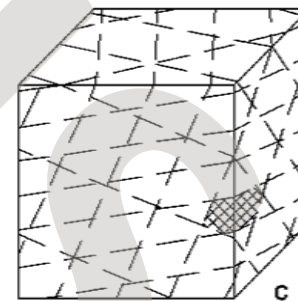
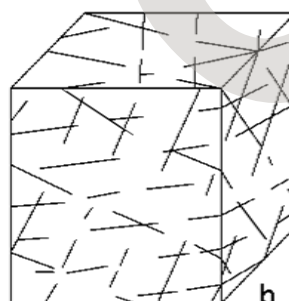
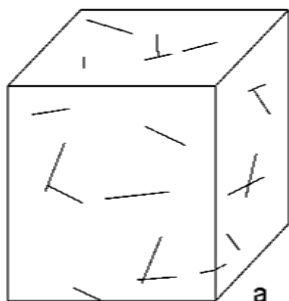
Caratterizzazione delle discontinuità

Persistenza delle discontinuità

La **persistenza** è il parametro che descrive la lunghezza di un giunto all'interno di un ammasso roccioso, ed è rilevata in campagna per mezzo di una fettuccia metrica.



Persistenza	Lunghezza
molto bassa	< 1 m
bassa	1-3 m
media	3-10 m
alta	10-20 m
molto alta	> 20 m



Caratterizzazione delle discontinuità

Scabrezza delle discontinuità

La **rugosità delle superfici** che costituiscono le due facce di una discontinuità è definita scabrezza ed è caratterizzata sia su piccola sia su grande scala.

La rugosità è fortemente condizionata:

- dalle modalità di formazione della frattura
- dalla litologia
- dal grado alterazione del materiale costitutivo dell'ammasso roccioso

La rugosità di una superficie può essere stimata dal **Joint Roughness Coefficient (JRC)**, la cui determinazione avviene per mezzo di un profilometro, cioè un misuratore del profilo della discontinuità.



Caratterizzazione delle discontinuità

Resistenza a compressione

La **resistenza a compressione** del materiale costituente le pareti della discontinuità è stimata per mezzo del parametro JCS, che viene determinato mediante prove sclerometriche, utilizzando il martello di Schmidt sulle pareti delle discontinuità.

Le prove col martello di Schmidt si eseguono facendo ogni volta 20 serie di letture: 10 sulla superficie naturale della discontinuità e 10 sulla stessa superficie dopo levigatura a mano, allo scopo di rimuovere la pellicola alterata più superficiale.

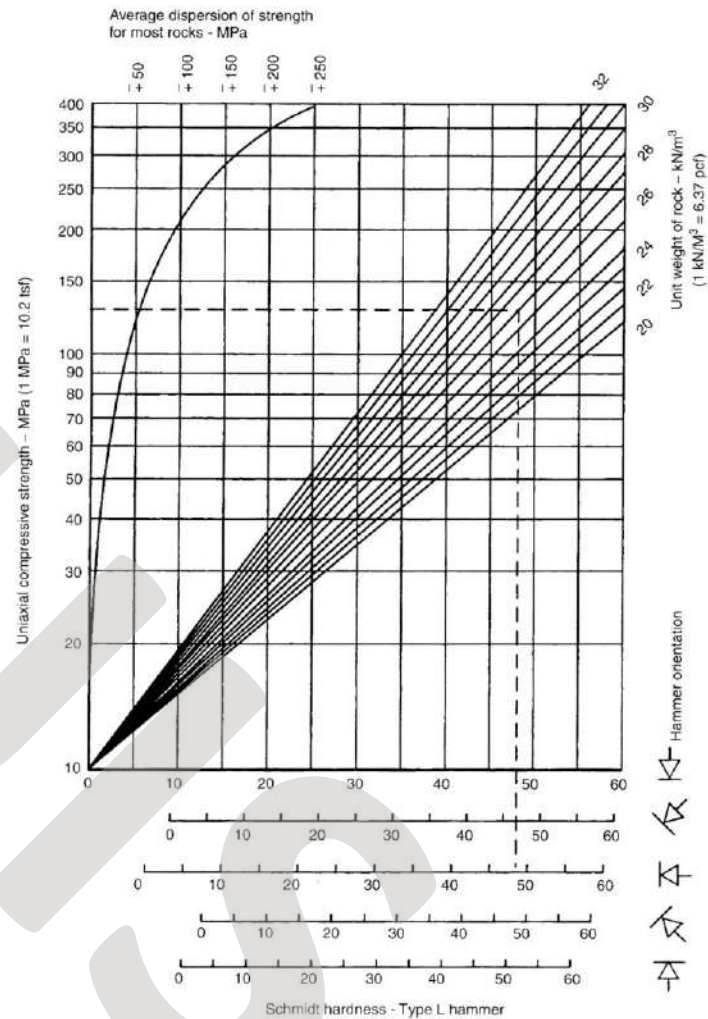


Caratterizzazione delle discontinuità

Resistenza a compressione

Per tradurre l'indice di rimbalzo ottenuto con il martello di Schmidt in stima della resistenza a compressione del materiale roccioso interessato dalla prova si può utilizzare l'abaco riportato in figura.

In basso sono riportati assi di riferimento differente per diverse orientazioni del martello di Schmidt.



Caratterizzazione delle discontinuità

Apertura delle discontinuità

discontinuità aperta, talvolta è costante, più spesso è variabile. In quest'ultimo caso si assume come rappresentativo il valore medio fra quelli rilevati lungo una frattura.

Le fratture si distinguono in serrate o chiuse, aperte o riempite.

Apertura	Distanza (mm)
stretta	0.1-0.25
aperta	0.5-2.50
estrem. aperta	10-100
cavernosa	> 100

Il **riempimento** è il materiale che separa le pareti delle discontinuità, la cui distanza perpendicolare, in questo caso, è definita ampiezza, e può essere misurata tramite uno spessimetro o, nel caso di discontinuità ben aperte, con un metro.

Il riempimento delle discontinuità influenza in modo significativo il comportamento meccanico delle discontinuità.

- **Riempimento autoctono:** si è formato nello stesso luogo in cui si trova all'atto del rilievo. Riempimento autoctono in un ammasso di granito.
- **Riempimento alloctono:** si è formato in un luogo differente rispetto a quello di rinvenimento durante il rilievo, poi, per azione della gravità oppure del trasporto ad opera delle acque in sotterraneo, è andato a depositarsi all'interno di fratture aperte.



Riempimento alloctono in un ammasso calcareo

Elementi di idrogeologia

L'idrogeologia applicata è la disciplina che studia gli aspetti quantitativi e qualitativi della circolazione delle acque nel sottosuolo, in particolare:

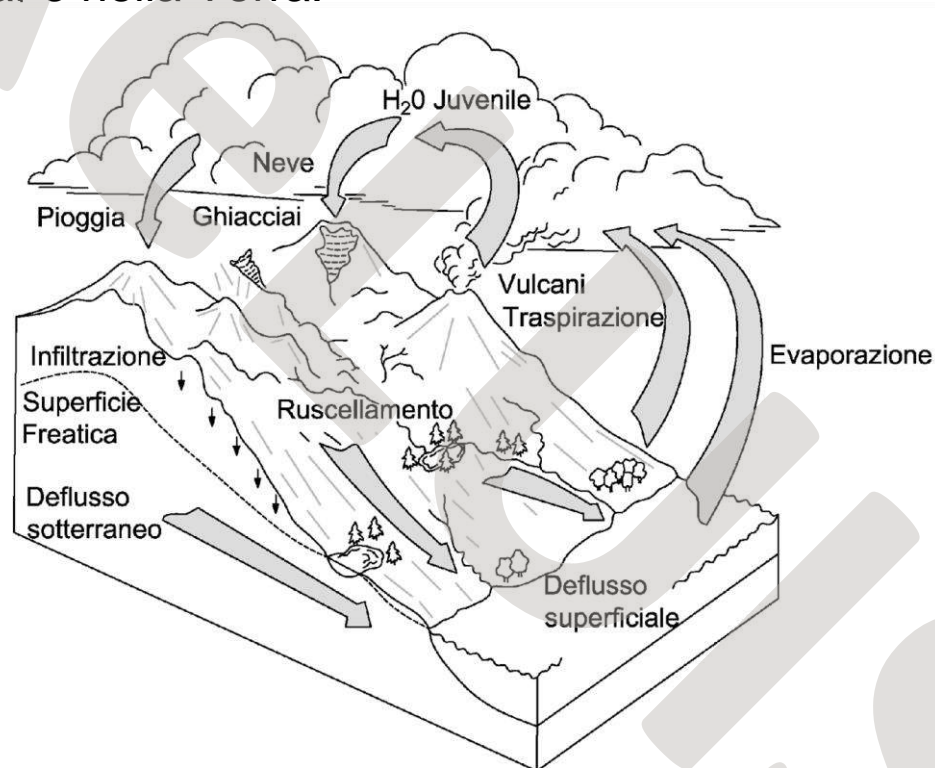
- l'interazione acqua-suolo a livello microscopico;
- le modalità di presenza e di circolazione delle acque nel sottosuolo

Stima della distribuzione volumetrica dell'acqua sulla e nella terra

<i>Ambiente</i>	<i>Volume</i>	<i>%</i>
<i>Oceani</i>	$1320 * 10^9 m^3$	97,20%
<i>Neve e ghiaccio</i>	$30 * 10^9 m^3$	2,15%
<i>Acque sotterranee a profondità inferiori a 800 m</i>	$4 * 10^9 m^3$	0,31%
<i>Acque sotterranee a profondità superiori a 800 m</i>	$4 * 10^9 m^3$	0,31%
<i>Zona insatura</i>	$0,07 * 10^9 m^3$	0,005%
<i>Laghi d'acqua dolce</i>	$0,12 * 10^9 m^3$	0,009%
<i>Laghi d'acqua salata</i>	$0,10 * 10^9 m^3$	0,008%
<i>Fiumi</i>	$0,001 * 10^9 m^3$	0,0001%
<i>Atmosfera</i>	$0,013 * 10^9 m^3$	0,001%

Ciclo idrologico

Il ciclo idrologico comprende i fenomeni che, complessivamente, descrivono l'evoluzione degli stati e delle condizioni che l'acqua può assumere sulla. e nella Terra.



Ciclo idrologico

Evaporazione

Evaporazione dell'acqua dagli oceani: l'acqua evaporata si muove in atmosfera facendo parte integrante del ciclo meteorologico terrestre. Quando le condizioni atmosferiche lo consentono il vapor d'acqua condensa, e forma le nuvole, che si muovono sopra gli oceani, o sopra le terre emerse.

Le nuvole sono formate da gocce d'acqua, e danno luogo alle precipitazioni atmosferiche, liquide o solide, quando raggiungono dimensioni tali da non poter più rimanere sospese in atmosfera.

Ciclo idrologico

Precipitazione e Ruscellamento

Precipitazioni (P): hanno luogo sia sugli oceani sia sulla terra ferma. L'acqua meteorica, allo stato liquido oppure sotto forma di neve, raggiunta la superficie terrestre, entra a far parte con modalità differenti del ciclo idrologico.

Una parte di queste precipitazioni si ferma come manto nevoso.

Un'altra aliquota delle precipitazioni ruscella e raggiunge più o meno rapidamente il reticolo idrografico superficiale (**Ruscellamento superficiale R**).

Ciclo idrologico

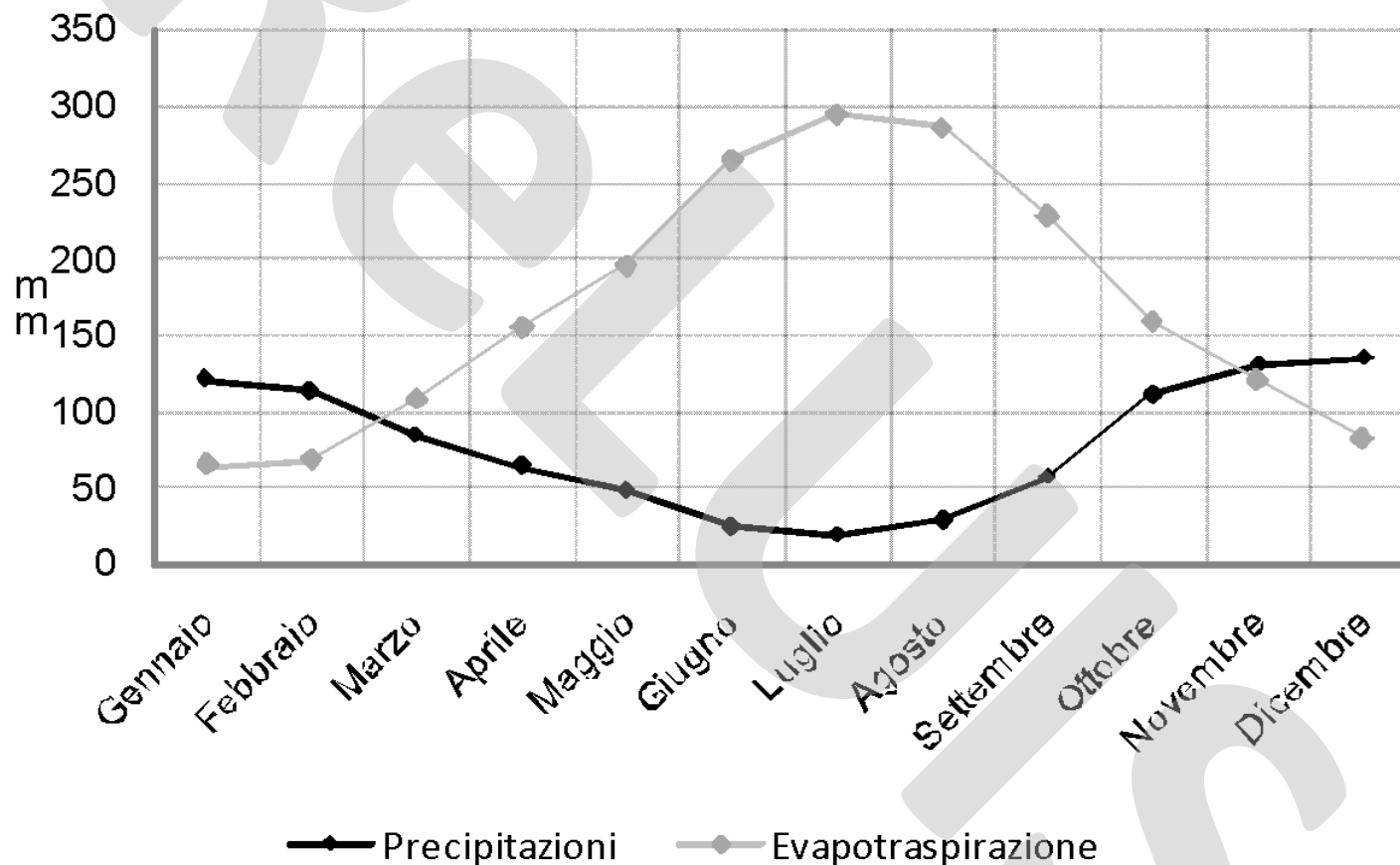
Evapotraspirazione

Evapotraspirazione (E): un'aliquota delle precipitazioni ritorna in atmosfera per effetto di una combinazione di fenomeni che prendono il nome di evapotraspirazione.

Questo termine sintetizza i processi di evaporazione che si verificano per irraggiamento solare, e di traspirazione, ad opera delle piante. Il processo di traspirazione comprende l'attività svolta dalla vegetazione, attraverso la quale parte dell'acqua di origine meteorica che raggiunge il suolo, viene restituita all'atmosfera.

Ciclo idrologico

Andamento delle precipitazioni e della evapotraspirazione potenziale nell'anno idrologico



Ciclo idrologico

Infiltrazione

Infiltrazione (I): dove le formazioni geologiche affioranti lo consentono, una parte delle precipitazioni, sia liquide sia nevose, s'infiltra nel sottosuolo e costituisce l'aliquota di infiltrazione delle precipitazioni meteoriche.

In idrogeologia questo termine è il più interessante ai fini della valutazione quantitativa dell'acqua disponibile nel sottosuolo. Dall'equazione del bilancio idrogeologico:

$$P = E + I + R$$

si ricava:

$$I = P - E - R$$

Ciclo idrologico

Movimento dell'acqua nel sottosuolo

Il movimento delle acque nel sottosuolo avviene attraverso le rocce fino ai:

- **Punti di scarica:** sorgenti,
- **Punti di emergenza:** laghi, fiumi, canali, mari, oceani.

Il reticolo idrografico superficiale è alimentato dall'aliquota delle acque meteoriche, proveniente dal ruscellamento, oppure dalla circolazione idrica sotterranea. In quest'ultimo caso il contributo delle acque sotterranee al deflusso superficiale si chiama flusso di base.

Origine endogena:

- **Acque magmatiche:** sono le acque che si formano per condensazione del vapor d'acqua disciolto nel magma in risalita dall'interno verso la superficie terrestre.

Origine esogena:

- **Precipitazioni meteoriche**
- **Piogge**
- **Neve**
- **Precipitazioni al suolo**

Complesso acqua, aria e suolo

L'insieme solido-aria costituisce la trama di una roccia ed il supporto nel quale può inserirsi l'acqua sotterranea.

L'acqua nel sottosuolo è presente all'interno dei vuoti interstiziali, fra i granuli, e delle fratture esistenti negli ammassi rocciosi lapidei.

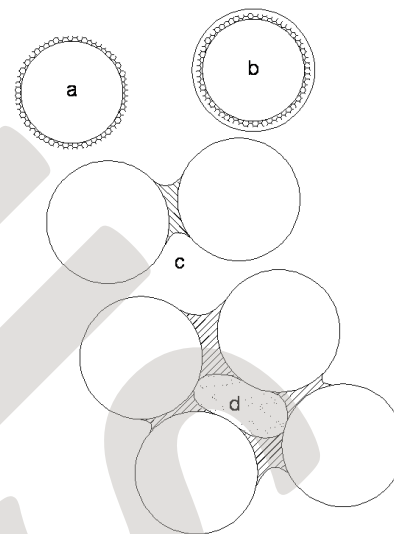
Le forme in cui è presente l'acqua nel sottosuolo sono:

Acqua igroscopica (a)

Acqua pellicolare (b)

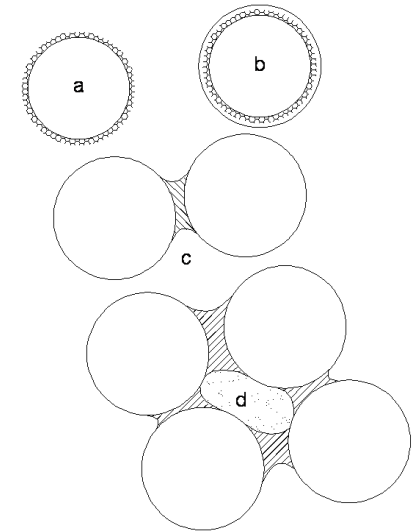
Acqua capillare (c)

Acqua gravifica (d)



Complesso acqua, aria e suolo

- a) **Acqua igroscopica:** è costituita dalle molecole d'acqua legate alle particelle di suolo da forze di superficie dovute alla natura dipolare della molecola H_2O , che sono superiori alla forza di gravità.
- b) **Acqua pellicolare:** è il secondo strato di molecole di H_2O che avvolgono con maggiore continuità, ma con legami dipolari di minore intensità, le particelle di suolo.
- c) **Acqua capillare:** si trova nei micropori delle formazioni rocciose, è trattenuta, all'interno di essi, contro la forza di gravità ed è direttamente utilizzabile dalle piante.
- d) **Acqua gravifica:** è la frazione d'acqua che è presente e si muove nel sottosuolo, per effetto della forza di gravità.



È questa l'acqua che interessa nella maggior parte dei casi le applicazioni sia della geologia sia della idrogeologia.

Le acque sotterranee possiedono energia in tre forme:

- **Energia meccanica**
- **Energia termica**
- **Energia chimica**

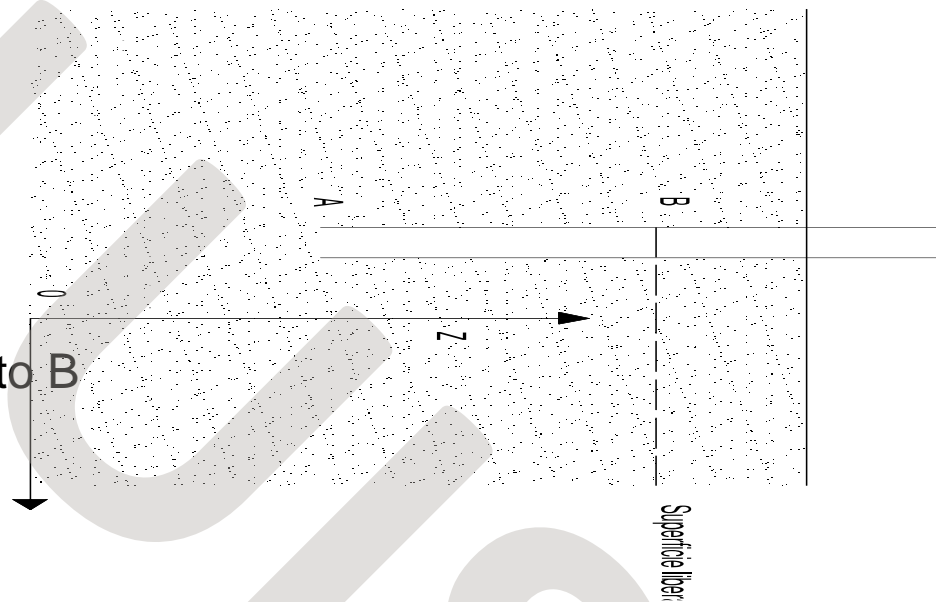
La tendenza ad eliminare le differenze di contenuto energetico, da punto a punto del sottosuolo, induce il movimento naturale delle acque in sottoterraneo.

Carico idraulico

Il **carico idraulico** in un punto B di un fluido incompressibile, soggetto esclusivamente alla forza di gravità è definito dalla relazione:

$$h = \frac{u^2}{2g} + \frac{p}{\rho g} + z$$

- u è la velocità del fluido nel punto B
- g è l'accelerazione di gravità
- p è la pressione atmosferica
- ρ è la densità dell'acqua
- z è la quota altimetrica, misurata positivamente verso l'alto, del punto B rispetto ad una quota di riferimento



Carico piezometrico

Nei mezzi porosi la velocità di flusso è molto bassa, per cui è giustificato trascurare il termine che si riferisce alla velocità dell'acqua:

$$h = \frac{p}{\rho g} + z$$

Da ciò consegue che l'espressione del carico idraulico si riduce a quella del solo **carico piezometrico**, il valore del quale dipende dall'origine scelta per l'asse z , generalmente coincidente con il livello medio del mare.

Livello piezometrico e Superficie piezometrica

Una volta raggiunto l'equilibrio la quota z_B è uguale al carico h nel punto B del piezometro, poiché il fluido all'interno del piezometro è immobile:

$$h_a = \frac{p_A}{\rho g} + z_A = \frac{p_B + \rho g(z_B - z_A)}{\rho g} + z_A = \frac{p_B}{\rho g} + z_B = h_B$$

Poiché, in genere, si assume la pressione atmosferica come lo zero di riferimento la relazione precedente diventa:

$$h_A = h_B = z_B$$

L'involuppo dei valori del carico idraulico, misurato nei piezometri inseriti nella zona satura del mezzo poroso, prende il nome di superficie piezometrica.

La **superficie piezometrica** è il luogo dei punti della zona satura in equilibrio con la pressione atmosferica.



Carico idraulico e carico piezometrico

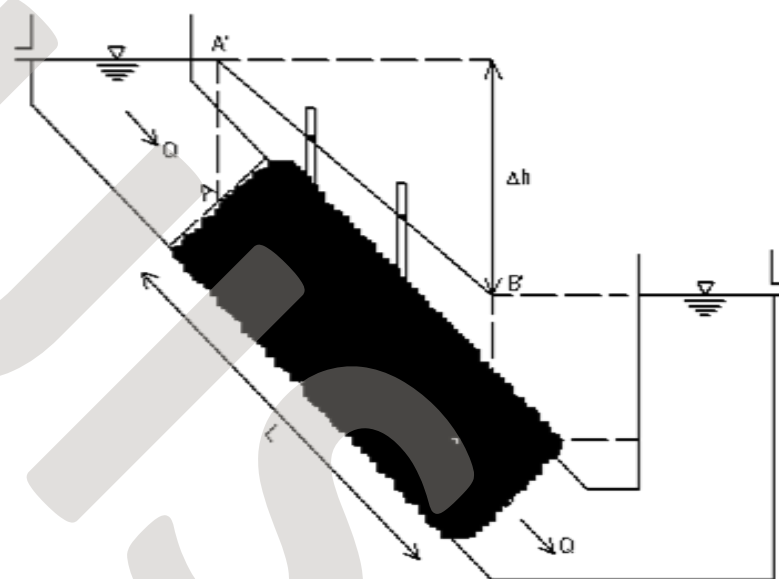
Per effetto delle differenze di carico che si registrano fra un punto e l'altro di una formazione geologica, l'acqua si muove nel sottosuolo, con modalità diverse in funzione delle caratteristiche idrauliche del mezzo attraversato.

Nei mezzi porosi il flusso dell'acqua può essere espresso attraverso la

Legge di Darcy:

$$Q = K \times A \times \frac{\Delta h}{L}$$

conducibilità idraulica o permeabilità (pointing to K)
area della sezione filtrante (pointing to A)
differenza di carico (pointing to Δh)
spessore della formazione porosa (pointing to L)



Gradiente idraulico e Legge di Darcy

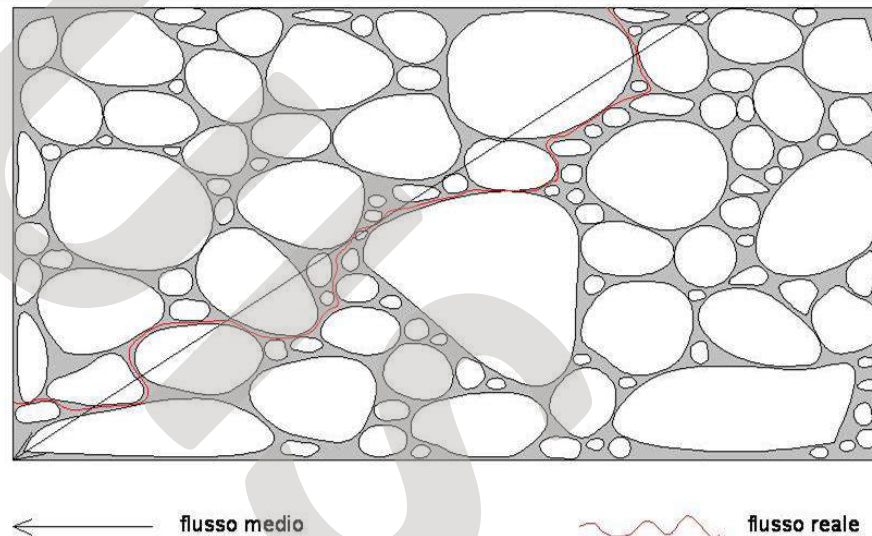
Il **gradiente idraulico** è la perdita di carico per unità di lunghezza:

$$i = \frac{\Delta h}{L}$$

La **velocità di filtrazione** espressa dalla **legge di Darcy** diventa quindi:

$$U = K * i$$

In realtà si tratta di una **velocità media di filtrazione** poiché il percorso dell'acqua nel sottosuolo è piuttosto tortuoso ed accidentato.



Gradiente idraulico e Legge di Darcy

In base alle equazioni di Navier-Stokes l'espressione generale della Legge di Darcy diventa:

$$U = -\frac{k}{\mu} (\text{grad}p + \rho \times g \times \text{grad}z)$$

Se si assume che l'acqua è un fluido incompressibile, l'equazione precedente diventa:

$$U = -\frac{k}{\mu} \text{grad}(p + \rho g z)$$

oppure, ricordando l'espressione del carico idraulico h:

dove:

$$U = -\frac{k\rho z}{\mu} \text{grad}h$$

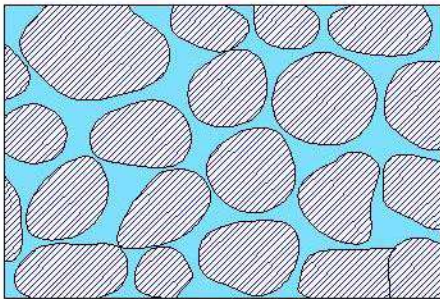
k è la **permeabilità intrinseca**

Tipi di permeabilità / Conducibilità idraulica

Generalmente si parla di rocce permeabili:

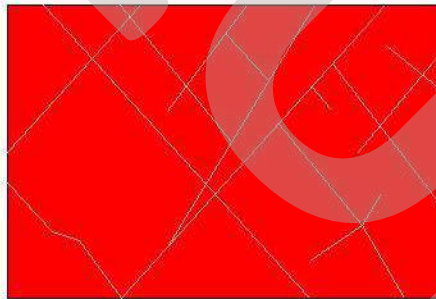
- per **porosità** (Permeabilità in piccolo)
- per **fratturazione** (Permeabilità in grande)
- per **carsismo** (Permeabilità in grande)

Sabbia e Ghiaia



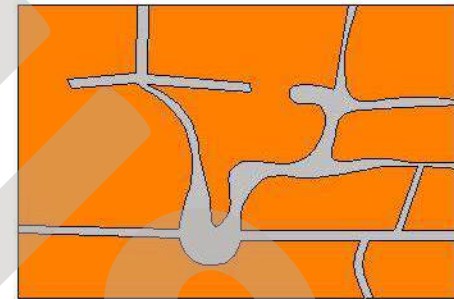
Porosità

Rocce Ignee



Fratturazione

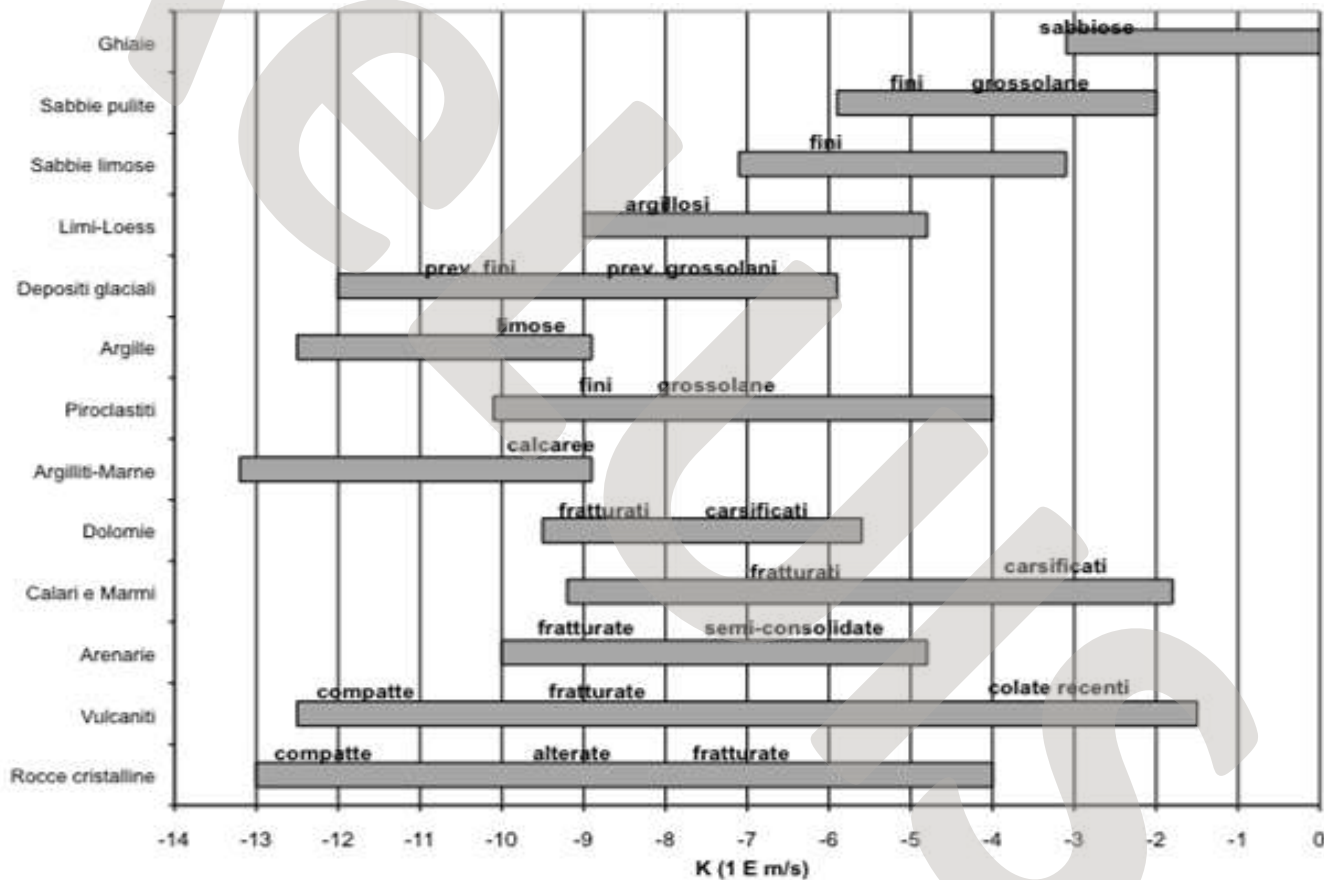
Calcere



Carsismo

Tipi di permeabilità / Conducibilità idraulica

Permeabilità per porosità, fessurazione e carsismo delle principali formazioni rocciose



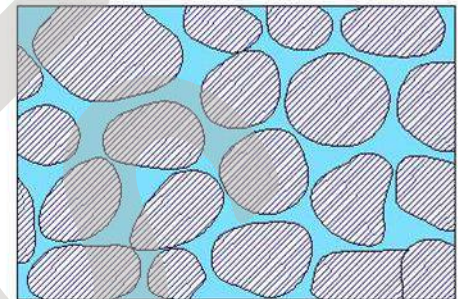
Permeabilità per porosità

Rocce permeabili per porosità: sono generalmente rocce sciolte, all'interno delle quali il moto di filtrazione dell'acqua avviene attraverso i vuoti interstiziali fra le particelle costituenti il deposito.

A questo genere di permeabilità è associato anche il termine di **singenetica** o **primaria**, per intendere una proprietà che si è formata contemporaneamente alla formazione della roccia stessa.

Esempi di rocce permeabili per porosità:

- **Sabbie**
- **Ghiaie**

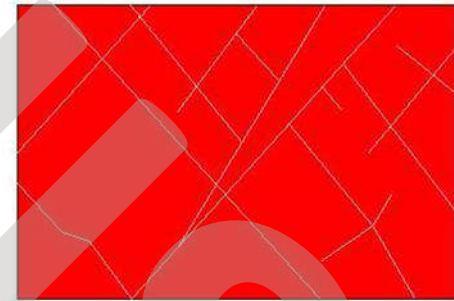


Permeabilità per fratturazione

Rocce permeabili per fratturazione: sono formazioni rocciose nelle quali la circolazione dell'acqua avviene attraverso il sistema di fessure che si sono formate, successivamente alla costituzione della roccia, per effetto di azioni tettoniche e di weathering, prevalentemente fisico.

Esempi di rocce permeabili per fratturazione:

- ✓ **Gneiss**
- ✓ **Graniti**
- ✓ **Basalti**
- ✓ **Arenarie ben cementate**
- ✓ **Calcari non carsificati**
- ✓ **Piroclastiti cementate**

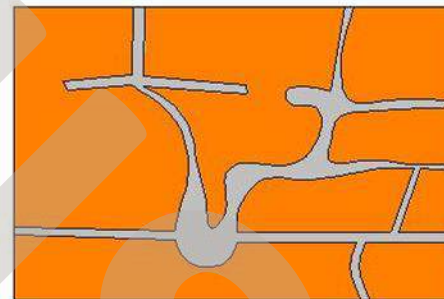


Permeabilità per carsismo

Rocce permeabili per carsismo: è la permeabilità che si forma nelle rocce soggette a processi di carsismo che producono la progressiva dissoluzione della roccia, favorendo la configurazione di vuoti in sottterraneo che vanno a costituire una rete di canali sotterranei, all'interno della quale si ha la circolazione dell'acqua.

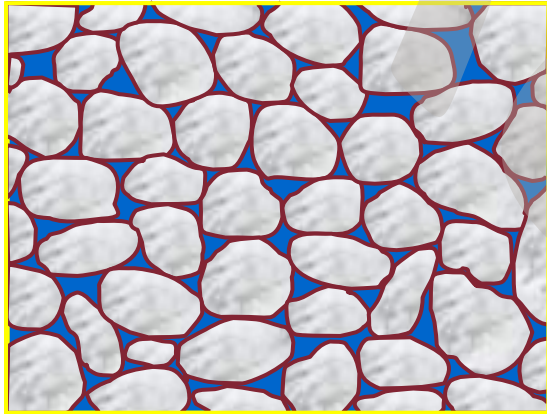
Esempi di rocce permeabili per carsismo:

- **Calcari carsificati**
- **Dolomie carsificate**

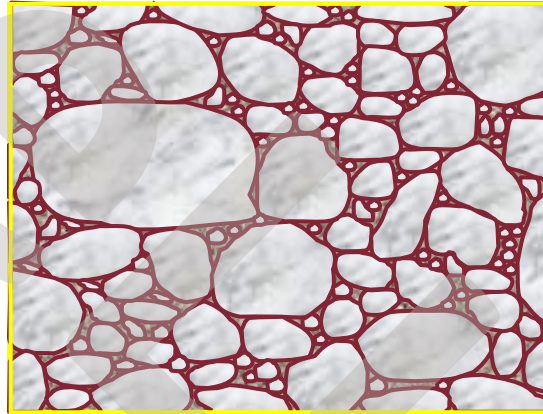


Tipi di permeabilità / Conducibilità idraulica

Ben classato
(sabbia o ghiaia)



Poco classato
(medio – fine)



Ben classato
Fine (limo - argilla)



Permeabilità e Conducibilità idraulica

Alta



Bassa

La classazione del materiale granulare condiziona il movimento delle acque sotterranee.

Il materiale poco classato è meno poroso di un materiale ben classato.

Acquiferi

Un **acquifero** è uno strato, una formazione o un gruppo di formazioni rocciose permeabili, sature d'acqua, la cui permeabilità è abbastanza elevata da consentire la filtrazione di una portata d'acqua sufficiente ad essere captata con profitto economico.

Acquifero: è il complesso acqua-formazione rocciosa.

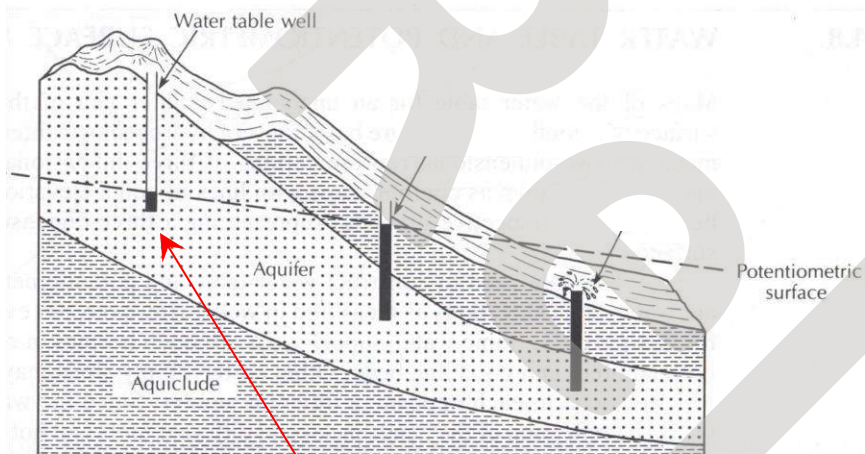
Falda: è l'accumulo di acqua nel sottosuolo, dotata di moto di filtrazione apprezzabile, sostenuta da un substrato impermeabile, non sempre individuabile univocamente.

Acquiferi non confinati e confinati

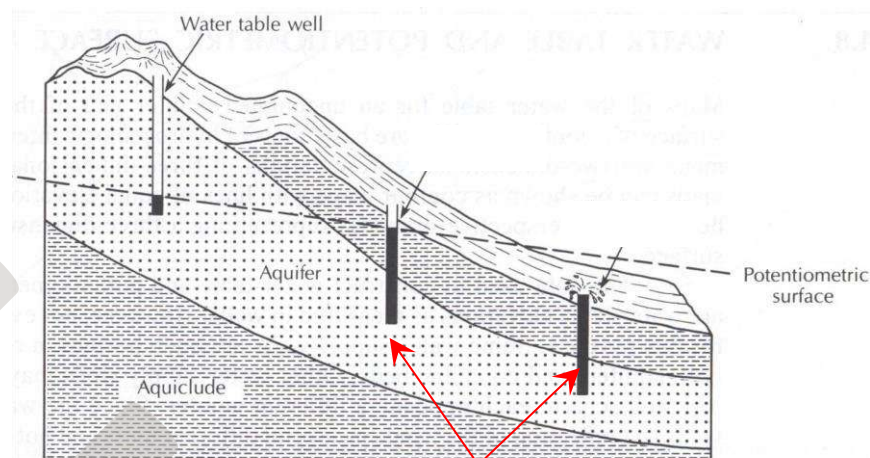
In prima approssimazione gli acquiferi si distinguono in:

- **Acquiferi non confinati (liberi o in condizioni freatiche):** quando la superficie limite superiore della zona satura coincide con la superficie piezometrica.
- **Acquiferi confinati (in pressione):** quando la superficie fisica che costituisce il limite superiore della zona satura si trova ad una quota inferiore rispetto alla superficie piezometrica.

Falda freatica o artesianiana



Falda libera o freatica



Falda artesianiana o in pressione

Negli acquiferi in pressione la superficie piezometrica è virtuale ed il suo livello si materializza quando la zona saturata è posta in diretta comunicazione con l'atmosfera, e l'acqua risale all'interno del foro fino a porsi in equilibrio con la P_{atm} . Se la risalita avviene superando la quota topografica del terreno, l'acquifero si trova in **condizioni artesiane**.

Acquiferi permeabili per porosità

Sono **acquiferi permeabili per porosità** tutti i terreni dotati di una porosità efficace primaria, ossia le rocce sciolte con granulometria superiore ai limi ed alcuni tipi di rocce lapidee formate per blanda cementazione di sedimenti sciolti dalle stesse caratteristiche granulometriche suddette.

Rocce lapidee:

- **Tufi vulcanici**
- **Calcareniti**

Rocce sciolte:

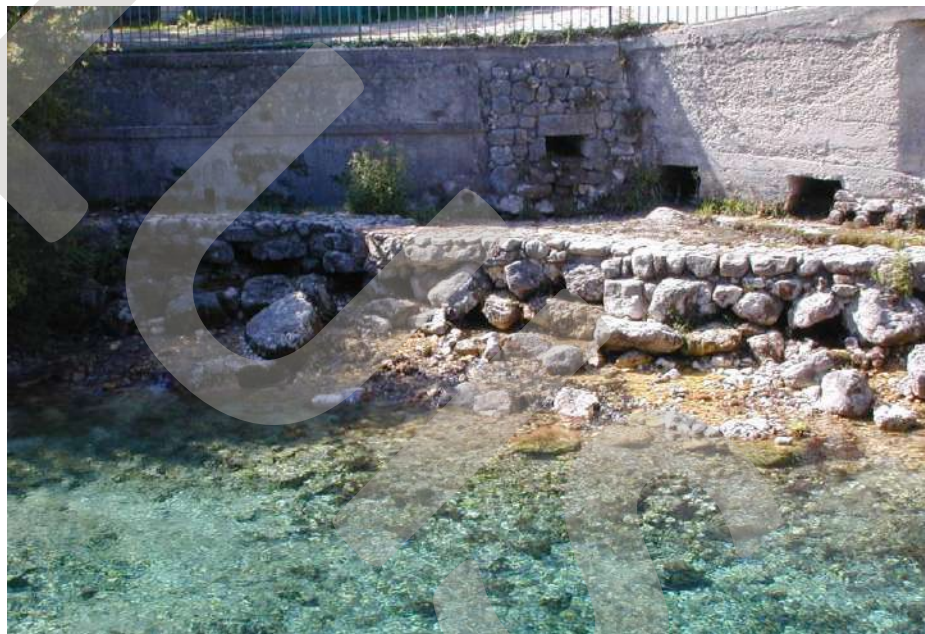
- **Sabbie**
- **Ghiaie**



Acquiferi permeabili per fessurazione

Sono **acquiferi permeabili per fessurazione** tutti i terreni dotati di porosità efficace secondaria, ossia tutte quelle rocce lapidee che hanno subito una intensa fratturazione per azioni, tettoniche e non.

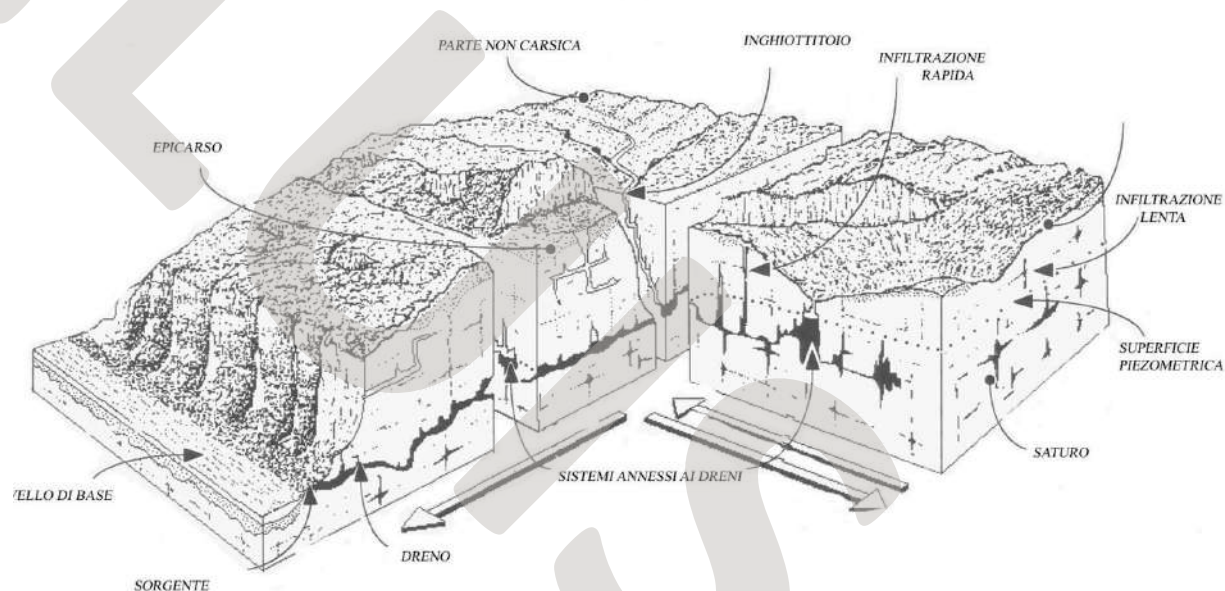
- **Calcari**
- **Dolomie**
- **Basalti**
- **Graniti**
- **Scisti**



Acquiferi permeabili per carsismo

Sono **acquiferi permeabili per carsismo** tutti i terreni dotati di porosità efficace secondaria originata dal processo di dissoluzione.

- **Calcarei carsificabili**
- **Formazioni evaporitiche (gessi e anidriti)**
- **Salgemma**

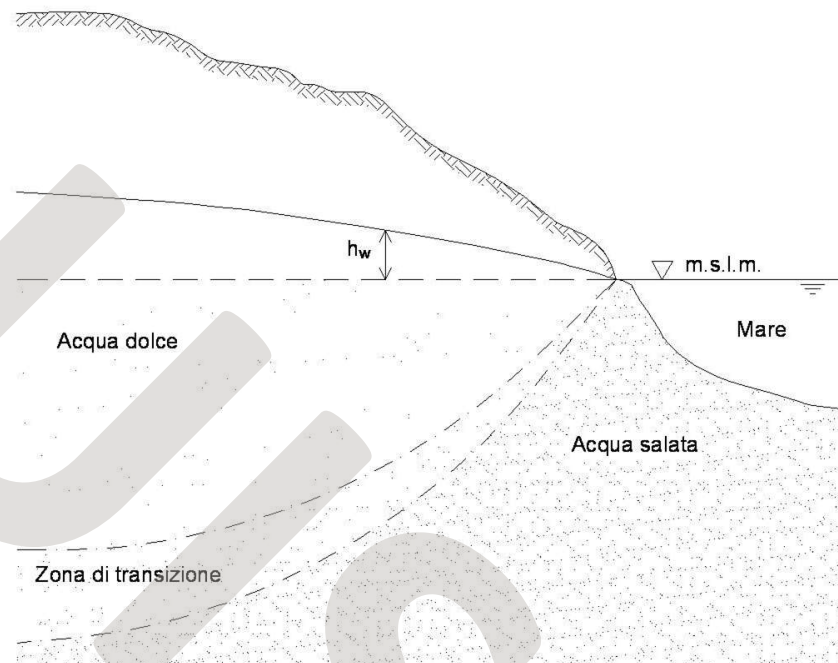


Acquiferi costieri

Gli **acquiferi costieri** sono acquiferi limitati inferiormente e/o lateralmente dall'acqua di mare.

La zona satura di acqua dolce poggia su una superficie mobile, soggetta alle variazioni del livello del mare e all'andamento dei livelli piezometrici nell'acqua dolce.

Poiché acqua dolce ed acqua salata non sono fluidi immiscibili, alla base dell'acqua dolce si trova una **zona di transizione**, a salinità crescente, il cui spessore è variabile nel tempo e nello spazio.



Superficie piezometrica

La **superficie piezometrica** è il luogo dei punti della falda che si trovano in equilibrio con la pressione atmosferica:

$$P = P_{atm}$$

La superficie piezometrica è una superficie dinamica, la cui posizione altimetrica, in ogni punto varia, nel tempo, in funzione di molteplici cause:

- **Andamento della superficie topografica**
- **Permeabilità dell'acquifero**
- **Morfologia dello strato acquifero**

Fattori che influenzano la superficie piezometrica

- 1) Andamento della superficie topografica:** la superficie piezometrica tende a seguire, attenuandolo, il profilo della superficie del terreno.
- 2) Permeabilità dell'acquifero:** la superficie piezometrica ha una pendenza più blanda dove la permeabilità della formazione rocciosa è maggiore, mentre tende ad essere più acclive dove questa è più bassa.
- 3) Morfologia dello strato acquifero:** l'andamento della superficie piezometrica risente delle eventuali eterogeneità idrauliche interne all'acquifero, oltre che dell'andamento della superficie del substrato impermeabile che limita inferiormente l'acquifero.

Cause di innalzamento e di depressione locale della superficie piezometrica

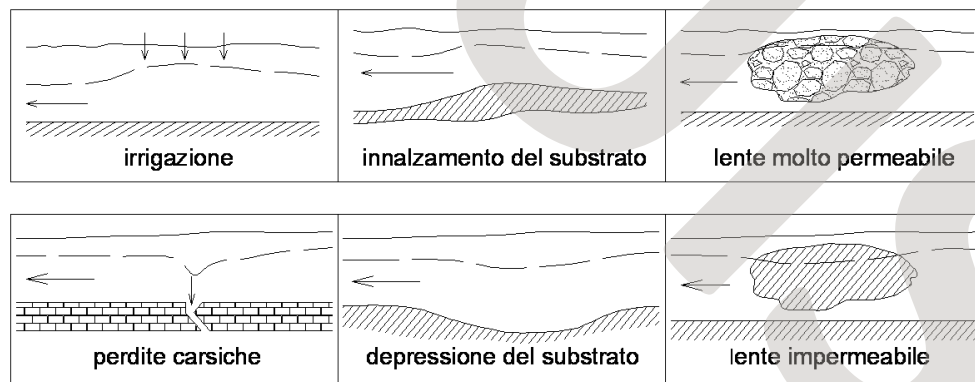
La superficie piezometrica in un punto può subire variazioni dovute a:

Cause di origine naturale:

- Alternarsi dei periodi di ricarica e di svuotamento dell'acquifero
- Variazioni della pressione atmosferica
- Oscillazioni di specchi liquidi a contatto laterale e inferiore con l'acquifero
- Terremoti

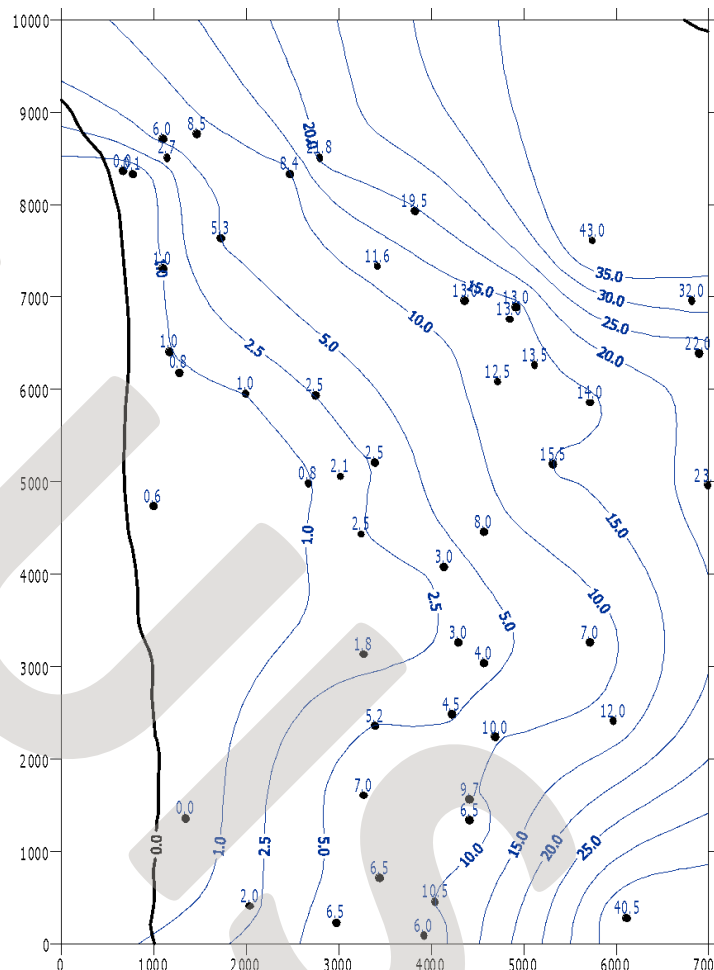
Cause di origine antropica:

- Emungimenti e immissioni di acqua dalla superficie



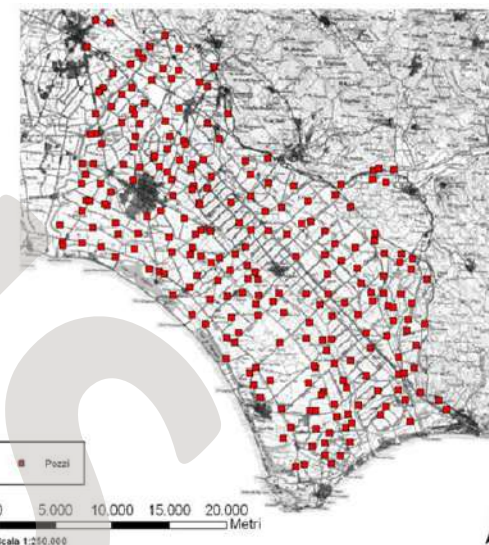
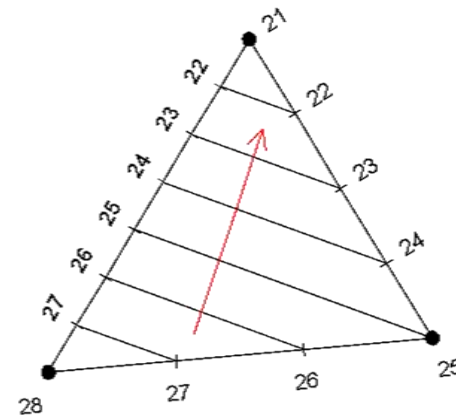
Rappresentazione della circolazione delle acque sotterranee

La superficie piezometrica è l'involuppo delle linee isofreatiche.



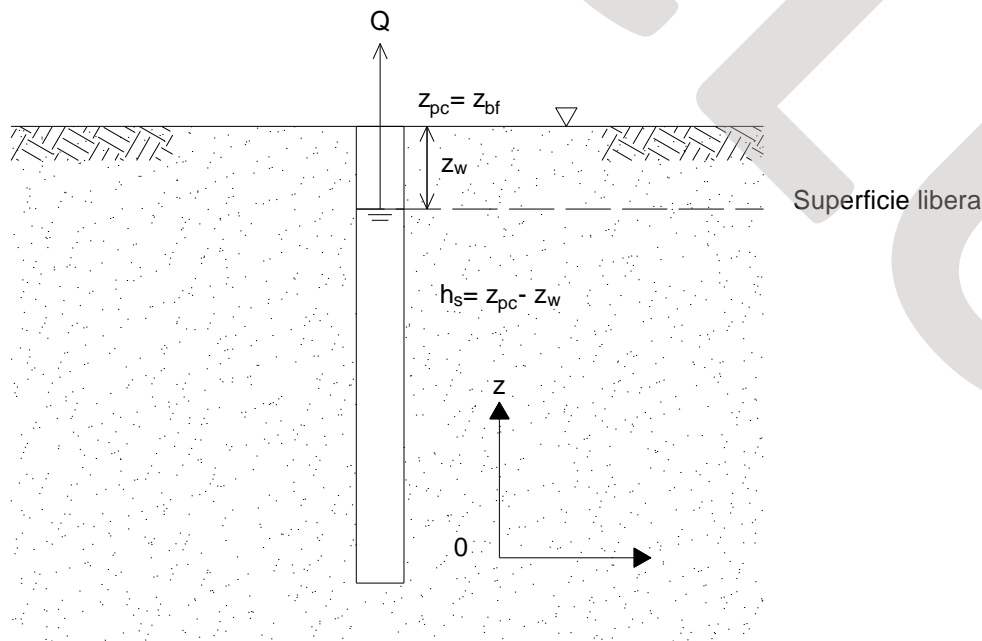
Ricostruzione della superficie piezometrica

1. **Interpolazione lineare**, eseguita dopo avere diviso l'area di studio in maglie triangolari, i cui vertici siano costituiti dai punti di misura.
2. Procedure fondate sull'analisi ed il **trattamento geostatistico dei dati sperimentali** disponibili.



Ricostruzione della superficie piezometrica

La **superficie piezometrica** è data dall'involuppo di una serie di misure del livello piezometrico eseguite, puntualmente, in pozzi o piezometri.



$$h_s = z_{pc} - z_w \text{ m S.I.m.}$$

- z_{pc} : quota geodetica del piano di campagna nel punto di misura
- z_w : profondità di rinvenimento della falda
- h_s : livello della superficie piezometrica nel punto di misura

Ricostruzione andamento superficie piezometrica

Per ottenere una **ricostruzione corretta della superficie piezometrica** è necessario:

- Disporre di un numero di punti di rilevazione del livello piezometrico distribuiti in modo omogeneo nell'area di studio.
- È preferibile che le misure, in ogni punto, siano relative ad almeno 12 mesi, oppure se si raccoglie una sola serie di rilevazioni puntuali è necessario che queste si riferiscano ad uno stesso periodo dell'anno.
- Tutte misure devono essere riferite ad una stessa quota topografica di riferimento.

Corso di aggiornamento professionale
ReLUIS

**Problematiche Geologiche
associate all'Instabilità di
Versante**
Parte 2: **Classificazione**



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Gerardo Grelle

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Area di Geologia Applicata

Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale

Email: gerardo.grelle@uniroma1.it

Programma corsi di aggiornamento professionale ReLuis

1. **Fenomeni gravitativi di versante**
 - 2.1 Definizione di fenomeno gravitativo
 - 2.2 Definizione di frana
 - 2.3 Cronistoria e approcci di classificazione
 - 2.4 Aspetti classificativi
 - 2.5 Classifica di Hutchinson
 - 2.6 Classifica di Varnes
 - 2.7 Classifica delle frane_Sassa e altri
 - 2.8 Classifica delle DGPV
 - 2.9 Classifica per Stile
 - 2.10 Classifica per Attività
2. **Analisi geo-cinematica**
 - 3.1 Caratterizzazione spazio temporale degli eventi (le 3F)
 - 3.1.1 Falls
 - 3.1.2 Failures (sliding)
 - 3.1.3 Flows
 - 3.2 Caratterizzazione all'insnesco
 - 3.2.1 Fattori predisponenti
 - 3.2.2 Fattori scatenanti
3. **Rilevamento e interpretazioni da cartografia**
 - 4.1 Riconoscimento di elementi da supporto cartografico di tipo fisiografico (DTM e curve di livello)
 - 4.2 Lettura di carte tematiche di pericolosità/Rischio progetto PAI
 - 4.3 Lettura di carte tematiche tipo IFFI
 - 4.4 Dati da piattaforme informatizzate e remote sensing.

- *«movimento verso il basso e verso l'esterno di materiali (rocce e terreni naturali, materiali di riporto, o combinazioni di più materiali) formanti un pendio» (Varnes, 1958)*
- *«movimento di masse di terreno o di roccia lungo un pendio, risultante da una rottura per taglio ai limiti della massa in movimento» (Skempton & Hutchinson, 1969)*
- *“Il fenomeno franoso è un movimento controllato dalla gravità, superficiale o profondo, rapido o lento, di materiale costituente un rilievo o un pendio del suolo”[1] (1987)*
[1] Consiglio Nazionale delle Ricerche – Progetto finalizzato «Conservazione del suolo» coordinato da Carrara, D'Elia e Semenza
- *«movimento di masse di roccia, detriti o suolo lungo un pendio» (Commissione dell'IUGS, 1997)*

Al concetto di frana è associata la **presenza di un pendio**, cioè di una superficie topografica acclive, ed il **movimento verso il basso** di una **massa di roccia** lungo di esso, per effetto della forza di gravità.

La distinzione fra il concetto di frana e altri fenomeni di mobilitazione ed asportazione del materiale roccioso dalla propria sede naturale risiede nell'**azione esclusiva e diretta della forza di gravità**, laddove in processi come quelli erosivi, esiste un agente, l'acqua o il vento che provoca il movimento del materiale.

Definizione di frana: «Open question»

☐ **Movimento** controllato dalla **gravità**, superficiale o profondo, rapido o lento, di materiali costituenti un versante o un intero rilievo (da Varnes, 1978, in Carrara *et al.*, 1985)

Coni detritici



Soliflusso



☐ **Movimento** di una **massa** di roccia, terra o detrito lungo un **versante** (Cruden, 1991)

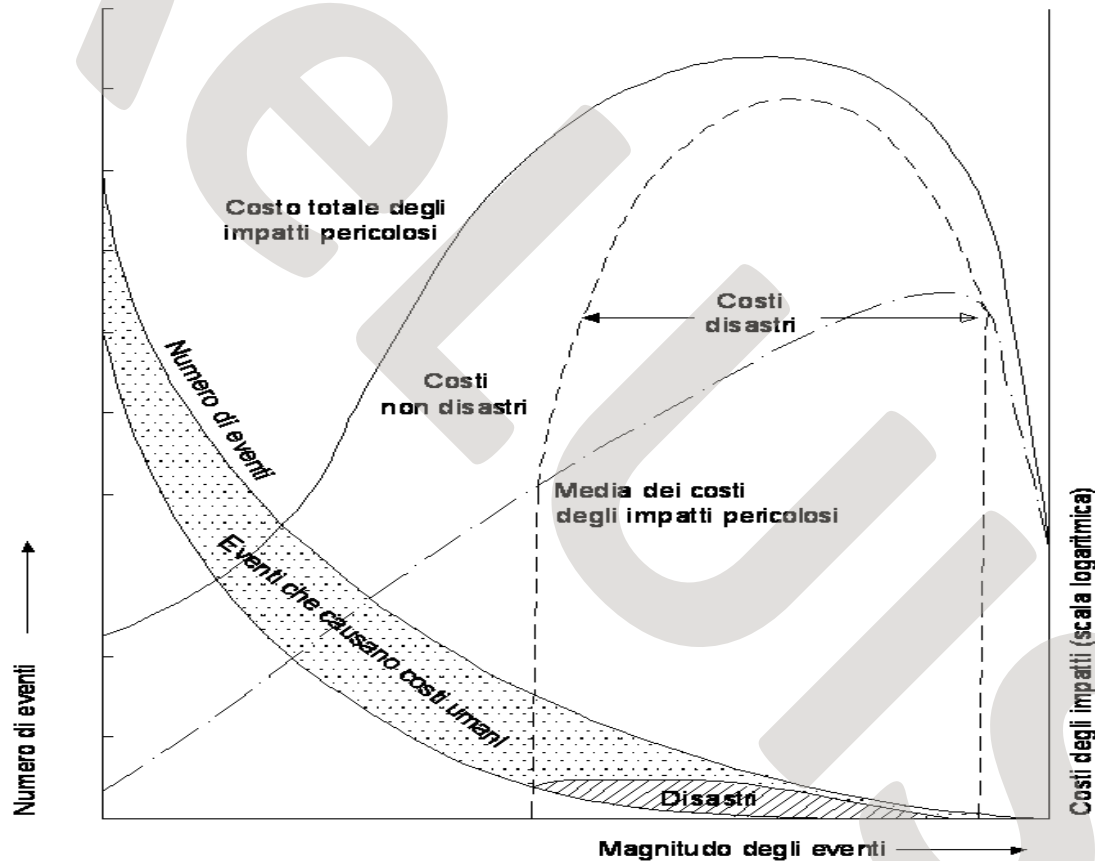
Che cosa non è una frana ?

Ogni altro tipo di "dissesto", quali subsidenze, sprofondamenti di cavità (carsiche o artificiali), valanghe di neve o di ghiaccio, calanchi, erosione spondale, ecc.



Complessità degli effetti connessi con i movimenti franosi

La crescente occupazione del territorio da parte di insediamenti antropici ha richiesto un sempre più approfondito studio delle cause che generano i movimenti franosi, sia per prevenirne gli effetti sia per evitare che l'opera dell'uomo possa, in qualche modo, accrescere la gravità di questi pericoli naturali.



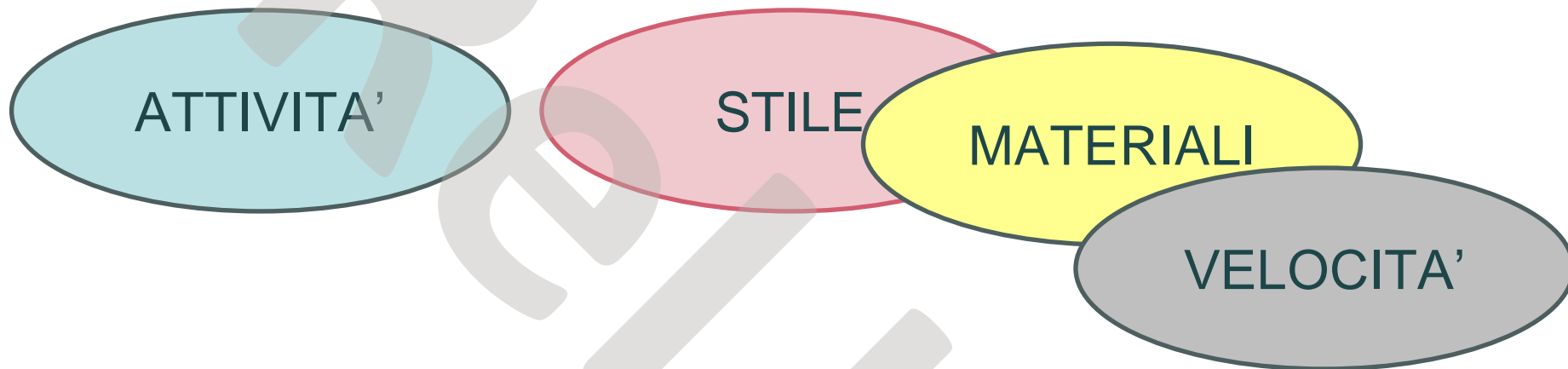
Classificazione delle Frane

Criteria informatori di una classificazione razionale

- **Rigore scientifico:** implica l'attribuzione di ogni frana a classi mutuamente esclusive, eliminando o riducendo al massimo **ambiguità** e soggettività
- **Finalizzazione:** impone la scelta di caratteri-guida rilevanti ai fini di **pratiche** di prevenzione e della stabilizzazione delle frane
- **Praticità:** concerne la **facilità e l'immediatezza** con cui il carattere-guida può essere rilevato anche da operatori non specialisti della materia, attraverso osservazioni speditive di campagna e limitate indagini nel sottosuolo

Principali caratteri-guida delle classificazioni delle frane

- 1) Cause del movimento
- 2) Durata e ripetitività dei movimenti
- 3) Tipo e proprietà meccaniche del materiale interessato (es. Sassa, 1989)
- 4) Caratteristiche ed eventuale preesistenza della superficie di distacco e di scorrimento (es. Penta, 1959; Corniello *et alii*, 1980)
- 5) Tipo di movimento (es. Varnes, 1978; Cruden & Varnes, 1996)
- 6) Insieme di caratteri guida (es. Hutchinson, 1988)



Attività: Questa categoria riguarda lo stato attuale e la storia recente della frana.

Stile: Questa categoria descrive il tipo di movimento e la forma della frana.

Materiale: Questa categoria riguarda il tipo di materiale coinvolto nella frana

Velocità: Questa categoria riguarda le velocità implicate nei vari eventi di frana

In relazione all'età relativa del fenomeno ed al proprio stato di attività le frane si possono distinguere in:

- 1) **Attive**: sono attualmente in movimento.
- 2) **Riattivate**: sono nuovamente attive dopo uno stato di inattività.
- 3) **Sospese/dormienti**: non si muovono attualmente ma si sono mosse nell'ultimo ciclo stagionale.
- 4) **Inattive**: l'ultima fase di attività è precedente all'ultimo ciclo stagionale.
 - **Quiescenti**: si ritiene possibile una riattivazione.
 - **Naturalmente stabilizzate**: se ciò non è ritenuto possibile naturalmente.
 - **Artificialmente stabilizzate**: la stabilizzazione è avvenuta con l'intervento dell'uomo.

Classificazione di attività

Evoluzione dello stato di attività di una frana

Definizione di movimento franoso in funzione degli spostamenti nel tempo

Attiva

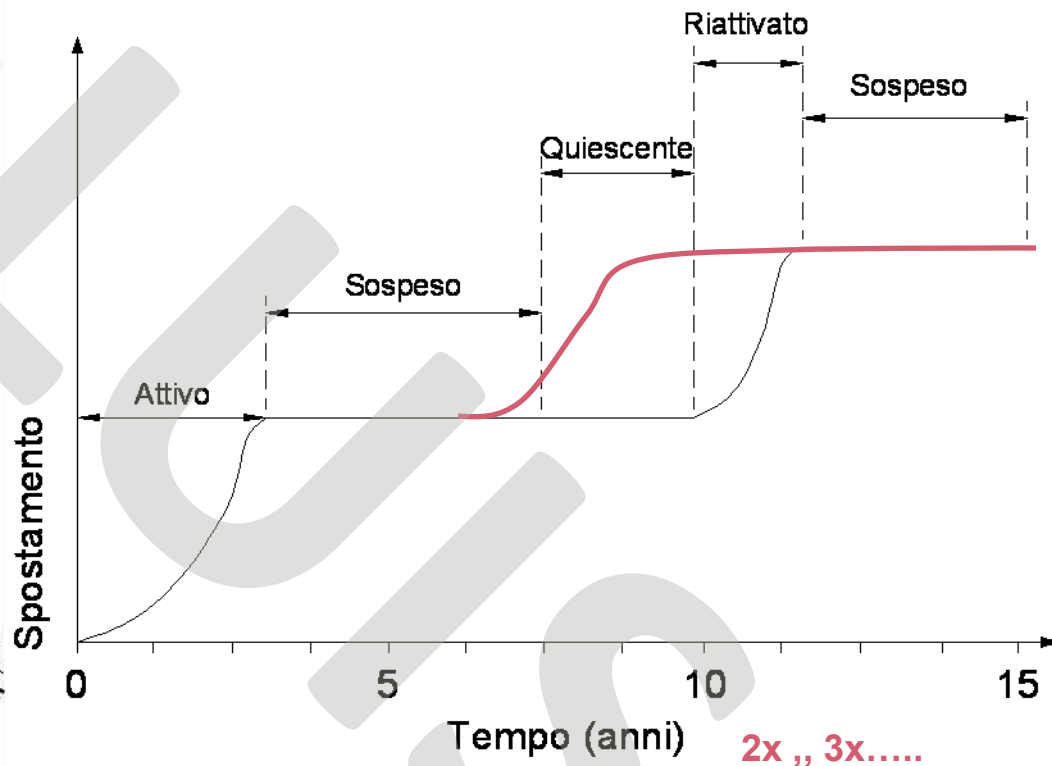
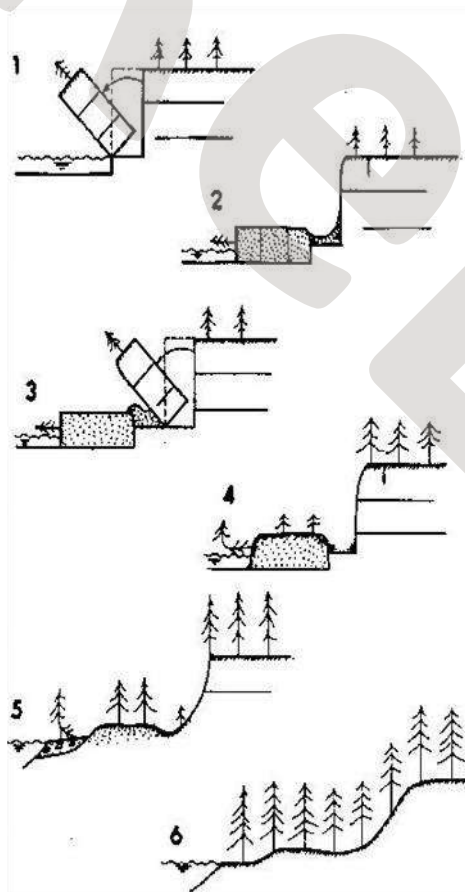
Sospesa

Riattivata

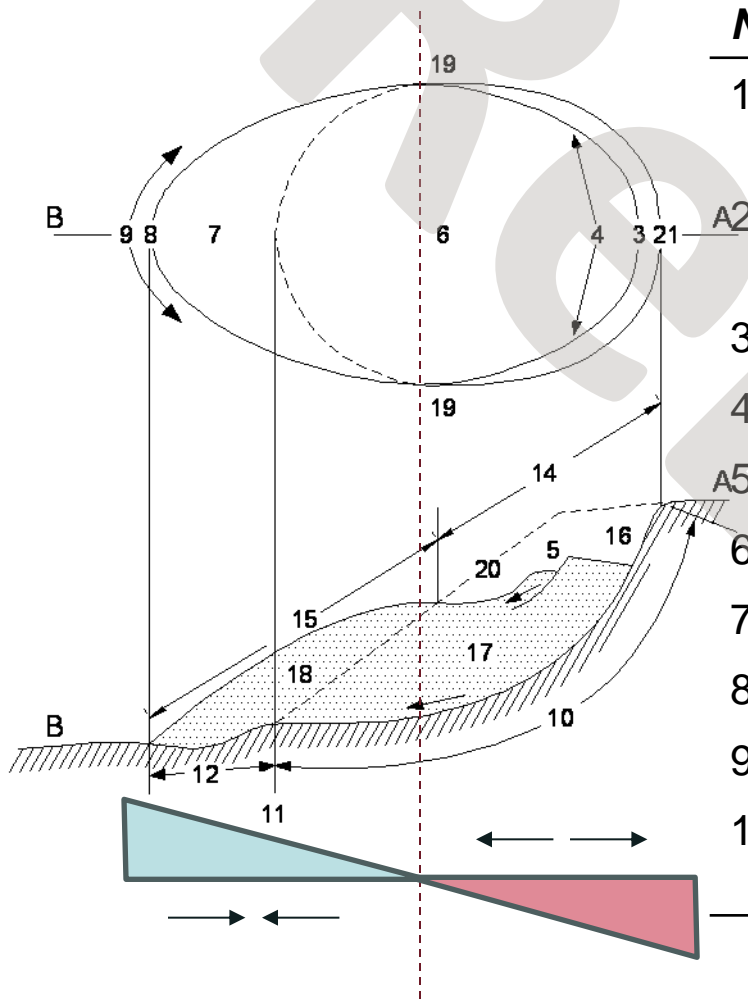
Inattiva

Quiescente

Stabilizzata



Nomenclatura delle componenti di una frana



N.	Nome	N.	Nome
1	Zona di coronamento	11	Unghia della superficie di rottura
2	Scarpata principale	12	Superficie di separazione
3	Parte sommitale	13	Materiale mobilizzato
4	Testata	14	Zona di scorrimento
5	Scarpata minore	15	Zona di accumulo
6	Corpo principale	16	Scorrimento
7	Piede	17	Massa in scorrimento
8	Punto inferiore	18	Accumulo
9	Unghia	19	Fianco
10	Superficie di rottura	20	Superficie originale del terreno in posto

La classifica dei movimenti franosi: verso la definizione di STILE

- PILLA (1847) > primo in Italia a classificare le frane suddivise in:
 - *Ordinarie* o superficiali;
 - *Straordinarie* o profonde

- STOPPANI (1871) nel suo "Corso di Geologia" classifica le frane dal punti di vista genetico:
 - Frane dovute al rammollimento del substrato;
 - Frane dovute all'erosione del substrato;
 - Frane dovute a rottura (frantumazione) del substrato;
 - Frane dovute ad incoerenza

- BALTZER (1874) classifica le frane in categorie considerando il materiale coinvolto come principale fattore discriminante:
 - landslide of rocks (*Felsstürze*)
 - landslide of earth (*Erdschlippe*)
 - landslide of mud (*Schlammströme*)
 - mixed landslides (*Gemischte*)

La classifica dei movimenti franosi - HEIM (1882)

HEIM'S CLASSIFICATION OF PROPERLY CALLED LANDSLIDES (Bergsturze)
ACCORDING TO THE ITALIAN VERSION OF R. AMALGIA'

TYPE OF MOVEMENT	NATURE OF SLIDING MATERIAL	DENOMINATION OF LANDSLIDE
SLIDING (<u>Rutschung</u>)	Rock formations (<u>Fels</u>)	1) Landslides owing to sliding of rocky material (<u>Felstrutschungen</u>)
	Incoherent debris materials earthy, loose (<u>Schutt</u>)	2) Landslides owing to sliding of incoherent material (<u>Schuttrutschungen</u>)
Ruin, collapse, rolling (<u>Sturz</u>)	Rock formations (<u>Fels</u>)	3) Landslides owing to rolling (collapse) of rock materials (<u>Felsstürze</u>)
	Incoherent formations (<u>Schutt</u>)	4) Landslides owing to rolling, collapse of incoherent material (<u>Schuttstürze</u>)
With each of both types of movement	Landslides of lithoid material to which incoherent material is added on the way	5) mixed landslides
Superimposition of two types of movement	With each of the types of material	6) Compound landslides
Sliding (1)	A soft bed flows or slides between two stable beds, owing to compression of the possibly heavier upper bed.	7) Landslides owing to crushing (<u>Quetschlammströme</u>)
Slumping	Any type of material that slumps owing to the presence or creation of subterranean voids	8) special landslides (<u>besondere Bergstürze</u>)

(1) Coastal sliding (Uferrastchungen) leading to disappearance of a stretch of shoreline includes types 1 and 2 and sometimes also other types. It should be also noted that TRABUCCO (1913) translates the German Quetschlammströme as mudflows.

La classifica dei movimenti franosi

● Dagli inizi del novecento numerosi sono gli autori italiani che propongono sistemi di classificazione dei fenomeni franosi:

- De Marchi, 1903;
- Almagià, 1910;
- Trabucco, 1913;
- Rotigiano, 1916;

- Gortani, 1948;
- Penta, 1956;
- Desio, 1971;
- Brugner & Valdinucci, 1972;
- Vallario, 1973;
- Casale et al., 1994.

La classifica dei movimenti franosi - Sharpe, 1938

MOVEMENT		EARTH OR ROCK				
KIND	RATE	ICE	EARTH OR ROCK PLUS ICE	EARTH OR ROCK DRY OR WITH MINOR AMOUNTS OF ICE OR WATER	EARTH OR ROCK PLUS WATER	WATER
		CHIEFLY ICE	EARTH OR ROCK PLUS ICE	EARTH OR ROCK DRY OR WITH MINOR AMOUNTS OF ICE OR WATER	EARTH OR ROCK PLUS WATER	CHIEFLY WATER
WITH FREE SIDE	FLOW	TRANSPORTATION	ROCK GLACIER CREP	ROCK - CREEP	SOLIFLUCTION	FLUVIAL TRANSPORTATION
	USUALLY IMPERCEPTIBLE TO RAPID		TALUS CREEP	SOIL CREEP		
SLIP (LANDSLIDE)	PERCEPTIBLE	GLACIAL	DEBRIS - AVALANCHE	SLUMP	DEBRIS - AVALANCHE	
	PERCEPTIBLE		DEBRIS - SLIDE			
NO FREE SIDE	FAST OR SLOW		ROCKSLIDE	ROCKFALL		
			SUBSIDENCE			

Sharpe's classification of landslides and related phenomena
Stewart Sharpe, 1938

TYPE OF MATERIAL	TYPE OF MOVEMENT (INCREASING SPEED)			
	SLIDE		FLOW	FALL
	ROTATIONAL	PLANAR		
BEDROCK	ROCK SLUMP	ROCK SLIDE BLOCK SLIDE	ROCK AVALANCHE	ROCK FALL
REGOLITH	EARTH SLUMP	DEBRIS SLIDE	DEBRIS AVALANCHE DEBRIS FLOW	SOIL FALL
SEDIMENTS	SEDIMENT SLUMP	SLAB SLIDE	EARTH FLOW LIQUEFACTION FLOW LOESS FLOW SAND FLOW	SEDIMENT FALL

INCREASING ROCK COHERENCE ↓

(INCREASING SEDIMENT SIZE →)

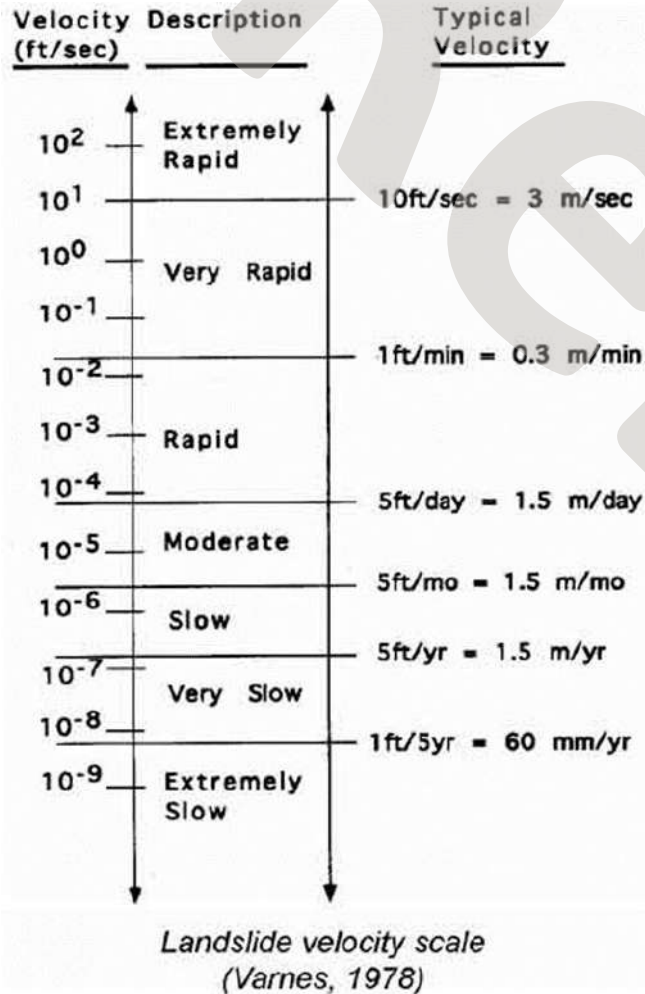
La classifica dei movimenti franosi - Varnes, 1978

<u>TYPE OF MOVEMENT</u>			<u>TYPE OF MATERIAL</u>		
			<u>BEDROCK</u>	ENGINEERING SOILS	
				<u>PREDOM. COARSE</u>	<u>PREDOMINANTLY FINE</u>
FALLS			ROCK FALL	DEBRIS FALL	EARTH FALL
TOPPLES			ROCK TOPPLE	DEBRIS TOPPLE	EARTH TOPPLE
SLIDES	ROTATIONAL	FEW UNITS	ROCK SLUMP	DEBRIS SLUMP	EARTH SLUMP
	TRANSLATIONAL	UNITS	ROCK BLOCK SLIDE	DEBRIS BLOCK SLIDE	EARTH BLOCK SLIDE
		MANY UNITS	ROCK SLIDE	DEBRIS SLIDE	EARTH SLIDE
LATERAL SPREADS			ROCK SPREAD	DEBRIS SPREAD	EARTH SPREAD
FLOWS			ROCK FLOW (DEEP CREEP)	DEBRIS FLOW (SOIL CREEP)	EARTH FLOW
COMPLEX			COMBINATION OF TWO OR MORE PRINCIPAL TYPES OF MOVEMENT		

La classifica di Tipologia dei movimenti franosi -



Varnes, 1978



Movement type	Material		
	ROCK	DEBRIS	EARTH
FALLS	Rock fall	Debris fall Scree Debris cone	Earth fall Colluvium Debris cone
TOPPLES	Rock topple	Debris topple Debris cone	Earth topple Debris cone
SLIDES	Single rotational slide (slump) Failure surface	Multiple rotational slide Crown Scarp Head Minor Scarp Failure surface Toe	Successive rotational slides
	Rock slide	Debris slide	Earth slide
SPREADS	Earth spread Cap rock Normal sub-horizontal structure Gully Camber slope Dip and fault structure Valley bulge (planned off by erosion) e.g. cambering and valley bulging Thinning of beds Competent substratum Plane of decollement		Earth spread
FLOWS	Solifluction flows (Periglacial debris flows)	Debris flow	Earth flow (mud flow)
COMPLEX	e.g. Slump-earthflow with rockfall debris		e.g. composite, non-circular part rotational/part translational slide grading to earthflow at toe

La classifica di Velocità dei movimenti franosi - Varnes, 1978

Landslide velocity scale (Cruden and Varnes, 1996).

Velocity class	Description	Velocity (mm/sec)	Typical velocity	Human response
7	Extremely Rapid	5×10^3	5 m/sec	Nil
6	Very Rapid	5×10^1	3 m/min	Nil
5	Rapid	5×10^{-1}	1.8 m/hr	Evacuation
4	Moderate	5×10^{-3}	13 m/month	Evacuation
3	Slow	5×10^{-5}	1.6 m/year	Maintenance
2	Very Slow	5×10^{-7}	16 mm/year	Maintenance
1	Extremely Slow			Nil

Scala di velocità (Hungry, 1981; Cruden & Varnes, 1996)

Classe	Descrizione	Danni osservabili	Velocità (m/s)	Velocità tipica
7	Estremamente rapido	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto di materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile	5	5 m/s
6	Molto rapido	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone	$5 * 10^{-2}$	3 m/min
5	Rapido	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti	$5 * 10^{-4}$	1.8 m/h
4	Moderato	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute	$5 * 10^{-6}$	13 m/mese
3	Lento	Possibilità di intraprendere lavori di rinforzo e restauro durante il movimento. Le strutture meno danneggiabili possono essere mantenute con frequenti lavori di rinforzo se il movimento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione	$5 * 10^{-8}$	1.6 m/anno
2	Molto lento	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento	$5 * 10^{-10}$	16 mm/anno
1	Estremamente lento	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni		

Classifica geotecnica delle frane secondo Hutchinson (1988)

Ai fini della valutazione della stabilità di un versante, interessato da una frana o potenzialmente instabile, o ai fini della realizzazione di idonee opere di sostegno, è importante conoscere la resistenza al taglio disponibile lungo la superficie di rottura. La resistenza al taglio è governata essenzialmente dalla natura e dalla disposizione delle particelle e dai loro legami (mineralogia e tessitura) e dalla pressione dei fluidi (di solito acqua e/o aria) che agiscono nei pori del terreno. La classifica di Hutchinson si basa pertanto su questi due fattori principali:

- Condizioni **granulometriche-tessiturali e di interazione tra i granuli del terreno** (*soil fabric conditions*)
- Condizioni **idrauliche** agenti sulla superficie di rottura

La classifica dei movimenti franosi - *Hutchinson*, 1988

- Fattori Discriminanti:
 - Morfologia dei movimenti (Principale);
 - Meccanismo (Subordinato);
 - Materiale coinvolto (Subordinato);
 - Velocità del movimento (Subordinato);N.B. Viene utilizzata la scala di velocità di Varnes 1978
- Tipi di fenomeni:
 - Rigonfiamenti;
 - Creep;
 - Cedimenti di versanti montuosi;
 - Scorrimenti e/o scivolamenti;
 - Movimenti di detrito sotto forma di flusso;
 - Ribaltamenti;
 - Crolli;
 - Movimenti di versante complessi.

Classifica di Hutchinson

Rebound	When ground is unloaded, either artificially by excavation or naturally by erosion, the unloaded area responds, initially elastically and subsequently by slow swelling
Creep	Any extremely slow movements which are imperceptible except through long-period measurement
Sagging of mountain slopes	A general term for those deep-seated deformations of mountain slopes, which, in their present state of development, do not justify classification as landslides.
Landslide	Relatively rapid downslope movements of soil and rock, which take place characteristically on one or more discrete bounding slip surfaces which divide the moving mass.
Debris movement of flow like form	Term covering five types of movement of flow-like form, which differ markedly in mechanism: non-periglacial mudslides, periglacial mudslides, flow slides, debris flows and sturzstroms.
Topple	A movement that occurs when the vector of resultant applied forces falls through, or outside a pivot point in the base of the affected block.
Fall	The more or less free and extremely rapid descent of masses of soil or rock of any size from steep slopes or cliffs.
Complex slope movement	The combination of two or more of the types of movements described above.

A	Rebound	
	1	Movements associated with man-made excavations
	2	Movements associated with naturally eroded valleys
B	Creep	
	1	Superficial, predominantly seasonal creep; mantle creep
	2	Deep-seated, continuous creep; mass creep
	3	Pre-failure creep; progressive creep
	4	Post-failure creep
C	Sagging of mountain slopes	
	1	Single-sided sagging associated with the initial stages of landsliding
	2	Double-sided sagging, associated with the initial stages of double landsliding, leading to ridge spreading
	3	Sagging associated with multiple toppling
D	Landslides	
	1	Confined failures
	2	Rotational slips
	3	Compound failures (markedly non-circular, with listric or bi-planar slip)
	4	Translational slides
E	Debris movements of flow-like form	
	1	Mudslides (non-periglacial)
	2	Periglacial mudslides (gelifluction of clays)
	3	Flow slides
	4	Debris flows, very to extremely rapid flows of wet debris
	5	Sturzstroms, extremely rapid flows of dry debris
F	Topples	
	1	Topples bounded by pre-existing discontinuities
	2	Topples released by tension failure at rear of mass
G	Falls	
	1	Primary, involving fresh detachment of material; rock and soil falls
	2	Secondary, involving loose material, detached earlier; stone falls
H	Complex slope movements	
	1	Cambering and valley-bulging
	2	Block-type slope movements
	3	Abandoned clay cliffs
	4	Landslides breaking down into mudslides or flows at the toe
	5	Slides caused by seepage erosion
	6	Multi-tiered slides
	7	Multi-storeyed slides

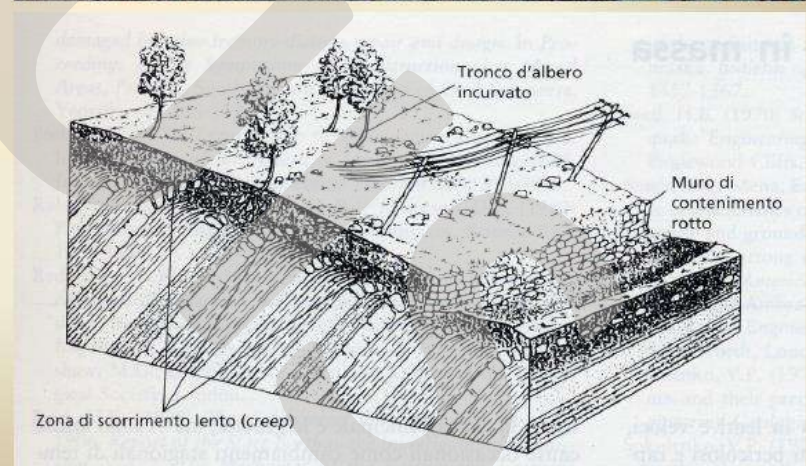
Classifica di Hutchinson

SOLIFLUSSI

Si riconosce per il formarsi di colate, lobi terrazzette ed increspature del terreno; assieme al materiale fine si spostano gli elementi grossolani. La coltre erbosa, se presente e continua, può non rompersi e lasciar vedere con le sue deformazioni questi movimenti. (in ambiente periglaciale si parla di geliflusso)

SOIL CREEP (o *Reptazione*)

Movimento molto lento verso il basso di suolo e regolite, che varia a seconda del tipo di suolo, del clima, della pendenza del versante e della densità di copertura vegetativa. Consiste in una deformazione lenta del regolite i cui livelli superiori si muovono lungo il pendio ad una velocità maggiore di quella dei livelli inferiori. Si manifesta attraverso lo spostamento e la rotazione verso valle di alberi, pali e recinzioni e da deformazione e rottura di muri di contenimento.



La classifica dei movimenti franosi - *Hungr et al, 2001* – «*molto esperti*»

Material	Water Content ¹	Special Condition	Velocity	Name
Silt, Sand, Gravel, Debris (talus)	dry, moist or saturated	- no excess pore-pressure, - limited volume	various	Non-liquefied sand (silt, gravel, debris) flow
Silt, Sand, Debris, Weak rock ²	saturated at rupture surface content	- liquefiable material ³ , - constant water	Ex. Rapid	Sand (silt, debris, rock) flow slide
Sensitive clay	at or above liquid limit	- liquefaction <i>in situ</i> , ³ - constant water content ⁴	Ex. Rapid	Clay flow slide
Peat	saturated	- excess pore-pressure	Slow to very rapid	Peat flow
Clay or Earth	near plastic limit	- slow movements, - plug flow (sliding)	< Rapid	Earth flow
Debris	saturated	- established channel ⁵ , - increased water content ⁴	Ex. Rapid	Debris flow
Mud	at or above liquid limit	-fine-grained debris flow	> Very rapid	Mud flow
Debris	free water present	- flood ⁶	Ex. Rapid	Debris flood
Debris	partly or fully saturated	- no established channel ⁵ , - relatively shallow, steep source	Ex. Rapid	Debris avalanche
Fragmented Rock	various, mainly dry	- intact rock at source, - large volume ⁷	Ex. Rapid	Rock avalanche

La classifica dei movimenti franosi “consigliata”

**CROLLI
FALLS**

**Crollo di roccia (detrito, terra)
– Rock/Debris/Earth Fall**

• Crollo di roccia (detrito) - *Rock (Debris) Fall*

**RIBALTAMENTI
TOPPLES**

**Ribaltamento di roccia
(detrito o terra) -
Rock/Debris/Earth topple**

• Ribaltamento di blocchi - *Rock (Debris) Block Topple*
• Ribaltamento flessurale - *Rock Flexural Topple*

**SCORRIMENTI
SLIDES**

**Scorrimento di roccia – Rock
Slides**

• Scorrimento traslativo di roccia in blocco, di blocchi o di cunei - *Translational (or Wedge) Rock Slide*
• Scorrimento rotazionale di roccia - *Rotational Rock Slide(Slump)*
• Scorrimento composito o rototraslativo di roccia - *Compound Rock Slide*
• Collasso di roccia - *Rock Collapse*

**Scorrimento di detrito o terra
– Soil Slides**

• Scorrimento traslativo di detrito – **Debris (Gravel, Talus, Sand) Slide**
• Scorrimento rotazionale di terra **Clay (Earth, Debris) Slump (Rotational)**
• Scorrimento composito o rototraslativo di terra – **Compound Clay/Debris Slide**

FLOWS

**Flussi in materiali fini,
granulari o rocciosi – Flows
in fine-grained, granular or
rock material**

• Flusso di sabbia/ghiaia/detrito/limo asciutta - *Dry Sand (Gravel, Debris, Silt) Flow*
• Scivolamento per colata in sabbia/limo/detrito/roccia alterata - *Sand (Silt, Debris, Weak Rock) Flow Slide*
• Colata di argille sensitive - *Clay Flow Slide*
• Colata di terra – *Earth Flow*
• Colata di detrito - *Debris Flow*
• Colata di fango - *Mud Flow*
• Valanga di detrito - *Debris Avalanche*
• Valanga di roccia - *Rock Avalanche*

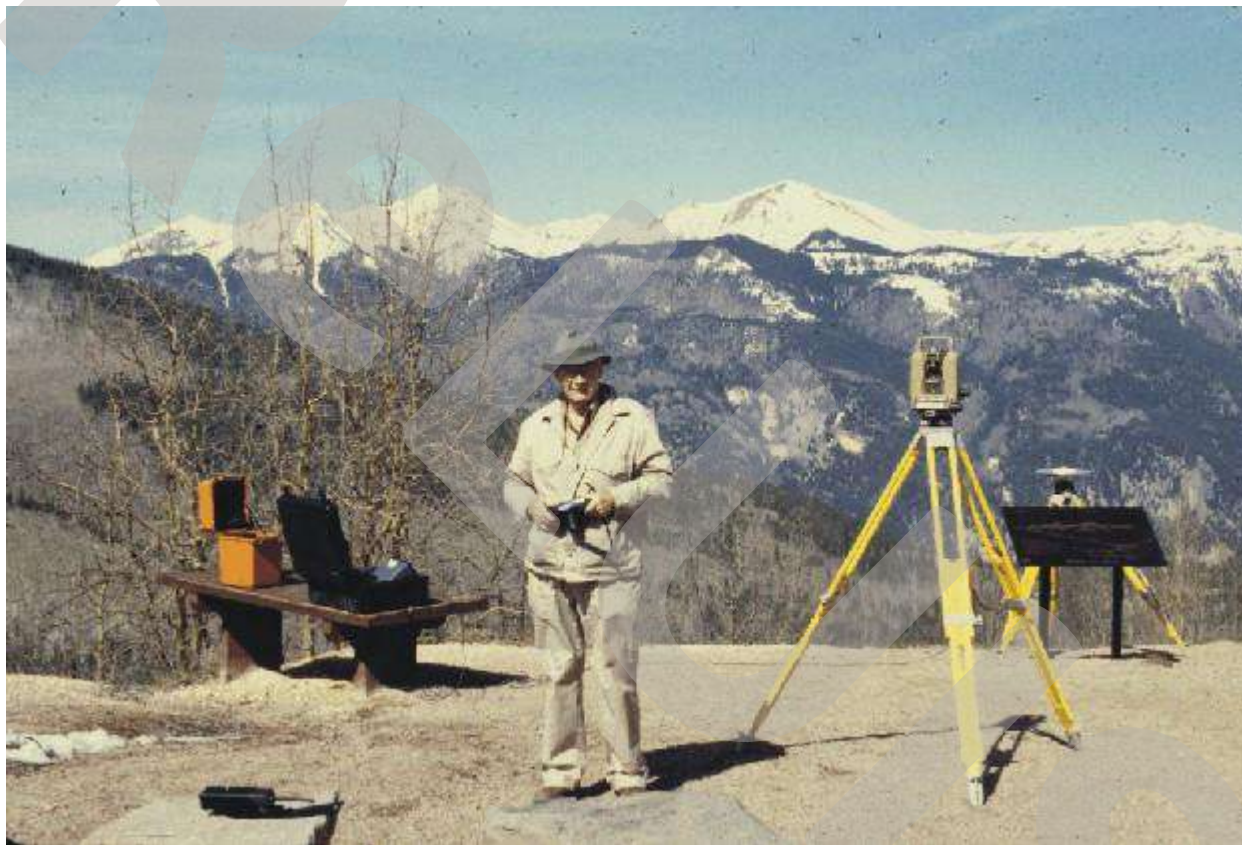
**ESPANSIONI
LATERALI
LATERAL
SPREADS**

**Espansione laterale di
roccia o terra – Rock/Soil
lateral spread**

**COMPRESSI
COMPLEX**

**“DGPV”
MOUNTAIN
SLOPE DEF.**

(da Varnes, 1978; Hutchinson, 1988; Cruden & Varnes, 1996; Hungr et al., 2001, modificata)



Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

La classifica dei fenomeni franosi di Varnes (1978)

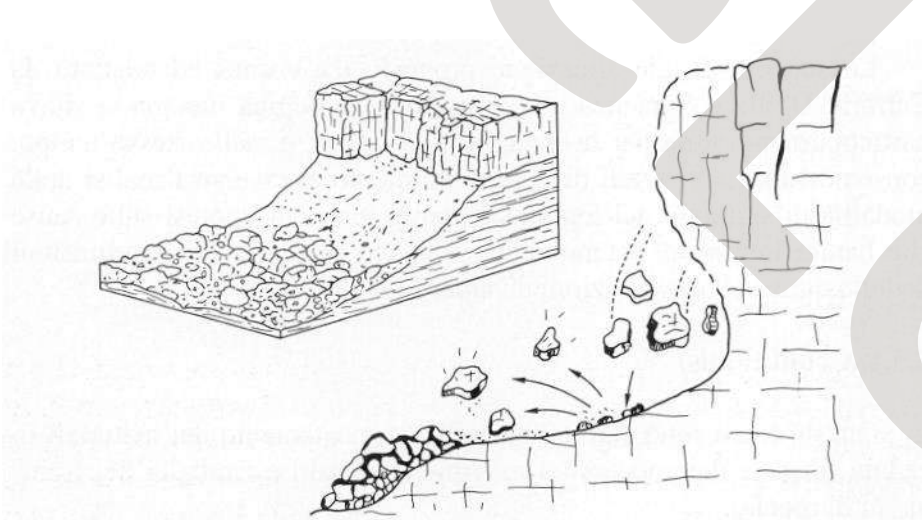
TIPO DI MOVIMENTO (PREVALENTE)	TIPO DI MATERIALE (PRIMA DEL MOVIMENTO)		
	AMMASSO ROCCIOSO (REGGIORE)	PREVALENTEMENTE GROSSOLANO (SOTTILE/REGGIERO)	TERRA SOLTIDA (SOTTILE/REGGIERO)
I - CROLLO (FALL) La massa crolla e si muove verso il basso. Il fenomeno è sempre preceduto da una fase di rottura, e il crollo avviene in un istante di tempo molto breve.	1 Crollo di roccia (rock fall) - Comportamento tipico	1 Crollo di detrito (debris fall)	1 Crollo di terra (earth fall)
II - RIBALTAMENTI (TOPPLE) L'elemento cede a forza che causa il ribaltamento intorno ad un punto di rotazione situato al centro del fenomeno della massa instabile. Questo è il caso di una massa che cede per effetto di un carico o di una spinta.	2 Ribaltamento di roccia (rock toppling) - Dal Frasca e Wilson (1970)	2 Ribaltamento di detrito (debris toppling)	2 Ribaltamento di terra (earth toppling)
III - SCORRENTI (SLIDE) / SCORRENTI A VOLANTINI (ROLLING) Il movimento avviene per scorrimento lungo una superficie di rottura. Il movimento avviene per rotolamento su una superficie di rottura.	3 Scorrimento rotazionale di massa (rotational sliding) - Dal Frasca e Wilson (1970) 3 Scorrimento traslatorio di massa (translational sliding) - Dal Frasca e Wilson (1970)	3 Scorrimento rotazionale di detrito (rotational sliding) - Dal Frasca e Wilson (1970) 3 Scorrimento traslatorio di detrito (translational sliding) - Dal Frasca e Wilson (1970)	3 Scorrimento rotazionale di terra (rotational sliding) - Dal Frasca e Wilson (1970) 3 Scorrimento traslatorio di terra (translational sliding) - Dal Frasca e Wilson (1970)
IV - ESPANSIONE LATERALE (LATERAL SPREAD) Movimento di espansione laterale, diffuso in una zona ristretta, che si verifica nei casi di liquefazione.	4 Espansione laterale di roccia (rock lateral spread)	4 Espansione laterale di detrito (debris lateral spread)	4 Espansione laterale di terra (earth lateral spread)
V - COLAMENTI (FLOW) Il movimento avviene per colamento, con comportamento di tipo fluido.	5 Colamento di roccia (rock flow)	5 Colamento di detrito (debris flow)	5 Colamento di terra (earth flow)
VI - DEFORMAZIONE (DEFORMATION) Il movimento avviene per deformazione, con comportamento di tipo plastico.	6 Deformazione di roccia (rock deformation)	6 Deformazione di detrito (debris deformation)	6 Deformazione di terra (earth deformation)
VII - COMPRESSE (COMPRESSION) Il movimento avviene per compressione, con comportamento di tipo elastico.	7 Compressione di roccia (rock compression)	7 Compressione di detrito (debris compression)	7 Compressione di terra (earth compression)
VIII - SCORRENTI ROTAZIONALE (ROTATIONAL SLIP) Il movimento avviene per scorrimento rotazionale, con comportamento di tipo elastico.	8 Scorrimento rotazionale di roccia (rock rotational slip)	8 Scorrimento rotazionale di detrito (debris rotational slip)	8 Scorrimento rotazionale di terra (earth rotational slip)

La classifica dei fenomeni franosi di Varnes (1978)

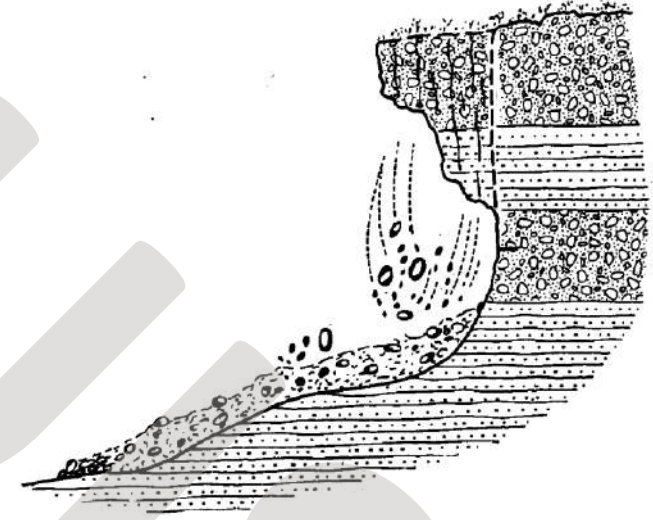
TIPO DI MOVIMENTO		TIPO DI MATERIALE		
		ROCCE	TERRENI GROSSOLANI	TERRENI A GRANA FINE
CROLLI		Crolli di roccia	Crolli di detrito	Crolli di terra
RIBALTAMENTI		Ribaltamenti di roccia	Ribaltamenti di detrito	Ribaltamenti di terra
SCORRIMENTI	ROTAZIONALI	Scorr. rotaz. di roccia	Scorrimenti rotaz. di detrito	Scorrimenti rotaz. di terra
	TRASLATIVI	Scorr. trasl. di roccia	Scorrim. traslat. di detrito	Scorrimenti traslat. di terra
ESPANSIONI LATERALI		Espans. lat. di roccia	Espans. laterali di detrito	Espansioni laterali di terra
COLAMENTI		Colamenti di roccia	Colamenti di detrito	Colamenti di terra
Fr. Complesse => FR. COMPOSITE		Combinazioni di due o più tipi principali di movimento		

- **Ammasso roccioso:** roccia in posto con le relative discontinuità strutturali
- **Roccia:** materiale naturale che, in campioni al di fuori della sua sede, è dotato di elevata coesione, anche dopo prolungato contatto con l'acqua
- **Terreno sciolto:** materiale naturale formato da aggregati di granuli non legati tra loro o che possono essere separati mediante modeste sollecitazioni o mediante un più o meno prolungato contatto con l'acqua

La massa si muove prevalentemente o parzialmente nell'aria. Il fenomeno comprende la caduta libera, il movimento a salti e rimbalzi, il rotolamento di frammenti di roccia o di terreno sciolto



Crolli in rocce lapidee

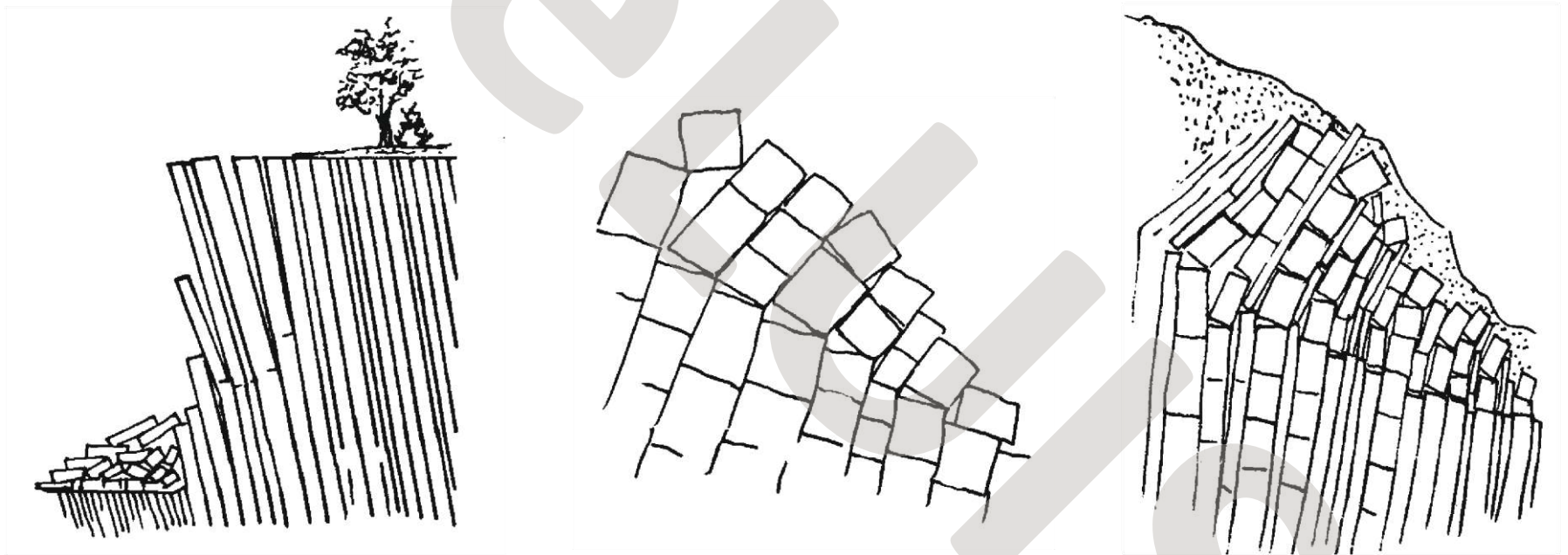


Crollo in rocce poco coerenti o alterate

Singoli massi e/o blocchi o porzioni di ammassi rocciosi che si staccano da pareti litoidi verticali o subverticali o da scarpate naturali e/o antropiche e che si muovono in aria. Il fenomeno comprende la caduta libera, il movimento a salti e rimbalzi ed il rotolamento di frammenti di roccia o di terreno sciolto. Il movimento è estremamente rapido. Il deposito è costituito da un accumulo di materiale di varie dimensioni che si raccoglie al piede del versante, ma in cui singoli blocchi di dimensioni maggiori possono percorrere anche notevoli distanze.

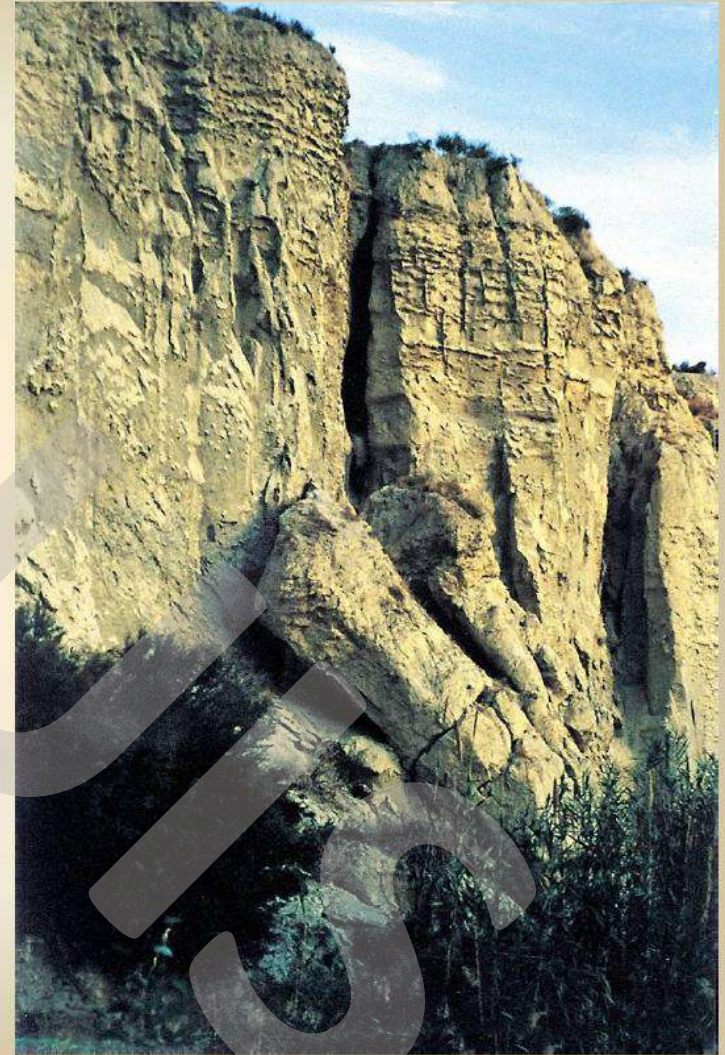
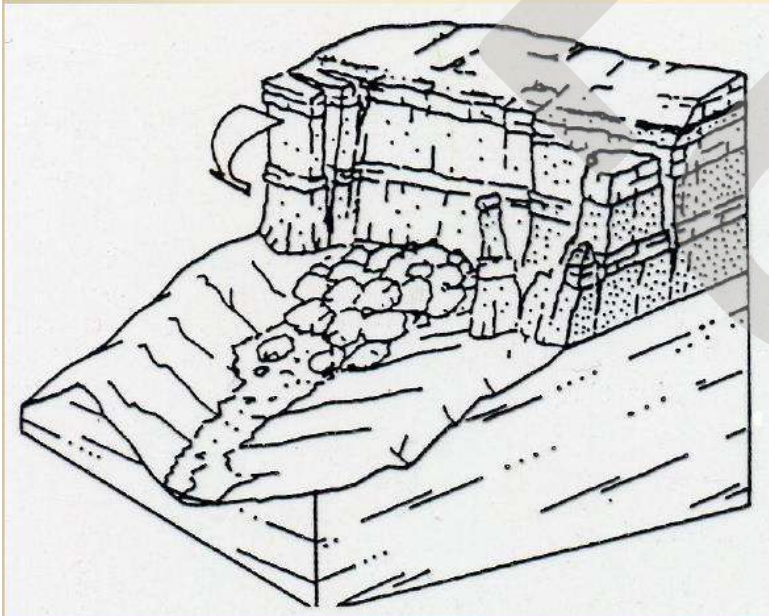


Movimento dovuto a forze che causano un momento ribaltante attorno ad un punto di rotazione situato al di sotto del baricentro della massa interessata. Qualora il fenomeno non sia frenato, può evolvere in un crollo o in uno scorrimento.



RIBALTAMENTI (TOPPLES)

Movimento dovuto ad un momento ribaltante attorno ad un punto di rotazione situato al di sotto del baricentro della massa interessata.



Scorrimenti o scivolamenti

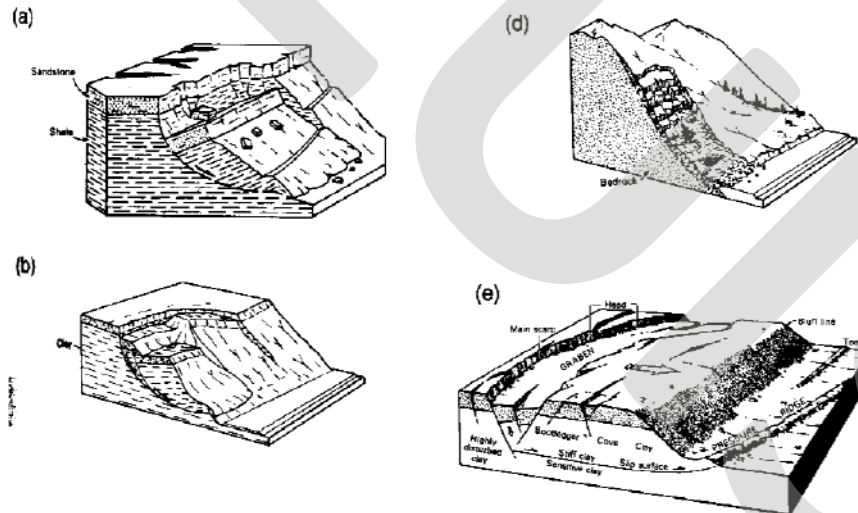
Il movimento comporta uno spostamento per taglio lungo una o più superfici, oppure entro un "livello" abbastanza sottile. Queste superfici di scorrimento sono visibili o possono essere ragionevolmente ricostruite.

Scorrimenti rotazionali o scoscendimenti (a, b)

Movimento dovuto a forze che producono un momento di rotazione attorno ad un punto posto al di sopra del centro di gravità della massa. La superficie di rottura si presenta concava verso l'alto.

Scorrimenti traslativi o scivolamenti p.d. (d, e)

Il movimento si verifica in prevalenza lungo una superficie più o meno piana o debolmente ondulata, corrispondente frequentemente a discontinuità strutturali, quali faglie, giunti di fessurazione o di stratificazione, o passaggi fra strati di diversa composizione litologica, o contatto tra roccia in posto e detrito soprastante.



Scorrimenti o scivolamenti

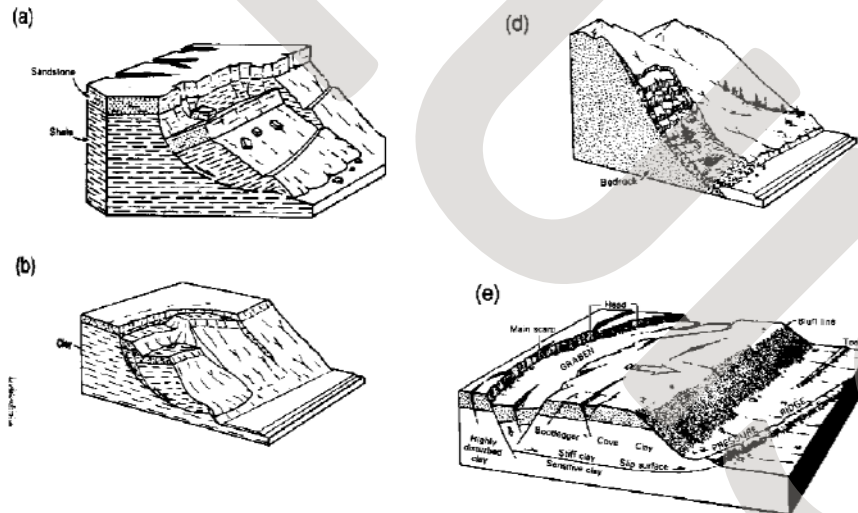
Il movimento comporta uno spostamento per taglio lungo una o più superfici, oppure entro un "livello" abbastanza sottile. Queste superfici di scorrimento sono visibili o possono essere ragionevolmente ricostruite.

Scorrimenti rotazionali o scoscendimenti (a, b)

Movimento dovuto a forze che producono un momento di rotazione attorno ad un punto posto al di sopra del centro di gravità della massa. La superficie di rottura si presenta concava verso l'alto.

Scorrimenti traslativi o scivolamenti p.d. (d, e)

Il movimento si verifica in prevalenza lungo una superficie più o meno piana o debolmente ondulata, corrispondente frequentemente a discontinuità strutturali, quali faglie, giunti di fessurazione o di stratificazione, o passaggi fra strati di diversa composizione litologica, o contatto tra roccia in posto e detrito soprastante.



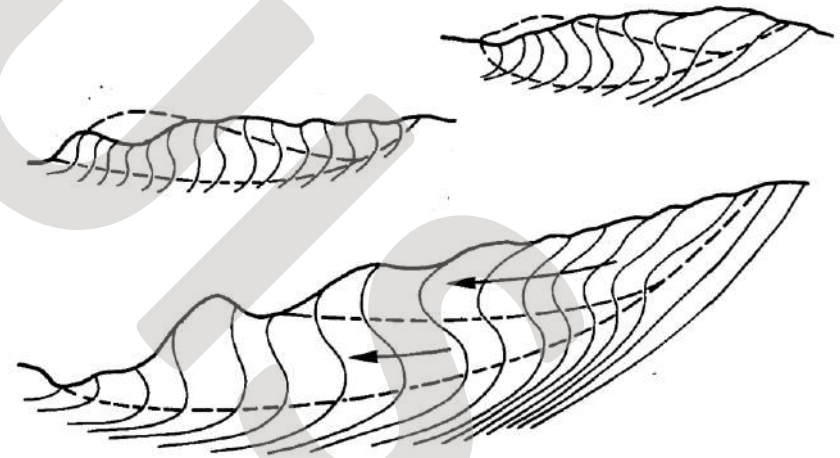
A – in ammassi rocciosi

Il fenomeno comprende deformazioni spazialmente continue e “*creep*” sia superficiale che profondo. Esso comporta movimenti differenziali, che sono estremamente lenti e generalmente non accelerati, fra unità che rimangono relativamente intatte.

I movimenti possono:

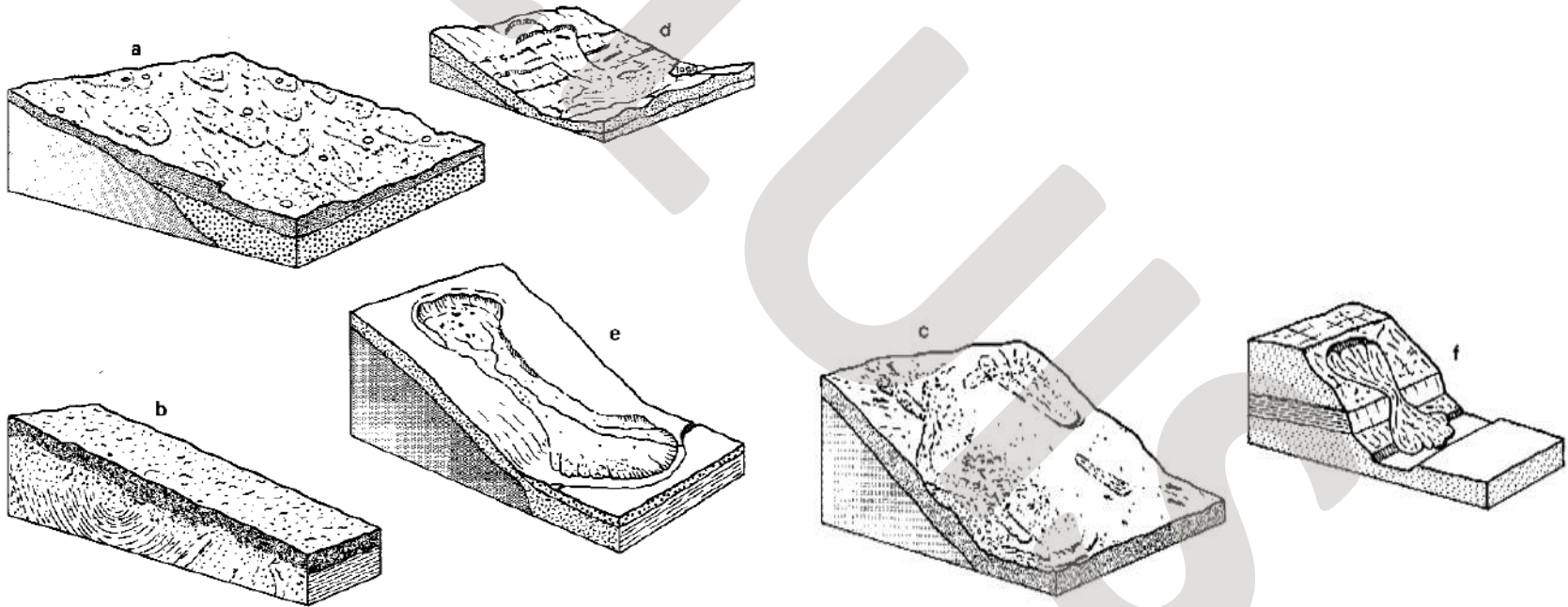
- 1) avvenire lungo più superfici di taglio che apparentemente non sono collegate
- 2) provocare piegamenti o rigonfiamenti, oppure
- 3) apparire approssimativamente simili, nella distribuzione delle velocità, ai movimenti tipici dei fluidi viscosi.

Esempi di colamenti in roccia
(Vallario, 1992)

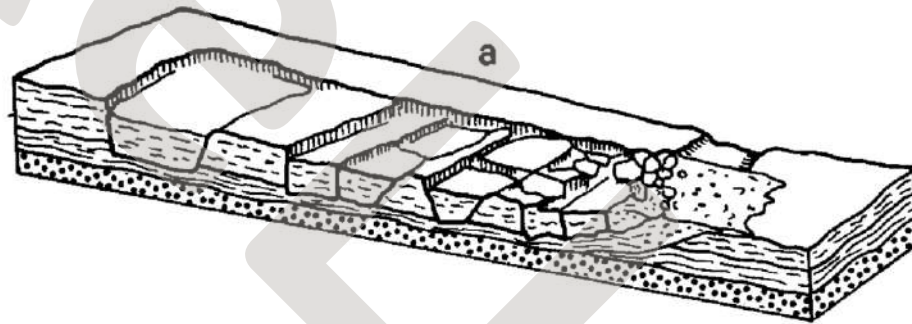
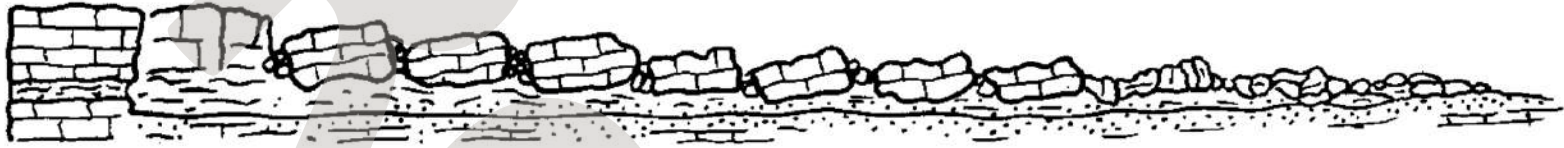


B – in terreni sciolti

Il fenomeno si esplica con movimenti entro la massa spostata tali, per cui o la forma assunta dal materiale in movimento o la distribuzione apparente delle velocità e degli spostamenti sono simili a quelle dei fluidi viscosi. Le superfici di scorrimento nella massa che si muove non sono generalmente visibili, oppure hanno breve durata. Il limite tra la massa in movimento ed il materiale in posto può essere una superficie netta di movimento differenziale, oppure una zona di scorrimenti distribuiti. Il movimento varia da estremamente rapido ad estremamente lento.



Espansioni laterali (Espansioni in Cruden & Varnes, 1996)



Movimenti di espansione laterale, diffusi in una massa fratturata, che si verificano nei due seguenti modi:

A – non si riconosce né una superficie basale di scorrimento, né una zona di deformazioni plastiche ben definite (prevalentemente in roccia)

B – l'espansione laterale della roccia o del terreno sciolto è dovuta alla liquefazione o alle deformazioni plastiche del materiale sottostante.

Espansioni laterali (Espansioni in Cruden & Varnes, 1996)

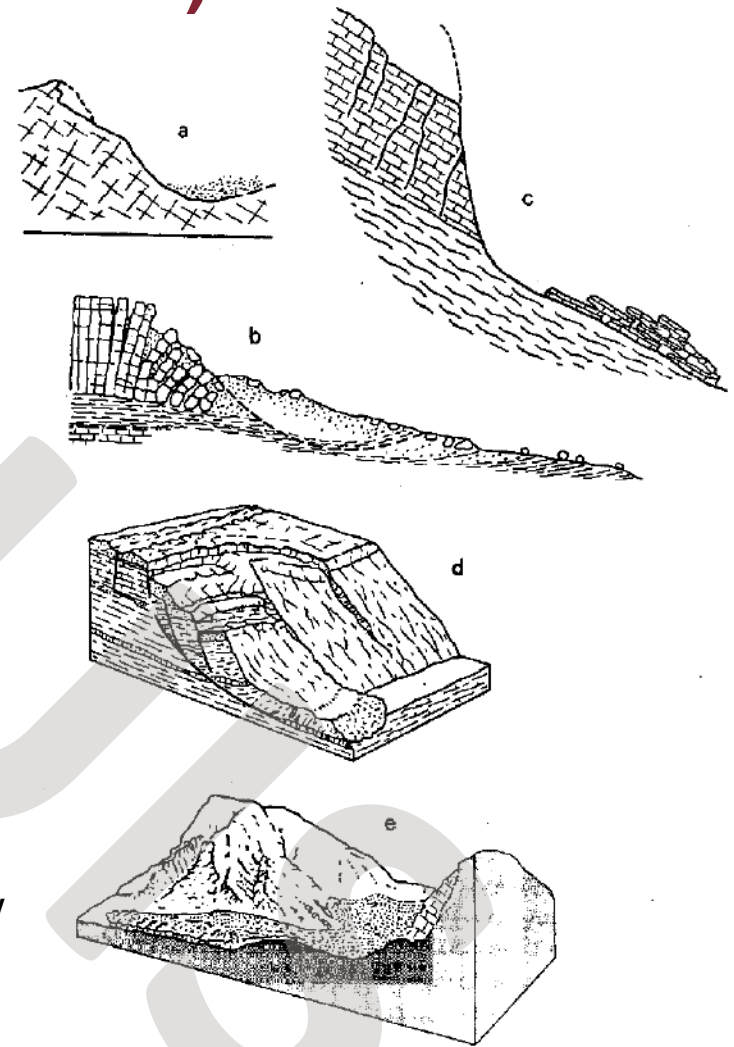
ESPANSIONI LATERALI

Movimenti di espansione laterale spesso per liquefazioni o deformazione plastica del materiale sottostante.



Frane complesse (abolite in Cruden & Varnes, 1996)

Il movimento risulta dalla combinazione di due o più dei cinque tipi principali sopra descritti. Molte frane sono complesse, ma generalmente un tipo di movimento predomina, spazialmente o temporalmente sugli altri.



Esempi di frane complesse (*sensu*
Varnes, 1978 – in Vallario, 1992)

Differenze sostanziali tra la classifica di Varnes (1978) e quella di Cruden & Varnes (1996)

- Eliminazione delle frane complesse (il termine "complesso" definisce uno stile di attività)
- Modifiche nella scala delle velocità di movimento
- Definizione di **stile, stato e distribuzione di attività**, in accordo con le proposte della Comunità scientifica internazionale

Attività di una frana

➤ Stato di attività

Descrive ciò che è noto sulla cronologia del movimento

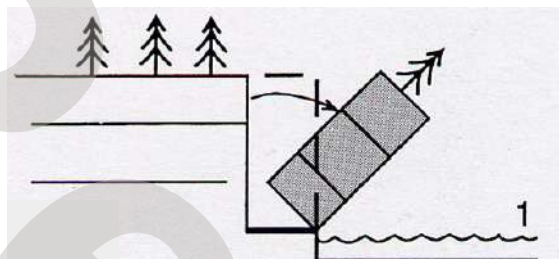
➤ Distribuzione di attività

Descrive le modalità e la direzione di evoluzione della frana

➤ Stile di attività

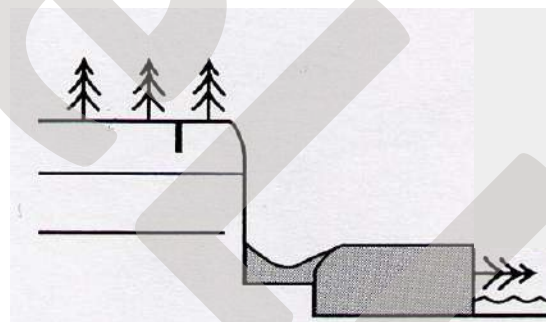
Indica come movimenti differenti all'interno della frana possano contribuire al movimento complessivo della stessa

Frana attiva



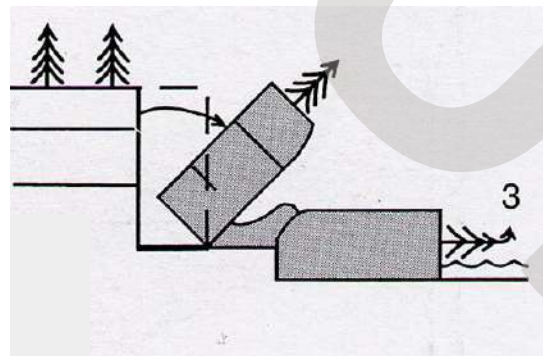
attualmente in
movimento

Frana sospesa



si è mossa entro l'ultimo
ciclo stagionale, ma non è
attiva attualmente

Frana
riattivata



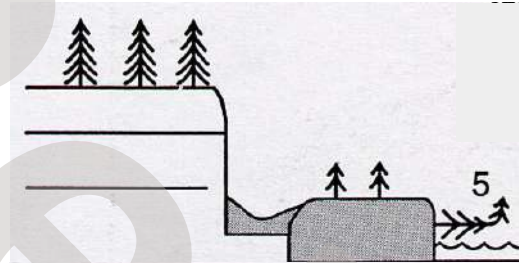
di nuovo attiva, dopo
essere stata inattiva

Stato di attività

Frane inattive: si sono mosse l'ultima volta prima dell'ultimo ciclo stagionale.

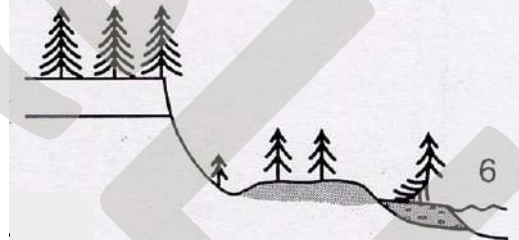
Si suddividono in:

Frana
quiescente



può essere riattivata dalle
sue cause originali

Frana naturalmente
stabilizzata



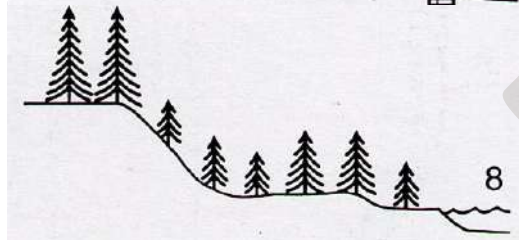
è stata protetta dalle sue
cause originali

Frana artificialmente
stabilizzata



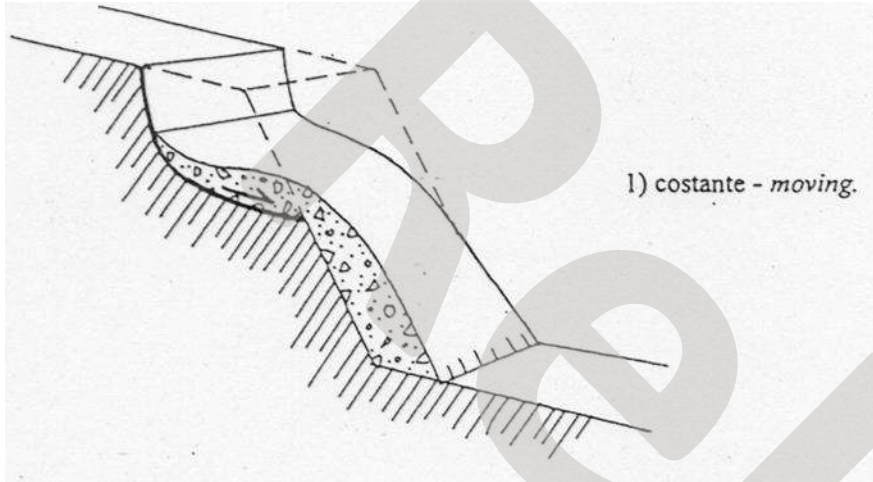
è stata protetta dalle sue
cause originali da misure di
stabilizzazione

Frana relitta

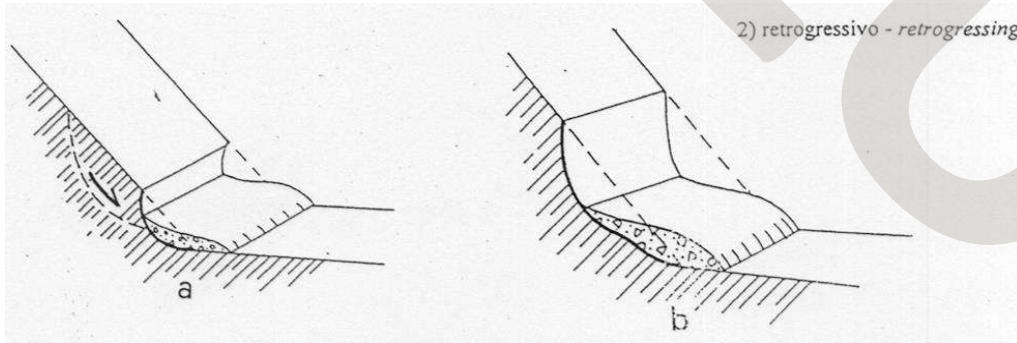


Si è sviluppata in condizioni
geomorfologiche o climatiche
considerevolmente diverse dalle attuali

Distribuzione di attività (WP/WLI, 1993) - 1

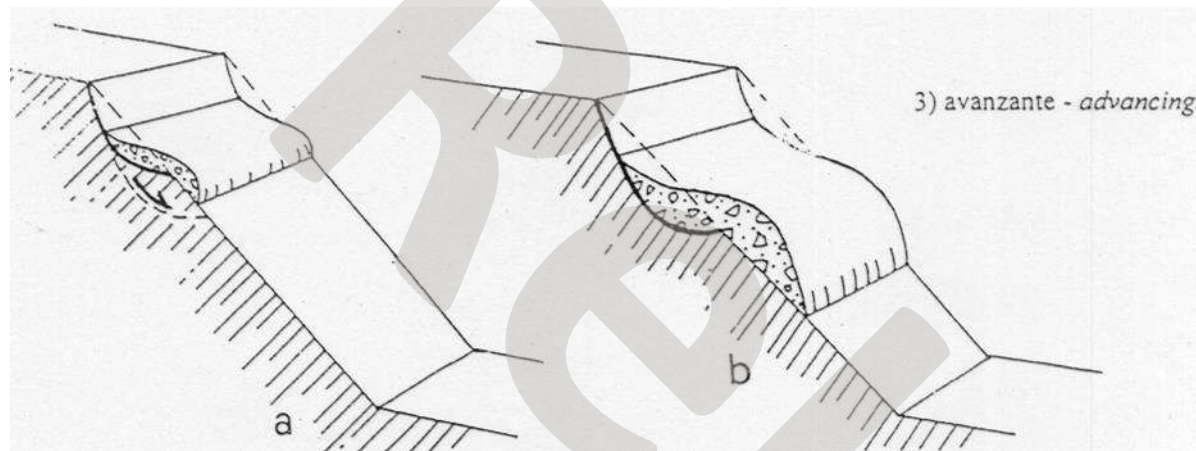


Il materiale spostato continua a muoversi senza variazioni apprezzabili della superficie di rottura e del volume di materiale spostato

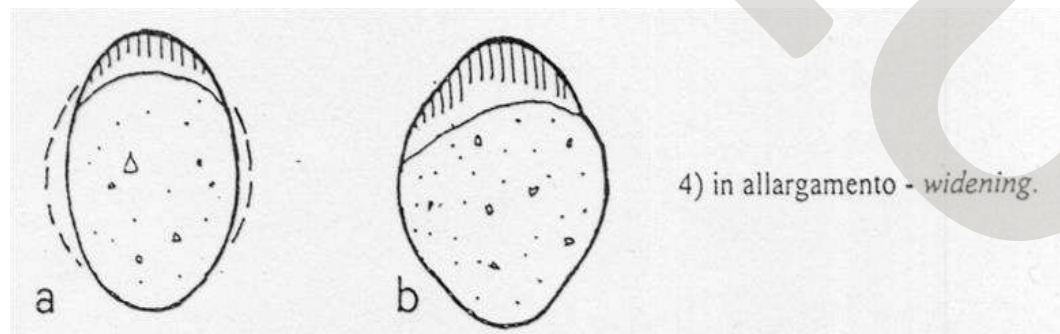


La superficie di rottura si estende in senso opposto a quello del movimento

Distribuzione di attività (WP/WLI, 1993) - 2



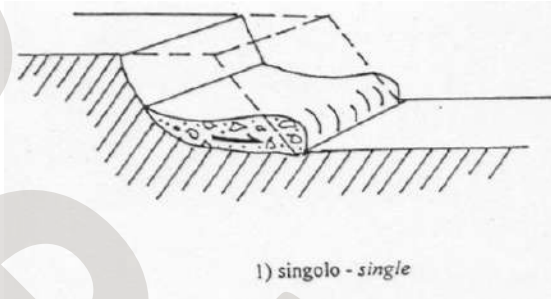
La superficie di rottura si estende nella direzione di movimento



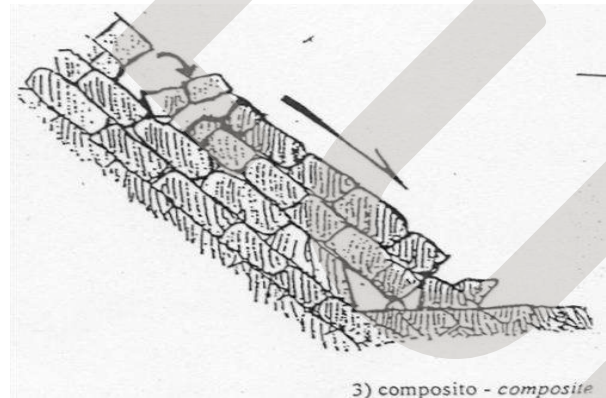
La superficie di rottura si estende su uno o entrambi i margini laterali

Stile di attività (WP/WLI, 1993) - 1

Frana caratterizzata da un singolo movimento del materiale spostato

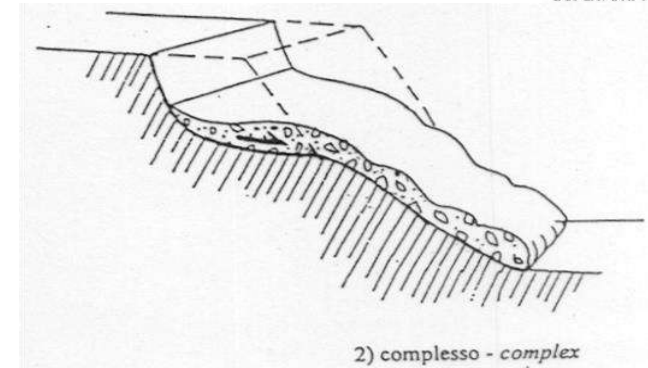


Frana caratterizzata dalla combinazione di due o più tipi di movimento, simultaneamente, in parti diverse della massa spostata



Stile di attività (WP/WLI, 1993) - 1

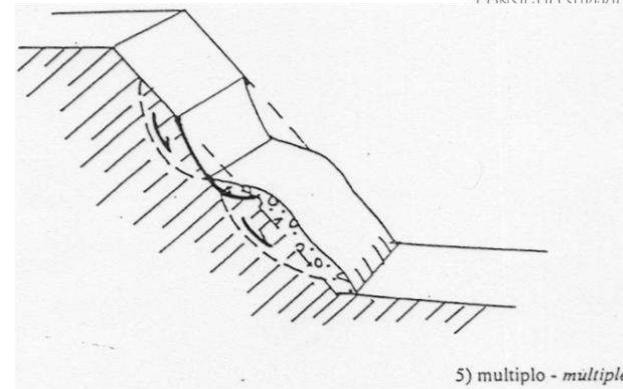
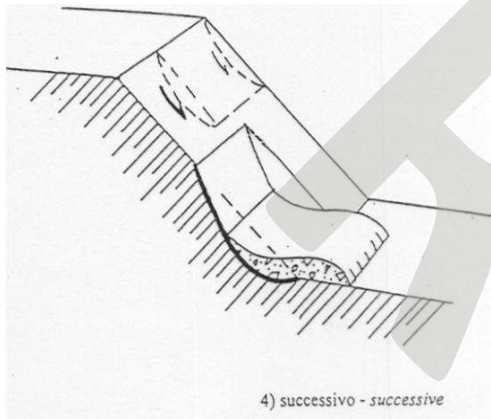
Frana caratterizzata dalla combinazione, in sequenza temporale, di due o più tipi di movimento



Stile di attività (WP/WLI, 1993) - 2



CONSIGLIO SUPERIORE
1



Frana caratterizzata da un movimento dello stesso tipo di un fenomeno precedente ed adiacente, in cui però le masse spostate e le superfici di rottura si mantengono ben distinte

Molteplice ripetizione dello stesso tipo di movimento

Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

Frequenza relativa delle varie tipologie di frana in Italia e grado di difficoltà per la loro identificazione e classificazione (Carrara et al., 1985)

Tipo di Movimento		Tipo di Materiale		
		Roccia	Detrito	Terra
<u>CROLLI ***</u>		<u>Crollo di roccia ***</u>	<u>Crollo di detrito ***</u>	<u>Crollo di terra ***</u>
<u>RIBALTAMENTI **</u>		<u>Ribaltamento di roccia **</u>	<u>Ribaltamento di detrito *</u>	<u>Ribaltamento di terra *</u>
<u>SCORRIM ***</u>	<u>Rotaz **</u>	<u>Scorr. rot. di roccia **</u>	<u>Scorr. rot. di detrito **</u>	<u>Scorr. rot. di terra **</u>
	<u>Trasl **</u>	<u>Scorr. trasl. di roccia **</u>	<u>Scorr. trasl. di detrito **</u>	<u>Scorr. trasl. di terra **</u>
<u>ESPANSIONI LATERALI *</u>		<u>Espans. lat. di roccia *</u>	<u>Espans. lat. di detrito *</u>	<u>Espans. lat. di terra *</u>
<u>COLAMENTI ***</u>		<u>Colamento di roccia *</u>	<u>Colata di detrito **</u>	<u>Colata di terra ***</u>
<u>FRANE COMPLESSE **</u>				

- ===== = fenomeni molto diffusi
- ===== = fenomeni relativamente diffusi
- ===== = fenomeni scarsamente diffusi
- *** = fenomeni facilmente individuabili
- ** = fenomeni individuabili con difficoltà
- * = fenomeni difficilmente individuabili

Classificazioni Recenti

- Aggiornate e funzionali a contenere caratteri più prettamente geo-meccanici del fenomeno
- Acquisizione di maggiori competenze per la loro gestione

L'aggiornamento della classifica secondo Hungr et al. (2014)

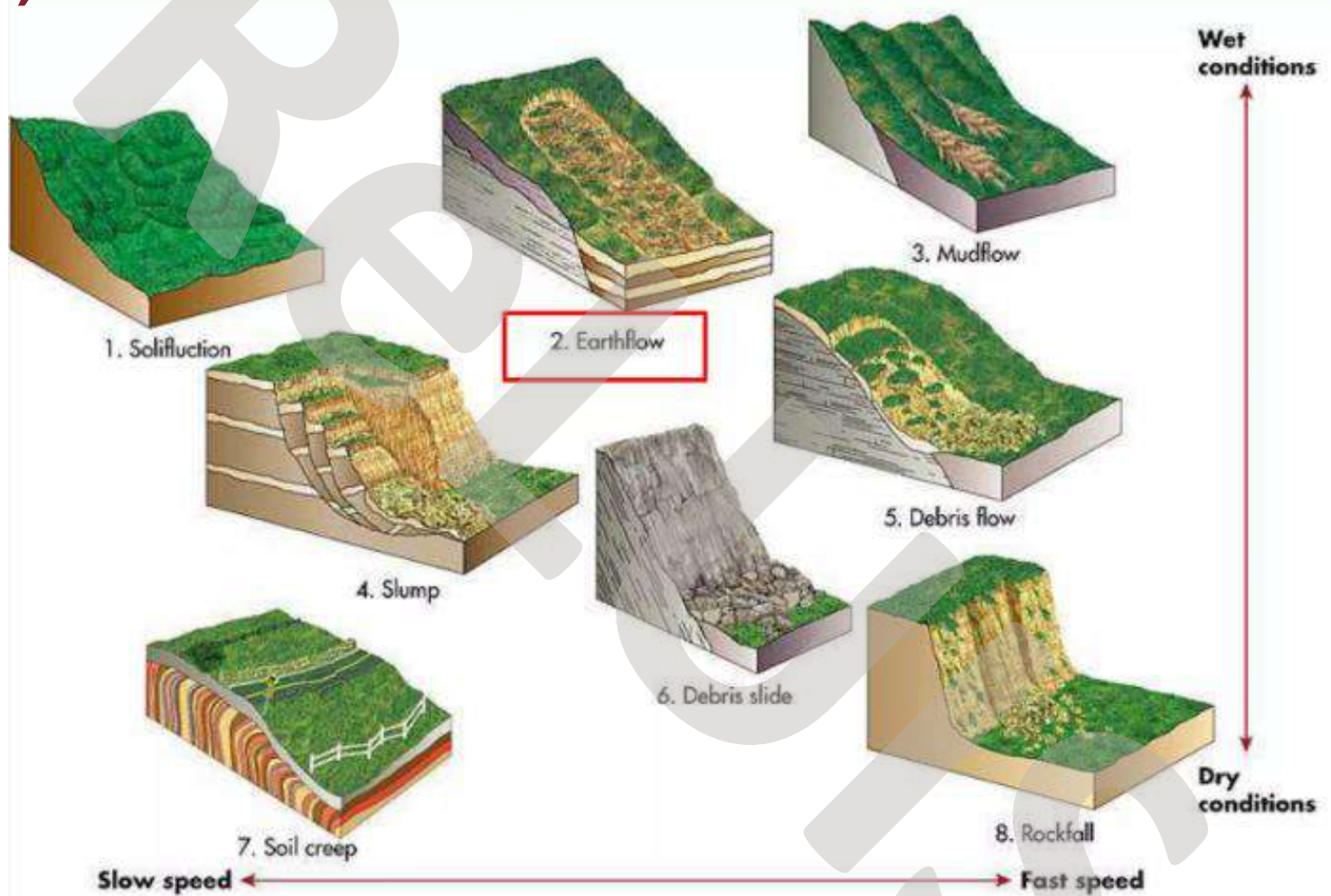
Table 3 Landslide-forming material types

Material name	Character descriptors (if important)	Simplified field description for the purposes of classification	Corresponding unified soil classes	Laboratory indices (if available)
Rock	Strong	Strong—broken with a hammer		UCS>25 MPa
	Weak	Weak—peeled with a knife		2<UCS<25 MPa
Clay	Stiff	Plastic, can be molded into standard thread when moist, has dry strength	GC, SC, CL, MH, CH, OL, and OH	$I_p > 0.05$
	Soft			
	Sensitive			
Mud	Liquid	Plastic, unsorted remolded, and close to Liquid Limit	CL, CH, and CM	$I_p > 0.05$ and $I_L > 0.5$
Silt, sand, gravel, and boulders	Dry	Nonplastic (or very low plasticity), granular, sorted. Silt particles cannot be seen by eye	ML	$I_p < 0.05$
	Saturated		SW, SP, and SM	
	Partly saturated		GW, GP, and GM	
Debris	Dry	Low plasticity, unsorted and mixed	SW-GW	$I_p < 0.05$
	Saturated		SM-GM	
	Partly saturated		CL, CH, and CM	
Peat		Organic		
Ice		Glacier		

L'aggiornamento della classifica secondo Hungr et al. (2014)

Table 5 Summary of the proposed new version of the Varnes classification system. The words in italics are placeholders (use only one)

Type of movement	Rock	Soil
Fall	1. <i>Rock/ice fall</i> ^a	2. <i>Boulder/debris/silt fall</i> ^a
Topple	3. <i>Rock block topple</i> ^a	5. <i>Gravel/sand/silt topple</i> ^a
	4. <i>Rock flexural topple</i>	
Slide	6. <i>Rock rotational slide</i>	11. <i>Clay/silt rotational slide</i>
	7. <i>Rock planar slide</i> ^a	12. <i>Clay/silt planar slide</i>
	8. <i>Rock wedge slide</i> ^a	13. <i>Gravel/sand/debris slide</i> ^a
	9. <i>Rock compound slide</i>	14. <i>Clay/silt compound slide</i>
	10. <i>Rock irregular slide</i> ^a	
Spread	15. <i>Rock slope spread</i>	16. <i>Sand/silt liquefaction spread</i> ^a
		17. <i>Sensitive clay spread</i> ^a
Flow	18. <i>Rock/ice avalanche</i> ^a	19. <i>Sand/silt/debris dry flow</i>
		20. <i>Sand/silt/debris flowslide</i> ^a
		21. <i>Sensitive clay flowslide</i> ^a
		22. <i>Debris flow</i> ^a
		23. <i>Mud flow</i> ^a
		24. <i>Debris flood</i>
		25. <i>Debris avalanche</i> ^a
Slope deformation	28. <i>Mountain slope deformation</i>	26. <i>Earthflow</i>
		27. <i>Peat flow</i>
		30. <i>Soil slope deformation</i>
		31. <i>Soil creep</i>
		29. <i>Rock slope deformation</i>



L'aggiornamento della classifica secondo Hungr et al. (2014) – Macro famiglie: deformazione vs volumi

Mountain slope deformation: Large-scale gravitational deformation of steep, high mountain slopes, manifested by scarps, benches, cracks, trenches and bulges, but lacking a fully defined rupture surface. Extremely slow or unmeasurable movement rates.

Rock slope deformation: Deep-seated slow to extremely slow deformation of valley or hill slopes. Sagging of slope crests and development of cracks or faults, without a well-defined rupture surface. Extremely slow movement rates.

The difference between rock slope deformation and mountain slope deformation is scale, with the former involving slopes only a few tens or hundreds of meters high and weak rock.

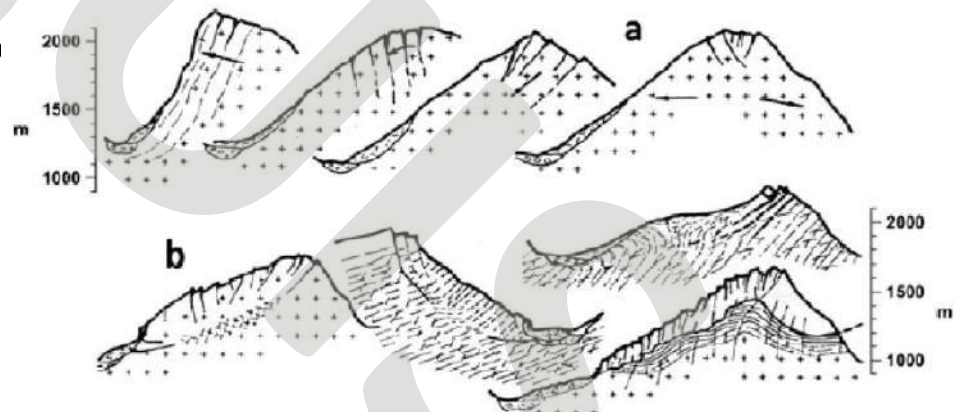
Soil slope deformation: Deep-seated, slow to extremely slow deformation of valley or hill slopes formed of (usually cohesive) soils. Often present in permafrost slopes with high ice content.

Soil creep: Extremely slow movement of surficial soil layers on a slope (typically less than 1 m deep), as a result of climate-driven cyclical volume changes (wetting and drying, frost heave).

Solifluction: Very slow but intensive shallow soil creep with characteristic solifluction lobes.



Slope deformation (Hungr et al., 2014)



Mountain slope deformation (Hungr et al., 2014)

Classifica delle frane secondo Sassa (1989)

Criteri classificativi

1) Meccanismo d'innesco (tipo di sollecitazione al taglio)

- a) Scivolamento
 - Frana per raggiungimento della resistenza di picco
 - Frana per raggiungimento della resistenza residua
- b) Liquefazione
- c) *Creep*

2) Movimento

- a) Crollo
- b) Scivolamento o scorrimento
- c) Flusso

3) Tipo di materiale

- a) Roccia
- b) Terreni granulari
- c) Terreni coesivi

Il *creep* è considerato come la continuazione o la ripetizione del meccanismo d'avvio, potendosi pertanto escludere dai tipi di movimento. Il ribaltamento non è un fenomeno di taglio e pertanto non è classificabile come frana. Le espansioni laterali possono essere classificate come scivolamenti o *creep* su superfici di rottura poco inclinate.

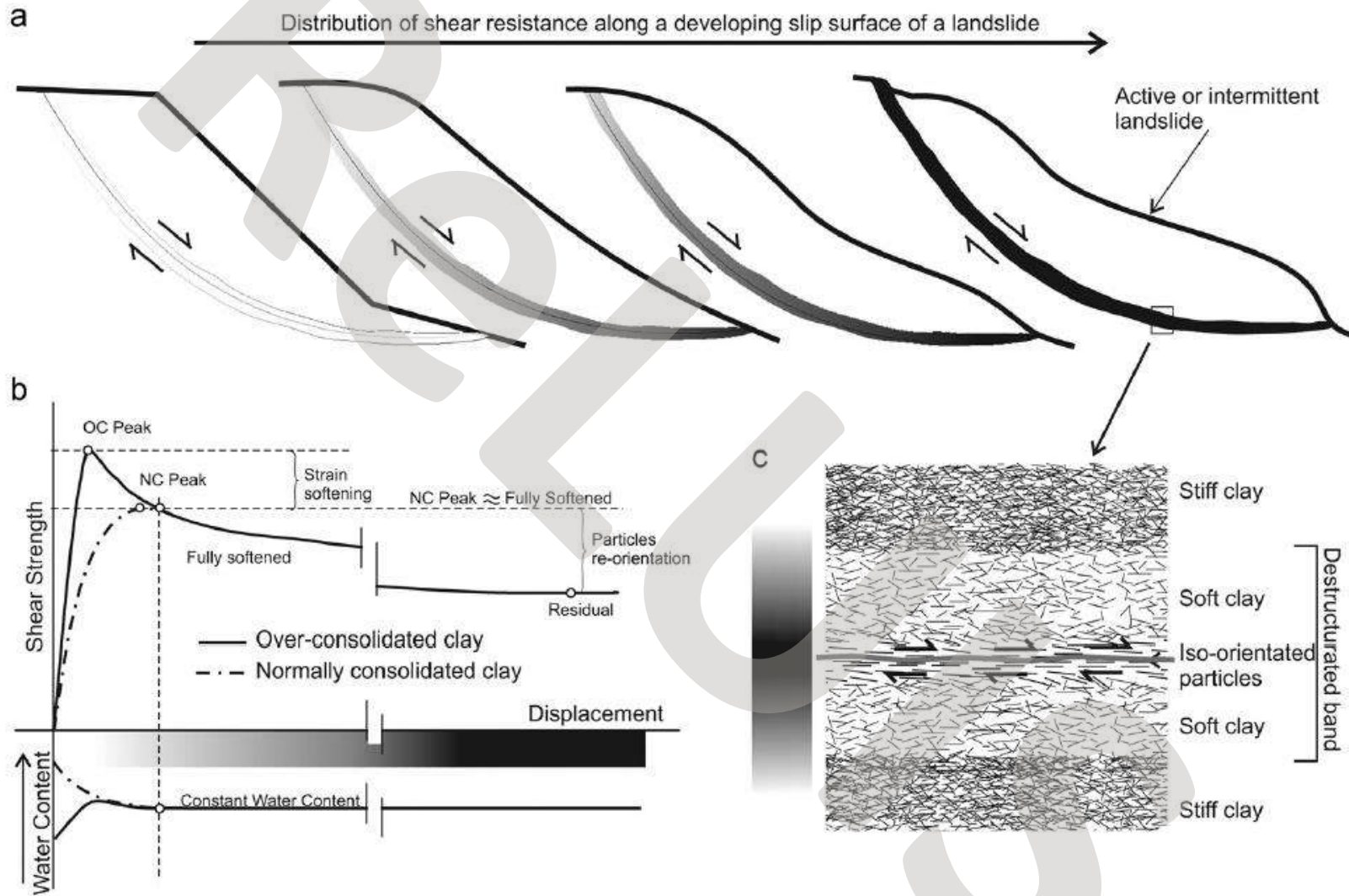


Fig. 1. Schematic model for (a) the mobilisation of shear resistance with time along a slip surface of a landslide, (b) shear resistance–displacement variation and (c) soil structure at the slip surface.

Condizioni idrauliche agenti sulla superficie di rottura

- A breve termine (condizioni non drenate)

Nessun decremento delle pressioni neutre in eccesso causate da cambiamenti di tensione totale

- Condizioni intermedie

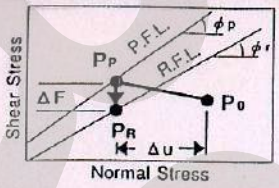
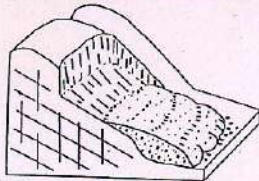
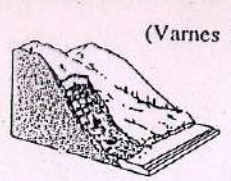
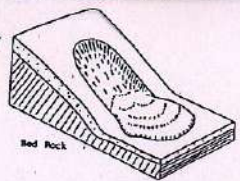
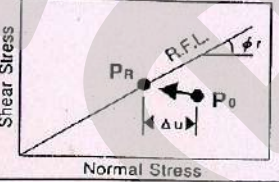
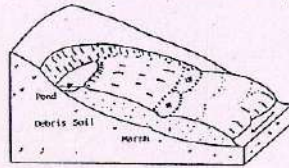
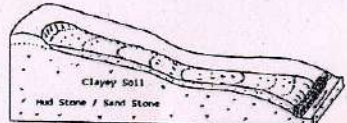
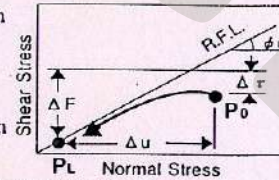

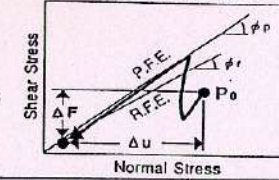
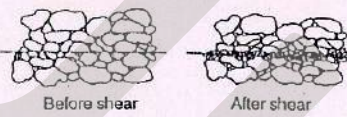
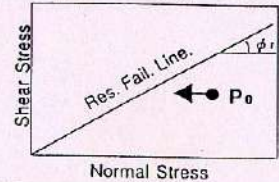
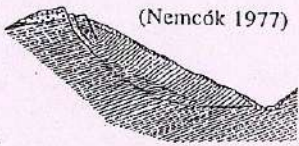
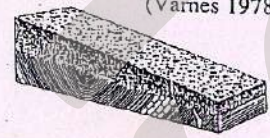
Parziale decremento delle pressioni neutre in eccesso. Rotture differite lungo fronti di scavo in argille dure rientrano di solito in questa categoria

- A lungo termine (condizioni drenate)

Totale annullamento delle pressioni neutre in eccesso



Classifica geotecnica delle frane secondo Sassa (1989)

Table 1 Landslide classification due to initiation mechanism				
Type of Shear	Stress Path	Rocks (> 20mm)	Sandy Soils (0.074 ~ 20 mm)	Clayey Soils (< 0.074 mm)
I. Slides				
I-1 Peak- Strength Slide				
I-2 Residual- State Slide		Landslides in crystalline schists Zentoku landslide (Fig. 2)		
II. Liquefaction				
II-1 Mass - Liquefaction		None	Matsukoshi landslide (Fig. 5)	
II-2 Sliding- Surface Liquefaction		None		None
III. Creep				
				

Classifica geotecnica delle frane secondo Sassa (1989)

Tipologia della sollecitazione al taglio	Granulometria del materiale		
	Roccia > 20 mm	Terreno sabbioso 20 - 0,074 mm	Terreno argilloso < 0,074 mm
I. Scivolamenti («Slides»)			
A) Scivolamento per massima sollecitazione al taglio (Peak Strength Slide)	North Nahanni (LN3, p. 4) Mount St. Helens (LN3, p. 9)	Medellin (LN2, p. 12)	(Clay-Peak Strength Slide) Scivolamento per massima sollecitazione al taglio in argilla
B) Scivolamento per sollecitazione residuale (Residual State Slide)	Zentoku (LN3, p. 23) Jing Long Shan (LN3, p. 15)	(Sand-Residual State Slide) Scivolamento per sollecitazione residuale in sabbia	Muddy Creek (LN2, p. 8)
II. Liquefazione	Nessuna	Okuli, URSS (LN3, p. 7)	Frana in «argilla attiva» («Quick Clay Landslide»)
III. Creep	Zentoku (LN3, p. 23)	Creep nel terreno	Creep in argilla

Frana

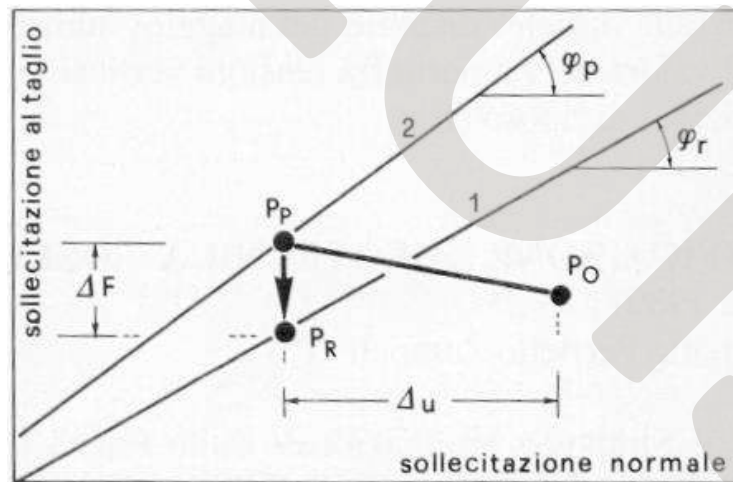
Fenomeno legato a sollecitazioni di taglio in versanti naturali ed artificiali

Alcuni tipi di fenomeni di taglio possono essere spiegati facendo uso del concetto di percorso delle sollecitazioni (*stress path*).

Quando in un punto all'interno di un pendio lo stato tensionale raggiunge l'involuppo di rottura, avrà inizio un movimento lungo una superficie di scivolamento. Il punto P_0 rappresenta lo stato tensionale di un generico punto del pendio in condizioni di stabilità.

Quando la pressione neutra aumenta, il punto P_0 si sposta verso sinistra di una quantità pari all'incremento di pressione neutra Δu . Quindi, quando lo stato tensionale raggiunge l'involuppo di rottura relativo alla resistenza di picco al punto P_p , si ha l'inizio di uno scivolamento.

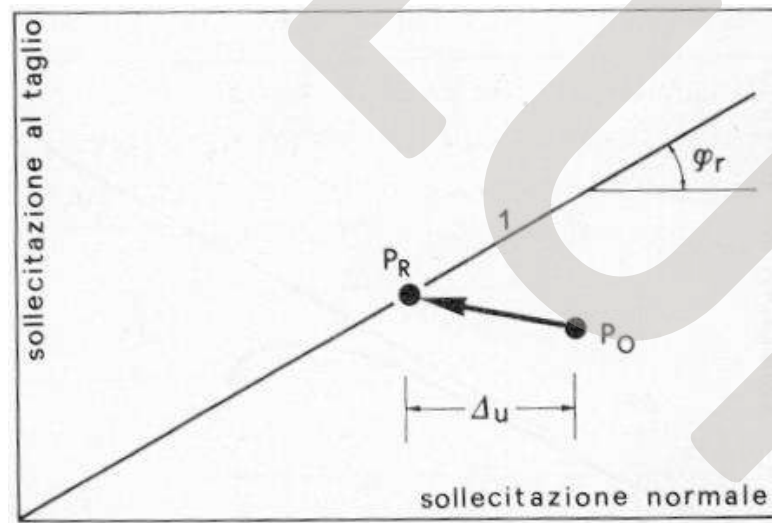
Nelle fasi iniziali e di piccola entità dei movimenti, nella zona interessata dal taglio, la resistenza disponibile decresce rapidamente al punto P_r sull'involuppo di rottura relativo alla resistenza residua. Una forza ΔF (differenza tra la sollecitazione di taglio e la nuova resistenza al taglio) determina un'accelerazione della massa già in corso di scivolamento. Si ha quindi una frana rapida che è classificata come **frana per raggiungimento della resistenza di picco** (*peak strength slide*).



- 1) Curva dei valori di rottura per resistenza al taglio residua;
- 2) Curva dei valori di rottura per massima sollecitazione. ΔF = Forza che determina l'accelerazione della massa in movimento. Δu = incremento di pressione neutra.

Quando lo strato che include la superficie di scivolamento è già ai valori di resistenza residua, i movimenti hanno inizio quando lo stato tensionale raggiunge l'involuppo di resistenza residua (P_R). La resistenza al taglio non decresce dopo la rottura; lo stato tensionale effettivo e la resistenza rimangono pressoché costanti. Di conseguenza, i movimenti sono lenti ed incrementi anche piccoli del fattore di sicurezza possono stabilizzare la frana.

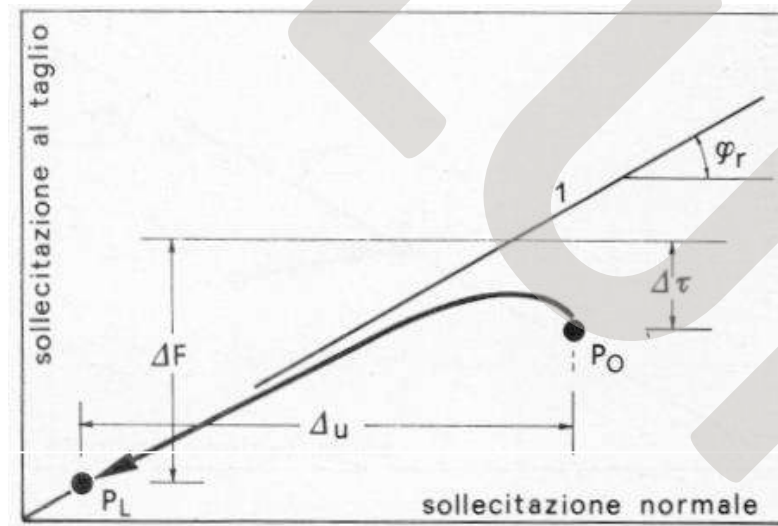
Si ha quindi una frana che è classificata come **frana per raggiungimento della resistenza residua** (*residual strength slide*).



1) Curva dei valori di rottura per resistenza al taglio residua. Δ_u = incremento di pressione neutra. A rottura avvenuta, la massa in movimento non subisce forti accelerazioni.

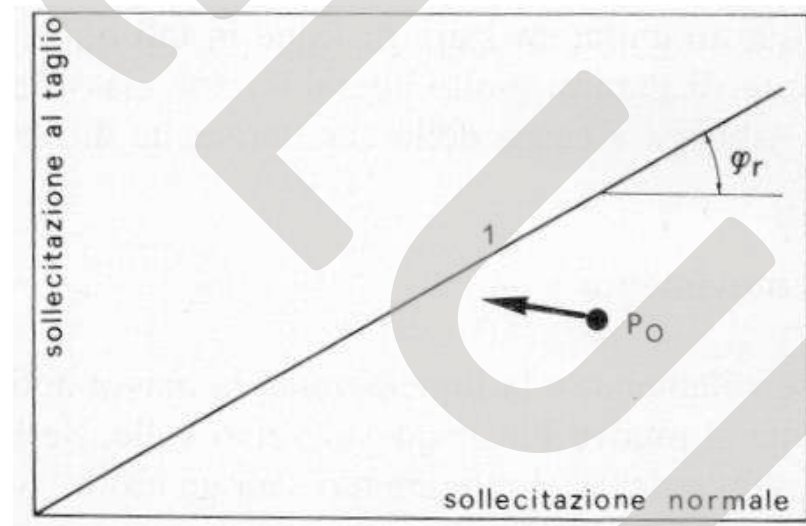
Quando una massa di terreno poco addensato è sottoposta a sollecitazione non drenata, lo scheletro solido collassa senza opporre al taglio alcuna resistenza per attrito (e quindi senza che lo stato tensionale raggiunga l'involuppo di rottura), e le tensioni effettive decrescono rapidamente ad un punto P_L sull'involuppo della resistenza residua molto vicino all'origine degli assi.

La resistenza al taglio è così piccola che può essere comparata a quella sviluppata da un fluido viscoso. Questa è la **liquefazione**, che può essere intesa come il fenomeno che dà origine ad eventi di flusso a partire da masse solide di terreno.



Sviluppo della sollecitazione nel caso di liquefazione. 1) Curva dei valori di rottura per resistenza al taglio residua; a rottura avvenuta, il materiale può essere considerato un fluido viscoso. ΔF = Forza che determina l'accelerazione della massa in movimento. Δ_u = incremento di pressione neutra.

Il **creep**, nella meccanica dei materiali, è definito come la deformazione sotto carico costante. In un versante, lo stato tensionale non può essere realmente costante, a causa delle fluttuazioni dei livelli piezometrici. Perciò, in tema di frane, il **creep** può essere considerato come la deformazione che avviene senza apprezzabili variazioni di stato tensionale. La figura mostra lo stato tensionale in un punto di un corpo soggetto a **creep**. L'involuppo di rottura non è raggiunto, ma lenti movimenti possono essere causati da oscillazioni delle tensioni.



Sviluppo della sollecitazione nel caso di **creep**. 1) Curva dei valori di rottura per resistenza al taglio residua; la sollecitazione non raggiunge la curva dei valori di rottura.

Si tratta di movimenti gravitativi di versante coinvolgenti grandi masse rocciose, caratterizzati da scala e velocità di movimento intermedie tra quelle proprie dei fenomeni franosi s.s. e quelle dei fenomeni tettonici p.d.

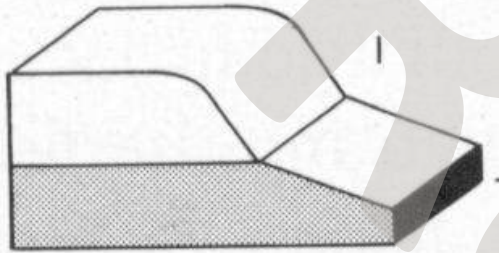
Una possibile definizione (Guida, 1992) identifica le DG PV come fenomeni deformativi a lungo termine (anche decine di migliaia di anni) che dislocano ammassi rocciosi di volumi ingenti (anche dell'ordine dei km^3) lungo discontinuità preesistenti o di neoformazione, con effetti geomorfologici visibili o movimenti rilevabili strumentalmente, nell'ambito della morfodinamica di un sistema crinale-versante-fondovalle.

Poiché si tratta di fenomeni di grandi dimensioni, la determinazione dello stato tensionale in profondità, la determinazione del comportamento meccanico degli ammassi rocciosi e l'elaborazione di un modello cinematico reale risultano estremamente complessi. Ne consegue che se è generalmente possibile definire il quadro litostrutturale e geomorfologico delle DGPV, gli aspetti geotecnici sono molto difficili da valutare.

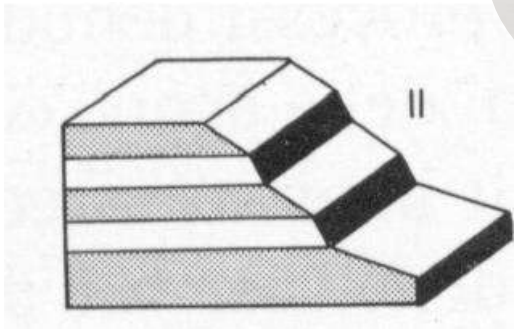
Le proprietà meccaniche della roccia e, di conseguenza, il meccanismo di deformazione, possono essere influenzate da fattori di scala (Goguel, 1978), quali: vaporizzazione di fluidi sotterranei, riduzione dell'attrito, pressioni elevate sulla superficie di rottura che possono portare alla fusione di rocce cristalline o alla dissociazione del CaCO_3 in CaO e CO_2 .

Alla luce delle attuali conoscenze, alcuni dei più imponenti movimenti in massa noti in letteratura possono essere ascritti a D.G.P.V.; tra questi, in ambito italiano, si ricordano gli eventi del Vajont (1963), di Ancona (1982), della Valpola (1987).

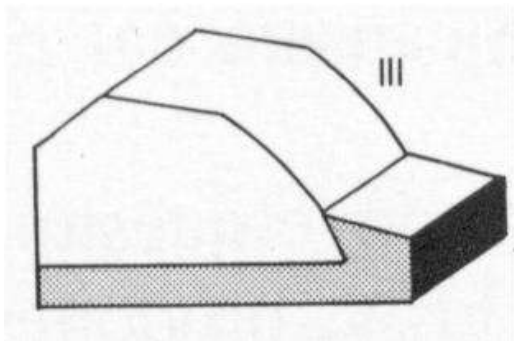
Assetti litostrutturali favorevoli per l'insorgere di D.G.P.V.



sovrapposizione di formazioni rocciose a comportamento fragile su rocce duttili



alternanza di strati, a spessore variabile, di litotipi a comportamento fragile e duttile



sovrapposizione confinata lateralmente di rocce a comportamento fragile su rocce a comportamento duttile

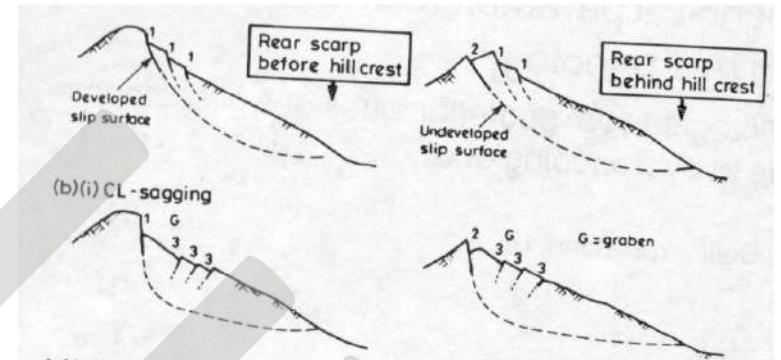
Tipi fondamentali di D.G.P.V.

Con riferimento alla classificazione di Varnes è possibile distinguere tre tipologie principali di DGPV:

- 1) Colate in roccia (Rock flow o Sacküng della letteratura straniera)
- 2) Scorrimenti di blocchi rocciosi (Rock block slide)
- 3) Espansioni laterali

Colate in roccia

Si verificano in rocce lapidee, fratturate, formanti rilievi alti ed acclivi, con deformazioni distribuite lungo fratture di varie dimensioni, senza che necessariamente si definisca un'unica superficie di taglio sviluppata per tutta l'estensione della zona deformata. Il movimento, in generale, è molto lento, con distribuzione delle velocità assimilabili a quelle dei fluidi viscosi. Queste deformazioni determinano modificazioni morfologiche, quali rigonfiamenti, avvallamenti, sdoppiamento di creste.



La Clapier (FR)



1976



1988

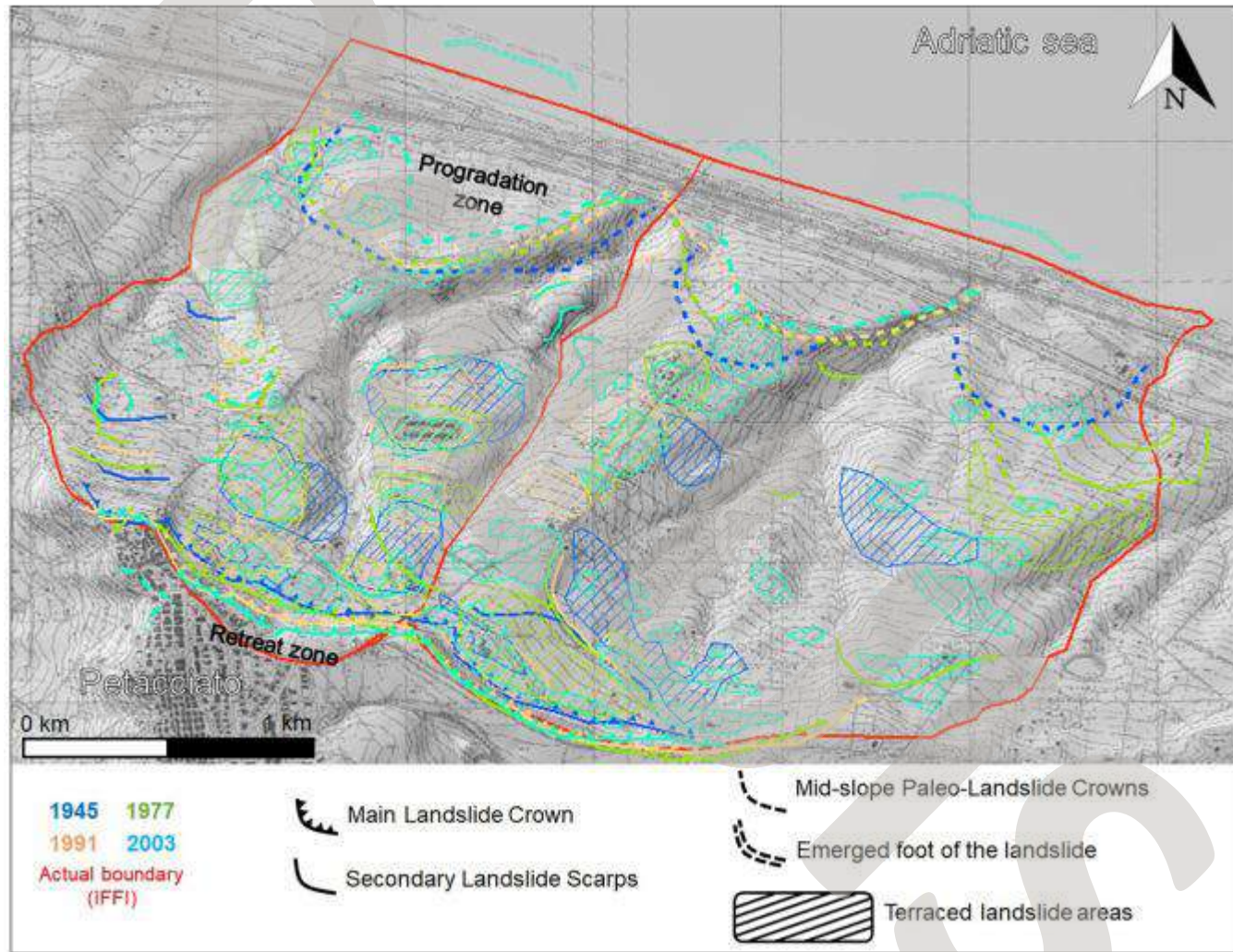


1994



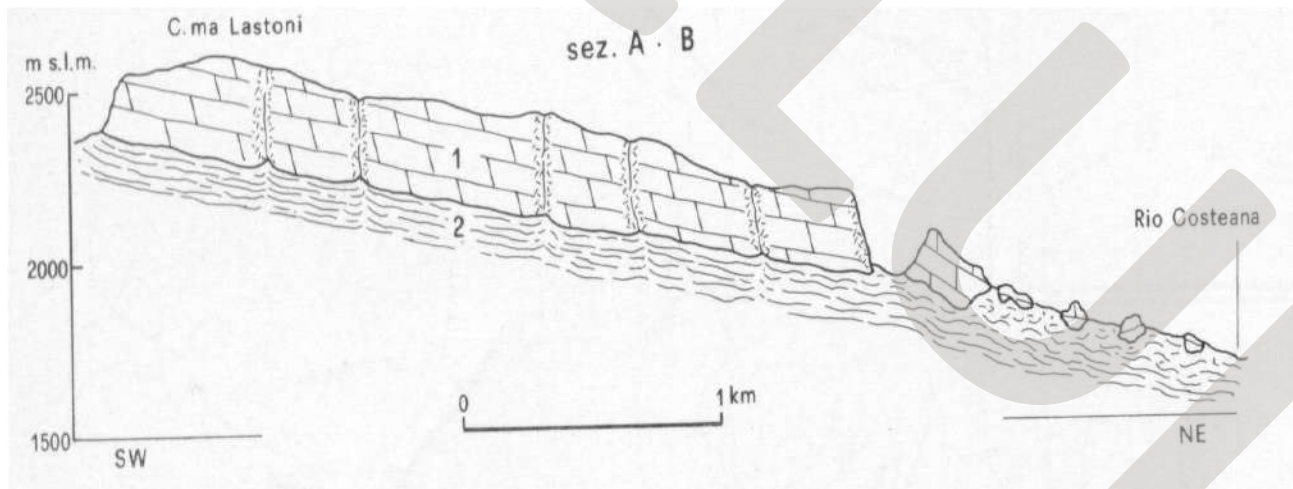
2006

Le linee guida per i ponti esistenti



Scorrimenti di blocchi rocciosi

Il movimento dell'ammasso roccioso avviene lungo una superficie ben individuata, preesistente o di neoformazione, con effetti morfologici evidenti in relazione all'entità degli spostamenti ed alle dimensioni delle masse dislocate. Il collasso avviene quando l'ammasso è cinematicamente libero e l'inclinazione delle discontinuità eccede la resistenza al taglio disponibile.

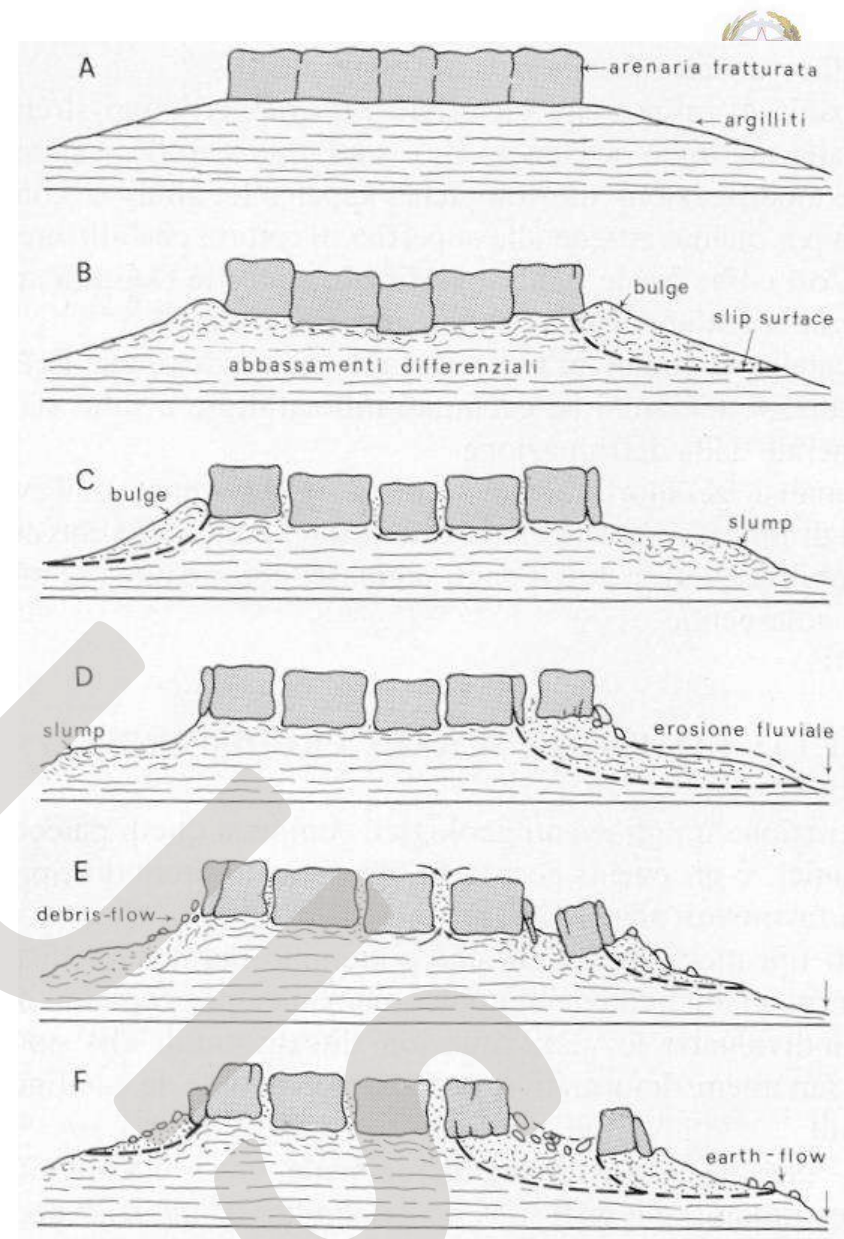


Sezione geologica schematica dei Lastoni di Formin - Conca Ampezzana (da Menotti *et alii*, 1990). Sb = scorrimento di blocchi.

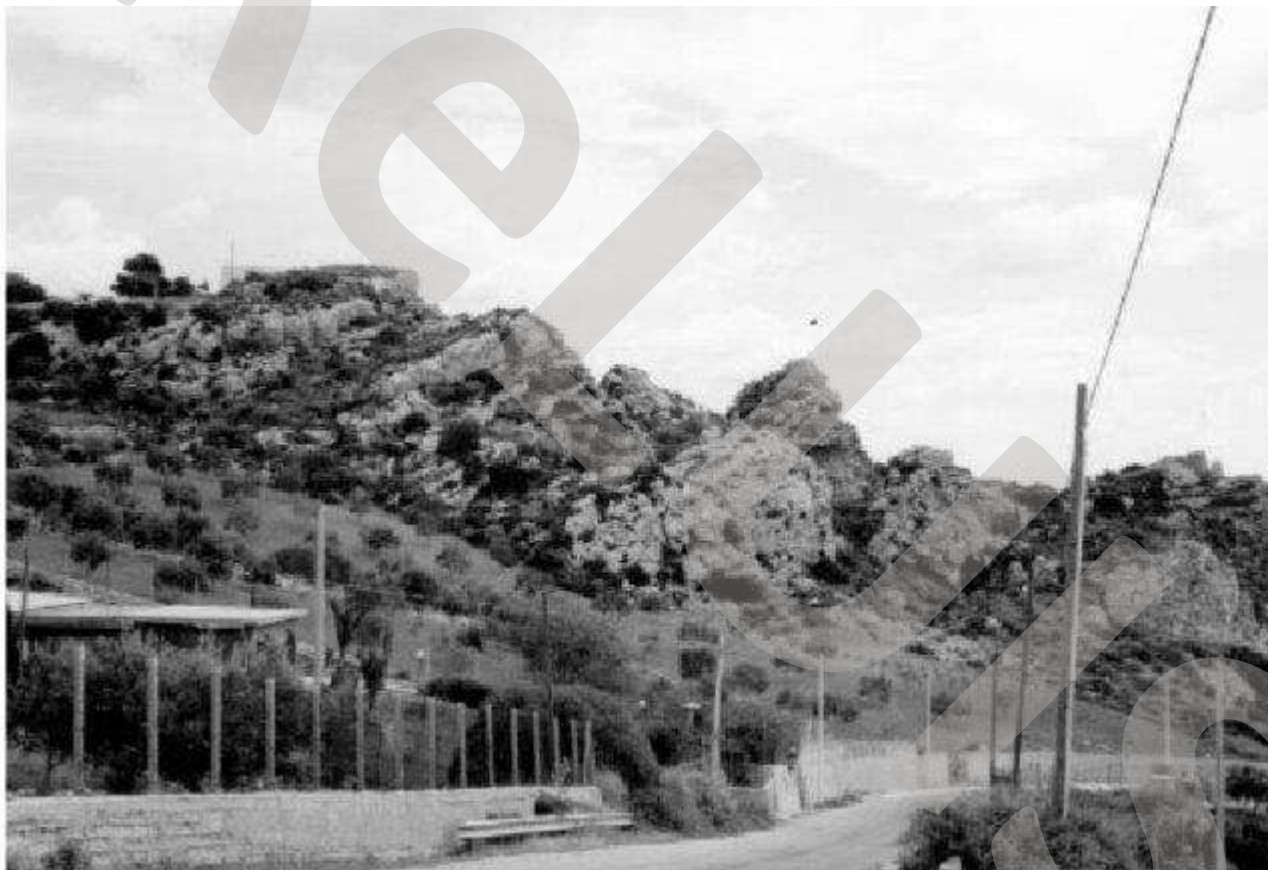
Espansioni laterali

Le espansioni laterali di ammassi rocciosi possono verificarsi senza la chiara evidenza di una superficie basale netta con sforzi di taglio o di una zona con deformazioni plastiche. I meccanismi non sono ancora ben noti, ma si tratta di un movimento in roccia che si manifesta con effetti morfologici evidenti, soprattutto lungo le creste. Nel caso di rocce lapidee sovrapposte a successioni a comportamento duttile, in genere per l'insorgere di deformazioni plastico-viscose, l'ammasso roccioso può frammentarsi, traslando con movimenti a prevalente componente orizzontale.

Schema del modello evolutivo per espansione laterale di una placca di rocce lapidee sovrastante una formazioni argillitica (da Cancelli *et alii*, 1987).



Cadula (OR)



Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

Corso di aggiornamento professionale
ReLUIS

**Problematiche Geologiche
associate all'Instabilità di
Versante**
Parte 3: Cinematismi



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Gerardo Grelle

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Area di Geologia Applicata

Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale

Email: gerardo.grelle@uniroma1.it

3. Analisi geo-cinematica

3.1 Caratterizzazione spazio temporale degli eventi (le **3F**)

3.1.1 Falls

3.1.2 Failures (sliding)

3.1.3 Flows

3.2 Caratterizzazione all'innescò

3.2.1 Fattori predisponenti

3.2.2 Fattori scatenanti

Falls – Caduta : ammette almeno una parte del percorso in condizioni aeree

Le frane di tipo "fall" (caduta) e le "rock avalanches" (valanghe di rocce) possono essere suddivise nelle seguenti tipi principali:

Rock Fall



Rock Avalanche



- **Rottura:** La fase iniziale in cui il materiale si stacca dalla massa rocciosa madre.
- **Corsa (Running):** La fase di movimento del materiale lungo il pendio in condizioni aeree o in rotolamento.
- **Deposizione:** La fase finale in cui il materiale si accumula alla base del pendio.

Falls – Distacco

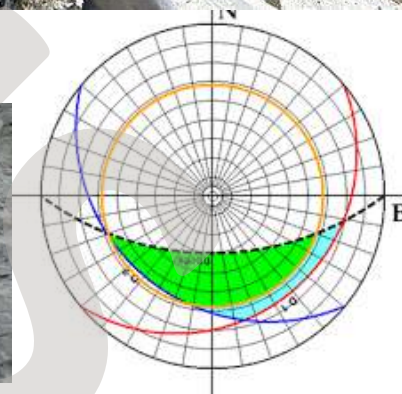
La fase di rottura avviene quando una porzione di roccia o terreno perde il suo equilibrio e si distacca dalla massa principale.

Questo può essere causato da vari fattori come:

- Fratturazione e intemperie della roccia.
- Erosione alla base del pendio.
- Attività sismica.
- Scongelo del permafrost.
- Aumento della pressione dell'acqua nei pori.

Falls – Distacco

Analisi della fratturazione in masse cinematicamente esposte .



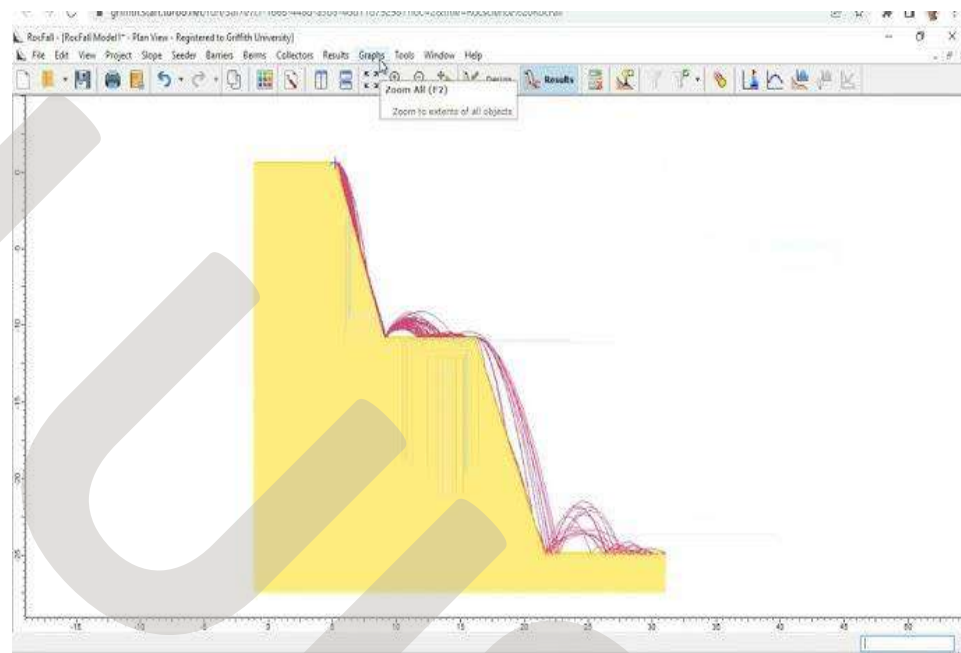
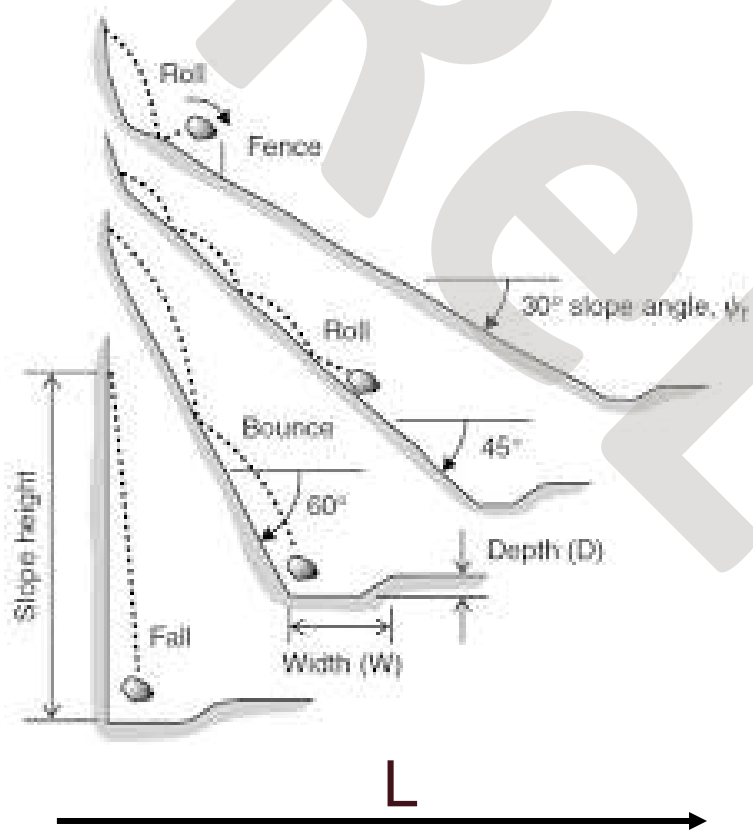
Falls – Caduta

Durante la fase di caduta, il materiale franato accelera e si sposta lungo il pendio.

Le caratteristiche del movimento possono variare notevolmente:

- Falls (Cadute): Il materiale cade verticalmente o quasi verticalmente, spesso rimbalzando o rotolando mentre scende.
- Rock Avalanches (Valanghe di Rocce): Il materiale roccioso si muove rapidamente lungo il pendio, spesso frammentandosi ulteriormente e comportandosi in modo simile a un flusso.

Falls – Deposizione



Falls – Deposizione

Nella fase di deposizione, il materiale si accumula alla base del pendio o in una valle. Le caratteristiche del deposito possono includere:

- **Distribuzione:** Il materiale può essere distribuito su una vasta area, a seconda dell'energia del movimento e della topografia del terreno.
- **Spessore del Deposito:** Il deposito può variare in spessore, con i blocchi più grandi e particelle più grandi spesso trovate lontano dalla base del pendio e i più piccoli distribuiti più vicino.

Analisi delle stima a seguire ->

Falls – Deposizione

Rock avalanche



Rock fall



shutterstock.com · 1393867277

Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

Failure – Rottura/scivolamento : ammette una rottura per sforzi di taglio con scorrimento reciproco delle due parti.

Le frane da scorrimento sono un tipo comune di movimento di massa che coinvolge il movimento di materiale lungo una superficie di scorrimento ben definita.

Queste frane possono essere suddivise nelle seguenti fasi principali:

- **Rottura**
- **Scorrimento**
- **Deposizione**

Failure (scorrimento) – Rottura

La fase di rottura avviene quando lo stress esterno induce il materiale a raggiungere le condizioni limite di resistenza a taglio lungo una superficie che diventerà di scorrimento.

Questo può essere causato da vari fattori come:

- Aumento della pressione dell'acqua nei pori dei terreni o delle rocce.
- Carico aggiuntivo sulla parte superiore del pendio, come costruzioni o accumulo di neve.
- Erosione alla base del pendio, che rimuove il supporto e destabilizza il materiale sovrastante.
- Attività sismica che provoca vibrazioni e fratturazione del materiale.
- Variazioni stagionali di temperatura e umidità, che possono causare il rigonfiamento e la contrazione del materiale.

Failure (scorrimento) – fase di scorrimento

Durante la fase di trasporto, il materiale franato scorre lungo superfici le cui geometria dipende dalle:

- Condizioni genetiche della formazione geologica interessata.
- Condizioni di fratturazione e debolezza
- Dal tipo di materiale
- Dalla tipologia di forze agenti.

Failure (scorrimento) – Tipi di scorrimento

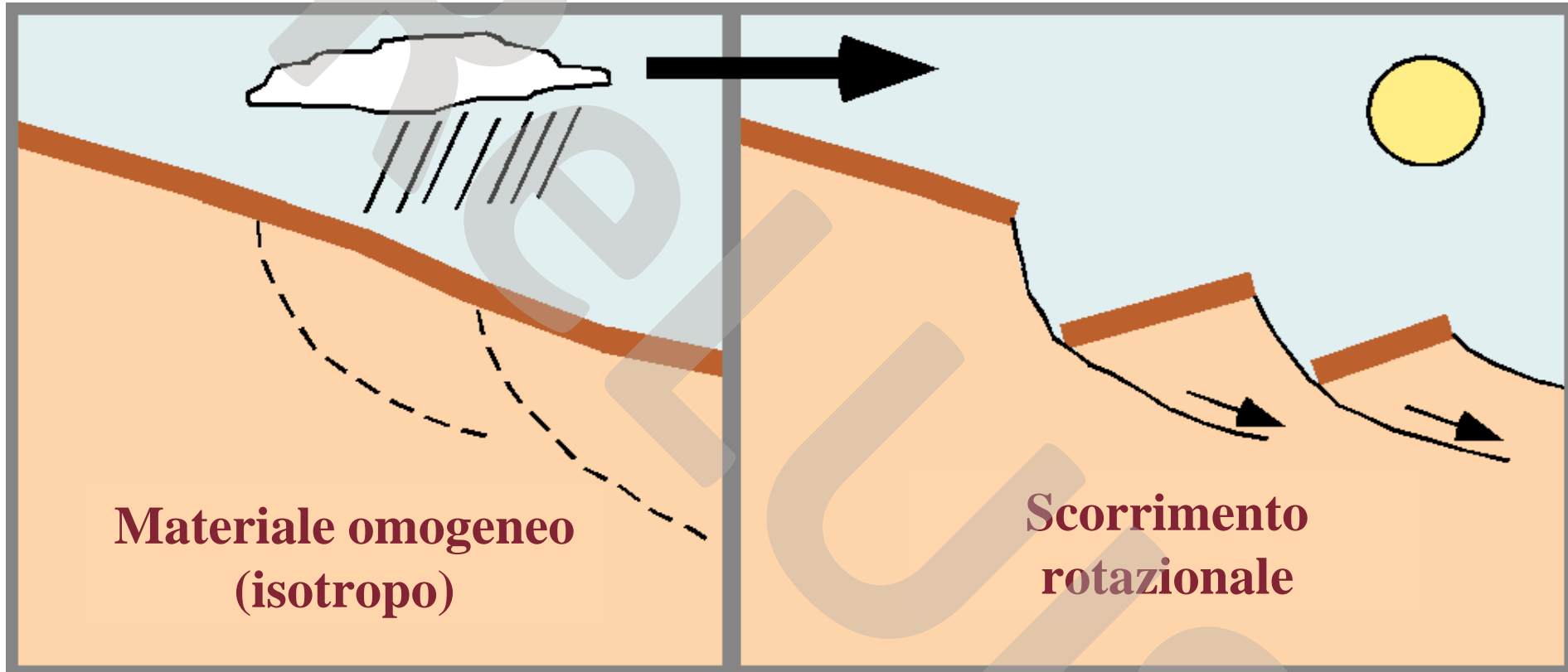
Le caratteristiche di questo movimento possono variare notevolmente in base al tipo di frana da scorrimento:

Scorrimenti Rotazionali: Il materiale si muove lungo una superficie di scorrimento curva, con una rotazione verso l'interno. Questo tipo di frana è comune nei terreni argillosi e coesivi.

Scorrimenti Traslativi: Il materiale si muove lungo una superficie di scorrimento piana o leggermente inclinata. Questo tipo di frana è comune nei terreni stratificati, dove strati di roccia o terreno più deboli possono fungere da piani di scorrimento.

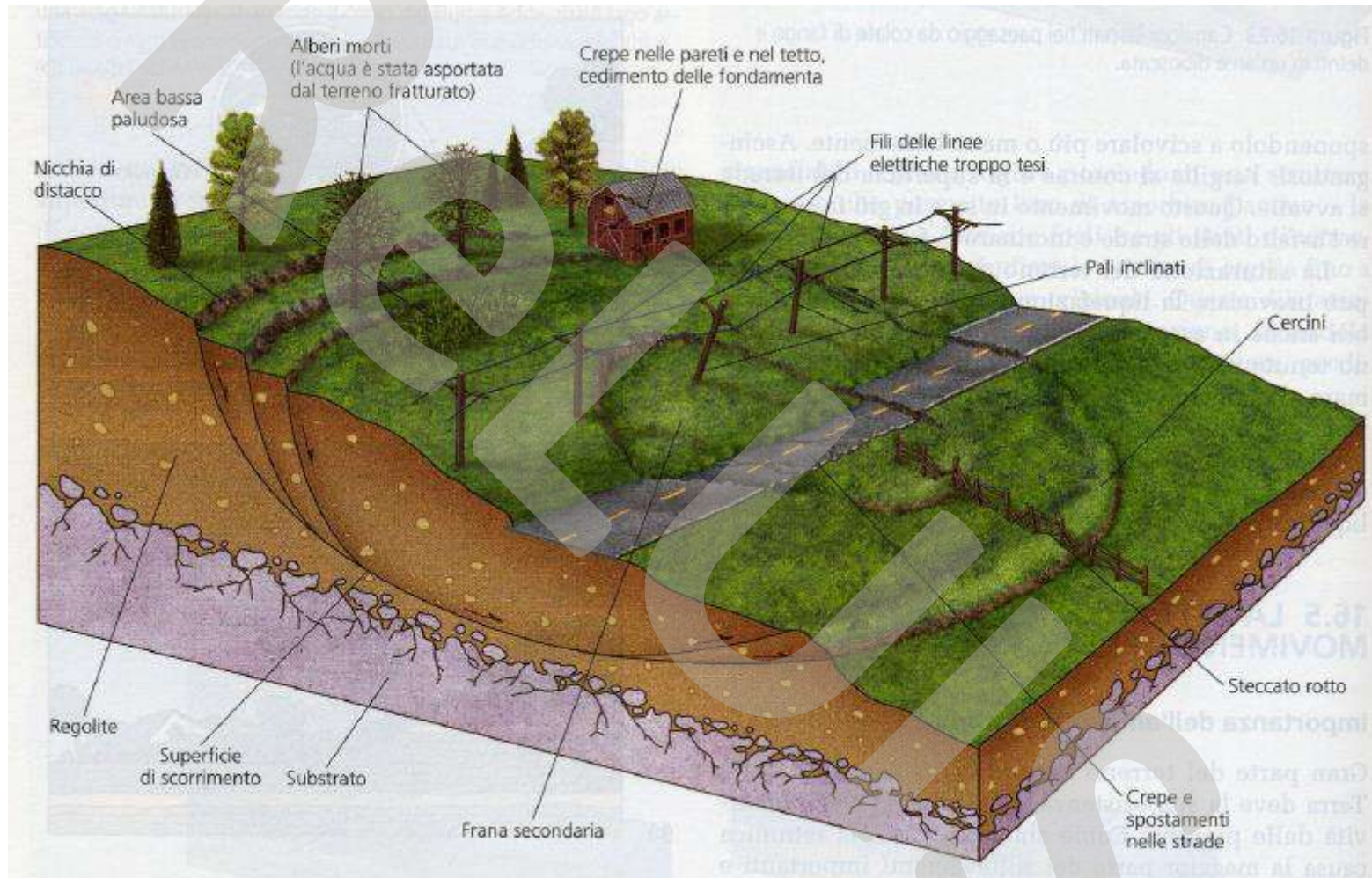
Scorrimenti Roto-Traslativi: Il materiale si muove nella parte iniziale come rotazionale e si estende a valle come traslativa. Solitamente la pendenza di questo ultimo tratto di superficie è un piano di strato o quando non lo è risulta di pochi gradi.

In che modo un materiale condiziona il tipo di frana?

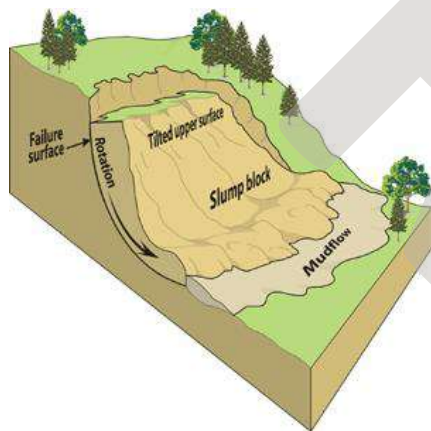


Un materiale omogeneo favorirà l'insorgere di uno scorrimento rotazionale

Elementi riconoscitivi di un movimento rotazionale o rototraslativo

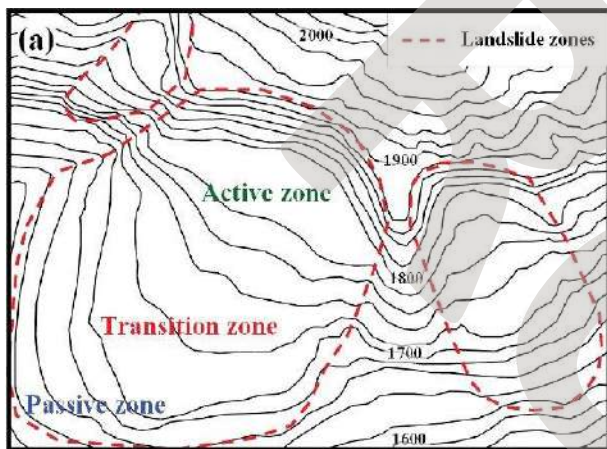


Scorrimenti rotazionali

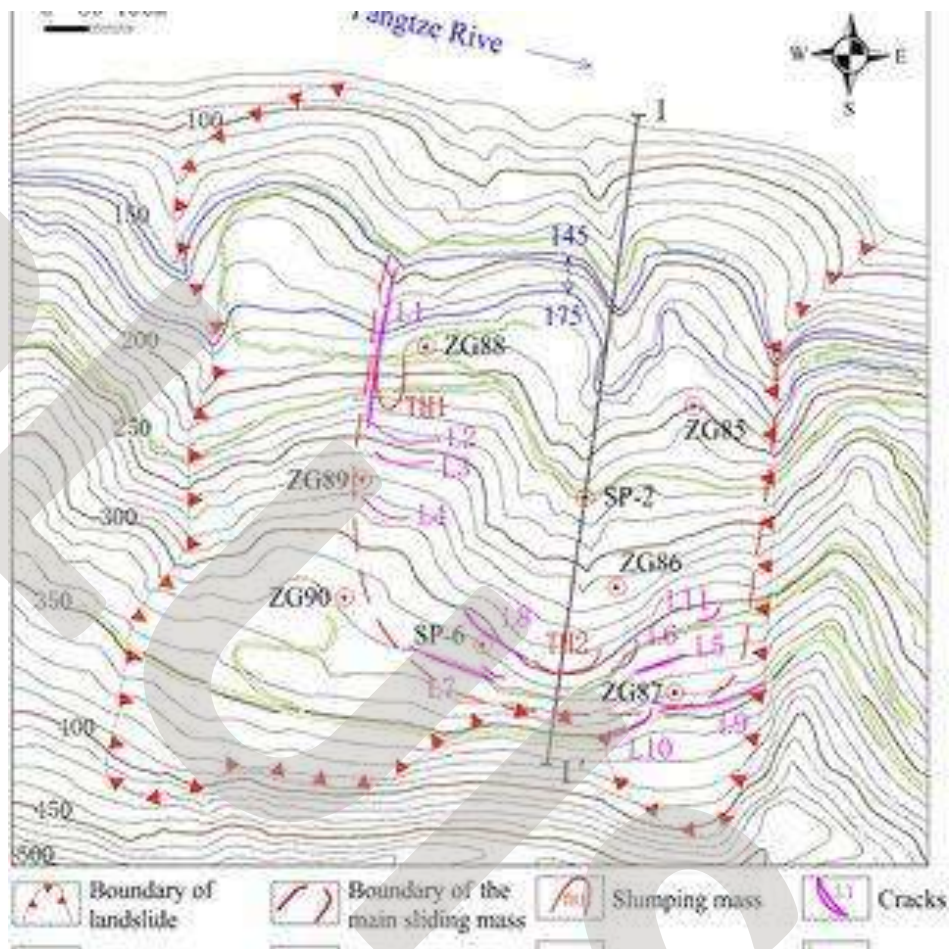
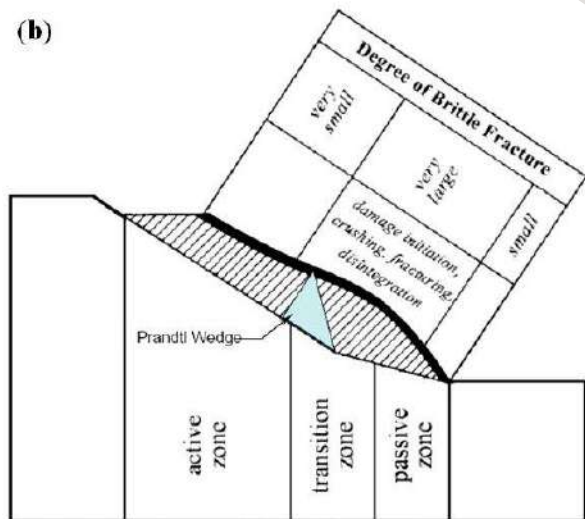


Un materiale omogeneo favorirà l'insorgere di uno scorrimento rotazionale

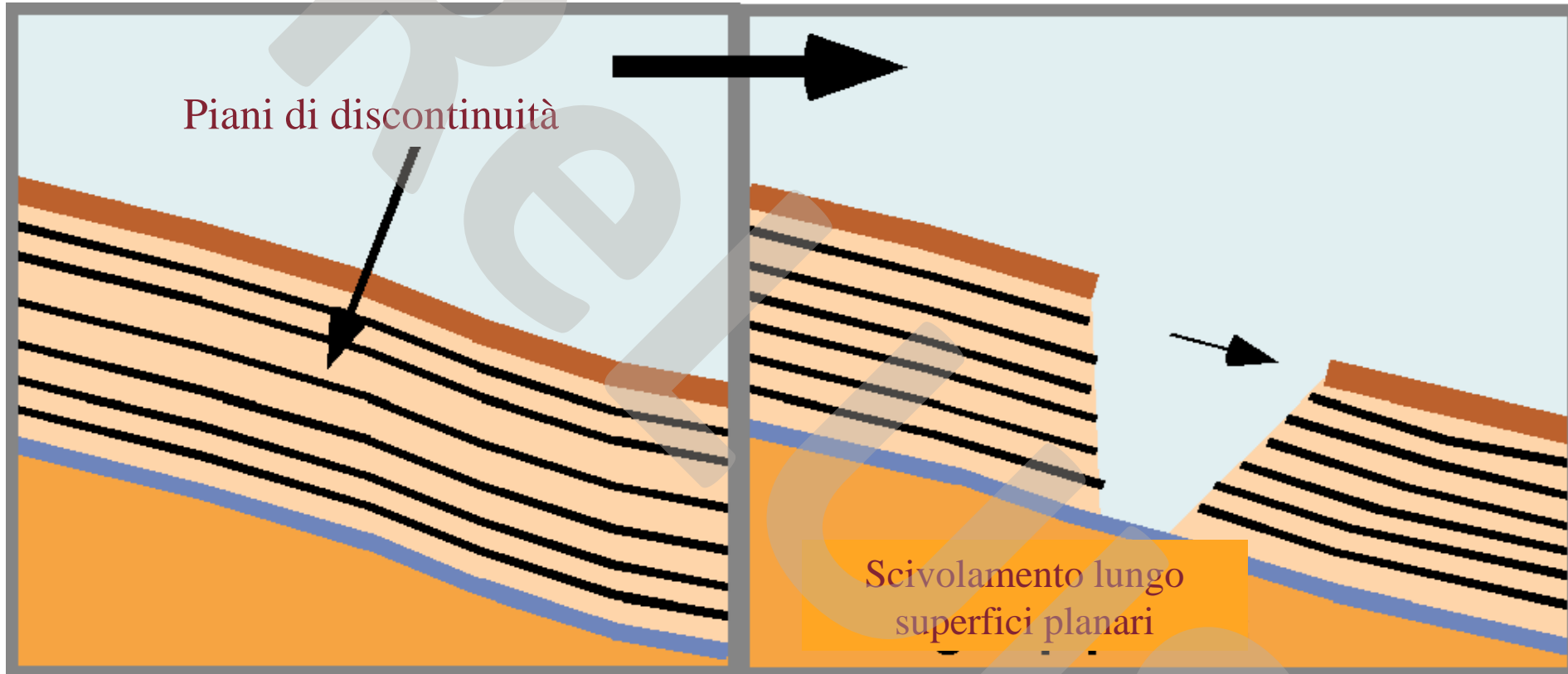
Scorrimenti rotazionali



(b)

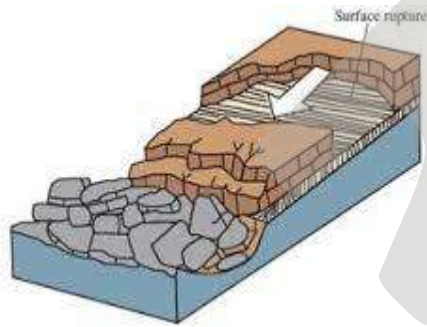


In che modo un materiale condiziona il tipo di frana?

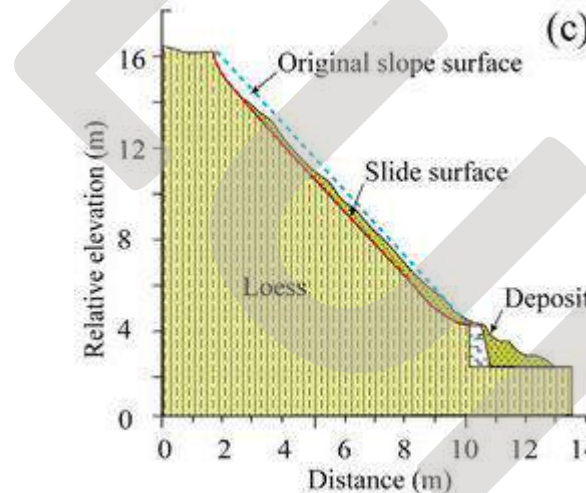
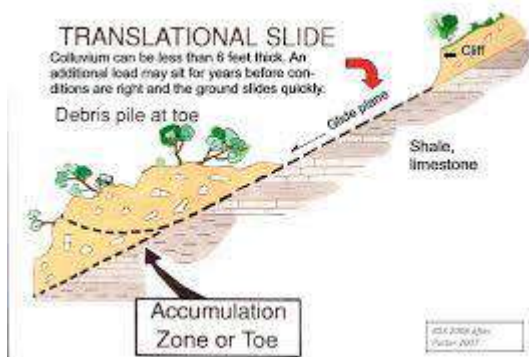
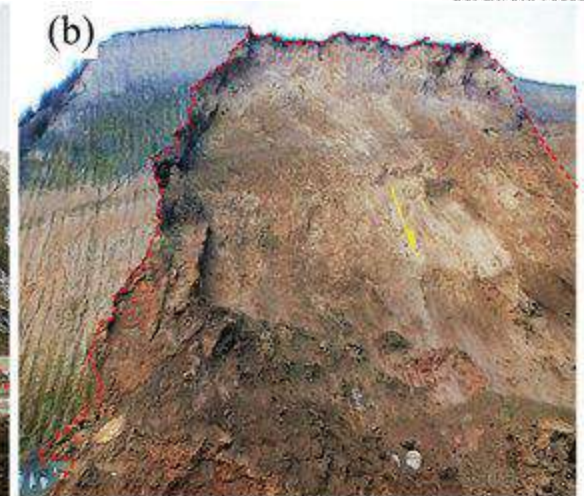
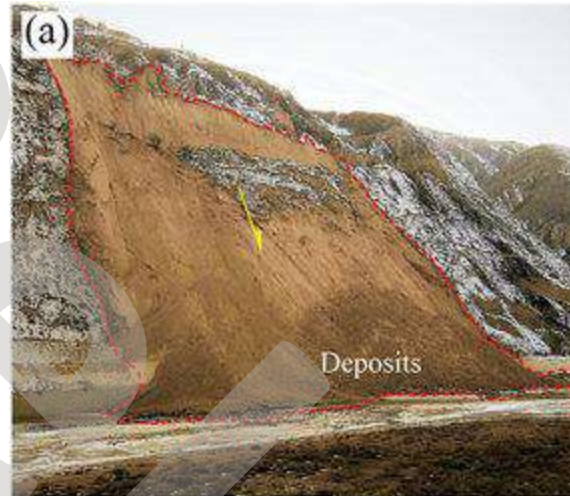


Un materiale con piani di discontinuità favorirà l'insorgere di uno scorrimento traslativo

Scorrimenti Traslativi



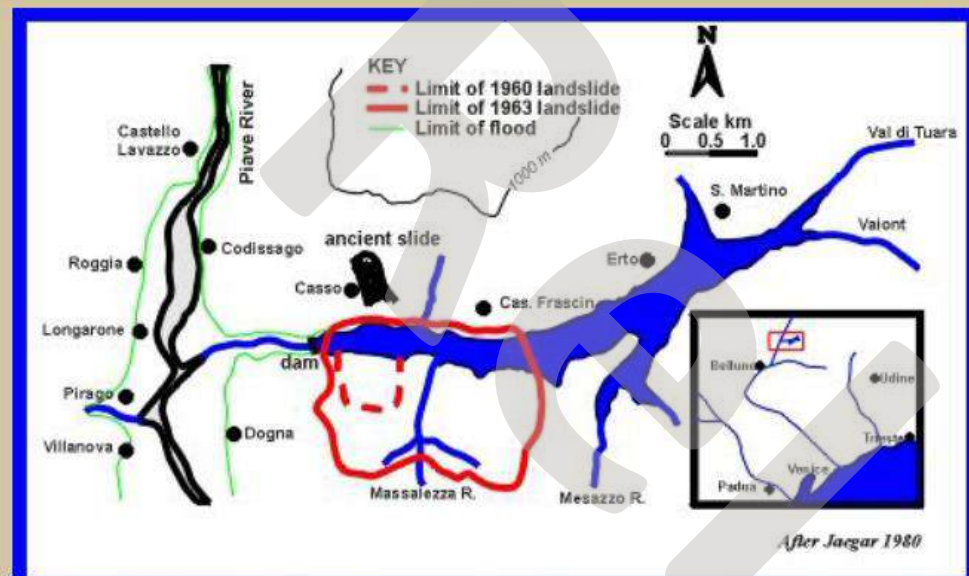
USGS



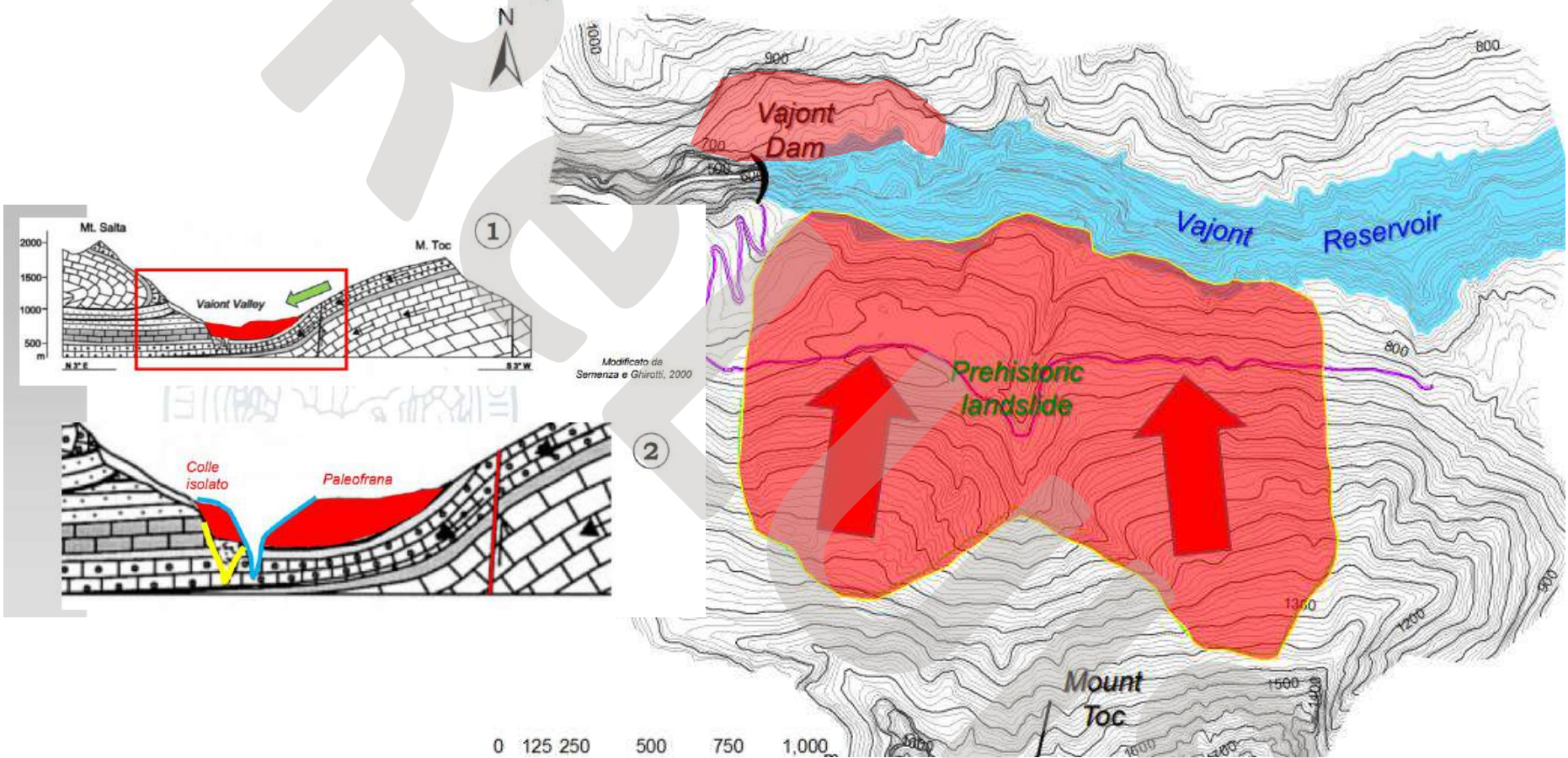
Giunti di strato favoriranno l'insorgere di uno scorrimento traslativo

Scorrimenti Traslativi

Frana del Vajont

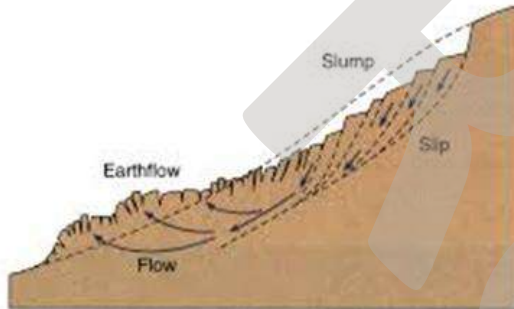


La paleofrana del monte Toc

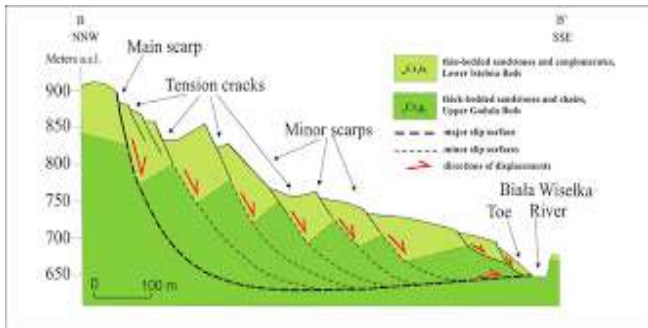


Giunti di strato favoriranno l'insorgere di uno scorrimento traslativo

Scorrimenti Roto-Traslativi



Cross section of a complex landslide characterized by slumping at the top and earthflow at the base.



Scorrimenti Roto-Traslativi con evoluzione in colata -----> earthflow (colate viscosse)

Frana di Maierato (VV)



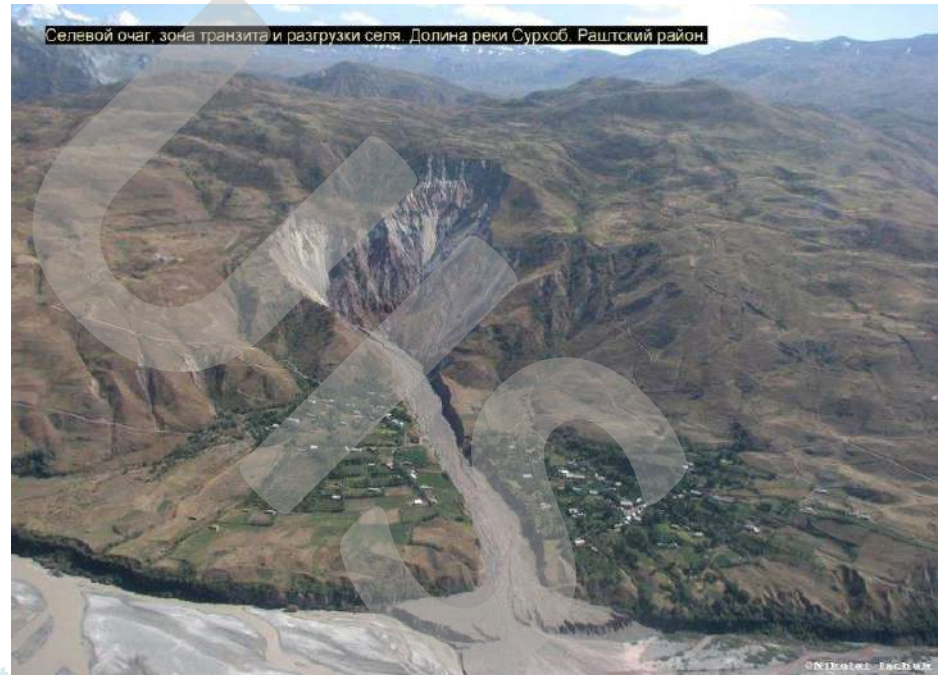
reluis Flow: Flussi

4 tipi principali :

- **Mud (Fango),**
- Debris (Detrito)
- Rock (Roccia) (rock avalanches)
- Earthflow



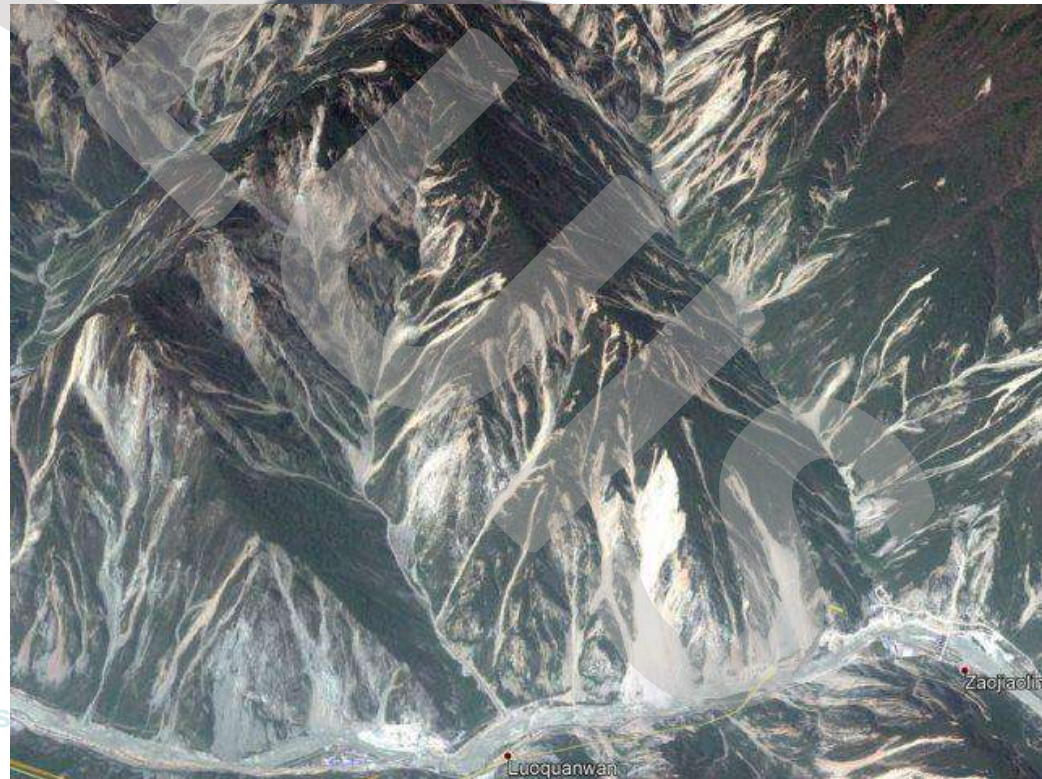
An earthquake on January 12, 2001 in El Salvador triggered the landslide that buried Colonia Las Colinas. Photo courtesy of U.S. Geological Survey



reluis Flow: Flussi

4 tipi principali :

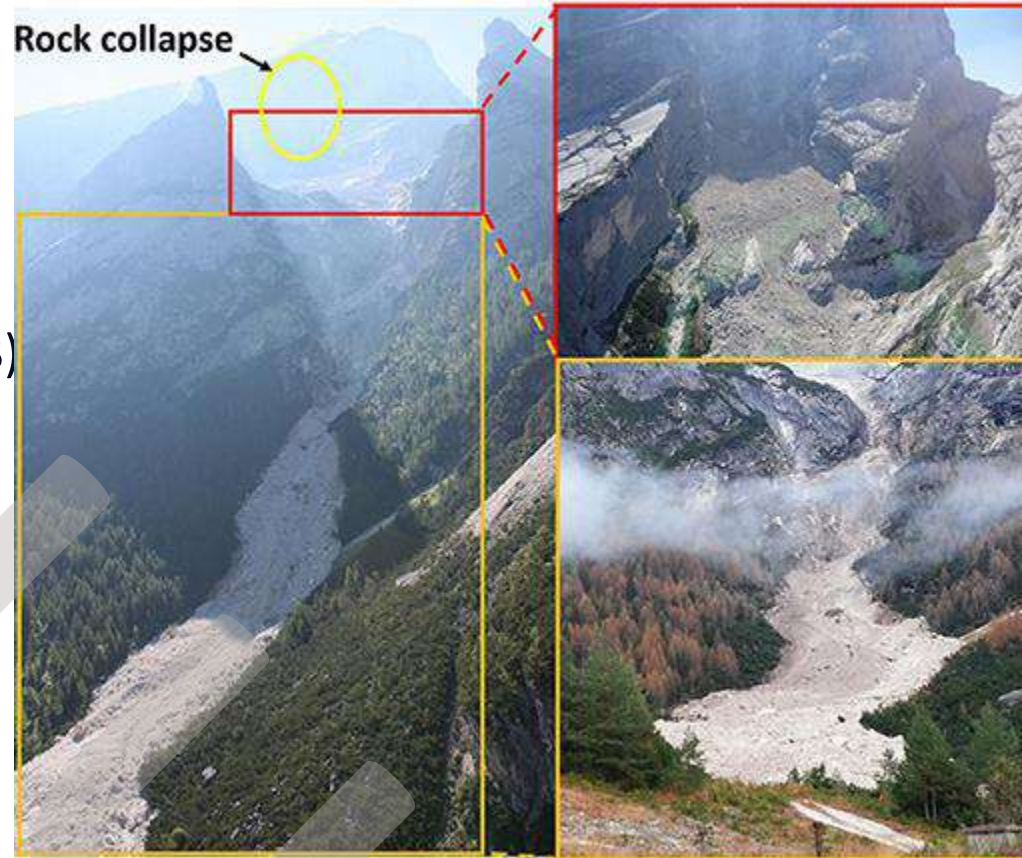
- Mud (Fango),
- **Debris (Detrito)**
- Rock (Roccia) (rock avalanches)
- Earthflow



reluis Flow: Flussi

4 tipi principali :

- Mud (Fango),
- Debris (Detrito)
- **Rock (Roccia) (rock avalanches)**
- Earthflow



Flow: Flussi

4 tipi principali :

- Mud (Fango) (colate rapide),
- Debris (Detrito) (colate rapide)
- Rock (Roccia) (rock avalanches)
- **Earthflow (colate lente)**



- **Earthflow (Frana di Montaguto)**



• **Earthflow (Frana di Montaguto)**

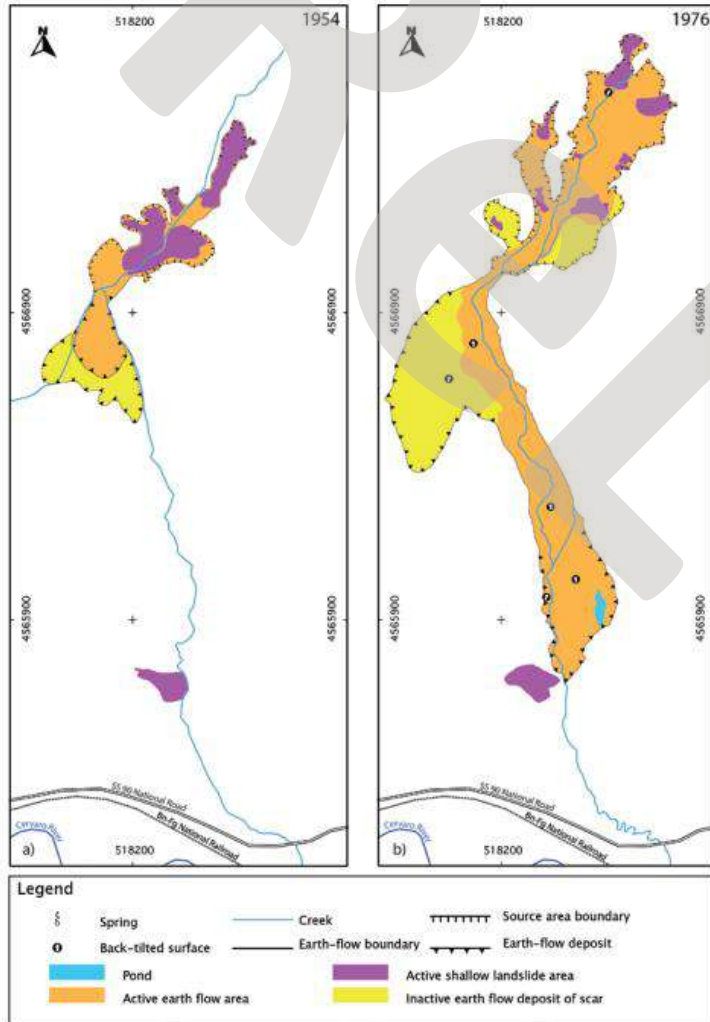


Fig. 4 - Maps of the Montaguto earth flow in 1954 (a) and 1976 (b)

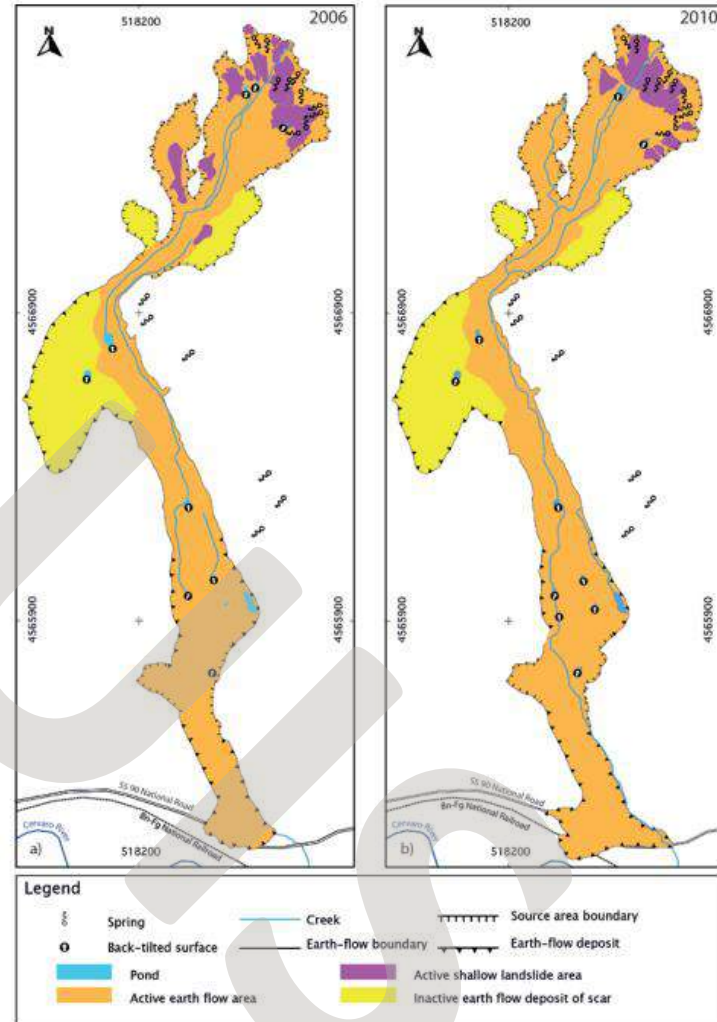
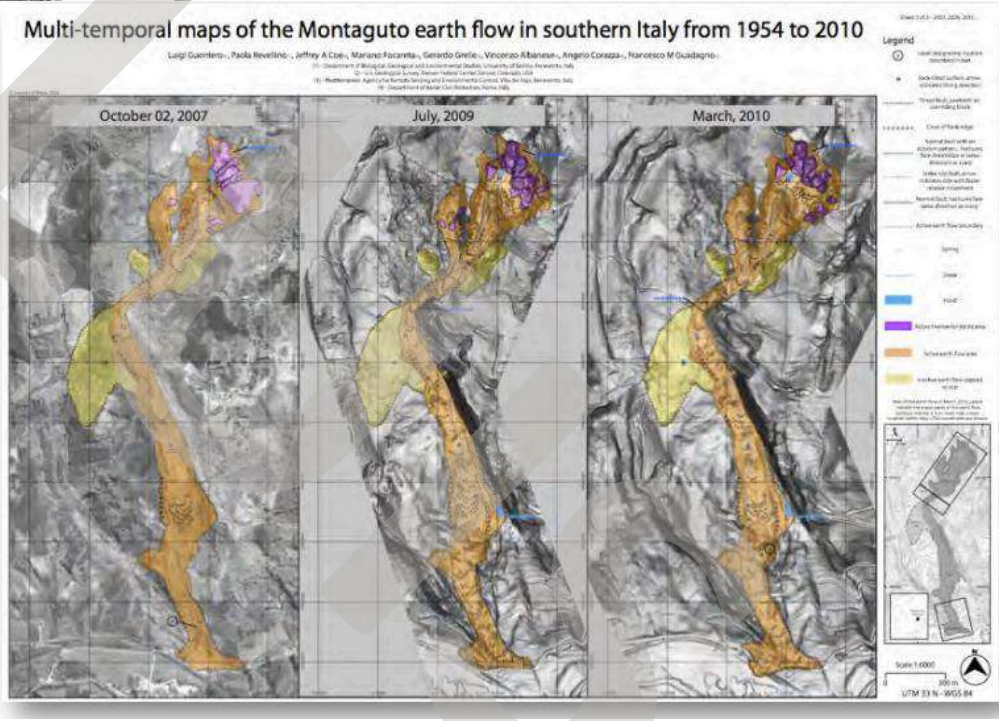
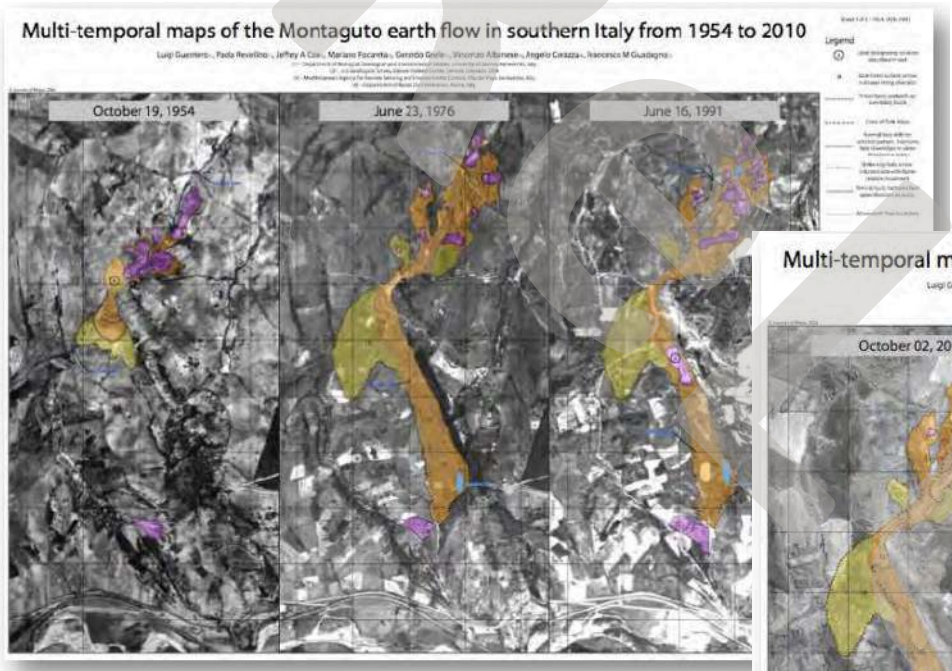


Fig. 5 - Maps of the Montaguto earth flow in 2006 (a) and 2010 (b)

- **Earthflow (Frana di Montaguto)**

- **Fotoaere**
- **DEM (lidar)**



3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

La stima delle aree di invasione di **secondo livello** derivano da correlazioni empiriche basate su osservazioni ad ampia scala spesso generalizzate per tipologie di eventi.

Crolli e Rock Avalanche

1.Heim (1932):

Correlazione empirica per la determinazione della distanza di crolli e rock avalanches, nota come "Heim's ratio" o "Fahrböschung".

Relazione: $H/L = \tan(\theta)$

H è la differenza di quota tra il punto di partenza e il punto di arresto del materiale, **L** è la distanza orizzontale tra questi punti e θ è l'angolo di frenatura.

2.Scheidegger (1973):

Relazione empirica per la stima della distanza percorsa da una frana.

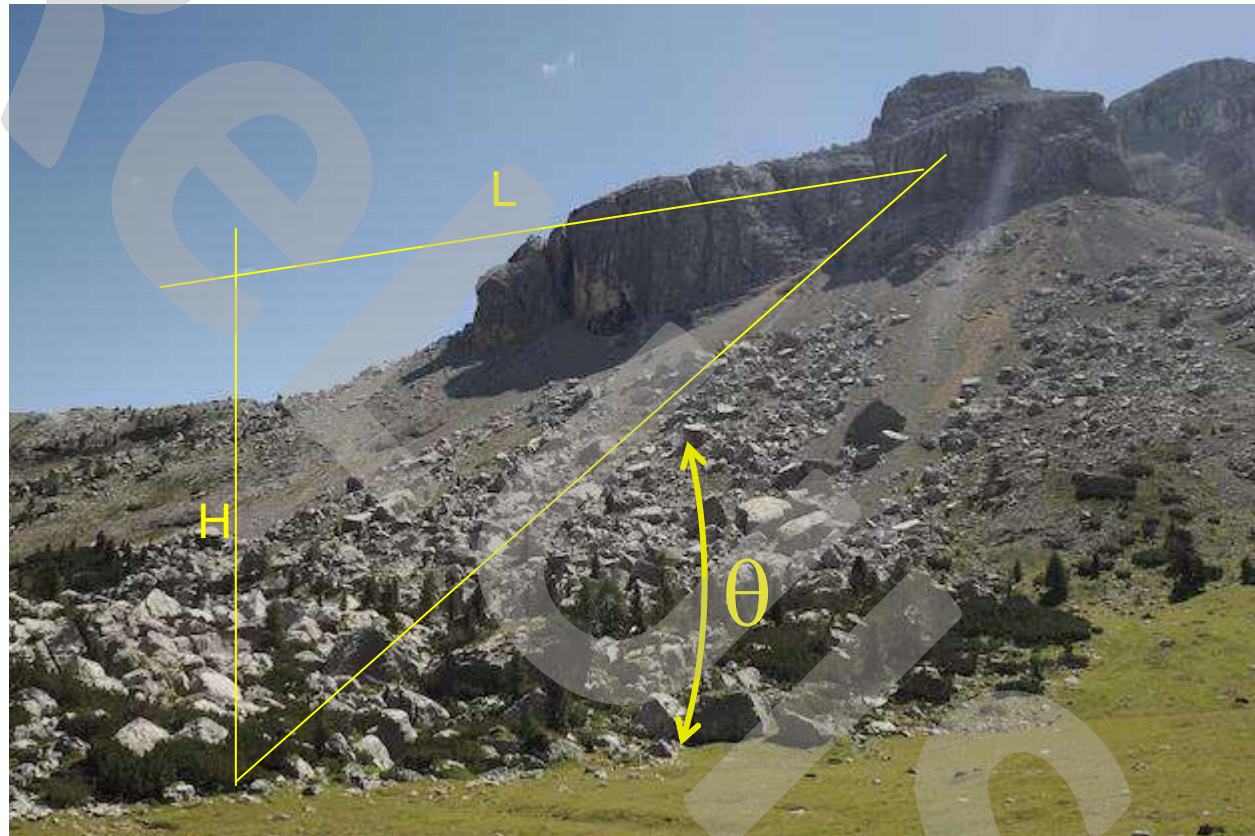
Relazione: $\log(L) = a + b \log(H)$

Dove **L** è la distanza orizzontale, **H** è l'altezza verticale, e **a** e **b** sono costanti empiriche.

3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

La stima delle aree di invasione di primo livello deriva dall'osservazione locale di altri eventi simili o similari tenuto conto delle condizioni geologiche e morfometriche dell'area .



3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche
Parametri chiave.

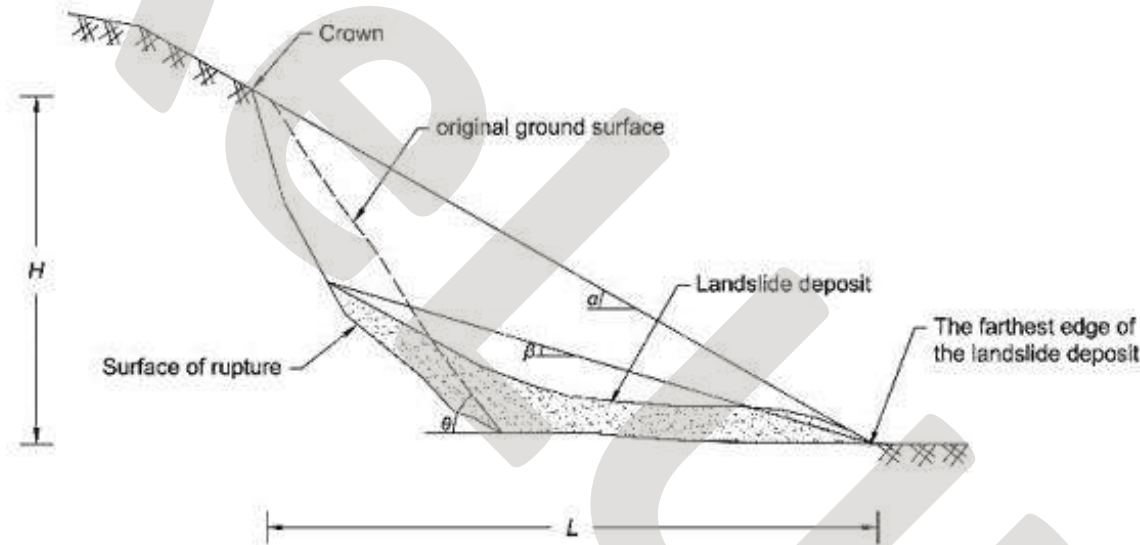


Figure 1. Geometrical variables: height of slope (H), run out distance (L), reach angle (α), shadow angle (β), slope angle (θ) (Hungar, et al., 2005).

3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

La stima delle aree di invasione di **secondo livello** derivano da correlazioni empiriche basate su osservazioni ad ampia scala spesso generalizzate per tipologie di eventi.

La legge di propagazione di Hungr et al. (2005) è un modello empirico utilizzato per stimare la distanza di propagazione delle frane. Il modello è stato sviluppato basandosi su una vasta raccolta di dati osservativi relativi a eventi di frane. Questa legge considera la relazione tra il volume del materiale franato e la distanza di propagazione, nonché l'altezza di caduta.

$$L = a \cdot V^b \cdot H^c$$

dove:

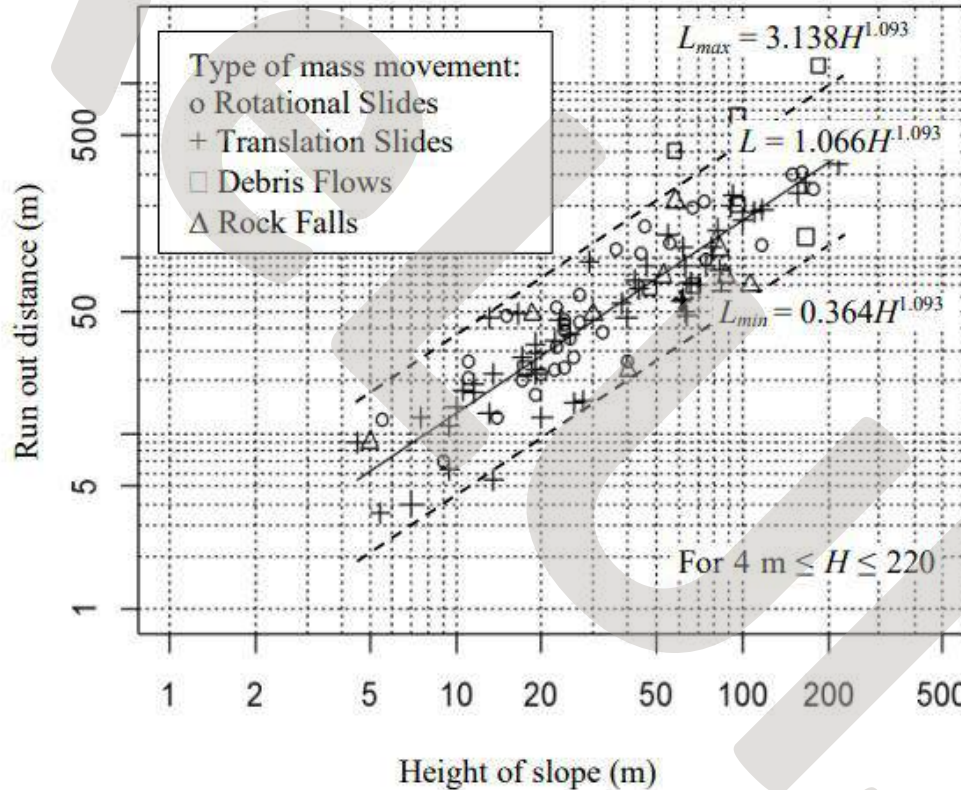
- **L** è la distanza di propagazione (in metri).
- **V** è il volume della frana (in metri cubi).
- **H** è l'altezza di caduta (in metri).
- **a**, **b** e **c** sono parametri empirici che vengono determinati attraverso la calibrazione su dati osservativi.

I valori tipici dei parametri **a**, **b** e **c** variano a seconda del tipo di frana e delle condizioni specifiche del sito, ma generalmente sono determinati attraverso analisi statistica dei dati di eventi passati.

3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

Su tutte le 3F (Falls, Failures, Flows)

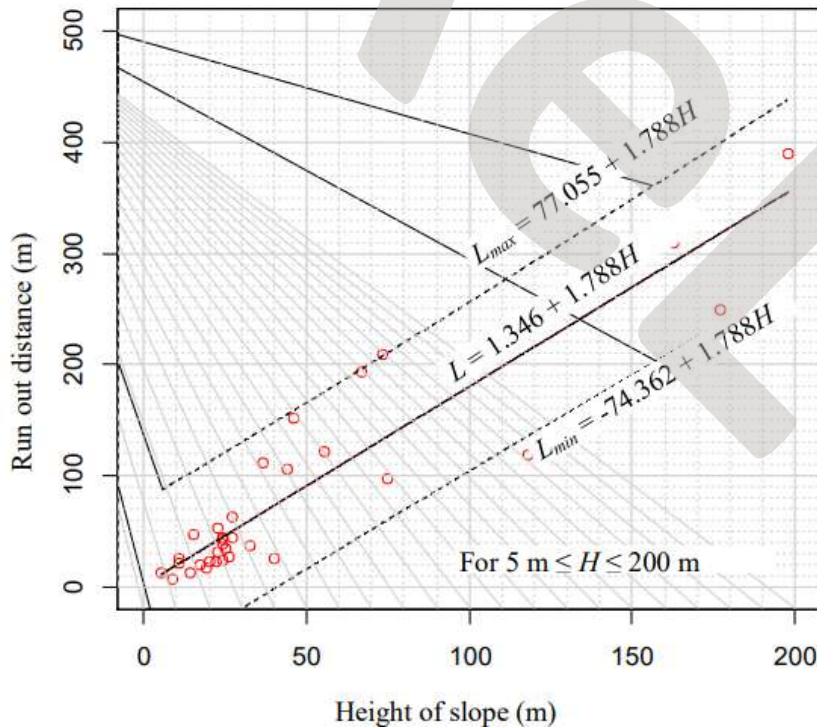


https://www.researchgate.net/publication/318366111_LANDSLIDE_RUNOUT_DISTANCE_PREDICTION_BASED_ON_MECHANISM_AND_CAUSE_OF_SOIL_OR_ROCK_MASS_MOVEMENT

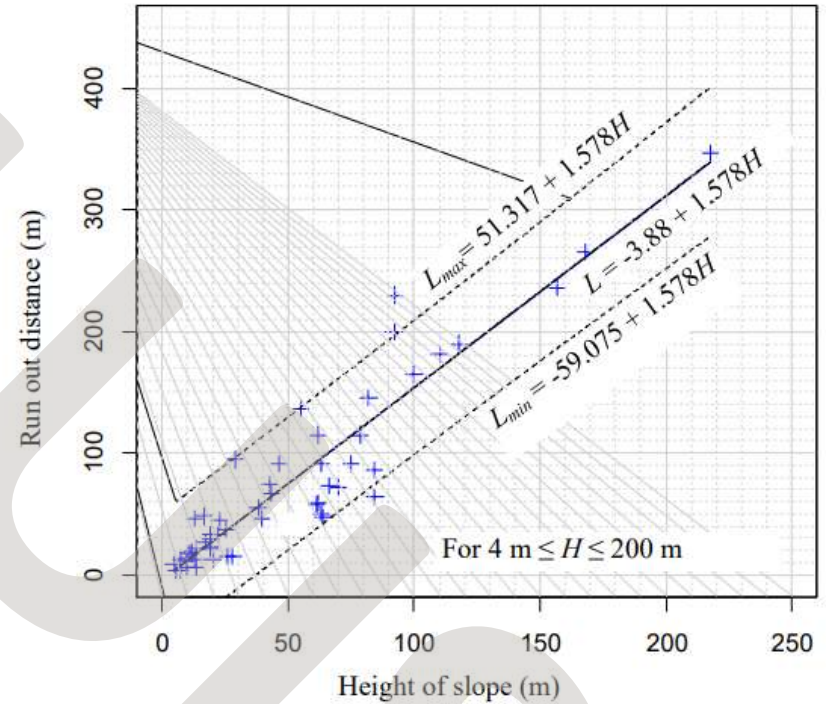
3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche Particolareggiato

Crolli e Rock Avalanche Rotazionali/Rototraslative



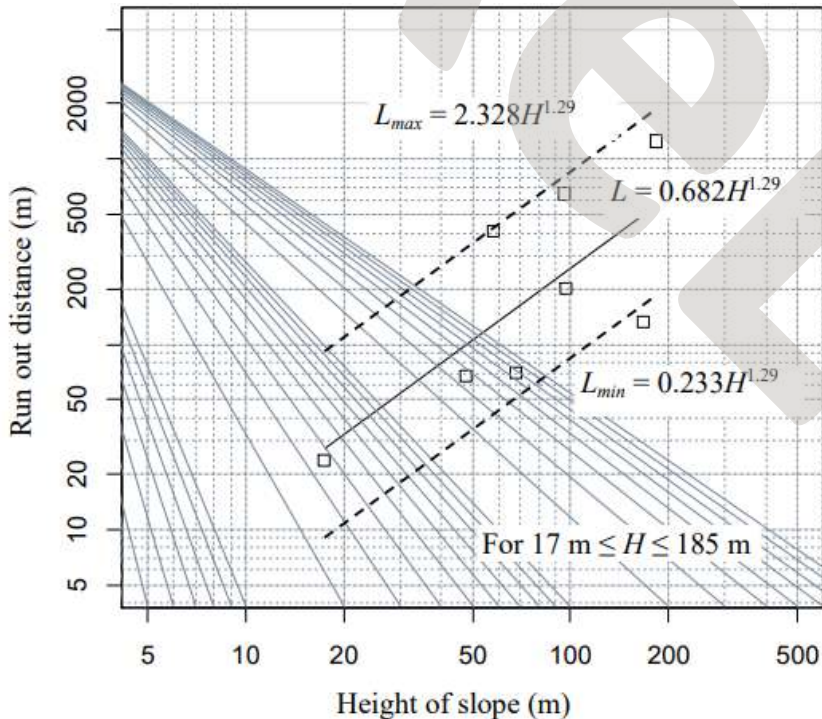
Crolli e Rock Avalanche Traslative



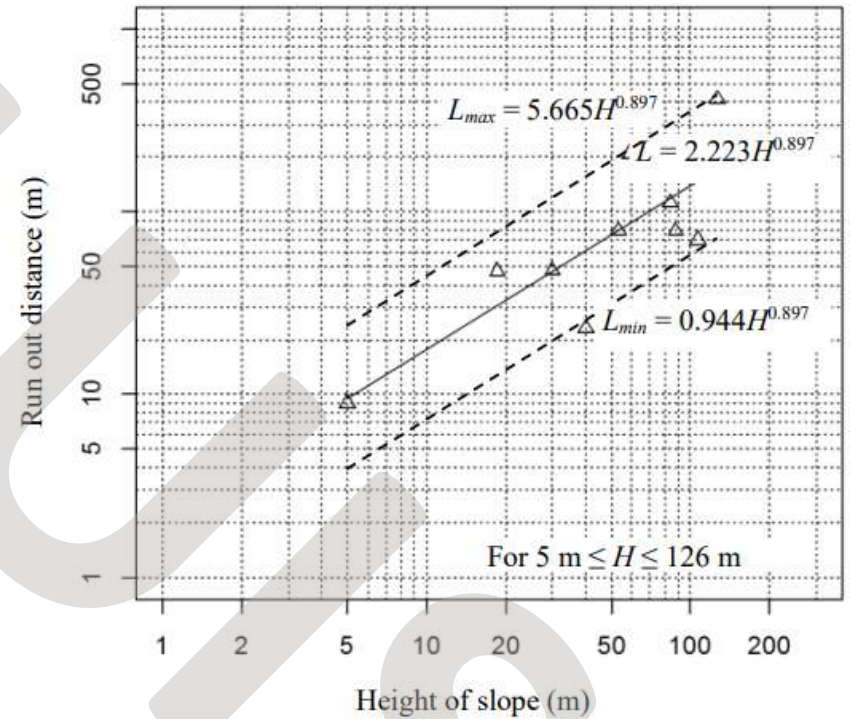
3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche Particolareggiato

Crolli e Rock Avalanche Debris flows



Crolli e Rock Avalanche Rock falls

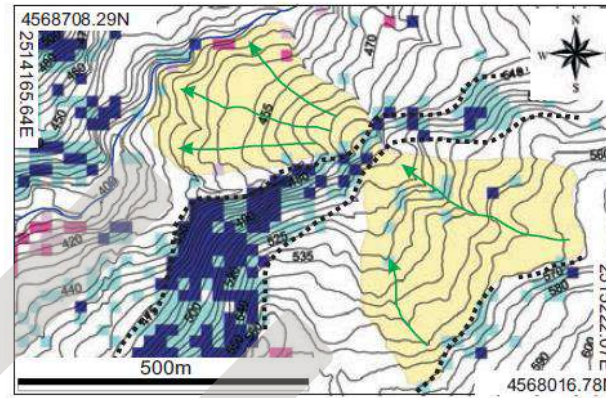


https://www.researchgate.net/publication/318366111_LANDSLIDE_RUNOUT_DISTANCE_PREDICTION_BASED_ON_MECHANISM_AND_CAUSE_OF_SOIL_OR_ROCK_MASS_MOVEMENT

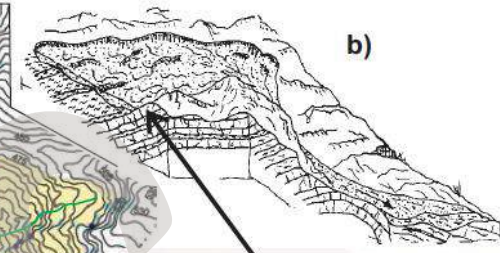
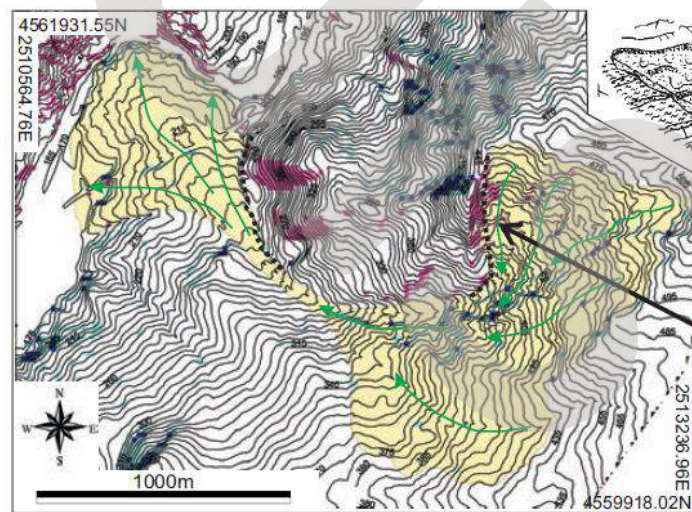
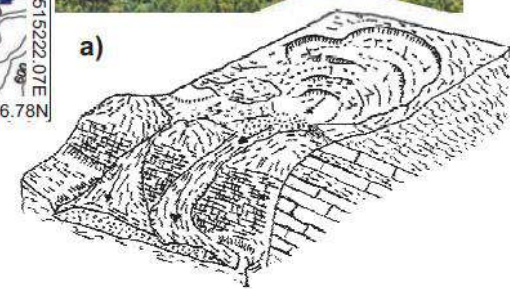
Earthflow: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

La stima delle aree di invasione di primo livello deriva dall'osservazione locale di altri eventi simili o similari tenuto conto dell'assetto geologico e morfometrico dell'area - « condizioni di controllo lito-strutturale » .



a)



b)

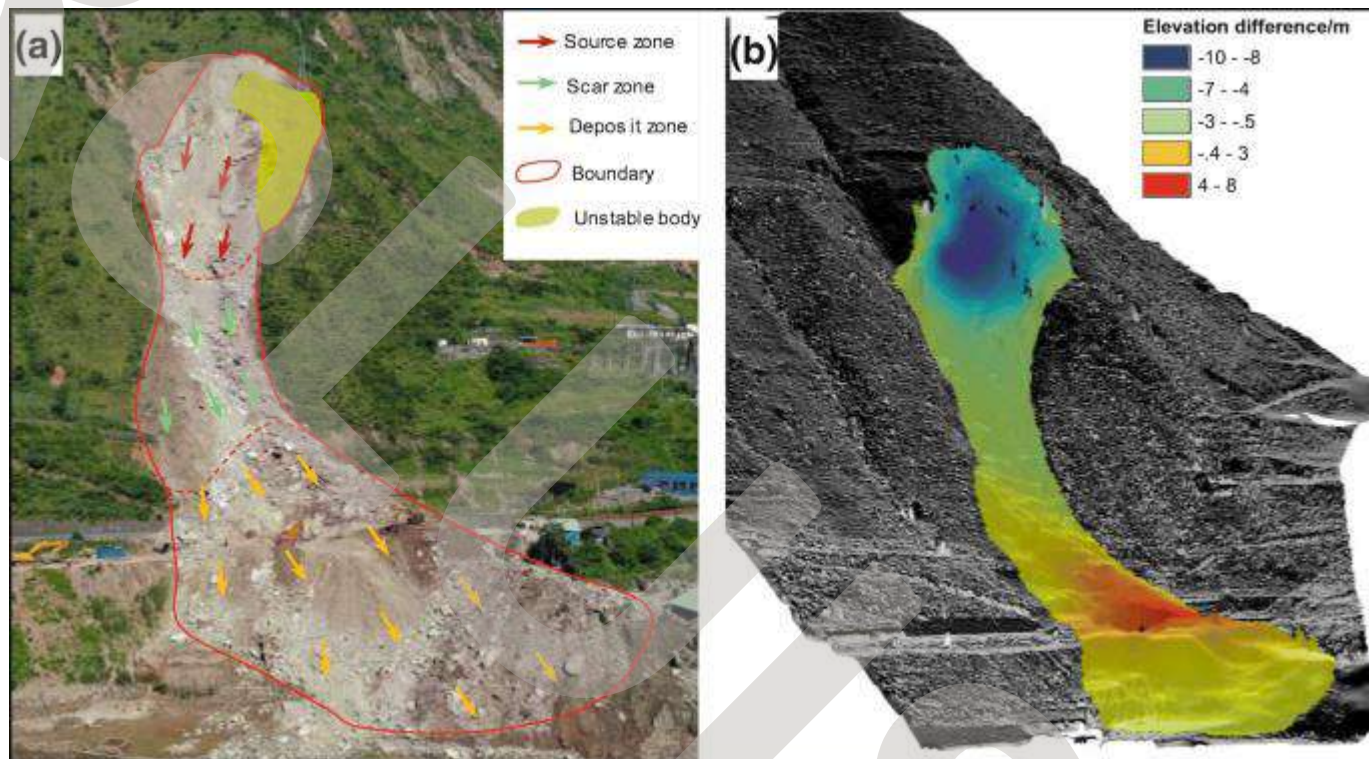


3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

La stima delle aree di invasione di **terzo livello** deriva da simulazioni che necessitano di preliminari step di taratura effettuati in «back analysis» su fenomeni simili già.

- Massa di distacco
- Coefficiente di erosione
- Reologia del materiale
- Contenuto d'acqua
- «legge di runoff»

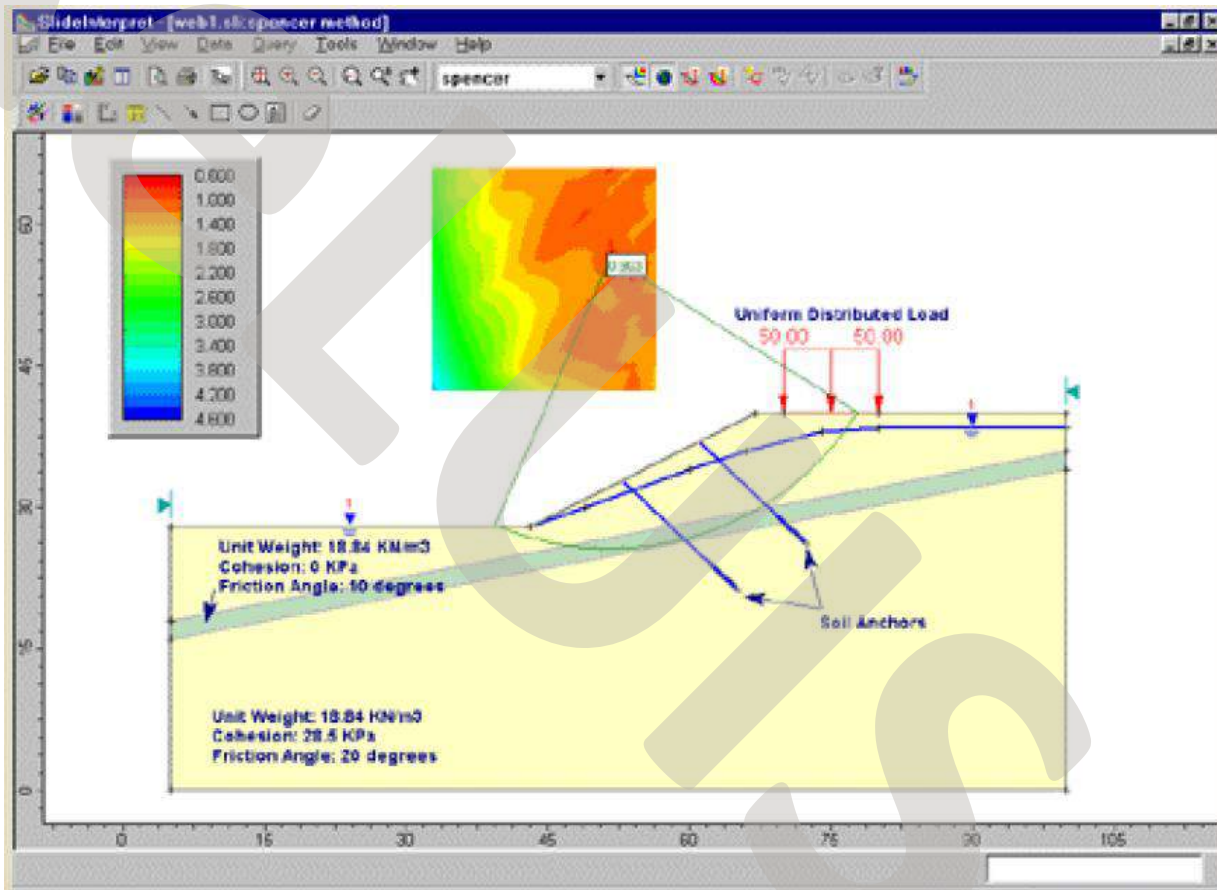


3F: Stima delle aree di invasione

Crolli e Rock Avalanche

La stima delle aree di invasione di terzo livello da verifiche di stabilità (valida solo per gli scivolamenti).

- Parametrizzazione geotecnica e idraulica, e eventualmente sismica



Cause predisponenti e determinanti

“Una frana può avere molte cause predisponenti o preparatorie (*causes*) ma solo una causa determinante (*trigger*)” – Wieczorek, 1996

Intrinseche

Geomorfologiche

Fisiche

Antropiche

**Cause
predisponenti o
preparatorie**

**Cause
determinanti**

- Intrinseche: materiale debole, sensitivo, alterato, fratturato; presenza di discontinuità con orientazione sfavorevole, contrasto di permeabilità, ecc.
- Geomorfologiche: sollevamento tettonico o vulcanico, erosione, deposito sul pendio o sulla cresta, ecc.
- Fisiche: precipitazioni, terremoti, eruzioni, gelifrazione, imbibizione-essiccamento, ecc.
- Antropiche: scavo al piede/carico sulla cresta del pendio; attività agricole, disboscamento, attività estrattive, accumulo di materiali di scarto o di rifiuti, ecc.

- Quando è o diventa instabile un pendio?
- La stabilità di un pendio si basa sul rapporto tra due tipi di forze: quelle **agenti** o instabilizzanti e quelle **resistenti**. Le forze agenti favoriscono il movimento lungo un versante, le forze resistenti vi si oppongono. La principale forza agente è la gravità, cui si oppone la resistenza al taglio

Cause predisponenti o preparatorie

Checklist for Planning a Landslide Investigation (Sowers and Royster 1978)

- I TOPOGRAPHY
 - A. Contour map
 - 1. Land form
 - 2. Anomalous patterns (jumbled, scarps, bulges)
 - B. Surface drainage
 - 1. Continuous
 - 2. Intermittent
 - C. Profiles of slope
 - 1. Correlate with geology (II)
 - 2. Correlate with contour map (IA)
 - D. Topographic changes
 - 1. Rate of change by time
 - 2. Correlate with groundwater (III), weather (IV), and vibration (V)
- II GEOLOGY
 - A. Formations at site
 - 1. Sequence of formations
 - 2. Colluvium
 - a. Bedrock contact
 - b. Residual soil
 - 3. Formations with bad experience
 - 4. Rock minerals susceptible to alteration
 - B. Structure: three-dimensional geometry
 - 1. Stratification
 - 2. Folding
 - 3. Strike and dip of bedding or foliation
 - a. Changes in strike or dip
 - b. Relation to slope and slide
 - 4. Strike and dip of joints with relation to slope
 - 5. Faults, breccia, and shear zones with relation to slope and slide
 - C. Weathering
 - 1. Character (chemical, mechanical, and solution)
 - 2. Depth (uniform or variable)
- III GROUNDWATER
 - A. Piezometric levels within slope
 - 1. Normal
 - 2. Perched levels, relation to formations and structure
 - 3. Artesian pressures, relation to formations and structure
 - B. Variations in piezometric levels [correlate with weather (IV), vibration (V), and history of slope changes (VI)]
 - 1. Response to rainfall
 - 2. Seasonal fluctuations
 - 3. Year-to-year changes
 - 4. Effect of snowmelt
 - C. Ground surface indications of subsurface water
 - 1. Springs
 - 2. Seeps and damp areas
 - 3. Vegetation differences
 - D. Effect of human activity on groundwater
 - 1. Groundwater utilization
 - 2. Groundwater flow restriction
 - 3. Impoundment and additions to groundwater
 - 4. Changes in ground cover and infiltration opportunity
 - 5. Surface water changes
 - E. Groundwater chemistry
 - 1. Dissolved salts and gases
 - 2. Changes in radioactive gases
- IV WEATHER
 - A. Precipitation
 - 1. Form (rain or snow)
 - 2. Hourly rates
 - 3. Daily rates
 - 4. Monthly rates
 - 5. Annual rates
 - B. Temperature
 - 1. Hourly and daily means
 - 2. Hourly and daily extremes
 - 3. Cumulative degree-day deficit (freezing index)
 - 4. Sudden thaws
 - C. Barometric changes
- V VIBRATION
 - A. Seismicity
 - 1. Seismic events
 - 2. Microseismic intensity
 - 3. Microseismic changes
 - B. Human induced
 - 1. Transport
 - 2. Blasting
 - 3. Heavy machinery
- VI HISTORY OF SLOPE CHANGES
 - A. Natural process
 - 1. Long-term geologic changes
 - 2. Erosion
 - 3. Evidence of past movement
 - 4. Submergence and emergence
 - B. Human activity
 - 1. Cutting
 - 2. Filling
 - 3. Changes in surface water
 - 4. Changes in groundwater
 - 5. Changes in vegetative cover, clearing excavation, cultivation, and paving
 - 6. Flooding and sudden drawdown of reservoirs
 - C. Rate of movement
 - 1. Visual accounts
 - 2. Evidence in vegetation
 - 3. Evidence in topography
 - 4. Photographic evidence
 - a. Oblique
 - b. Stereo aerial photographs
 - c. Aerial photographs
 - d. Spectral changes
 - 5. Instrumental data
 - a. Vertical changes, time history
 - b. Horizontal changes, time history
 - c. Internal strains and tilt, including time history
 - D. Correlations of movements
 - 1. Groundwater [correlate with groundwater (III)]
 - 2. Weather [correlate with weather (IV)]
 - 3. Vibration [correlate with vibration (V)]
 - 4. Human activity [correlate with human-induced vibration (VB)]

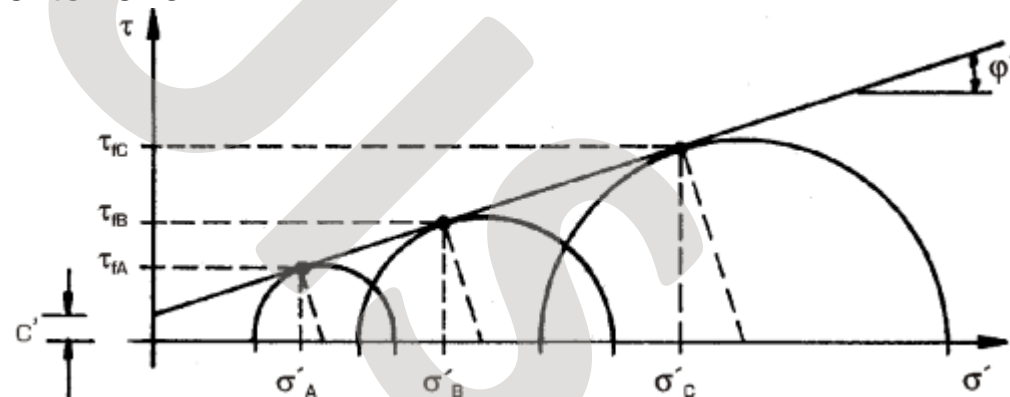
Resistenza al taglio

Il criterio di Mohr-Coulomb è il criterio maggiormente utilizzato per la descrizione delle modalità di rottura dei terreni sottoposti a sforzi di taglio.

Tale criterio presuppone che esista un legame di proporzionalità diretta tra gli sforzi normali efficaci applicati sulla superficie di movimento e la resistenza al taglio del materiale a rottura:

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

- τ = resistenza al taglio del materiale (kN/m^2)
- c' = coesione efficace del terreno (kN/m^2)
- σ' = sforzo normale agente sulla superficie di movimento (kN/m^2)
- ϕ' = angolo di attrito interno efficace del terreno



La presenza di acqua nei pori di una roccia sciolta riduce la resistenza al taglio. In tal caso, nell'equazione di Mohr – Coulomb si deve considerare anche tale contributo negativo, che si esprime nel seguente modo:

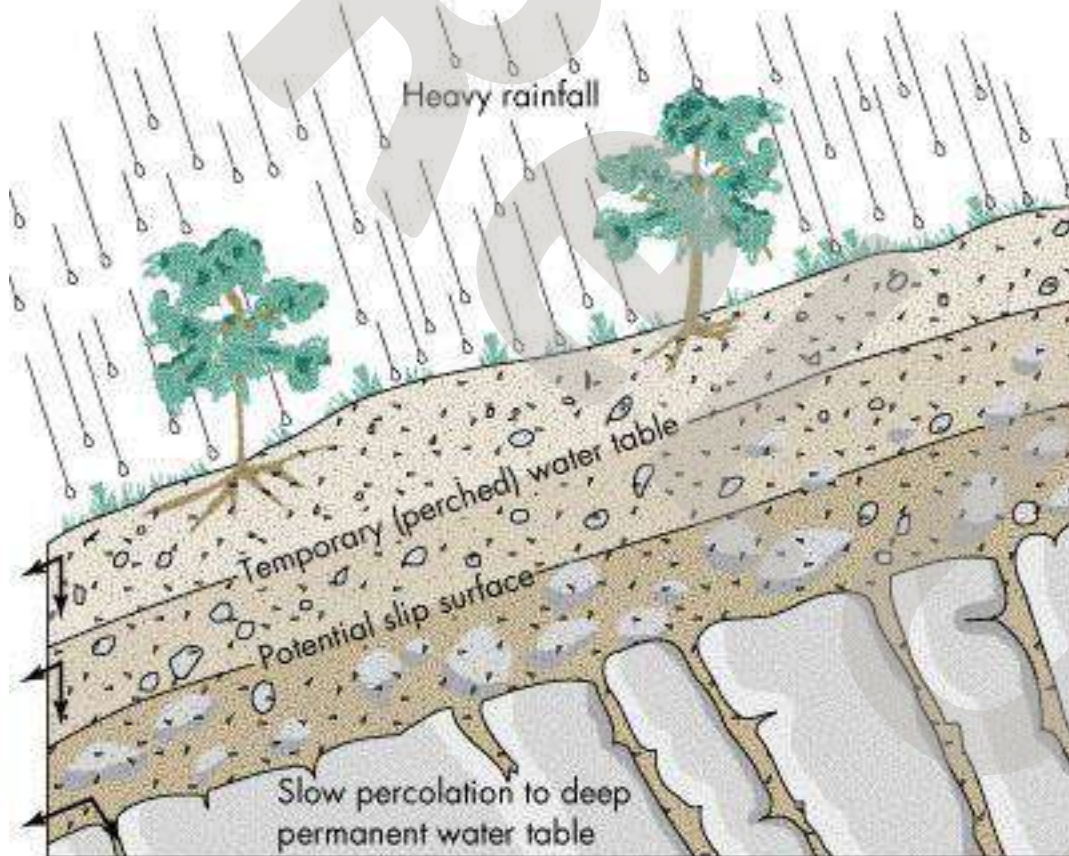
$$\sigma' = \sigma - u$$

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

- τ = resistenza al taglio del materiale (kN/m²)
- c' = coesione efficace del terreno (kN/m²)
- σ' = sforzo normale agente sulla superficie di movimento (kN/m²)
- u = pressione neutra dell'acqua sulla superficie di movimento (kN/m²)
- $\sigma - u$ = sforzo normale efficace agente sulla superficie di movimento
- ϕ' = angolo di attrito interno efficace del terreno

La resistenza al movimento lungo un versante dipende dalla **resistenza al taglio** del materiale coinvolto, a sua volta funzione della coesione e dell'attrito interno.

Il ***weathering*** ed in particolare l'alterazione chimica indebolisce i materiali presenti lungo un versante, riducendo la loro resistenza al taglio. Quest'ultima può essere ulteriormente ridotta dall'incremento delle pressioni neutre all'interno dei pori.



- Deposito colluviale: permeabilità media

- Substrato lapideo: permeabilità più bassa

Una falda in pressione riduce la stabilità di un pendio causando un temporaneo incremento delle pressioni neutre che riduce la resistenza al taglio del materiale sciolto

Condizioni tessiturali del terreno (che condizionano c' e ϕ')

- Frane di primo distacco in terreni non coinvolti in pregressi fenomeni d'instabilità

La struttura del terreno non presenta orientazioni preferenziali. I parametri di resistenza al taglio sono quelli di picco o comunque superiori a quelli residui.

- Frane lungo piani o zone di taglio preesistenti

Sono associate a:

- Riattivazioni di frane pre-esistenti
- Innesco di frane su pre-esistenti superfici di taglio prodotte da processi diversi dalle frane, quali: tettonica, geliflusso di argille, rigonfiamento non uniforme, ecc.

In questi casi la struttura del terreno lungo la superficie di rottura è fortemente orientata nel senso del movimento ed i parametri di resistenza al taglio sono quelli residui o molto prossimi ad essi.

Studio morfostrutturale di dettaglio per approcciare alle schede d'ispezione

- Litostratigrafia ed assetto strutturale del versante instabile
 - Aspetti morfologici del versante
 - Anomalie del reticolo idrografico
 - Eventuali forme riconducibili ad eventi di instabilità pregressi
 - Circolazione idrica sotterranea
 - Condizioni ed anomalie della copertura vegetale
 - Lesioni e/o deformazioni di manufatti

 - Caratteristiche della frana
- ❖ *Elementi morfologici*
 - ❖ *Stato di attività*
 - ❖ *Distribuzione di attività*
 - ❖ *Stile di attività*
 - ❖ *Tipo di frana*

USO DEL SUOLO																		
Usso del suolo <input type="radio"/> aree urbanizzate <input type="radio"/> seminativo arborato <input type="radio"/> rimboscimento e novelletto <input type="radio"/> aree denudate <input type="radio"/> aree estrattive <input type="radio"/> colture specializzate <input type="radio"/> bosco ceduo <input type="radio"/> macchia cespugliato <input type="radio"/> seminativo <input type="radio"/> vegetazione riparia <input type="radio"/> bosco d'alto fusto <input type="radio"/> prato pascolo					Tecniche colturali <input type="radio"/> rittochino <input type="radio"/> spina <input type="radio"/> giropoggio <input type="radio"/> terrazzi <input type="radio"/> in traverso <input type="radio"/> ciglionamenti													
IDROGEOLOGIA			CLASSIFICAZIONE															
Acque superficiali <input type="checkbox"/> assenti <input type="checkbox"/> stagnanti <input type="checkbox"/> ruscellamento diffuso <input type="checkbox"/> ruscellamento concentrato			Movimento 1 2 <input type="radio"/> crollo <input type="radio"/> ribaltamento <input type="radio"/> scivolamento rotazionale <input type="radio"/> scivolamento traslativo <input type="radio"/> espansione <input type="radio"/> colamento		Materiale 1 2 <input type="radio"/> roccia <input type="radio"/> detrito <input type="radio"/> terra		Velocità 1 2 <input type="radio"/> estremamente lento (< 16 mm/anno) <input type="radio"/> molto lento (< 1.6 m/anno) <input type="radio"/> lento (< 13 m/mese) <input type="radio"/> moderato (< 1.8 m/h) <input type="radio"/> rapido (< 3 m/min) <input type="radio"/> molto rapido (< 5 m/s) <input type="radio"/> estremamente rapido (> 5 m/s)											
Sorgenti <input type="radio"/> assenti <input type="radio"/> diffuse <input type="radio"/> localizzate		Falda <input type="radio"/> assente <input type="radio"/> freatica <input type="radio"/> in pressione	NOTE: 1. <i>Primo movimento</i> 2. <i>Secondo movimento</i>		Contenuto d'acqua 1 2 <input type="radio"/> secco <input type="radio"/> umido <input type="radio"/> bagnato <input type="radio"/> molto bagnato													
ATTIVITA'																		
Stato <input type="radio"/> attivo <input type="radio"/> attivo s.s. <input type="radio"/> sospeso <input type="radio"/> riattivato			<input type="radio"/> quiescente <input type="radio"/> T=1-10 anni <input type="radio"/> T=10-100 anni <input type="radio"/> T>100 anni			<input type="radio"/> stabilizzato <input type="radio"/> naturalmente <input type="radio"/> artificialmente <input type="radio"/> relitto			Distribuzione <input type="radio"/> costante <input type="radio"/> retrogressivo <input type="radio"/> avanzante <input type="radio"/> in allargamento		<input type="radio"/> in diminuzione <input type="radio"/> multidirezionale <input type="radio"/> confinato		Stile <input type="radio"/> singolo <input type="radio"/> complesso <input type="radio"/> composito		<input type="radio"/> successivo <input type="radio"/> multiplo		Stadio <input type="radio"/> incipiente <input type="radio"/> avanzato <input type="radio"/> senile <input type="radio"/> esaurito	
SEGNI PRECURSORI					DATAZIONE													
<input type="checkbox"/> fenditure, fratture <input type="checkbox"/> trincee <input type="checkbox"/> doppie creste <input type="checkbox"/> crolli localizzati <input type="checkbox"/> rigonfiamenti <input type="checkbox"/> contropendenze <input type="checkbox"/> cedimenti <input type="checkbox"/> lesioni dei manufatti		<input type="checkbox"/> scricchiolio strutture <input type="checkbox"/> inclinazione pali o alberi <input type="checkbox"/> variaz. portata sorgenti <input type="checkbox"/> variaz. portata corsi d'acqua <input type="checkbox"/> variaz. livello acqua pozzi <input type="checkbox"/> acqua in pressione nel suolo <input type="checkbox"/> rumori sotterranei			<input type="checkbox"/> giornali <input type="checkbox"/> pubblicazioni <input type="checkbox"/> testim. orali <input type="checkbox"/> audiovisivi <input type="checkbox"/> archivi enti <input type="checkbox"/> cartografia		Fonte <input type="checkbox"/> immagini telerilevate <input type="checkbox"/> documenti storici <input type="checkbox"/> lichenometria <input type="checkbox"/> dendrocronologia <input type="checkbox"/> metodi radiometrici <input type="checkbox"/> altre datazioni		Data certa									
								Data incerta	min	max								
								Anno										
								Mese										
								Giorno										
								Ora										
								Età radiometrica	anni B.P.	precisione	±							

M. AMANTI, N. CASAGLI, F. CATANI, M. D'OREFICE & G. MOTTERAN

Corso di aggiornamento professionale

ReLUIS

**Problematiche Geologiche
associate all'Instabilità di
Versante**

**Parte 4: Cartografie e
Rilevamento**



SAPIENZA
UNIVERSITÀ DI ROMA

Gerardo Grelle

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Ambientale

Area di Geologia Applicata

Facoltà di Ingegneria Civile ed Industriale

Email: gerardo.grelle@uniroma1.it

Frane

4. **Rilevamento e interpretazioni da cartografia**

- 4.1 Riconoscimento di elementi da supporto cartografico di tipo fisiografico (DTM e curve di livello)
- 4.2 Lettura di carte tematiche di pericolosità/Rischio progetto PAI
- 4.3 Lettura di carte tematiche tipo IFFI
- 4.4 Dati da piattaforme informatizzate e remote sensing.

Supporti cartografici

IFFI: Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia

Mappatura e caratterizzazione dei fenomeni franosi

(tende a definire la *Suscettibilità*)

PAI: Piani di Assetto Idrogeologico

(basata su una rappresentazione qualitativa dei livelli di *Rischio*)

Supporti cartografici

IFFI: Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia

Metodi di rilevamento e classificazione standard

(stessa accuratezza)

PAI: Piani di Assetto Idrogeologico

Da raccolta di dati da diversi fonti: piani da comunali a regionali.

Supporti cartografici

IFFI:

Coordinato dall'ISPRA (Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale), l'IFFI ha compilato un inventario nazionale completo delle frane, registrando oltre **620.000 fenomeni franosi** che interessano circa 23.700 km², ovvero circa il 7,9% del territorio italiano. I dati sono raccolti e aggiornati in collaborazione con le autorità regionali e provinciali autonome e includono vari tipi di fenomeni franosi come **crolli, colate e scivolamenti**

PAI:

I PAI sono piani di bacino mirati alla mitigazione dei rischi idrogeologici, inclusi i fenomeni franosi. Questi piani si concentrano spesso sulle aree più critiche e ad alto rischio identificate attraverso dati storici e studi locali. Integrano valutazioni di pericolosità per **sviluppare strategie di gestione del rischio e pianificazione del territorio,**

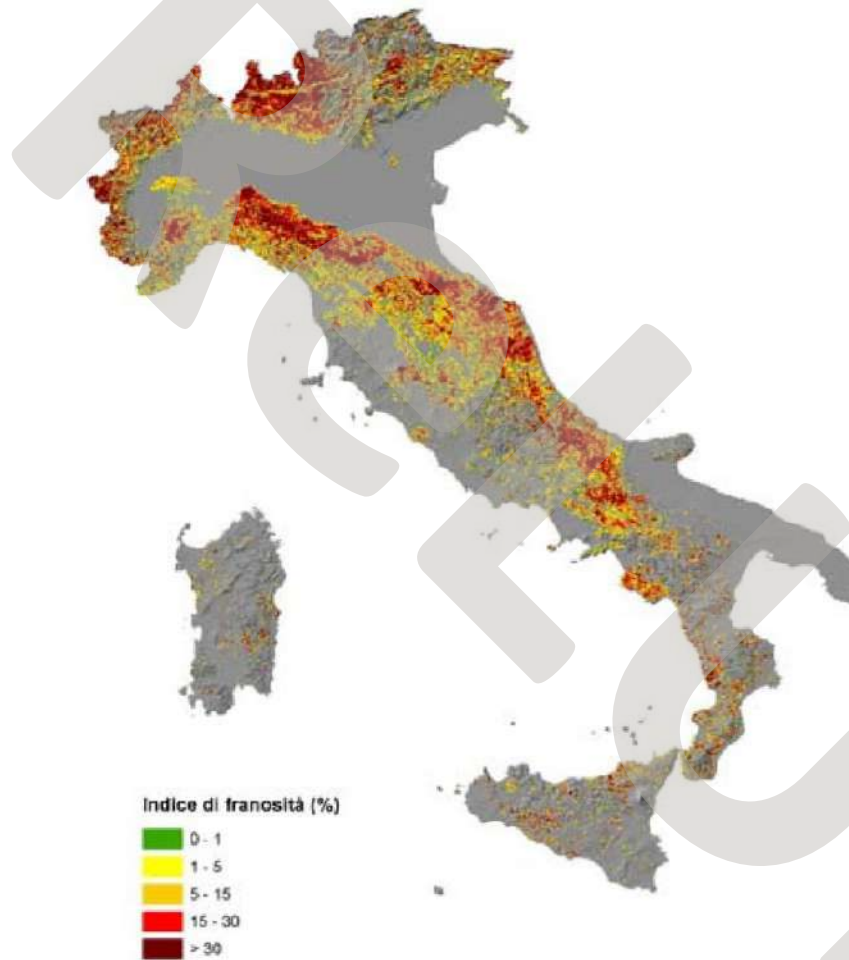
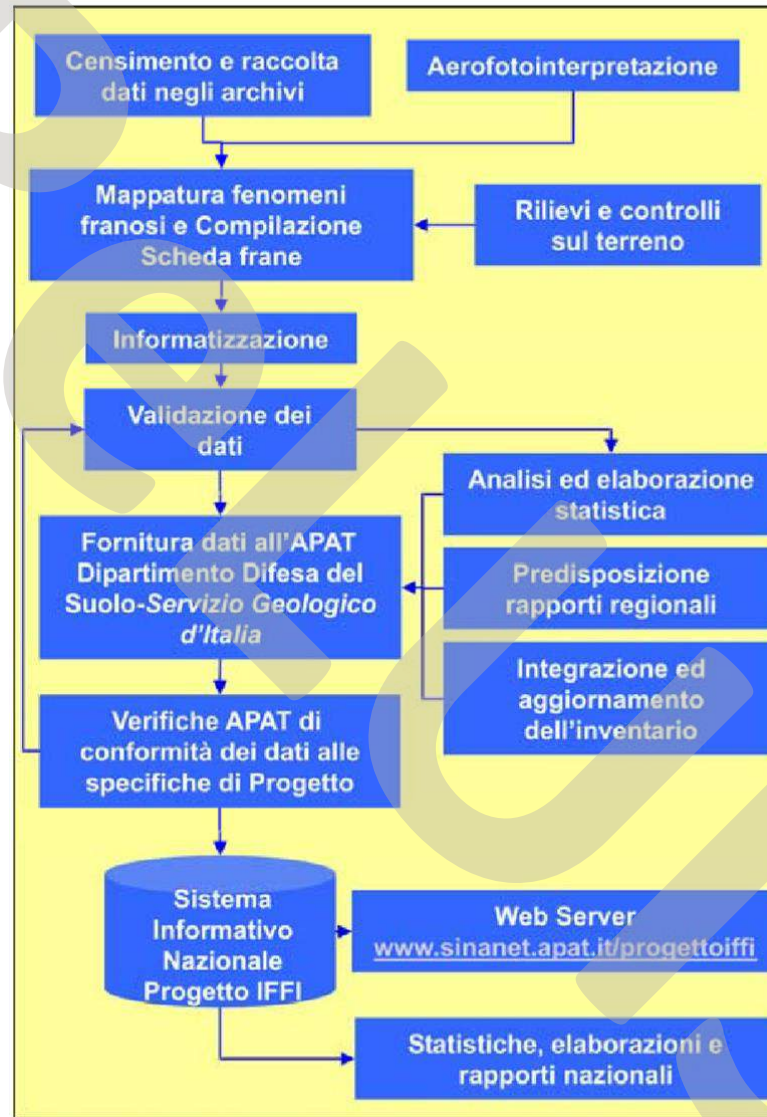


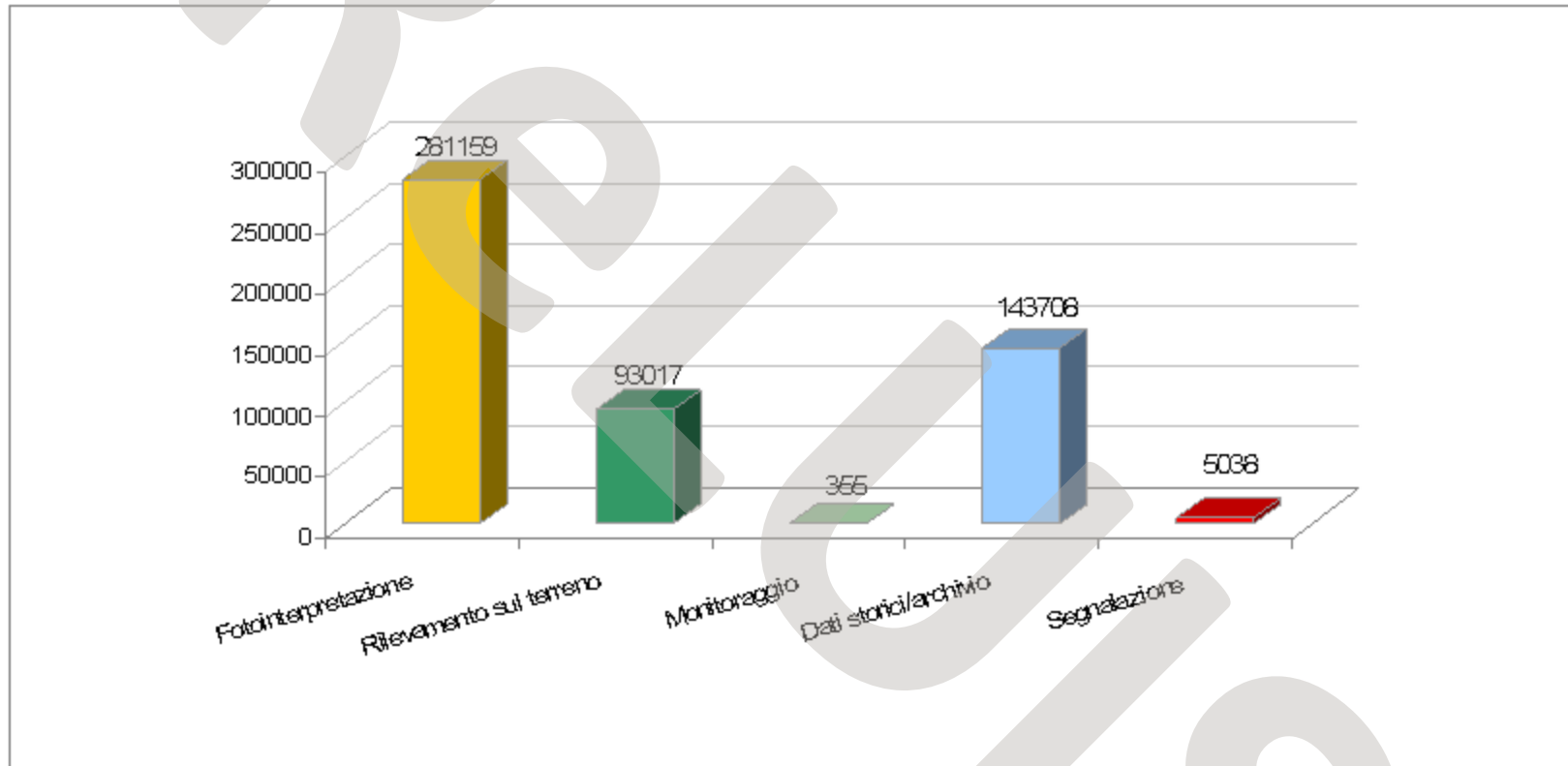
Fig. 7: *Indice di franosità (%) - area in frana /area totale calcolato su maglia 1x1 Km.*

Il Progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia), elaborato dall'ISPRA e dalle Regioni e Province Autonome, ha censito circa 485.000 frane (aggiornamento dicembre 2007), che interessano un'area di 20.721 km², pari al 6,9% del territorio nazionale

La struttura del Progetto: struttura



Metodi di individuazione delle frane utilizzati nel progetto IFFI



Il Progetto IFFI- dati di schedatura

Il progetto IFFI (Inventario dei Fenomeni Franosi in Italia) riporta una serie di **parametri dettagliati** per caratterizzare i fenomeni franosi. Ecco un elenco dei principali parametri inclusi nell'inventario IFFI:

1. Identificativo della Frana:

1. Codice univoco che identifica la frana.

2. Localizzazione:

1. Coordinate geografiche (latitudine e longitudine).
2. Comune e provincia di appartenenza.

3. Tipologia di Frana:

1. Classificazione del tipo di movimento (scivolamento, crollo, colata, ecc.).

4. Dimensioni:

1. Superficie della frana.
2. Volume stimato del materiale coinvolto.

5. Stato di Attività:

1. Stato attivo, quiescente, inattivo.

6. Data di Occorrenza:

1. Data o periodo in cui si è verificata la frana.

7. Cause della Frana:

1. Cause naturali (precipitazioni, terremoti, ecc.) o antropiche (scavi, deforestazione, ecc.).

8. Materiale Coinvolto:

1. Tipo di materiale coinvolto (roccia, terreno, detriti).

9. Danni Causati:

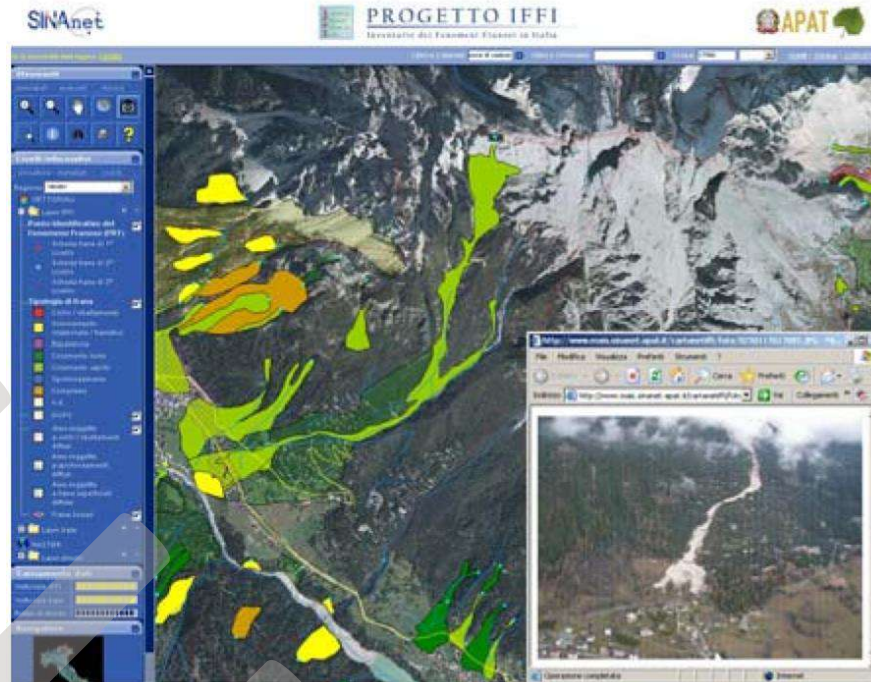
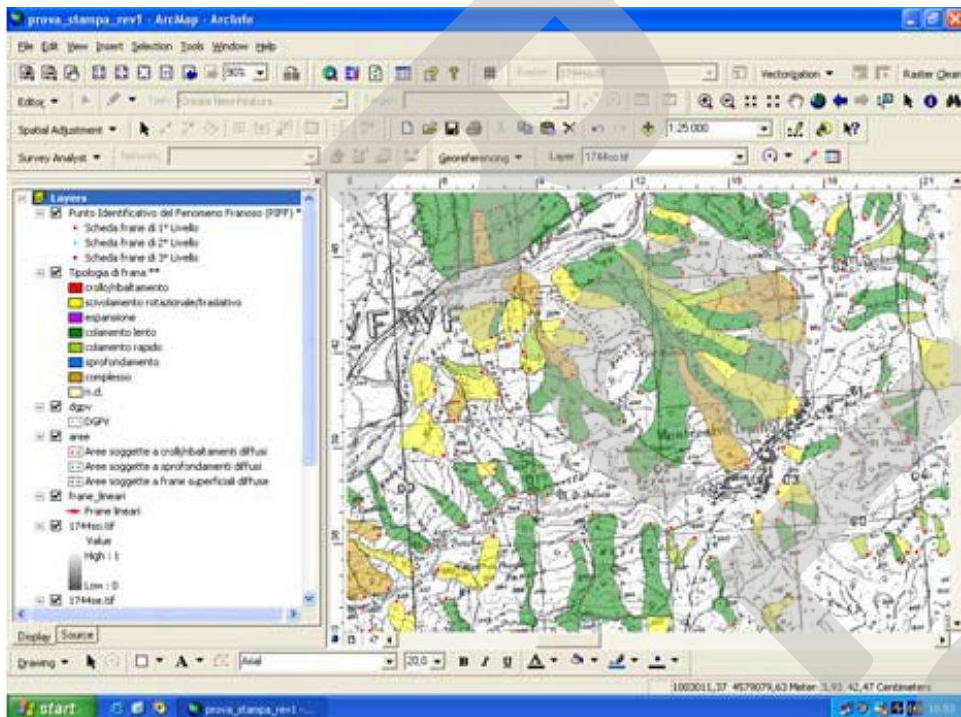
1. Danni a strutture, infrastrutture, persone, ecc.

10. Fotografie e Documentazione:

1. Documentazione fotografica e report tecnici.

11. Interventi di Mitigazione:

1. Interventi effettuati per mitigare il rischio (muri di contenimento, drenaggi, ecc.).

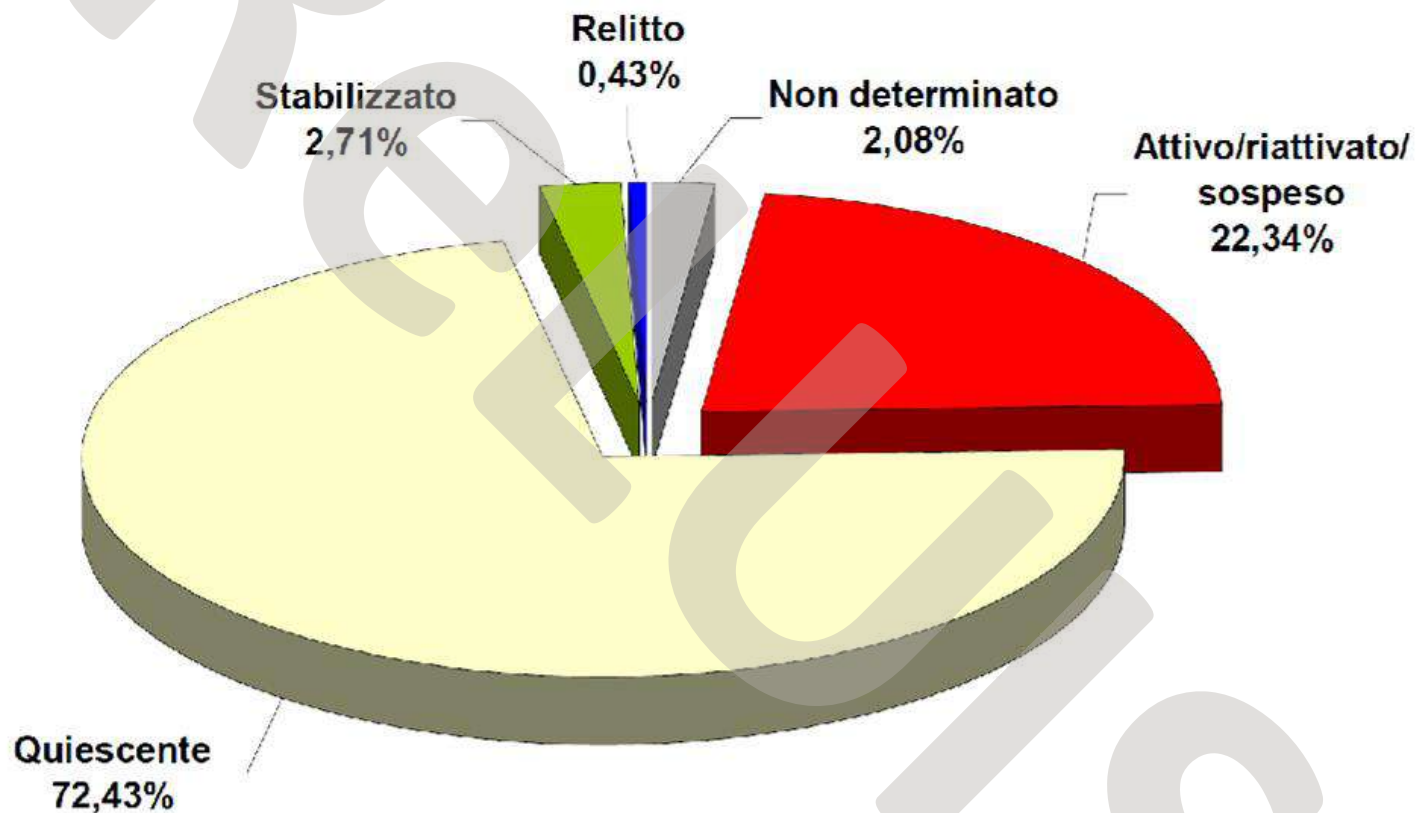


La Banca Dati è costituita da una cartografia informatizzata alla scala 1:25.000 o a scale di maggior dettaglio e dal relativo *database* alfanumerico e iconografico.

Ogni fenomeno franoso è rappresentato da:

- un punto georeferenziato posto, per convenzione, in corrispondenza della quota più elevata del coronamento della frana;
- un poligono, quando la frana è cartografabile alla scala di rilevamento adottata;
- una linea quando i fenomeni franosi sono di forma molto allungata e presentano una larghezza non cartografabile.

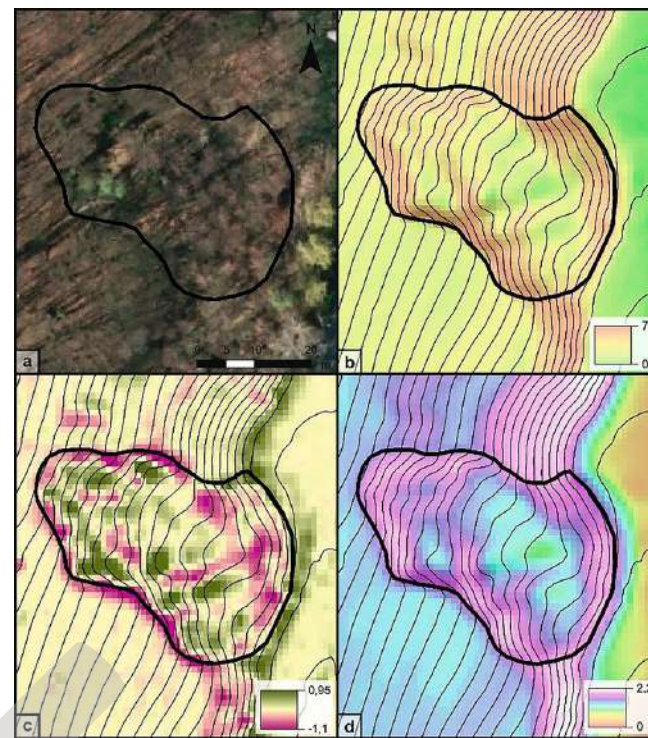
Le frane in Campania : attività



Rilevamento da supporti cartografici:

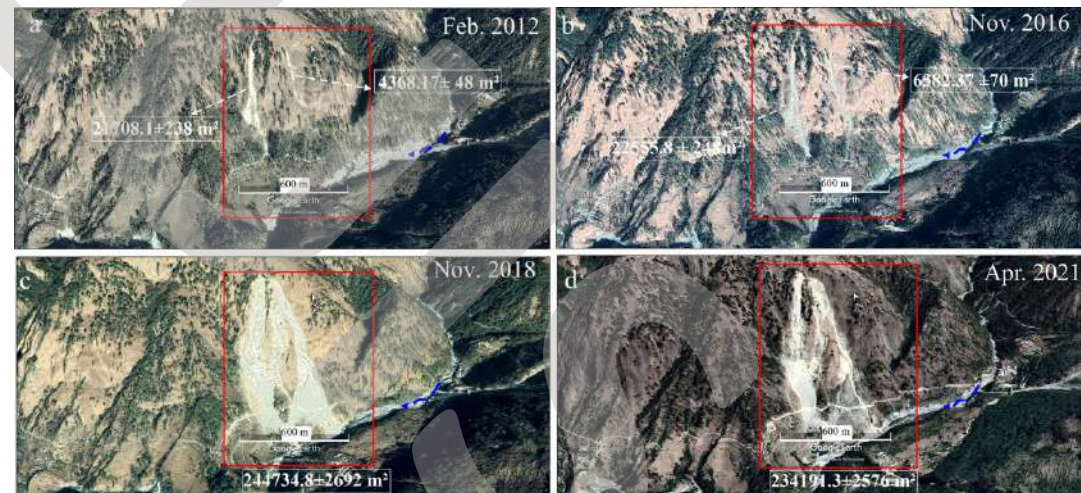
1. Statici: (forma)

Individuazione dei caratteri diagnostici, forma curve di livello, foto-aeree, restituzioni cartografiche bi-tridimensionali.



2. Cinematici: (evoluzione)

Individuazione di variazioni spaziotemporali tra punti fisici spazialmente definiti o cartografici di riferimento.



Misura delle variazioni delle distanze

Si tracciano sulla cartografia più antica, fra quelle disponibili, una serie di segmenti, trasversali rispetto all'ipotetica direzione del movimento franoso, separati da distanze definite, ed ancorati a punti potenzialmente fissi, come angoli di edifici, oppure limiti di proprietà noti.

Sulle cartografie redatte in tempi successivi si calcola nuovamente la distanza fra di essi, per valutare l'entità del movimento.

Dalla divisione fra la variazione delle distanze misurate e l'intervallo di tempo intercorso fra la redazione di due carte successive è possibile dedurre anche un ordine di grandezza della velocità annuale media del movimento.

Misura della modificazione delle aree

L'applicazione di questo metodo prevede la misura dell'area compresa all'interno del contorno dell'ipotetica area in frana, sulla cartografia di riferimento più antica, e la ripetizione della stessa misura sulle cartografie successive.

Tali misure possono essere eseguite facilmente sia con un normale CAD sia con i più avanzati GIS, a condizione che sia adeguatamente individuato il perimetro dell'area in frana.

Il confronto fra le misure successive consente di valutare l'evoluzione del movimento franoso.

Individuazione di una frana da foto aeree

In taluni casi per l'individuazione di aree potenzialmente in frana può essere utile l'**interpretazione di foto aeree**, pancromatiche, a colori ed all'infrarosso, utilizzando, possibilmente, le coppie di foto per la lettura con lo stereoscopio.

L'impiego di foto aeree presenta alcuni significativi vantaggi:

- consente l'immediata delimitazione di aree in frana di grandi dimensioni,
- evidenzia in modo netto l'assetto del territorio intorno al movimento franoso,
- fornisce la possibilità di definire con apprezzabile precisione la geometria del movimento franoso ed anche la velocità, se si dispone di foto aeree acquisite in tempi successivi.

Individuazione di una frana da immagine satellitare

Alcune immagini satellitari raggiungono una risoluzione tale da renderle paragonabili alle foto aeree, per la caratterizzazione dei movimenti franosi.

Il vantaggio di questa tecnica risiede nella possibilità di fornire in aggiunta alcune informazioni d'interesse indiretto per la caratterizzazione di aree in frana, come per l'uso del suolo, oppure la distinzione fra rocce lapidee e suoli di copertura.

Peraltro le immagini satellitari sono rilevate con sistematica periodicità e pertanto possono costituire uno strumento per controllare ad intervalli definiti la evoluzione della superficie topografica e valutare la velocità media del movimento franoso.

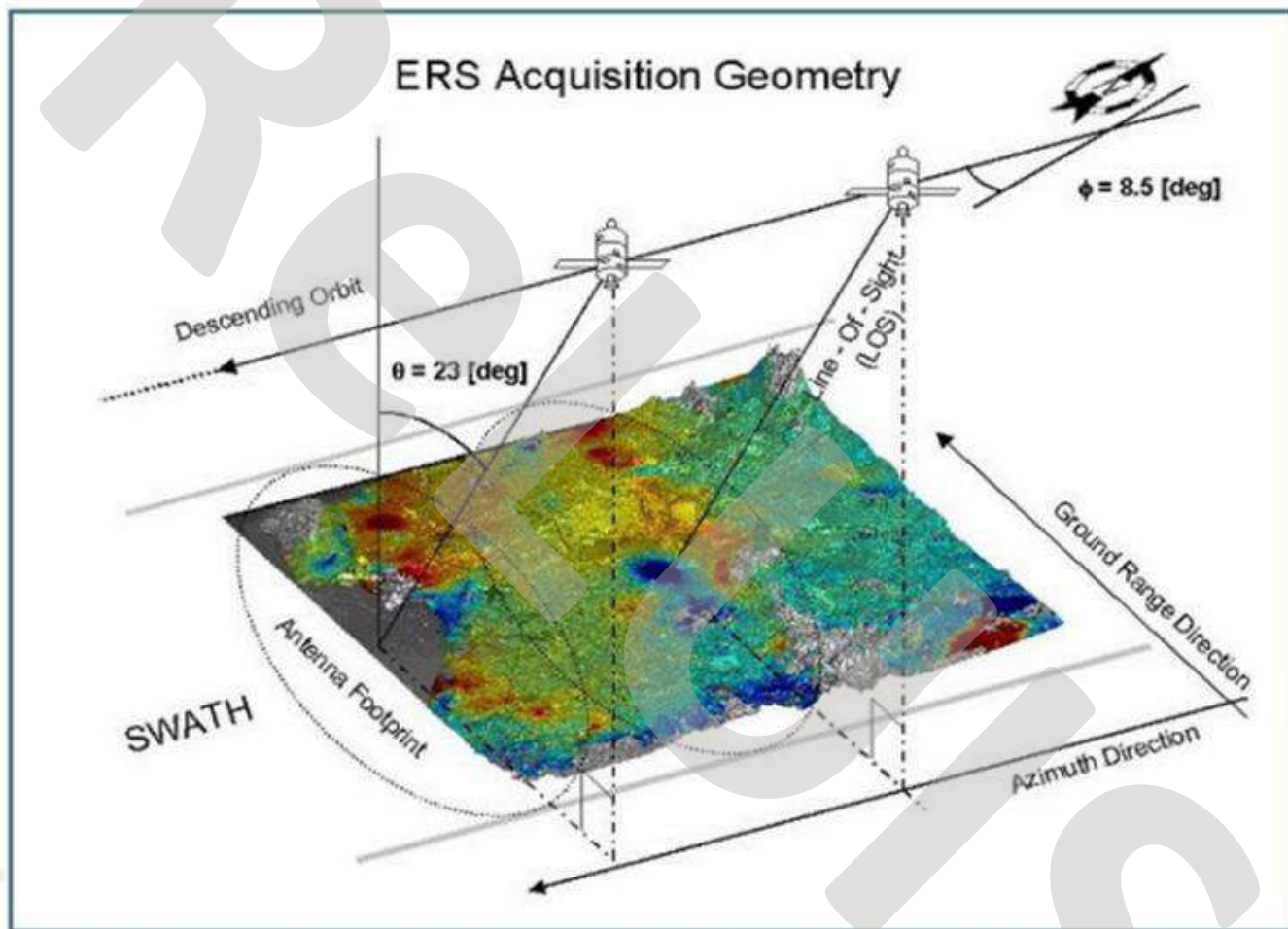
Individuazione di una frana da immagine satellitare





Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti



Tecniche Interferometriche: In-SAR

IN-SAR (Interferometric Synthetic Aperture Radar)

Interferometric Synthetic Aperture Radar (IN-SAR) è una tecnica di telerilevamento utilizzata per misurare movimenti della superficie terrestre.

Principi di funzionamento:

- **Acquisizione dei dati:** Due o più immagini radar della stessa area vengono acquisite in momenti diversi.
- **Interferogramma:** Le immagini vengono combinate per creare un interferogramma, che rappresenta le differenze di fase tra le immagini.
- **Calcolo delle deformazioni:** Analizzando le variazioni di fase, è possibile calcolare i cambiamenti di quota o i movimenti laterali della superficie terrestre.

Applicazioni:

- **Monitoraggio delle frane:** Identificazione e monitoraggio dei movimenti del terreno.
- **Vulcanologia:** Studio delle deformazioni del terreno attorno ai vulcani.
- **Geodesia:** Misurazione dei movimenti tettonici e subsidenza.

Vantaggi:

- **Alta risoluzione:** Può rilevare movimenti di pochi millimetri.
- **Ampia copertura:** Copre vaste aree geografiche.
- **Indipendenza dalle condizioni atmosferiche:** Può acquisire dati anche in presenza di nuvole o di notte.

Svantaggi:

Passo di acquisizione temporale definito

Tecniche Interferometriche: Gb-SAR

Ground-Based Synthetic Aperture Radar (GB-SAR) è una tecnica simile all'IN-SAR, ma utilizza un radar montato su una **struttura fissa a terra**.

Principi di funzionamento:

- **Radar a terra:** Il radar è posizionato su una struttura fissa e acquisisce immagini della stessa area da diverse posizioni lungo una linea retta.
- **Creazione di un'immagine sintetica:** Le immagini acquisite vengono combinate per creare un'immagine radar sintetica ad alta risoluzione.
- **Analisi delle deformazioni:** Come per l'IN-SAR, le variazioni di fase tra le immagini vengono analizzate per rilevare movimenti della superficie.

Applicazioni:

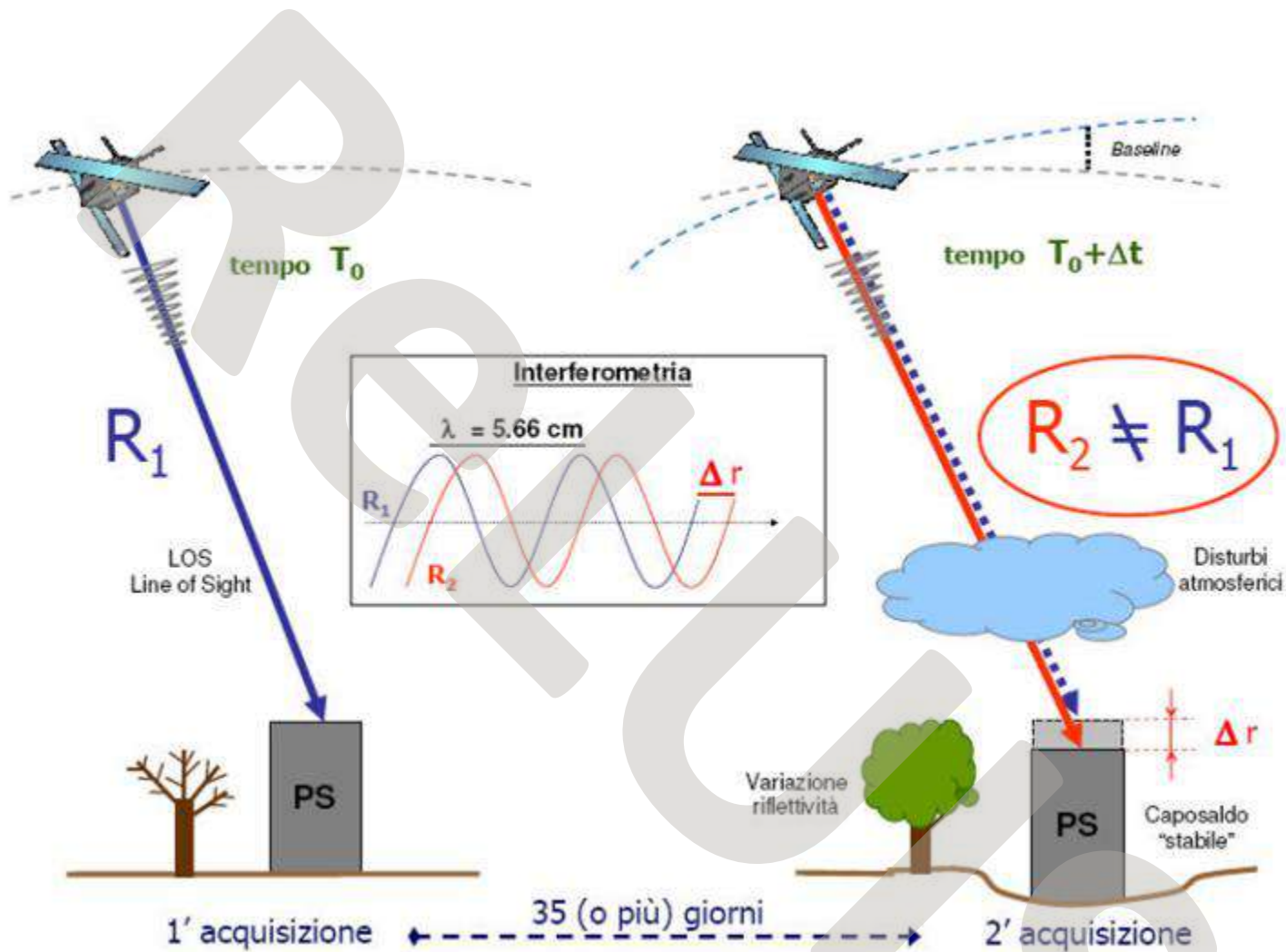
- **Monitoraggio delle infrastrutture:** Monitoraggio di ponti, dighe, edifici e altre strutture.
- **Stabilità delle scarpate:** Controllo della stabilità di pendii e pareti rocciose.
- **Attività mineraria:** Monitoraggio delle deformazioni del terreno nelle aree di estrazione.

Vantaggi:

- **Alta risoluzione temporale:** Può acquisire dati molto frequentemente, anche a intervalli di pochi minuti.
- **Flessibilità operativa:** Può essere installato in punti strategici per monitorare specifiche aree di interesse.
- **Indipendenza dalle condizioni atmosferiche:** Come l'IN-SAR, funziona in qualsiasi condizione atmosferica e di illuminazione.

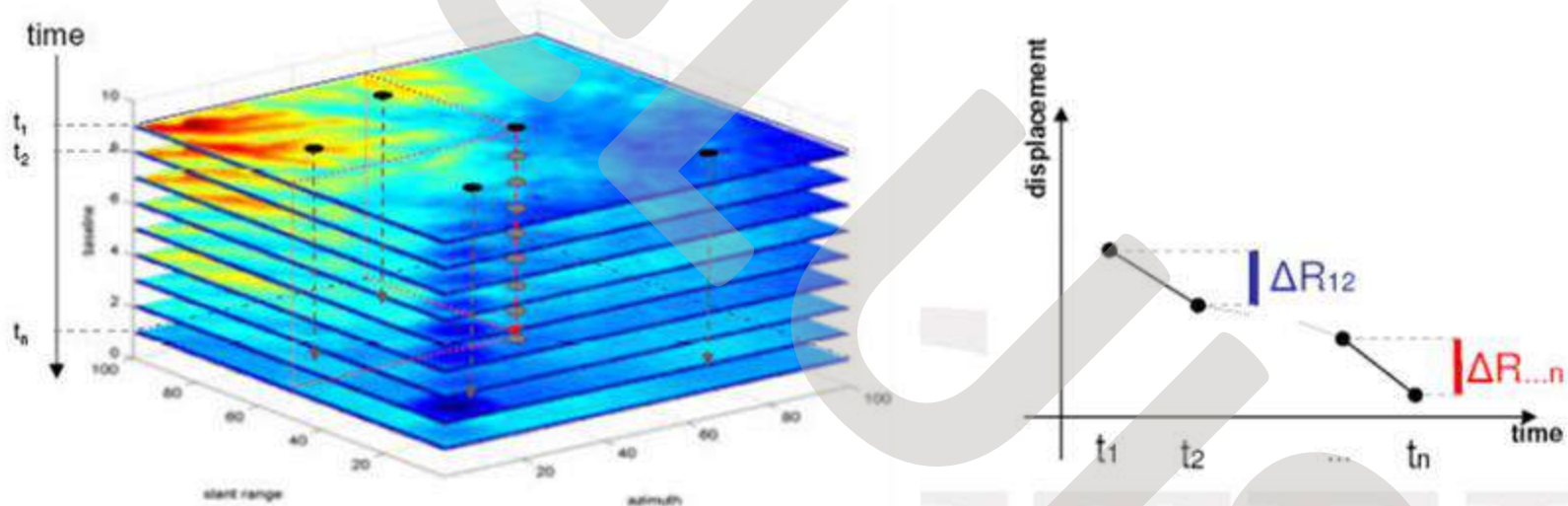
Svantaggi:

Rilevamento localizzato

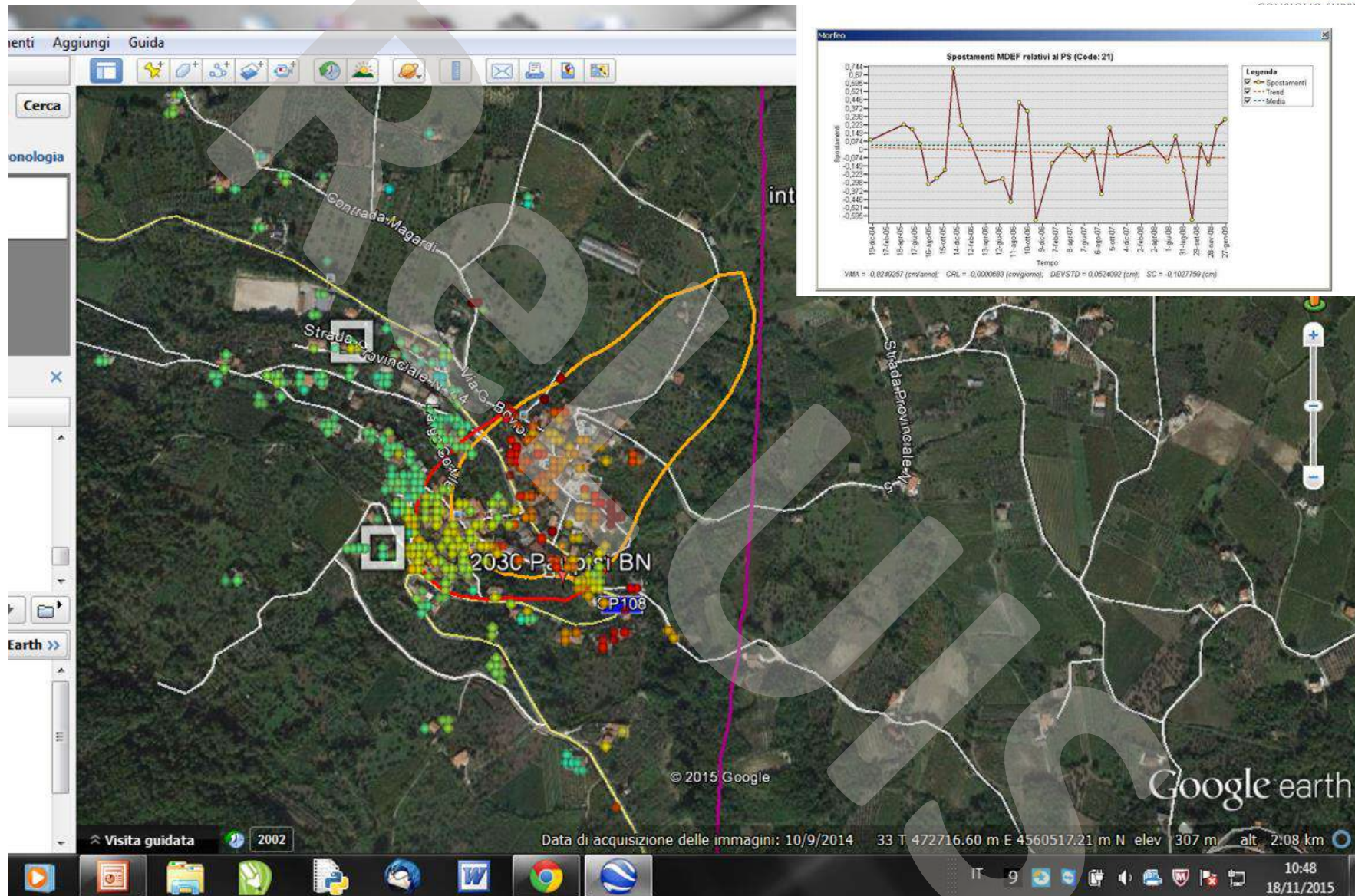


✓ Acquisizione in uno stack di scene SAR

- Scelta della scena master
- Scelta dei PS
- Realizzazione degli spostamenti differenziali



reluis Analisi dei dati misurati



Modulo II – Rischi naturali e interventi di mitigazione per la sicurezza dei ponti

Le linee guida per i ponti esistenti

INTERFEROMETRIA Gb-SAR

