

PIEGHE, FAGLIE E ALTRE DEFORMAZIONI

Le pieghe e le faglie sono le forme più comuni di deformazione delle rocce che costituiscono la crosta terrestre.

La giacitura dello strato è un'importante informazione che si ricava dalla misura di due elementi: la direzione e l'inclinazione.

La direzione di uno strato è la direzione della retta orizzontale che risulta dall'intersezione del piano dello strato con un piano orizzontale. Essa è determinata dall'angolo azimutale che questa intersezione forma con il nord.

L'inclinazione è l'angolo zenitale formato dalla retta di massima pendenza del piano dello strato con un piano orizzontale. La retta di massima pendenza del piano dello strato, detta immersione, è perpendicolare alla direzione dello strato e definisce la direzione verso cui lo strato “affonda” entro terra.

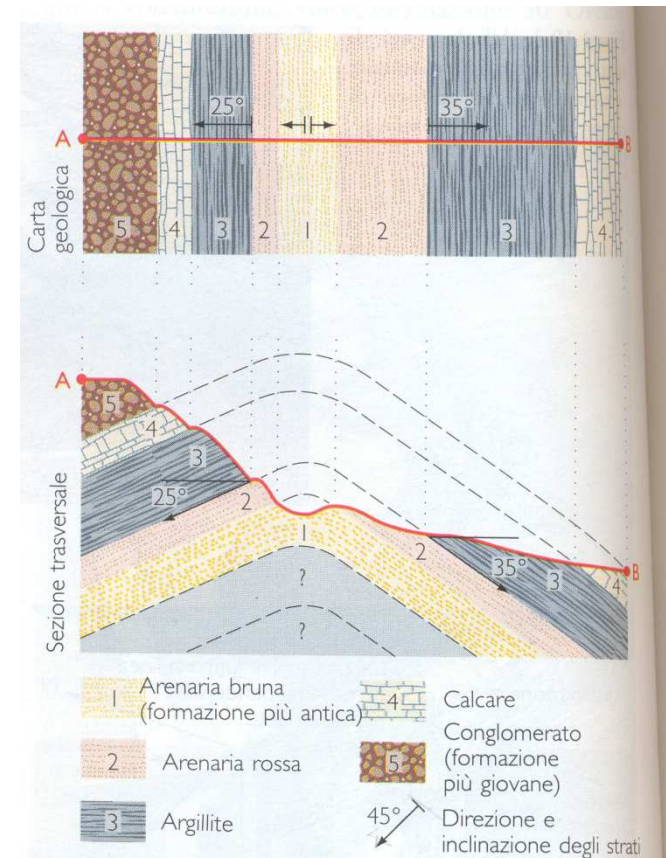
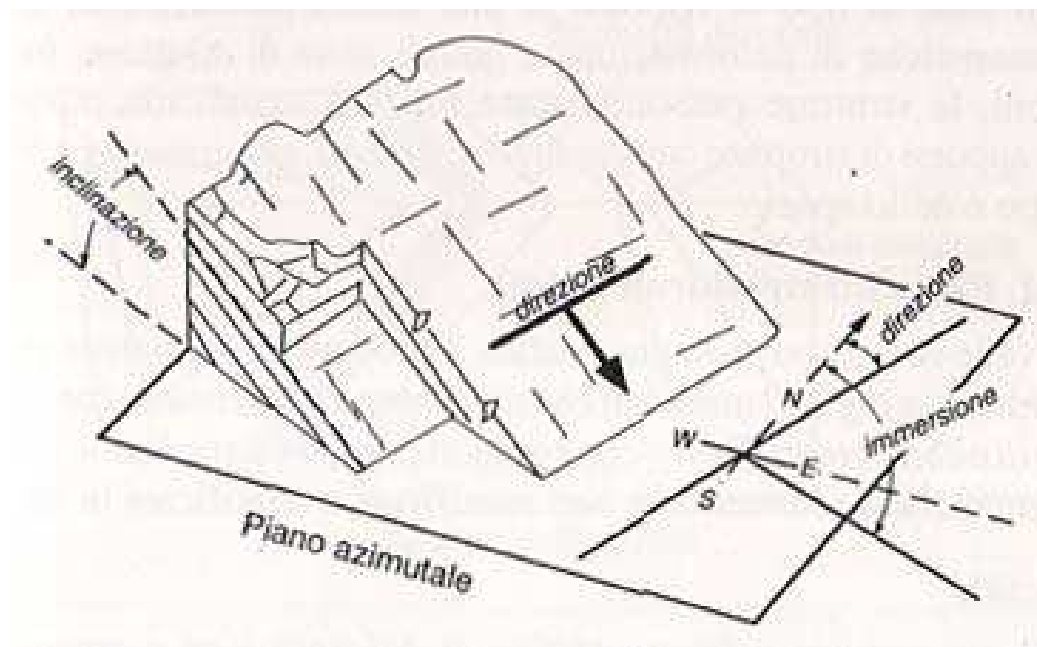
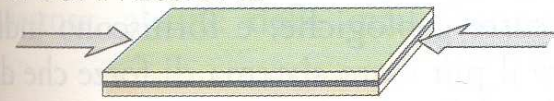
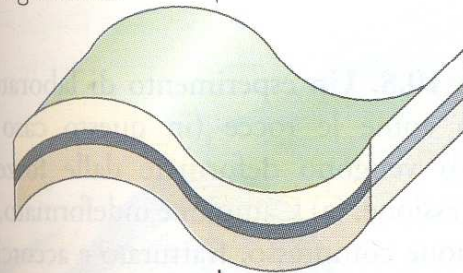


Figura 10.6. Una carta geologica e una sezione trasversale ricavata da essa. La giacitura degli strati indica che la formazione 1 è alla base della successione sedimentaria e quindi è la più antica; le formazioni adiacenti sono più giovani. La parte erosa della piega è stata ricostruita con linee tratteggiate che congiungono formazioni identiche, rappresentate con gli stessi colori e gli stessi numeri, e che conservano per ciascun fianco l'inclinazione osservata.

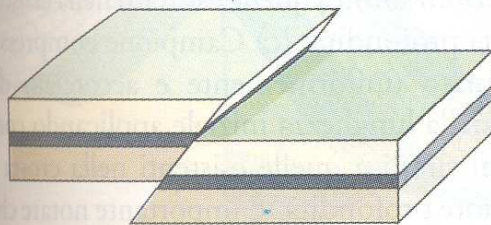
STRUTTURE
DI COMPRESSIONE



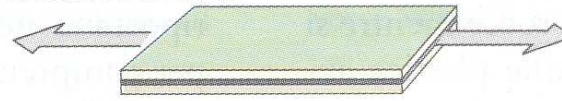
Piegamento



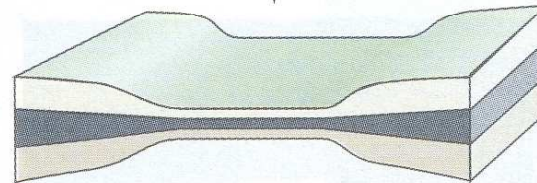
Fagliazione



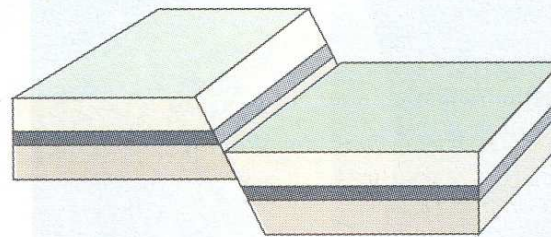
STRUTTURE
DI DISTENSIONE



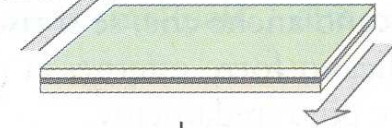
Stiramento
e assottigliamento



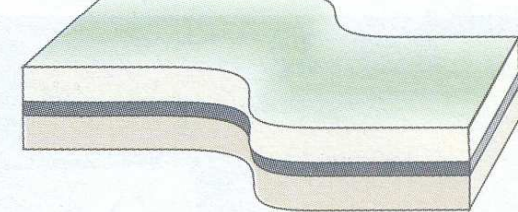
Fagliazione



STRUTTURE
DI TAGLIO



Deformazione
di scorrimento



Fagliazione

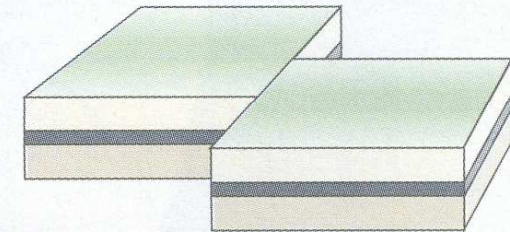


Figura 10.7. Le rocce risultano deformate da pieghe o da faglie a seconda dei differenti tipi di forze tettoniche cui sono state sottoposte. Le caratteristiche delle diverse deformazioni si osservano sul terreno e da esse è possibile risalire alla natura delle forze che, caso per caso, le hanno prodotte.

Il termine piega implica che una struttura che originariamente era piana, come uno strato sedimentario, si è incurvata.

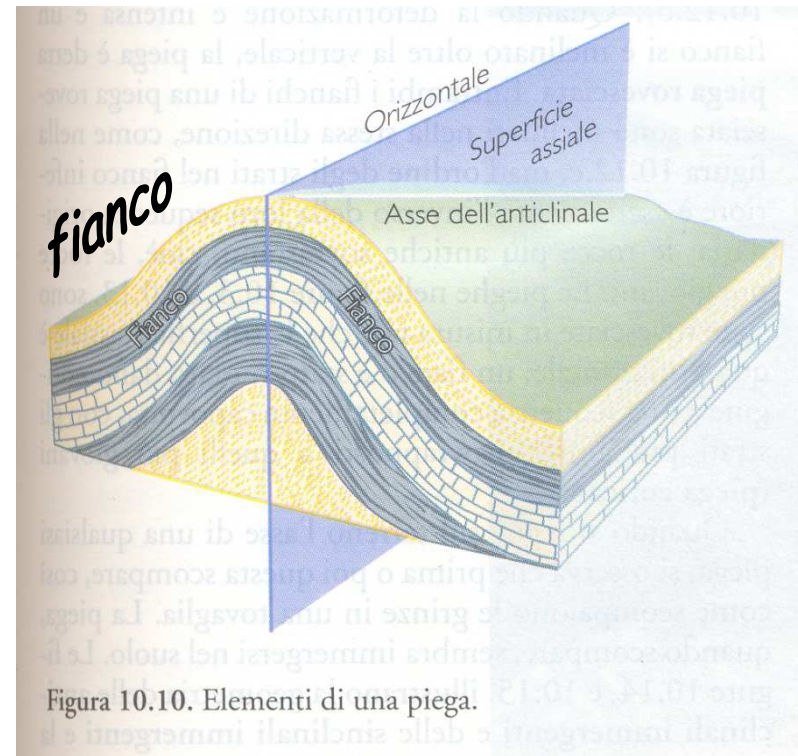
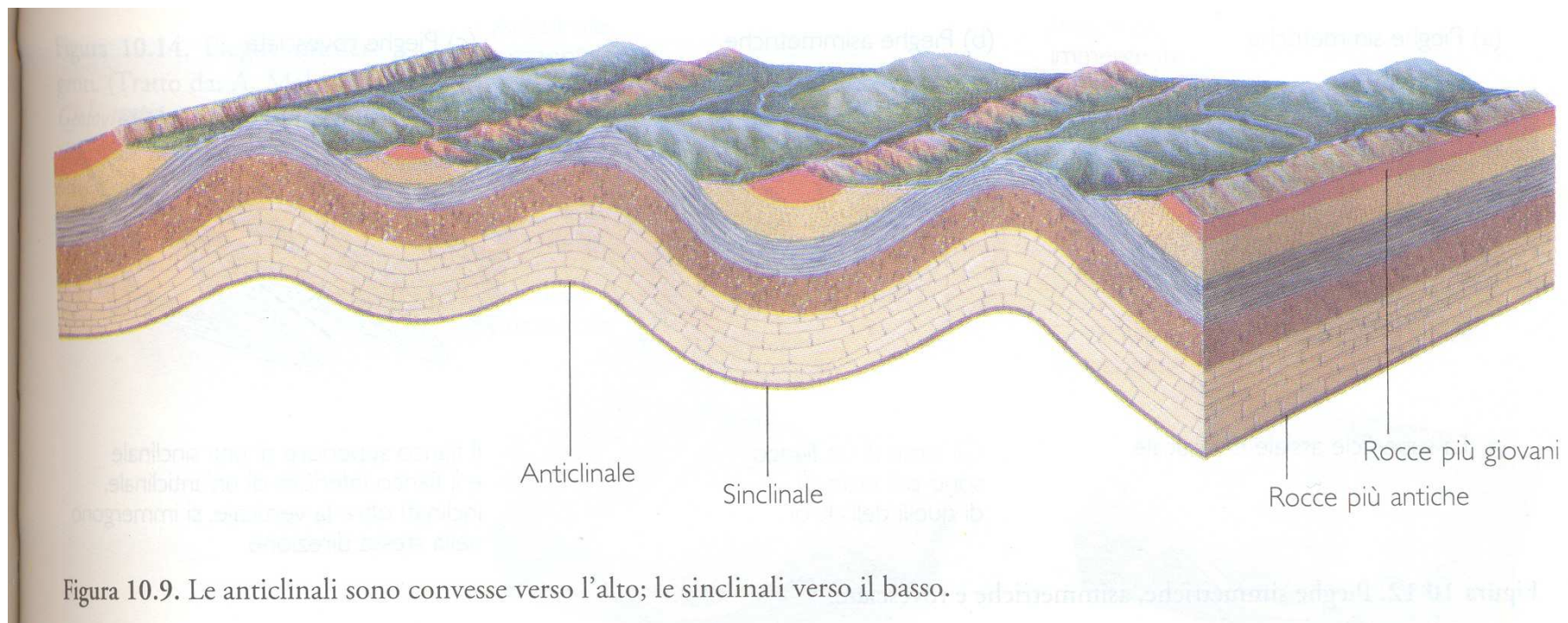


Figura 10.10. Elementi di una piega.



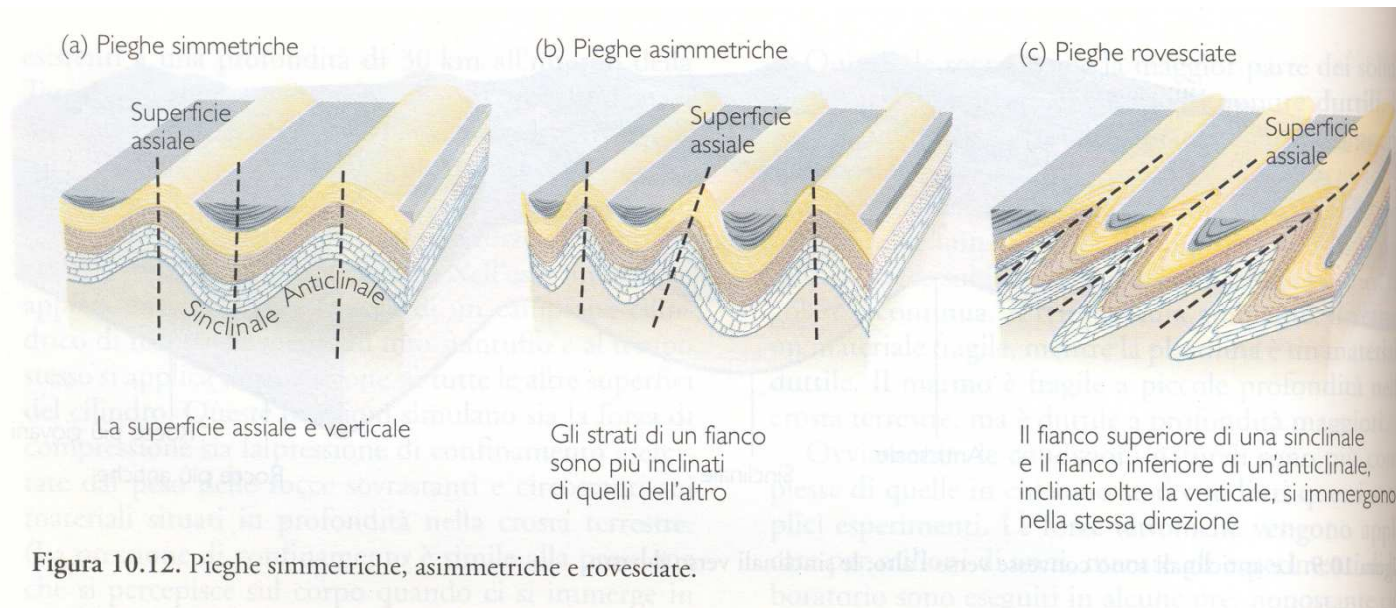


Figura 10.12. Pieghe simmetriche, asimmetriche e rovesciate.



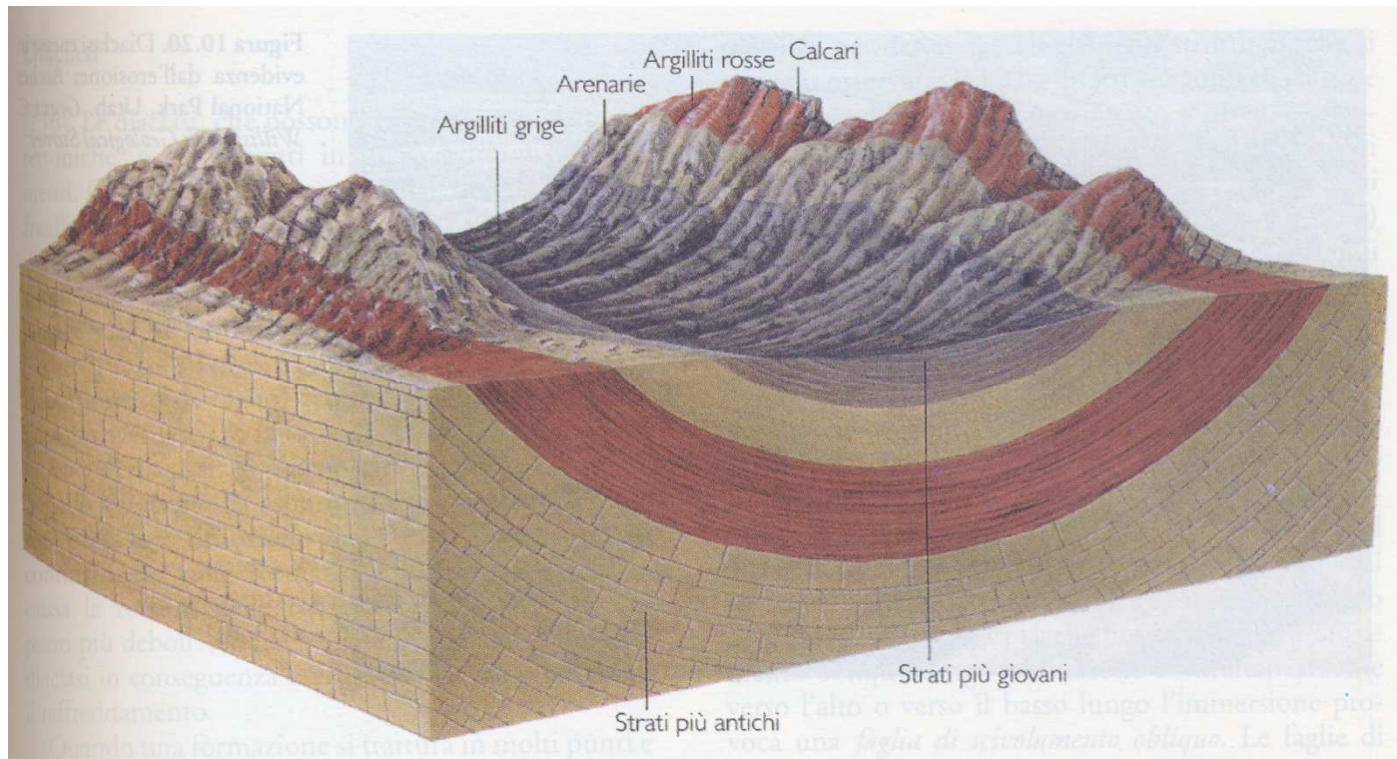
Figura 10.13. Piega rovesciata. *Geological Survey of Israel.*



Figura 10.16. La caratteristica configurazione circolare o ellittica degli affioramenti di una brachianticlinale. Gli strati più antichi sono nel nucleo; le formazioni adiacenti sono via via più giovani e si immergono nella direzione opposta al nucleo.



Figura 10.17. Una brachianticlinale erosa in rocce scure a circa 10 km a Est di Rawlins, nel Wyoming. L'auto e la ferrovia in basso a destra permettono di apprezzare le dimensioni. (Da J.S. Shelton, *Geology Illustrated*, W.H. Freeman, San Francisco, 1966.)



La deformazione delle rocce dipende dal tipo di sforzo esercitato. Esistono due tipi di fratture: le diaclasi e le faglie.

Una diaclasi è una frattura lungo la quale non si è prodotto un movimento consistente.

Una faglia è una frattura con spostamento relativo delle parti separate.

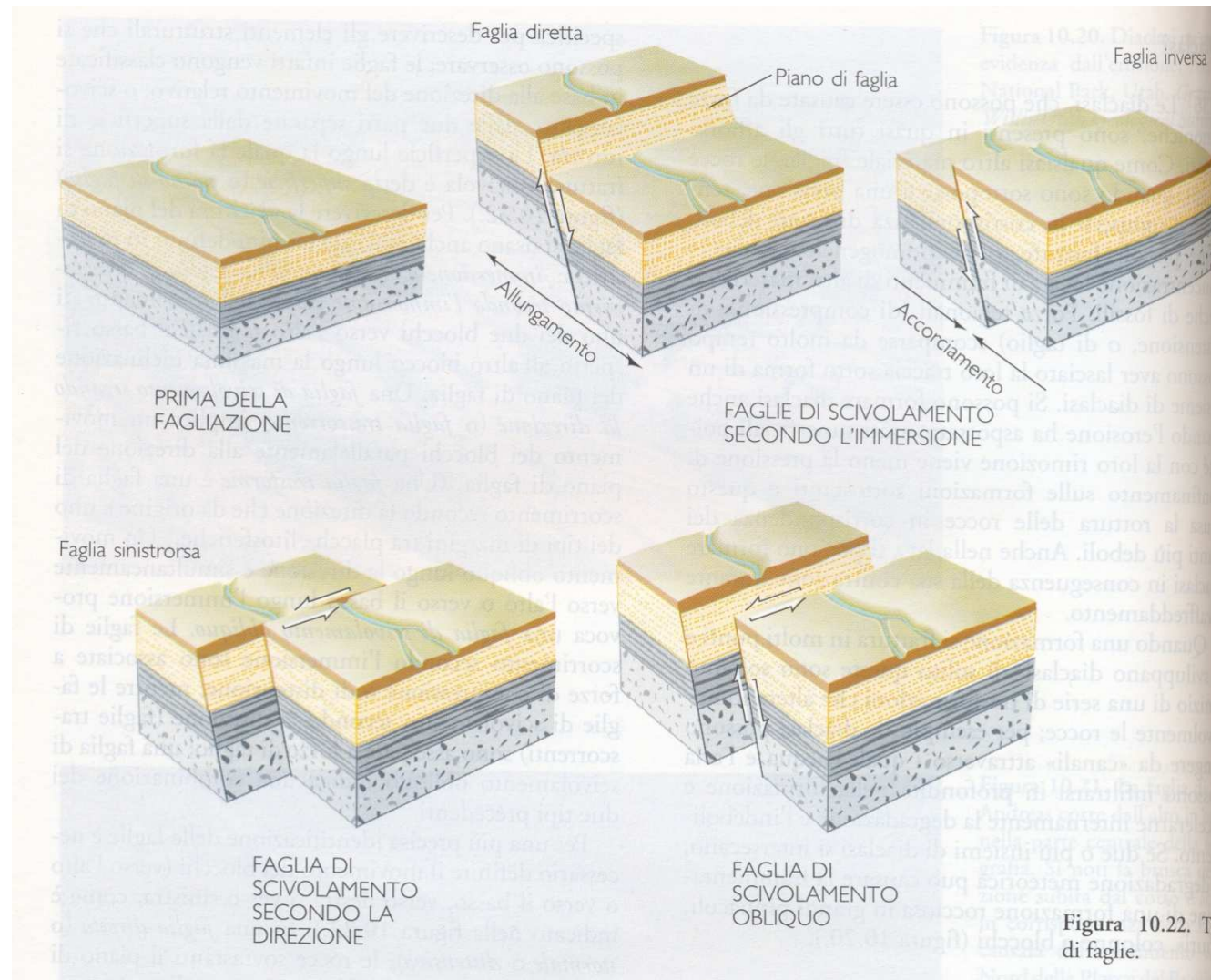
La superficie lungo la quale la formazione si frattura e scivola è detta superficie o piano di faglia.

faglie dirette o normali: una faglia si dice diretta quando il tetto scende rispetto al muro. In questo caso il settore di crosta terrestre è interessato da un regime tettonico distensivo o divergente (ad esempio in occasione dell'apertura di un rift). Solitamente tali faglie presentano un piano avente inclinazione elevata, attorno ai 60° .

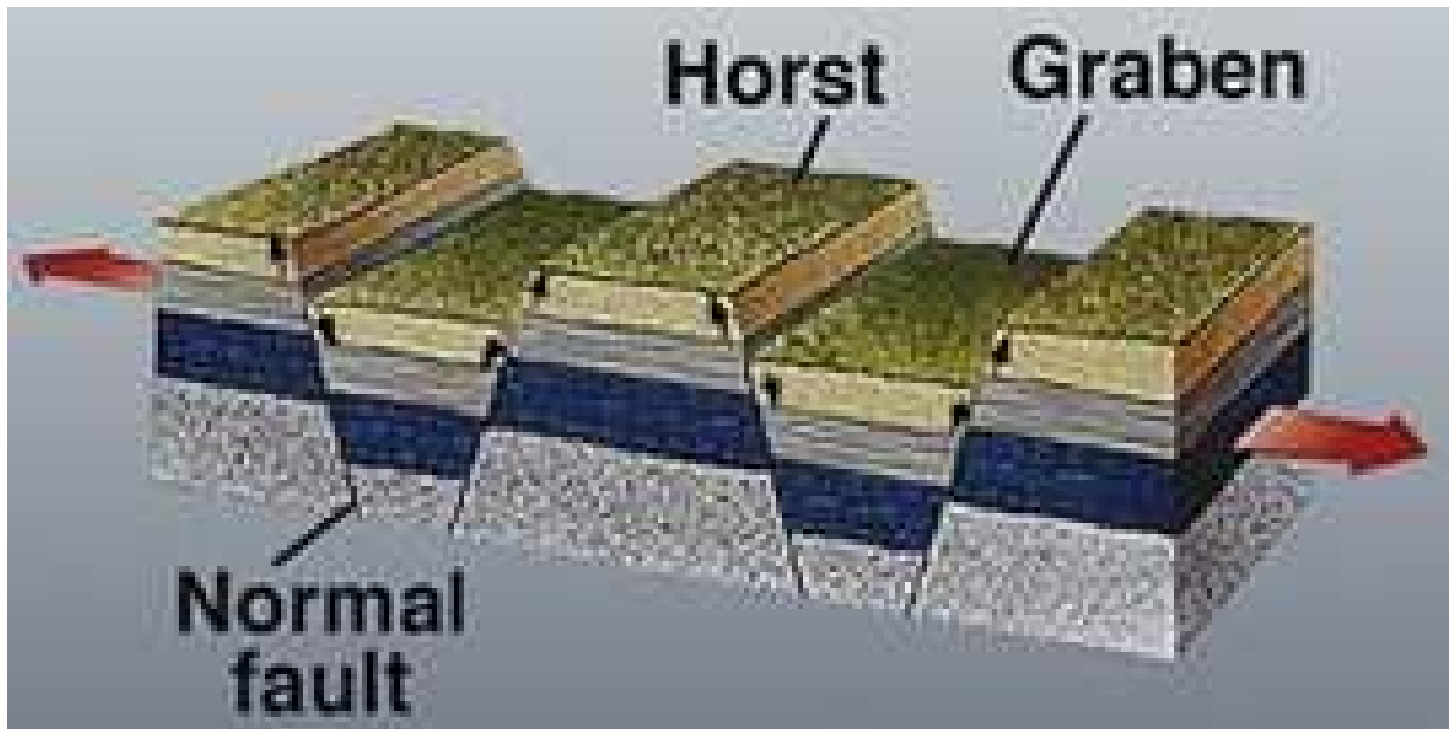
faglie inverse: una faglia si dice inversa se il tetto sale rispetto al muro. In questo caso il settore di crosta risulta raccorciato a causa di un campo di stress tettonico compressivo. Gli angoli del piano di faglia sono piuttosto bassi (attorno ai 30°). Nel caso di angoli molto bassi o nulli si parla di sovrascorrimenti.

faglie trascorrenti: una faglia si dice trascorrente se il piano di faglia è verticale con spostamento orizzontale relativo delle masse rocciose. Tali faglie sono distinte in destre o sinistre; il senso è determinabile ponendosi sulla linea di faglia e osservando il senso della dislocazione del blocco roccioso che si ha di fronte.

Una faglia inversa in cui l'inclinazione del piano di faglia è piccola, cosicché la spinta è soprattutto orizzontale, prende il nome di sovrascorrimento.



Fossa tettonica o rift valley: una depressione in cui un blocco appare sprofondato tra due blocchi adiacenti che sono stati allontanati l'uno dall'altro. Es. fosse tettoniche dell'Africa orientale, valle del Reno, fossa tettonica del Mar Rosso.







MOVIMENTI DI MASSA

Definizioni

- Movimenti in massa (*mass movements*): movimenti di masse di materiale sulla superficie della terra che avvengono prevalentemente in seguito all'azione della gravità
 - carattere non selettivo
 - generalmente la distanza di trasporto è ridotta (zona di erosione e di deposito a breve distanza)
 - esempi: *frane, sprofondamenti, valanghe, subsidenza*
- Trasporto in massa (*mass transport*): movimenti di masse di materiale che avvengono prevalentemente in seguito all'azione delle acque correnti superficiali.
 - carattere selettivo (condizionato dalla granulometria)
 - trasporto per distanze anche rilevanti

Quali sono i fattori che possono causare i movimenti di massa?

Sono principalmente tre:

1- acclività dei versanti

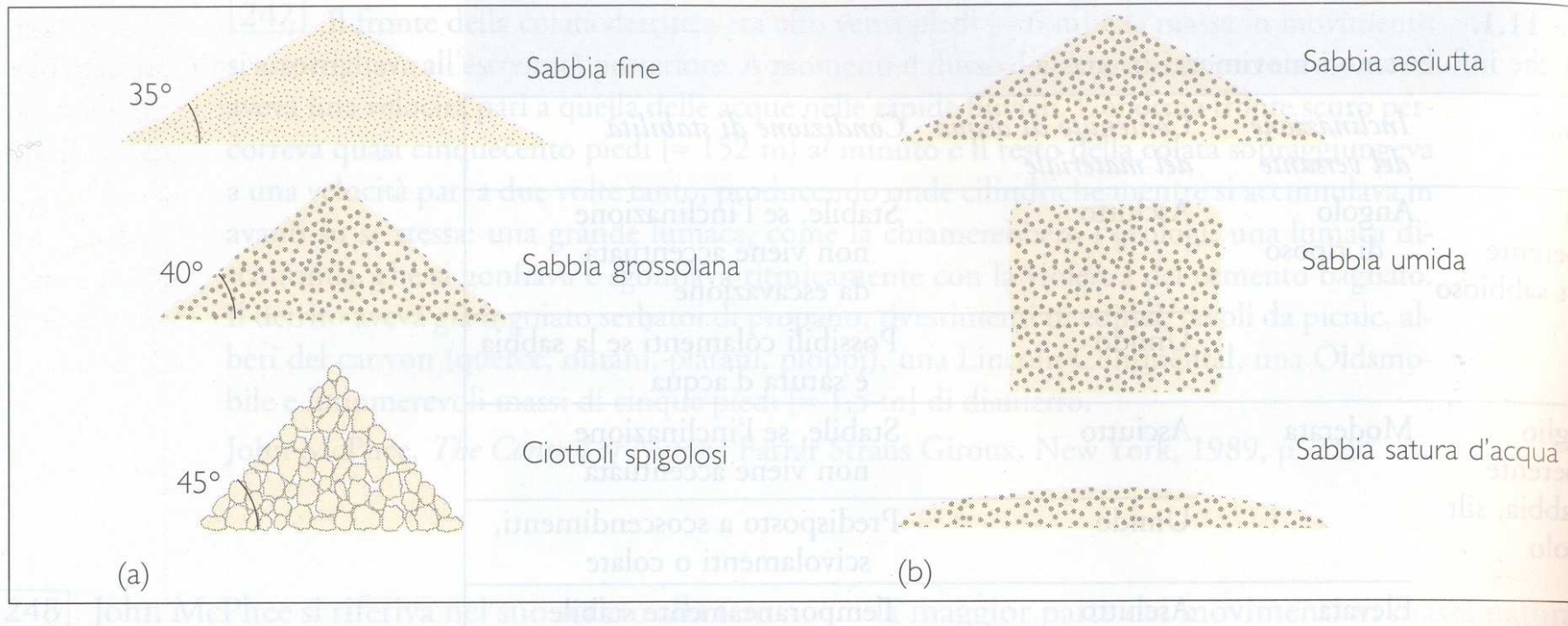
2- la natura dei materiali che costituiscono i versanti

3- la quantità d'acqua presente nei materiali.

Tabella 11.1.
Fattori che influenzano i movimenti in massa

<i>Materiale</i>	<i>Inclinazione del versante</i>	<i>Contenuto di acqua del materiale</i>	<i>Condizione di stabilità</i>
Sabbia incoerente o silt sabbioso	Angolo di riposo	Asciutto	Stabile, se l'inclinazione non viene accentuata da escavazione
		Umido	Possibili colamenti se la sabbia è satura d'acqua
Miscuglio incoerente di sabbia, silt e suolo	Moderata	Asciutto	Stabile, se l'inclinazione non viene accentuata
		Umido	Predisposto a scoscendimenti, scivolamenti o colate
	Elevata	Asciutto	Temporaneamente stabile
		Umido	Fortemente predisposto a scorrimenti o colate
Roccia fratturata e deformata	Da moderata a elevata	Asciutto o umido	Possibili frane di crollo o scorrimenti
Roccia massiva	Moderata	Asciutto o umido	Stabile
	Elevata	Asciutto o umido	Possibili frane di crollo o scorrimenti

Materiali incoerenti

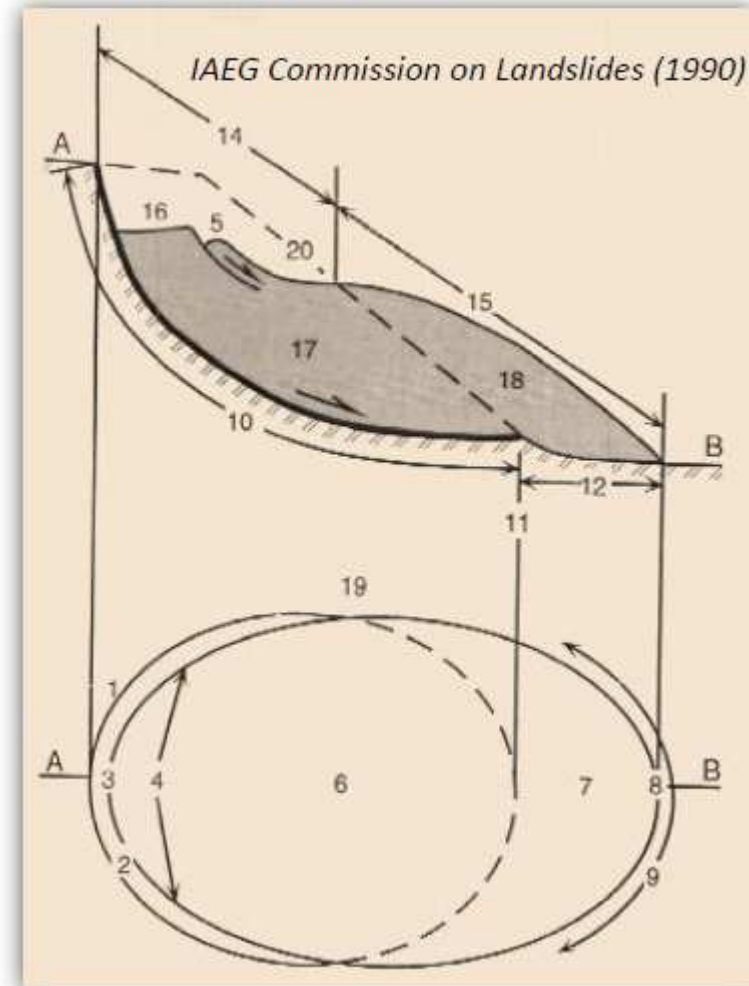


Materiali coerenti

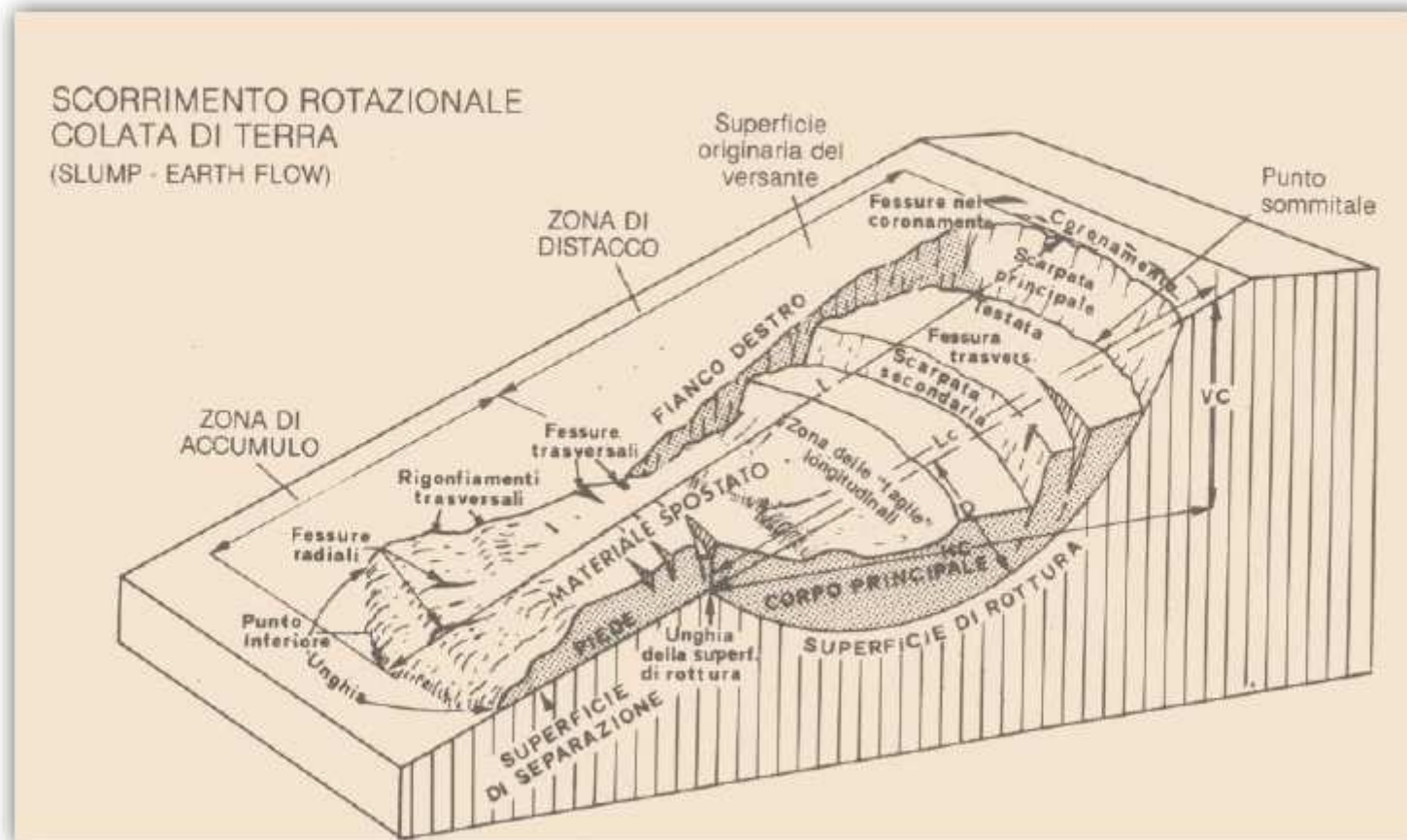
La resistenza al movimento dipende dall'attrito interno

Terminologia per la fisionomia

- 1) coronamento
- 2) scarpata principale
- 3) punto sommitale
- 4) testata
- 5) scarpata
- 6) corpo principale
- 7) piede
- 8) punto inferiore
- 9) unghia
- 10) superficie di rottura
- 11) unghia della superficie di rottura
- 12) superficie di separazione
- 13) materiale spostato (o franato)
- 14) zona di distacco (o di abbassamento)
- 15) zona di accumulo
- 16) distacco
- 17) massa distaccata (o abbassata)
- 18) accumulo
- 19) fianco
- 20) superficie originaria del versante

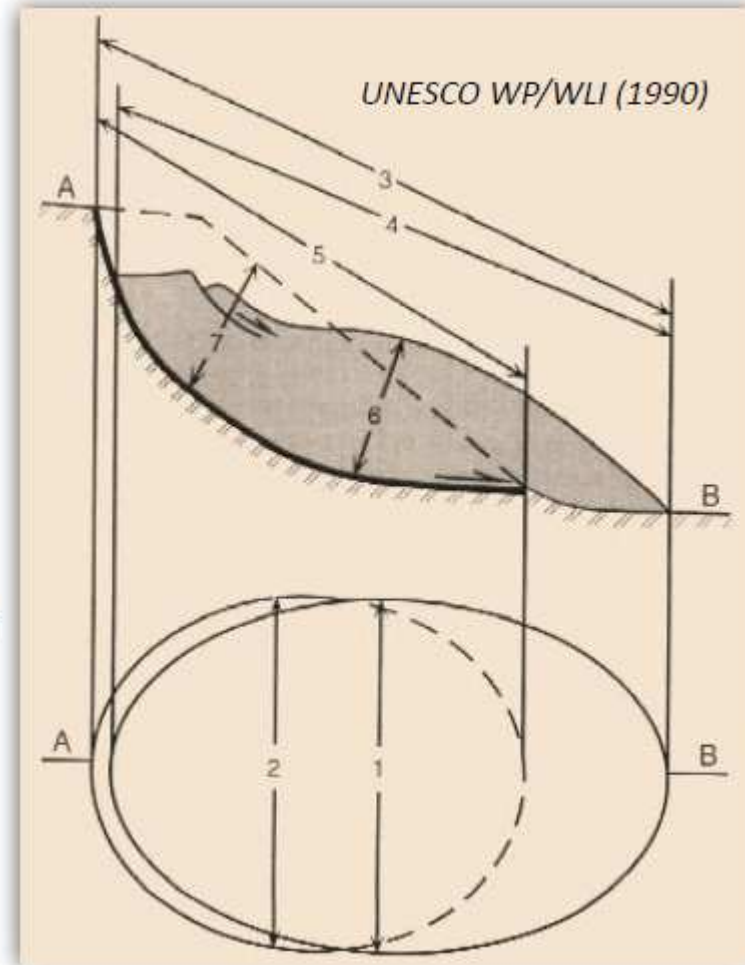


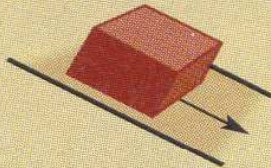
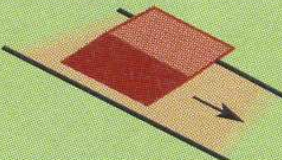
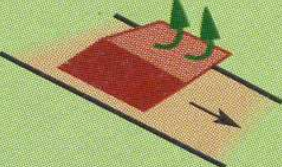
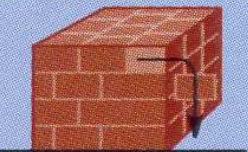
Terminologia per la fisionomia



Terminologia per la morfometria

1. larghezza della massa spostata W_d
2. larghezza della superficie di rottura W_r
3. lunghezza totale L
4. lunghezza della massa spostata L_d
5. lunghezza della superficie di rottura L_r
6. profondità della massa spostata D_d
7. profondità della superficie di rottura D_r
8. lunghezza della linea di mezzeria L_{cl}
9. dislivello H

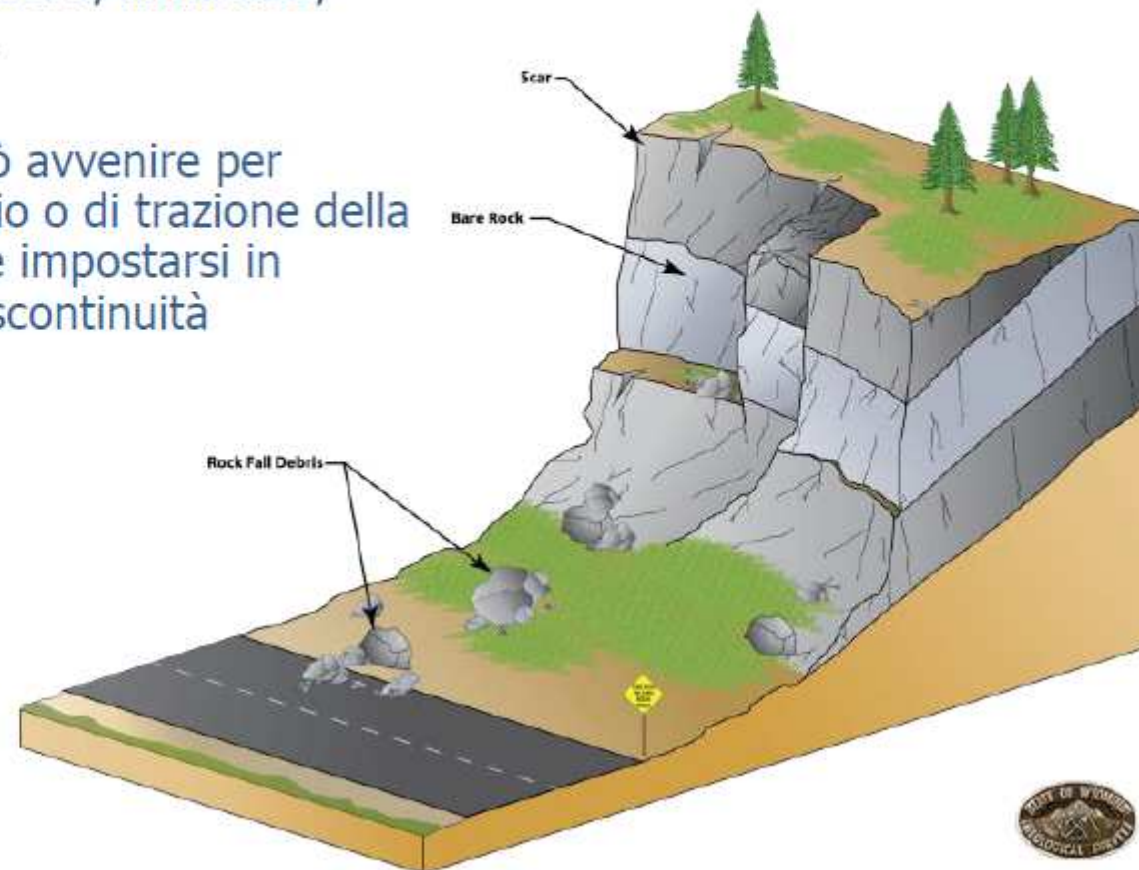


MECCANISMO		MATERIALE			VELOCITÀ
		Roccia	Suoli granulari fini	Suoli granulari grossolani	
SCIVOLAMENTO		Scoscendimento	Scoscendimento di terra	Scoscendimento di detrito	Lento
		Scivolamento in blocco	Scivolamento di terra	Scivolamento di detrito	Rapido
FLUSSO		Valanga di roccia	Colata di terra e fango, valanga	Colata di detrito, valanga	Molto rapido
		Creep	Creep	Creep	Estremamente lento
CROLLO		Crollo di roccia	Crollo di terra	Crollo di detrito	Estremamente rapido

Crollo (Fall)

Massa che si stacca da un versante molto acclive e che, successivamente, si muove per caduta libera, rimbalzo, rotolamento.

Il distacco può avvenire per rottura di taglio o di trazione della roccia, oppure impostarsi in superfici di discontinuità preesistenti.



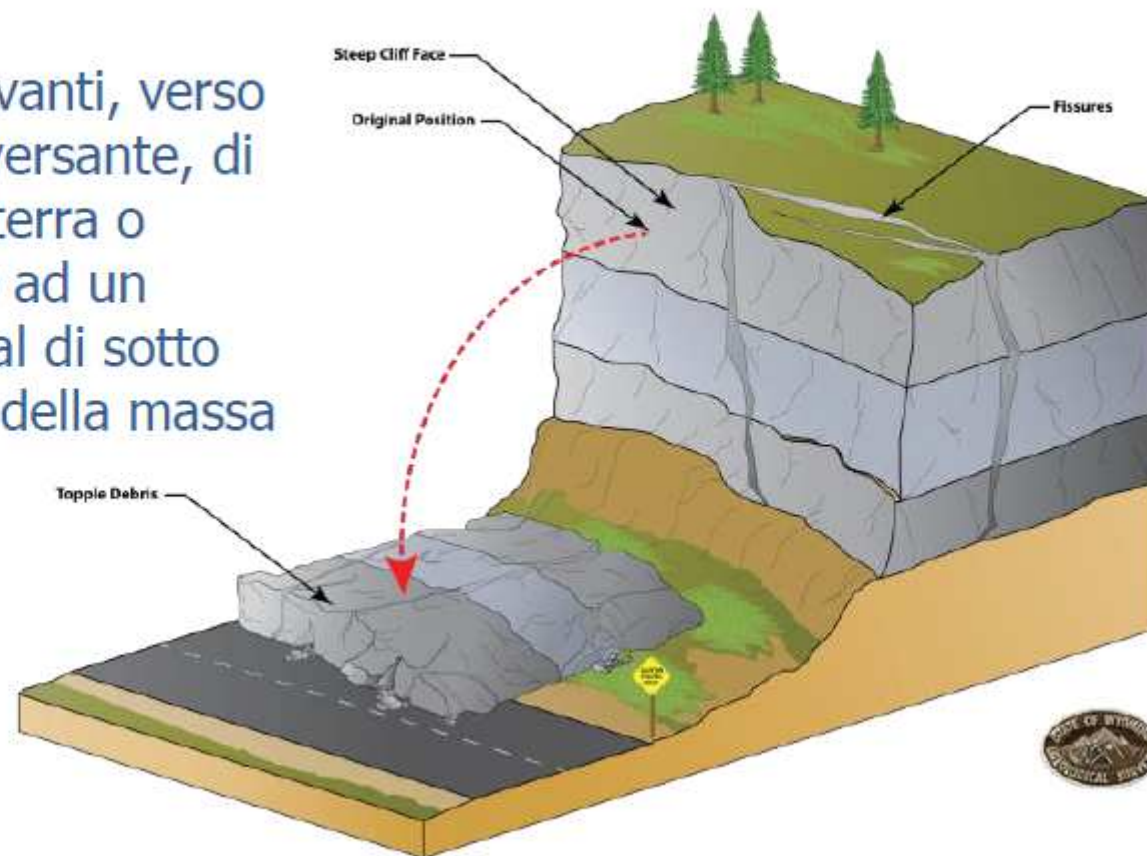
Crollo (Fall)



Zion National Park, USA

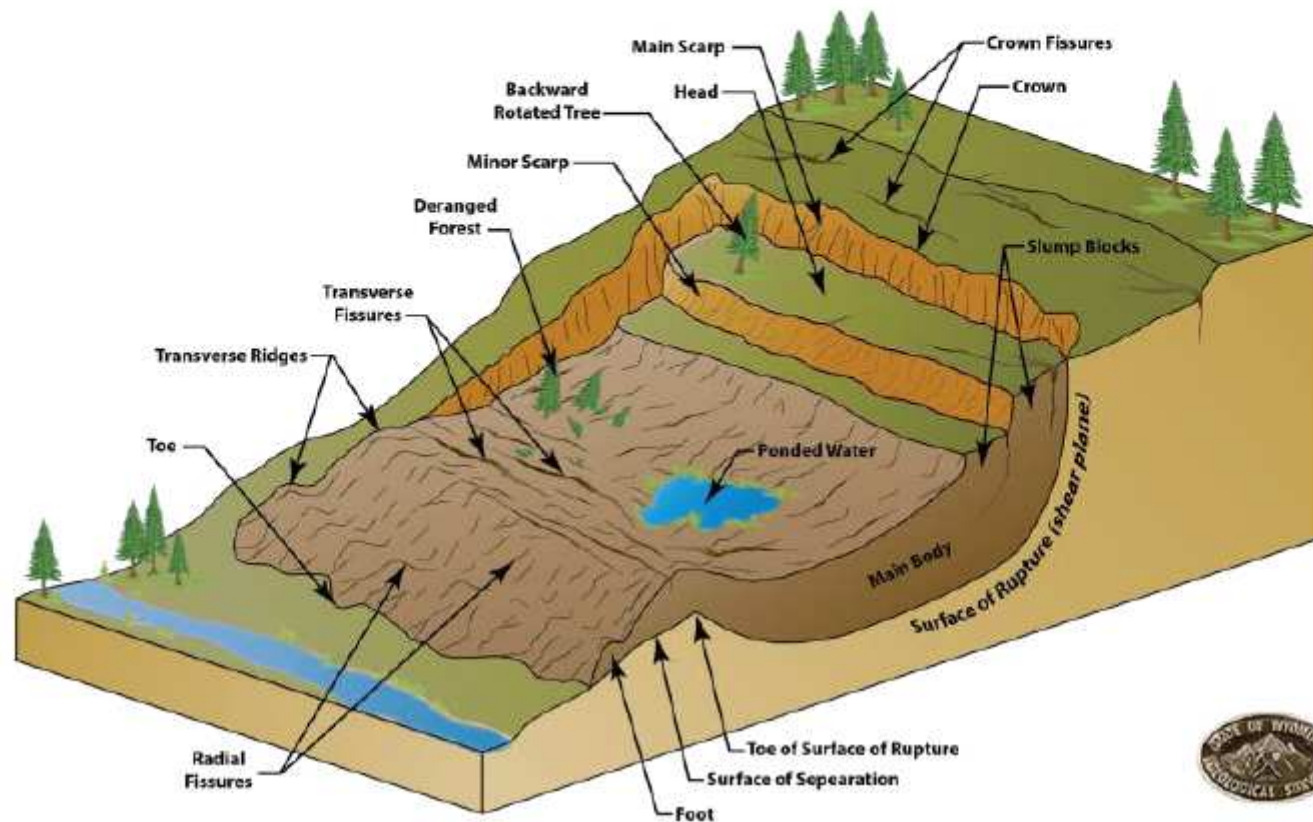
Ribaltamento (topple)

Rotazione in avanti, verso l'esterno del versante, di una massa di terra o roccia, intorno ad un punto situato al di sotto del baricentro della massa spostata.



Scivolamento (slide) - Rotazionale

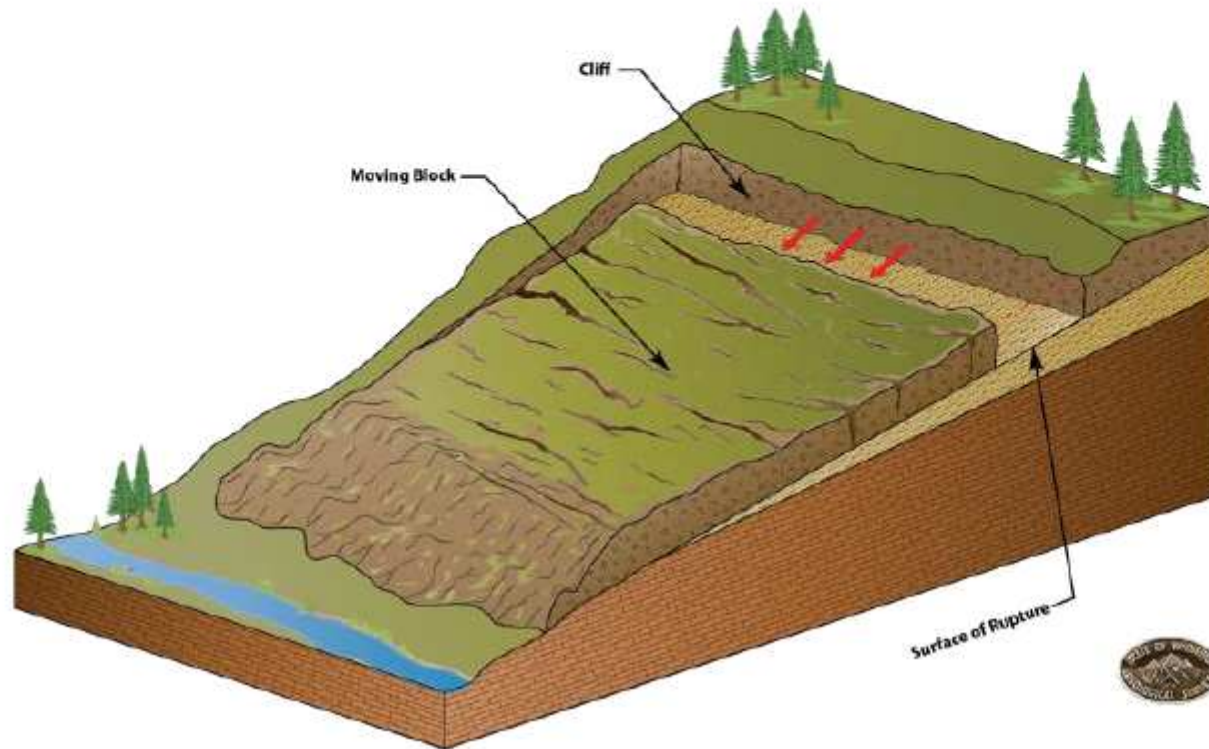
Movimento verso la base del versante di una massa di terra o roccia che avviene per deformazioni di taglio lungo una o più superfici o entro uno spessore limitato di materiale.





Scivolamento (slide) - Planare

Movimento verso la base del versante di una massa di terra o roccia che avviene per deformazioni di taglio lungo una o più superfici o entro uno spessore limitato di materiale.

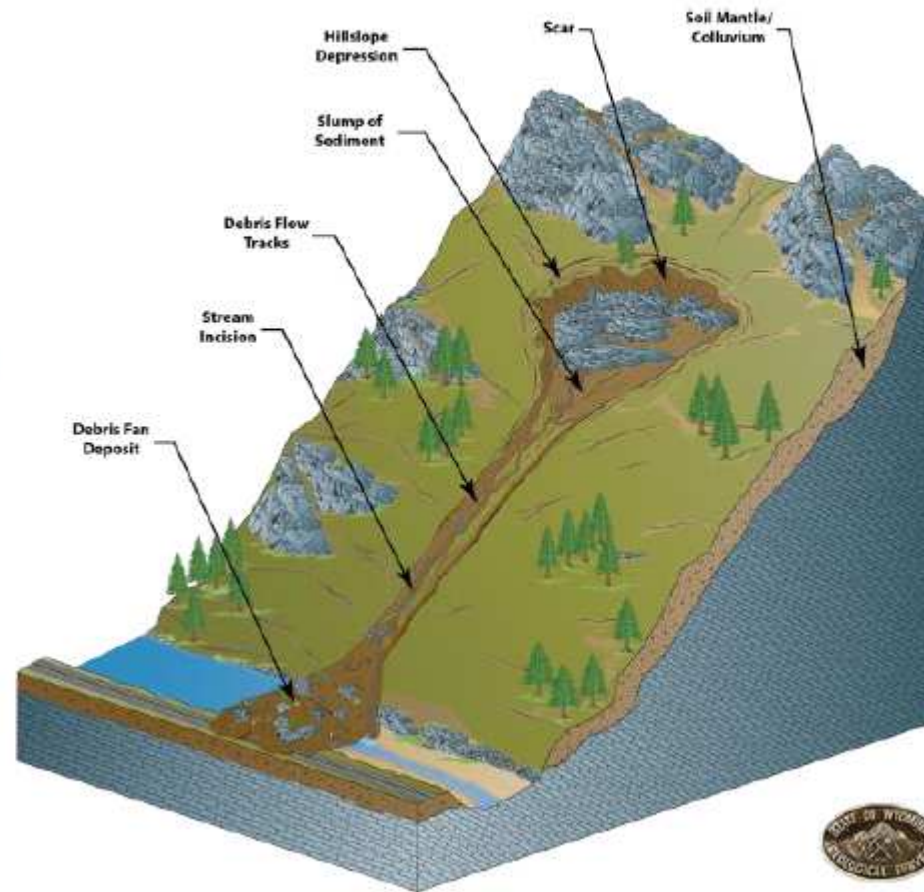


Colata o colamento (Flow)

Movimento distribuito in maniera continua all'interno della massa spostata.

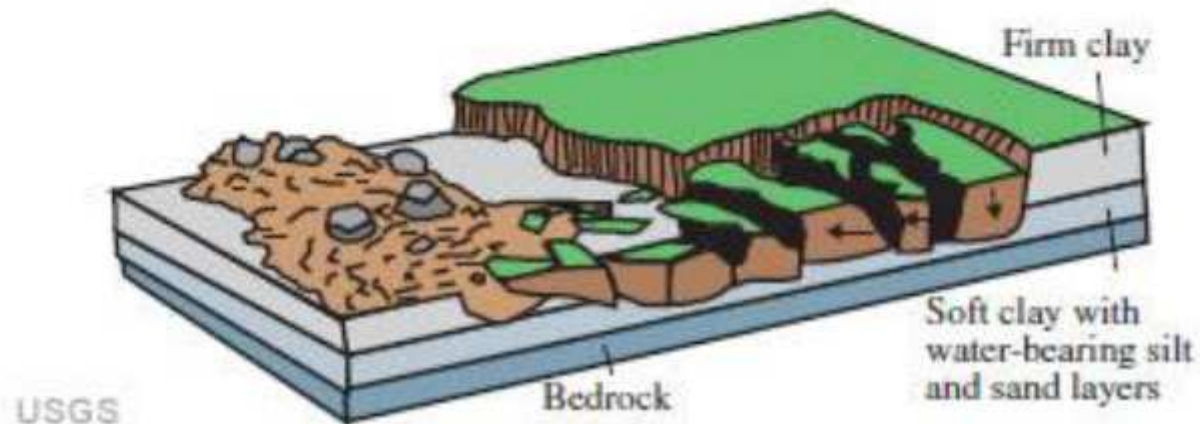
Le superfici di taglio, se presenti, sono multiple e spesso temporanee.

La distribuzione delle velocità nella massa spostata è analoga a quella all'interno di un fluido viscoso.

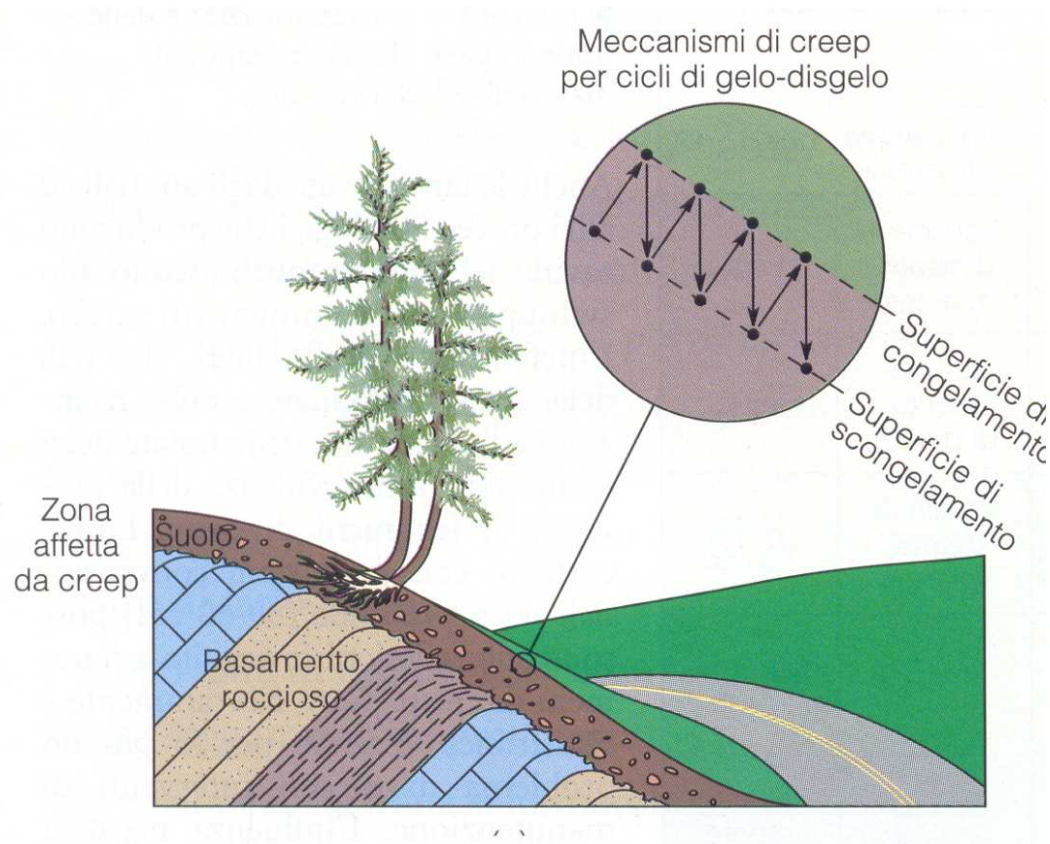


Espansione (spread)

Estensione e lieve subsidenza di un livello coesivo o di un ammasso roccioso in seguito alla deformazione e allo spostamento di un livello meno competente sottostante. La superficie di rottura non è una superficie di intensa deformazione di taglio.

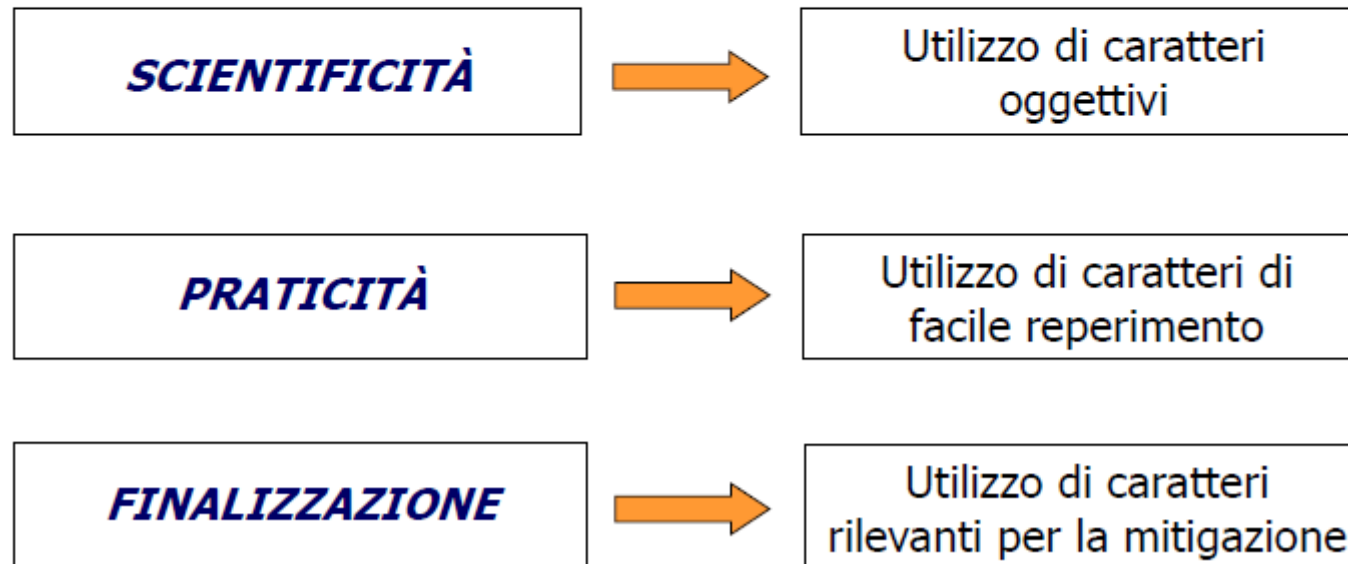


Creep: è il movimento verso valle, essenzialmente continuo e lento di suoli e rocce su versanti molto acclivi. Coinvolge sia i processi di gelo e disgelo sia quelli alternati di essiccamento ed imbibizione di un versante.



Principi di classificazione

- La classificazione è un problema concettuale nel quale si devono osservare “criteri di scientificità, finalizzazione e praticità” (*Carrara et al., 1985*)



Principali classificazioni fino al 1996

STOPPANI	1871	MIYABE	1935	VENZO & LARGAIOLLI	1968
A. PENCK	1874	LADD	1935	HUTCHINSON	1968
BALTZER	1875	HENNES	1936	SAVAGE	1968
MOLITOR	1894	SHARPE	1938	ZARUBA & MENCL	1969
PANTANELLI	1897	DI TELLA & BAY	1939	SKEMPTON & HUTCHINSON	1969
NEUMAYR	1898	MONTANARI	1940	VENZO & ULCIGRAI	1970
GUNTHER	1899	PRINCIPI	1945	DESIO	1971
DE MARCHI	1903	BENDEL	1948	BRUGNER & VALDINUCCI	1972
BRAUN	1907	MARESCA	1948	NEMCOCK et alii	1972
HOWE	1909	GORTANI	1948	VALLARIO & COPPOLA	1973
STINY	1910	IPPOLITO & COTECCHIA	1954	BLYTH & DE FREITAS	1974
ALMAGIA'	1910	SCHULTZ & CLEAVES	1955	NICOTERA	1975
ISSEL	1910	KRYNINE & JUDD	1957	VENZO	1976
TRABUCCO	1913	VARNES	1958	VARNES	1978
ROTIGLIANO	1916	DESIO	1959	CORNIELLO et alii	1980
W. PENCK	1924	PENTA	1959	HUTCHINSON	1988
TERZAGHI	1925	VENZO	1960	SASSA	1989
HEIM	1932	GOGUEL	1967	CRUDEN & VARNES	1996

Contenuto d' acqua

- **SECCO:** assenza di acqua
il materiale si comporta come un solido
- **UMIDO:** acqua non libera
il materiale si comporta come un solido plastico
- **BAGNATO:** acqua libera
il materiale si comporta in parte come un liquido
- **MOLTO BAGNATO:** materiale fluido
il materiale fluisce come un liquido

Velocità

IUGS/WGL (1995)

classe	descrizione	danni osservabili	scala delle velocità	
1	ESTREM. LENTO	Impercettibile senza strumenti di monitoraggio. Costruzione di edifici possibile con precauzioni.	16 mm/anno	$5 \cdot 10^{-10}$ m/s
2	MOLTO LENTO	Alcune strutture permanenti possono non essere danneggiate dal movimento.	1.6 m/anno	$5 \cdot 10^{-8}$ m/s
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 lo spostamento totale non è troppo grande durante una particolare fase di accelerazione.	13 m/mese	$5 \cdot 10^{-6}$ m/s
4	MODERATO	Alcune strutture temporanee o poco danneggiabili possono essere mantenute	1.8 m/h	$5 \cdot 10^{-4}$ m/s
5	RAPIDO	Evacuazione possibile. Distruzione di strutture, immobili ed installazioni permanenti.	3 m/min	$5 \cdot 10^{-2}$ m/s
6	MOLTO RAPIDO	Perdita di alcune vite umane. Velocità troppo elevata per permettere l'evacuazione delle persone.	5 m/s	5 m/s
7	ESTREM. RAPIDO	Catastrofe di eccezionale violenza. Edifici distrutti per l'impatto del materiale spostato. Molti morti. Fuga impossibile.		

Attività di monitoraggio

Indagine

Raccolta di tutte le informazioni utili per la previsione degli scenari di rischio.

Monitoraggio s.s.

Insieme delle azioni finalizzate al controllo dell'evoluzione di una grandezza variabile nel tempo, mediante opportuna strumentazione.

Finalità di un sistema di monitoraggio

- Controllare l'evoluzione del fenomeno
- Determinare il meccanismo di innesco
- Definire i rapporti tra movimento e condizioni idrauliche
- Verificare l'efficacia degli interventi di stabilizzazione
- Supportare le decisioni in ambito di pianificazione
- Allertare le popolazioni esposte a rischio
- Prevedere l'evoluzione temporale del fenomeno franoso

Principali aspetti da valutare

- Superficie e volumi coinvolti (magnitudo)
- Meccanismo di rottura
- Istante di rottura
- Tipo di movimento
- Distanza di propagazione

Progettazione sistema di monitoraggio

- Definizione degli scenari di rischio (massimo scenario credibile)
- Stabilire i parametri da investigare e definirne i limiti di variabilità
- Selezionare il tipo di strumentazione più idonea
- Individuare l'ubicazione più corretta per gli strumenti
- Prevedere la misurazione dei fattori meteo (precipitazioni, pressione, temperatura, vento ecc.) che possono influenzare il comportamento della frana e dei sensori
- Pianificare la raccolta, elaborazione, interpretazione ed implementazione dei dati
- Pianificare la calibrazione e manutenzione della strumentazione

Parametri per la scelta del sistema

- Tipologia del fenomeno
- Velocità del fenomeno – attività
- Accessibilità
- Condizioni in cui si opera (emergenza / post emerg.)
- Tempo a disposizione
- Elementi a rischio presenti
- Risorse economiche disponibili
- Capacità di mantenere il sistema in efficienza
- Disponibilità di rete elettrica – telefonica
- Esposizione (Gps – pannelli fotovoltaici)
- Clima
- Protezione dei componenti da atti vandalici - furti

Strumenti per il monitoraggio superficiale

- Spie
- Griglie
- Clinometri o tiltmetri
- Estensimetri
- Distometri
- Strumenti topografici
- Global Position System
- Interferometria radar
- Laser scanning

Spie

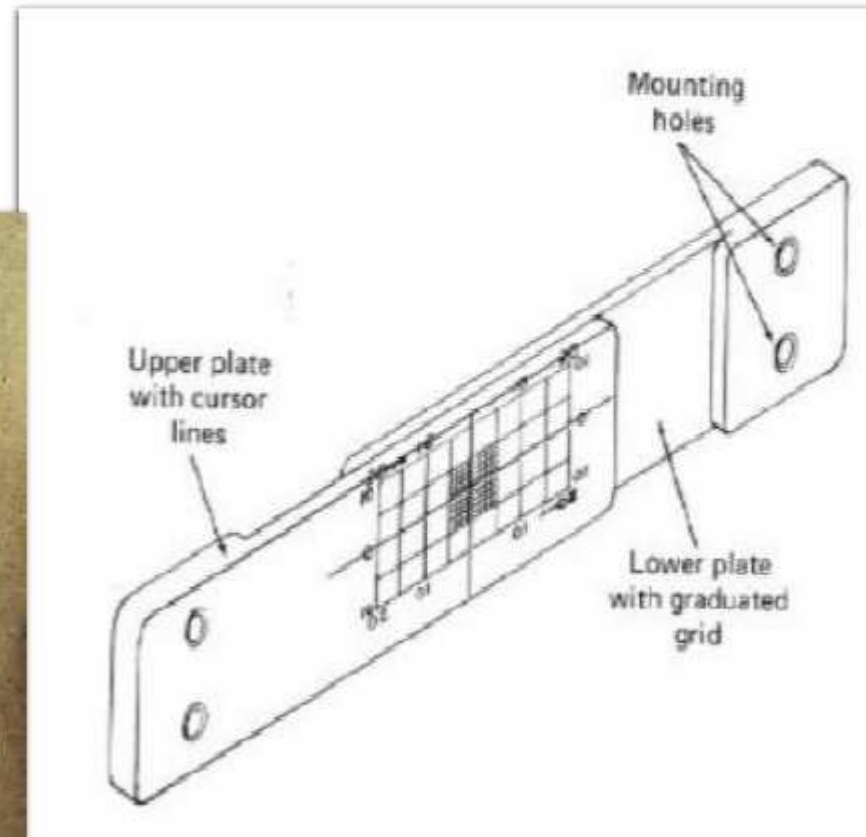
Sbarrette di vetro o di gesso che vengono cementate ai due lati di una fessura (per es. su un edificio sul corpo di frana)

La rottura della sbarretta indica la presenza di movimenti differenziali in atto



Griglie

Rispetto alle spie forniscono anche un'indicazione dell'entità del movimento



Distometri



Fessurimetri



Estensimetri

Misura della deformazione di un elemento metallico a
cavallo di una frattura o di una lesione strutturale



Monitoraggio profondo

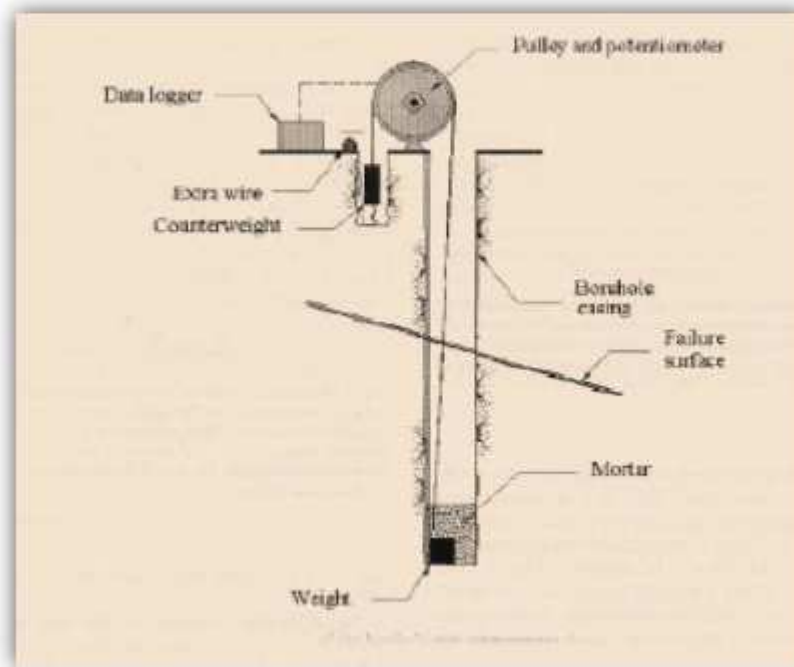
Strumentazione

- Estensimetro a filo (singolo, multiplo)
- Inclinometro (singolo, a catena, motorizzato)
- Differential Monitoring of Stability (DMS)
- Time Domain Reflectometry (TDR)
- Piezometri

Estensimetri in fori di sondaggio

- Cavi estensimetrici inguainati cementati in un foro di sondaggio (es. all'esterno di un tubo inclinometrico)
- La variazione di lunghezza del cavo, registrata mediante un micrometro, permette di stabilire se si verificano deformazioni in profondità
- Consente di stimare la velocità di deformazione mediante la possibilità di connettere il micrometro con un sistema di registrazioni dati in continuo
- È possibile ricavare informazioni sulla distribuzione dei movimenti in profondità solo se si dispone di sistemi multibase (cavi estensimetrici ancorati a profondità diverse).

Estensimetro singolo



Inclinometri

- È lo strumento tradizionale più usato per il monitoraggio delle frane
- Consente di misurare:
 - La profondità della superficie di rottura
 - Lo spessore della superficie di rottura
 - L'entità dello spostamento
 - La velocità del movimento
 - La direzione del movimento

Differential monitoring of stability (DMS)

- 'Catena di inclinometri, automatizzabile
- Costi elevati



Figure 3. DMS-IL



TDR

- La tecnica si basa sull'uso di cavi coassiali costituiti da un materiale conduttore ricoperto da materiale dielettrico
- Lungo il cavo viene inviato un segnale elettrico; eventuali alterazioni della geometria della sezione causano un cambiamento nella impedenza che genera un' onda riflessa, misurata con un oscilloscopio
- Poiché la velocità di propagazione dell'onda è una caratteristica intrinseca del cavo, le misure danno indicazioni sulla posizione dell'anomalia e sulla intensità della deformazione

Monitoraggio profondo - piezometri

Obiettivi:

- Correlazione tra livelli piezometrici e spostamenti
- Correlazione tra afflussi meteorici e piezometria
- Dati di input per analisi di stabilità

Tipi di piezometri

Senza diaframma

- A tubo aperto
- Idraulici a due tubi

Con diaframma

- Pneumatico
- A corda vibrante
- A resistenza elettrica

Article

Mineralogical and Geotechnical Characterization of the Clay Layers within the Basal Shear Zone of the 1963 Vajont Landslide

Alberto Bolla ^{1,*} , Paolo Paronuzzi ¹, Daniela Pinto ² , Davide Lenaz ³  and Marco Del Fabbro ¹

¹ Polytechnic Department of Engineering and Architecture, University of Udine, 33100 Udine, Italy; paolo.paronuzzi@uniud.it (P.P.); marco.delfabbro@uniud.it (M.D.F.)

² Department of Earth and Geoenvironmental Sciences, Aldo Moro University of Bari, 70125 Bari, Italy; daniela.pinto@uniba.it

³ Department of Mathematics and Geosciences, University of Trieste, 34128 Trieste, Italy; lenaz@units.it

* Correspondence: alberto.bolla@uniud.it; Tel.: +39-0432-558738

Received: 17 August 2020; Accepted: 3 September 2020; Published: 6 September 2020



Abstract: The 1963 Vajont landslide is a reference example of large rockslides involving clay interbeds emplaced in sedimentary rock masses in correspondence with the basal rupture zone (thinly stratified cherty limestone of the Fonzaso Formation dated to Middle–Upper Jurassic). The basal shear zone of the 1963 Vajont landslide was made up of a chaotic assemblage of displaced rock masses, limestone angular gravel, and spread clay lenses. The mineralogical investigations showed that the clays are characterized by complex assemblages of illite/smectite mixed layers (36–96%) admixed with variable amounts of calcite (4–64%) and quartz (0–6%). The clay layers show highly variable plasticity properties and shear strength characteristics. The samples with a large prevalence of clay mineral content (CM) (CM > 79%) are characterized by low values of the residual friction angle (6.7–14.9°), whereas clay materials characterized by a higher content of granular minerals (calcite and quartz) clearly show greater friction angle values (19.5–26.7°). The high permeability of the limestone angular gravel, which caused a rapid reservoir-induced inflow (1960–1963), together with the low friction angle of the clay layers were responsible for the overall shear strength reduction in correspondence with the basal rupture zone, thus favoring the huge sliding on 9 October 1963.

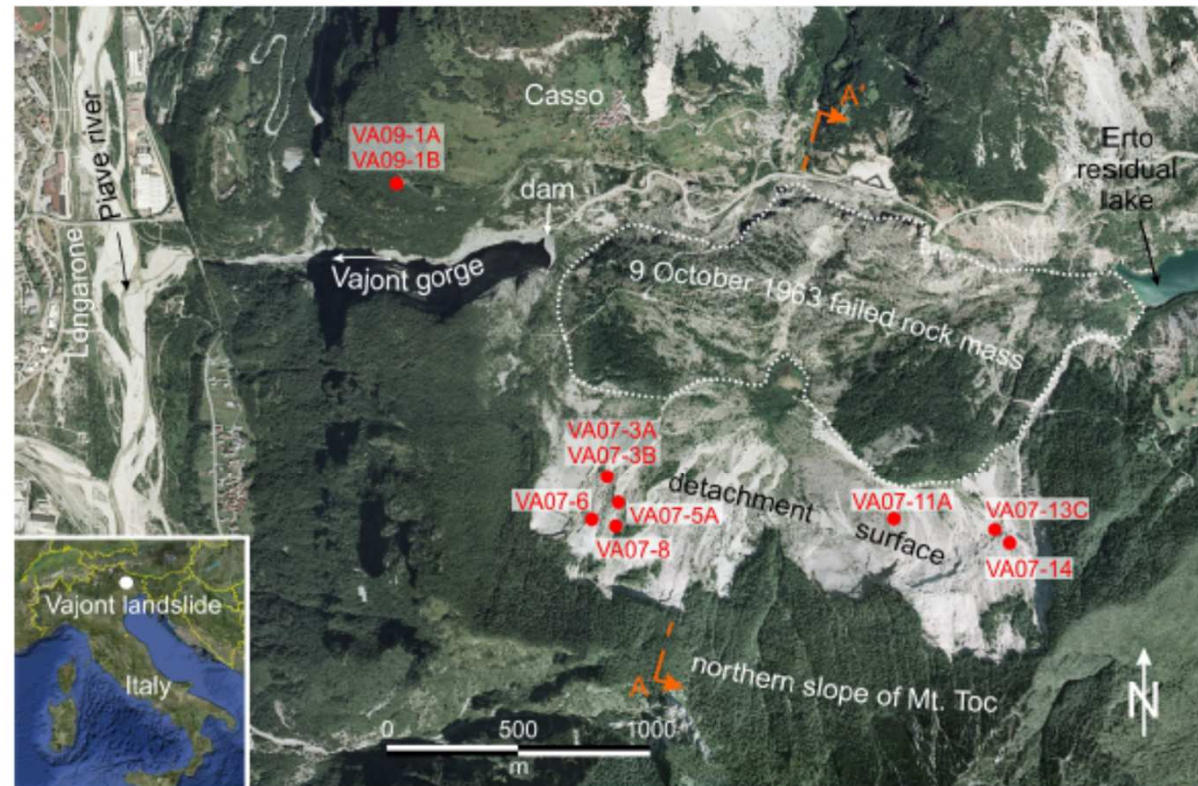


Figure 1. Orthophoto of the final stretch of the Vajont valley showing the detachment surface and the failed rock mass of the 1963 Vajont landslide. The location of the clay samples analyzed in the present study and the trace of the geological cross-section are also shown.

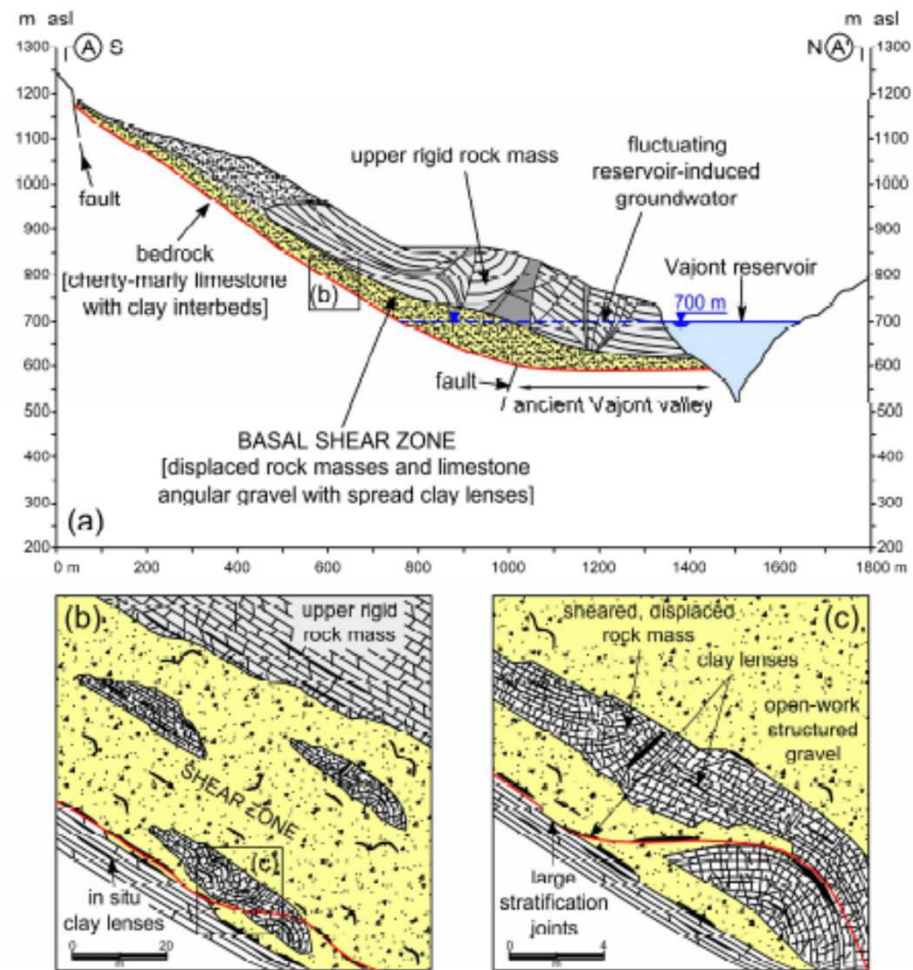


Figure 3. (a) Geological cross-section of the Vajont slide before 9 October 1963 displaying the thick shear zone interposed between the upper rock mass and the underlying bedrock. (b,c) The failure surface involved different materials within the basal shear zone (modified figure from [24]).



Figure 4. (a) Failure scar of the 1963 Vajont landslide, showing widespread presence of remnants of the basal shear zone. The location and code of some clay samples are also shown. (b) Basal contact between the main rupture surface and the overlying debris of the shear zone. (c) Displaced and stratified rock mass “wrapped” by a layer made up of angular gravel.

Table 3. Geotechnical index properties and residual friction angles of clay samples from Vajont.

Sample	Sampling Location	Grain-Size Distribution				Liquid Limit	Plastic Limit	Plasticity Index	Activity Index	Residual Friction Angle
		G (%)	S (%)	M (%)	CF (%)	LL (%)	PL (%)	PI (%)	AI (-)	φ_{res} (°)
VA07-3A	Failure scar, West	15	11	49	25	52	22	30	1.2	11.1–14.9
VA07-3B	Failure scar, West	15	15	43	27	62	37	25	0.9	–
VA07-5A	Failure scar, West	15	28	38	18	38	17	21	1.2	25.1–26.7
VA07-6	Failure scar, West	18	19	37	25	67	31	36	1.4	8.9–10.8
VA07-8	Failure scar, West	29	28	20	23	62	24	38	1.7	19.5–22.5
VA07-11A	Failure scar, East	2	13	26	59	82	28	54	0.9	6.8–8.5
VA07-13C	Failure scar, East	9	19	20	52	89	30	59	1.2	7.5–9.1
VA07-14	Failure scar, East	3	8	26	63	62	31	31	0.5	–
VA09-1A	Casso	3	40	26	31	77	39	38	1.2	6.7–9.7
VA09-1B	Casso	1	35	39	25	71	43	28	1.1	–

Legend: G = gravel; S = sand; M = silt; CF = clay fraction.

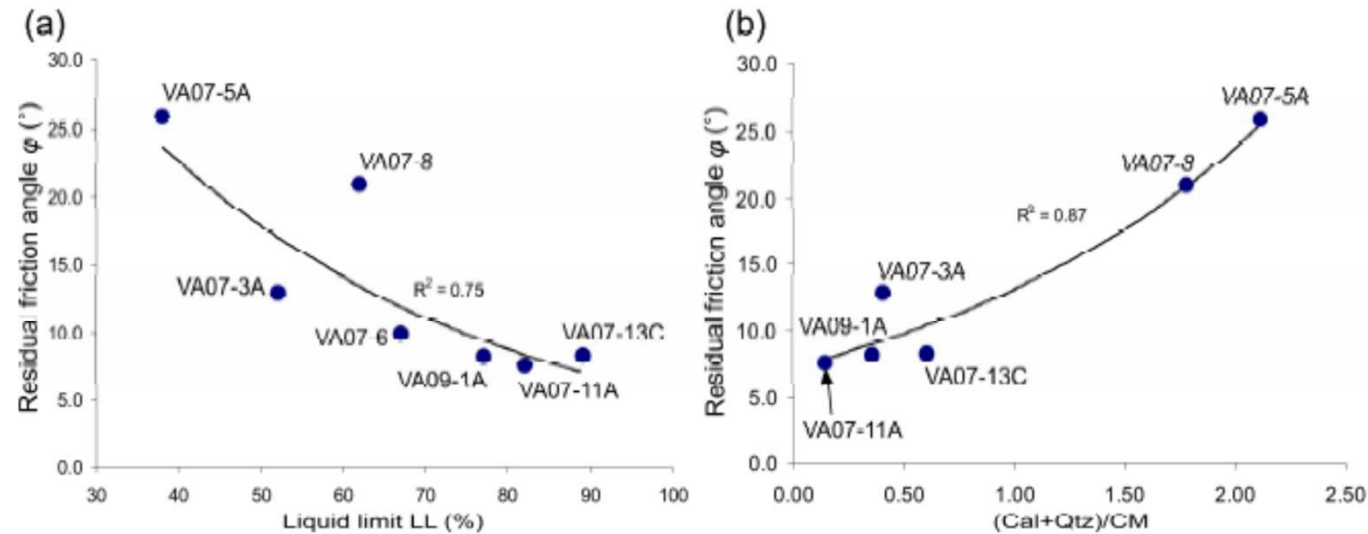
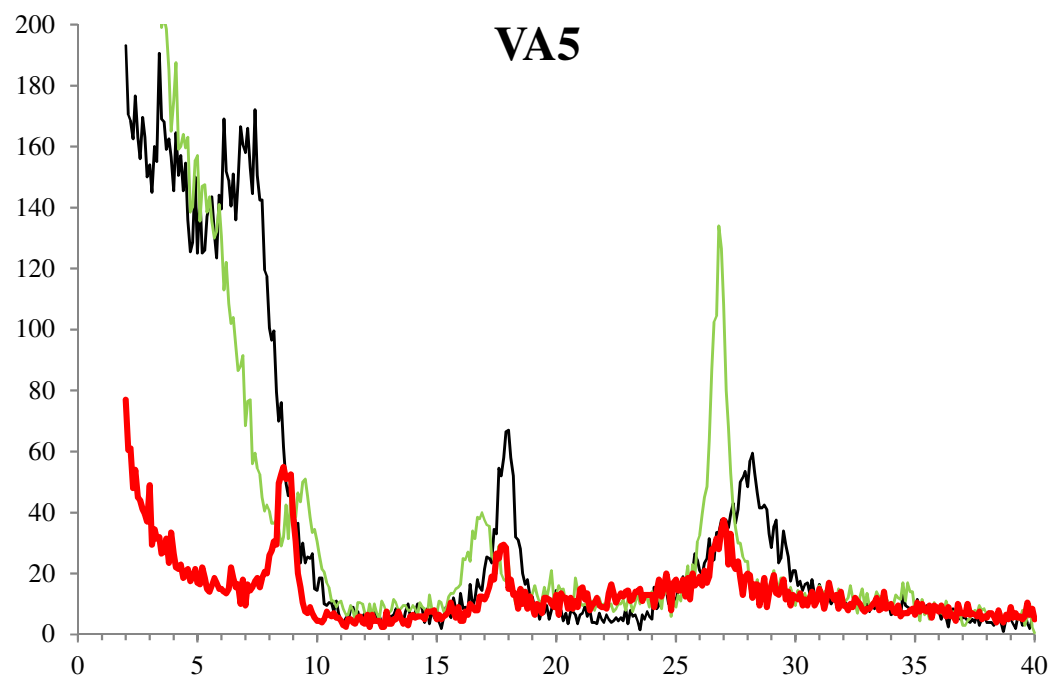
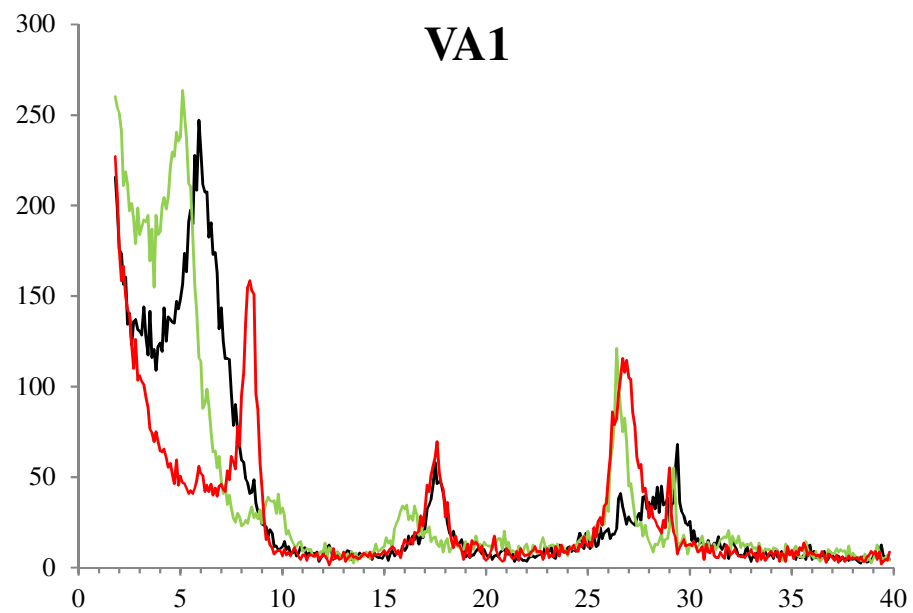


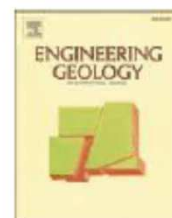
Figure 11. Correlation diagrams for some selected clay samples from Vajont, showing (a) residual friction angle vs. liquid limit and (b) residual friction angle vs. (calcite + quartz)/clay minerals ratio.





Contents lists available at ScienceDirect

Engineering Geology

journal homepage: www.elsevier.com/locate/enggeo

The clays involved in the 1963 Vajont landslide: Genesis and geomechanical implications

Paolo Paronuzzi^a, Alberto Bolla^{a,*}, Daniela Pinto^b, Davide Lenaz^c, Massimo Soccà^a

^a Dipartimento Politecnico di Ingegneria e Architettura, Università degli Studi di Udine, via Cotonificio 114, 33100 Udine, Italy

^b Dipartimento di Scienze della Terra e Geoambientali, Università degli Studi di Bari A. Moro, via Orabona 4, 70125 Bari, Italy

^c Dipartimento di Matematica e Geoscienze, Università degli Studi di Trieste, via Weiss 8, 34127 Trieste, Italy

ARTICLE INFO

Keywords:

Vajont landslide

Clay

Illite/Smectite mixed layer

Shear strength

Volcanic ash

Jurassic tephra

ABSTRACT

The catastrophic Vajont landslide that occurred on 9 October 1963 caused about 2000 deaths when 270–300 Mm³ of rock and debris slid from the northern slope of Mt. Toc into the newly created artificial reservoir, displacing some huge water waves that flooded the nearby villages. The 1963 slide was an en-block remobilisation of a prehistoric rockslide lying on the southern reservoir bank. Basal sliding took place within a complex lithostratigraphic sequence of cherty-marly limestones and clay interbeds belonging to the Fonzaso Formation of Upper Jurassic age. In this work, we investigate the geological origin and provenance of the Vajont clays according to the results of mineralogical and geochemical analyses performed on several clay samples which were collected from the landslide failure surface and the same limestone sequence in the surrounding area. The sampled clayey materials contained variable amounts of clay minerals (36–96%), calcite (4–64%) and quartz (0–6%). The dominant clay minerals were illite/smectite (I/S) mixed layers with a high illite content (85–50%), which was consistent with the high percentage of K₂O (1.17–5.77%). The Vajont clays included in the Fonzaso Fm. can be referred to as K-bentonites and can be interpreted as distinct deposits of volcanoclastic materials (tephra), representing the sedimentary inputs of volcanic ashes that interrupted the “normal” calcareous sedimentation during the late Oxfordian–upper Tithonian (158–145 Ma). The soft clay interbeds played a different mechanical role in the occurrence of the prehistoric rockslide and the 1963 en-block remobilisation. When referring to the ancient slope failures, distinct clay-rich layers that were concentrated within some specific lithostratigraphic intervals of the Jurassic cherty limestone sequence caused a localised decrease in the available shear strength, allowing for relative shear displacements along the dip-slope bedding planes. This caused additional shear/tensile fracturing of limestone beds and the formation of a stepped basal failure surface. During the 1963 remobilisation, the clay layers contributed to the average shear strength decrease of the debris material forming the basal shear zone of the slide, but the main triggering factor was the increase in pore pressures caused by the reservoir-induced groundwater inflow.



Fig. 1. Aerial view of the Vajont dam area shortly after the disaster that occurred on 9 October 1963, showing the 300 Mm³ landslide mass that filled the artificial reservoir. This picture (available at <https://www.ilpost.it/2013/10/09/il-disastro-del-vajont/vajont-dam/>, Copyright holder: Associated Press Photo) was taken on 16 November 1963 and is one of the first colour pictures of the Vajont landslide after the catastrophe.

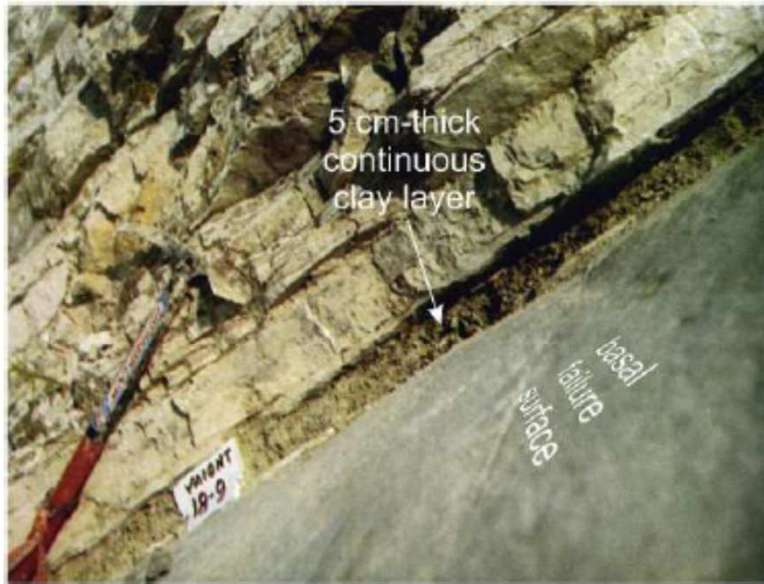


Fig. 2. Basal clay interbed as exhumed by Hendron and Patton during their field work on the failure surface; location 18-9 is close to VA15-166 of this study (photo modified from [Hendron and Patton, 1985](#)).

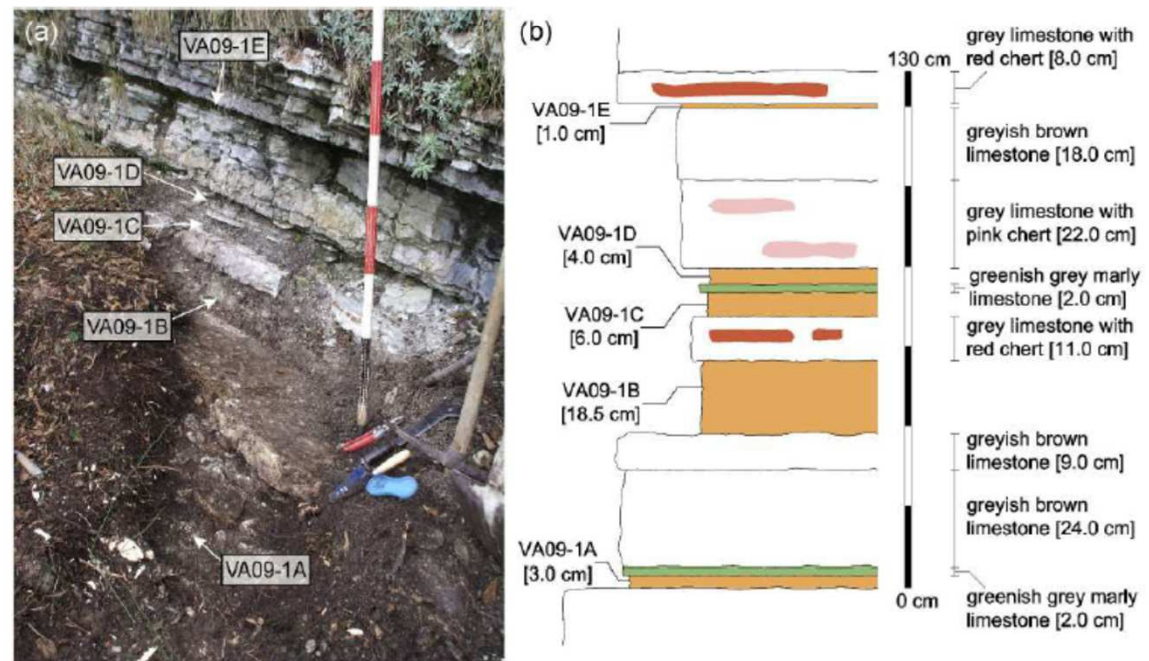


Fig. 5. (a) Rock outcrop (top of the Fonzaso Fm.) on the north valley side from which 5 clay layers were sampled, and (b) its schematisation. For the sampling location see [Fig. 3](#).

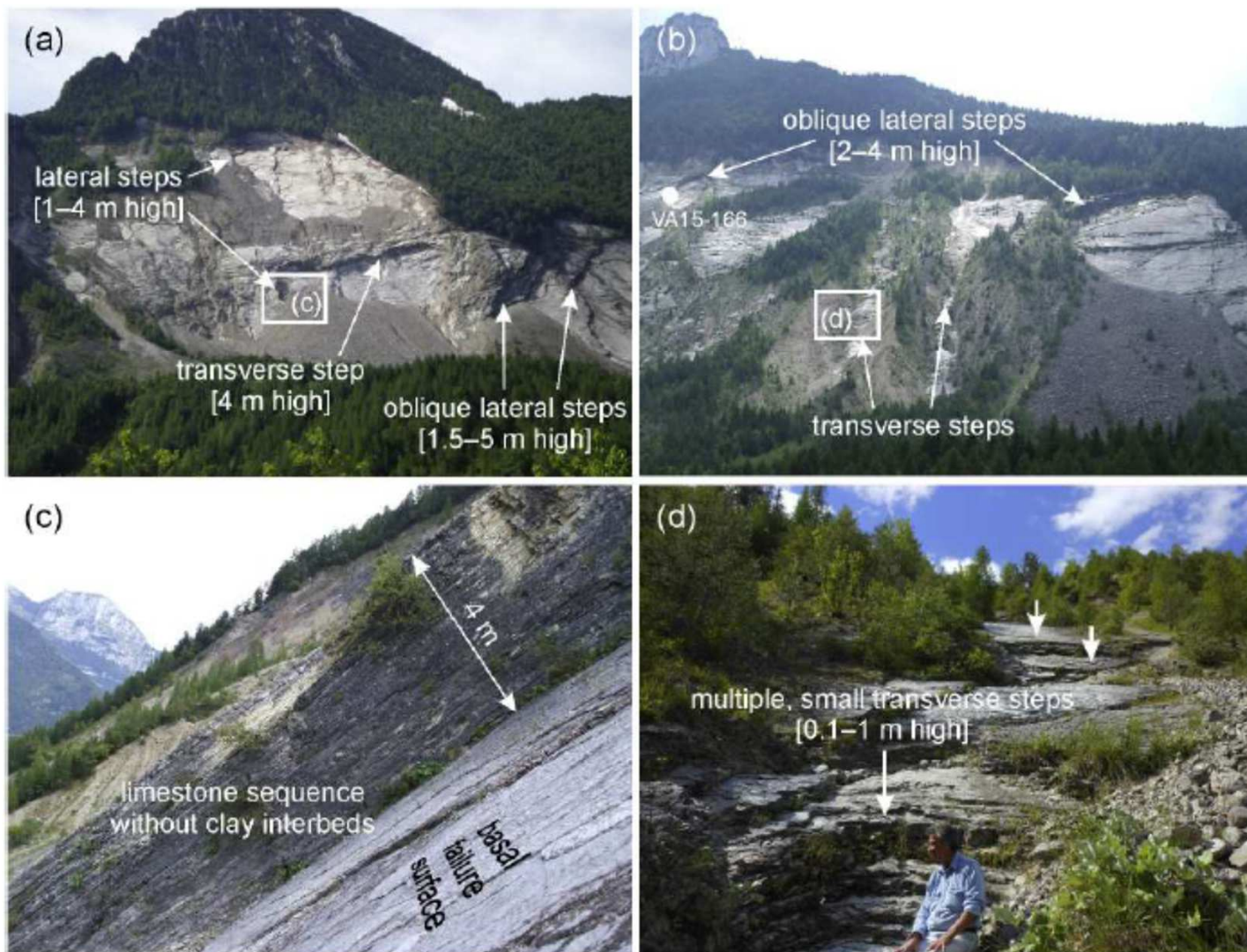


Fig. 6. Stepped morphology of the basal failure surface characterising (a) the eastern part and (b) the western part of the detachment surface of the Vajont landslide. (c), (d) Details of a lateral step and multiple transverse steps, respectively, showing the in-situ lithostratigraphic sequence outcropping on the failure surface (Fonzaso Fm.).

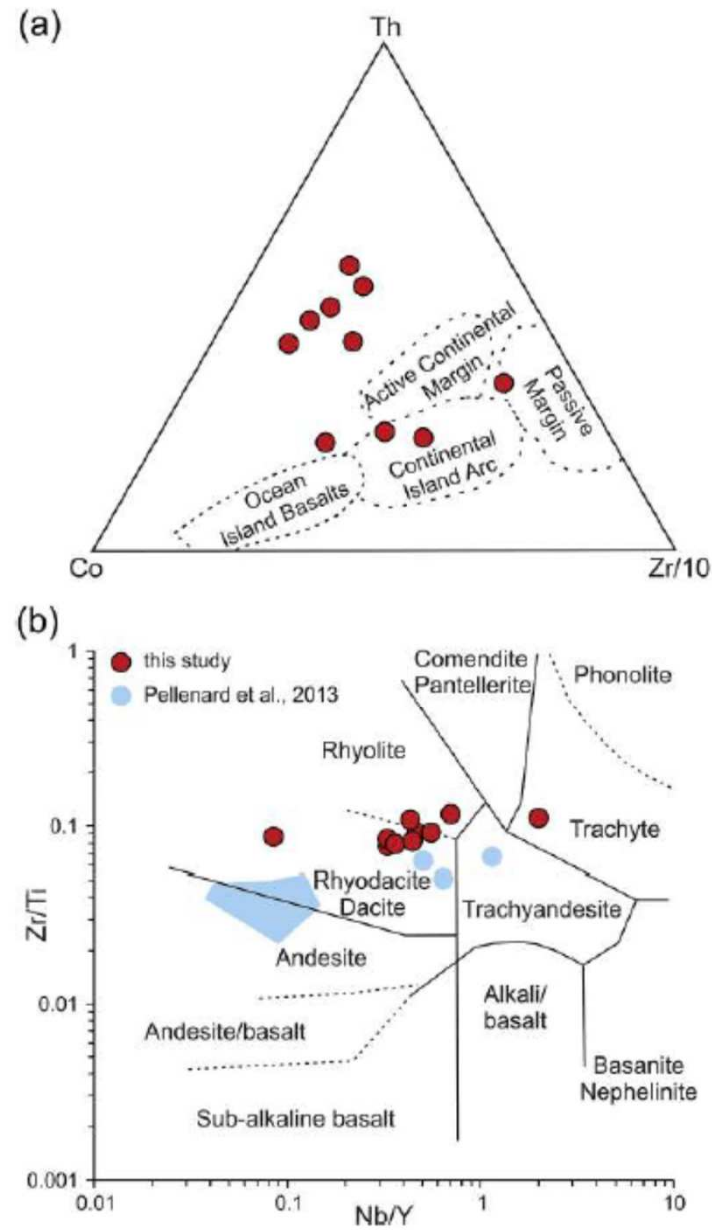


Fig. 11. (a) Th-Co-Zr/10 ternary diagram for the studied samples. Fields after Bhatia and Crook (1986). (b) Zr/Ti vs. Nb/Y diagram for the analysed clay samples from Vajont (red circles). The bentonite layers analysed by Pellenard et al. (2013) are also shown (blue field and circles). Fields after Winchester and Floyd (1977). (For interpretation of the references to colour in this figure legend, the reader is referred to the web version of this article.)