

Recensioni

Mechanics of landslides - K. TERZAGHI - nel vol. « Engineering Geology », edito dalla « Geological Society of America », 1950.

Il lungo articolo che, in questo *Berkey volume*, K. TERZAGHI dedica alla meccanica dei movimenti franosi viene a colmare una grave lacuna della letteratura scientifica sull'argomento. Quasi tutti gli autori, infatti, trattando dei fenomeni franosi o svolgono una trattazione estremamente schematica per giungere ad una classifica, ovvero si dilungano nella esposizione, sia pure interessante, di numerosi casi particolari senza addentrarsi nel processo meccanico, che provoca il dissesto. In questo lavoro invece, pur rifacendosi sovente all'esperienza singola propria o di altri, l'autore sviluppa prevalentemente i fondamenti fisico-meccanici del fenomeno.

L'opera si compone di quattro parti distinte. Nella prima parte vengono stabiliti i concetti fondamentali che differenziano il *frammento* propriamente detto dallo *scorrimento*. Quest'ultimo rappresenta, per l'A., quel tipo di deformazione dei pendii, che noi siamo soliti definire come *frana per cedimento* (1) e che tanta parte ha nei fenomeni franosi dell'Appennino. « Il *frammento*, — dice l'A. — non è che il movimento di piccole porzioni di materiale, con limiti ben definiti, mentre lo *scorrimento* implica il lento movimento del terreno sottostante ai pendii di una intera regione, onde non esiste una superficie limite ben definita fra il materiale in movimento e quello stazionario ». Oltre che per la velocità del movimento, i *frammenti* differiscono dagli *scorrimenti* principalmente per il tipo di deformazione che da essi deriva; deformazione che, se nel primo caso va inquadrata nella meccanica dei solidi, nel secondo caso va esaminata secondo le leggi dell'idraulica applicata ai liquidi altamente viscosi. L'A. accenna in proposito, mediante taluni esempi, ai tipi di formazioni geologiche interessate da quei movimenti che egli ha definito come *scorrimenti*, mostrando chiaramente come questi — nelle formazioni flyscioidi, nelle filladi, negli scisti argillosi o in altri tipi di rocce — possono assumere proporzioni tali da rientrare fra gli eventi geologici di importanza determinante nei lineamenti geomorfologici di una intera regione.

Questo problema avrebbe meritato una esposizione ben più dettagliata, specie per quanto riguarda i processi di natura fisica ad esso inerenti. Ma purtroppo

l'A. non considera, come si è dianzi accennato, gli *scorrimenti* fra le frane propriamente dette e, pertanto, nella seconda parte del suo lavoro, analizza i processi meccanici solo limitatamente a queste ultime.

Con questa limitazione, la seconda parte dell'opera è indubbiamente molto interessante. In essa l'A., basandosi su concetti ben noti della Meccanica delle terre e, in particolare, prendendo spunto da alcuni fondamenti teorici esposti più diffusamente nei numerosi suoi trattati sull'argomento, tenta una discriminazione ben riuscita delle varie cause che conducono ai framenti e del modo di agire di esse.

Le *cause* possono distinguersi, secondo l'A., in *esterne* ed *interne*. Le prime son quelle che producono un vero e proprio aumento delle forze di taglio nel materiale costituente il pendio; le seconde invece riguardano unicamente le variazioni delle forze resistenti opposte da questo ultimo. Fra le *cause esterne*, che modificano le condizioni di stabilità dei pendii, vanno considerate innanzitutto le scosse sismiche, le quali aumentano bruscamente le tensioni di taglio lungo le superfici potenziali di scorrimento. In tal modo diminuisce notevolmente il cosiddetto coefficiente di sicurezza G , del pendio, rappresentato dal rapporto fra il momento delle forze resistenti e quello delle forze agenti esternamente, applicati entrambi alla porzione di materiale delimitata dalla superficie di scorrimento. Il metodo convenzionale usato per la valutazione dell'effetto di una scossa sismica serve, però, soltanto in via orientativa. E' frequente infatti il caso di pendii, per i quali il valore di G , calcolato scende al disotto dell'unità e che invece si dimostrano stabili: così accade, per es., per le argille poco sensitive, mentre, al contrario, su pendii costituiti da *loess* e da alcune sabbie scarsamente cementate i movimenti vibratorii hanno effetti talora catastrofici. Questo caso potrebbe verificarsi — a parere di chi scrive — nelle formazioni sabbiose del nostro Pliocene.

Di particolare rilievo risulta poi l'esame che l'A. svolge di tutti quei casi di framenti comunemente attribuiti alla azione di *lubrificazione* esercitata dall'acqua penetrata nel terreno. Tale spiegazione, condivisa ancora oggi da molti geologi, è ritenuta dal TERZAGHI inaccettabile, da un lato perchè molti dei comuni minerali costituenti le rocce sciolte hanno coefficiente d'attrito statico maggiore per superfici bagnate che per superfici asciutte, dall'altro perchè è ormai dimostrato che qualsiasi lubrificante agisce meglio se disposto sotto forma di una pellicola estremamente sottile. Da ciò si può dedurre che le rocce sciolte, essendo sovente allo

(1) Vedi ad esempio l'articolo di F. IPPOLITO e V. CORECCHIA nel fascicolo 2, 1954 di questa rivista.

Tabella I. — *Processi che producono i «frammenti» secondo K. TERZAGHI.*

A	B	C	D	E	F
Causa agente	Evento o processo che fa agire la causa	Modo di agire della causa	Materiali costituenti i pendii più sensibili alla causa agente	Natura fisica delle azioni di rilievo della causa agente	Effetto sulle condizioni di equilibrio del pendio
Agente asportante	Operazioni di costruzione o erosione	1. - Aumento dell'altezza o della pendenza del pendio	Qualsiasi materiale	Cambia il regime delle pressioni nel materiale che forma il pendio	Aumenta gli sforzi di taglio
Forze tettoniche	Movimenti tettonici	2. - Deformazioni della crosta terrestre su grande scala	Argille compatte o fessurate, scisti argillosi	Cambia il regime delle pressioni e causa l'apertura di giunti	Aumenta gli sforzi di taglio e dà inizio al processo 8
Forze tettoniche o esplosivi	Terremoti o mine	3. - Vibrazioni ad alta frequenza	Qualsiasi materiale	Aumenta l'angolo del pendio	Aumento degli sforzi di taglio
Gravità del materiale costituente il pendio	Processo che ha creato il pendio	5. - Crepe negli strati di materiale debole del pendio	Qualsiasi materiale Loess, sabbie lievemente cementate, ghiaie Sabbia sciolta, fine o media, allo stato saturo	Produce variazioni transitorie degli sforzi Agisce a sfavore dei legami intergranulari Riordina ed assesta i granelli	Diminuzione della coesione e aumento delle tensioni Liquefazione spontanea
	4. - Crepe sul pendio	Argille compatte o fessurate, scisti, residui di vecchie frane	Riapre i giunti chiusi e ne produce altri	Riduce la coesione e accelera il processo 8	

Acqua

<p>Pioggie o fusione delle nevi</p> <p>Gelo</p> <p>Evaporazione</p> <p>Abbassamento rapido</p> <p>Rapido innalzamento del livello d'acqua</p> <p>Sollevamento della falda acquifera a distanza</p> <p>Infiltrazione d'acqua da sorgenti artificiali (serbatoi o canali)</p>	<p>6. - Spostamenti d'aria nei vuoti</p>	<p>Sabbie bagnate</p>	<p>Diminuzione della resistenza d'attrito</p>	
	<p>7. - Spostamenti d'aria nei giunti aperti</p>	<p>Rocce stratificate, scisti argillosi</p>	<p>Aumenta la pressione dell'acqua di porosità</p>	
	<p>8. - Riduzione della pressione capillare associata al rigonfiamento</p>	<p>Argille compatte o fessurate, scisti</p>	<p>Causa il rigonfiamento</p>	
	<p>9. - Azione chimica degli agenti atmosferici</p>	<p>Rocce di ogni specie</p>	<p>Indebolisce i legami intergranulari</p>	
	<p>10. - Espansione dell'acqua dovuta al congelamento</p>	<p>Rocce stratificate</p>	<p>Allarga i giunti esistenti e ne produce altri ancora</p>	
	<p>11. - Formazione e successiva fusione degli strati di ghiaccio</p>	<p>Limo e sabbia fine</p>	<p>Aumenta il contenuto di acqua del suolo negli strati di sommità</p>	
	<p>12. - Contrazione</p>	<p>Argille</p>	<p>Produce fessure di contrazione</p>	
	<p>13. - Produce movimento di filtrazione ai piedi del pendio</p>	<p>Sabbia fine e limo, prevalentemente drenati</p>	<p>Produce eccesso di pressione nell'acqua di porosità</p>	
	<p>14. - Riordina l'assetto dei granelli</p>	<p>Sabbia sciolta, media e fine, allo stato saturo</p>	<p>Aumento spontaneo della pressione di porosità</p>	
	<p>15. - Causa il sollevamento della superficie piezometrica nel materiale costituente il pendio</p>	<p>Strati di limo e sabbia, interstratificati o sottostanti a strati di argilla</p>	<p>Aumenta la pressione dell'acqua di porosità</p>	
	<p>16. - Infiltrazione attrattiva verso il pendio</p>	<p>Limo saturo</p>	<p>Aumenta la pressione dell'acqua di porosità</p>	
	<p>17. - Scaccia l'aria dai vuoti</p>	<p>Sabbia fine umida</p>	<p>Elimina le tensioni superficiali</p>	
	<p>18. - Rimuove il cemento solubile</p>	<p>Loess</p>	<p>Sottrae i legami intergranulari</p>	
	<p>19. - Erosione superficiale</p>	<p>Sabbia fine e limo</p>	<p>Mina il pendio</p>	
				<p>Diminuzione della coesione</p>
				<p>Diminuzione della resistenza di attrito</p>
				<p>Diminuzione della coesione</p>
				<p>Diminuzione della resistenza di attrito</p>
				<p>Liquefazione spontanea</p>
			<p>Diminuzione della resistenza di attrito</p>	
			<p>Diminuzione della coesione</p>	
			<p>Diminuzione della resistenza di attrito</p>	
			<p>Diminuzione della coesione</p>	
			<p>Aumento degli sforzi di taglio</p>	

stato umido, contengono permanentemente molto più della quantità di acqua necessaria per *lubrificare* le superfici dei granelli. Tuttavia l'acqua di pioggia, che penetra al di sotto di un pendio, ne intacca la stabilità in vari modi. L'innalzamento della superficie piezometrica nel terreno può, per esempio, abbassare, talora anche notevolmente, la resistenza specifica al taglio lungo la superficie potenziale di scorrimento. Ritenendo infatti, in un punto P di questa, tale resistenza data da:

$$s = c \pm (p - hw) \operatorname{tg} \varphi$$

ove c rappresenta la coesione del terreno, p la pressione dovuta ai carichi soprastanti alla superficie di scorrimento, h l'altezza piezometrica nel punto considerato, w il peso specifico dell'acqua e φ l'angolo di attrito, è facile rendersi conto che un aumento di h ha per effetto la diminuzione di s , a danno della stabilità del pendio, naturale o artificiale che sia.

Diversamente l'acqua, una volta assorbita dal suolo, ne aumenta il peso specifico apparente, variando pertanto il valore del coefficiente di sicurezza G_s del pendio. Più importante risulta però la sua azione a sfavore di c : nelle cavità del terreno, in parte riempite d'aria, l'acqua elimina la tensione superficiale, cui si deve spesso la compattezza apparente dei materiali sciolti sottili. Nei materiali cementati da sostanze solubili, l'acqua procede inoltre al dilavamento di queste ultime, onde, nei casi descritti, diventa nel tempo sempre più probabile il franamento, il quale può quindi avvenire in qualsiasi periodo dell'anno.

Esaminando altri tipi di franamenti prodotti dalle molteplici azioni dell'acqua, l'A. accenna infine a due fenomeni particolari, quanto mai insidiosi, che egli denomina *abbassamento rapido* e *liquefazione spontanea*.

Il primo di essi si riferisce all'abbassamento del livello dell'acqua in un serbatoio, ovvero lungo le sponde di un fiume dopo una piena, con una rapidità di almeno qualche metro al giorno. Se l'abbassamento dell'acqua all'esterno avviene, infatti, con una certa rapidità, la superficie piezometrica dell'acqua penetrata nel terreno ritarda ad abbassarsi rispetto al livello acquifero esterno, onde, ad abbassamento avvenuto, la superficie piezometrica s'innalza più o meno ripidamente dal piede del pendio verso l'interno di esso, il che, anche a non voler tener conto dell'effetto secondario delle forze capillari, provoca una forte diminuzione delle resistenze a taglio disposte lungo la superficie potenziale di scorrimento. Al piede del pendio la velocità di filtrazione e la pressione corrispondente all'acqua filtrante raggiungono i valori maggiori e, di conseguenza, smuovono i granelli del terreno nella direzione e nel senso dei filetti fluidi, vale a dire cioè verso la base del pendio, ove, pertanto, ha inizio la frattura che produce la frana.

Il processo di *liquefazione spontanea* si verifica invece quando la disposizione dei granelli del materiale sciolto costituente il pendio non è dotato di sufficiente stabilità, di modo che una perturbazione, anche lieve, dell'equilibrio di essa degenera in un riordino di tutto l'insieme di granelli, con conseguente assestamento e diminuzione della porosità del materiale. Se tale riordino avviene sott'acqua, le conseguenze possono

risultare catastrofiche, poichè la viscosità dell'acqua, contenuta nel materiale, impedisce una rapida diminuzione della porosità, onde, prima di riconsolidarsi, il materiale si comporta come un liquido denso e viscoso, che si espande in direzione orizzontale, fino a che la scarpata non sia divenuta una superficie piana sub-orizzontale. Tutti i tipi di vibrazioni e l'aumentata pendenza di talune scarpate, formate da terreni scarsamente coerenti, rappresentano i fattori che più facilmente danno luogo a simili calamità.

La trattazione dei fenomeni descritti è largamente documentata da esempi, i quali indicano, fra l'altro, i

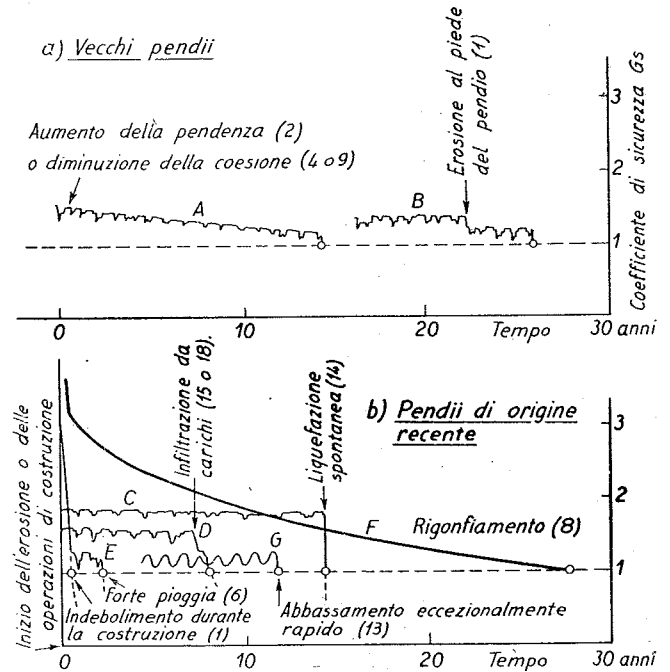


Fig. 1

tipi di formazioni geologiche ove più frequentemente tali fenomeni avvengono. Così, per mezzo di esempi molto utili, l'A. illustra anche la diversa azione esercitata dall'acqua, proveniente da infiltrazioni artificiali o piovana, su pendii dotati di consistenza apparente. In effetti egli mostra che una infiltrazione intermittente — acqua di pioggia — anche se copiosa, può risultare, per taluni materiali, meno dannosa di una infiltrazione prolungata, anche se questa non ha una portata notevole.

A completamento dell'esame svolto per i singoli processi posti a base dei franamenti, l'A. riporta infine una interessante tabella, che fornisce allo studioso dell'argomento un utile promemoria ed una guida all'investigazione sul terreno. Tale tabella è qui riprodotta.

Circa la periodicità dei franamenti, l'A. non giunge ad una conclusione degna di rilievo ed attribuisce tale lacuna alla mancanza di dati statistici. Egli fornisce invece una brillante rappresentazione del modo con cui varia il coefficiente di sicurezza G_s di determinati pendii in funzione del tempo e in relazione a diverse cause. Tale rappresentazione facilita il discernimento tra i processi dianzi descritti, onde si è ritenuto utile

riprodurla in figura 1. In essa la curva A si riferisce al franamento di un vecchio pendio, in seguito alla erosione o alla degradazione operata dagli agenti atmosferici sulla roccia. La curva B illustra un franamento avvenuto durante un temporale, in seguito alla profonda escavazione prodotta dalla erosione al piede. Le curve da C a G si riferiscono a pendii recenti, ovvero a vecchi pendii sottoposti ad eventi senza precedenti. Il pendio C franò in seguito a liquefazione spontanea causata da un'esplosione; D in seguito all'infiltrazione avvenuta attraverso il fondo di un canale, appena costruito e non rivestito; E come risultato della più forte pioggia riscontrata dalla formazione del pendio; F in seguito alla graduale diminuzione della coesione dell'argilla costituente il pendio; G illustra infine il caso di un eccezionale e rapido abbassamento del livello dell'acqua in un serbatoio di immagazzinamento idrico.

Nella terza parte della sua opera l'A. tratta brevemente della dinamica dei franamenti. Accennando ai

carattere dinamico dei franamenti su pendii costituiti da alternanze di rocce diverse e da alcuni materiali speciali, come, per esempio, le argille *ultrasensitive* e *tixotropiche*.

Sulle misure precauzionali da adottare nelle zone franose e sui mezzi atti a correggere i franamenti in atto l'A. riferisce nella quarta ed ultima parte dell'opera. Egli si limita però solo a dare alcuni cenni sull'importante problema, per il quale rimanda, caso per caso, ad opere specifiche. I metodi che Egli consiglia sono, comunque, nella maggioranza dei casi molto delicati ed esigono la conoscenza precisa del fenomeno che ha dato luogo al franamento, onde l'A. fa appello soprattutto alla cooperazione fra il geologo e l'ingegnere, dimostrando come soltanto da tale collaborazione possa scaturire la esatta comprensione dei fenomeni e la scelta razionale dei mezzi idonei alla correzione di essi.

V. Cotecchia

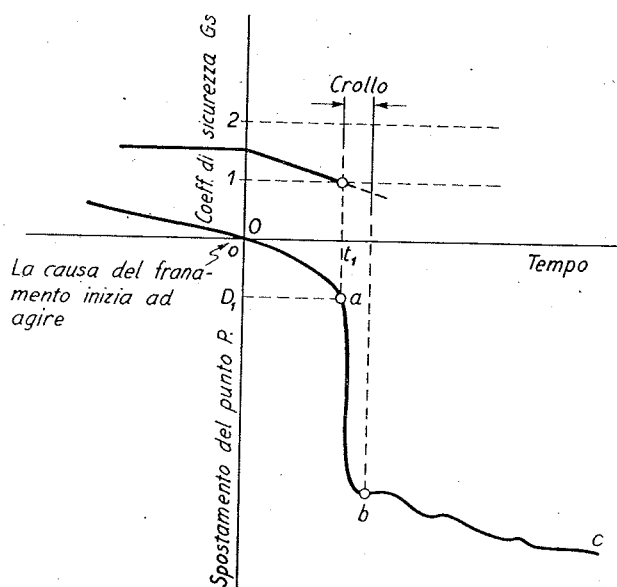


Fig. 2

movimenti che precedono la frana vera e propria e fatta eccezione per i casi di terremoti e di *liquefazione spontanea*, che danno luogo ad una diminuzione pressochè istantanea del coefficiente di sicurezza G_s , egli sottolinea il fatto che ogni franamento è preceduto in genere da una graduale diminuzione di tale coefficiente, il che comporta una progressiva deformazione del terreno soprastante alla superficie di scorrimento. La figura 2 illustra, infatti, un esempio di relazione esistente, nel tempo, fra la variazione di G_s e lo spostamento in verticale di un punto P posto in sommità del nucleo di terra in frana. Il tratto di curva *oa* rappresenta il movimento che ha preceduto il franamento, mentre il tratto superiore di *ab* rappresenta il moto accelerato col quale quest'ultimo ha inizio. Le forze in gioco tendono a decrescere, via via che l'ammasso di terra in frana acquista posizioni più stabili, onde il moto, ad un certo punto cambia in ritardato e finalmente tende a finire.

Quanto detto vale naturalmente per materiali dotati di una certa uniformità di costituzione. Diverso è il

Cedimenti superficiali di vaste aree nella zona di Houston-Galveston, Texas, in relazione con la eduazione delle falde sotterranee (Land-surface subsidence and its relation to the withdrawal of the ground water in the Houston-Galveston region, Texas) - WINSLOW A. G. e DOYEL W. W. - Economic Geology, 49, 4, giugno-luglio 1954, pagg. 413-422, 3 fig.

A seguito del controllo della rete di livellazione, nella regione di Houston-Galveston si è constatato un abbassamento generale della superficie del suolo. Tale abbassamento, che ha raggiunto in talune zone valori di 80 cm, è stato posto in relazione con l'intenso emungimento delle falde idriche sotterranee (1.200.000 m³/giorno).

Il sottosuolo della regione è costituito da una potente serie di sedimenti sciolti, più o meno coerenti, terziari e quaternari. Tale serie si immerge verso la costa con una sensibile pendenza, ed è formata da terreni di differente permeabilità.

Le formazioni permeabili sedi delle falde artesiane più intensamente sfruttate sono rappresentate da sabbie plioceniche e da sabbie argillose pleistoceniche.

Come si è detto, l'eduazione di acqua da queste falde ha provocato un abbassamento regionale della superficie del suolo. Dall'esame dei profili di livellazione e delle piezometriche delle falde si è constatato che i massimi abbassamenti della superficie si sono verificati nelle zone ove maggiore è stata la depressione delle piezometriche provocata dall'intenso pompaggio.

Gli AA ricordano che fenomeni di questo genere sono stati rilevati anche in molte altre regioni, sede di emungimento da falde idriche o di coltivazione di giacimenti di idrocarburi.

Gli AA ricordano, inoltre, che, secondo le ipotesi più comunemente ammesse (TOLMAN, MEINZER), per effetto della diminuzione della pressione delle falde, causata dal pompaggio, si stabilisce un gradiente idraulico fra gli strati argillosi adiacenti agli strati sedi di falde e questi ultimi.

L'acqua contenuta negli strati argillosi si sposta, perciò, da questi verso quelli sabbiosi e contribuisce