



Pietro Cirone

ANALISI E VERIFICA DEI PENDII

Frane ed intense erosioni

[Scheda sul sito >](#)



- Geomorfologia dei pendii in erosione normale ✓
- Dissesti del suolo - Studio delle aree in frana ✓
- Influenze pluviometriche e idrografiche su bacini e versanti ✓
- Meccanica degli scoscendimenti, scivolamenti e crolli ✓

Pietro Cirone

ANALISI E VERIFICA DEI PENDII

Frane ed intense erosioni



Dario Flaccovio Editore

Pietro Cirone

ANALISI E VERIFICA DEI PENDII – Frane ed intense erosioni

ISBN 978-88-579-0348-4

© 2014 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: settembre 2014

Cirone, Pietro <1949->

Analisi e verifica dei pendii : frane ed intense erosioni / Pietro Cirone. -

Palermo : D. Flaccovio, 2014.

ISBN 978-88-579-0348-4

1. Meccanica dei terreni.

624.1513 CDD-22

SBN Pal0272867

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, settembre 2014

Nomi e marchi citati sono generalmente depositati o registrati dalle rispettive case produttrici.

L'editore dichiara la propria disponibilità ad adempiere agli obblighi di legge nei confronti degli aventi diritto sulle opere riprodotte.

La fotocopiatura dei libri è un reato.

Le fotocopie per uso personale del lettore possono essere effettuate nei limiti del 15% di ciascun volume/fascicolo di periodico dietro pagamento alla SIAE del compenso previsto dall'art. 68, commi 4 e 5, della legge 22 aprile 1941 n. 633. Le riproduzioni effettuate per finalità di carattere professionale, economico o commerciale o comunque per uso diverso da quello personale possono essere effettuate solo a seguito di specifica autorizzazione rilasciata dagli aventi diritto/dall'editore.

Indice

Premessa

1. Geomorfologia dei pendii in erosione normale

1.1. Generalità.....	»	11
1.1.1. Erosione normale lineare ed areolare.....	»	12
1.1.2. Alterazione in sito (weathering).....	»	17
1.1.3. Moto dei detriti lungo i versanti.....	»	18
1.2. Litologia dei versanti.....	»	21
1.2.1. Generalità.....	»	21
1.2.2. Minerali essenziali.....	»	22
1.2.2.1. Silicati.....	»	23
1.2.2.2. Carbonati.....	»	26
1.2.2.3. Fosfati.....	»	26
1.2.2.4. Ossidi.....	»	26
1.2.2.5. Solfuri.....	»	27
1.2.2.6. Alogenuri.....	»	27
1.2.2.7. Solfati.....	»	27
1.2.3. Forma litologica e petrografica.....	»	28
1.2.3.1. Rocce ignee.....	»	28
1.2.3.2. Rocce sedimentarie.....	»	31
1.2.3.3. Rocce metamorfiche.....	»	40
1.3. Influenze tettoniche e stratigrafiche.....	»	42
1.3.1. Generalità.....	»	42
1.3.2. Strati e facies.....	»	43
1.3.3. Tettonica e sedimentazione.....	»	45
1.3.4. Fenomeni e stili tettonici su rilievi e versanti.....	»	48
1.4. Esodinamica dei rilievi. Successione dei cicli di erosione.....	»	52
1.4.1. Generalità.....	»	52
1.4.2. Agenti esogeni. Formazione del suolo.....	»	52
1.4.3. Successione dei cicli di erosione.....	»	54
1.4.3.1. Pendii policiclici. Profili di equilibrio.....	»	54
1.4.3.2. Successioni di escavazioni e rinterri di una valle. Terrazzi alluvionali.....	»	57

1.5. Inquadramento cronologico	»	58
1.6. Rilievi e versanti italiani	»	62

2. Dissesti del suolo. Movimenti franosi

2.1. Generalità.....	»	65
2.2. Fenomeni di intensa erosione	»	66
2.2.1. Falde e coni di detrito roccioso	»	66
2.2.2. Scoscendimenti erosivi di superficie	»	70
2.2.3. Lame eterogenee	»	73
2.2.4. Calanchi argillosi.....	»	75
2.2.5. Erosione da acque incanalate	»	78
2.3. Fenomeni franosi	»	81
2.3.1. Scoscendimenti.....	»	81
2.3.2. Scivolamenti.....	»	83
2.3.3. Crolli lapidei.....	»	87
2.3.4. Cedimenti	»	90
2.4. Ambienti geomorfologici dei fenomeni erosivi e franosi.....	»	91
2.4.1. Generalità	»	91
2.4.2. Alpi.....	»	92
2.4.3. Appennino	»	95
2.4.3.1. Appennino settentrionale e centrale	»	96
2.4.3.2. Appennino meridionale	»	97
2.4.4. Regione geologica italiana nel suo complesso.....	»	107

3. Influenze pluviometriche e idrografiche su bacini e versanti

3.1. Generalità.....	»	111
3.2. Bacini imbriferi e versanti.....	»	112
3.2.1. Legge di possibilità climatica.....	»	112
3.2.2. Esempificazione di un caso reale	»	114
3.2.3. Afflussi e deflussi meteorici. Conseguenze sulla stabilità dei pendii	»	124
3.3. Idrografia dei versanti. Erosione. Dilavamento e acque correnti.....	»	131
3.3.1. Erosione del suolo. Valutazione	»	131
3.3.2. Esempificazioni numeriche. Approfondimenti.....	»	134
3.3.3. Azioni di rivi, ruscelli e acque correnti. Morfometria dei bacini ...	»	141
3.3.4. Esempificazione di un'analisi morfometrica. Approfondimenti ...	»	145
3.3.5. Soglia pluviale di innesco del fenomeno franoso su un pendio	»	149
3.3.6. Esempificazione numerica. Approfondimenti	»	152
3.3.7. Valutazione del rischio di innesco della frana.....	»	156

4. Meccanica degli scoscendimenti, scivolamenti e crolli

4.1. Generalità.....	»	159
4.2. Meccanica degli scoscendimenti	»	160
4.2.1. Generalità	»	160

4.2.2.	Scoscendimenti in scarpate verticali di terreno omogeneo	» 162
4.2.3.	Scoscendimenti in scarpate di terreno omogeneo inclinate e delimitate da piani orizzontali	» 167
4.2.4.	Scoscendimenti in scarpate di terreno omogeneo a geometria varia	» 178
4.2.5.	Scoscendimenti in scarpate di terreno non omogeneo	» 180
4.2.6.	Scoscendimenti in pendii interessati da pressioni neutre	» 182
4.3.	Meccanica degli scivolamenti.....	» 182
4.4.	Meccanica dei crolli.....	» 185
4.4.1.	Resistenza dei materiali rocciosi coerenti	» 185
4.4.2.	Stati tensionali nelle falde rocciose pericolanti.....	» 188
4.5.	Influenze del sisma sulla stabilità dei pendii	» 193
5. Studio delle aree in frana		
5.1.	Generalità.....	» 199
5.2.	Morfologia e morfometria delle frane	» 201
5.3.	Permeabilità dei materiali in frana. Moti di filtrazione.....	» 208
5.3.1.	Porosità.....	» 208
5.3.2.	Filtrazione.....	» 211
5.3.3.	Permeabilità delle formazioni rocciose	» 212
5.3.3.1.	Conglomerati	» 212
5.3.3.2.	Areniti	» 213
5.3.3.3.	Formazioni calcaree.....	» 213
5.3.3.4.	Formazioni filladiche e scistose.....	» 214
5.3.3.5.	Formazioni rocciose cristalline.....	» 214
5.3.3.6.	Formazioni laviche, piroclastiche e limno-vulcaniche....	» 214
5.4.	Rocce sciolte in frana. Caratteristiche geotecniche	» 215
5.4.1.	Generalità	» 215
5.4.2.	Compressibilità e preconsolidazione.....	» 219
5.4.3.	Resistenza a rottura	» 228
5.4.3.1.	Criterio di resistenza di Mohr-Caquot. Retta di Coulomb	» 228
5.4.3.2.	Compressione triassiale	» 229
5.4.3.3.	Taglio diretto.....	» 235
5.4.3.4.	Tipologia delle prove di rottura	» 237
5.4.3.5.	Prove di rottura su sabbie e ghiaie.....	» 239
5.4.3.6.	Prove di rottura su argille normalmente consolidate	» 243
5.4.3.7.	Prove di rottura su argille sovraconsolidate	» 249
5.4.4.	Riferimenti normativi.....	» 252
5.5.	Stati tensionali di pendio indefinito	» 252
	Bibliografia	» 265

Premessa

Vecchio problema, purtroppo sempre attuale, quello della stabilità dei pendii, cui tante attenzioni hanno profuso da oltre un secolo geologi ed ingegneri. Che la materia non fosse semplice, lo si poteva già intuire dalla originaria difficoltà tassonomica – di fatto poi mai totalmente risolta – di codificare i dissesti del suolo ed i movimenti franosi in uno schema tecnico-scientifico stabile ed esaustivo; codifica che, superando la parzialità delle prospettive con cui ci si affacciava alla questione, potesse fornire maggiori ausili a chi si trovava nella ventura di avere a che fare con una tale non facile problematica. La magmatica natura della materia ha quindi forse fatto sì che in genere se ne affrontasse lo studio in senso prevalentemente ora naturalistico, ora invece meccanicistico; e ciò mi pare non abbia aiutato a privilegiare una visione unitaria delle cose. Non credo si possa comunque negare che lo studio dei pendii abbia storicamente trovato la sua genesi nell'ambito della *Geomorfologia*, costituendone essa il naturale prodromo. E mi sembra anche che gli stessi geografi abbiano per lo più considerato intuitivamente il versante collinare in chiave geomorfologica come parte di un *interfluvio*, ovvero come parte di ciò che risulta compreso fra le linee vallive di due *talweg* consecutivi. Sicché, in tal senso, la stessa genesi del concetto scientifico di versante, prima che ad un approccio squisitamente geologico, è forse da ascrivere addirittura ad uno di natura geografica. Ma, se queste sembrano essere le origini epistemologiche della questione, non va tuttavia sottaciuto che in pratica l'approccio naturalistico ha col tempo forse lasciato un po' il passo a quello deterministico connesso con lo sviluppo negli anni da una parte della *Meccanica delle terre* e dall'altra della *Meccanica delle rocce*. Ora, così come non si può mettere certamente in discussione il ruolo determinante svolto da tali due discipline, allo stesso modo – ritengo – non vada neppure sottaciuto quello proprio dalla Geomorfologia, la quale, nell'inquadrare a monte i termini costitutivi del problema (*litologia, tettonica, erosione*), getta parimenti da parte sua ampia luce sull'intera questione. È da tali riflessioni, confortate anche dall'esperienza, che mi sono perciò mosso nell'affrontare il delicato tema, partendo dagli aspetti geomorfologici e soffermandomi convenientemente su di essi; anche se l'urgenza meccanicistica si affaccia subito dopo nel testo con un argomento che, sebbene di tipo naturalistico, trova comunque sistematico inquadramento nell'ambito della *climatologia, idro-*

logia e idrografia del territorio cui il versante appartiene. Tema, quest'ultimo, che non a caso occupa infatti nella trattazione una posizione per così dire intermedia fra i predetti due aspetti. E col successivo rilevante argomento dedicato alla *Meccanica degli scoscendimenti, scivolamenti e crolli*, si entra poi nel vivo dei modelli matematici direttamente inerenti al delicato problema della verifica di stabilità dei pendii. L'ultimo tema riguarda infine lo *Studio delle aree in frana*, con particolar riferimento non solo ad alcune interessanti questioni morfometriche, quanto soprattutto a quelle più squisitamente geotecniche, di per sé atte ad impostarne e risolverne svariati problemi. È in sintesi questo l'iter che ho seguito nell'esposizione, cercando di darne un taglio il più possibile equilibrato fra le diverse urgenze disciplinari. E, se in qualche modo ciò mi sia riuscito, spero possa essere utile al lettore. Un ringraziamento infine all'Editore Dario Flaccovio per la fiducia che ripone nei miei scritti e l'attenzione con cui li cura.

Firenze, giugno 2014

Pietro Cirone

1. Geomorfologia dei pendii in erosione normale

1.1. Generalità

I *pendii naturali* (o *versanti*), costituiscono gli elementi tipici essenziali dei *rilievi* della crosta terrestre. Caratterizzati dalla *pendenza* (fattore determinante nell'analisi) racchiudono in sé i fondamentali fattori atti a spiegare la genesi (*litologia*), la struttura (*tettonica*) e l'evoluzione (*erosione*) degli stessi rilievi. Per quanto riguarda la pendenza – la quale di fatto non è mai nulla – va subito chiarito che, nell'ambito della globale conformazione della superficie terrestre, raramente essa supera i 45°. Ad esempio, mentre le falde di detrito granitico presentano una pendenza dell'ordine di 37°, quelle di detrito calcareo presentano invece pendenze variabili fra i 34° ed i 22°. E, con riferimento ad esempio ai paesaggi montuosi dell'Europa centrale, le pendenze dei versanti si aggirano intorno ai 35°. Così come è anche raro che le pendenze dei corsi d'acqua maggiori superino – al di fuori dei tratti montani – il valore del 1%. Va comunque considerato che nell'esodinamica *accumulo-erosione* dei versanti la pendenza gioca un ruolo essenziale, dal momento che (a parte il suo maggiore o minore valore) nella varietà dei casi concreti essa può configurarsi o meno come *pendenza di equilibrio del versante*, cioè come pendenza che nelle sue condizioni attuali non tende né ad aumentare né a diminuire sensibilmente. Circa poi gli altri tre fattori (definiti anche come *forme litologiche, tettoniche, di erosione* del rilievo), rimandando al prosieguo più approfondite riflessioni, si ritiene opportuno fare intanto le seguenti brevi precisazioni.

A – LITOLOGIA

Riguardando – la litologia – la natura genetica della roccia, la *forma litologica* costituisce nell'analisi geomorfologica del rilievo il fattore che in pratica rende conto della sua *durezza*. Sono ad esempio di origine litologica sia la geomorfologia di un rilievo a strati duri, sia quella di un rilievo che – costituito da una roccia piuttosto tenera – presenti invece su suolo e sottosuolo chiari episodi di escavazione.

 B – TETTONICA

La *forma tettonica* riguarda l'architettura della litosfera e, quindi, quella delle dislocazioni e deformazioni subite dai rilievi montuosi ad opera delle forze che ne hanno costruito e modellato la struttura mediante sollevamenti, piegamenti e fratture. Fenomeni tettonici, questi, che – influenzando pertanto sulla roccia costituente – condizionano *ab origine* la geomorfologia di un versante.

 C – EROSIONE

L'*erosione* è invece quel fattore complessivo, esodinamico e gravitativo, che, per effetto delle acque correnti superficiali, del gelo, del vento, delle azioni termiche e chimiche, degrada inesorabilmente i rilievi mediante una *forma ciclica* che, come si vedrà, si ripete in successioni geologiche, livellando dapprima il paesaggio (*penepiano*) ed aggredendolo poi nuovamente a causa ad esempio di un suo successivo sollevamento rispetto al *livello di base* del mare.

1.1.1. Erosione normale lineare ed areolare

La predetta schematizzazione, sebbene utile ai fini di una suddivisione concettuale dei fattori che influenzano la geomorfologia dei pendii, non va tuttavia presa asetticamente in senso scolastico, dal momento che nella realtà possono benissimo verificarsi casi in cui i suddetti fattori siano presenti (anche tutti e tre contemporaneamente) in modo combinato fra loro. Se ad esempio si considera la scarpata di figura 1.1, se ne può ricondurre l'origine sia ad una forma litologica che ad una forma tettonica o di erosione.

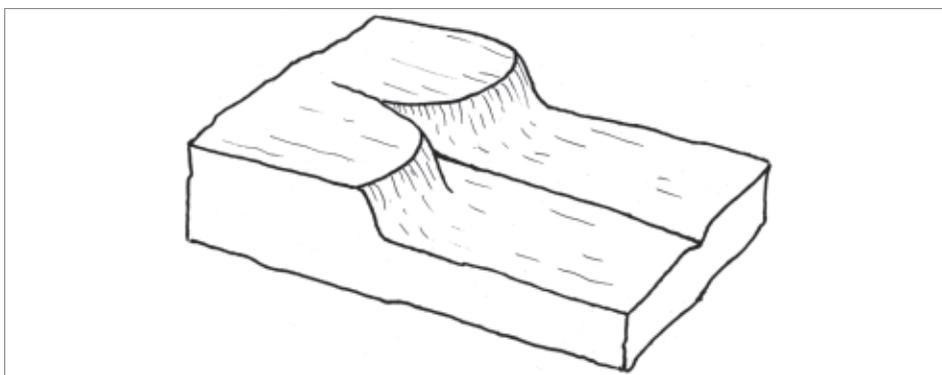


Figura 1.1

Nel caso della scarpata di origine litologica (figura 1.2, da [17] elaborata) il pendio si è formato in corrispondenza di uno strato di roccia dura per l'effetto di un'escavazione erosiva limitata alle formazioni rocciose tenere.

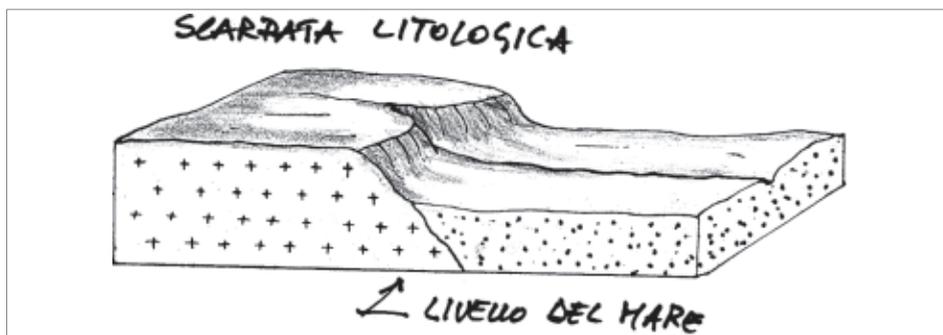


Figura 1.2

Nel caso invece della scarpata di origine tettonica (figura 1.3, da [17] elaborata) il dirupo, generato da un fenomeno di piegamento o di frattura, denuncia in genere la sua origine mediante variazioni di inclinazione o discontinuità nei suoi strati costituenti.

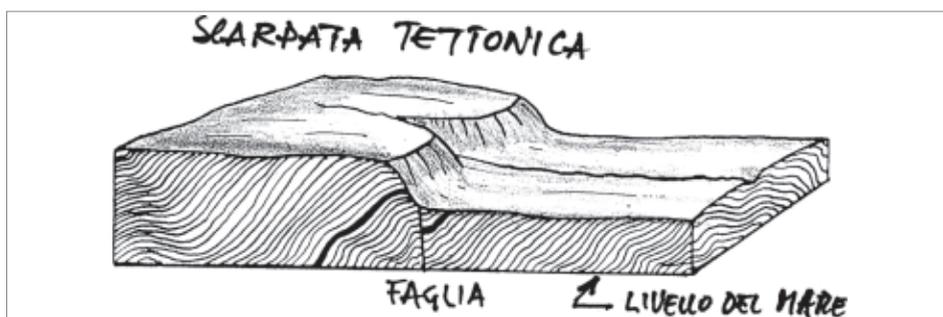


Figura 1.3

Infine nel caso della scarpata di origine erosiva (figura 1.4, da [17] elaborata) il dirupo è stato originato da un'azione di erosione ciclica, la quale, partendo dal peneplano superiore (risultato di un precedente ciclo di erosione) e lavorando su di esso, ne ha ridotto l'estensione alla forma attuale, lasciandone intatta una parte (zona superiore dell'originario peneplano) e abbassandone il livello della rimanente fino a portarlo a quello del piano inferiore di nuova formazione (risultato della seconda erosione), con la conseguente modellazione geomorfologica della scarpata fra i due piani.

Ma, come già detto, questo schema può essere sovvertito nella realtà da un meccanismo più complesso (figura 1.5, da [17] elaborata) in cui, ad esempio, l'erosione ha fatto arretrare un'esistente scarpata di origine tettonica trasformandola in una scarpata da contatto litologico. Il che, ben evidenziando la necessità di far riferimento ai suddetti tre fattori nell'analisi geomorfologica dei pendii, induce

ad affrontarne una disamina più dettagliata in relazione alle loro implicazioni sugli argomenti oggetto di questa trattazione.



Figura 1.4

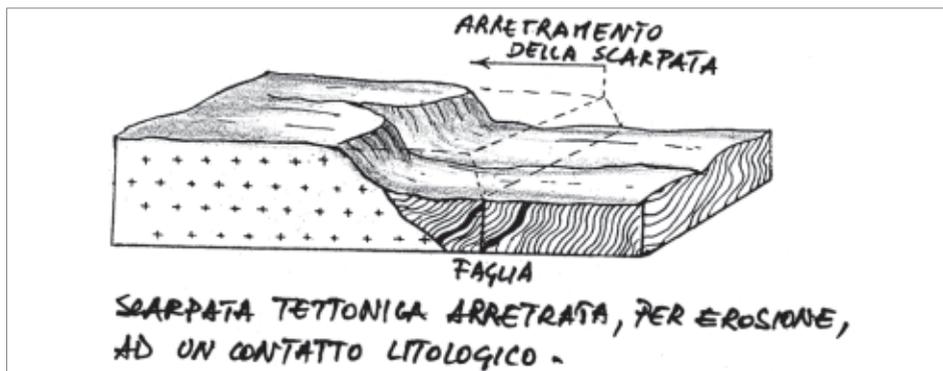


Figura 1.5

A proposito poi della *forma erosiva* occorre fare qualche riflessione circa l'erosione cosiddetta *normale* o *fluviale* (costituente la forma erosiva più diffusa sulla superficie terrestre), tipica comunque delle zone umide temperate, caratterizzata da:

- uno scorrimento delle acque verso il *livello base* del mare, considerato fisso;
- pendii coperti, senza soluzione di continuità, da vegetazione, da suolo o almeno da *régolite* (cfr. §1.1.2), con esclusione dei tratti di più forte pendenza.

A tale tipo di erosione fluviale, spiegata nelle sue leggi evolutive notoriamente da *W.M. Davis*, consegue poi una geomorfologia dei rilievi (detta anch'essa *normale*) caratterizzata a sua volta da lunghi *cicli erosivi* (ciascuno della durata di diversi milioni di anni), alternati a periodi di brusco ringiovanimento del paesaggio per via, ad esempio, di generali uniformi sollevamenti tettonici ciclici dell'intera regione. È così che un paesaggio, livellato in un tempo lunghissimo dall'erosione fino a diventare un "*quasi piano*" (dal latino *paene* ≡ *quasi*, da cui *penepiano*), nel subire un brusco sollevamento si trova ad essere poi nuovamente aggredito dall'erosione. È, questo, il singolo ciclo d'erosione normale, schematizzabile come l'insieme di una lunga erosione ed un sollevamento, geomorfologicamente assimilabile ad una sequenza di tre stadi temporali: *giovinezza*, *maturità* e *vecchiaia* (figura 1.6, da [17] elaborata).

Va inoltre distinta – nell'ambito dell'erosione normale – l'*erosione lineare* dall'*erosione areolare*, dovendosi differenziare sotto l'aspetto geomorfologico il *talweg* (linea passante per i punti più depressi di una vallata) dall'*interfluvio* (estensione geomorfologica compresa fra due talweg consecutivi) (figura 1.7a e 1.7b).

Infatti, mentre l'erosione lineare (caratterizzata essenzialmente dall'erosione esercitata dall'acqua corrente sul fondo valle) riguarda tipicamente il talweg, viceversa quella areolare (agente in superficie soprattutto per via dell'azione erosiva esplicata dall'acqua e dagli agenti atmosferici e biologici) è tipica delle scarpate di interfluvio. È quindi evidente come la maggiore o minore sensibilità di una roccia all'erosione areolare sia un importante parametro di valutazione nell'analisi dei pendii, considerato anche che le formazioni rocciose di interfluvio sono per estensione di gran lunga prevalenti rispetto alle ridotte aree di talweg. Il che induce a soffermare a livello preliminare l'attenzione su tale diffusa tipologia di erosione in relazione sia all'alterazione della roccia costituente il pendio, che al movimento dei detriti di scarpata, analizzando grosso modo le conseguenti modificazioni geomorfologiche dei versanti. Come si nota poi nelle figure 1.7.a 1.7.b, l'interfluvio è classicamente formato da due versanti opposti, rivolti ciascuno verso il sottostante talweg, caratterizzati nella loro morfologia dalla loro stessa struttura nonché dai relativi processi di erosione di tipo sia chimico-fisico (*alterazione in situ*) che meccanico (*trascinamento dei detriti*).

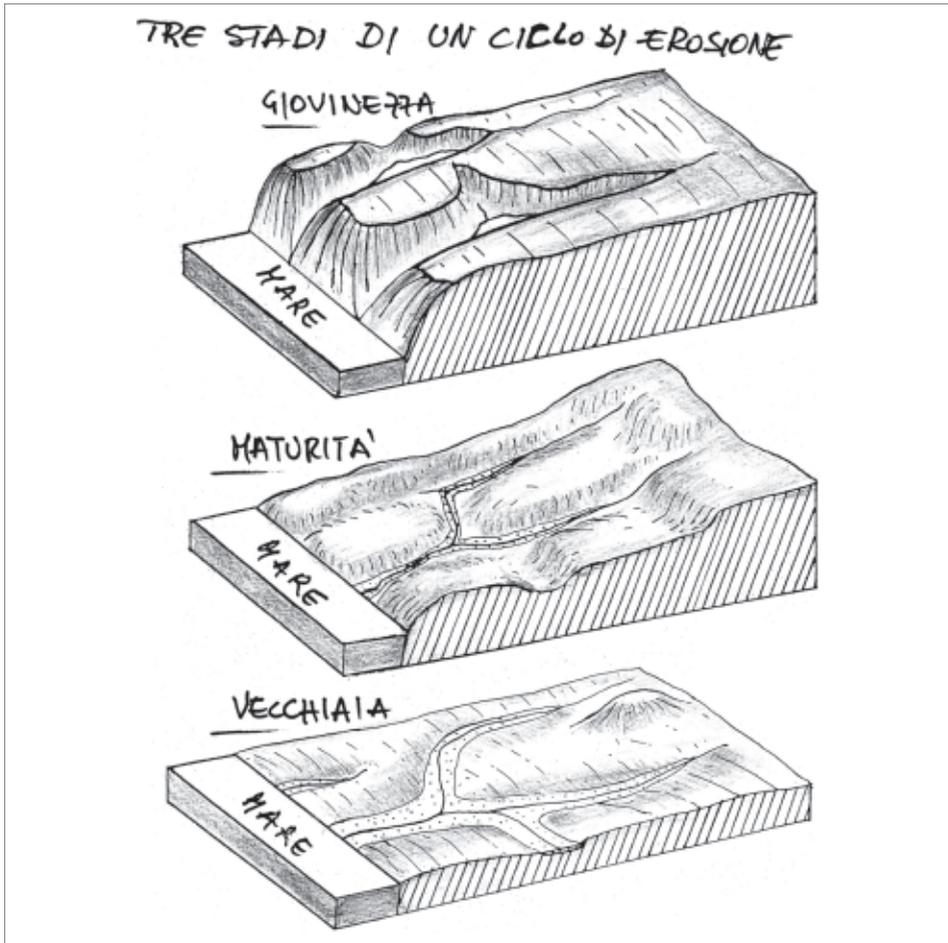


Figura 1.6

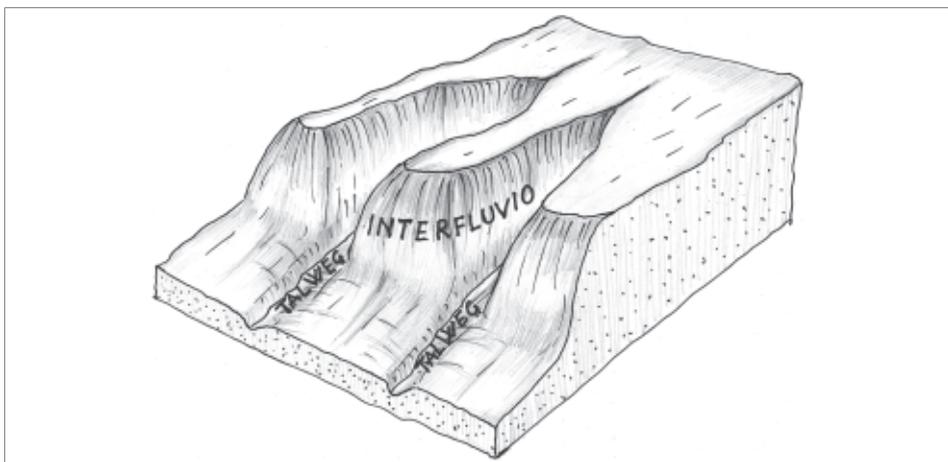


Figura 1.7a

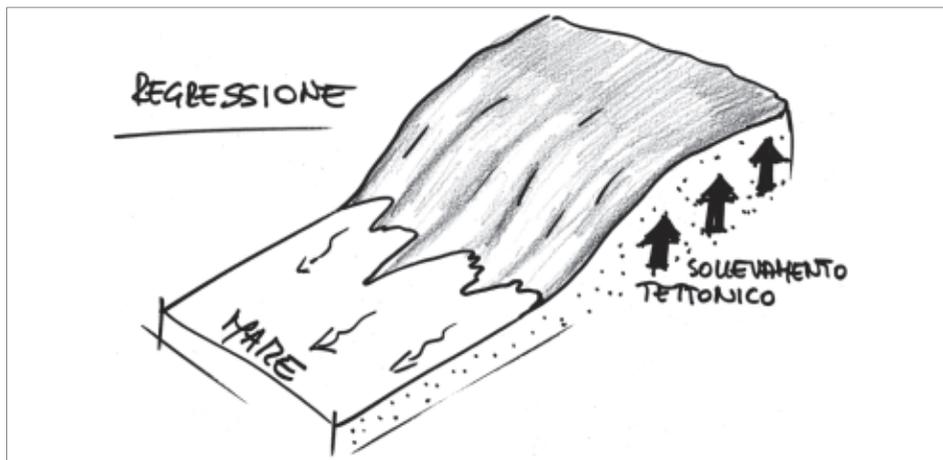


Figura 1.22

Per cui dal punto di vista stratigrafico, mancando la sedimentazione, ai periodi di regressione sono sempre associate delle lacune stratigrafiche. Ne consegue pertanto una serie di successivi *cicli sedimentari* alternati a regressioni del tipo: a) primo ciclo di trasgressione e sedimentazione (facies marina); b) regressione, erosione, lacuna stratigrafica; c) secondo ciclo di trasgressione e sedimentazione (facies marina); e così via con successivi episodi marini alternati di regressione e trasgressione.

1.3.4. Fenomeni e stili tettonici su rilievi e versanti

Sia i singoli fenomeni tettonici (pieghe, fratture, scorrimenti, ricoprimenti), sia la sintesi delle loro vaste combinazioni nell'ambito di una stessa regione geolitologica (stili tettonici), esercitano una tale influenza sulla geomorfologia dei pendii, da poterne condizionare la stessa erosione normale. Ad esempio sia una *piega monoclinale* (figura 1.23 di L. Trevisan, da [33] elaborata) che una *piega a ginocchio* (figura 1.24 di L. Trevisan, da [33] elaborata) conferiscono al pendio una sottostante forma di base che va di fatto a ripercuotersi in qualche maniera sulla sua stessa geomorfologia di superficie.

Analogamente notevoli possono essere le influenze tettoniche sul pendio nel caso di una piega stirata a tal punto da fratturarsi e dar vita ad una *piega faglia diritta* (figura 1.25 da [33] elaborata) o *rovescia* (figura 1.26 da [33] elaborata).

Altro fenomeno tettonico degno di essere menzionato come movimento strutturale della crosta terrestre capace di incidere sulla conformazione di un versante è il *ricoprimento di rilievo* generato in corrispondenza di una valle per effetto di uno scorrimento di masse rocciose che, soggette a spinte tettoniche, tendono ad accavallarsi le une sulle altre (figura 1.27, da [33] elaborata).

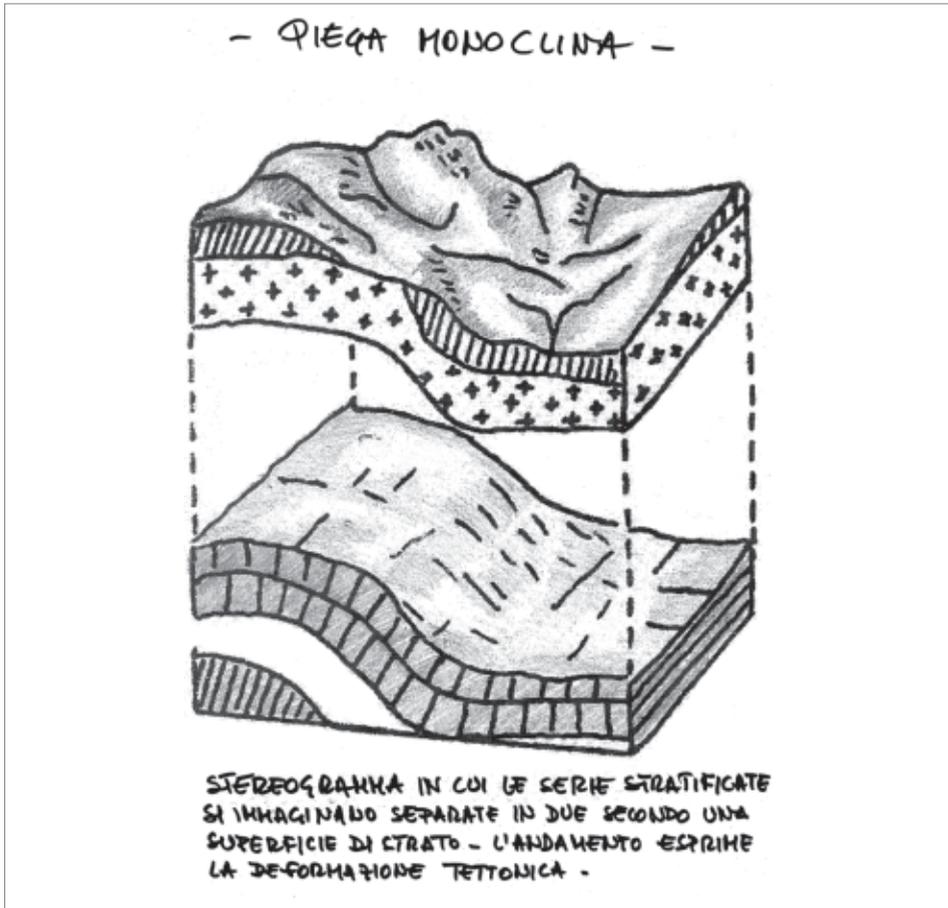


Figura 1.23

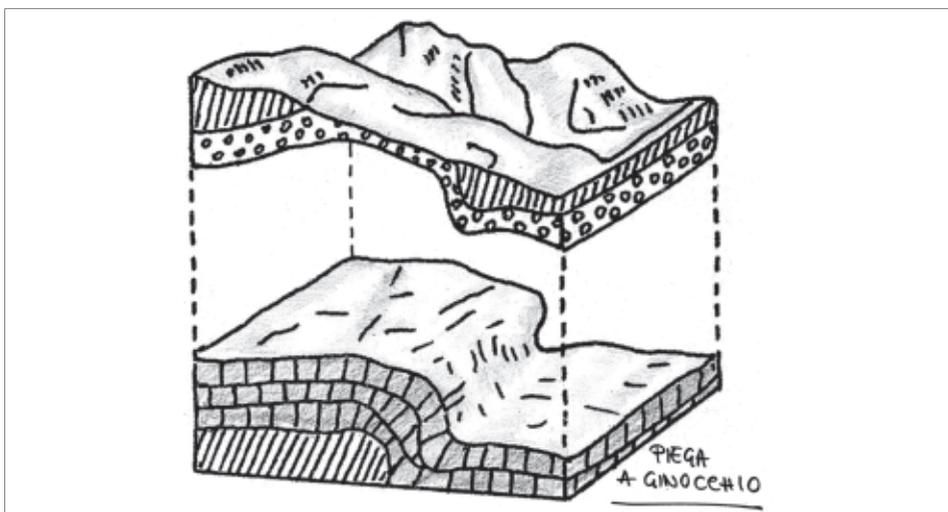


Figura 1.24

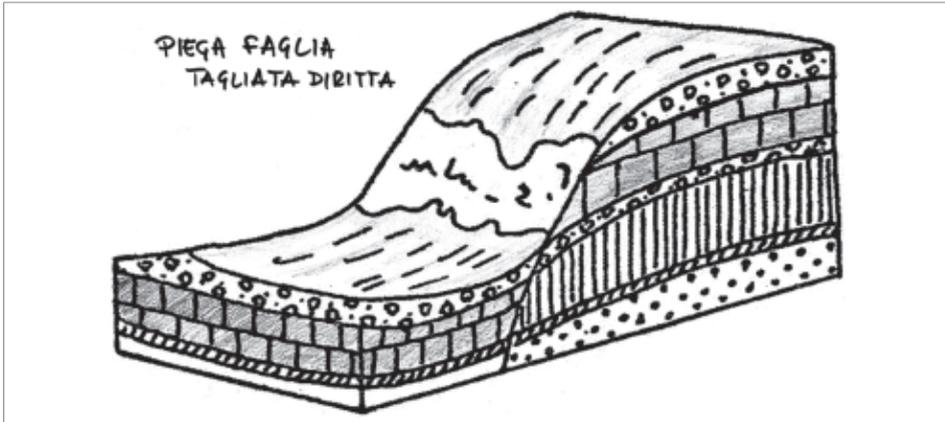


Figura 1.25

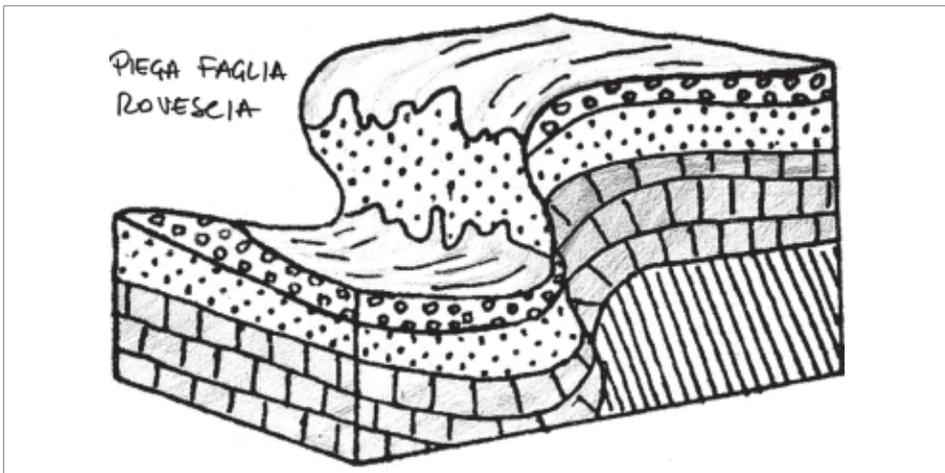


Figura 1.26

Per quanto concerne poi l'espressione regionale di uno stile tettonico è interessante ricordare, ai fini della conformazione dei pendii, quello cosiddetto *isoclinal* caratterizzato dalla presenza di pieghe inclinate più o meno dello stesso angolo sull'orizzonte (figura 1.28).

Così come degno di nota è anche lo stile cosiddetto *a scaglie*, di cui si riporta qui l'interessante esempio del Monte Brugiana, fra Massa e Carrara (figura 1.29, da [33]).

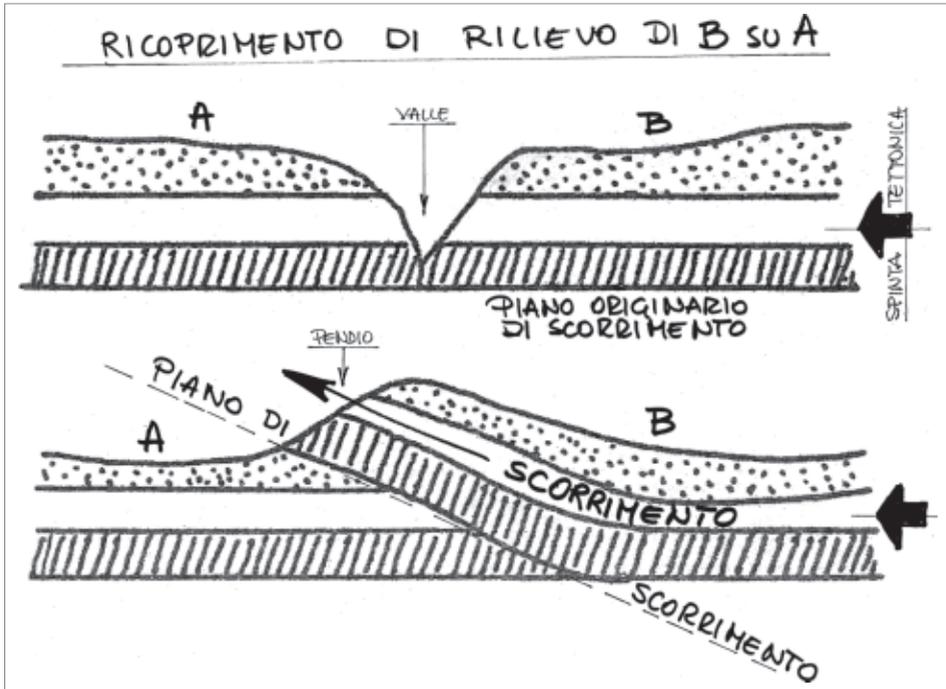


Figura 1.27

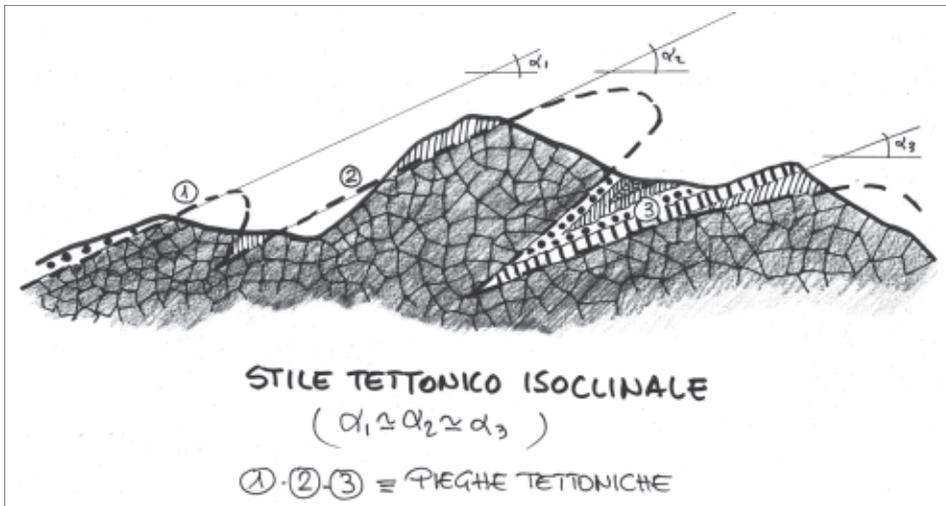


Figura 1.28



Figura 2.8

e disfatte dall'acqua, la maggiore o minore accelerazione locale di discesa ad esse impressa dalle acque pluviali lungo i vari tratti di pendenza incontrati nel loro moto verso valle. Talvolta, specialmente quando le infiltrazioni di acqua da superficiali si trasformano in profonde a causa di una più spinta alterazione e disgregazione delle rocce componenti, la comparsa di una lama come moto di superficie può rappresentare l'indizio di un più profondo e vasto moto di massa, tipico di una vera e propria frana, caratterizzata da un lento cedimento viscoso privo però di una sua ben definita superficie di distacco (figura 2.8: caso professionale di una lama superficiale in formazione scisto-filladica alterata, rappresentata a schizzo in pianta, attualmente in studio da parte dell'autore nelle pendici collinari della Calabria settentrionale tirrenica, simulante evento indiziale di più profondo fenomeno di traslazione franosa, con dissesto di manufatti edilizi). Tipo di frana, questo, di cui si dirà nel seguito.

2.2.4. *Calanchi argillosi*

Il fenomeno calanchivo rappresenta forse una delle più pittoresche espressioni erosive della Penisola, caratterizzando con un'inconfondibile geomorfologia il disegno del paesaggio. Tipico delle formazioni argillose e residuamente talvolta scistose o filladiche, esso è sostanzialmente il prodotto di un'erosione (anch'essa superficiale) di alterazione fisica della roccia costituente (dovuta all'interazione acqua-argilla) e successivamente di disgregazione, dilavamento e trasporto da parte delle acque pluviali defluenti; erosione che si manifesta in modo multiforme, a seconda delle situazioni geomorfologiche locali, mediante caratteristici solchi multipli incisi nel terreno secondo la sua pendenza, piccoli torrioni o tozzi mammelloni di terreno solcati in verticale, nonché cupole, creste aguzze e modesti cocuzzoli, spesso anche cespugliati (figura 2.9: calanchi d'Aspromonte – Calabria, da [42] adattata; figura 2.9.a: sperone roccioso di Civita di Bagnoregio con sullo sfondo l'imponente “Valle dei calanchi”, da [8]; figura 2.10: calanchi di Belvedere M.mo (CS) – Calabria tirrenica settentrionale, da [8]).

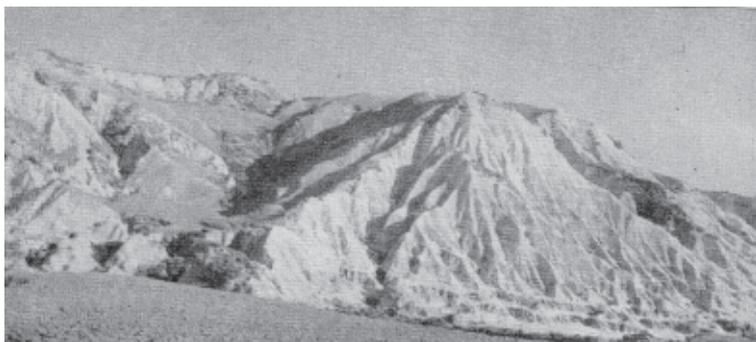


Figura 2.9



Figura 2.9.a

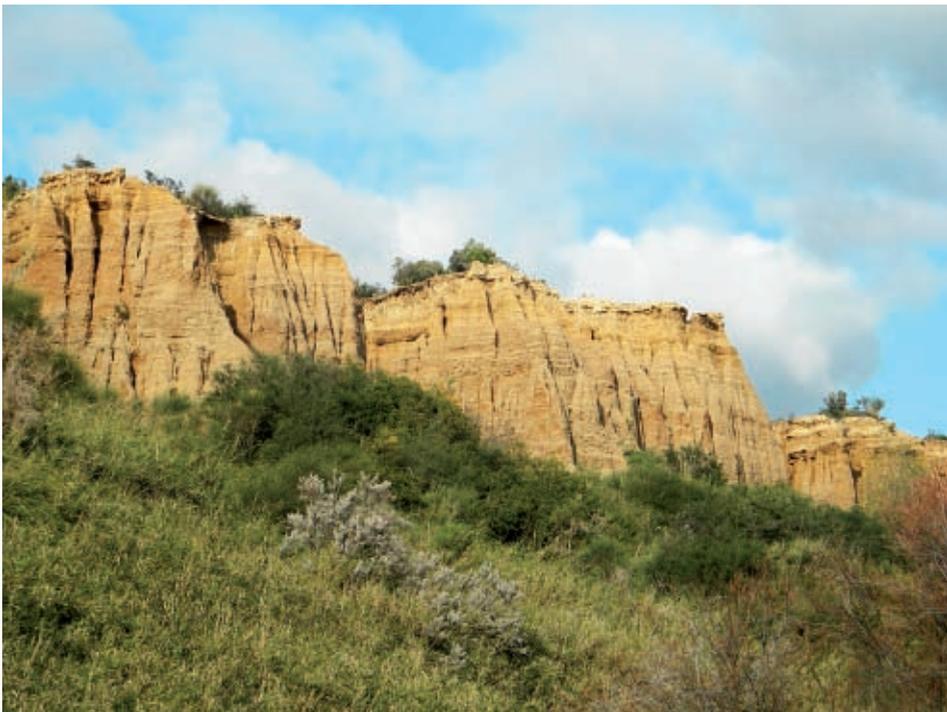


Figura 2.10

LITOLOGIA

La natura litologica delle formazioni calanchive è soprattutto riconducibile alle rocce argillose compatte ed uniformi di epoca pliocenica e miocenica, oltre che subordinatamente ad argille scistose paleogeniche, a filladi alterate e ad argille scagliose, diffuse un po' dappertutto nell'Appennino, dai territori tosco-emiliani a quelli umbro-marchigiani ed abruzzesi, fin giù ai territori lucani, calabri e siculi. Va poi segnalato che le formazioni calanchive sono presenti sul territorio in modo talvolta camuffato, non conclamato, quando cioè la loro ibrida matrice litologica (congiuntamente di natura sabbiosa ed argillosa) genera contemporaneamente – con le sue diverse forme di alterazione e disgregazione, mescolate e confuse fra loro – due fenomeni erosivi anch'essi diversi, quello calanchivo (inerente alla componente argillosa) e quello dello scoscendimento superficiale (inerente alla componente sabbiosa), dando vita ad un complesso fenomeno di intensa erosione caratterizzato da un paesaggio piuttosto ibrido e devastato, su cui è facile che si inneschino ulteriori più gravi dissesti. In proposito va infatti sottolineato che, mentre nello scoscendimento superficiale (litologicamente relativo a terreni clastici psefitici e psammitici incoerenti o quasi) l'acqua pluviale defluente esplica sia l'azione disgregatrice che quella di ablazione e trasporto del materiale, viceversa nel caso del dissesto calanchivo (litologicamente di natura argillosa) l'azione di alterazione e disgregazione è confinata alle interazioni fisiche acqua-argilla, rimanendo alle acque defluenti solo il compito di trasportare lungo il pendio il materiale alterato.

CAUSE PROVOCATRICI

Variazioni termiche – Interazioni molecolari fra l'acqua e l'argilla – Azione delle acque pluviali selvagge.

GEOMORFOLOGIA

La geomorfologia dei calanchi, quale causa prima del relativo fenomeno erosivo, è ascrivibile innanzitutto all'interazione molecolare che si sviluppa fisicamente fra le formazioni rocciose costituenti (prevalentemente argillose) e l'acqua di pioggia. È infatti, questa, la prima fondamentale fase (tipica dei fenomeni calanchivi) di alterazione e disgregazione della roccia madre di pendio, spesso facilitata dalla presenza di variazioni termiche, le quali – nel favorire la fessurazione delle argille – consentono poi all'acqua piovana di meglio penetrare nel corpo argilloso e di alterarlo più estesamente per reciproca interazione molecolare. Segue quindi la fase successiva in cui le acque meteoriche, defluenti più o meno selvaggiamente sul pendio, trascinano a valle il materiale argilloso alterato e disgregato, mettendo a nudo il paesaggio calanchivo per come scolpito dall'interazione molecolare acqua-argilla responsabile dell'alterazione e disgregazione argillosa. A contribuire al modellamento geomorfologico interviene poi – come al solito – la

pendenza dei versanti argillosi aggrediti, dal momento che è proprio in funzione di essa che si caratterizzano le diverse forme calanchive, assumendo aspetti fra loro differenti, dai solcatissimi pendii a dolce profilo alle più aspre forme a parete verticale cosiddette “*a canne d’organo*” (figura 2.11: formazione calanchiva nel comune di Belvedere M.mo, da [8]).



Figura 2.11

2.2.5. *Erosione da acque incanalate*

È, questo, un fenomeno corrosivo tipico delle zone collinari e montuose aspre litologicamente tenere, poco consistenti o alterate, caratterizzate dalla presenza di incisioni di pendio, fossi, valloni e greti torrentizi (figure 2.12, 2.13, 2.14: incisioni di pendio in rocce calcaree del mesozoico nella propaggine sud del monte Serra la Limpida, 1119 m, alle spalle del Capo Scalea, in destra idraulica del corso terminale del fiume Lao nella Calabria tirrenica settentrionale, da [8]) in cui s’incanalano le acque pluviali, incidendone e corrodendone fondo e sponde con produzione di detriti, che – trasportati più o meno caoticamente (a seconda della pendenza dell’alveo) con trascinalamenti, rotolamenti e salti, talvolta accompagnati da fango – aggravano a loro volta la già intensa azione erosiva esplicita dall’acqua.



Figura 2.12



Figura 2.13

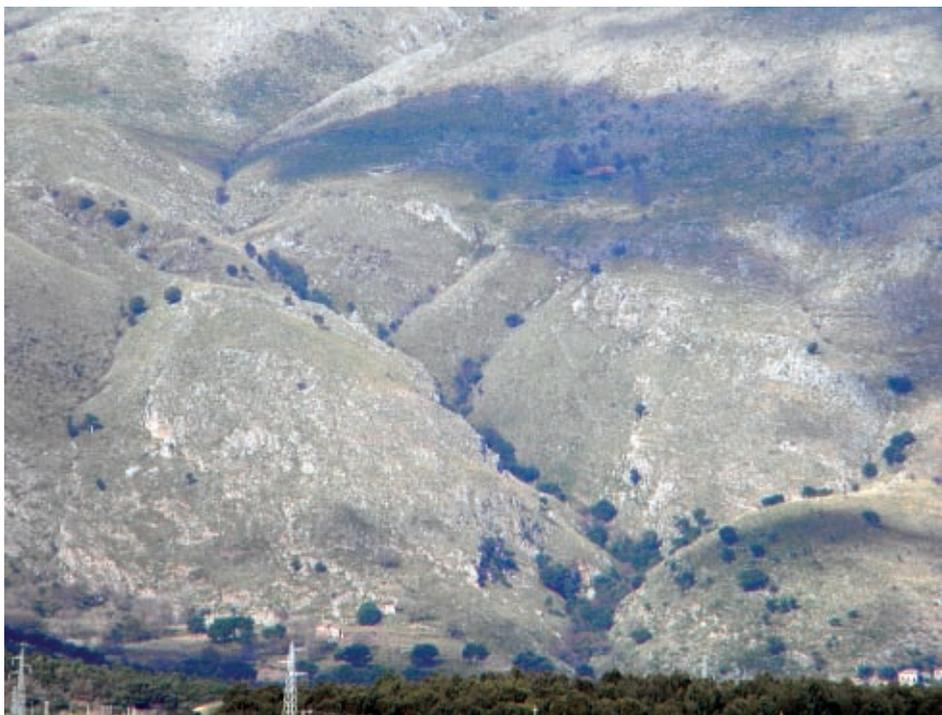


Figura 2.14

LITOLOGIA

La natura litologica dei terreni erosi dalle acque incanalate è piuttosto varia (rocce lapidee tenere o alterate, conglomerati, formazioni argillose, ecc.), potendo spaziare dai calcari alle arenarie, dai calcareniti agli scisti alterati, dalle formazioni sabbiose più o meno cementate a quelle argillose.

CAUSE PROVOCATRICI

Acque naturalmente incanalate – Azione corrosiva dei detriti trasportati.

GEOMORFOLOGIA

La geomorfologia del dissesto di intensa erosione ascrivibile alle acque incanalate dipende sostanzialmente, oltre che dalla consistenza litologica dei terreni aggrediti (costituenti la fonte del trasporto solido), anche dal tipo di incanalamento imboccato dall'acqua (incisioni di pendio più o meno profonde, ripidezza dei fossi e dei valloni, pendenza e larghezza dei greti torrentizi), in modo da ricalcare in un certo qual modo i meccanismi erosivi propri degli scoscardimenti superficiali.

3. Influenze pluviometriche e idrografiche su bacini e versanti

3.1. Generalità

La concomitanza tra i fenomeni franosi e gli eventi piovosi è generalmente una circostanza euristica attribuibile al turbamento dell'equilibrio naturale dei pendii indotto dalla pioggia, anche se talvolta non è questa la causa determinante dell'innescò di un movimento franoso. Non v'è comunque dubbio che – a parte le precipitazioni eccezionali, le quali di per sé costituiscono in merito sempre un determinante fattore eziologico naturale – un clima piovoso sia quasi sempre un'importante causa preparatoria dell'evento franoso, specialmente se le rocce costituenti il pendio siano particolarmente sensibili all'alterazione meteorica. Senza poi parlare dell'azione di rapido scalzamento che un corso d'acqua può esplicare sulle sponde di talweg, al piede del pendio, in concomitanza di una piena straordinaria conseguente al verificarsi di una pioggia eccezionale nel bacino imbrifero dell'asta fluviale. Azione di piede, questa, in ogni caso nefasta per la stabilità di un versante anche se di tipo erosivo lento, imputabile non all'azione violenta di una precipitazione straordinaria, quanto piuttosto alle predette condizioni di clima piovoso. Resta pertanto confermata l'importanza sia del fattore pluviometrico che di quello idrografico, risalente quest'ultimo alla geomorfologia stessa dei versanti. Così, mentre lo studio dell'influenza del primo fattore (pluviometria) richiede in pratica un'analisi statistica delle precipitazioni storicamente verificatesi nella zona oggetto d'indagine (finalizzata alla stima delle probabilità con cui eventi pluviometrici di diversa intensità possono presentarsi in un determinato periodo di tempo), viceversa lo studio delle influenze esercitate sulla stabilità di un versante dal secondo fattore (idrografia) dipende dalla morfometria non solo della rete idrografica esistente quanto anche del bacino imbrifero su cui gli eventi pluviometrici, lenti o violenti che siano, vanno ad esercitare la loro azione. Sicché l'azione sinergica dei suddetti due fattori si traduce in sostanza o nella lenta potenza erosiva esercitata nel tempo dalle acque superficiali su di un versante o in un evento pluviometrico critico (fungente da causa determinante di un movimento franoso), eventualmente aggravato ai fini della stabilità del versante da un insieme di conseguenti eventi idrografici caratterizzati da fenomeni critici di ruscellamento superficiale o addirittura – in presenza di grandi impluvi o di corsi d'acqua maggiori – da altrettanti fenomeni critici di piena.

3.2. Bacini imbriferi e versanti

3.2.1. Legge di possibilità climatica

A parte la diretta influenza eziologica esercitata dalla pluviometria sui fenomeni franosi come causa preparatoria o perfino determinante, la conoscenza pluviometrica aiuta in ogni caso a delineare le caratteristiche dell'ambiente naturale in cui essi avvengono. Come tale, essa richiede sempre in presenza di frane (potenziali o in atto) una certa attenzione da parte di chi si trovi ad affrontarne lo studio. Non va poi sottaciuto che, allorché si abbia a che fare con una frana già avvenuta, lo studio pluviometrico serve in particolare ad inquadrare le caratteristiche della precipitazione verificatasi in concomitanza di essa e le conseguenze idrografiche che ne sono derivate nell'area di frana, onde poterne valutare a posteriori il grado di prevedibilità. Senza infine parlare della necessità progettuale di conoscere in ogni caso la *legge di pioggia* (o di *possibilità climatica*) inerente ad un'area in frana o già franata, ai fini della possibilità di valutarne le portate idrauliche di superficie da raccogliere, canalizzare e smaltire. La conoscenza delle caratteristiche pluviometriche di un comprensorio idrografico è in genere finalizzata a stabilire una relazione fra la *massima altezza* h (in mm) di pioggia caduta e la sua *durata* t (in ore) del tipo:

$$h = at^n$$

con

a \equiv altezza di pioggia (in mm) caduta in un'ora;

n \equiv coefficiente angolare, sempre < 1 dal momento che l'*intensità media* della pioggia $i = h/t = a t^{(n-1)}$ diminuisce all'aumentare della sua durata.

È nota, ad esempio, la seguente relazione proposta dal *Gherardelli* per l'Appennino meridionale in riferimento a durate di pioggia maggiori di 24 ore:

$$h = 109 t^{1/3}$$

Utili, seppure un po' datate e al limite anche con qualche incongruenza fisica, sono inoltre le curve binomiali del tipo:

$$h = (a - bt)^n$$

come, ad esempio, quella del *Forti* (per durate inferiori alle 24 ore) inerente ai maggiori nubifragi italiani, in pratica rispondente per molte regioni italiane:

$$h = (187 - t)t^{1/3}$$

Fra le relazioni monomiali del primo tipo è opportuno inoltre ricordare quella del *Frosini* per Roma (durate < 10 ore):

$$h = 80 t^{0,42}$$

quella del *Contessini* per Firenze (durate non superiori a 2 ore):

$$h = 50,6 t^{0,88}$$

e quella proposta dal *Montanari* per la regione emiliana:

$$h = 70 t^{1/3}$$

Così come utile è fra le seconde anche la relazione binomia proposta dal *Fantoli* per Genova (durate di pioggia inferiori a 10 ore):

$$h = (92 - 1,3t)t^{1/2}$$

In relazione poi al periodo di ritorno T (espresso in anni) con cui può presentarsi una precipitazione eccezionale o comunque intensa, occorre correggere le precedenti relazioni $h = h(t)$ (sia monomie che binomie) mediante la seguente formulazione:

$$h = h(t) (1 + k \log T)$$

dove k è un coefficiente dipendente dalla quota ipsografica media H_m del bacino espressa in metri e dalla massima altezza di pioggia giornaliera h_g espressa in mm. Così nel caso ordinario di leggi di pioggia monomie si ha:

$$h = at^n (1 + k \log T)$$

dove i tre parametri a , n , k possono porsi per calcoli orientativi direttamente proporzionali al parametro $\alpha = [H_m(\text{m})^{1/5} + h_g(\text{mm})/100]$:

$$a = c_1 \alpha$$

$$n = c_2 \alpha$$

$$k = c_3 \alpha$$

Per quanto riguarda la predetta quota ipsografica, si può suddividere la superficie del bacino (ridotta all'orizzonte) in un opportuno numero di superfici, ciascuna compresa fra due prefissate curve di livello. Quindi, detta S_i l'area della generica superficie i^{ma} delimitata superiormente dalla curva di livello di quota H_i ed inferiormente dalla curva di quota rispettivamente H_{i-1} , il valore di H_m è dato da:

$$H_m = \sum[S_i (H_i + H_{i-1})] / (2\sum S_i)$$

Il valore della massima altezza di pioggia giornaliera h_g cui far riferimento può desumersi invece dalla carta delle isoiete delle massime precipitazioni giornaliere della regione in cui ricade il bacino. Ed in riferimento ad uno studio eseguito in proposito dall'autore nel versante tirrenico della Calabria

settentrionale, se ne propongono qui a titolo esemplificativo alcune utili valutazioni.

3.2.2. Esempificazione di un caso reale

Si propone il caso del bacino imbrifero del Corvino di Diamante (CS) (figura 3.1, da [37] adattata e modificata), il quale presenta un'estensione superficiale ridotta all'orizzonte di 36,20 Km², a varia permeabilità (22,29 Km² elevata; 2,92 Km² elevata-buona; 0,61 Km² buona; 10,38 Km² moderata-bassa), ed uno sviluppo perimetrale di 27,88 Km (figura 3.2) allo spartiacque superficiale.

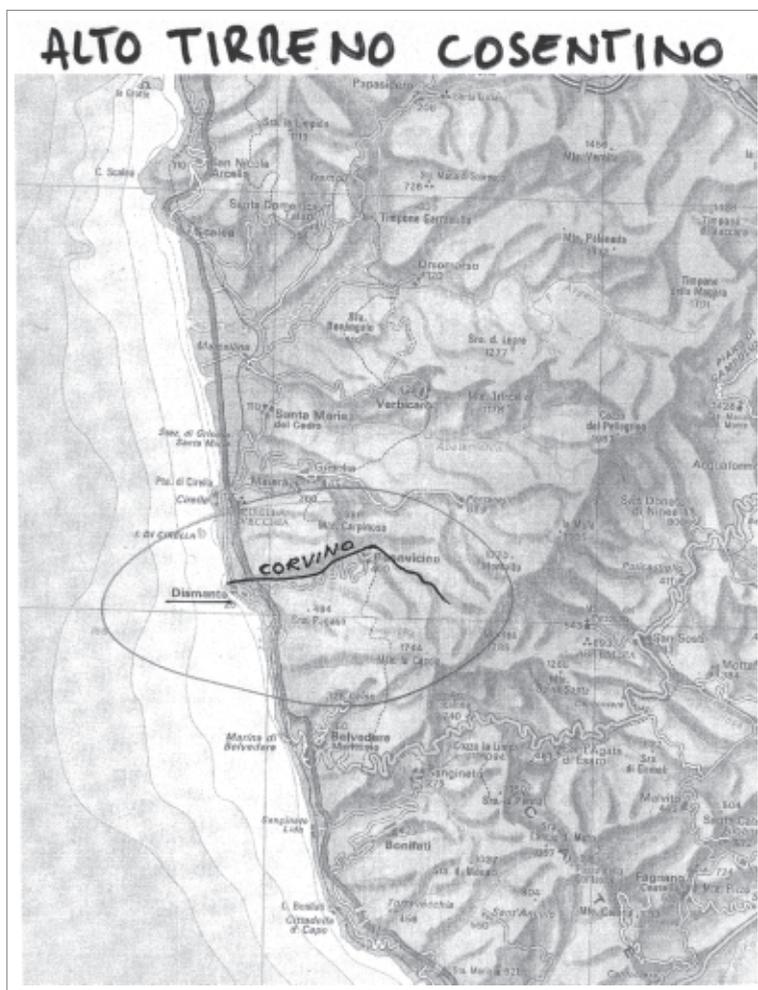


Figura 3.1

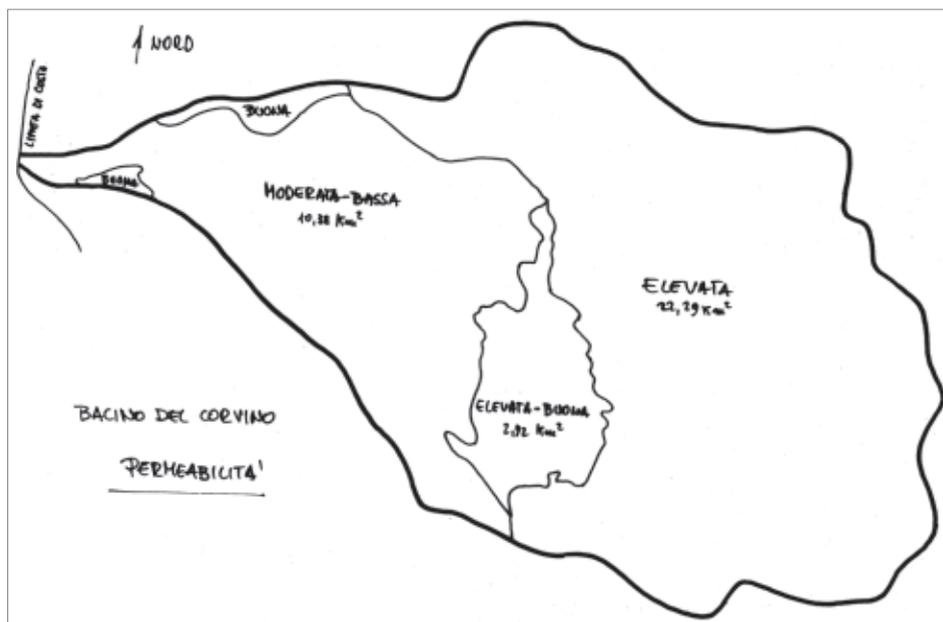


Figura 3.2

Sono state individuate le seguenti superfici componenti (figura 3.3.a):

$S_1 = 3,75 \text{ Km}^2$ fra le curve di livello 0 e 200 m (s.l.m.)

$S_2 = 9,40 \text{ Km}^2$ fra le curve di livello 200 e 500 m

$S_3 = 15,94 \text{ Km}^2$ fra le curve di livello 500 e 1000 m

$S_4 = 5,89 \text{ Km}^2$ fra le curve di livello 1000 e 1500 m

$S_5 = 1,22 \text{ Km}^2$ fra le curve di livello 1500 e 1750 m.

È stata quindi calcolata la *quota ipsografica media* del bacino:

$$H_m = [3,75 \cdot 200 + 9,40 \cdot (200 + 500) + 15,94 \cdot (500 + 1000) + 5,89 \cdot (1000 + 1500) + 1,22 \cdot (1500 + 1750)] / (2 \cdot 36,20) = 690 \text{ m}$$

graficamente anche confermata dal tracciamento della *curva ipsografica* dello stesso bacino (figura 3.3.b).

Poiché la lunghezza dell'asta fluviale principale è pari a $L = 10,750 \text{ Km}$, resta anche individuata la pendenza media I_m del bacino imbrifero:

$$I_m = 2 H_m / L = 2 \cdot 690 / 10750 = 0,1284 = 12,84\%$$

- per $t = 24$ ore:

$$i_{24} = 0,0001/(1 - e^{-0,0009 \cdot 24}) = 0,0046 \text{ m/ora}$$

$$h_{24} = i_{24} t_{24} = 0,0046 \text{ m/ora} \cdot 24 \text{ ore} = 0,11 \text{ m}$$

con il battente idrico nella falda che ovviamente – qualunque sia la durata della pioggia di soglia – conferma il valore dell'altezza di pioggia caduta, avendosi ad esempio:

- per $t = 1$ ora:

$$z = i(1 - e^{-K\beta t})/(K\beta) = 0,11 \cdot (1 - e^{-0,36 \cdot 0,0025 \cdot 1})/(0,36 \cdot 0,0025) = 0,11 \text{ m}$$

- per $t = 24$ ore:

$$z = i(1 - e^{-K\beta t})/(K\beta) = 0,0046 \cdot (1 - e^{-0,36 \cdot 0,0025 \cdot 24})/(0,36 \cdot 0,0025) = 0,11 \text{ m}$$

Ed analoga conferma non può ovviamente che venire anche dal calcolo del battente idrico estratto dall'equazione di stabilità del pendio al limite di equilibrio, avendosi nell'esempio proposto:

$$z = \lambda h(1 - p/f) \cos \alpha = 1,6 \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,466/0,532) \cdot 0,91 = 0,11 \text{ m}$$

Il predetto modello idrologico si presta poi ad un'altra semplice, ma interessante, interpretazione analitica che val la pena mostrare. Se infatti si esegue un bilancio idrologico globale della falda con riferimento al tempo t (pari alla durata della pioggia), si può scrivere:

$$v = q + w$$

con

$v = iA$ (portata d'acqua, al netto di eventuali perdite come sopra, affluente alla superficie della falda);

$q = Kbz$ (portata d'acqua defluente dalla sezione di valle della falda);

$w = Az/t$ (portata media d'acqua accumulata nella falda nel tempo t);

da cui, sostituendo, si ha:

$$iA = Kbz + Az/t$$

ovvero, ponendo $\beta = b/A$:

$$i = K\beta z + z/t = (K\beta + 1/t)z$$

e quindi anche:

$$z = i/(K\beta + 1/t)$$

Uguagliando poi il valore di tale battente a quello calcolato dal modello di stabilità del pendio in condizione di equilibrio limite, si ha:

$$i/(K\beta + 1/t) = \lambda h(1 - p/f)\cos\alpha$$

da cui si ottiene il valore dell'intensità della pioggia di soglia:

$$i = \lambda h(1 - p/f)(K\beta + 1/t)\cos\alpha \approx \lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/t$$

essendo (come si vedrà nel caso ordinario di piogge di durata inferiore alle 24 ore e di terreni non eccessivamente filtranti) trascurabile il termine $K\beta$ rispetto a $1/t$. E tale espressione di i restituisce esattamente i valori dell'intensità i di soglia calcolati in precedenza mediante l'espressione $i = K\beta\lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/(1 - e^{-K\beta t})$, come si evince dalla seguente esemplificazione eseguita con gli stessi dati utilizzati in precedenza (in cui $K\beta = 0,36 \cdot 0,0025 = 0,0009$ è trascurabile rispetto a $1/t$), avendosi:

$$i = \lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/t = 1,6 \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,466/0,532) \cdot 0,91/t = 0,11/t$$

da cui:

- $t = 1/3$ ora; $i_{1/3} = 0,11/(1/3) = 0,33$ m/ora
- $t = 1/2$ ora; $i_{1/2} = 0,11/(1/2) = 0,22$ m/ora
- $t = 1$ ora; $i_1 = 0,11/(1) = 0,11$ m/ora
- $t = 2$ ore; $i_2 = 0,11/(2) = 0,055$ m/ora
- $t = 3$ ore; $i_3 = 0,11/(3) = 0,037$ m/ora
- $t = 6$ ore; $i_6 = 0,11/(6) = 0,018$ m/ora
- $t = 12$ ore; $i_{12} = 0,11/(12) = 0,009$ m/ora
- $t = 24$ ore; $i_{24} = 0,11/(24) = 0,0046$ m/ora

Risultati, questi, perfettamente coincidenti con quelli calcolati sopra.

Se ne deduce quindi che, per la sua evidente semplicità, nel caso ordinario sopra evidenziato (piogge di durata inferiore alle 24 ore e terreni non molto filtranti, o comunque nel caso di $K\beta \ll 1/t$) si può calcolare la soglia pluviale di innesco della frana mediante la seguente formula:

$$i = \lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/t$$

cui, per gli stessi motivi ($K\beta$ trascurabile rispetto a $1/t$), può anche associarsi il calcolo del battente z con la seguente formula immediata (corrispondente ad una portata di filtrazione trascurabile nella sezione di valle della falda):

$$z = it$$

Battente, questo, che nel caso del pendio sopra esemplificato assume (per qualsiasi durata di pioggia) il predetto valore critico $z = 0,11$ m, come risulta dal seguente semplice confronto numerico:

- $t = 1/3$ ora, $i_{1/3} = 0,33$ m/ora: $z = 0,33 \text{ m} \cdot 1/3 \text{ ora} = 0,11 \text{ m}$
- $t = 24$ ore, $i_{24} = 0,0046$ m/ora: $z = 0,0046 \cdot 24 = 0,11 \text{ m}$.

3.3.7. Valutazione del rischio di innesco della frana

È poi sempre bene valutare quale sia all'attualità (o quale fosse, nel caso di una valutazione postuma rispetto all'evento franoso, eseguita in back-analisy) il rischio che un pendio possa (o potesse) franare per effetto dell'imbibizione meteorica. Ciò può condursi mettendo in relazione la soglia pluviale i con la legge di possibilità climatica della zona in cui ricade il pendio. Riprendendo infatti tale legge completa del relativo periodo di ritorno, già vista in precedenza [$h_{p,T} = at^n (1 + k \log T)$, con a pari all'altezza di pioggia caduta in un'ora], si ottiene la seguente espressione per l'intensità di pioggia attesa con un periodo di ritorno T (anni):

$$i = h_{p,T}/t = at^{n-1} (1 + k \log T)$$

Uguagliando tale valore a quello sopra calcolato [$i = K\beta\lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/(1 - e^{-K\beta t})$; oppure $i = \lambda h(1 - p/f)(K\beta + 1/t)\cos\alpha$; o più semplicemente $i = \lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/t$], si ha in riferimento al caso più semplice:

$$\lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/t = at^{n-1} (1 + k \log T)$$

da cui:

$$\log T = \lambda h(1 - p/f)\cos\alpha/(kat^n) - 1/k$$

Così, ad esempio, se per la falda franosa esemplificata al precedente § 3.3.6, si assume una legge di possibilità climatica del tipo:

$$h_{p,T} = 45t^{0,5}(1 + 0,75 \log T)$$

si ha:

$$k = 0,75; a = 45 \text{ mm}; n = 0,5$$

e quindi:

$$\log T = 1,6 \cdot 0,6 \cdot (1 - 0,466/0,532) \cdot 0,91/(0,75 \cdot 0,045 \cdot t^{0,5}) - 1/0,75 = 3,21/t^{0,5} - 1,33$$

Considerando pertanto durate di pioggia dell'ordine dell'ora (ritenute, in base all'esperienza, critiche per le aree non molte estese come quelle franose), risulta quanto segue:

- per $t = 1$ ora:

$$\log T = 3,21/t^{0,5} - 1,33 = 1,88$$

$$T = 10^{1,88} = 76 \text{ anni}$$

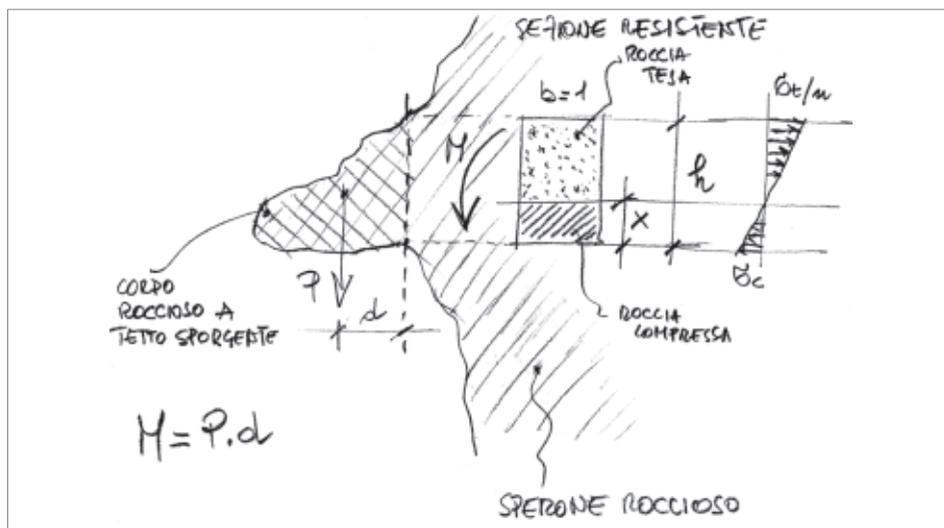


Figura 4.29.a

4.5. Influenze del sisma sulla stabilità dei pendii

Si consideri un pendio potenzialmente esposto a scoscendimenti. In caso di evento sismico il volume di terreno tendente a scoscendere è interessato, oltre che da un momento agente M_a di natura statica generato dal suo peso, anche da un momento agente di natura sismica M_s (generato dall'accelerazione cui in tal caso è sottoposto il suddetto volume), ai quali si oppone il momento resistente M_r , risalente all'azione stabilizzante delle forze di coesione e di attrito. In riferimento, ad esempio, al meccanismo generale di scoscendimento analizzato al §4.2.5 (cui si rimanda il lettore) inerente ad un pendio in terreno non omogeneo, se per il calcolo dei momenti si sceglie come polo il centro O del cerchio di scoscendimento, risulta quanto segue (figura 4.30):

- momento agente in assenza di sisma: $M_a = \sum \Delta P_i r$
- momento resistente: $M_r = (\sum c'_k \Delta s + \sum \Delta P_n \operatorname{tg} \varphi) r$
- momento agente generato dal sisma di normativa (NTC 2008, §7.11.3.5.2): $M_s = \beta_s S a_g P (y \pm 0,5x) / g$

con i simboli usati al suddetto precedente §4.2.5 e con i seguenti altri simboli: $P = \sum \Delta P \equiv$ peso del volume di terreno mobilitato nello scoscendimento;

$y \equiv$ eccentricità della componente orizzontale $\beta_s S a_g P / g$ della forza sismica agente (applicata nel baricentro G del volume di terreno in scoscendimento) rispetto al polo O;

$x \equiv$ eccentricità della componente verticale $\pm 0,5 \beta_s S a_g P / g$ della forza sismica (ap-

plicata nel centro di figura G del volume di terreno in scoscendimento) rispetto al polo O ;

$a_g \equiv$ accelerazione sismica di picco attesa su sito di riferimento rigido;

$g \equiv$ accelerazione di gravità;

$\beta_s \equiv$ coefficiente di riduzione dell'accelerazione sismica massima attesa al suolo, per come tabellato in Tab. 7.11.I – *NTC 2008* (figura 4.31);

$S = S_s \cdot S_T \equiv$ coefficiente che comprende l'effetto dell'amplificazione stratigrafica S_s e di quella topografica S_T , di cui al §3.2.3.2 *NTC 2008* – Tab. 3.2.II; Tab. 3.2.IV; Tab. 3.2.V; Tab. 3.2.VI (figure 4.31.a,b,c,d).

Sicché la condizione di stabilità del pendio in presenza di sisma è in definitiva espressa dalla seguente relazione:

$$\sum c'_k \Delta s + \sum \Delta P_n \operatorname{tg} \varphi \geq \sum \Delta P_t + \beta_s S a_g P (y \pm 0,5x)/(rg)$$

Si ritiene utile anche osservare che nel passato si soleva trascurare nel calcolo l'effetto della componente verticale della forza sismica, assumendo soltanto a livello orientativo una componente orizzontale (applicata sempre nel baricentro del predetto volume di scoscendimento) di valore $a_s P$, con a_s pari a: 0,1 (terremoti gravi); 0,25 (terremoti violenti); 0,5 (terremoti catastrofici) [33]. Sotto l'aspetto euristico val la pena però riferire in proposito che pendii in argille poco sensitive – caratterizzati a tavolino da una precaria stabilità di calcolo – si dimostrano invece realmente stabili durante il terremoto; mentre, al contrario, in pendii costituiti da *loëss* (deposito sedimentario polverulento di origine eolica) e da alcune sabbie scarsamente cementate le scosse hanno talvolta effetti catastrofici [33].

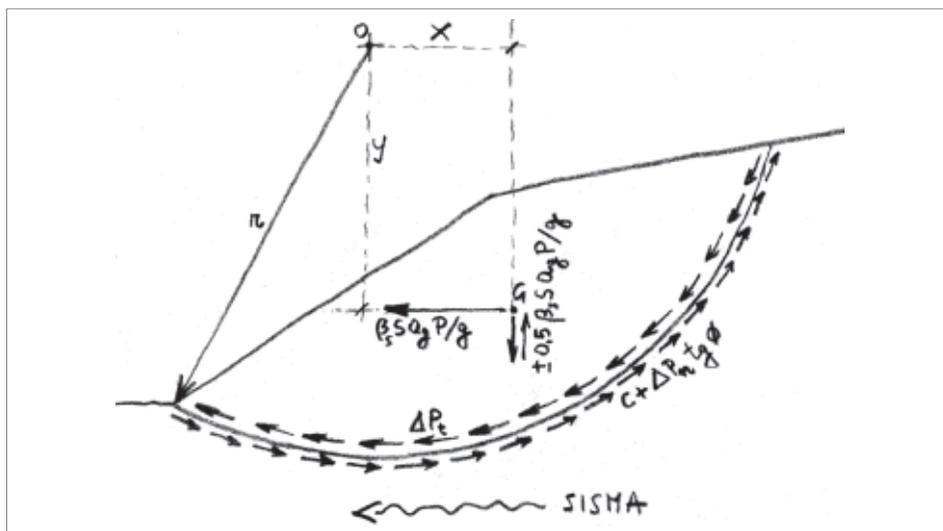


Figura 4.30

Tabella 7.11.I – Coefficienti di riduzione dell'accelerazione massima attesa al sito.

	Categoria di sottosuolo	
	A	B, C, D, E
	β_s	β_s
$0,2 < a_g(g) \leq 0,4$	0,30	0,28
$0,1 < a_g(g) \leq 0,2$	0,27	0,24
$a_g(g) \leq 0,1$	0,20	0,20

Figura 4.31

Tabella 3.2.II – Categorie di sottosuolo

Categoria	Descrizione
A	<i>Ammassi rocciosi affioranti o terreni molto rigidi</i> caratterizzati da valori di $V_{s,30}$ superiori a 800 m/s, eventualmente comprendenti in superficie uno strato di alterazione, con spessore massimo pari a 3 m.
B	<i>Rocce tenere e depositi di terreni a grana grossa molto addensati o terreni a grana fina molto consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 360 m/s e 800 m/s (ovvero $N_{SPT,30} > 50$ nei terreni a grana grossa e $c_{v,30} > 250$ kPa nei terreni a grana fina).
C	<i>Depositati di terreni a grana grossa mediamente addensati o terreni a grana fina mediamente consistenti</i> con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ compresi tra 180 m/s e 360 m/s (ovvero $15 < N_{SPT,30} < 50$ nei terreni a grana grossa e $70 < c_{v,30} < 250$ kPa nei terreni a grana fina).
D	<i>Depositati di terreni a grana grossa scarsamente addensati o di terreni a grana fina scarsamente consistenti</i> , con spessori superiori a 30 m, caratterizzati da un graduale miglioramento delle proprietà meccaniche con la profondità e da valori di $V_{s,30}$ inferiori a 180 m/s (ovvero $N_{SPT,30} < 15$ nei terreni a grana grossa e $c_{v,30} < 70$ kPa nei terreni a grana fina).
E	<i>Terreni dei sottosuoli di tipo C o D per spessore non superiore a 20 m</i> , posti sul substrato di riferimento (con $V_s > 800$ m/s).

Figura 4.31.a

Condizioni topografiche

Per condizioni topografiche complesse è necessario predisporre specifiche analisi di risposta sismica locale. Per configurazioni superficiali semplici si può adottare la seguente classificazione (Tab. 3.2.IV):

Tabella 3.2.IV – Categorie topografiche

Categoria	Caratteristiche della superficie topografica
T1	Superficie pianeggiante, pendii e rilievi isolati con inclinazione media $i \leq 15^\circ$
T2	Pendii con inclinazione media $i > 15^\circ$
T3	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $15^\circ \leq i \leq 30^\circ$
T4	Rilievi con larghezza in cresta molto minore che alla base e inclinazione media $i > 30^\circ$

Le suesposte categorie topografiche si riferiscono a configurazioni geometriche prevalentemente bidimensionali, creste o dorsali allungate, e devono essere considerate nella definizione dell'azione sismica se di altezza maggiore di 30 m.

Figura 4.31.b

Amplificazione stratigrafica

Per sottosuolo di categoria **A** i coefficienti S_S e C_C valgono 1.

Per le categorie di sottosuolo **B, C, D** ed **E** i coefficienti S_S e C_C possono essere calcolati, in funzione dei valori di F_0 e T_C^* relativi al sottosuolo di categoria **A**, mediante le espressioni fornite nella Tab. 3.2.V, nelle quali g è l'accelerazione di gravità ed il tempo è espresso in secondi.

Tabella 3.2.V – Espressioni di S_S e di C_C

Categoria sottosuolo	S_S	C_C
A	1,00	1,00
B	$1,00 \leq 1,40 - 0,40 \cdot F_0 \cdot \frac{a_B}{g} \leq 1,20$	$1,10 \cdot (T_C^*)^{-0,20}$
C	$1,00 \leq 1,70 - 0,60 \cdot F_0 \cdot \frac{a_B}{g} \leq 1,50$	$1,05 \cdot (T_C^*)^{-0,33}$
D	$0,90 \leq 2,40 - 1,50 \cdot F_0 \cdot \frac{a_B}{g} \leq 1,80$	$1,25 \cdot (T_C^*)^{-0,50}$
E	$1,00 \leq 2,00 - 1,10 \cdot F_0 \cdot \frac{a_B}{g} \leq 1,60$	$1,15 \cdot (T_C^*)^{-0,40}$

Figura 4.31.c

Amplificazione topografica

Per tener conto delle condizioni topografiche e in assenza di specifiche analisi di risposta sismica locale, si utilizzano i valori del coefficiente topografico S_T riportati nella Tab. 3.2.VI, in funzione delle categorie topografiche definite in § 3.2.2 e dell'ubicazione dell'opera o dell'intervento.

Tabella 3.2.VI – Valori massimi del coefficiente di amplificazione topografica S_T

Categoria topografica	Ubicazione dell'opera o dell'intervento	S_T
T1	-	1,0
T2	In corrispondenza della sommità del pendio	1,2
T3	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,2
T4	In corrispondenza della cresta del rilievo	1,4

La variazione spaziale del coefficiente di amplificazione topografica è definita da un decremento lineare con l'altezza del pendio o rilievo, dalla sommità o cresta fino alla base dove S_T assume valore unitario.

Figura 4.31.d

Qualora invece si abbia a che fare con problemi di scivolamento (cfr. precedente §4.3), la relazione di stabilità in condizioni statiche drenate ivi considerata (cfr. figura 4.22):

$$W \cos \alpha \operatorname{tg} \varphi + c'_k l_{AB} \geq W \sin \alpha$$

dove:

- u_z è la pressione neutra agente nel campione intatto prelevato alla profondità z dal piano campagna;
- A è un coefficiente (*Skempton*), dipendente dalla natura del terreno e dal suo stato tensionale-deformativo, valutabile per via sperimentale;
- φ' è invece l'angolo di resistenza a taglio in condizioni drenate già incontrato in precedenza.

Ora, poiché la prova *UU* viene eseguita su almeno tre provini provenienti tutti da uno stesso campione intatto, ne consegue che la pressione neutra iniziale è per tutti i provini uguale a quella u_z agente in sito. Ma non solo. Perché anche il coefficiente A si mantiene costante in tutti i suddetti provini. Nell'osservare poi che sperimentalmente il valore di u_z (ovviamente cambiato di segno) è di poco inferiore alla

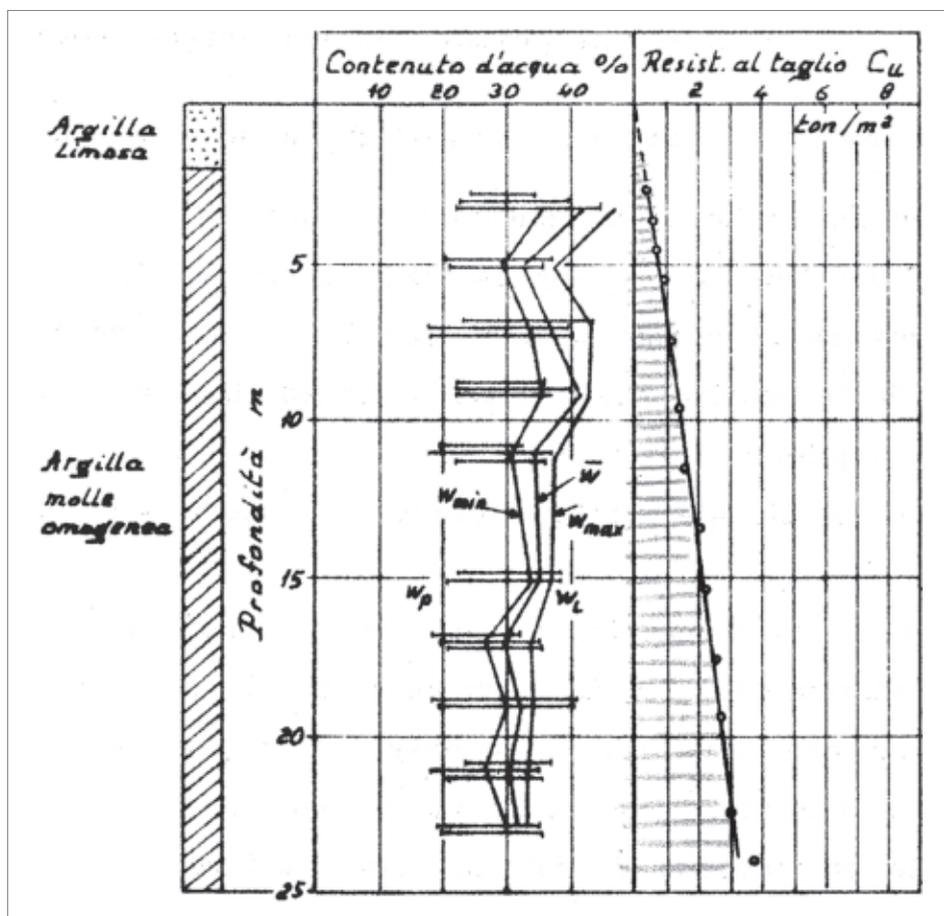


Figura 5.36

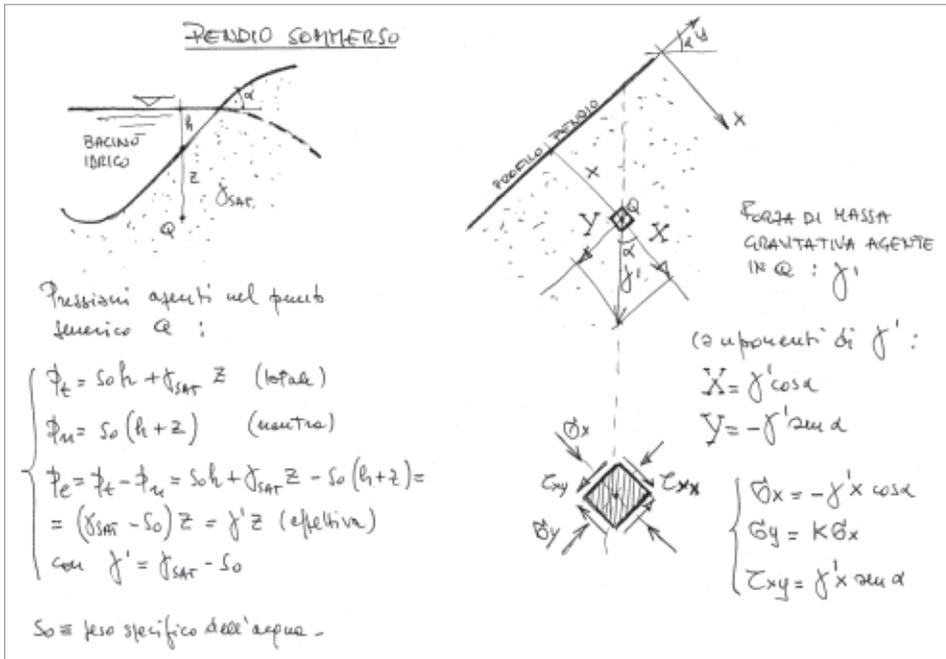


Figura 5.55

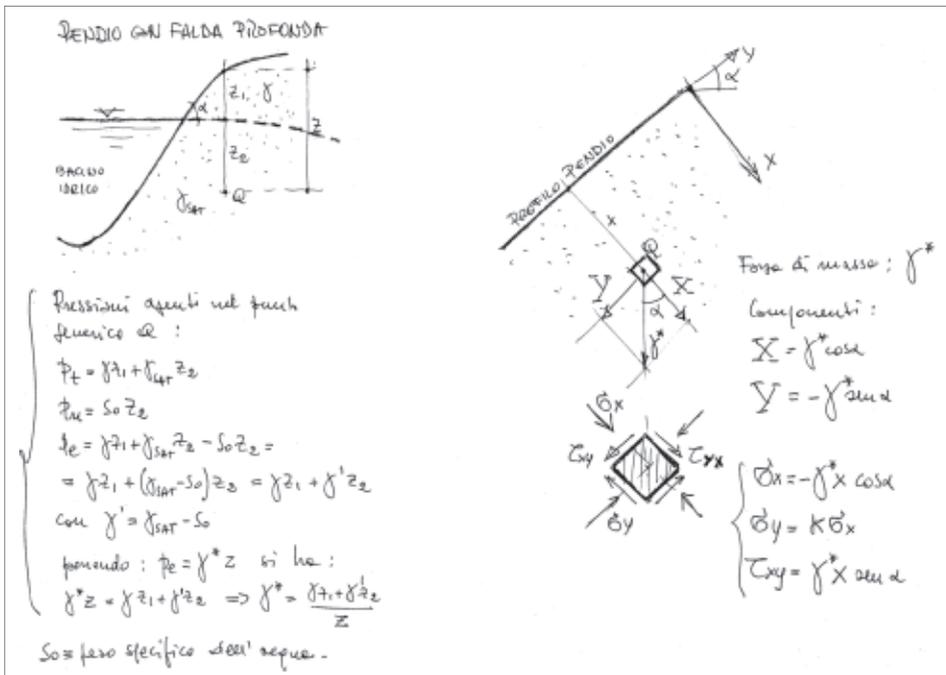


Figura 5.56

Bibliografia

1. Arredi F., *Sistemazioni montane*, Manuali Cremonese – Manuale dell’Ingegnere Civile, Casa Editrice Perrella, Roma, 1953.
2. Arredi F., *Costruzioni Idrauliche*, UTET, Torino, 1984-1988.
3. Barla G., Jamiolkowski M., *Meccanica dei terreni e delle rocce*, Enciclopedia dell’Ingegneria, Vol. VII, Geotecnica e Ingegneria delle Fondazioni, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.
4. Bay F., *Sistemazione dei bacini montani*, Manuale dell’Ingegnere G. Colombo, 80ª Edizione, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1968.
5. Berardi G., *Ingegneria delle Fondazioni*, Enciclopedia dell’Ingegneria, Vol. VII, Geotecnica e Ingegneria delle Fondazioni, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.
6. Cavallo R., Bertini T., *Aspetti geologico-tecnici*, Terremoto del 6 Maggio 1976 nel Friuli, L’Industria Italiana del Cemento, n. 7-8, luglio-agosto 1976.
7. Cestelli Guidi C., *Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1980.
8. Cirone P., *Archivio professionale privato*.
9. Civita M., De Rriso R., Vallario A., De Masi R., *Idrogeologia del massiccio Taburno-Camposauro (Campania)*, Istituto di Geologia della Università di Napoli – Pubblicazione n. 248, Estratto da Mem. Soc. Geol. It. Vol. X – Fasc. 2, Napoli, 1971.
10. Civita M., *Idrogeologia*, Enciclopedia dell’Ingegneria, Vol. VII, Geologia e Geologia Tecnica, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.
11. Colosimo P., *Manuale di Geologia Tecnica delle Frane*, Vol. 1, Edizione Nuove Ricerche, Ancona, 1982.
12. Crespellani T. et Alii, *Ingegneria geotecnica nelle aree sismiche*, CISM, Udine 1999.
13. Croce A., Pellegrino A., *Principi di Geotecnica*, Manuale di Ingegneria Civile, Sezione III, Edizioni Scientifiche A. Cremonese, Roma, 1983.
14. De Marchi G., *Idraulica*, Manuale dell’Ingegnere G. Colombo, 80ª Edizione, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1968.

15. De Marchi G., *Climatologia e Idrologia*, Manuale dell'Ingegnere G. Colombo, 80^a Edizione, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1968.
16. De Riso R., *Geologia delle strade, ferrovie e aeroporti*, Enciclopedia dell'Ingegneria, Vol. VII, Geologia e Geologia Tecnica, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.
17. Derruau M., *Précis de Géomorphologie*, Masson et C^{ie} Editeurs, Paris, 1958.
18. Desio A., *Geologia Applicata all'Ingegneria*, Ulrico Hoepli Editore, Milano, 1973.
19. Di Ricco G., *Bonifiche idrauliche*, Manuali Cremonese – Manuale dell'Ingegnere Civile, Casa Editrice Perrella, Roma, 1953.
20. D.M. Infrastrutture 14.1.2008 (S.O. n. 30 alla G.U. 4 febbraio 2008, n. 29).
21. Fassò C.A., *Idrologia Tecnica*, Enciclopedia dell'Ingegneria, Vol. VIII, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.
22. Franciosi V., *Scienza delle Costruzioni – Vol. I, Teoria dell'elasticità e resistenza dei materiali*, Editore Liguori, Napoli, 1965.
23. Franzetti S., *Acque sotterranee*, Manuale dell'Ingegnere Nuovo Colombo – Volume secondo, Costruzioni Idrauliche, Editore Ulrico Hoepli, Milano, 1985.
24. Gherardelli L., *Statistica Idrologica*, Manuali Cremonese – Manuale dell'Ingegnere Civile, Casa Editrice Perrella, Roma, 1953.
25. Guerrin A. e Lavaur R.C., *Resistenza e bonifica dei terreni di fondazione*, Dunod, Paris – Prima edizione italiana a cura dell'ing. Augusto Baù, Vitali e Ghianda, Genova 1989.
26. Guida M., Iaccarino G., Vallario A., *Alcune considerazioni sui fenomeni di dissesto e sulla difesa del suolo nella Penisola Sorrentina*, Istituto di Geologia e Geofisica della Università di Napoli – Pubblicazione n. 38 (nuova serie), Estratto da “Geologia Tecnica” Rivista bimestrale tecnica e informativa – Anno 1974 – n. 2.
27. Guida M., Iaccarino G., Vallario A., *Il dissesto idrogeologico del territorio comunale di Cardeto (Reggio Calabria) Considerazioni di Geologia Ambientale*, Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli – Pubblicazione n. 47 (nuova serie), Estratto da Geologia Applicata e Idrogeologia – Vol. IV, Bari, 1974.
28. Guida M., Iaccarino G., Lombardi G., Vallario A., *La frana di Marina Grande di Capri del 21 febbraio 1974. Studio di geologia-tecnica*, Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli – Pubblicazione n. 102, Estratto dal “Bollettino della Società dei Naturalisti in Napoli”, Vol. LXXXV, Napoli, 1976.
29. Guida M., Iaccarino G., Vallario A., *Le carte tematiche ad indirizzo geologico-tecnico per la riqualificazione ambientale – Un nuovo elaborato per la bonifica del territorio: la carta degli interventi*, Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli – Pubblicazione n. 106 (nuova serie), Estratto da “Bollettino dell'A.I.C.”, n. 40, Napoli, 1977.

30. Guida M., Iaccarino G., Lombardi G., Vallario A., *Analisi geologico-tecnica della frana in località Solaro, nel Comune di Formia (Latina)*, Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli – Pubblicazione n. 107, Estratto dal “Bollettino della Società dei Naturalisti in Napoli”, Vol. LXXXVI, Napoli, 1977.
31. Guida D., Guida M., Iaccarino G., Lambiase S., Metcalf G., Salzano G, Vallario A., Vecchio V., Zicari G., *Una proposta per l'elaborazione di carte della franosità*, Istituto di geologia e Geofisica dell'Università di Napoli, estratto dal “Bollettino della Società dei naturalisti in Napoli” – Vol. LXXXVII – 1978.
32. Habib P., *Manuale di geotecnica per le fondazioni*, Vitali e Ghianda, Genova, 1977 (Edizione originale francese: *Précis de géotechnique*, DUNOD).
33. Ippolito F., *Lezioni di Geologia Applicata*, Voll. 1-2, Liguori, Napoli, 1964.
34. Ippolito F. e Lucini P., *Litologia e Geologia*, Enciclopedia dell'Ingegneria, Vol. VII, Geologia e Geologia Tecnica, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.
35. Ippolito G., *Appunti di Costruzioni Idrauliche*, Liguori Editore, Napoli.
36. Istituto Geografico De Agostini, *Enciclopedia Geografica Mondiale*, Edizione speciale per il Corriere della Sera, Novara, 1995.
37. Istituto Geografico De Agostini, *Grande Atlante Geografico d'Europa e d'Italia*, Edizione per il Corriere della Sera, Novara, 1995.
38. Istituto di Tecnica delle Fondazioni e Costruzioni in terra – Facoltà di Ingegneria Università di Napoli, *Elementi di Fisica e Meccanica dei terreni* (Appunti – Corso Prof. A. Croce), Editrice l'Ateneo, Napoli 1972.
39. Jappelli R., *Stabilità dei pendii*, Manuale di Ingegneria Civile, Sezione III, Edizioni Scientifiche A. Cremonese, Roma, 1983.
40. Lambe T.W., Whitman R.V., *Meccanica dei Terreni*, (traduzione di Calogero Valore), Dario Flaccovio Editore, Palermo, 1997 (Edizione originale: *Soil Mechanics*, John Wiley & Sons, Inc., 1969; SI Version Copyright, 1979).
41. Lancellotta R., *Geotecnica*, Zanichelli Editore, Bologna, 1987.
42. Landini P., Fabris A., *Cielo, Terra, Acque – Compendio di Geografia e Geologia*, S. Lattes & C. Editori, Torino, 1966.
43. Maione U., *Precipitazioni meteoriche*, Manuale dell'Ingegnere Nuovo Colombo, 81ª Edizione, Volume secondo, Editore Ulrico Hoepli, Milano, 1985.
44. Mori A., *Nuovo Atlante Geografico*, S. Lattes & C. Editori, Torino, 1963.
45. Nebbia G., Ippolito G., Russo Spina A., Viparelli M., *Idraulica*, Liguori Editore, Napoli, 1966.
46. Nicotera P., *Dissesti e movimenti franosi*, Enciclopedia dell'Ingegneria, Vol. VII, Geologia e Geologia Tecnica, ISEDI – Istituto Editoriale Internazionale, Milano, 1973.

47. Penta F., *Geologia Tecnica*, Manuali Cremonese – Manuale dell'Ingegnere Civile, Casa Editrice Perrella, Roma, 1953.
48. Poggi B., *Filtrazione*, Manuale di Ingegneria Civile – Sezione Prima, Idraulica, Edizioni Scientifiche A. Cremonese, Roma, 1981.
49. Rosso R. (Politecnico di Milano), *Sulla valutazione dei fattori idrologici e geomorfologici di innesco delle frane superficiali nei bacini montani*, 28° Convegno di Idraulica e Costruzioni Idrauliche, Potenza 16-19 settembre 2002.
50. Scimeni E., *Idraulica generale*, Manuali Cremonese – Manuale dell'ingegnere civile (diretto da Mario Pantaleo), Casa Editrice Perrella, Roma, 1953.
51. Supino G., *Le reti idrauliche*, Casa Editrice Patron, Bologna 1965.
52. Supino G., *Climatologia e Idrografia*, Manuale di Ingegneria Civile, Sezione Prima, Edizioni Scientifiche A. Cremonese, Roma, 1981.
53. Terzaghi K., Peck R.B., *Geotecnica*, UTET, Torino, 1974 – (Traduzione di Carbonara V. da *Soil Mechanics in Engineering Practice*, 1967 by John Wiley and Sons, Inc., New York, London, Sydney).
54. Tesoriere G., *Strade, Ferrovie, Aeroporti*, UTET, Torino, 1973-1979.
55. Tocchetti L., *Lezioni di Costruzioni di strade, ferrovie ed aeroporti*, Editori Pellerano – Del Gaudio, Napoli.
56. Vallario A. (con la collaborazione di Coppola L.), *Geologia e franosità nell'area ad oriente del Taburno-Camposauro e del Partenio (Province di Benevento ed Avellino)*, Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli – Pubblicazione n. 23 (nuova serie), Estratto da *Geologia Applicata e Idrogeologia* – Vol. VIII – Parte II, Bari, 1973.
57. Vallario A., *Ricerche idrogeologiche sui massicci calcarei: metodologie ed applicazioni pratiche*, Istituto di Geologia e Geofisica dell'Università di Napoli – Pubblicazione N.40 (nuova serie), Estratto da *Atti Accademia Cosentina* – Vol. XIX 1973, Napoli 1973.
58. Vallario A., *Ambiente fisico e territorio*, Istituto di Geologia e Geofisica Università di Napoli, Estratto da *IL FRANTOIO* ottobre 1978, Edizioni PEI, Parma.
59. Versace P. et alii, *Rapporto Regionale Valutazione delle Piene in Calabria (VAPI)*, 1989.
60. Viparelli C., *Ricostruzione dell'idrogramma di piena*, Istituto di idraulica e costruzioni idrauliche della Università di Palermo (Ricerca compiuta sotto gli auspici dell'ANIDEL).