

APPUNTI DI GEOLOGIA APPLICATA

Capitolo 6 LE STRADE

A Cura di V. Francani e C. Rampolla

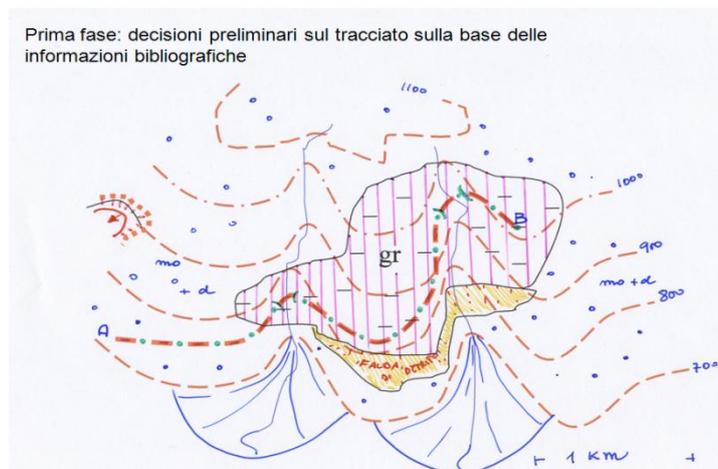
Nelle precedenti lezioni si è esaminata la classificazione dei dissesti; nelle prossime, saranno prese in considerazione le indagini dirette a formulare le decisioni sugli interventi, che saranno studiate in funzione dello stato evolutivo del dissesto, quale può essere visualizzato dallo studio geologico. Per esaminare quanto è possibile fare per la previsione delle frane, si tenga conto del fatto che la Regione (D.Fossati, D. Mazzoccola, E.Sciesa e M.Ceriani, della Struttura Rischi Idrogeologici, 2001) ha recentemente pubblicato una nota di indirizzo sulle modalità per localizzare le aree in frana con notevole dettaglio, fino ad arrivare a una definizione delle aree che possono essere colpite.

STUDI GEOLOGICI PER I PROGETTI DI STRADE

Sequenza delle fasi:

Fase iniziale:

- a) studi a tavolino sui dati disponibili
- b) sopralluoghi
- c) stesura di un rapporto preliminare e di un programma di lavoro sul terreno



Fase esecutiva preliminare

- a) rilevamento geologico e geostrutturale, fotogeologia, geomorfologia
- b) geofisica
- c) pozzetti, trincee e sondaggi
- d) prove di laboratorio
- e) rapporto finale

Fase operativa in corso d'opera:

- a) Controlli e monitoraggi durante gli scavi e la costruzione
- b) Assistenza al progetto e ai lavori di cantiere
- c) Individuazione dei pericoli
- d) Consolidamento e messa in sicurezza in fase di avanzamento
- e) Protezione stabilità e operatori

- f) Drenaggi superficiali e profondi: Indicazione delle aree da drenare e delle modalità di intervento
- g) Proposta interventi (da richiedere a esperto idraulico e idrologo)
- h) Scavi
- i) Analisi di stabilità dei versanti, da demandare a geotecnici
- j) Proposta dei rimedi (da richiedere a esperto geotecnico)

La progettazione delle vie di comunicazione ha un rilevante interesse nel campo dell'ingegneria ambientale, sia per l'impatto di queste opere sull'equilibrio dei versanti e sulla qualità dei suoli e delle acque, sia per i vantaggi che esse comportano per il territorio, se ben eseguite e progettate in funzione ambientalistica.

I problemi che coinvolgono gli studi geologici sono notevoli e numerosi. Ci si limita qui a elencare alcuni aspetti di maggiore interesse:

1. scelta del percorso e della sezione
2. fattori limitanti le pendenze e le curvature
3. fattori limitanti la dimensioni degli scavi
4. fattibilità degli scavi e dei riporti, anche in termini di costo
5. opere di difesa dai dissesti
6. attraversamento dei corsi d'acqua
7. opere di attenuazione dell'impatto ambientale
8. opere di valorizzazione ambientale

Fase iniziale:

1. SCELTA DEL PERCORSO

Occorre determinare l'andamento plano-altimetrico del tracciato stradale. Perciò occorre rispettare:

- le caratteristiche geometriche (pendenze, raggio di curvatura e larghezza della sede), definite in funzione del tipo di strada (autostrada, strade urbane, extraurbane, provinciali, ecc.)
- La natura geologica del sito

Per esempio il tracciato nelle aree montane può essere condizionato da vari fattori geologici e morfologici; le possibili scelte sono tra:

- tracciato di cresta
- tracciato di mezza costa
- misto

Nel primo caso, si hanno i vantaggi di una maggiore stabilità nell'attraversamento di formazioni franose, ma vi sono alcuni inconvenienti che derivano dalla ventosità, dai continui saliscendi, dalla minore disponibilità di spazio per curve ad ampio raggio, e (per quanto riguarda gli aspetti geologici), lo stato di alterazione e fratturazione delle rocce, maggiormente soggette al gelo.

Nel secondo caso, si hanno notevoli svantaggi dall'esposizione alle frane, all'erosione delle acque superficiali, ai passaggi su corsi d'acqua, alla caduta di detriti. I vantaggi risiedono nella buona protezione dal ghiaccio e dalla neve e dal vento. Le soluzioni miste sono quindi quelle preferibili, dove sia possibile operare la scelta.

Per quanto riguarda pendenze e curvature, le prime devono essere di pochissimi valori percentuali e le curvature devono essere di ampio raggio, oltre a consentire la migliore visibilità possibile e la maggiore semplicità del tracciato, che non deve richiedere continue correzioni della guida.



La scelta del tracciato deve favorire una rapida esecuzione dei lavori e della messa in sicurezza. I costi sono in effetti notevolmente condizionati dalla velocità di avanzamento, quindi dai mezzi utilizzati; le spese consistono infatti in:

- a. costi fissi (assicurazioni, ammortamenti di attrezzature, interessi)
- b. costi di esercizio (combustibili e lubrificanti, riparazione di attrezzi, manodopera varia, specialisti e progettisti)
- c. costi ambientali (sistemazione dei versanti dopo la costruzione, opere di valorizzazione ambientale e di ingegneria naturalistica)

I costi variano molto, ma si possono esprimere in percentuale rispetto al costo totale del progetto. In generale lo studio geologico e geotecnico comportano spese dell'ordine dello 0,5% del costo del progetto.

Il principio fondamentale del rilevamento geologico è che le prove e gli studi devono essere continuati fino ad assicurare una conoscenza dei terreni sufficiente a garantire il successo e la sicurezza dell'opera progettata. Si deve tenere presente che il rilevamento potrebbe anche costare il doppio del previsto, cosa che non porterebbe in generale ad un costo superiore all'1% di quello dell'intero progetto; tuttavia una erronea valutazione delle caratteristiche del sottosuolo facilmente determina costi superiori al 10% dell'intero progetto.

2. FATTIBILITA' DEGLI SCAVI

La possibilità di eseguire scavi è limitata dall'altezza critica propria dei terreni, e dalle pendenze limite proprie dei diversi tipi di terreno (es. ghiaie 45°, sabbie 35°).

Sussistono inoltre vincoli di costo: la roccia integra è infatti, a meno di qualche eccezione, scavabile solamente con esplosivi, che sono di costo elevato e necessitano di una sapiente indagine preliminare per poter abbattere nel migliore dei modi la roccia senza produrre danni al versante.

I metodi meno costosi utilizzano gli scarificatori (rippers), bracci meccanici con uno o due denti che incidono fino a 80 cm-1 m la compagine del terreno e lo portano sulla traccia stradale già aperta, dove una benna dalla capacità di 0,8 –1,5 m³ lo porta ai mezzi di trasferimento verso i luoghi di scarica o di utilizzo.

I rippers si adattano a molti tipi di terreno, purchè poco compatti (non superano la velocità delle onde principali 1.8 – 2 km/s) fra i quali flysch, arenarie argillose, scisti alterati, calcari fratturati, ardesie alterate, depositi glaciali, conglomerati poco cementati.

Queste attrezzature non sono in grado di asportare le argille e lavorano male anche con le marne che non siano in scaglie.

Le terre sciolte possono essere scavate anche a mano o con semplici benne.

I costi sono in effetti notevolmente condizionati dalla velocità di avanzamento, quindi dai mezzi utilizzati; le spese consistono infatti in:

- a) costi fissi (assicurazioni, ammortamenti di attrezzature, interessi)
- b) costi di esercizio (combustibili e lubrificanti, riparazione di attrezzi, manodopera varia, specialisti e progettisti)
- c) costi ambientali (sistemazione dei versanti dopo la costruzione, opere di valorizzazione ambientale e di ingegneria naturalistica)

Deve inoltre, volta per volta, essere scelta la sezione della strada, che potrà essere:

- a) totalmente in rilevato
- b) parzialmente in scavo
- c) in scavo da un lato e dall'altro con riporto
- d) in trincea

Le scelte devono essere fatte sia in funzione della geometria del tracciato, delle curvature e delle pendenze, sia delle difficoltà naturali incontrate.

Ad esempio, le sezioni in trincea si adattano talora alle condizioni di cresta, quelle in rilevato a quelle di pianura; i riporti si potranno fare solamente dove il terreno del versante si dimostri adatto a sopportare il sovraccarico, ecc.

Fase esecutiva preliminare:

LA GEOLOGIA NEL PROGETTO STRADALE

Lo studio geologico prevede l'esecuzione di una serie di indagini, sviluppate in più fasi, via via sempre più approfondite e specifiche.

- A. Studio geologico in fase di studio di fattibilità
- B. Studio geologico in fase di progetto preliminare
- C. Studio geologico-tecnico in fase di progetto definitivo ed esecutivo

A. Studio geologico in fase di studio di fattibilità

- rilevamento geologico a piccola scala (1:50.000 1:25.000);
- esame delle foto aeree;
- esame delle carte geologiche esistenti;
- esame delle carte geomorfologiche e/o tematiche esistenti.

In questa fase è possibile fare una scelta delle zone più idonee a diventare sede del tracciato

B. Studio geologico in fase di progetto preliminare

- studio geologico: litologia rocce e terre sciolte, fenomeni deformativi fragili o duttili (faglie, fratture, pieghe);

- studio geomorfologico: valutazione del grado di stabilità dei versanti;
- studio climatologico: termometria e pluviometria dell'area in esame;
- studio idrologico: evoluzione dei corsi d'acqua che interessano la sede stradale (portate di massima piena, potere erosivo ecc.);
- studio idrogeologico: ricostruzione della circolazione idrica sotterranea, rapporti tra acque sotterranee e superficiali;
- valutazione di impatto ambientale (V.I.A.): interazioni tra area in progetto e ambiente circostante;
- indicazioni circa l'apertura delle cave di prestito.

In questa fase è possibile individuare il tracciato definitivo e dei relativi punti critici che necessitano di ulteriori approfondimenti

C. Studio geologico-tecnico in fase di progetto definitivo ed esecutivo

- prove geognostiche in sito: Sondaggi meccanici (terreni e rocce), Prospezioni geofisiche (terreni e rocce), Prove penetrometriche (terreni), Definizione degli indici di qualità degli ammassi rocciosi (rilevamento geologico-strutturale alla scala dell'affioramento, martello di Schmidt, prove di caricopuntiforme), Prove di carico su piastra (terreni), Prove scissometriche (terreni coesivi), C.B.R. (terreni)
- prove geognostiche in laboratorio: Analisi granulometriche (terreni), Limiti di Atterberg (terreni coesivi), Prove di compressione monoassiale (terreni e rocce), Prove edometriche (terreni), Prove di compressione triassiale (terreni e rocce), Prove di resistenza al taglio (terreni e rocce), Prova di Proctor (terreni)
- ricerca del materiale da costruzione: La realizzazione di una strada comporta l'impiego di materiali da costruzione quali: inerti per il calcestruzzo, materiali per i rilevati, per le strutture drenanti e per il sottofondo della sede stradale.
I materiali vanno reperiti in loco per non avere un aggravio di costi. Vanno individuati i siti idonei e prelevati numerosi campioni da sottoporre a prove sperimentali in relazione al loro futuro impiego. Sulla base degli studi e delle prove effettuate, si può procedere all'apertura delle cave di prestito nei luoghi prescelti e alla realizzazione delle relative strade di accesso.

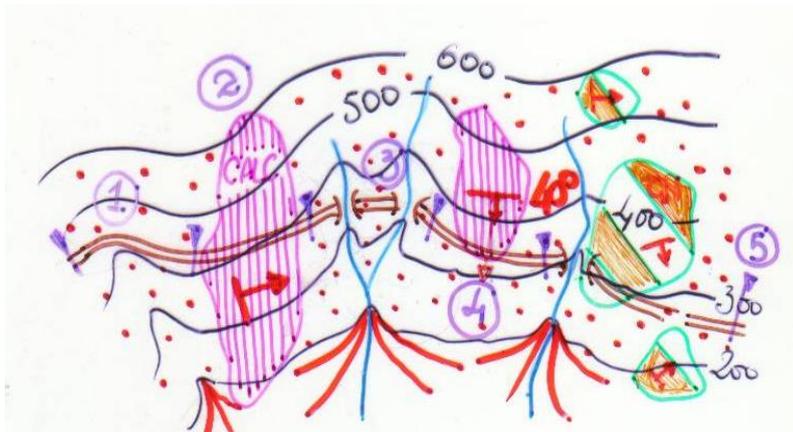
In questa fase è possibile la progettazione in senso stretto del solido stradale e delle opere ad esso associate, compiti propri degli ingegneri

Suddivisione in tratti

Lo studio delle strade si fa suddividendole in tratti che si differenziano per le problematiche di scavo, di sostegno e di messa in sicurezza della manodopera e dei versanti, che sono condizionate dalle caratteristiche idrogeologiche e geologico-tecniche riscontrate nel corso degli accertamenti.

Ad esempio nelle figure riportate si osserva come il tratto di strada sia suddiviso in cinque tratti minori, ciascuno con problematiche geologico-tecniche e idrogeologiche diverse: compare un tratto in calcari, uno in morene e detriti, un'altro in calcari, uno con attraversamento di una valle secca, uno con attraversamento di una valle percorsa da un corpo idrico.

Il tratto più pericoloso è quello nella valle con acqua, perché possiamo avere fenomeni di frana accompagnati da alluvionamento; quello più infido è quello con la valle secca, perché possiamo avere, inattesi, gli stessi fenomeni della valle con il torrente.



1. debris-flow
2. Calcare con giacitura trasverso-banco
3. Rilevante trasporto solido
4. Calcare a franapoggio
5. Gneiss piegati e detrito

Il rilevamento geologico deve quindi essere finalizzato, utilizzando al meglio le prospezioni geognostiche e l'analisi geologica, idrogeologica e geomorfologica, a comprendere la dinamica del versante. Ci si avvale quindi dei rilievi geologici e delle carte esistenti, delle fotografie aeree che mostrano in tempi diversi il succedersi dei dissesti e chiariscono la storia del versante, nonché di tutta la documentazione necessaria per valutare lo stato di umidità del suolo, e gli aspetti idrologici e idrogeologici.

Il rilevamento geologico, che viene eseguito solitamente da geologi, ma viene impostato e seguito dai progettisti, che ne prendono diretta visione controllandone in loco i risultati o partecipandovi direttamente, di solito includono:

- a. **idoneità del sito** al progetto in esame (prima fase)
- b. **caratteri tecnici** di suoli e rocce \Rightarrow valutazione delle condizioni del suolo e della copertura (che generalmente comporta il prelievo di campioni e analisi geotecniche di laboratorio) e identificazione della superficie del substrato roccioso (la cui profondità è di particolare importanza) e dei suoi caratteri tecnici (seconda fase)
- c. potenziali difficoltà per l'esecuzione del progetto e loro discussione in una relazione geologica (terza fase), che costituisce il documento progettuale di base. Nella stesura del rapporto geologico, che viene redatto per ogni tratto in cui è stato suddiviso il percorso, si deve segnalare ed esaminare le problematiche di scavo, di sostegno e di messa in sicurezza della manodopera e dei versanti, che sono condizionate dalle caratteristiche idrogeologiche e geologico-tecniche riscontrate nel corso degli accertamenti. Lo studio deve essere accompagnato da prove geofisiche, sondaggi, penetrometrie e deve essere seguito da uno studio geotecnico per il dimensionamento di scavi, opere di protezione e analisi della stabilità dei versanti.

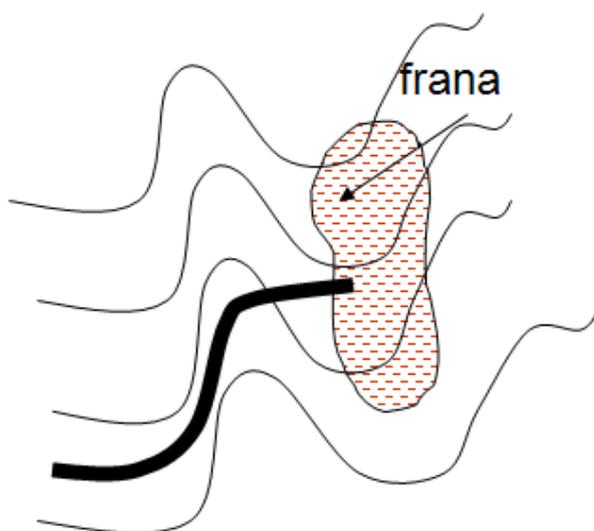
Una volta compresa la problematica, e operata la suddivisione in tratti, per ciascuno di questi si opera in modo da controllare tutti i parametri della scheda qui riportata, andando a vedere su affioramenti-campione le condizioni generali del versante, seguendo quindi lo schema dal punto 4 in avanti.

SCHEMA DELL'INDAGINE

1. Litologia e frane (operazione 1 e 2 della tabella)
2. Divisione in tratti omogenei
3. Per ogni tratto studio geomorfologico della dinamica dei versanti e stato dei dissesti

PRIMA FASE: PROGETTAZIONE		
OPERAZIONE	INDAGINI DA COMPIERE	FINALITÀ'
1. Rilevamenti geologici	Campionamento	Identificazione dei problemi e distinzione dei tratti omogenei
2. Fotogeologia	Carta geologica	
3. Geomorfologia	Carta dei dissesti	
INDAGINI SPECIFICHE PER OGNI TRATTO		
3/bis . per ogni tratto studio della dinamica dei versanti		
4. Studio geostrutturale	Diagrammi strutturali, delimitazione zone di frattura e alterazione, stato di alterazione, qualità della roccia con correzioni Bieniawski o Romana	Test Markland
5. Studio copertura	Origine, spessore e granulometria dei depositi superficiali	
6. Idrogeologia	Esame venute d'acqua e delle sorgenti, loro posizionamento	<ul style="list-style-type: none"> - Circuito delle acque sotterranee - Valutazione dell'entità delle riserve idriche - Rapporti con la rete di superficie
7. Analisi di laboratorio	Granulometria, coesione, res.taglio, attrito, limiti, res.compr.unisassiale	Caratterizzazione tecnica
8. Prospezioni geognostiche	Geofisica (Elettrica, Sismica, Radar)	<ol style="list-style-type: none"> 1. Spessore copertura (Sism.) 2. Andamento tetto e resistenza substrato (Sism.) 3. Livelli argillosi (Elet.) 4. Presenza acqua (Elet.) 5. Cavernosità (Radar)
	prove penetrometriche	Stato di addensamento
	Sondaggi e prelievo di campioni in profondità	<ol style="list-style-type: none"> 1. Identificazione strutture e livelli deboli profondi 2. RQD 3. Venute d'acqua
FASE OPERATIVA: ASSISTENZA al progetto e ai lavori di cantiere		
Individuazione dei pericoli	Consolidamento e messa in	Protezione stabilità e

	sicurezza in fase di avanzamento	operatori
Drenaggi superficiali e profondi	Indicazione delle aree da drenare	Proposta interventi (da richiedere a esperto idraulico e idrologo)
Scavi	Analisi di stabilità dei versanti, da demandare a geotecnici	Proposta dei rimedi (da richiedere a esperto geotecnico)



Quando la realizzazione del progetto implica l'attraversamento di un'area franosa, descritta nello studio geologico, deve essere effettuato il consolidamento del versante prima di iniziare lo scavo

Per ogni affioramento si devono controllare i seguenti parametri

Roccia

Litologia, giacitura, fittezza della stratificazione, alterazione, presenza di strati o giunti riempiti di materiale argilloso, copertura eluvio-colluviale, eventuale presenza di sorgenti, discontinuità.

Sono effettuati diagrammi strutturali per verificare con il test di Markland la stabilità della roccia, è effettuata la classificazione di Bieniawski con le opportune correzioni per tenere conto dell'esposizione del pendio.

La classificazione di *Bieniawski* (1986) è riportata sul testo, al quale si rinvia.

Terre

Si valuta la natura e origine, oltre che litologia, del deposito, al fine di chiarirne il contatto con la roccia, determinando se si tratta di detrito di falda, detrito di frana, deposito glaciale, cono di detrito, conoide di deiezione, copertura eluvio-colluviale.

Della massima importanza la valutazione speditiva della granulometria e dell'inclinazione di eventuali superfici di debolezza (piani di rottura di frane, allineamenti di vuoti, allineamenti di livelli argillosi) e la loro giacitura, con l'intendimento di comprendere se sono o meno disposti in modo da favorire un evento franoso o comunque la circolazione idrica.

Si deve badare particolarmente stabilire anche approssimativamente lo spessore della coltre detritica e quindi il probabile andamento del tetto della roccia, perché su questa superficie si innestano i principali movimenti franosi.

Inoltre ha grade interesse la definizione dello schema della circolazione idrica sotterranea, delle permeabilità dei diversi livelli e depositi, e la posizione delle sorgenti.

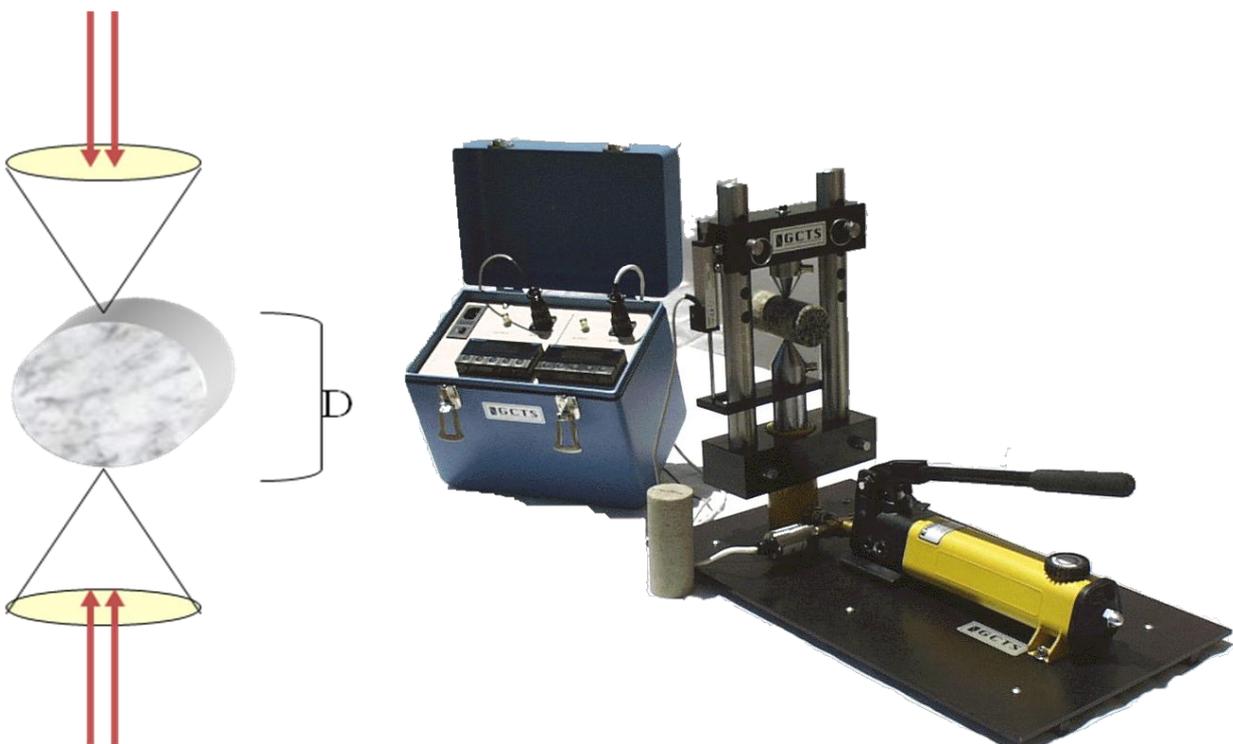
Prospezioni geognostiche

La prima e più importante è il rilevamento geologico, che viene condotto a scala di dettaglio ($1/10.000-1/2000$), con il rilevamento accurato dei depositi superficiali e delle rocce, con particolare attenzione alle tracce di movimenti franosi (fenditure, spostamenti di terreno, deformazioni del suolo ecc.). Se necessario si accompagna questa cartografia con una della geomorfologia, al fine di porre in evidenza tutti i fenomeni che, pur avendo origine lateralmente alla strada, possono influenzarne la sicurezza: ad esempio crolli o frane a monte, erosioni al piede da parte di corsi d'acqua e frane a valle.

Nella prima fase dello studio, appare indispensabile l'uso delle fotografie aeree che permettono di avere un quadro della situazione, evidenziando i dissesti maggiori su un'area molto vasta. Queste tre operazioni vengono compiute contemporaneamente e sotto una sola direzione, per le molteplici correlazioni esistenti fra le tre indagini.

Nel corso dei rilevamenti sul terreno, si procede al miglioramento dei dati fotogeologici e alla delimitazione delle zone di frattura, delle sorgenti e delle venute d'acqua, alla raccolta di informazioni circa precedenti eventi franosi, e infine alla scelta dei campioni da destinare al laboratorio geotecnico, per la determinazione soprattutto di angolo di attrito e coesione.

Da campioni prelevati in sito si potranno ricavare i dati indispensabili per l'effettuazione del point load test.



Successivamente, dove si hanno problemi, vengono compiute prospezioni geofisiche (radar, sismica, più raramente elettrica) per stabilire prima di tutto il tetto del substrato, se i depositi superficiali hanno spessore ridotto, poi le caratteristiche elastiche del mezzo roccioso, che

permettono di individuare quelle meccaniche, e infine (tramite radar o tomografia elettrica) la eventuale presenza di vuoti o livelli argillosi. Frequentemente si impiegano penetrometrie, nelle terre, onde accertare lo stato di addensamento dei materiali che le costituiscono. Si procede infine alla effettuazione di sondaggi, dove le prove precedentemente descritte non diano esiti tali da permettere di capire alcuni problemi.

Prospezioni geofisiche: georadar e profili di resistività

Il *georadar* viene impiegato per consentire la visualizzazione di cavità all'interno del terreno fino a pochi metri di profondità. Risulta quindi ottimo per le costruzioni stradali nelle aree in cui le rocce sono fratturate o pervase da cavità carsiche, tanto da dar luogo a situazioni di pericolo dove sono sovraccaricate dal peso dei veicoli.

Il funzionamento del georadar è basato su due antenne, una emettente e l'altra ricevente, e sull'invio di fasci di onde elettromagnetiche di frequenze (i cui valori possono essere variati a seconda dell'antenna usata, fra 50 a 500 Megahertz) nel terreno.

La velocità di spostamento delle onde è proporzionale alla conducibilità elettrica dei diversi livelli di terreno. I segnali vengono riflessi dalle superfici dei diversi livelli incontrati e rinviati all'antenna ricevente che li filtra e li invia a un elaboratore che fornisce con immediatezza la visione delle strutture del sottosuolo. Con particolare chiarezza si possono ricavare le forme delle superfici dei livelli a conducibilità diversa (es. fusti metallici sepolti, tubazioni, cavità, fondazioni).

Profili geoelettrici: sono profili che si ottengono spostando l'intero quadripolo dopo aver ottenuto un sondaggio elettrico di piccola profondità nella posizione di partenza: è così possibile seguire l'andamento di un livello di particolare interesse (ad esempio il contatto roccia- depositi superficiali).

Le strutture pericolose

a) zone di pianura

Nelle **strade di pianura** il tracciato non è soggetto a particolari condizionamenti di tipo morfologico, rappresentati solo dai corsi d'acqua e dai relativi terrazzi. Diventano invece importanti i fattori di tipo più propriamente geologico, legati alla natura del sottosuolo, generalmente costituito da materiale alluvionale, dal quale derivano numerose problematiche.

Rischio di alluvioni, erosioni di sponda ecc.: Si possono verificare in prossimità dei corsi d'acqua. È importante riconoscere le aree che sono state già soggette in passato a questo fenomeno. Si deve eseguire un esame delle caratteristiche idrologiche del corso d'acqua per dimensionare le opere di superamento del fiume stesso. In particolare si dovranno studiare le variazioni di temperatura e le precipitazioni, soprattutto quelle di intensità maggiore, le portate del corso d'acqua principale e dei suoi affluenti, il trasporto solido di fondo, che può ridurre e ostruire la sezione di deflusso, i tempi di ritorno degli eventi piovosi e delle piene.

Livelli argillosi e falda a piccola profondità

Escursioni piezometriche

Cedimenti: Sono dovuti alla presenza di terreni compressibili, che non sono in grado di sostenere il peso del tracciato stradale e cedono sotto il medesimo. È un comportamento tipico di argille, limi

e torbe. L'entità dei cedimenti è proporzionale alla compressibilità dei materiali, allo spessore degli orizzonti compressibili e alla presenza d'acqua.

Terrazzi ferrettizzati con occhi pollini e scarpate argillose: Si chiama “Ferretto” la copertura eluviale dei terreni fluvioglaciali (la “ferrettizzazione” è un processo di eluviazione che ha portato alla formazione di uno spesso livello argilloso-limoso caratterizzato dalla presenza di residui ferrici colloidali). I terrazzi più antichi, del **Mindel**, hanno una copertura eluviale più spessa, anche oltre 10 m, costituita da limi sabbiosi, sabbie fini e argille di **colore rosso-violetto**;
I terrazzi del **Riss** hanno una copertura eluviale limoso-argillosa-sabbiosa meno spessa, 4-5 m, e di **colorazione ocracea**;
I terrazzi **Wurmiani**, più recenti, presentano una ridotta copertura eluviale di **colore bruno-grigio**.



Profilo di terreno ferrettizzato

Impaludamento della strada: È una situazione che si verifica di frequente nelle aree di pianura, nelle quali è necessario eseguire accurate misure piezometriche e redigere una carta idrogeologica che dia indicazioni circa la **soggiacenza della falda** e le sue **oscillazioni**. Un caso tipico ci viene offerto dalla media e bassa pianura del Po, dove la falda ha una soggiacenza ridotta, tanto da essere talora affiorante e costituire la zona dei **fontanili**.

La venuta a giorno di queste risorgive, che interessano un'ampia fascia di pianura che si sviluppa dal Piemonte al Veneto, determina condizioni di impaludamento per ristagni d'acqua o per risalita capillare della falda in terreni fini.



b) zone di pianura pedemontana

Nella zona prealpina o pedemontana, i problemi geologici sono legati alla presenza di grandi archi morenici tra i quali si interpongono bacini lacustri e paludi. Le difficoltà che si incontrano nell'attraversamento dei depositi morenici sono legate a:

- il basso angolo di attrito
- la non elevata coesione dei materiali
- le pendenze spesso rilevanti dei versanti (30°)
- la bassa profondità della superficie piezometrica

- la ridotta altezza critica dei versanti a monte del tracciato stradale.
- Presenza di morene
- Torbiere e paludi intramoreniche
- Laghi con sedimenti argilloso-limoso-torbosi

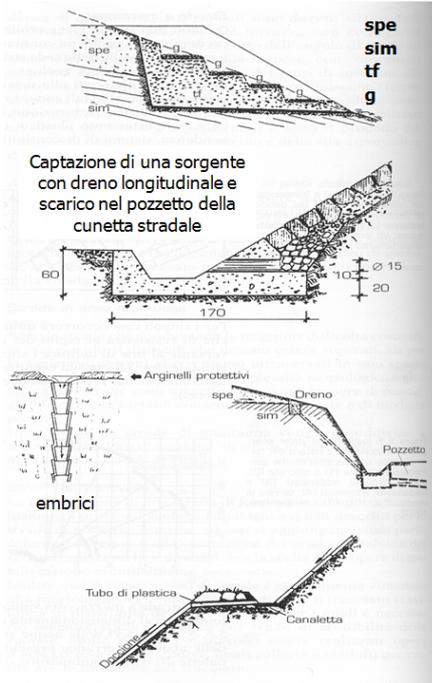
c) Strade di montagna a mezza costa

Sono le strade che comportano le maggiori difficoltà costruttive, sia per i forti dislivelli che devono essere superati, sia per la varietà di terreni che vengono attraversati in uno spazio ristretto. Inoltre, a causa della complessità morfologica e geologica, tali strade sono soggette al maggior numero di passaggi obbligati e le varianti consentite sono limitate e di modesta portata.

I principali problemi riscontrabili sono:

- Massi instabili, cornici di roccia instabile
- Morene su substrato molto inclinato con acqua
- Falde di detrito interessate da nuovi crolli o scavi al piede
- Rocce fratturate o stratificate in modo pericoloso per l'operatore
- Attraversamento di valli o di conoidi con rischio di debris-flows o di alluvioni
- Instabilità delle sponde degli alvei fluviali
- Instabilità delle pile o delle spalle dei ponti
- Infine, nelle zone di alta montagna, non vanno sottovalutati i problemi connessi all'eventualità che si verifichino fenomeni valanghivi. A tale proposito devono essere stimati i volumi e le traiettorie delle valanghe che possono interessare la sede stradale e si devono fornire indicazioni circa il posizionamento delle opere di difesa.



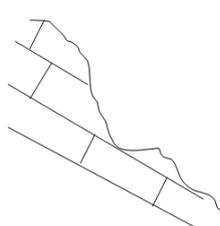


- = strato permeabile
- = strato impermeabile
- = trincea filtrante
- = gradoni con sovrastante strato drenante in ghiaia

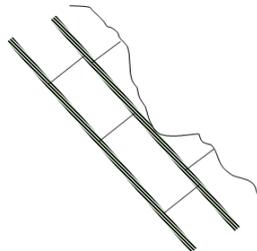
Per le strade a mezza costa vanno anche effettuati studi per dimensionare le opere di drenaggio delle acque superficiali incanalate e non e delle acque sotterranee presenti nel versante (canalette drenanti, tombinature, dreni orizzontali, muri drenanti, ecc.) e uno studio sull'eventuale scalzamento operato dai corsi d'acqua che scorrono sul fondovalle.

Tali zone si rinvengono in corrispondenza di aree di intensa fratturazione, orizzonti cataclastici o di rocce a comportamento plastico, depositi superficiali a elevata pendenza, sistemi di discontinuità primari o secondari aventi giacitura sfavorevole.

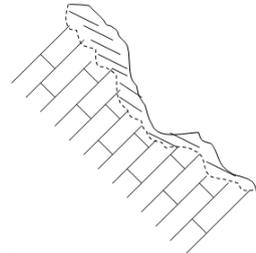
Depositi superficiali ad elevata pendenza



Strati a franapoggio con inclinazione minore del pendio



Intercalazioni di livelli a comportamento plastico

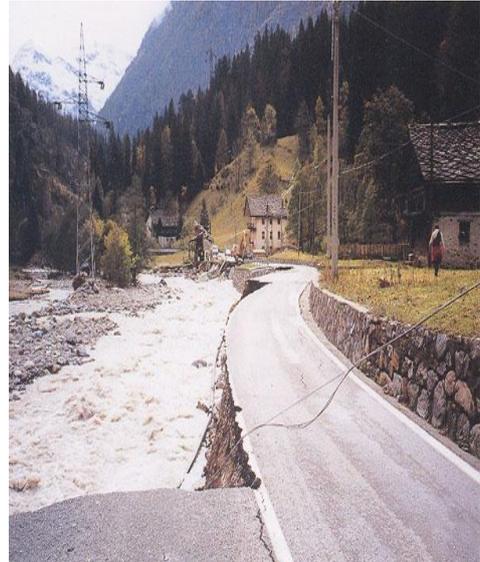


Zone di intensa fratturazione



d) Strade di fondovalle

Le strade di fondovalle hanno problematiche analoghe a quelle delle strade di pianura. A queste si aggiungono problemi inerenti la stabilità dei versanti adiacenti la sede stradale e la scelta delle opere di stabilizzazione eventualmente necessarie. Inoltre, poiché questo tipo di strada è strettamente vincolato alla morfologia del fondovalle, non di rado il tracciato si sviluppa in prossimità dei corsi d'acqua, per i quali è necessario eseguire studi dettagliati sul grado di erodibilità delle loro sponde. Molto spesso, poi, devono essere realizzate opere d'arte costose e impegnative, quali gallerie e viadotti per rettificare le tortuosità del tracciato.



Il rapporto geologico conclusivo

- Il rapporto geologico viene redatto, segnalando per ogni tratto in cui è stato suddiviso il percorso ed esaminandone le problematiche di scavo, di sostegno e di messa in sicurezza della manodopera e dei versanti,
- Il rapporto deve fare riferimento a prove geofisiche, sondaggi, penetrometrie, che devono essere allegate, e deve essere seguito da uno studio geotecnico per il dimensionamento di scavi, opere di protezione e analisi della stabilità dei versanti.
- Inoltre, segnala le soluzioni per i problemi prospettati

Le strade e le frane

Indagini necessarie nell'attraversamento di strutture pericolose: la distanza di sicurezza

Con le indagini rivolte alla identificazione delle strutture pericolose, termina la fase progettuale; in questa prima parte del lavoro, le indagini sono rivolte soprattutto alla scelta delle attrezzature, al dimensionamento dei costi e dei tempi di lavoro, alla scelta del tracciato e delle soluzioni di avanzamento.

Nella seconda fase, che è quella operativa, gli studi geologici potranno essere utilizzati nell'assistenza ai lavori sul terreno, ed avranno soprattutto la finalità di risolvere volta per volta i problemi che si potranno presentare nel dettaglio della progettazione delle opere, dell'esecuzione degli scavi, della messa in sicurezza degli operatori.

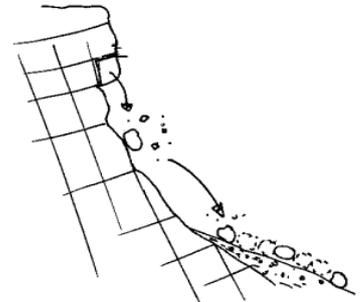
Una delle più importanti analisi da compiere in questa fase, consiste nella delimitazione delle aree che potrebbero essere colpite da dissesti. Per avere ragguagli su questo argomento, è quindi necessario definire le aree a rischio di frana, sulla base dei rilevamenti compiuti nel corso della prima fase.

In questo campo, un'utile indagine è stata compiuta dalla Regione (D.Fossati, D. Mazzoccola, E.Sciesa e M.Ceriani, della Struttura Rischi Idrogeologici, 2001) ha recentemente pubblicato una nota di indirizzo sulle modalità per arrivare a una definizione delle aree che possono essere colpite.

La *distanza di sicurezza*, che corrisponde alla distanza massima che può raggiungere il danno prodotto dagli eventi franosi, può in questa fase essere calcolata in base a semplici relazioni.

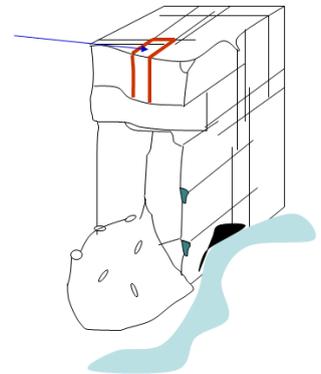
Tratti interessati da possibili crolli, naturali e dovuti allo scavo

CINEMATISMO: distacco e caduta di una massa di materiale da un pendio molto ripido o da una scarpata; il materiale discende in caduta libera finché non raggiunge il versante; dopo l'impatto, il moto prosegue per rimbalzi e/o rotolamenti \Rightarrow cinematismo complesso. La cinematica dell'evento è veloce \Rightarrow *elevata pericolosità del fenomeno e notevole capacità distruttiva*. Le traiettorie di caduta dipendono da molti fattori, quali la velocità iniziale, la forma, le dimensioni e la litologia del blocco; la geometria del pendio e le sue caratteristiche litologiche incidono sulla quantità di energia dissipata per effetto degli urti.



Sintomi premonitori

- Allargamento fenditure sul versante nella parte alta
- Ampliamento dell'apertura delle discontinuità
- Se avviene per erosione al piede, aumento delle dimensioni dell'escavazione
- Caduta di detriti (anche in forma di piccole colate) durante le precipitazioni
- Presenza di falde di detrito non cementate e prive di copertura arbustiva o di suolo al piede della parete



Secondo Davies, vi è un rapporto fra volume franato e distanza raggiungibile dal masso (distanza di sicurezza), in base alla relazione

$$R = 9,98 V^{0,33}$$

Che porterebbe, per un masso di 27 m^3 , a una distanza di circa 30 m. Tenendo conto del dislivello H, fra cornice della frana e punto di impatto, la distanza raggiunta è calcolabile dalla relazione

$$\log R = \log H - 0,664 + 0,1529 \log V$$

Il volume V viene calcolato sulla base del rilevamento geologico e geomorfologico, tenendo conto delle dimensioni della roccia che presenta la possibilità di crollo a breve termine. In generale, si sceglie il volume di roccia che risulta delimitato da fratture di trazione ben aperte e alterate, con RQD inferiore al 50%, anche se non ha ancora dato segni di movimento. Il volume viene calcolato dalle sezioni geologiche condotte attraverso la cornice di roccia instabile, che è bene confortare con sondaggi geosismici, dove possibile.

Tale calcolo è di particolare importanza quando le operazioni di scavo avvengono tramite rippaggio.

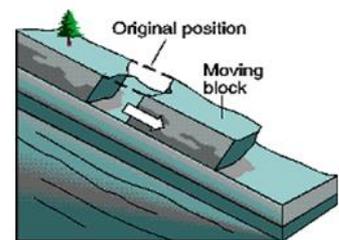
In questo caso gli operatori lavorano sul ripper o su cingolati dotate di benne, che si muovono su una sede stradale molto stretta che rappresenta la prima traccia della sede definitiva.

Lo scavo di materiale resistente può agevolare, con la riduzione delle resistenze al piede, il franamento delle masse instabili che ne erano precedentemente sorrette, con esiti molto pericolosi per gli operatori, che hanno scarsa o nulla possibilità di movimento.

E' quindi necessario che la prima fase di apertura del tracciato, *nei tratti che l'indagine geologica di progetto avrà indicato come pericolosi*, o dove abbia segnalato indici qualitativi della roccia molto bassi (categorie *quarta e quinta* di Bieniawski) sia accompagnata dalla liberazione della roccia da tutte quelle coperture che ne impediscono la visione, fino a rendere accertabile il volume di roccia destinato a franare con il rippaggio. Ove necessario, il terreno andrà quindi, prima dello scavo, parzialmente consolidato in modo da evitare che il volume fatto cadere si riveli eccessivo per la sicurezza.

Tratti interessati da scivolamenti che evolvono in colate

- MATERIALE COINVOLTO: roccia, terreno non coesivo, detriti di versante
- CINEMATISMO: scorrimento di blocchi di roccia o lame di terreno lungo una superficie planare, generalmente coincidente con un orizzonte di debolezza (fratture, giunti di strato, superfici di contatto tra materiale di copertura e substrato roccioso).
- CAUSE PREDISPONENTI: presenza di un livello di debolezza, elevata pendenza del versante
- CAUSE SCATENANTI: eventi meteorici intensi, sollecitazioni sismiche, scalzamento al piede (corsi d'acqua)



Fenditura che prosegue una frattura profonda

Avallamento che denota la presenza di una discontinuità fra roccia stabile e in movimento

Deformazione del terreno dovuta al movimento della roccia sottostante

Se i tratti stradali interessano versanti a mezza costa, a una certa distanza dalla strada si possono rinvenire tracce di movimenti incipienti. Nel caso in cui si siano individuate le possibilità che si verifichino scivolamenti lungo i versanti, che non si incanalino entro impluvi, è possibile definire l'estensione della frana a partire dalla relazione:

$$R = 46,91 \log(H+3) - 22,38$$

in cui H rappresenta il dislivello fra il punto più alto della zona di distacco e il punto inferiore della zona in cui è prevedibile l'accumulo.

Tratti interessati da debris-flows



Quando le frane previste nel progetto possono incanalarsi negli impluvi, e trasformarsi quindi in colate detritiche, valgono per esse le relazioni esposte in precedenza. Per calcolare i limiti dei debris-flows sono infatti disponibili le relazioni di Takahashi già esposte, che forniscono le dimensioni dell'area da salvaguardare e i limiti d'innescò. La relazione di Ashida fornisce indicazioni sulla massa di terreno solido mobilizzabile.

La quantità di detrito mobilizzabile è anche valutabile dalla relazione di Costa G., Ceriani M. e altri (2000), in base alla quale tale volume W si ricava da:

$$W = 5,3 \cdot \text{Area bacino} \cdot \text{Melton number}^{0,8} \cdot S \cdot 1/F^2$$

F è un indice di frana, pari a 1 per grandi frane o frane lungo la rete idrografica, 2 per frane che colpiscono i versanti, 3 per frane piccole o trascurabili
S è la pendenza dell'alveo.

E' in questi casi necessario prevedere viadotti dalle luci

sufficientemente ampie per consentire il deflusso della portata liquida e del volume di detriti senza che questo dia luogo ad ostruzioni.

Ciò si ottiene posizionando la strada all'esterno dell'area prevista per l'espansione del debris-flow ed ampliando le sezioni degli alvei nei quali è previsto il transito della portata solida.

Quando la strada attraversa una conoide, si deve inoltre tener presente il fatto che, nel corso delle maggiori piene, il materiale alluvionale che forma le conoidi può essere in parte mobilizzato. Le fondazioni dei viadotti devono quindi essere sufficientemente profonde per superare lo strato di materiale mobilizzabile, ed è consigliabile che questo sia ritenuto pari ad almeno 4,5 m.

Fase Operativa

Drenaggio delle acque superficiali

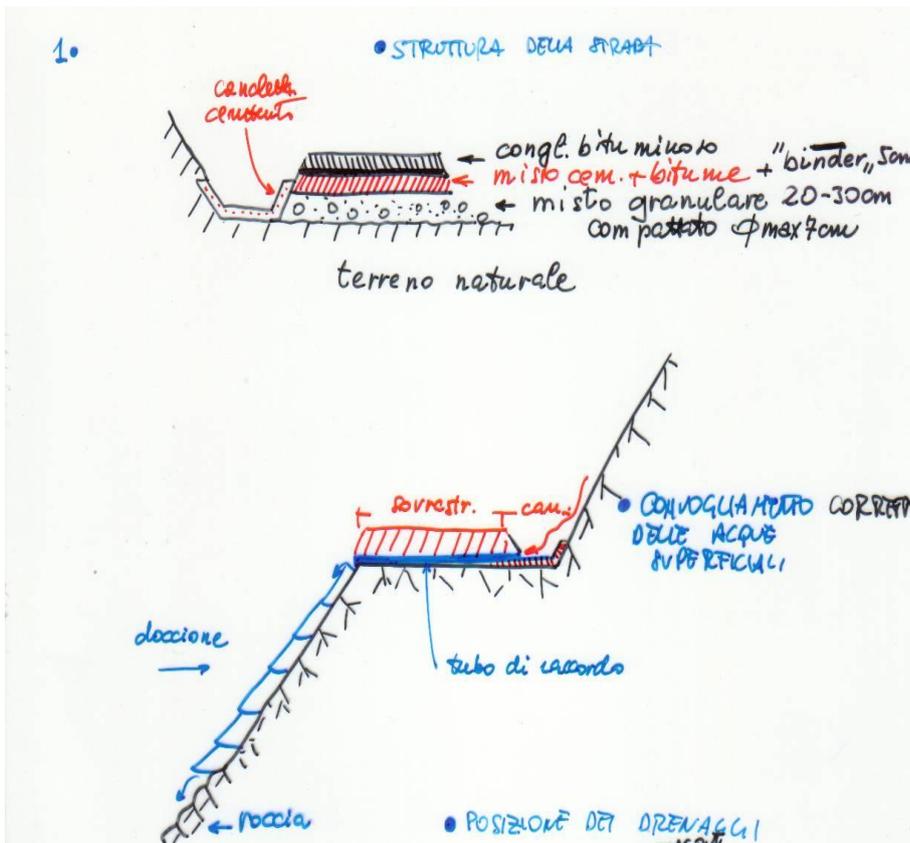
Il corpo stradale produce l'effetto di raccogliere e incanalare rilevanti volumi di acque superficiali che scorrono sul versante, finendo per convogliarle lungo le cunette laterali e le tombinature verso recapiti idonei. Se i punti di fuoriuscita delle acque dalle canalette non sono abbastanza frequenti, esse ne esondano e invadono la sede stradale e i versanti sottostanti, con rischi anche gravi.

Si realizzano infatti solchi di erosione e frane che coinvolgono i terreni superficiali, in specie quando questi sono argillosi e limosi.

Tale scorrimento superficiale non si limita al trasporto di acqua, ma anche di limi e sabbie in sospensione, e durante le maggiori piogge anche di ciottoli e ghiaia.

I punti nei quali due strade a mezza costa si vengono a incontrare determinano, come le confluenze fra corsi d'acqua, rilevanti aumenti di portata nelle canalette, che devono essere previsti, in modo che siano evitati gli accumuli di detriti, le esondazioni dalle cunette laterali e i fenomeni di erosione accelerata e di frana che ne possono conseguire.

Si deve quindi eseguire uno studio idrologico che accerti l'entità delle acque che affluiscono alla sede stradale nel corso delle piogge, e gli si deve accompagnare un'indagine geologica che determini i punti ideali per lo smaltimento delle acque incanalate, che corrispondono ad avvallamenti in roccia non alterata.



1. sovrastuttura

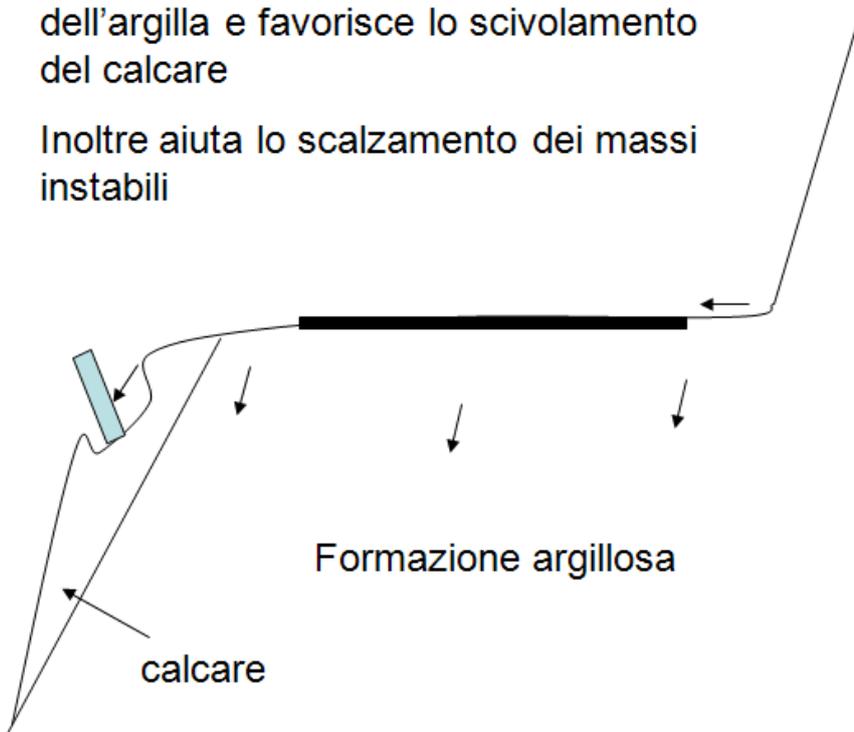
dall'alto: conglomerato bituminoso Binder
Misto cemento e bitume
Misto granulare
Base: terreno naturale

2. Sistema drenante:

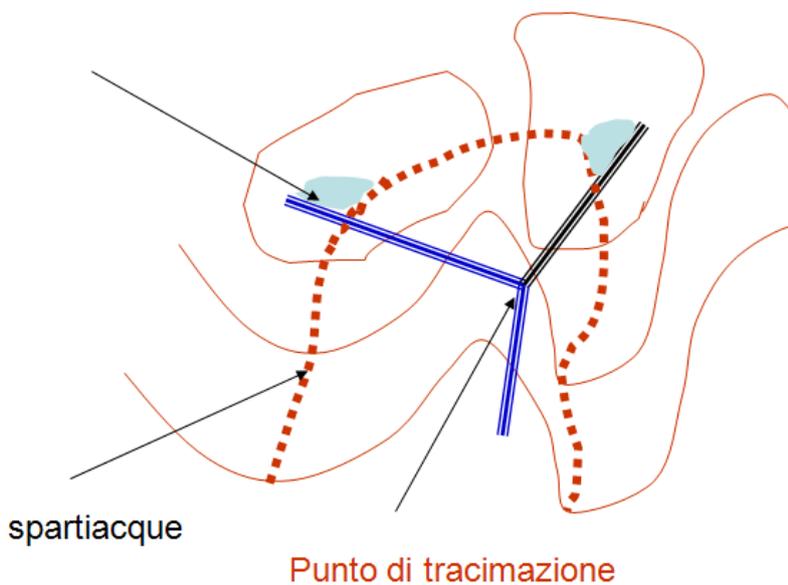
Canaletta laterale
Tombinatura
Dreno laterale o inserito nella sovrastuttura
Scarico con o senza gronda (doccione)

In questo esempio il mancato drenaggio produce la saturazione dell'argilla e favorisce lo scivolamento del calcare

Inoltre aiuta lo scalzamento dei massi instabili



Porzione di bacino esterno



L'importanza dei dren superficiali è molto grande. Infatti le strade tendono a unire bacini idrografici separati, producendo in alcuni punti la convergenza delle acque drenate da vaste aree, anche esterne al bacino.

Ad esempio, la strada in blu porta nel crocevia le acque drenate anche da un bacino esterno; l'incontro con la strada in nero (che porta altre acque da bacino esterno) determina un afflusso idrico notevole, calcolabile con la relazione

$$Q = 10 A^{1/2}$$

Che indica come un bacino di un ettaro dia luogo a un afflusso di 1 metro cubo/s circa

11.4.5 Drenaggio delle acque sotterranee

La strada, dove viene eseguita in scavo, costituisce un dreno del suolo, che può avere effetti benefici, se il volume complessivo delle acque estratte dal terreno non è tale da pregiudicare le risorse idriche sotterranee.

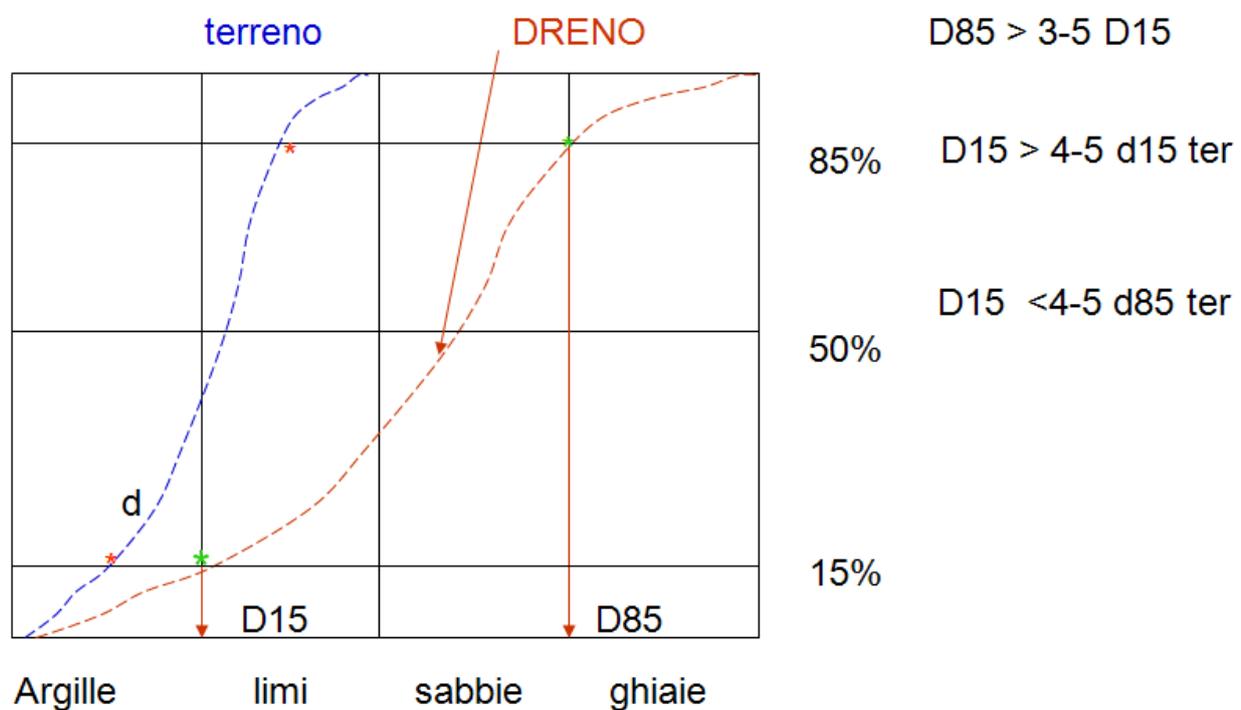
Lo scavo del versante determina l'inacidimento del suolo non saturo, le cui acque devono essere raccolte dal filtro di ghiaietto e sabbia posto nell'intercapedine muro-terreno, o dalle semplici canalette che corrono lungo lo scavo.

Il drenaggio delle acque sotterranee viene compiuto con un misto granulare disposto alle spalle dei muri di contenimento, e talora con trincee drenanti, che saranno oggetto di un approfondimento successivo in un capitolo dedicato ai sistemi di estrazione delle acque sotterranee. Questo rivestimento porta le acque a una serie di tubi disposti a franapoggio, che attraversano il muro e la portano a una canaletta esterna. Un altro sistema prevede che le acque vengano raccolte da un tubo finestrato posto alla base del filtro all'interno di una canaletta di cemento, dal quale vengono portate a una tombinatura.

Per quanto riguarda il drenaggio dei muri, si deve progettarlo in modo da evitare che il filtro abbia permeabilità inferiore a quella del terreno e del tubo di convogliamento delle acque.

Pertanto si scelgono in modo che il valore del D85 (diametro rispetto al quale l'85% in peso del materiale del filtro presenta diametro inferiore) sia da 3 a 5 volte quello del D15. Quest'ultimo deve avere un valore superiore a 4-5 volte il d 15 del terreno naturale, e inferiore a 4-5 volte il d 85 del terreno naturale stesso.

Per quanto riguarda il tubo - filtro, ammesso che la larghezza delle sue finestrate sia a, si deve fare in modo che D 85 sia almeno da uno a 2,5 volte il valore di a.



Curva granulometrica del dreno

Regolazione del drenaggio: interventi migliorativi dell'impatto sul territorio

Se si ritiene che il drenaggio del non saturo sia *eccessivo*, e riduca l'alimentazione idrica proveniente alla vegetazione di aree naturali protette, si deve ricorrere all'espedito di recapitare le acque drenate a un sistema di *vasche di smaltimento*, di volume complessivo poco superiore alla decina di metri cubi, sistemate in punti pianeggianti (solitamente lungo la parete del versante che fiancheggia la strada a monte), scelti in modo da evitare che possano dar luogo a eccessiva saturazione dei suoli. E' pertanto utile che il terreno predisposto per lo smaltimento mediante subdrenaggio sia discretamente permeabile (k maggiore di 10^{-4} m/s)

Lo smaltimento viene agevolato preparando un letto di ghiaia e sabbia sul fondo di queste vasche a contatto con il terreno. Una misura di questo tipo, praticata con vasche *impermeabili*, permette di raccogliere le acque necessarie per gli interventi *antincendio* nelle aree boschive. Queste misure di subdrenaggio e di accumulo di acque per interventi contro gli incendi sono praticate nelle aree boschive dell'America settentrionale. L'utilizzo delle strade come dreni intercettori delle acque superficiali e sotterranee in eccesso, cioè come mezzi per deviare da punti particolarmente vulnerabili perché costituiti da terreni cedevoli le acque di superficie, è di particolare interesse ambientale; infatti molte pendici montane subiscono un notevole miglioramento nelle condizioni di stabilità quando la rete stradale viene progettata con sistemi di drenaggio delle acque superficiali efficienti. Non essendo tuttavia questo uno degli scopi abituali dei progetti stradali, è necessario che in sede di valutazione di impatto ambientale si tenga conto di queste opportunità e si inserisca anche questo obiettivo fra quelli del progetto. La discarica dei materiali di risulta dello scavo, spesso comporta gravi inconvenienti per la stabilità dei versanti. E' quindi opportuno che, durante la fase di discussione del progetto, le Autorità preposte provvedano a incentivare la destinazione di tali materiali per impieghi di rilevante utilità. Fra i possibili utilizzi, quello come materiali da costruzione (calcarei e marne per cemento), gneiss, serpentine prive di amianto per massicciate ferroviarie, e per arginature o rilevati stradali è quello preferibile. Molte sono le voci negative che un progetto male indirizzato può comportare, come risulta dall'elenco di seguito riportato.

Alterazioni ambientali

1. Lo spargimento di sali sulla sede stradale per evitare la formazione di ghiaccio produce una grave inquinamento delle acque sotterranee per una fascia di qualche centinaio di metri intorno alla carreggiata, e analoga contaminazione si riscontra dove si utilizzano prodotti diserbanti. I rischi connessi con sversamenti di prodotti tossici da autocisterne rovesciate per incidenti sono molto elevati.
2. Nelle aree montuose i ponti sono sovente causa di ostruzione degli alvei fluviali, per il convergere contro i piloni delle ramaglie e dei detriti nel corso delle piene
3. Le strade producono il disordine della rete idrografica minore, con fenomeni erosivi e frane
4. Il traffico determina la contaminazione dell'aria con sostanze aggressive per i materiali da costruzione pregiati e l'aumento dei processi di alterazione delle rocce, aumentando le possibilità di cedimenti dei terreni più instabili.
5. Non sono infrequenti, nelle aree con strade in rilevato, i fenomeni di impaludamento
6. L'accentuazione delle pendenze innesca fenomeni franosi nelle strade a mezza costa.
7. Le discariche di inerti effettuate lungo le pendici montane in terreni instabili o in alvei, producono notevoli dissesti.

Di tutti questi inconvenienti deve tener conto la valutazione di impatto ambientale che è destinata a correggere i progetti che possano dar vita alle conseguenze indicate.

Metodo di scavo

Quando la roccia è **scarsamente fratturata** e non vi sono sintomi di possibili movimenti franosi, è possibile aprire lo scavo con **esplosivi**.

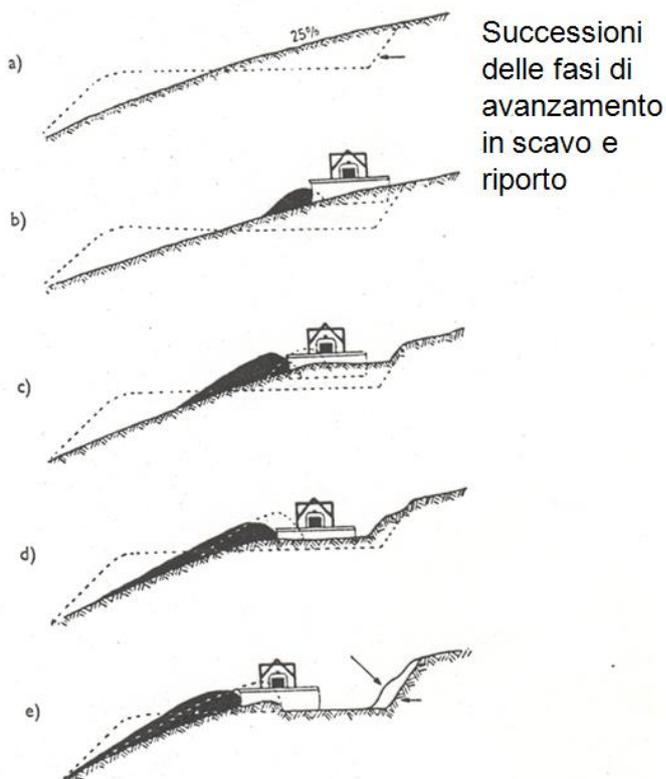
Controindicazioni: costi e possibili frane.

Quando la roccia **non è integra**, o è costituita da terreni **poco coesivi**, si impiegano metodi meno costosi, con l'utilizzo di scarificatori (**rippers**), bracci meccanici con uno o due denti che incidono fino a 80 cm-1 m la compagine del terreno e lo portano sulla traccia stradale già aperta, dove una benna dalla capacità di 0,8 –1,5 m³ lo porta ai mezzi di trasferimento verso i luoghi di discarica o di utilizzo.

I rippers si adattano a molti tipi di terreno, purchè poco compatti (in questi terreni le prove geosismiche possono dimostrare che la velocità delle onde principali non supera 1.8 – 2 km/s) fra i quali flysch, arenarie argillose, scisti alterati, calcari fratturati, ardesie alterate, depositi glaciali, conglomerati poco cementati.

Queste attrezzature non sono in grado di asportare le argille e lavorano male anche con le marne che non siano in scaglie.

Le terre sciolte possono essere scavate anche **a mano** o con semplici **benne**.



d) ATTACCO A GRADONI

Viene realizzato sia nel senso longitudinale che trasversale (fig. 531). In quest'ultimo caso, per ogni taglio la lama dell'apripista o dello skraiper viene spostata di quel tanto che occorre per dare alla scarpa della trincea la pendenza voluta (fig. 530 a, b, c, d).

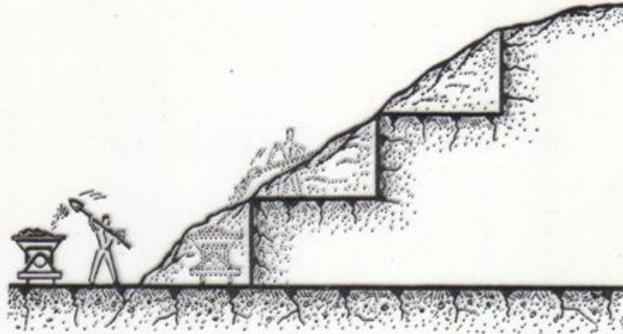


Fig. 531.

e) ESECUZIONE A STRATI

L'attacco del terreno avviene secondo strati inclinati variabili dalle possibilità di lavorabilità che ha la macchina anche in relazione alla natura delle terre (figg. 532 a e 532 b).

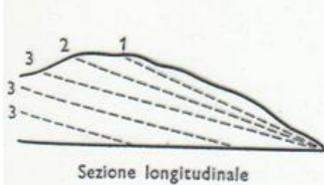


Fig. 532 a.



Fig. 532 b.

Avanzamento a gradoni

Avanzamento in scavo

Fondo strada e soprastruttura

Il fondo del terreno naturale sul quale viene impostata la soprastruttura stradale, viene scavato, livellato e rullato, in modo da fargli assumere una buona compattezza e omogeneità. Si osserva, altrimenti, una tendenza alla deformazione di tutta la soprastruttura.

Su di esso viene deposto un livello granulare o misto sabbia-ghiaia di buona permeabilità, addensato in modo da presentare il minor numero possibile di discontinuità aperte, sul quale viene steso uno strato di bitume o di cemento o di calcestruzzo, e un livello di usura in conglomerato bituminoso. Il livello di base deve essere il più possibile omogeneo per evitare che i carichi diano luogo a cedimenti differenziali della soprastruttura. Al fine di ottenere i migliori risultati, questo livello subisce un trattamento di stabilizzazione con diversi composti, che vanno dal cloruro di calcio al bitume, a seconda delle esigenze.

Lo spessore dei diversi strati viene scelto in funzione delle finalità della strada e delle condizioni naturali; ad esempio il livello di base granulare avrà uno spessore tanto maggiore quanto maggiore è la possibilità che al contatto con il fondo naturale si formino veli d'acqua che, per risalita capillare e successivo ghiacciamento, possono fessurare o deformare i livelli soprastanti.

Sicurezza del cantiere

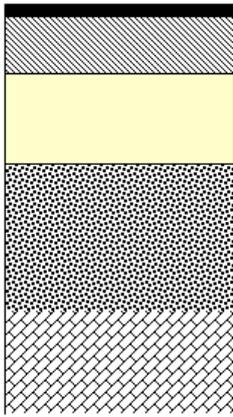
Un avanzamento prudentiale comporta:

- a) spingere lo scavo fino all'inizio dell'area critica segnalata dallo studio geologico (esempio: terreni attraversati da una zona di frattura)
- b) utilizzando una benna con braccio meccanico lungo, eliminare la roccia instabile (senza ricorrere ad esplosivi) ed utilizzarla eventualmente come riporto
- c) gradonare il versante instabile, e se è il caso, procedere al consolidamento della roccia (ad esempio con chiodature)
- d) ripetere l'operazione fino al termine del tratto instabile.

E' sconsigliabile procedere a scavi rapidi, approfittando del fatto che non sempre la roccia frana immediatamente dopo lo scavo (in specie le argille hanno un certo ritardo nel mettersi in movimento dopo essere state attraversate da un taglio del versante); ciò può essere ingannevole, e dare luogo a crolli improvvisi mentre i lavori sono ancora in atto.



Strato di usura in congl.bituminoso



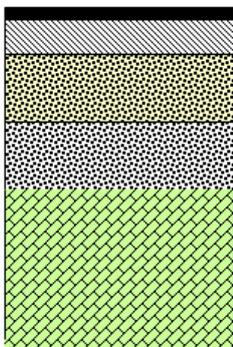
binder

Calcestruzzo o terra-
cemento

Misto granulare o
terra stabilizzata

Struttura di strada a traffico pesante
30 cm

Strato di usura in congl.bituminoso a
caldo in due strati



Pietrisco

Misto granulare o terra
stabilizzata

Struttura di strada a traffico medio