

Maurizio Pierro



Dario Flaccovio Editore

Progettazione geotecnica dei rilevati stradali

[Scheda sul sito >](#)

Aspetti teorici - Applicazioni - Normativa

Allineato ai capitolati di ANAS e Società Autostrade



Compattamento dei terreni: definizione e obiettivi ✓

Tecniche di compattamento in sito ✓

Verifiche e controlli durante l'esecuzione ✓

Problematiche geotecniche nella fase di progettazione ed esecuzione ✓

Maurizio Pierro

PROGETTAZIONE GEOTECNICA DEI RILEVATI STRADALI

Aspetti teorici – Applicazioni – Normativa



Dario Flaccovio Editore

Maurizio Piero

PROGETTAZIONE GEOTECNICA DEI RILEVATI STRADALI

Aspetti teorici – Applicazioni – Normativa

ISBN 978-88-579-0124-4

© 2012 by Dario Flaccovio Editore s.r.l. - tel. 0916700686

www.darioflaccovio.it info@darioflaccovio.it

Prima edizione: marzo, 2012

Piero, Maurizio <1982->

Progettazione geotecnica dei rilevati stradali : aspetti teorici, applicazioni, normativa /

Maurizio Piero. - Palermo : D. Flaccovio, 2012.

ISBN 978-88-579-0124-4

1. Costruzioni stradali.

625.22 CDD-22

SBN PAL0241688

CIP – Biblioteca centrale della Regione siciliana "Alberto Bombace"

Stampa: Tipografia Priulla, Palermo, marzo 2012

RINGRAZIAMENTI

Scrivere un testo è sempre qualcosa di gratificante per il proprio ego, ma scriverlo su argomenti che si amano, come l'ingegneria geotecnica per il sottoscritto, è qualcosa di incommensurabile. Il raggiungimento di questo obiettivo ha comportato tanti sacrifici e mai lo avrei raggiunto senza il contributo di tante persone che mi sono state vicine e mi hanno spronato ad andare avanti. Ringrazio innanzitutto i miei genitori, mio fratello Roberto e mia sorella Laura, che da sempre hanno creduto in me e mi hanno sostenuto; ringrazio Lavinia che mi è stata vicino, Danilo con il quale ho cooperato per la redazione del quinto capitolo e tutti i miei amici più stretti che, anche a loro insaputa, hanno contribuito nel trasmettermi quella serenità di cui si necessita per scrivere un buon testo.

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. Rilevati stradali

1.1. Cenni introduttivi.....	»	1
1.2. Caratteristiche geometriche dei rilevati	»	2
1.2.1. Il piano di posa	»	2
1.2.2. Il corpo del rilevato	»	5
1.2.3. Il sottofondo stradale	»	6
1.2.4. La sovrastruttura stradale	»	7
1.3. Problematiche dei rilevati: stabilità e cedimenti	»	9

2. Il compattamento dei terreni nei rilevati stradali

2.1. Descrizione dei terreni naturali	»	13
2.2. I terreni a grana grossa e i terreni a grana fine	»	15
2.3. Definizioni	»	19
2.4. Compattamento: definizione e obiettivi	»	22
2.4.1. Caratteristiche dei terreni	»	24
2.4.2. Influenza del contenuto d'acqua sul compattamento	»	29
2.4.3. Modalità di compattamento.....	»	34
2.4.4. Considerazioni sul compattamento.....	»	37
2.5. Deformabilità e compressibilità.....	»	40
2.6. Resistenza a taglio	»	43

3. Le tecniche di compattamento in sito

3.1. Cenni introduttivi.....	»	53
3.2. Macchine impiegate per lo scavo e il carico.....	»	53
3.3. Macchine impiegate per il trasporto.....	»	59
3.4. Macchine impiegate per la stesura.....	»	60
3.5. Macchine impiegate per il compattamento.....	»	61
3.5.1. Spessore degli strati e numero di passate.....	»	61
3.5.2. Macchine ad effetto statico.....	»	62
3.5.3. Macchine ad effetto dinamico.....	»	65
3.6. Efficienza del compattamento.....	»	69
3.7. Tecniche di compattamento.....	»	70

4. Verifiche e controlli durante l'esecuzione

4.1. Cenni introduttivi.....	»	73
4.2. Controllo del terreno impiegato nel rilevato.....	»	73
4.3. Controllo delle modalità di esecuzione e dei mezzi compattanti.....	»	74
4.4. Controllo delle caratteristiche del terreno compattato.....	»	83
4.4.1. Verifica della massa volumica del secco <i>in situ</i>	»	83
4.4.2. Determinazione della capacità portante del terreno.....	»	90
4.4.2.1. Metodi di calcolo.....	»	90
4.4.2.1.1. Metodi razionali.....	»	91
4.4.2.1.2. Metodi empirici.....	»	94
4.4.2.1.3. Altri metodi di calcolo della portanza.....	»	98

5. Un caso applicativo

5.1. Cenni introduttivi.....	»	103
5.2. Il caso di studio.....	»	104
5.3. Problematiche geotecniche nella fase di progettazione.....	»	107
5.3.1. Scelta dei materiali del rilevato.....	»	107
5.3.2. Definizione di una campagna di indagini geognostico-geotecniche.....	»	107
5.3.3. Definizione del modello geologico-geotecnico di sottosuolo.....	»	115
5.3.4. Verifiche geotecniche sul terreno di fondazione.....	»	118
5.3.4.1. Analisi dei carichi indotti dal rilevato.....	»	118

5.3.4.2. Tensioni indotte nel sottosuolo dal rilevato (Boussinesq).....	» 120
5.3.4.3. Verifiche di resistenza dei terreni di fondazione	» 120
5.3.4.4. Verifica dei cedimenti dei terreni di fondazione	» 123
5.3.5. Verifiche geotecniche sul corpo del rilevato.....	» 125
5.3.5.1. Metodo equilibrio limite (LEM)	» 125
5.3.5.2. Valutazione dell'azione sismica.....	» 127
5.4. Problematiche geotecniche nella fase di esecuzione.....	» 133
5.4.1. Controllo del terreno impiegato nel rilevato	» 133
5.4.2. Controllo delle modalità di esecuzione del lavoro e dell'efficacia dei mezzi compattanti.....	» 136
5.4.3. Controllo delle caratteristiche del terreno compattato.....	» 138
Bibliografia	» 149

PREMESSA

La dottrina illumina l'esperienza, l'esperienza collauda la dottrina.
(R. Magri)

In prima battuta è opportuno sottolineare che la teoria è importante, ma senza applicazioni è fine a se stessa, come la pratica senza la teoria, d'altro canto, è “zoppa”.

La soluzione ideale è un giusto connubio tra le due. Questa la filosofia che ha animato la stesura di questo testo, nato con l'intento, da un lato, di spiegare cos'è un rilevato stradale, come funziona, quali caratteristiche debba possedere e, dall'altro, di porre altrettante domande “pratiche” dando risposte esaurienti. Ad esempio quali passaggi seguire nella progettazione geotecnica di un rilevato, quali verifiche effettuare in qualità di direttore dei lavori durante l'esecuzione di un rilevato, cosa prescrivono i capitolati tecnici, quali sono le normative a cui fare riferimento.

Nella libera professione mi è capitato di sovente di imbartermi in rilevati stradali come progettista geotecnico, come direttore dei lavori o come consulente tecnico d'ufficio del tribunale; molto spesso ho cercato dei testi che fossero un buon connubio tra la teoria e gli aspetti pratici tanto cari a noi professionisti, ma ho trovato spesso opere perfette da un punto di vista dottrinale ma scarse di esempi, di riferimenti normativi, che non definivano in modo semplice e conciso quali passaggi devono essere seguiti per progettare geotecnicamente un rilevato o quali fossero le verifiche da effettuare in corso d'opera. Altre volte, è capitato di imbartermi in testi con riferimenti pratici, ma senza la giusta dose di teoria. Il presente testo si rivolge ai professionisti, dando loro la possibilità di conoscere gli aspetti geotecnici alla base del progetto di un'opera in terra compattata, riferimenti pratici, diagrammi che illustrino quali passaggi seguire.

Il testo si articola in cinque capitoli, dei quali i primi due sono teorici, il terzo riferisce le tecniche di compattamento adottate in sito, nel quarto si definiscono le prescrizioni tecniche imposte dalle normative e dai capitolati di due importanti enti quali ANAS e Società Autostrade, infine il quinto capitolo è

X

Progettazione geotecnica dei rilevati stradali

l'analisi di un caso pratico. Quest'ultimo capitolo definisce tutti i passaggi da effettuare sia nella progettazione geotecnica che nell'esecuzione di un rilevato stradale. Ogni passaggio è commentato e il professionista può, in questo modo, comprendere come muoversi quando si trovi di fronte al progetto geotecnico o alla direzione lavori di un rilevato stradale.

L'autore

1. I RILEVATI STRADALI

1.1. Cenni introduttivi

La progettazione di una costruzione in terra (intendendosi con tale termine qualunque opera venga realizzata attraverso l'uso di terre *sciolte*) si pone come scopo basilare la messa in opera di una struttura che, nel tempo, sia stabile con adeguati margini di sicurezza: i requisiti prestazionali richiesti saranno funzione della tipologia di opera, così come per una diga in terra o per un argine fluviale dovrà essere garantita la tenuta idraulica, mentre per un rilevato, stradale o ferroviario, la percorribilità in condizioni di sicurezza.

In linea generale, nella costruzione dei rilevati stradali prevale il concetto dell'impiego esclusivo di materiali che già possiedono in natura le caratteristiche di idoneità, mentre non vengono presi in considerazione quei materiali che non possiedono tali caratteristiche, ma che potrebbero divenire utilizzabili a seguito di miscelazione con additivi. Attualmente, nella progettazione e nella realizzazione di rilevati, sono prescritte le caratteristiche originarie dei materiali (i quali devono essere accuratamente selezionati) e non le caratteristiche meccaniche che i materiali potrebbero assumere a seguito di lavorazioni o di trattamenti: ciò comporta che, in relazione alle indubbe difficoltà che si incontrano nel reperire terreni selezionati e pregiati occorrenti per la realizzazione di rilevati, si renda necessario ricercare il migliore rendimento possibile in termini di movimento di terra. Con il termine *movimento di terra* ci si riferisce alla fase di trasporto dei terreni dalla cava di prestito al cantiere nel quale tali terreni devono trovare impiego: al fine di ridurre gli oneri connessi a queste operazioni, le normative si stanno orientando verso la definizione di prescrizioni che prevedano l'impiego di materiali definiti *non conformi*, finora destinati a scarto, ma che, a seguito di trattamento con additivi e successiva compattazione, possano essere ottimizzati sotto il profilo delle caratteristiche meccaniche e divenire pertanto adatti a un loro impiego nel corpo dei rilevati stradali.

Una corretta e attenta scelta dei terreni da impiegare nel rilevato è solo il primo step per un corretto approccio geotecnico e, da sola, non è comunque sufficiente a garantire un buon comportamento del rilevato se non è accompagnata da un'altrettanto corretta posa in opera dei materiali e da operazioni di riscontro che, in qualche misura e con le più ragionevoli approssimazioni, confermino quanto preventivato e rispettino quanto prescritto dai capitolati tecnici e dalle normative di settore.

1.2. Caratteristiche geometriche dei rilevati

In figura 1.1 si riporta la sezione trasversale schematica di un rilevato tipo.

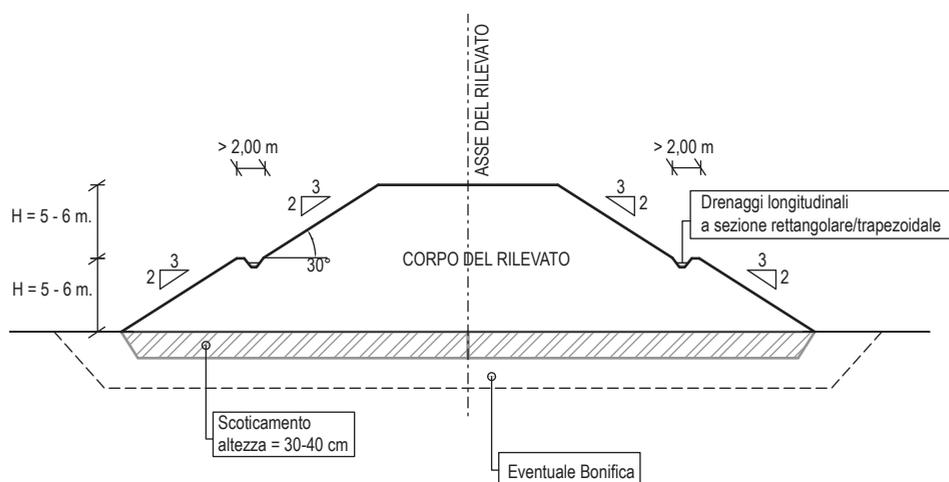


Figura 1.1. Sezione schematica di un rilevato stradale

Un rilevato stradale è costituito dai seguenti componenti strutturali:

- piano di posa;
- corpo del rilevato (nucleo centrale);
- sottofondo stradale;
- sovrastruttura o pavimentazione stradale.

1.2.1. Il piano di posa

Il piano di posa dei rilevati stradali rappresenta l'interfaccia tra il rilevato e il terreno sottostante (terreno *in situ*): la sua preparazione si pone come fine quello di minimizzare, per quanto possibile, i problemi che possono derivare dal terreno di fondazione; al fine di contenerne i cedimenti, sui terreni che

costituiscono il piano di posa dei rilevati è sempre prevista, indipendentemente dall'altezza dei rilevati, l'effettuazione del taglio delle piante arboree ed arbustive, l'asportazione dello strato di terreno vegetale, solitamente molto compressibile (figura 1.2) e dalle scadenti proprietà meccaniche (figura 1.3). Il terreno humifero, una volta rimosso, viene rimpiazzato da materiale a grana grossa avente la funzione di *anticapillare*, il quale viene successivamente compattato (figura 1.4): talvolta questo materiale viene separato dal corpo del rilevato e dalla base con uno strato di "tessuto non tessuto".

Quanto detto in precedenza costituisce un modo di procedere univoco nella maggior parte dei casi, non essendo possibile stabilire a priori l'effettivo spes-

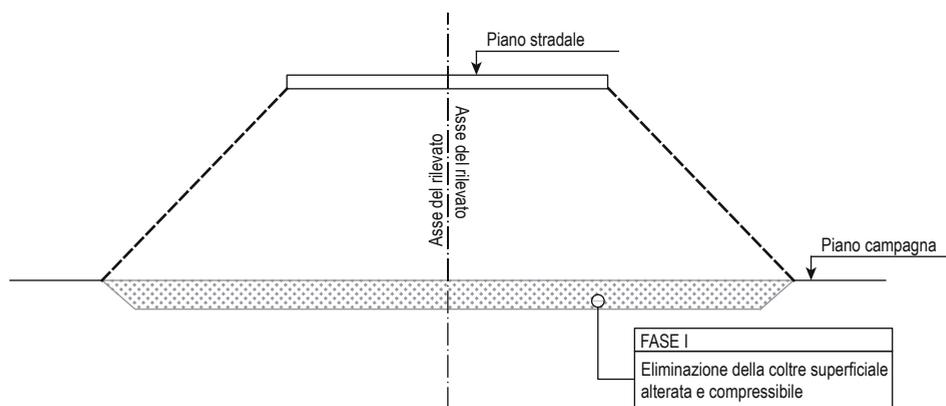


Figura 1.2. Prima fase nella preparazione del piano di posa

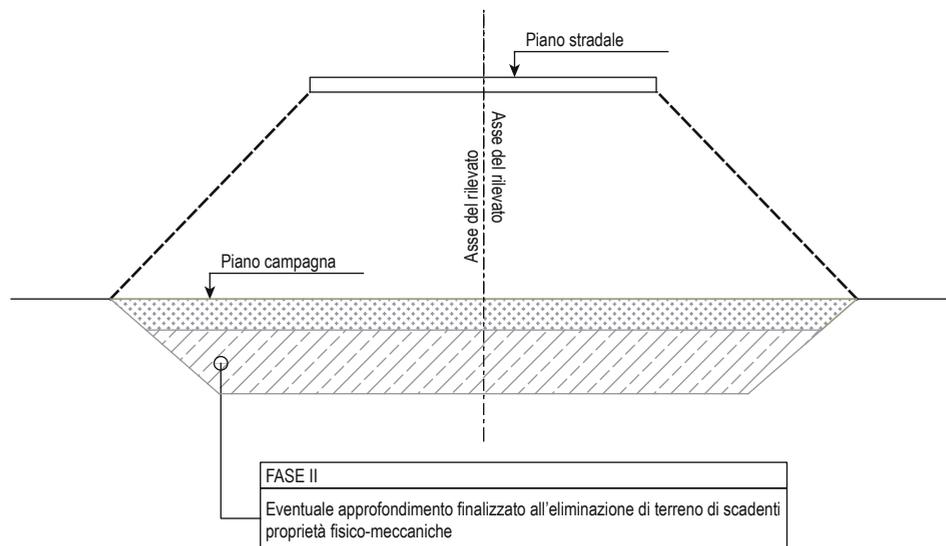


Figura 1.3. Seconda fase nella preparazione del piano di posa

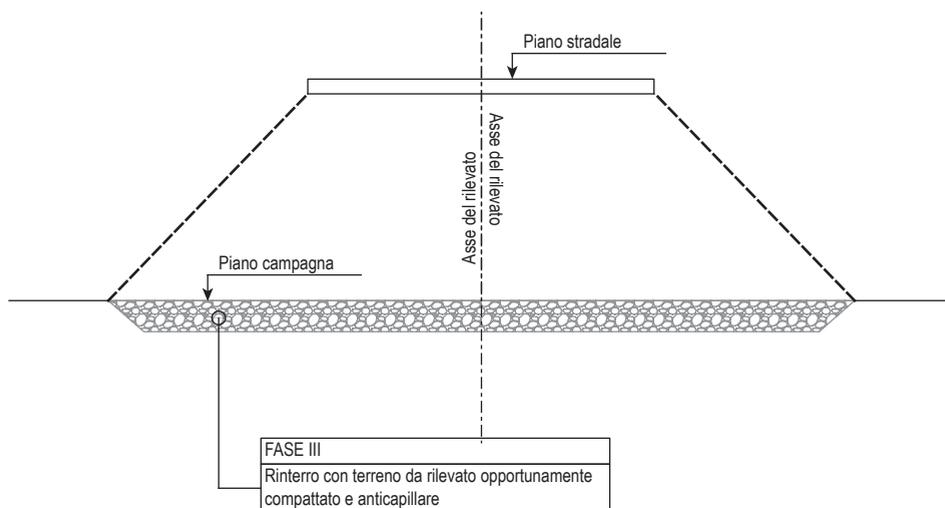


Figura 1.4. Terza fase nella preparazione del piano di posa

sore di scavo, ancorché in presenza di un'indagine preventiva la quale, per quanto diffusa, è pur sempre limitata a uno spazio ben definito: d'altra parte, l'eliminazione totale del terreno vegetale è un'esigenza irrinunciabile. qualora, dopo l'asportazione della coltre superficiale, siano presenti nel sottofondo materiali di bassa consistenza, che risultino eccessivamente deformabili e compressibili, occorrerà bonificare il terreno di posa fino a una profondità maggiore.

Un ulteriore accorgimento da adottare in zone collinari con pendenze del terreno superiori al 10-15% è rappresentato dalla gradonatura del piano di posa (figura 1.5), atto a evitare superfici di discontinuità tra terreno in sito e rilevato di forma continua scongiurando, in tal modo, potenziali cinematismi del rilevato stesso. La sistemazione a gradoni in direzione trasversale all'asse del rilevato è fondamentale, tuttavia non deve essere trascurata la gradonatura

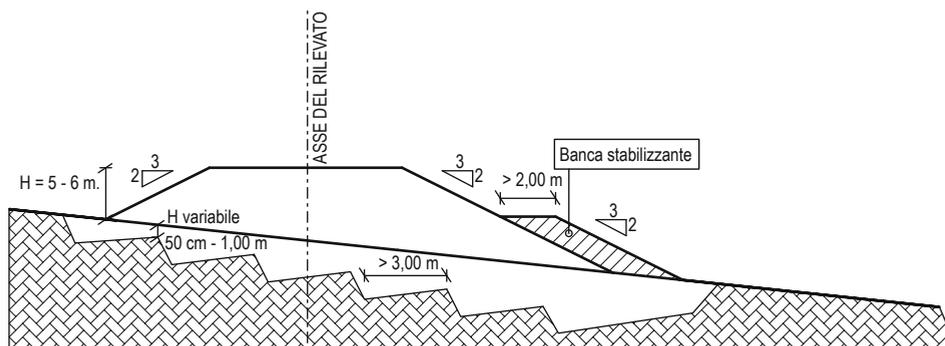


Figura 1.5. Rilevato su terreno a forte pendenza trasversale – Schema dell'intervento di gradonatura

in direzione longitudinale (parallela all'asse del rilevato). Le dimensioni dei gradoni (larghezza e altezza) devono, quanto più sia possibile, garantire una facile lavorazione alle macchine per la movimentazione della terra e, pertanto, la larghezza non dovrebbe essere inferiore ai 3 metri, mentre il dislivello tra due gradoni consecutivi dovrebbe essere dell'ordine di 1,00-1,5 metri. In ogni caso, dovrà essere effettuata, ai sensi della vigente normativa, una verifica di stabilità globale del corpo del rilevato come verrà illustrato nel capitolo 5 dove si affronterà un caso applicativo di studio e verranno analizzati tutti i passi da compiere per un'analisi geotecnica esaustiva.

1.2.2. Il corpo del rilevato

I terreni selezionati per l'impiego nel rilevato devono essere stesi a strati, lo spessore finale dei quali è prescritto a seconda della qualità dei terreni stessi e con pendenze trasversali tali da assicurare, dopo compattazione, una *serratura granulometrica* che garantisca un facile deflusso superficiale delle acque meteoriche così da scongiurare l'infiltrazione nel corpo del rilevato.

I terreni selezionati costituenti il corpo del rilevato, a compattazione ultimata, dovranno assicurare adeguati valori di densità e di compressibilità (così come riportato nel capitolo dedicato alle prescrizioni normative e ai capitolati tecnici).

La pendenza delle scarpate dei rilevati è condizionata dalle caratteristiche dei terreni con cui essi sono costituiti: se si fa riferimento ai tipi di terreno generalmente ammessi, una pendenza di $2/3$ come rapporto altezza/larghezza dei gradoni è sufficiente ad assicurare la stabilità globale del corpo in terra nei confronti di superfici di scorrimento potenziali entro il corpo del rilevato. Con tale rapporto geometrico, tuttavia, problemi di instabilità superficiali possono insorgere in terreni incoerenti e di angolo di attrito non particolarmente elevato (si pensi, ad esempio, a delle sabbie fini) per effetto dell'erosione esercitata dalle acque meteoriche: in tal caso, è sufficiente, generalmente, la protezione di scarpata con una coltre vegetale, la cui funzione è appunto quella di limitare al massimo l'azione erosiva operata dagli agenti esogeni e in particolare dalle acque meteoriche. In questi casi, infatti l'addolcimento della pendenza di scarpata, in assenza di un'adeguata copertura superficiale, non risolve il problema a meno di non ricorrere a valori estremamente ridotti della pendenza. È prassi consolidata interrompere la scarpata con banchi orizzontali ogni 5-6 metri di altezza: il duplice effetto benefico che se ne ottiene è, da un lato, l'incremento di stabilità del manufatto, riducendosi la pendenza media della scarpata, dall'altro, la riduzione della velocità di ruscellamento superficiale

delle acque di pioggia, il che contribuisce a minimizzare eventuali problemi di erosione superficiale. Tali banchettoni orizzontali vengono, di norma, attrezzati con fossi o cunette di raccolta e drenaggio delle acque, generalmente in terra a sezione rettangolare (o trapezoidale) rivestita con pareti in calcestruzzo. Per svolgere correttamente la loro funzione, la larghezza delle banche non dovrebbe essere inferiore a 2,00 metri. Banche orizzontali di maggiore larghezza trovano la loro ragione di essere nell'esigenza di migliorare la stabilità del rilevato, nel caso in cui esso sia impostato su terreni di scadenti proprietà meccaniche (aumentando l'area di impronta del rilevato si riducono le tensioni scaricate in fondazione). Le dimensioni delle banche (altezza e larghezza) devono essere definite compiutamente attraverso analisi di stabilità dell'insieme rilevato-piano di posa: il tutto dipenderà dalla natura e dalle caratteristiche meccaniche dei terreni impiegati, nonché da quelli dei terreni presenti *in situ*. Si dovrà, in particolare, ricercare quel valore del coefficiente di sicurezza che garantisca, con un margine adeguato, che le forze resistenti superino quelle instabilizzanti.

1.2.3. Il sottofondo stradale

Il sottofondo è lo strato più superficiale del corpo del rilevato, sul quale si colloca direttamente la pavimentazione stradale e nel quale le tensioni prodotte dai carichi dinamici in transito sulla strada, che tenderanno a ridursi con la profondità, assumono ancora valori apprezzabili.

Le caratteristiche fondamentali che un sottofondo deve possedere sono:

- un'elevata rigidità: deve deformarsi molto poco sotto l'azione dei carichi, sia durante la costruzione della pavimentazione che durante la fase di esercizio della strada; d'altra parte, solo se il sottofondo è abbastanza indeformabile, è possibile contenere le deformazioni che il peso dei veicoli provoca nella pavimentazione entro quei limiti che evitano la rottura in breve tempo della pavimentazione stessa;
- la conservazione nel tempo delle sue caratteristiche meccaniche, in particolare della rigidità;
- la superficie superiore del sottofondo, normalmente detta *piano di sottofondo*, deve essere sufficientemente regolare.

Pertanto, al fine di conferire tali caratteristiche al sottofondo stradale, i capitolati prescrivono:

- l'impiego di terreni con caratteristiche meccaniche migliori rispetto a quelli

impiegati per la parte inferiore del corpo del rilevato (elevata resistenza, bassa deformabilità);

- un compattamento più spinto rispetto a quello richiesto per i terreni costituenti la restante parte del nucleo centrale.

1.2.4. La sovrastruttura stradale

La pavimentazione (o sovrastruttura) stradale è la struttura piana, di spessore più o meno elevato a seconda dei casi, sovrapposta al rilevato e direttamente soggetta all'azione dinamica dei veicoli (figura 1.6). Essa ha essenzialmente tre funzioni fondamentali:

- garantire ai veicoli una superficie di percorribilità regolare e poco deformabile;
- ripartire sul terreno sottostante le azioni dei veicoli, in misura tale che non si abbiano deformazioni del piano viabile pericolose per il traffico;
- proteggere il terreno sottostante dall'azione degli agenti atmosferici.

Le pavimentazioni stradali sono, in genere, costituite da più strati sovrapposti, realizzati in miscele di aggregati lapidei e di leganti; tra questi ultimi i più adoperati sono il conglomerato bituminoso e il calcestruzzo: con il primo si realizzano strati che possono subire deformazioni anche di qualche entità sotto i carichi senza però fessurarsi (in tal caso si otterranno pavimentazioni denominate *flessibili*). Le pavimentazioni realizzate facendo uso di calcestruzzo hanno, invece, una deformazione di rottura molto più piccola (e conseguente minore possibilità di deformarsi) e vengono generalmente indicate come pavimentazioni *rigide*.

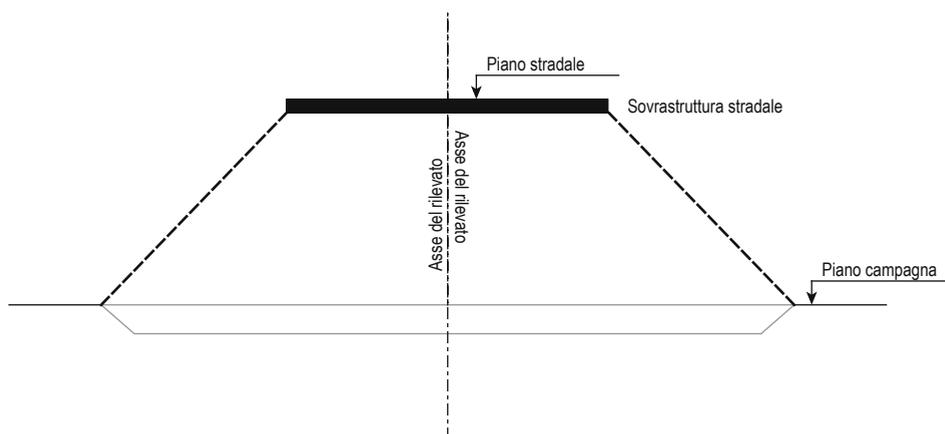


Figura 1.6. Posizione della sovrastruttura stradale

I veicoli trasmettono alle pavimentazioni azioni verticali, dovute al peso, e azioni orizzontali, cioè tangenti al piano viabile: queste ultime sono conseguenza del moto del veicolo, ovvero della frenatura, e determinano sollecitazioni tangenziali piuttosto intense negli strati più superficiali della pavimentazione, le quali tendono a smorzarsi via via che ci si approfondisce negli strati sottostanti. Va osservato che tali considerazioni hanno imposto determinati accorgimenti: nelle pavimentazioni flessibili, infatti, gli strati più superficiali si realizzano facendo uso di miscele e aggregati che conferiscano allo strato stesso un'elevata resistenza al taglio, mentre gli strati sottostanti vengono realizzati in modo tale da avere un'elevata resistenza alla flessione (figura 1.7). Il primo di questi ultimi strati, procedendo dal basso verso l'alto, è detto *strato di base*: ad esso è affidato il compito di ripartire sul terreno di appoggio della pavimentazione le azioni verticali trasmesse dai veicoli. Tale strato è realizzato con una miscela di materiali lapidei e legante bituminoso (eccezion fatta per strade di modestissima importanza).

Al di sotto dello strato di base, si dispone uno *strato di fondazione*, realizzato, di norma, con materiale granulare senza far uso di legante: ha la funzione fondamentale, oltre a quella di contribuire opportunamente alla ripartizione dei carichi trasmessi dai veicoli, di realizzare una superficie regolare su cui stendere lo strato di base. Quando la strada è percorsa da numerosi veicoli industriali, lo strato di base, unitamente agli strati superficiali, subisce deformazioni, oltre che elevate anche frequenti, le quali possono portare, dopo un certo tempo, alla fessurazione della pavimentazione per fenomeni di fatica. Allo scopo di prevenire tale problema, oggi si usa spesso interporre tra la base e la fondazione un ulteriore strato di *misto cementato* (costituito da una particolare miscela di materiale granulare e cemento): si realizza, in tal modo, uno strato molto rigido che diminuisce notevolmente la deformabilità della pavimentazione aumentandone, al contempo, la resistenza a fatica (e quindi la vita utile).

In alcuni casi è consuetudine fare, invece, ricorso a pavimentazioni rigide. Queste sono costituite da una lastra di calcestruzzo che, in virtù dell'eleva-

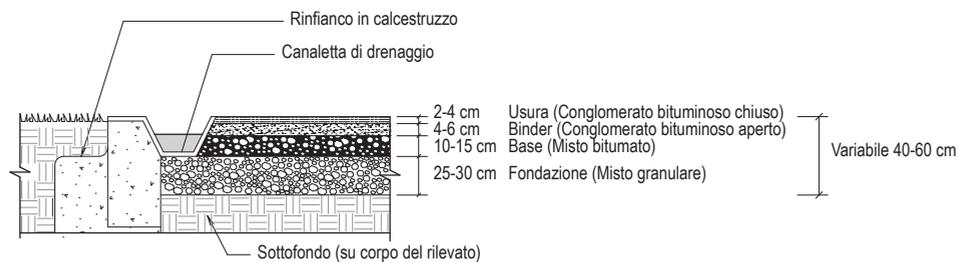


Figura 1.7. Sezione tipo di una moderna pavimentazione flessibile

ta resistenza al taglio e di una discreta resistenza flessionale, svolge simultaneamente le funzioni sia degli strati superficiali che dello strato di base delle pavimentazioni flessibili. Al di sotto di questo strato si usa disporre un ulteriore strato di fondazione in materiale lapideo non legato oppure in misto cementato. Lo strato di fondazione in entrambe le tipologie di pavimentazioni è collocato sul piano di sottofondo, il quale, a sua volta, è disposto al di sopra del corpo del rilevato.

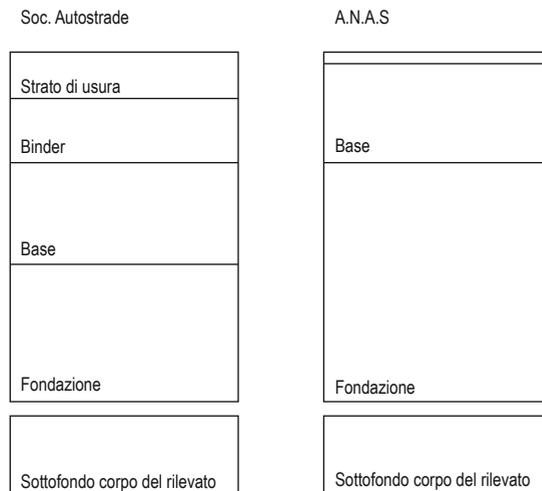


Figura 1.8. Tipologia schematica della sovrastruttura stradale nel caso di due enti importanti quali ANAS e Società Autostrade

1.3. Problematiche dei rilevati: stabilità e cedimenti

La risposta complessiva dei rilevati, come accade per le altre opere in terra, dipenderà dall'interazione tra il rilevato e i terreni di fondazione. D'altra parte, il carico che i rilevati trasmettono alla fondazione è, a volte, di alcune decine di tonnellate per metro quadrato e interessa superfici molto estese, per cui le sollecitazioni significative si propagano agli strati di terreno fino a notevoli profondità. Va detto anche che, in alcuni casi, il piano di posa presenta inclinazioni trasversali pronunciate che comportano rischi di scivolamento.

Se i terreni su cui si fonda il rilevato non pongono problemi né di portanza né di cedimenti (rocce compatte, terreni a grana grossa più o meno cementati, etc.), la risposta del rilevato dipenderà unicamente dalle sue caratteristiche meccaniche. Nel caso in cui i rilevati vengano costruiti su terreni di caratteristiche meccaniche scadenti, è necessario controllare che non si verifichino fenomeni di instabilità e valutare i cedimenti, istantanei e/o differiti nel tempo, che si potrebbero manifestare per effetto della compressione dei terreni in fondazione e di quelli che costituiscono il rilevato.

L'instabilità di un tratto più o meno lungo di rilevato può verificarsi a causa delle scadenti proprietà meccaniche del terreno di appoggio: in tale ottica, si definisce *carico limite* quel carico che, applicato a un'opera di fondazione, produce la rottura del complesso terreno-opera di fondazione. Tale collasso per raggiungimento del carico limite, denominato *rottura generale* (figura

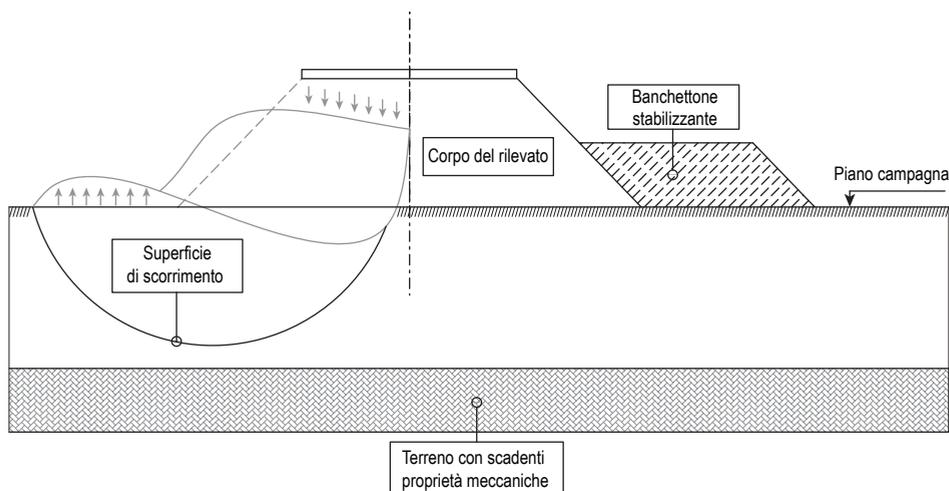


Figura 1.9. Rottura di un rilevato per instabilità del piano di posa

1.9), è caratterizzato dalla formazione di una superficie di scorrimento lungo la quale viene vinta, per effetto del peso del rilevato, la resistenza a taglio del terreno di appoggio: il valore del carico limite risulta chiaramente individuato come punto di massimo della curva carichi-cedimenti.

Il controllo della stabilità va fatto con i classici metodi dell'ingegneria geotecnica (Bishop, Fellenius, Janbu, Bell) e il valore del coefficiente di sicurezza, riferito alla stabilità del sistema manufatto-terreno di fondazione, dovrà avere un valore prefissato dal progettista geotecnico (è opportuno che tale valore sia almeno pari a 1,3). Si evidenzia che fenomeni di rottura per instabilità del piano di posa sono più probabili nelle argille sature non consolidate durante, o subito dopo, la costruzione del rilevato a causa delle sovrappressioni neutre che possono dissiparsi anche in tempi piuttosto lunghi (uno o più anni). Quando le verifiche evidenziano come realistico un pericolo di scorrimento, i provvedimenti più comuni sono (a parte quello non sempre attuabile di ridurre l'altezza del rilevato) un notevole addolcimento delle scarpate o, in alternativa, la costruzione di *banchettoni* ai lati del rilevato, i quali fungono da contrappeso andando a incrementare l'azione passiva delle forze resistenti.

L'altro problema che si pone è quello dei cedimenti: essi sono dovuti all'addensamento che il rilevato subisce, a costruzione ultimata, per effetto delle vibrazioni provocate dai veicoli che transitano sulla strada, del peso proprio del rilevato stesso e degli abbassamenti che, per cause diverse, subisce il terreno su cui il rilevato poggia. La variazione di densità del corpo del rilevato che si manifesta dopo il completamento della costruzione del manufatto stradale e

che, oltre determinati limiti di tolleranza, provoca la rottura della sovrastruttura è generalmente dovuta ad almeno uno tra i seguenti fattori:

- compattamento difettoso;
- non idonea qualità dei materiali impiegati (ad esempio, quando si utilizzano per il corpo del rilevato materiali non insensibili all'acqua e contemporaneamente non si protegge adeguatamente il rilevato dall'evento meteorico).

Va altresì sottolineato che i cedimenti possono, però, verificarsi nel terreno su cui poggia il rilevato per effetto del fenomeno della consolidazione: questi possono essere di pochi centimetri o di qualche metro ed esaurirsi nell'arco di qualche mese o di molti anni, ciò in funzione delle caratteristiche e dello spessore dello strato che si consolida, nonché dell'altezza del rilevato e delle tecniche costruttive.

Tali cedimenti, generalmente non uniformi (differenziali), non sono più tollerabili a partire dal momento in cui si termina la costruzione della sovrastruttura; in casi del genere risulta, pertanto, necessario:

- valutare con accuratezza le caratteristiche del terreno e procedere a una valutazione dei cedimenti previsti;
- decidere, caso per caso, se sia più conveniente accettare i cedimenti previsti, accelerandone il più possibile il decorso nel tempo, oppure cercare di limitarne l'entità.

Per raggiungere questi scopi esistono svariate tecniche costruttive; le più impiegate sono:

- *aumento del sovraccarico*: consiste nel costruire un rilevato di altezza maggiore (dal 10% al 20% in più dell'altezza iniziale) di quella finale: quando i cedimenti così ottenuti uguagliano quelli stimati per il rilevato effettivo, si elimina la parte eccedente. Tra i vari metodi che accelerano la consolidazione questo è il meno costoso e il più semplice, ma certo non il più rapido;
- *sistemi drenanti*: consistono nel realizzare una serie di dreni verticali o orizzontali, che riducono i percorsi che l'acqua interstiziale deve compiere per essere smaltita verso l'esterno, diminuendo così notevolmente i tempi di consolidazione. I dreni verticali, molto più diffusi di quelli orizzontali, sono essenzialmente dei pali di sabbia di medio o grande diametro.

Si può, tuttavia, pensare, in presenza di terreni molto compressibili, di limitare i cedimenti costruendo i rilevati con materiali leggeri; le proprietà che tali materiali dovrebbero possedere sono:

- basso peso specifico;
- buone resistenze meccaniche;

- possibilità di essere ben compattati (ad esempio: argille espanse, calcestruzzi cellulari a ridotta densità, polistirene espanso, etc.).

Nelle zone paludose o anticamente lagunari o lacustri si rinvergono depositi di argille e limi con forti percentuali di torbe o detriti organici ed elevati contenuti in acqua: essi hanno densità molto basse, caratteristiche meccaniche scadenti e capacità pressoché nulla di sopportare carichi anche modesti. Qualora non fosse possibile deviare il tracciato planimetrico della strada al fine di evitare siffatti terreni, dovranno essere adottati accorgimenti particolari e spesso molto costosi, per costruire rilevati anche di modeste dimensioni (ad esempio, il miglioramento meccanico di tali terreni mediante tecniche di consolidamento).

Nei capitoli che seguono verranno esposti esclusivamente gli aspetti legati alla realizzazione dei rilevati stradali e non quelli connessi al miglioramento della risposta dei terreni di fondazione.