Politecnica s.r.l

Parte "D" – Stabilità e sollecitazioni delle strutture ed Opere Civili

Programma:

– Fondamenti di scienza e tecnica delle costruzioni (4h)

– Linee in trincea, in rilevato, in galleria (2h)

– Gallerie, analisi del rischio e sistemi di protezione (2h)

Durata: 8 ore

Modalità di erogazione: FAD sincrona

Ing. Elena Di Mare, Ph.D

Aprile 2026

INDICE

1. **Introduzione**
2. **Linee in trincea e in rilevato**
3. **Gallerie**
4. **Analisi di rischio**
5. **Sistemi di protezione**

Obiettivi: disamina delle opere caratterizzanti la sede stradale/ferroviaria e delle opere di protezione della stessa, al fine di potere avere un quadro generale sui potenziali rischi collegati alle strutture e sugli strumenti ad oggi adoperati per la valutazione degli stessi.

SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO A GUIDA VINCOLATA (TGV)

1

• **Decreto 28 dicembre 2023**, REGISTRO UFFICIALE Int.0081906 e **Allegati**: Disciplina dei requisiti per il rilascio dell'autorizzazione di sicurezza relativa ai sistemi di trasporto pubblico a guida vincolata, ai sensi dell'articolo 6, comma 1, lettera b), del decreto-legge 10 settembre 2021, n. 121, convertito con modificazioni in legge 9 novembre 2021, n. 156.

Articolo 2
(Definizioni)

1. Ai fini dell'applicazione del presente decreto si intende per:

a. **«Sistemi di trasporto pubblico a guida vincolata (TGV)»**: sistema di trasporto pubblico guidato da almeno una rotaia o vincolato ad una linea di alimentazione elettrica, destinato all'esercizio di trasporti locali, servizi passeggeri urbani ed extraurbani, con veicoli semoventi e operanti sia segregati che non dal traffico stradale e pedonale. Tali sistemi comprendono:
   - le metropolitane e le metropolitane leggere, con e senza conducente, come definite dalla UNI 8379, e i sistemi assimilabili;
   - le tranvie e le tranvie veloci (metro-tranvie), come definite dalla UNI 8379, e i sistemi assimilabili;
   - i sistemi filoviari.

SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO A GUIDA VINCOLATA (TGV)

1

• **UNI 8379:** Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia). **Termini e definizioni.**

2.2 **metropolitana**: Sistema di trasporto rapido di massa, di elevata portata e frequenza nell'ambito delle conurbazioni, costituito da veicoli automotori o rimorchiati dai medesimi, a guida vincolata, con circolazione regolata da segnali e completamente autonoma da qualsiasi altro tipo di traffico.

2.3 **metropolitana leggera**: Sistema di trasporto rapido di massa che mantiene le caratteristiche della metropolitana di cui al precedente punto 2.2 ad eccezione della portata oraria, che risulta ridotta a causa della limitata capacità dei convogli per ridotte dimensioni dei veicoli e/o per ridotta composizione.

2.4 **tranvia**: Sistema di trasporto per persone negli agglomerati urbani costituito da veicoli automotori o rimorchiati dai medesimi, a guida vincolata, in genere su strade ordinarie e quindi soggetto al Codice della Strada, con circolazione a vista.

2.5 **tranvia veloce** (metrotranvia): Sistema di trasporto che mantiene le caratteristiche della tranvia di cui al precedente punto 2.4, con possibili realizzazioni anche in tratte suburbane, ma che consente velocità commerciali e portate superiori grazie ad adeguati provvedimenti (per esempio delimitazioni laterali della sede, riduzione del numero di attraversamenti, semaforizzazione degli attraversamenti con priorità per il sistema, ecc.), atti a ridurre le interferenze del sistema con il restante traffico veicolare e pedonale. Essendo questo sistema la soluzione tecnologicamente evoluta del precedente, possono esistere sistemi misti (tranvia-tranvia veloce) composti da tratte di linea funzionalmente concepite con riferimento ai due sistemi. Le tratte di linea afferenti alle diverse tipologie di sistema mantengono le caratteristiche rispettivamente previste e di conseguenza il sistema di trasporto sarà costituito in parte da tranvia ed in parte da tranvia veloce.

SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO A GUIDA VINCOLATA (TGV)

1

• **UNI 8379:** Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia). APPENDICE A. Classificazione dei vari sistemi di trasporto in funzione di alcune caratteristiche fondamentali. **Caratteristiche della sede e degli attraversamenti**.

prospetto A.I **Caratteristiche della sede e degli attraversamenti**

	Sede (A.1)						Attraversamento (A.2)							
	Promiscua (A.1.1)			Propria (A.1.2)			Libero (A.2.1)	Segnalato (A.2.2)			Protetto (A.2.3)			
	Libera (A.1.1.1)	Riservata (A.1.1.2)	Protetta (A.1.1.3)	Riservata (A.1.2.1)	Protetta (A.1.2.2)	Isolata (A.1.2.3)	a	a	b	c	a	b	c	d
Ferrovia	NO	NO	NO	SI	SI	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	SI	SI
Metropolitana	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Metro leggera	NO	NO	NO	NO	NO	SI	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO	NO
Tranvia veloce	NO	NO	SI	SI	SI	SI	NO	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI
Tranvia	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI	SI

SISTEMA DI TRASPORTO PUBBLICO A GUIDA VINCOLATA (TGV)

1

• **UNI 8379:** Sistemi di trasporto a guida vincolata (ferrovia, metropolitana, metropolitana leggera, tranvia veloce e tranvia). APPENDICE A. Classificazione dei vari sistemi di trasporto in funzione di alcune caratteristiche fondamentali. **Caratteristiche della sede e degli attraversamenti**.

Esempi di tipologia della sede:

a) a livello del suolo delimitata da barriere adeguatamente robuste per neutralizzare l'urto di altri veicoli e di altezza tale da costituire serio ostacolo per i pedoni trasgressori;

b) in trincea coperta;

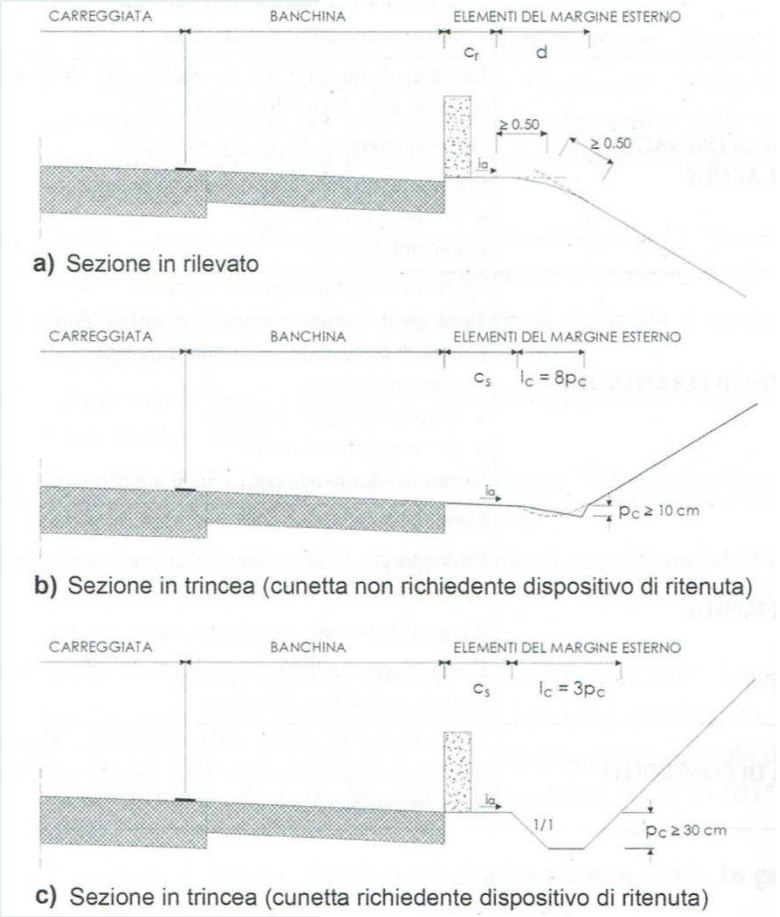
c) in rilevato non accessibile;

d) in viadotto isolato;

e) in galleria.

LE OPERE D'ARTE DEL CORPO STRADALE

Il corpo stradale è l'insieme di **opere in terra** che predispongono la **sede stradale** (rilevati e trincee) di *supporto alla sovrastruttura,* **opere d'arte minori** (muri, tombini, canalette idrauliche), le **opere di protezione e di confine**.



Tipologie di sezioni trasversali:

- Sezione in rilevato: sezione in cui le quote stradali sono tutte superiori a quelle del piano di campagna;
- Sezione in trincea: sezione in cui le quote stradali sono tutte inferiori a quelle del piano di campagna.

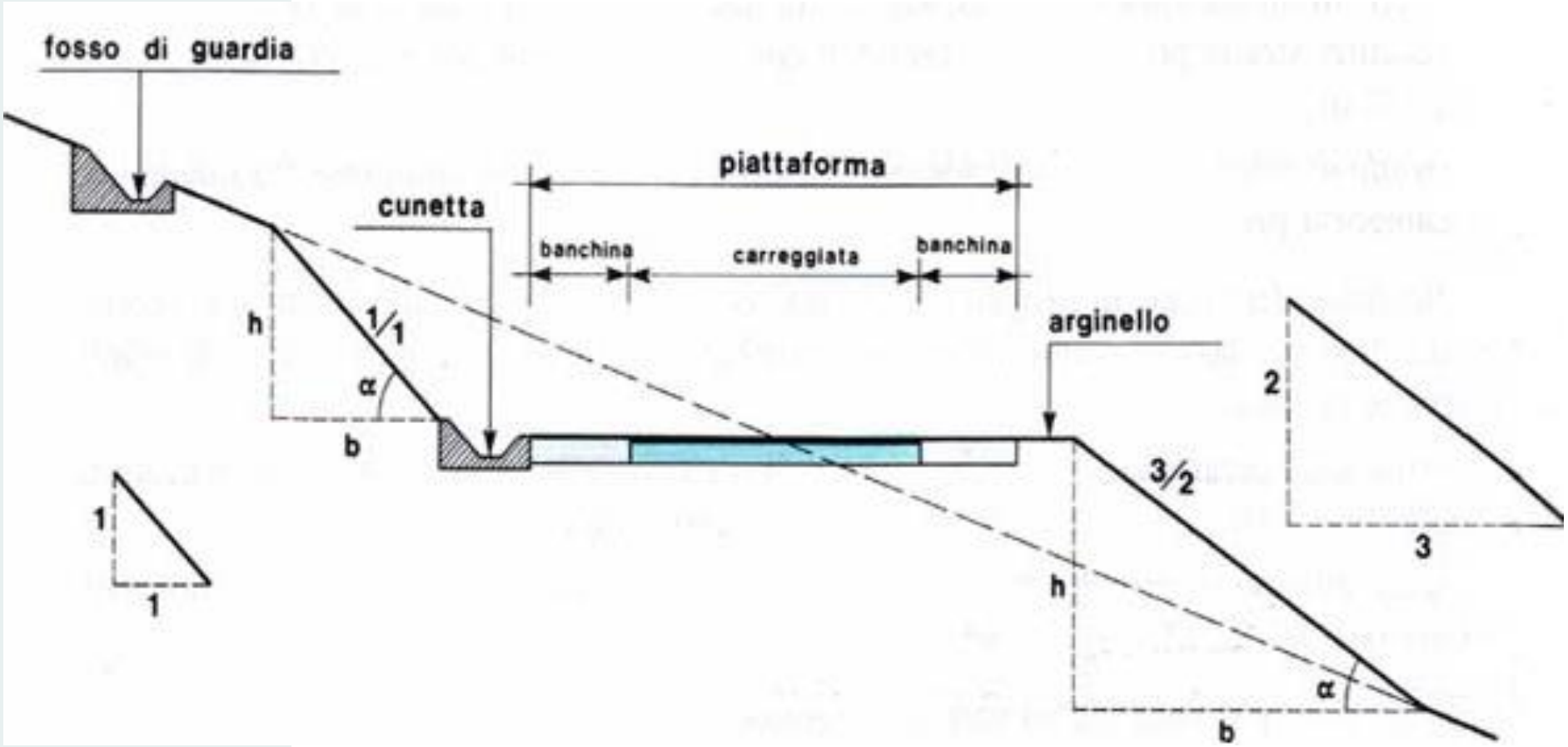
Tab. 7.1 - Dimensioni degli elementi marginali esterni secondo la Normativa italiana [7.1]

ELEMENTO (SIMBOLO)	DENOMINAZIONE	TIPOLOGIA STRADALE	DIMENSIONE
c_r	Ciglio o arginello in rilevato	A, B, C, D	≥ 0,75 m
		E, F	≥ 0,50 m
d	Raccordo	Ove previsto	1,00 m
c_s	Ciglio in scavo	Ove previsto	come c_r
i_a	Pendenza trasversale dei cigli	Tutte	4%
l_c	Larghezza della cunetta	Tutte	≥ 0,80 m
p_c	Profondità della cunetta	Tutte	Cfr. Figura 7.1

Canale, Distefano, Leonardi 2009

LE OPERE D'ARTE DEL CORPO STRADALE

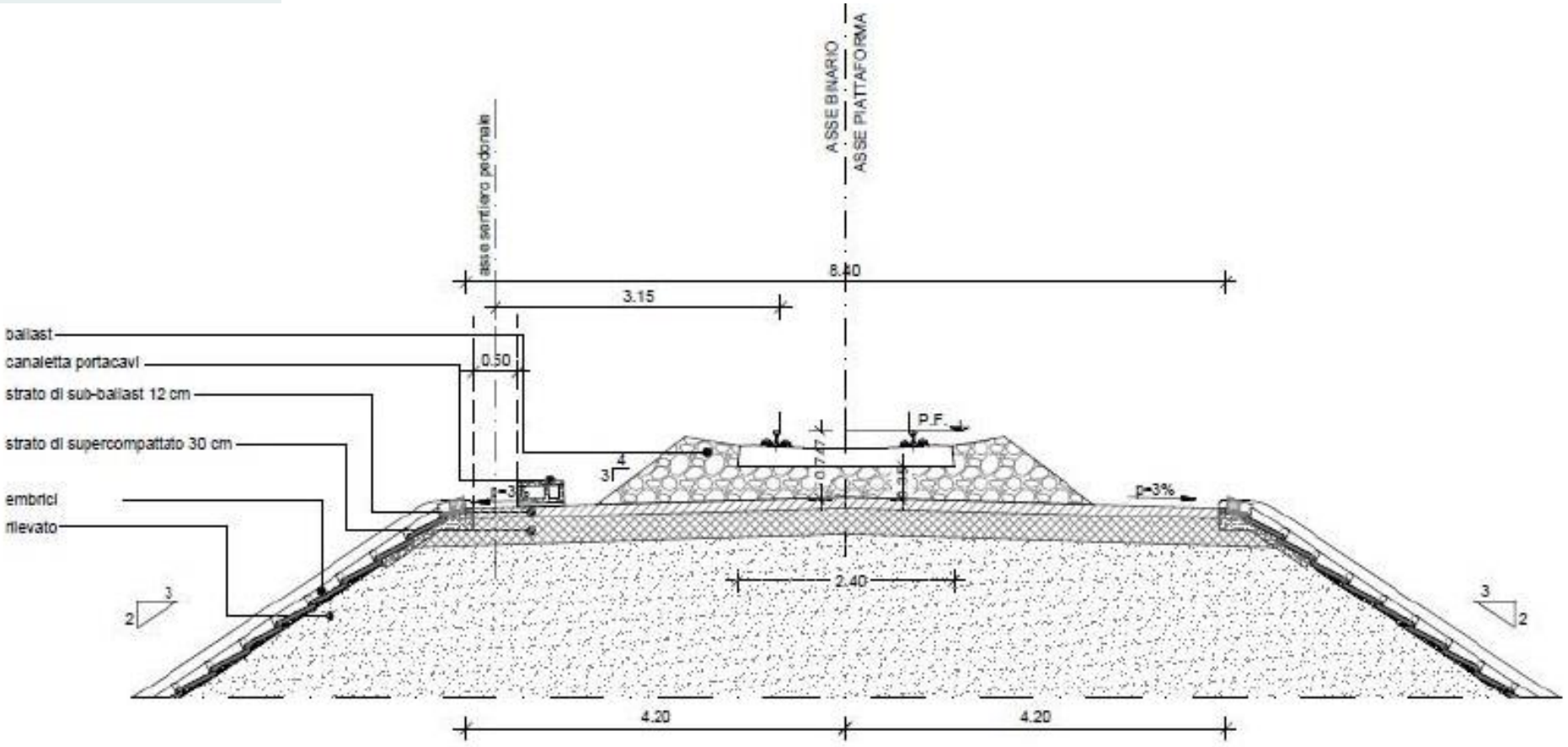
2



OPERE IN TERRA: RILEVATO

2

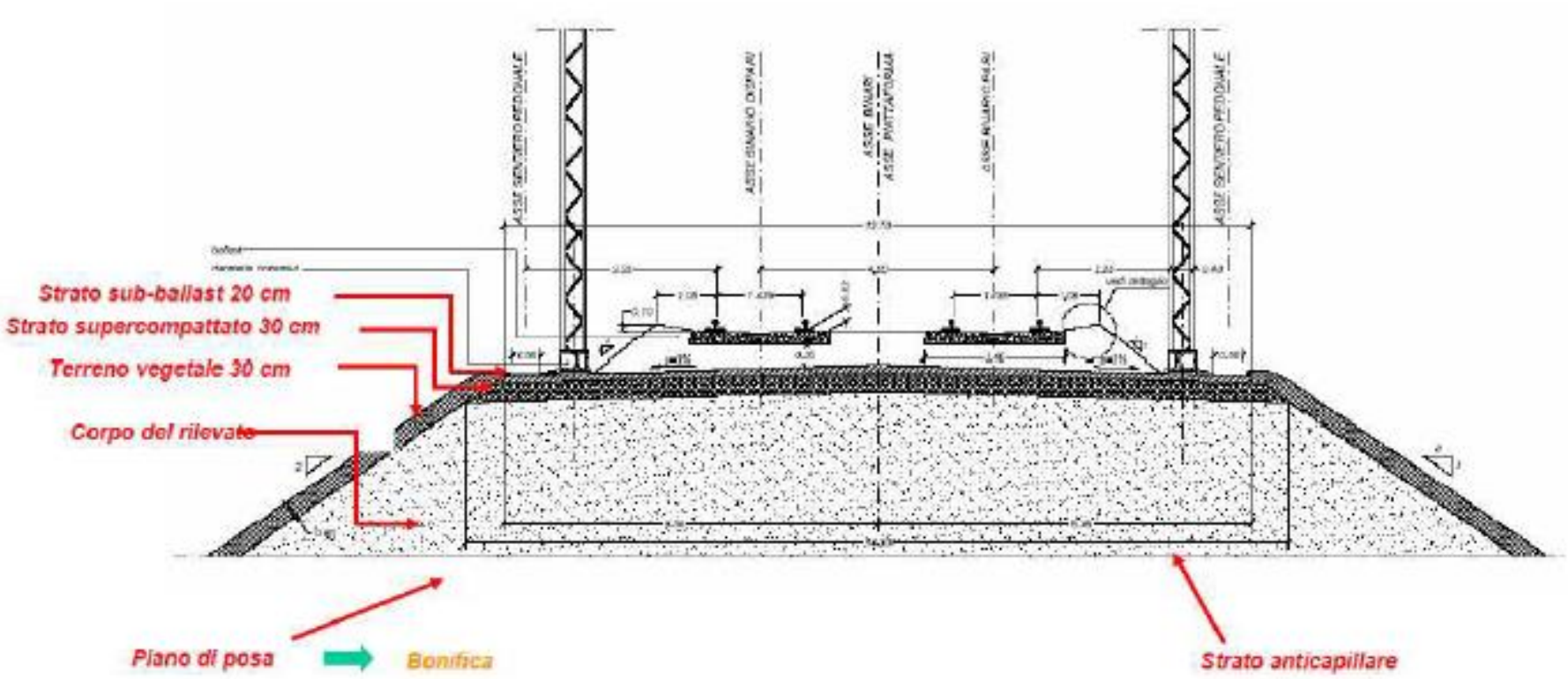
Esempio di rilevato per semplice binario rettifilo



OPERE IN TERRA: RILEVATO (2)

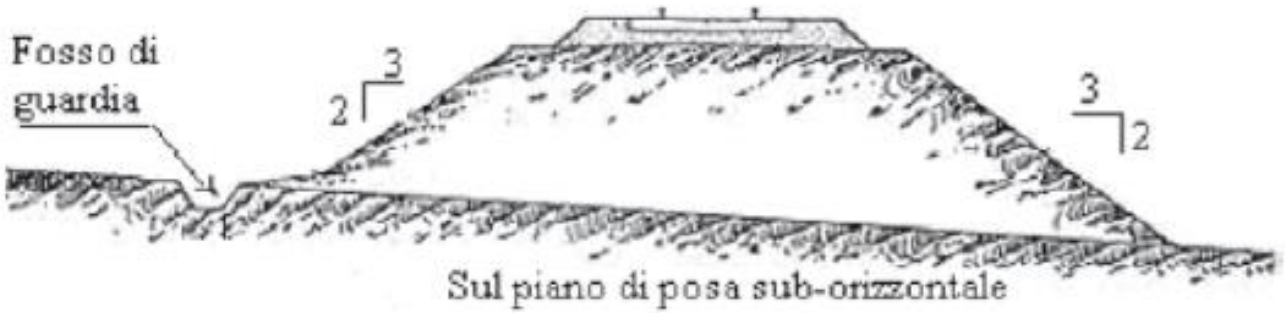
2

Esempio di rilevato per doppio binario



OPERE IN TERRA: RILEVATO (3)

Costruzione del corpo stradale



Sul piano di posa sub-orizzontale

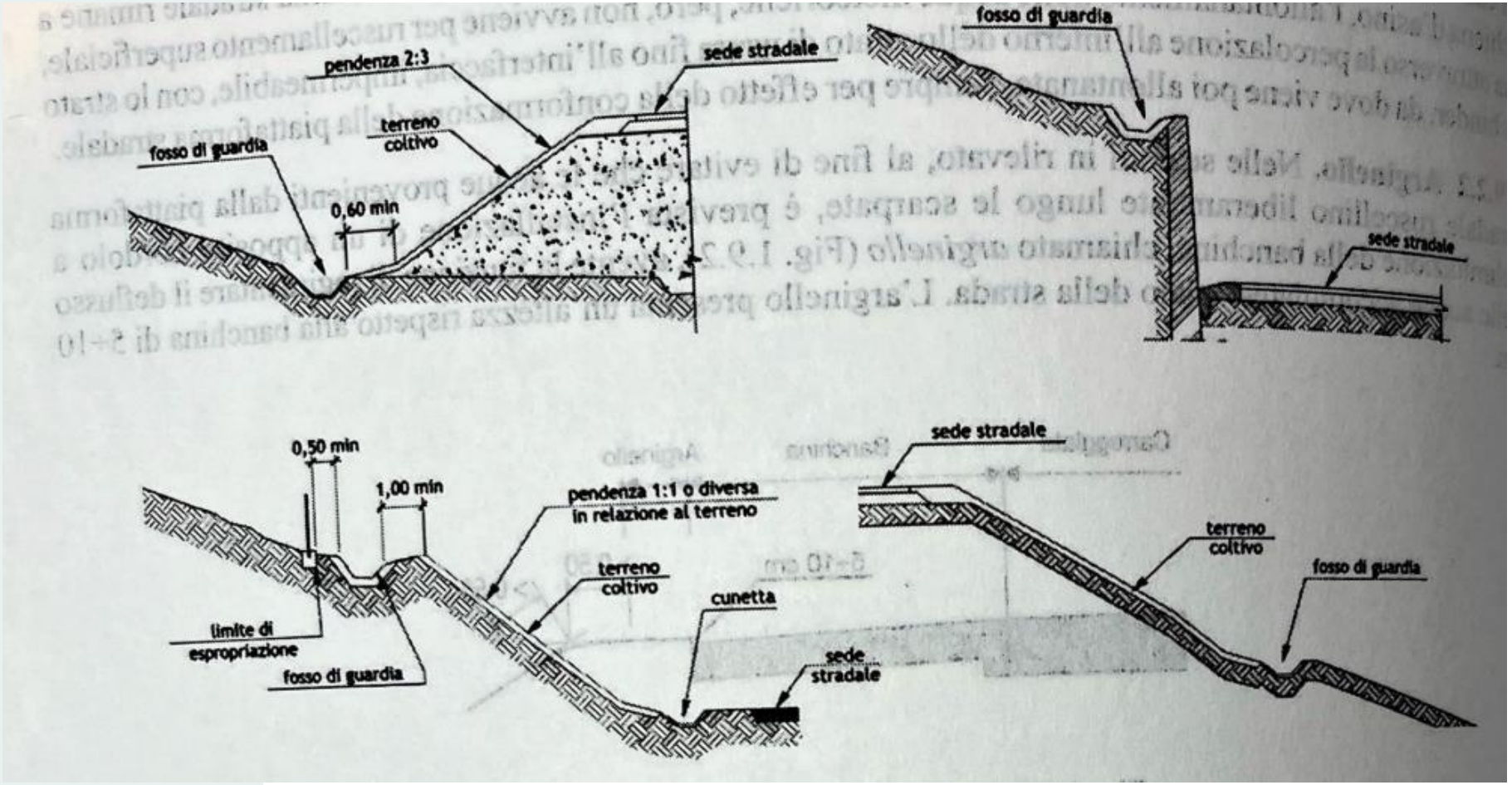


Preparazione del piano di posa a gradoni

Sul piano di posa con pendenza maggiore del 15%

OPERE IN TERRA: RILEVATO (3)

2



Servetto 2006

OPERE IN TERRA: RILEVATO (4)

2

I rilevati, normalmente previsti **con pendenza delle scarpate 2 su 3**, devono essere eseguiti tenendo conto delle seguenti modalità costruttive:

- le **terre impiegate** devono essere stese a strati di spessore adeguato ai mezzi di costipamento utilizzati;
- su ciascuna sezione trasversale, i **materiali impiegati per ciascuno strato** devono essere uguali o della stessa classe di appartenenza;
- la superficie superiore degli **strati** deve avere la **pendenza trasversale 3,5%** e deve essere evitata la formazione di avvallamenti o solchi;
- le **terre devono essere inumidite** o essiccate mediante aerazione;
- nel caso di rilevati di altezza superiore a 5-6 m devono essere eseguite **banchine** opportunamente dimensionate in larghezza (in genere 2 m);
- sulle scarpate dei rilevati deve essere posato uno strato di **terreno vegetale** umifero dello spessore di 20-30 cm, da stendere a cordoli orizzontali opportunamente costipati;
- eventuali provvedimenti di **bonifica o di acceleramento del consolidamento del terreno di posa**.

Tesoriere: Strade, Ferrovie, Aeroporti - Vol. I – Il progetto e le opere d'arte – UTET
Tesoriere G., Giunta M., Russello M. 2001

OPERE IN TERRA: RILEVATO (5)

2

La realizzazione del rilevato ferroviario prevede la formazione di un ultimo **strato supercompattato** di terreno granulare di elevata portanza, fortemente addensato, avente un fuso granulometrico stabilito, così da sopportare agevolmente i carichi trasmessi dall'esercizio e, allo stesso tempo, formare un piano granulometricamente "chiuso" in modo da permettere un facile deflusso delle acque d'infiltrazione.

Tra il ballast (la massicciata) e lo strato supercompattato (la piattaforma del rilevato) si prevede un ulteriore strato, detto «**subballast**» con la funzione di:

- ripartire gradualmente i carichi;
- proteggere il corpo del rilevato dalle acque meteoriche di infiltrazione e dalle azioni prodotte dal gelo/disgelo;
- eliminare gli effetti di "rottura" del rilevato, provocati dall'azione penetrante degli elementi litoidi della massicciata ferroviaria;
- eliminare l'inquinamento della massicciata per risalita del materiale più sottile.

Il subballast può essere realizzato in misto cementato (20 cm) o conglomerato bituminoso (12 cm).

Tesoriere: Strade, Ferrovie, Aeroporti - Vol. I – Il progetto e le opere d'arte – UTET

Tesoriere G., Giunta M., Russello M. 2001

OPERE IN TERRA: TRINCEA

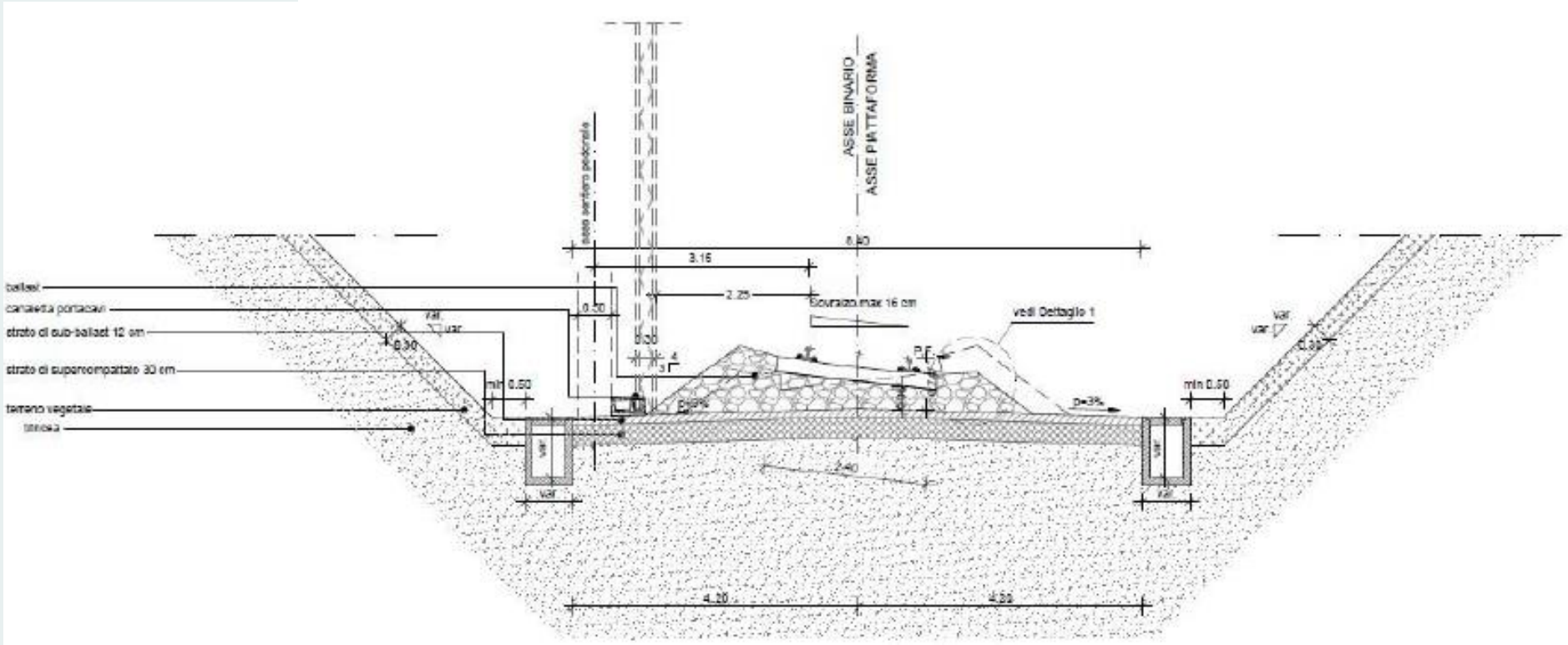
2

Le trincee vengono scavate per realizzare la linea sotto al piano campagna. Il raccordo con il naturale profilo del terreno avviene tramite le scarpate la cui pendenza dipende dalle caratteristiche fisico-meccaniche del terreno.
Per diminuire la sezione di scavo, spesso si prevede l'esecuzione di **muri di controripa**.
Per assicurare il drenaggio delle acque di pioggia, si prevede un **fosso di guardia** in corrispondenza del ciglio di monte della scarpata e due cunette laterali ai lati della piattaforma.
Anche per le trincee, la zona portante la sovrastruttura è rappresentata dallo strato **supercompattato** e dal **subballast**.
Questi strati hanno le stesse caratteristiche di quelli impiegati nei rilevati.
Lo strato fortemente compattato è posto direttamente sugli strati di fondazione della trincea, a loro volta posti sui terreni del sito eventualmente stabilizzati con trattamenti specifici.

Tesoriere: Strade, Ferrovie, Aeroporti - Vol. I – Il progetto e le opere d'arte – UTET
Tesoriere G., Giunta M., Russello M. 2001

OPERE IN TERRA: TRINCEA (2)

2



OPERE D'ARTE MINORI

2

Si intendono principalmente **opere di contenimento del terreno** e **ponticelli e tombini** (con luce inferiore a 5-6 metri).

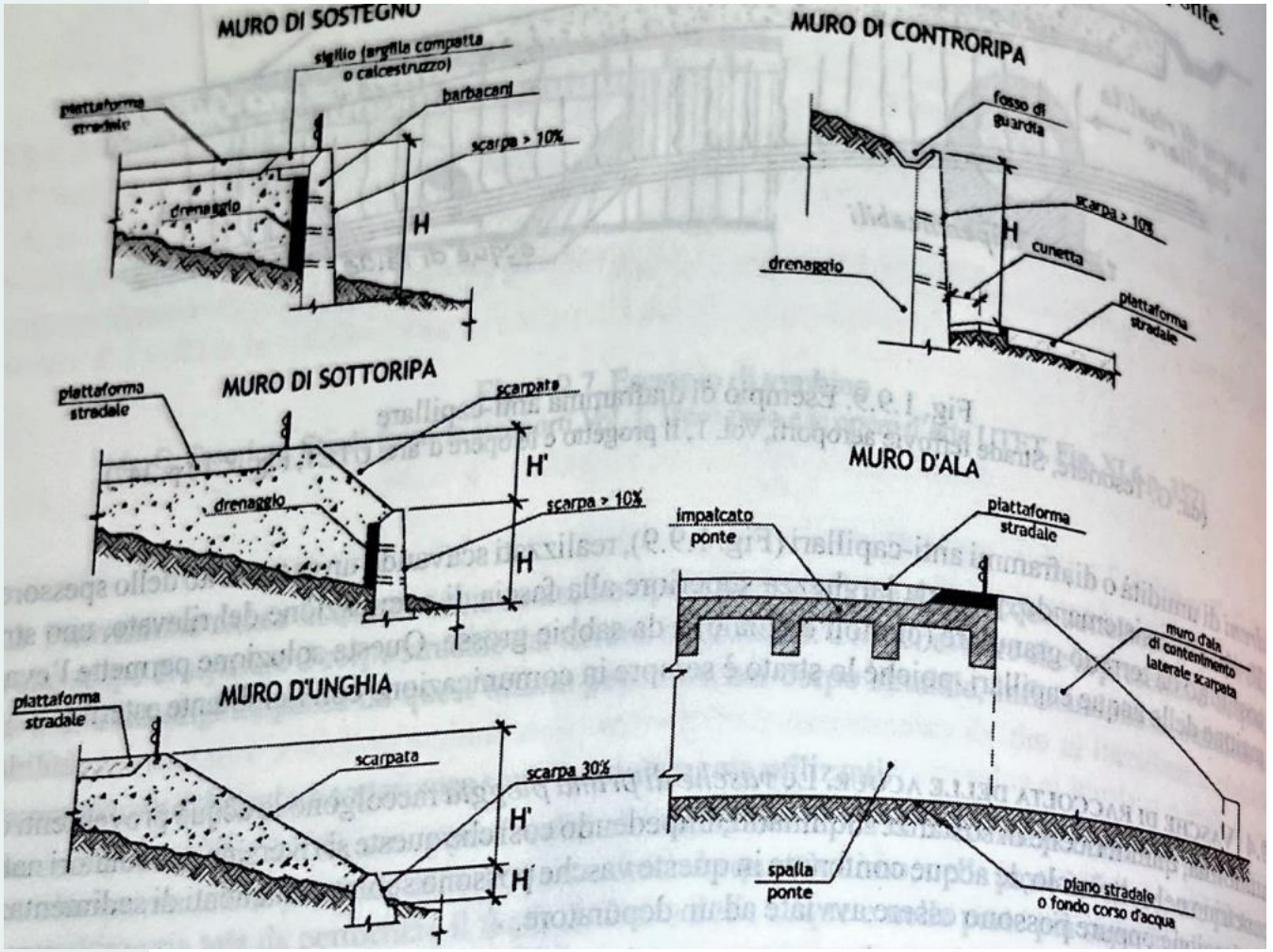
Nelle situazioni in cui la realizzazione di una scarpata di sterro o riporto comporti la movimentazione di elevati volumi di terra o un ingombro planimetrico considerevole, la piattaforma stradale ed il terreno possono essere raccordati attraverso opere di contenimento che sostituiscono in tutto o in parte la scarpata stessa.

A seconda della posizione nella quale le opere di contenimento sono realizzate, si ha la seguente distinzione:

- muri di sostegno, utilizzati nelle sezioni in rilevato, sostituiscono la scarpata di valle sostenendo il terrapieno;
- muri di sottoscarpa, utilizzati nelle sezioni in rilevato, sostituiscono la parte finale di una scarpata di valle;
- muri d'unghia, utilizzati nelle sezioni in rilevato, vengono realizzati al piede della scarpata per consentire una maggiore stabilità e pertanto hanno dimensioni inferiore rispetto al caso precedente;
- muri di controripa, adottati nelle sezioni in scavo (trincee o a mezzacosta) per sostenere il terreno a monte della piattaforma stradale;
- muri d'ala, sono opere di sostegno del terrapieno realizzate lateralmente alle spalle di un ponte.

OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO

2

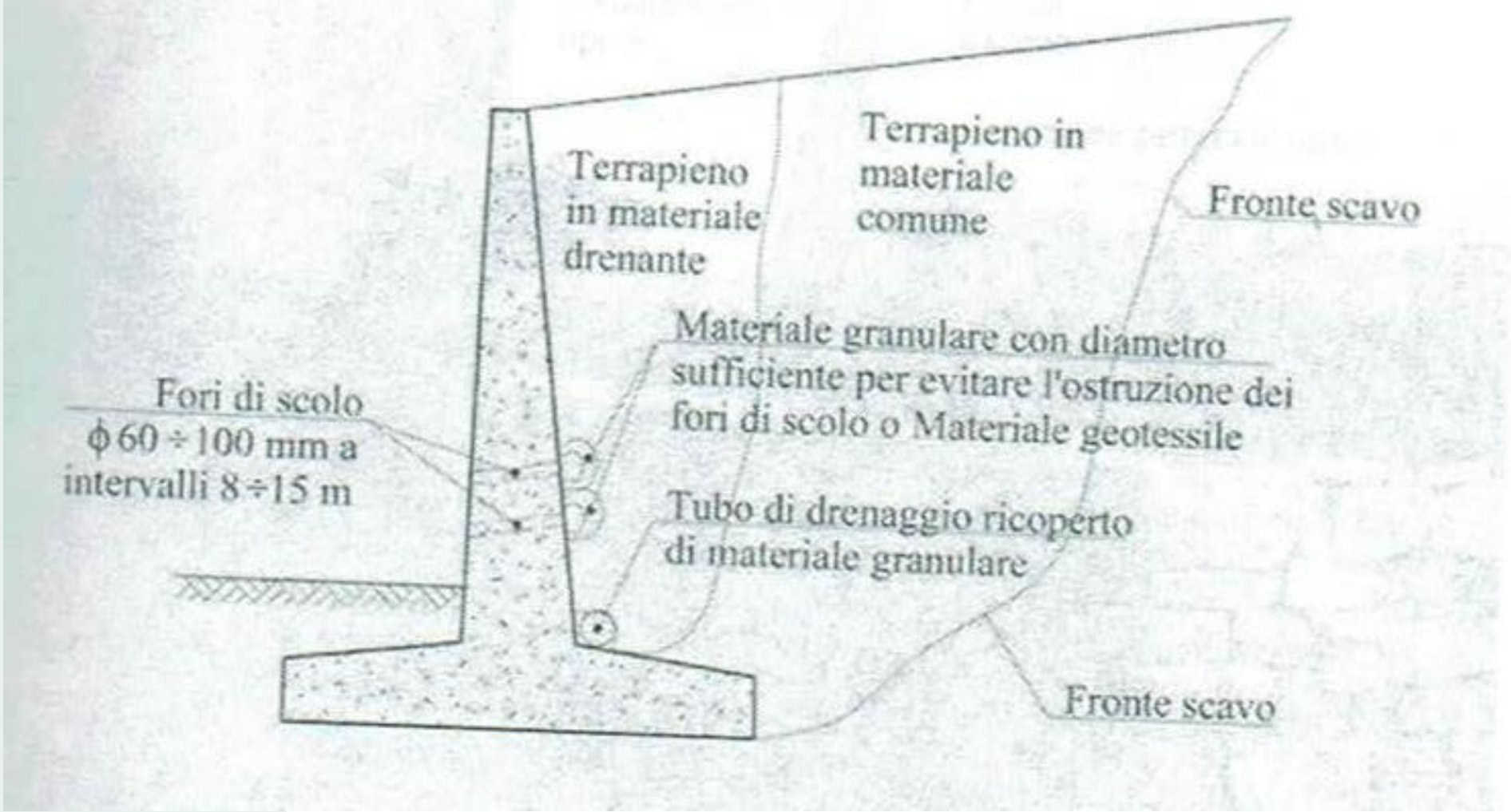


Servetto 2006

OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (2)

2

Sistema di drenaggio

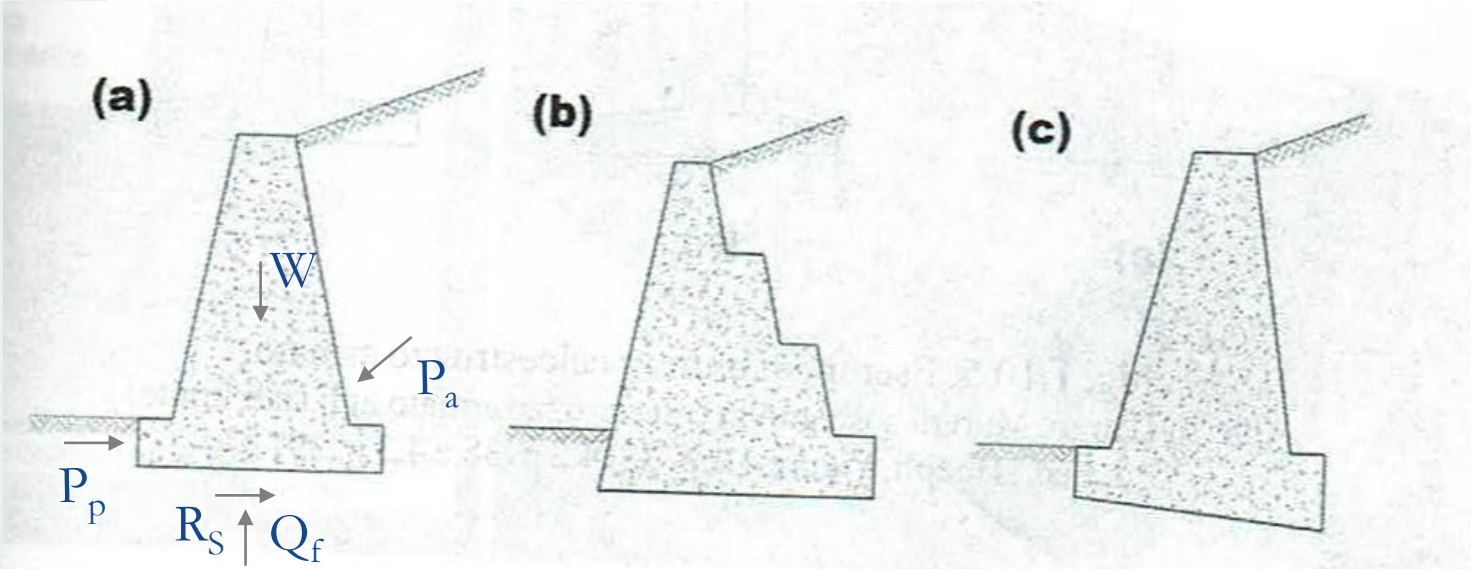


Longo 2013

OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (3)

A seconda della tecnica realizzativa adottata, si ha la seguente distinzione:

- muri a gravità, costituiti da una struttura monolitica in cls o in muratura di mattoni o pietrame, la cui stabilità è garantita dal peso proprio della struttura; si tratta di opere poco costose e utilizzate per altezze limitate (max 4 - 5 m), che possono dar vita a instabilità nel caso di sisma; per aumentare la stabilità dell'opera stessa si tende a realizzare le pareti (interna e/o esterna) con gradonature o inclinare la base della fondazione verso l'interno del muro stesso;



Esempi di muri a gravità *Longo 2013*

OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (4)

2

- muri a secco (dry-joint), sono realizzati accostando pietre di cava con superficie esterna avente scabrezza tale da garantire il reciproco ammorsamento, l'assenza di legante tra una pietra e l'altra consente a queste opere una elevata capacità drenante.
Costi di realizzazione elevati (personale specializzato).

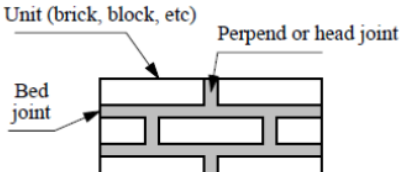


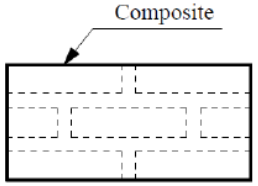
FEM

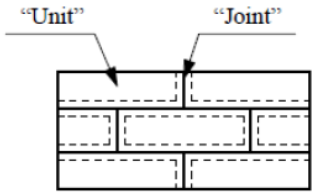
⬇

DEM





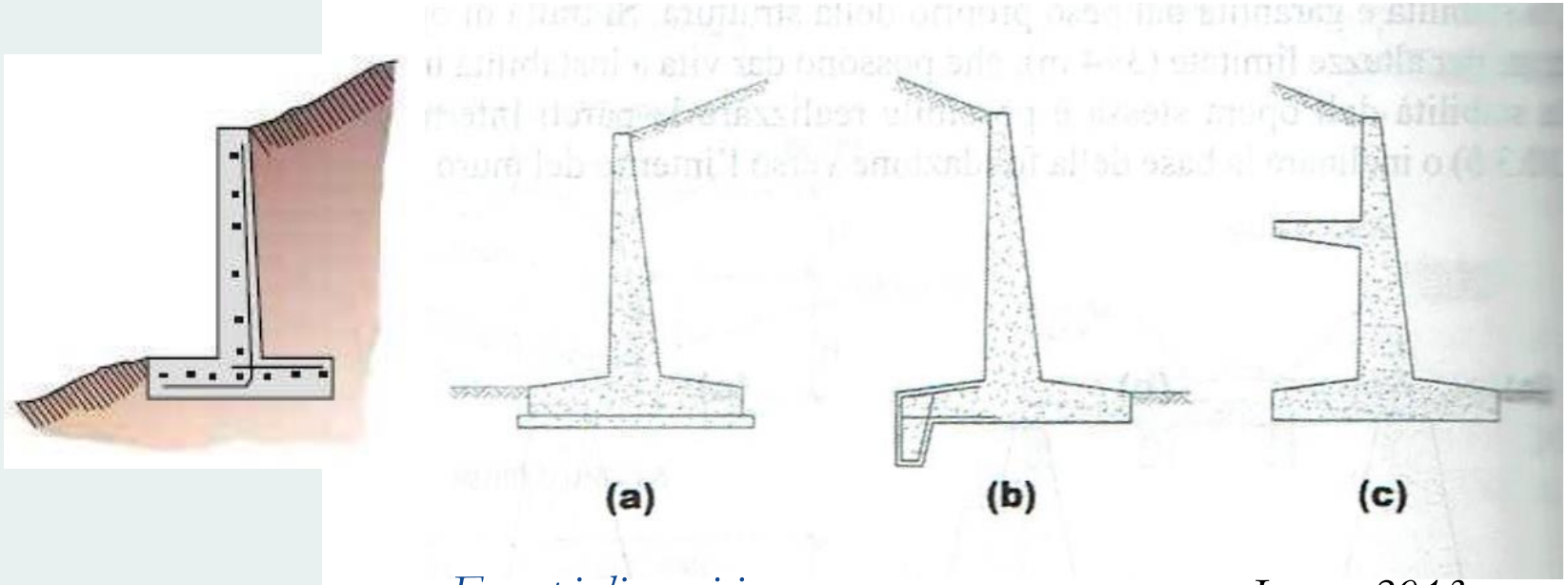




Lourenço 1996

OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (5)

- muri in calcestruzzo armato, sono costituiti da un paramento verticale ancorato alla suola (fondazione) in calcestruzzo. L'ancoraggio deve garantire la continuità strutturale tra gli elementi. La stabilità dell'opera deriva in larga parte dal peso del terreno che grava sulla parte di suola a monte; per migliorare la stabilità è possibile realizzare un dente di fondazione e/o disporre una mensola lungo la parete interna. **Tale tipologia di muro trova ampia applicazione nelle opere stradali o ferroviarie** per altezze fino a 6-8 m, per altezze superiori si ricorre generalmente a **muri con contrafforti o tiranti**.



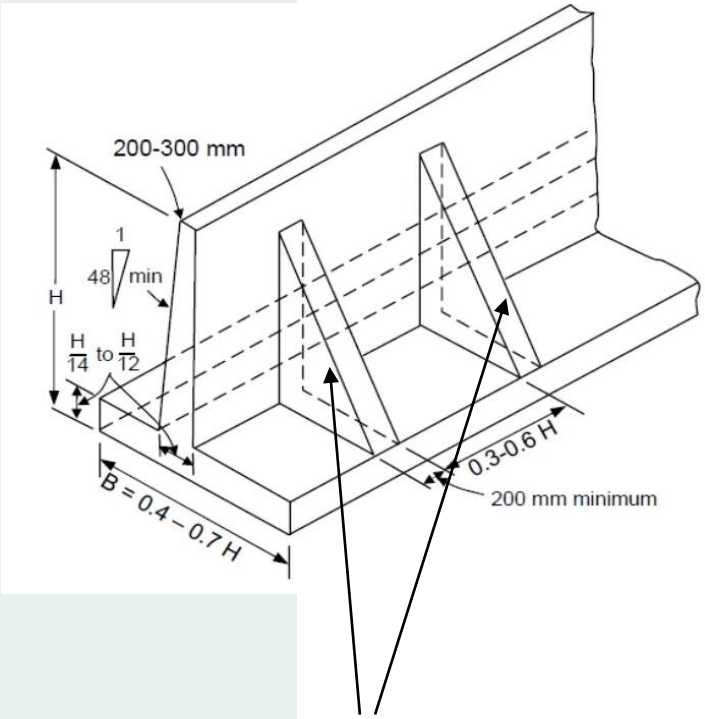
Esempi di muri in ca

Longo 2013

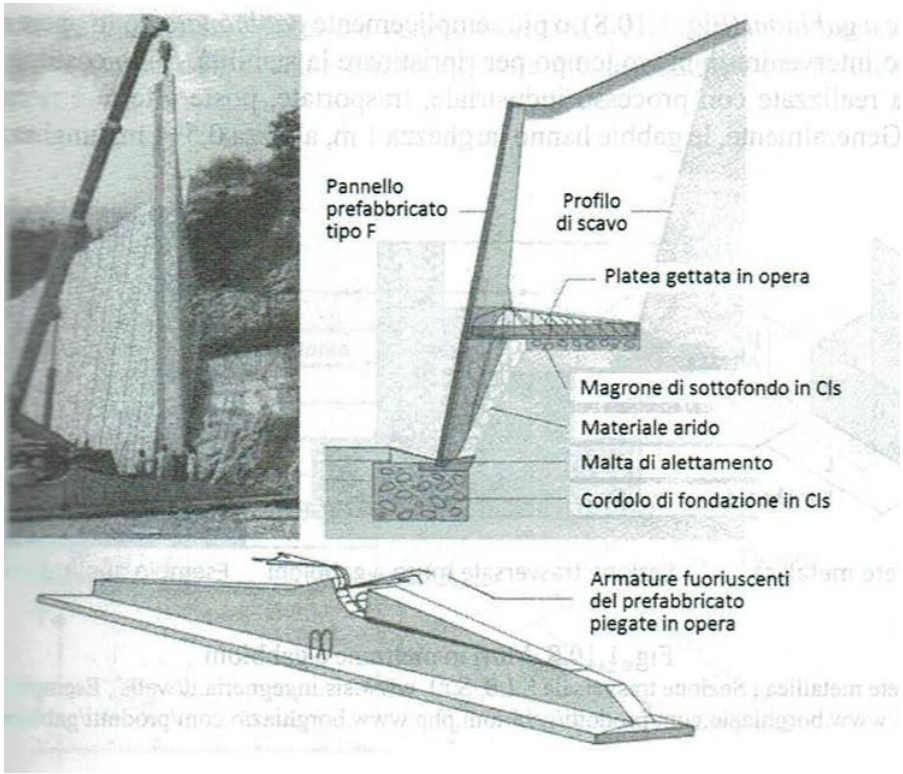
OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (6)

2

- muri a contrafforti, muri a mensola provvisti di setti verticali disposti ortogonalmente alla parete verticale con la funzione di irrigidire la struttura stessa;
- muri prefabbricati,



Contrafforti



Servetto 2006

OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (7)

- **muri a elementi o muri cellulari a gabbia**, sono costituiti da un'intelaiatura di elementi prefabbricati in legno, cls o acciaio, ottenuta sovrapponendo gli elementi modulari e riempiendo con terreno le gabbie (muri verdi); lo schema statico è il medesimo dei muri a gravità ma presentano il vantaggio di avere una rapida posa in opera e una maggiore deformabilità;



Esempi di muri verdi

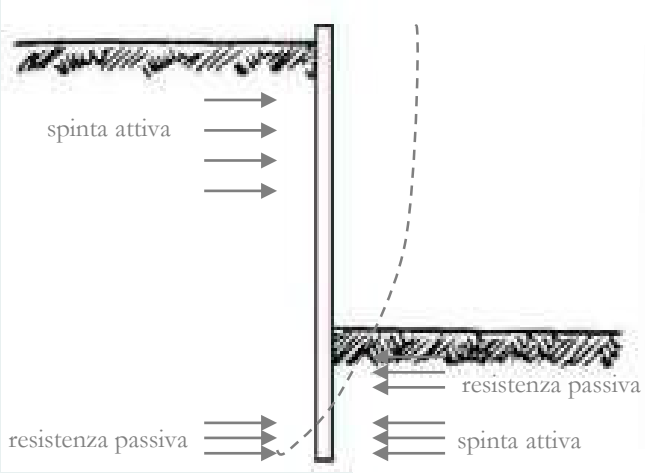


Muri in pietrame o gabbioni

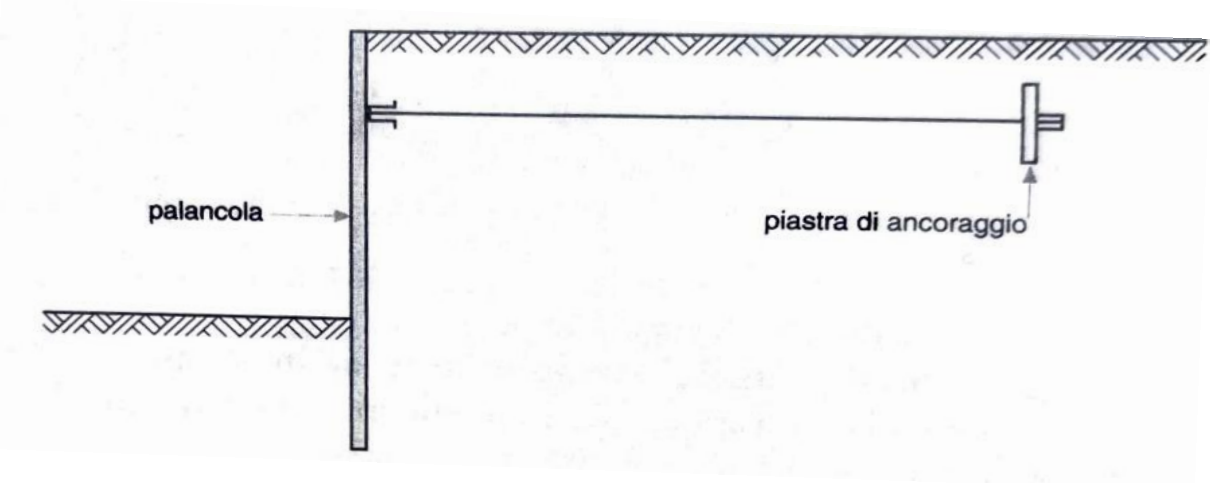
OPERE DI CONTENIMENTO DEL TERRENO (8)

- **muri di rivestimento**, servono a proteggere le scarpate dal degradamento superficiale causato dagli agenti atmosferici e in particolare dalle acque meteoriche oppure dai corsi d'acqua e, infine, per evitare la caduta e il distacco di elementi rocciosi di modeste dimensioni; possono essere realizzati in cls gettato in opera, in blocchi prefabbricati montati a secco o in mattoni con malta idraulica.

In aggiunta alle opere viste, si annoverano le **paratie** come opere di sostegno flessibili. A differenza dei muri, sono costituite da una parete che, per un tratto più o meno lungo, risulta immersa nel terreno.



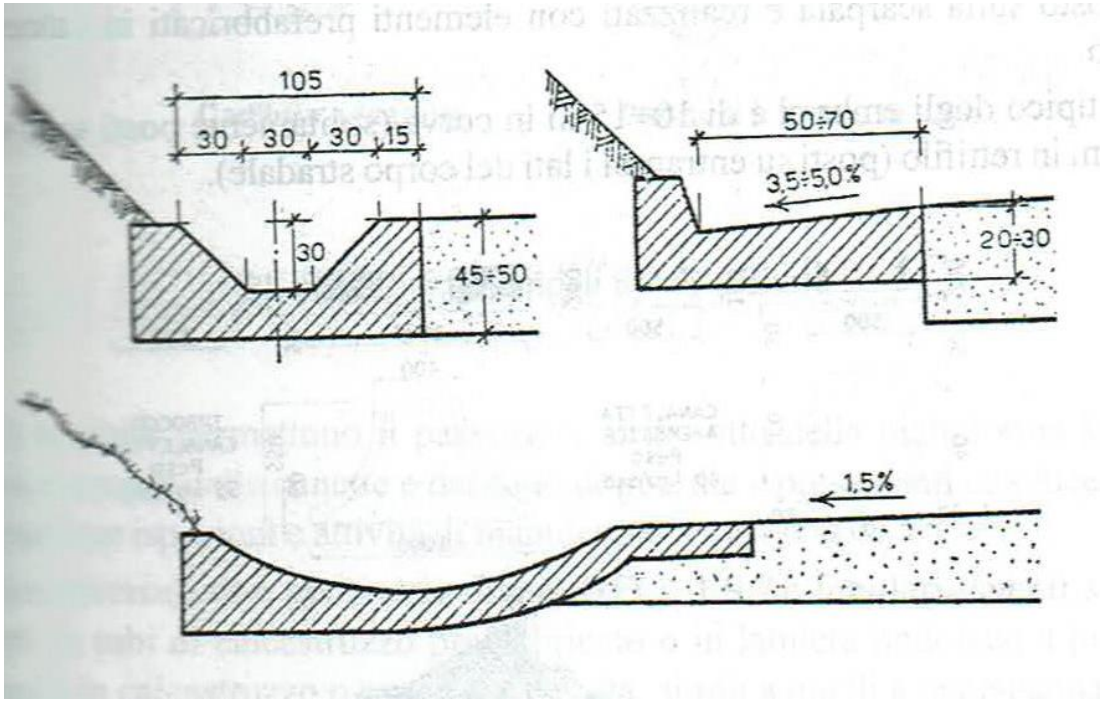
Paratie senza ancoraggio



Paratie con ancoraggio, Colombo & Coleselli, 2004

OPERE DI DRENAGGIO

- cunette, sono poste a lato della piattaforma stradale nelle sezioni in trincea con il compito di raccogliere le acque provenienti dalla piattaforma e dalle scarpate; presentano diverse configurazioni geometriche;
- fossi di guardia, hanno lo scopo di raccogliere i deflussi superficiali di rilevante entità e possono essere posti a monte della sezione in rilevato, in sommità dei muri di controripa, oppure delle scarpate.



Cunette, Tesoriere, 1998

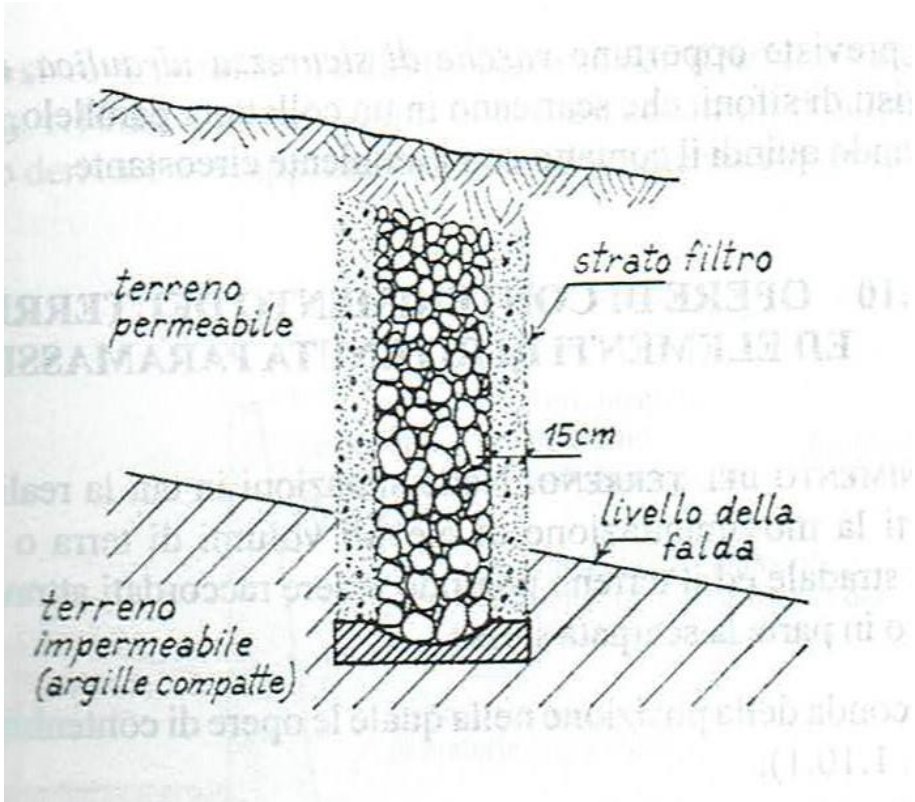
OPERE DI DRENAGGIO (2)

2

Protezione dalle acque sotterranee.

Tali opere sono realizzate allo scopo di separare il corpo stradale dal terreno circostante. Per la protezione dalle acque sotterranee sono correntemente utilizzati:

- trincee drenanti, realizzate secondo la linea di massima pendenza di un versante, costruite scavando una porzione di terreno e sostituendo quest'ultimo, nella parte inferiore, con pietrame di granulometria tale da permettere il facile deflusso delle acque e nella parte più superficiale, con uno strato di terreno impermeabile;

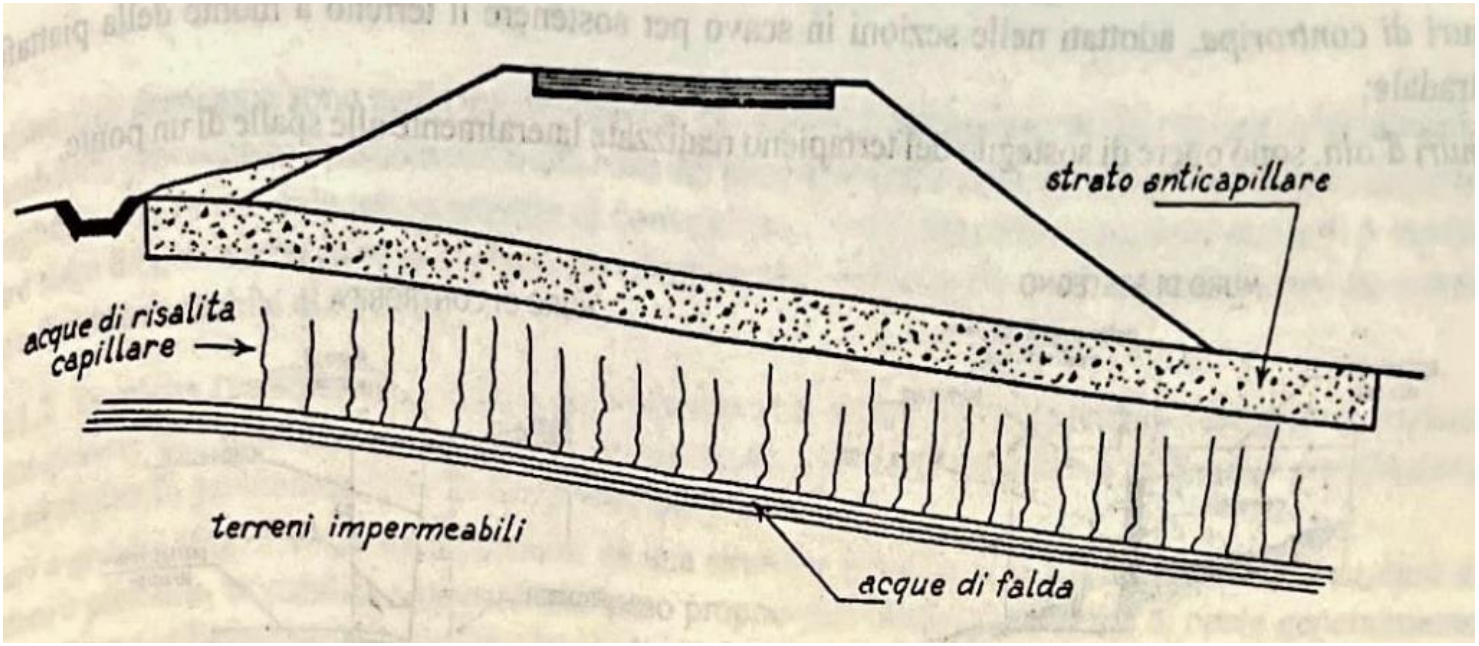


Trincea drenante, Tesoriere, 1998

OPERE DI DRENAGGIO (3)

2

- pozzi drenanti, il foro dei pozzi viene riempito con materiali di grossa pezzatura, quest'ultimo protetto da materiale più fine o da geotessile; l'allontanamento dell'acqua dei pozzi è realizzato tramite tubi posti sul fondo degli stessi;
- dreni di umidità o diaframmi anti-capillari, realizzati scavando un cassonetto dello spessore di 30-60 cm e sistemando uno strato costruito da terreno granulare e da sabbie grosse.



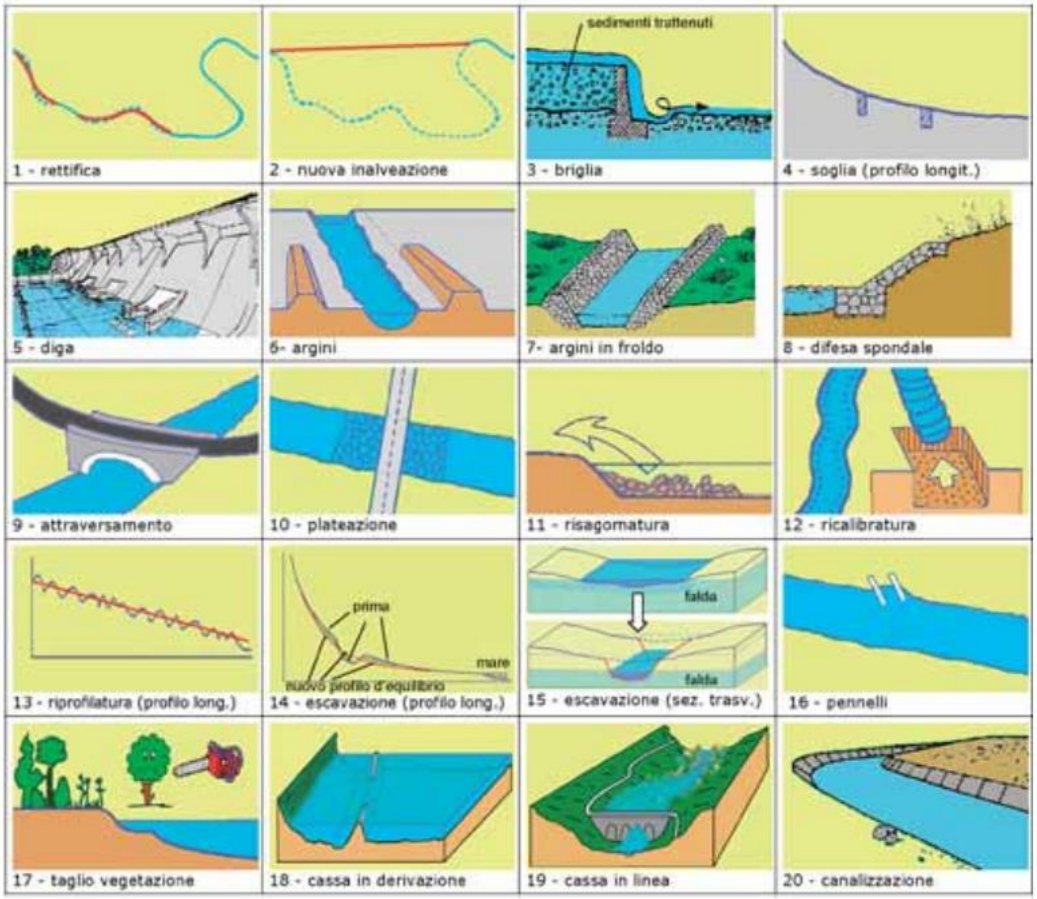
Diaframma anti-capillare, Tesoriere, 1998

OPERE IDRAULICHE

2

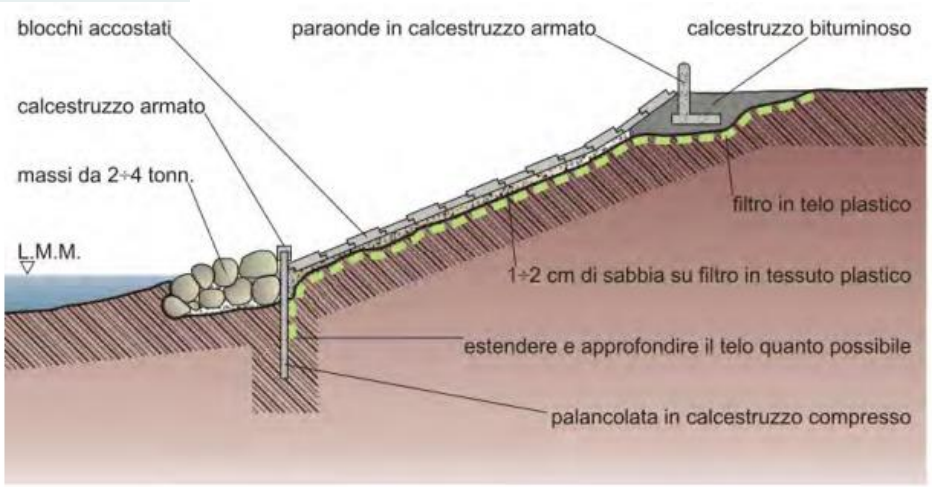
Sono interventi di stabilizzazione del fondo dell'alveo e alla salvaguardia della sede ferroviaria da esondazioni. Tra cui si annoverano:

- difese trasversali, come briglie, finalizzate a contrastare l'incisione dell'alveo, trattenendo i sedimenti a monte, e soglie di fondo che, contrariamente alle prime, non sporgono dal fondo (non inducono cioè un innalzamento) ma si limitano a stabilizzare la quota del fondo;
- difese radenti (muri d'argine, di rivestimento, gabbionate, scogliere) che subiscono l'azione diretta delle acque evitando che agisca sui rilevati o sulle spalle dei ponti.



Tipi di interventi fluviali, Sansoni in APAT 2007

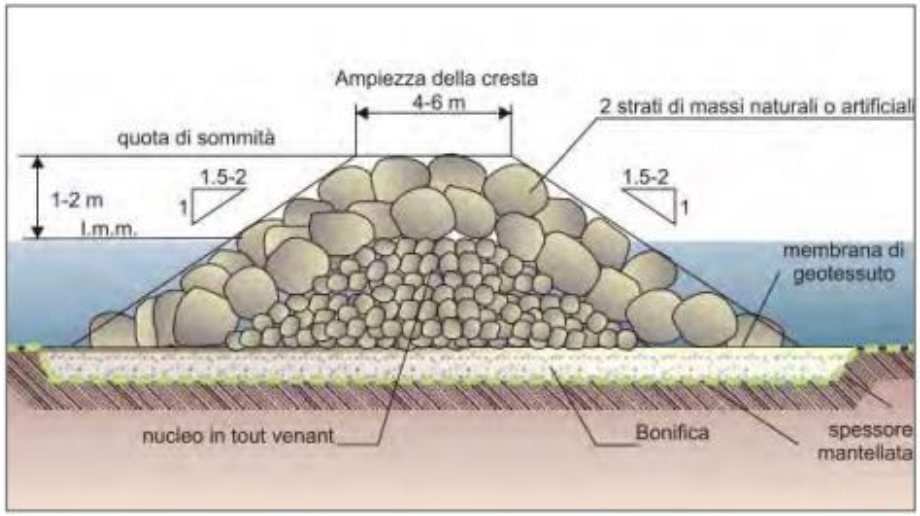
OPERE IDRAULICHE (2)



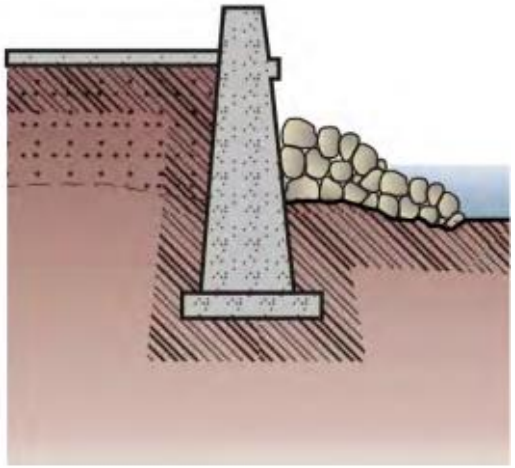
Schema barriera aderente per coste basse



Esempio di scogliera radente



Schema barriera emergente distaccata



Esempio di muro di sponda

LE GALLERIE – D.M. 17.01.2018

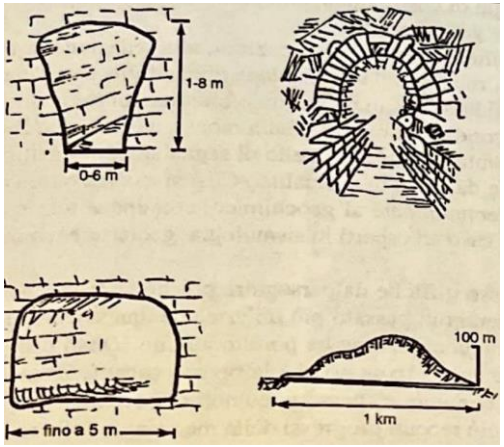
6.7. OPERE IN SOTTERRANEO

Le presenti norme definiscono le procedure tecniche per il progetto e la costruzione delle opere in sotterraneo quali le gallerie, le caverne ed i pozzi, che sono costruiti totalmente nel sottosuolo mediante operazioni coordinate di asportazione del terreno e/o della roccia in posto e l'esecuzione di eventuali interventi necessari alla stabilizzazione della cavità a breve e a lungo termine, nonché del rivestimento finale.

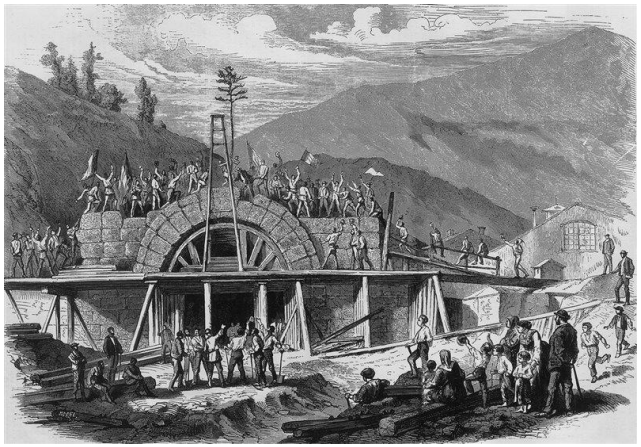
700 a.C.

1800

1900



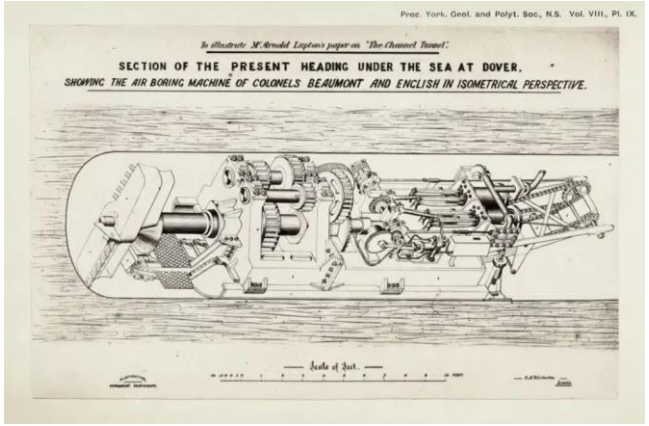
Sandstorm, 1963



Incisione, 1857-1861

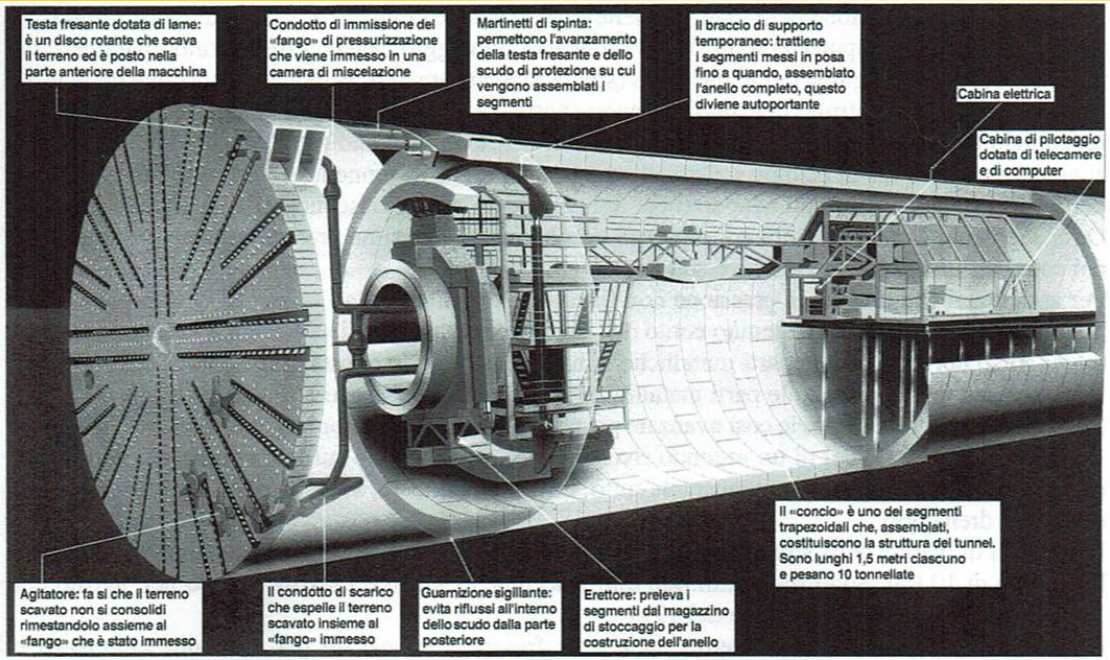
SISTEMA COMPLESSO

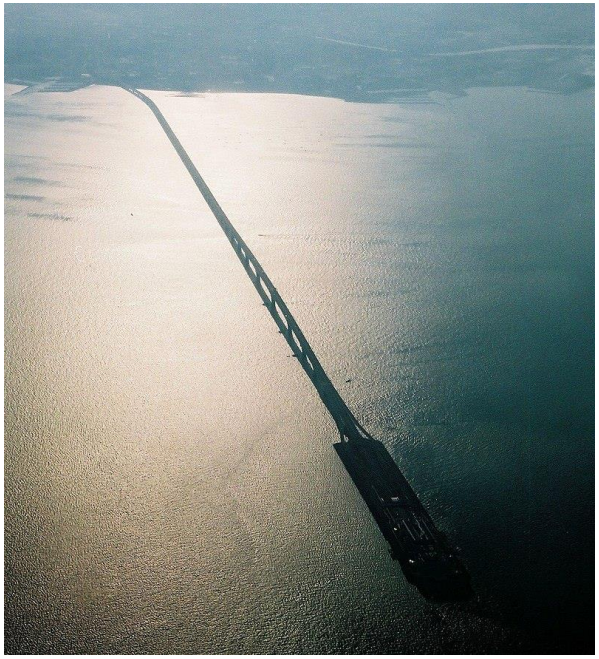
APPROCCIO MULTIDISCIPLINARE

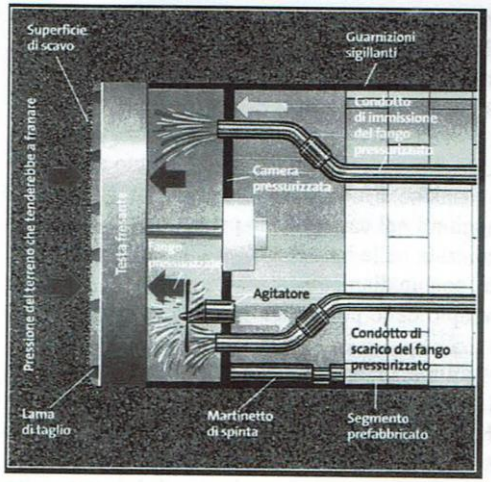


Lupton, 1883

GALLERIA TOKYO-BAY AQUILINE
TBM (TUNNEL BORING MACHINE)







Il congiungimento sotterraneo dei tunnel



• **Guida** con monitoraggio satellitare della manovra di avvicinamento delle due frese fino a 50 metri l'una dall'altra. La loro posizione è stata controllata con sensori magnetici e la direzione orizzontale con controlli topografici laser.



• **Corrette** le eventuali deviazioni rispetto al percorso previsto, a 50 metri di distanza fra le due macchine si è passati all'«attracco». Nello smontaggio delle macchine è stato necessario consolidare il suolo anche nel loro punto di incontro.



• **Le parti interne** delle macchine vengono smontate. Si è effettuato un arretramento dei dischi rotanti solo dopo aver fatto avanzare al massimo i macchinari, riducendo quindi al minimo la porzione di sottosuolo ancora da consolidare.



• **Completato** lo smontaggio delle macchine, si è effettuato il congiungimento dei due tronconi del tunnel. L'interno del tunnel è stato successivamente ricoperto con un rivestimento di calcestruzzo che ha completato l'opera.



LE GALLERIE – D.M. 17.01.2018

3

6.7.1. PRESCRIZIONI GENERALI

Il progetto delle opere in sotterraneo, per la loro peculiarità, deve svilupparsi ponendo particolare cura nella definizione del modello geologico e del modello geotecnico di riferimento.

L'approccio progettuale adottato deve prevedere l'impiego di metodi atti a prevenire o controllare, nelle fasi esecutive, gli effetti legati alla variazione dello stato tensionale preesistente nel terreno e/o nell'ammasso roccioso e alla variazione del regime idraulico del sottosuolo nell'intorno della cavità, conseguenti alle operazioni di scavo. Deve in particolare essere dimostrato il raggiungimento di condizioni di stabilità della stessa cavità ad opera ultimata, in relazione alle condizioni e alle caratteristiche del sito, nonché alle conseguenze che si possono comunque produrre nell'ambiente circostante. A tale scopo, in stretta dipendenza dai risultati delle indagini geologiche e geotecniche, nel progetto devono essere specificati e adeguatamente giustificati:

- geometria, ubicazione (per le opere puntuali quali le caverne ed i pozzi) e tracciato dell'opera (per le opere a sviluppo lineare quali le gallerie);
- metodi e tecniche di scavo, di tipo tradizionale o meccanizzato;
- eventuali interventi di stabilizzazione (quali il miglioramento e il rinforzo dei terreni e dell'ammasso roccioso) da adottare sul fronte e sulle pareti di scavo, le strutture di rivestimento, di prima fase o definitivi, ed eventuali opere di protezione degli imbocchi;
- modalità e metodi per l'intercettazione delle acque sotterranee ed il controllo del regime delle pressioni interstiziali
- provvedimenti per prevenire l'innesco e/o la riattivazione di eventuali fenomeni franosi, soprattutto per le gallerie parietali e nelle zone di imbocco;
- elementi utili a definire accorgimenti nei metodi e nelle tecniche di scavo, interventi, piani e norme di sicurezza, anche con riferimento a particolari situazioni di pericolo per presenza di gas tossici o esplosivi, di cavità (naturali e antropiche) o di venute improvvise di acqua;
- problemi relativi alla messa a dimora dei materiali di risulta dagli scavi, compresa la individuazione degli eventuali interventi di inertizzazione che si rendessero necessari, in relazione alla natura degli stessi materiali.

LE GALLERIE – D.M. 17.01.2018

3

6.7.2. CARATTERIZZAZIONE GEOLOGICA

L'ampiezza e l'approfondimento degli studi e delle indagini di carattere geologico devono essere commisurati alla complessità geologica, alla vulnerabilità ambientale del sito, alla posizione e alle dimensioni dell'opera.

Il modello geologico di riferimento deve descrivere le caratteristiche geologiche generali dei terreni e dell'ammasso roccioso interessato dagli scavi indicando natura e distribuzione geometrica dei litotipi e caratteri strutturali, ponendo particolare attenzione al riconoscimento del contatto fra formazione di base e copertura, dei contatti stratigrafici, delle faglie in corrispondenza o in prossimità dell'opera e delle altre discontinuità Devono essere accertate le caratteristiche sismotettoniche e la franosità della zona interessata dal progetto, particolarmente rilevante per gallerie parietali e per le zone di imbocco, e deve essere segnalata l'eventuale presenza di cavità carsiche.

Gli accertamenti devono riguardare inoltre le condizioni idrogeologiche, i caratteri degli acquiferi presenti nell'area, nonché i rischi di natura ambientale dovuti alla presenza di gas tossici ed esplosivi e di minerali nocivi.

6.7.3. CARATTERIZZAZIONE E MODELLAZIONE GEOTECNICA

Specifiche indagini, in sito e in laboratorio, devono permettere la caratterizzazione fisico-meccanica dei terreni e delle rocce sia alla scala dell'elemento di volume sia alla scala dell'ammasso. Ove necessario la caratterizzazione deve essere rivolta a valutare potenzialità spingenti e/o rigonfianti e le caratteristiche meccaniche lungo le discontinuità. Deve inoltre essere accertato il regime delle pressioni interstiziali e l'eventuale presenza di moti di filtrazione.

Il modello geotecnico di sottosuolo deve permettere di eseguire le analisi di progetto e le verifiche di sicurezza di cui al successivo § 6.7.5 . A tal fine, deve evidenziare le zone omogenee dal punto di vista fisico-meccanico e rappresentare il regime delle pressioni interstiziali nel sottosuolo interessato dallo scavo. Inoltre, la caratterizzazione fisico-meccanica dei materiali deve essere adeguata ai procedimenti analitici e/o numerici previsti.

Nel caso in cui la progettazione faccia riferimento al "metodo osservazionale", indagini e prove integrative possono essere svolte in corso d'opera purché previste per la valutazione dei parametri significativi per la scelta fra le soluzioni alternative già individuate in progetto.

LE GALLERIE – D.M. 17.01.2018

6.7.5. ANALISI PROGETTUALI E VERIFICHE DI SICUREZZA

Le analisi devono essere riferite alle diverse fasi di scavo e costruzione, nonché alle condizioni di esercizio.

Le verifiche devono essere svolte con riferimento agli stati limite ultimi (SLU) e agli stati limite di esercizio (SLE).

Si devono considerare gli stati limite ultimi per raggiungimento della resistenza del terreno o dell'ammasso roccioso interessato dallo scavo (GEO) e gli stati limite ultimi per raggiungimento della resistenza degli elementi strutturali che costituiscono gli interventi di stabilizzazione e di rivestimento, sia di prima fase sia definitivi (STR). Devono essere inoltre valutati quantitativamente gli effetti indotti dall'opera in sotterraneo sui manufatti e sulle costruzioni esistenti. Devono essere considerati i possibili stati limite ultimi di tipo idraulico prodotti sia dalle spinte idrauliche al fronte e al contorno dello scavo in fase di avanzamento (UPL) sia da elevati gradienti idraulici nel caso di attraversamento di terreni suscettibili al sifonamento (HYD).

Le verifiche di stabilità globale dei versanti con cui l'opera interagisce e dei fronti di scavo agli imbocchi devono essere eseguite con i criteri indicati ai §§ 6.3 e 6.8 rispettivamente per i pendii naturali e per i fronti di scavo.

Le verifiche agli stati limite ultimi devono essere eseguite con l'Approccio 1, considerando le due combinazioni di coefficienti

– Combinazione 1: (A1+M1+R1)

– Combinazione 2: (A2+M2+R2)

con i valori dei coefficienti parziali riportati nelle Tabelle 6.2.I, 6.2.II e con i coefficienti γ_R dei gruppi R1 e R2 pari all'unità.

Le verifiche strutturali degli elementi di rinforzo, in avanzamento dal fronte e sulle pareti di scavo, e delle strutture di rivestimento, di prima fase e definitive, devono essere eseguite come specificato al § 6.2.4.1.3 , utilizzando i valori caratteristici dei parametri geotecnici.

Le verifiche nei confronti degli stati limite ultimi idraulici devono essere eseguite con i criteri indicati al § 6.2.4.2.

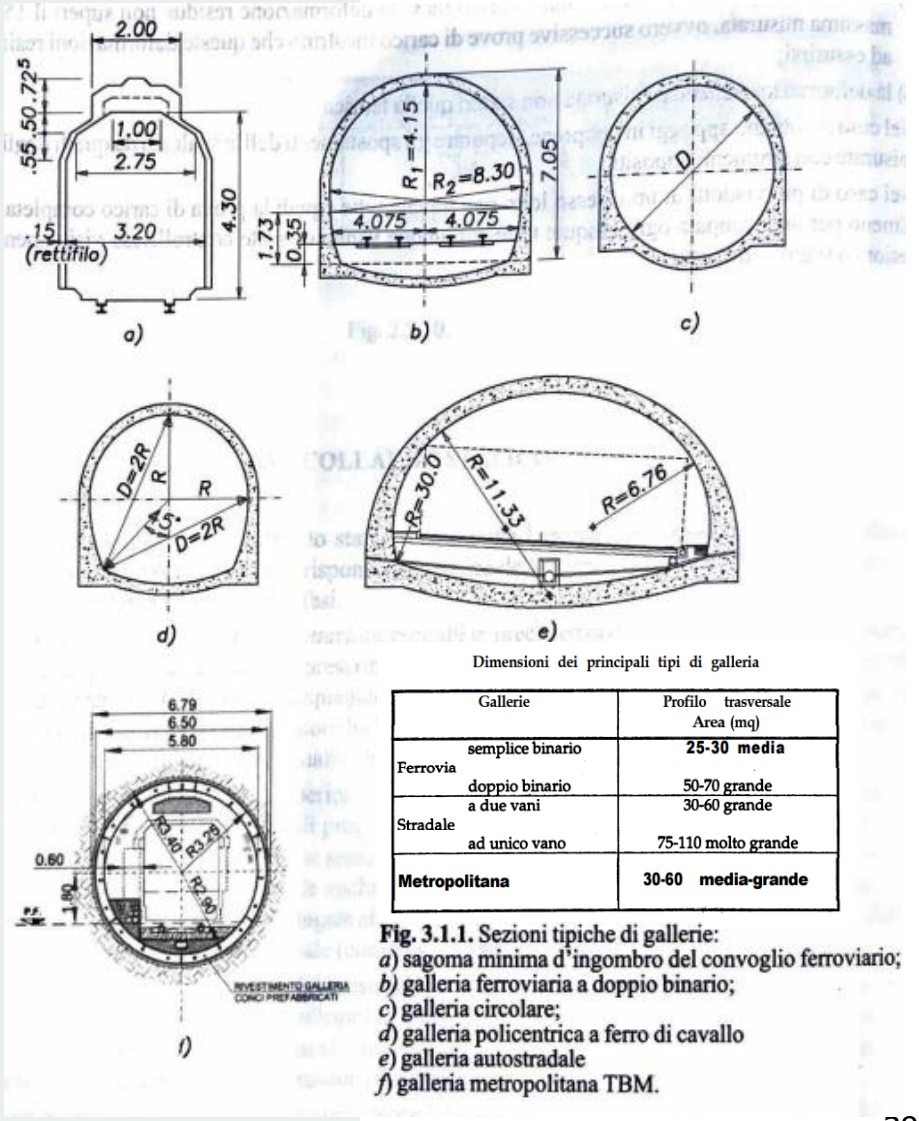
Nel caso di progettazione basata sul metodo osservazionale, di cui al § 6.2.5, le analisi devono permettere la valutazione quantitativa del comportamento dell'opera nelle diverse fasi di scavo e costruzione, in modo da poter formulare previsioni sui valori delle grandezze rappresentative del comportamento della cavità, con particolare riguardo ai valori di convergenza radiale, della deformazione longitudinale del fronte e, se pertinenti, degli spostamenti di superficie, per consentire il confronto delle previsioni con i valori misurati delle medesime grandezze.

6.7.6. CONTROLLO E MONITORAGGIO

Il monitoraggio deve permettere di verificare la validità delle previsioni progettuali in relazione al comportamento dell'opera in fase di costruzione e in esercizio, per il periodo di tempo indicato in progetto. Esso deve essere predisposto in modo da permettere la valutazione del comportamento del terreno o dell'ammasso roccioso interessato, delle strutture di rivestimento per ogni fase di scavo e costruzione e a opera ultimata, nonché del comportamento dei manufatti esistenti. In presenza di fenomeni franosi, potenziali o in atto, il monitoraggio deve riguardare le grandezze significative (tensioni, spostamenti e pressioni interstiziali) e gli effetti sulle opere per il controllo del fenomeno.

Nel caso di applicazione del metodo osservazionale, il monitoraggio deve essere specificamente progettato per consentire il controllo delle grandezze rappresentative del comportamento del complesso opera-terreno ai fini della scelta fra le soluzioni alternative previste.

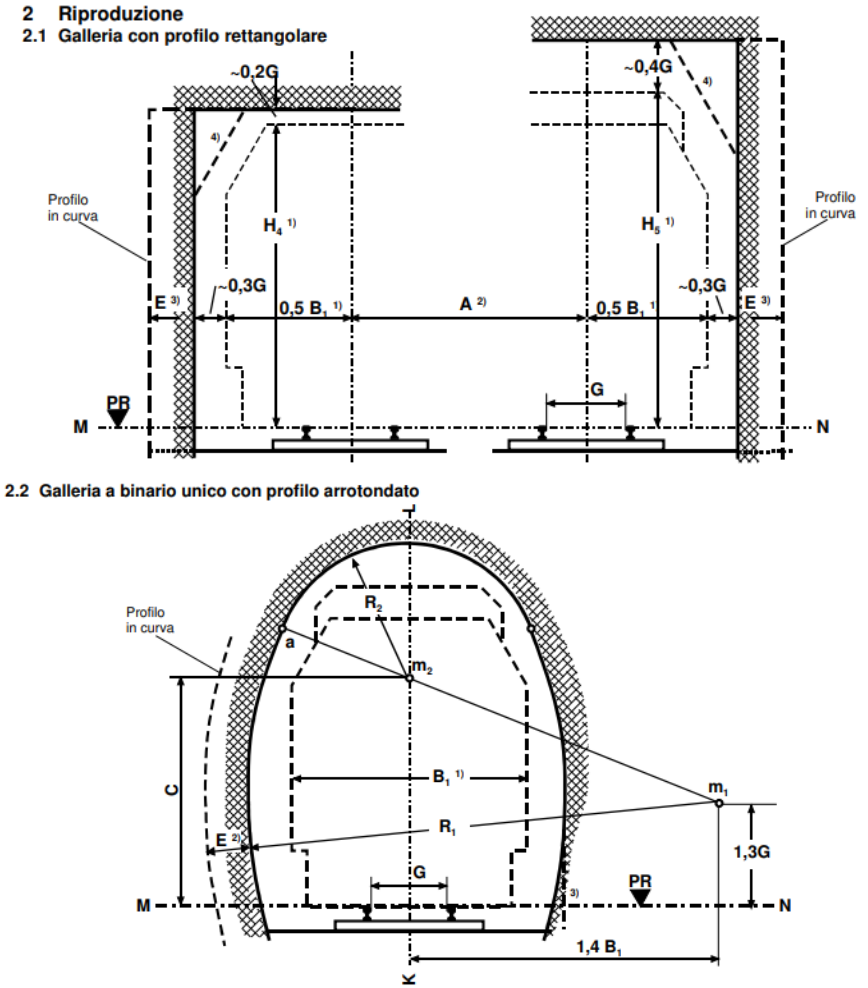
TIPOLOGIE COSTRUTTIVE



Dimensioni dei principali tipi di galleria

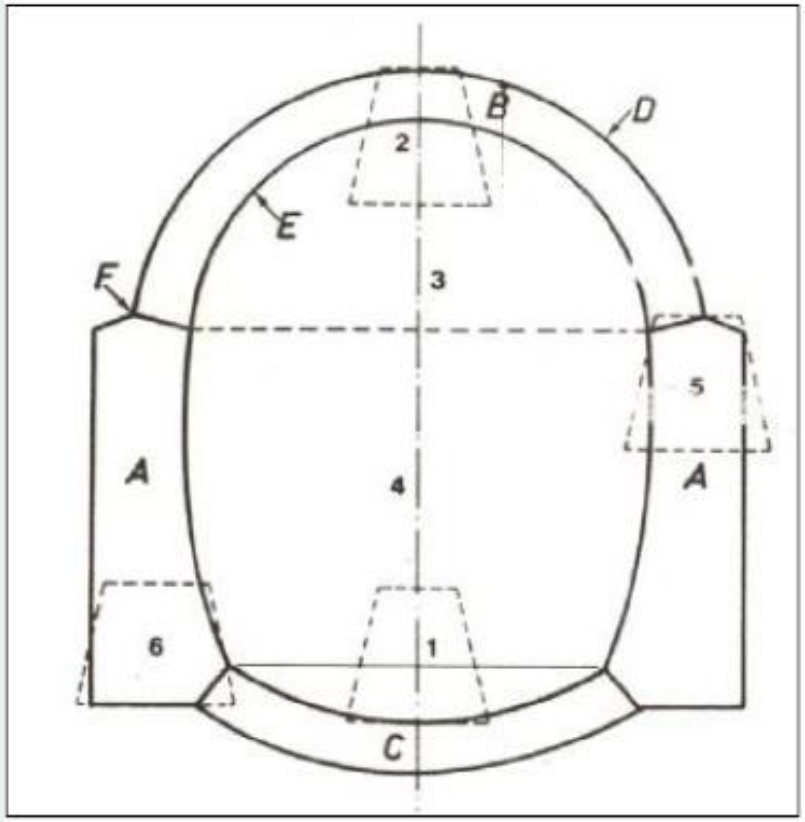
Gallerie		Profilo trasversale Area (mq)
Ferrovia	semplice binario	**25-30 media**
	doppio binario	50-70 grande
Stradale	a due vani	30-60 grande
	ad unico vano	75-110 molto grande
Metropolitana		**30-60 media-grande**

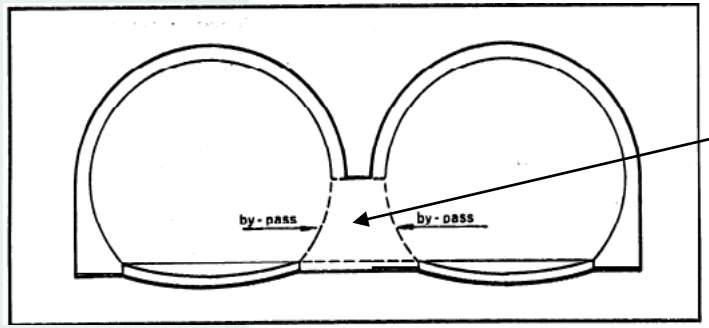
Fig. 3.1.1. Sezioni tipiche di gallerie:
a) sagoma minima d'ingombro del convoglio ferroviario;
b) galleria ferroviaria a doppio binario;
c) galleria circolare;
d) galleria policentrica a ferro di cavallo
e) galleria autostradale
f) galleria metropolitana TBM.



Norme Europee di Modellismo Ferroviario Profili delle Gallerie per le Ferrovie a Scartamento Normale NEM 105

TERMINOLOGIA





A → Piedritti
B → Rivestimento di calotta
C → Arco rovescio
D → Profilo di estradosso
E → Profilo di intradosso
F → Imposta di calotta
1→ Cunicolo di base centrale
2→ Cunicolo di sommità o di calotta
3→ Sezione di calotta
4→ Strozzo
5→ Cunicolo di imposta di calotta
6 → Cunicolo di base laterale

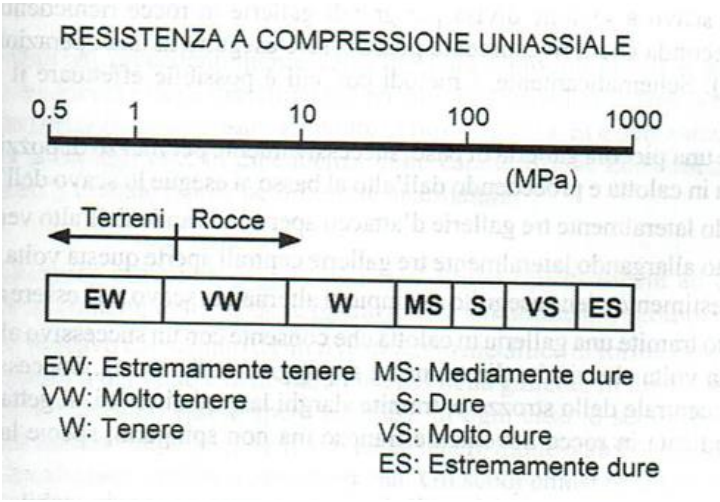
7→ Cunicolo di servizio (by-pass)

METODI DI ATTACCO ED AVANZAMENTO

Lo scavo può essere iniziato a partire da uno o dai due estremi del tracciato oppure, per gallerie lunghe, possono prevedersi attacchi intermedi tramite finestre, pozzi, discenderie.
L'**avanzamento** del fronte di scavo viene eseguito attraverso l'abbattimento e sgombero della roccia e la successiva posa in opera del rivestimento provvisorio e/o definitivo.
L'abbattimento è eseguito con metodi diversi in relazione alle caratteristiche meccaniche e strutturali dell'ammasso roccioso e delle dimensioni del fronte di scavo. In generale le rocce sono distinte dalle terre per la natura dei legami che conferiscono coesione e continuità che non si perdono con l'immersione in acqua (soglia limite tra 2 e 5 MPa di resistenza a compressione).



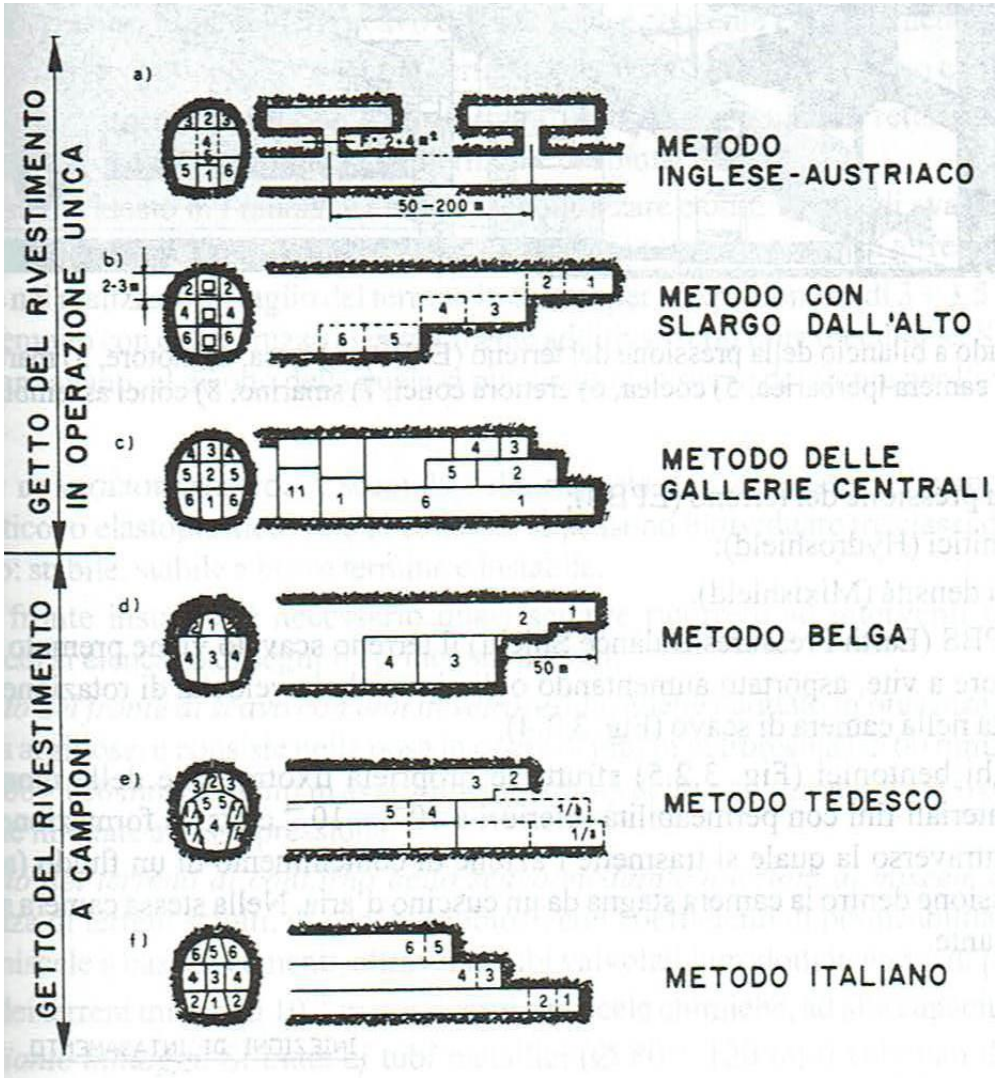
Possibilità di attacco, Manuale dell'ing. Civile, 2018



Suddivisione per i terreni consistenti e le rocce, ISRM, 1978

METODI DI SCAVO TRADIZIONALE

Dimensioni gallerie	Tipo di roccia	Metodi di scavo	Mezzi di scavo
Piccole e medie gallerie	Rocce coerenti	Generalmente a piena sezione	Esplosivi
	Rocce sciolte		Macchine marciavanti
Grandi gallerie	Rocce massive o in blocchi	A piena sezione A sezione divisa in due parti: calotta e strozzo	Esplosivi Macchine
	Rocce richiedenti armature immediate	A sezione divisa	Macchine



Metodi di scavo a sezione divisa, Manuale dell'ing. Civile, 2018

MACCHINE OPERATRICI CONTINUE (1)

3

Classificazione delle «tunneling machines» adottata in Germania, Svizzera e Austria

Tunnelling machines (TM's)	Gruppo	Supporto del fronte	Terreno
Tunnel Boring Machines (TBM's)	TMB without shield TBM aperta	Assente	Rock Roccia
	TBM with shield TBM scudata		
Shield Machine (SM's) Macchina scudata	Shield Machine with full face excavation Macchina scudata con scavo a piena sezione	Open/Aperta Blind/Chiusa	Hard or soft ground Terreno da duro a tenero
		Compressed air/Aria compressa	
		Slurry/Contropressione di fango	
		Earth pressure balanced/Contropressione di terra	
	Shield Machine with partial face excavation Macchina scudata con scavo a sezione parziale	Open/Aperta	
		Semi open/Semi aperta	
		Compressed air/Aria compressa	
		Slurry/Contropressione di fango	

Tanzini, 2015

MACCHINE OPERATRICI CONTINUE (2)

3

Macchine per lo scavo di gallerie in roccia (breve descrizione del principio di funzionamento)

TBM non scudate (Unshielded TBM's)	Una testa porta utensili o testa di scavo, rotante attorno ad un asse coincidente con l'asse della galleria, viene spinta contro il fronte di scavo; gli utensili, normalmente dischi, penetrano nella roccia polverizzandola localmente e creando intense sollecitazioni di trazione e taglio.
TBM non scudate speciali (Special Unshielded TBM's)	Alesatrici (Reaming Boring Machines - RBM's). L'alesatrice è una TM che permette l'allargo (alesaggio) di un foro realizzato con TBM (foro pilota). Raise Borer. È una macchina per lo scavo di pozzi che permette l'alesaggio a partire dal basso verso l'alto di un foro pilota realizzato con batteria di perforazione.
TBM monoscudate (Single Shielded TBM's)	Analogamente alla TBM non scudata il ciclo di lavoro è discontinuo, e prevede: scavo per una lunghezza pari alla corsa utile (stroke), riposizionamento (attraverso i martinetti longitudinali di spinta) e con contemporanea posa del rivestimento della galleria con conci prefabbricati, nuovo scavo.
TBM doppioscudate (Double Shielded TBM's)	Vale quanto riportato per la TBM non scudata ma permette l'avanzamento continuo grazie al doppio sistema di spinta.

Tanzini, 2015

MACCHINE OPERATRICI CONTINUE (3)

3

Macchine per lo scavo di gallerie in terreni (breve descrizione del principio di funzionamento)

Scudi aperti (Open Shield)	Lo scudo aperto è una TM in cui l'abbattimento del fronte avviene con una testa di scavo a sezione parziale. A seconda del mezzo d'abbattimento, si distinguono gli scudi con scavo semplice (hand shields) e gli scudi parzialmente meccanizzati (partly mechanized shields) in cui lo scavo avviene per mezzo di una fresa ad attacco puntuale o con benna collegata allo scudo, e con un sistema di scarico e smarino automatico.
Scudi meccanizzati chiusi (Mechanical Supported Closed Shields)	Lo scudo meccanizzato chiuso è una TBM in cui la testa di scavo svolge la doppia funzione di mezzo per lo scavo e mezzo per il sostegno del fronte, sostegno che è assicurato da piastre mobili, solidali con la testa, spinte contro il fronte da appositi martinetti idraulici.
Scudi aperti a supporto meccanico del fronte (Mechanical Supported Open Shields)	Analogo a quello descritto per lo scudo aperto; la stabilità del fronte di scavo è ottenuta tramite piastre metalliche che vengono alternativamente spinte contro il fronte.
Scudi chiusi ad aria compressa (Compressed Air Closed Shields)	Nello scudo chiuso a contro pressione d'aria, la testa rotante porta utensili svolge la funzione di mezzo per lo scavo, mentre il sostegno del fronte è assicurato da aria compressa a livello sufficiente per bilanciare la pressione idrostatica del terreno.
Scudi aperti ad aria compressa (Compressed Air Open Shields)	L'abbattimento del fronte, come per gli scudi aperti, avviene con l'impiego di un mezzo puntuale; il sostegno del fronte è assicurato da aria compressa in quantità sufficiente a bilanciare la pressione idrostatica del terreno.

Tanzini, 2015

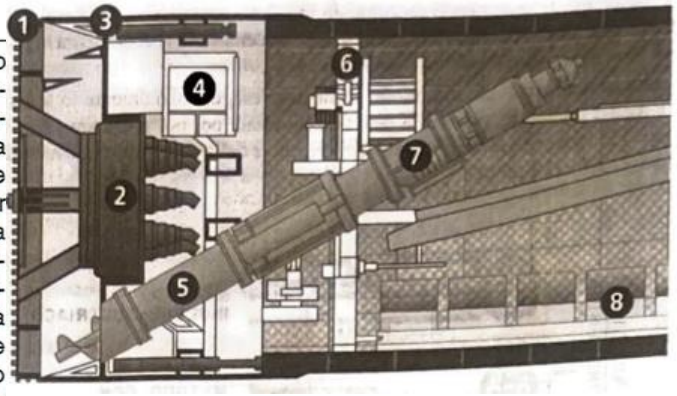
MACCHINE OPERATRICI CONTINUE (4)

3

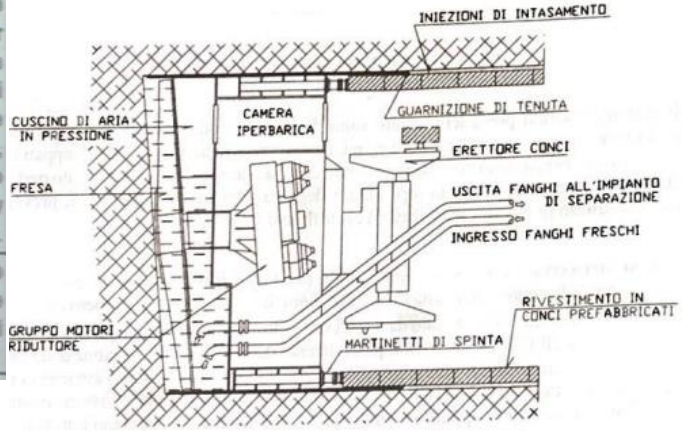
Macchine per lo scavo di gallerie in terreni (breve descrizione del principio di funzionamento)

Scudi chiusi a contro pressione di fango (Slurry Shields)	La testa rotante porta utensili svolge la funzione di mezzo per lo scavo mentre il sostegno del fronte avviene attraverso una contro pressione di fango costituito da una sospensione di bentonite o argilla in acqua (slurry). Questa sospensione è pompata nella camera di scavo, da dove raggiunge il fronte penetrando nel terreno a formare il filter cake ovvero la membrana impermeabile (terreni fini) o la zona impregnata (terreni grossolani) che garantisce il trasferimento della contro pressione al fronte di scavo. Il materiale scavato per mezzo degli utensili montati sulla testa rotante è composto in parte da terreno naturale ed in parte dalla sospensione di bentonite o argilla in acqua. Questo miscuglio viene pompato (smarino idraulico) dalle camere di scavo ad un impianto di separazione che in genere è localizzato in superficie.
Scudi aperti a contro pressione di fango (Open Slurry Shields)	Il principio operativo è del tutto analogo a quello degli scudi aperti a contro pressione d'aria. In questo caso il sostegno del fronte avviene per mezzo di una contro pressione di fango.
Scudi a contro pressione di terra (Earth Pressure Balance Shields - EPBS)	La testa rotante porta utensili svolge la funzione di mezzo per lo scavo mentre il sostegno del fronte avviene per mezzo dello stesso terreno scavato che è mantenuto in pressione all'interno della camera di scavo attraverso i martinetti di spinta dello scudo (che trasferiscono la pressione al diaframma di separazione tra scudo e camera di scavo, e quindi, al terreno scavato). I detriti di scavo vengono rimossi dalla camera di scavo attraverso una coclea (screw conveyor) che permette la riduzione progressiva della pressione.
Scudi chiusi combinati (Combined Shields: Mixshiled, Polishield)	Lo scudo chiuso combinato è una macchina che si può adottare alle diverse condizioni di scavo principalmente attraverso la modifica del sistema di supporto del fronte di scavo.

Tanzini, 2015



Scudo a bilancio della pressione del terreno (EPBS): 1) fresa, 2) motore, 3) martinetti idraulici, 4) camera iperbarica, 5) coclea, 6) erettore conci, 7) smarino, 8) conci assemblati



Scudo a fanghi bentonitici (sistema Hydroshield)

MACCHINE OPERATRICI CONTINUE (5)

3

VANTAGGI TBM (Tunnel Boring Machine):

- → Lo scavo eseguito con una fresa meccanica conserva lo stato originale di tensione della roccia circostante la cavità
- → Il disturbo della roccia, circostante la cavità, è ridotto ad un minimo, riducendo la necessità dell'azione di misure di sicurezza, con conseguente perdita di tempo ed aumento dei costi
- → La deformazione della cavità scavata è minore, poiché il modulo di deformabilità del massiccio roccioso è più elevato
- → Le condizioni di tensioni attorno alla cavità si adattano successivamente e non come conseguenza di uno «shock» come nel caso di uno scavo convenzionale
- → La longevità di una cavità scavata con TBM è superiore (la letteratura in merito cita un aumento da 10 a 100 anni rispetto ad uno scavo eseguito con metodi convenzionali)
- → La forma di uno scavo eseguito con TBM (sezione circolare) è particolarmente favorevole per quanto concerne l'impatto nel massiccio circostante
- → Il carico trasmesso al rivestimento sia provvisorio sia definitivo è inferiore

MACCHINE OPERATRICI CONTINUE (6)

3

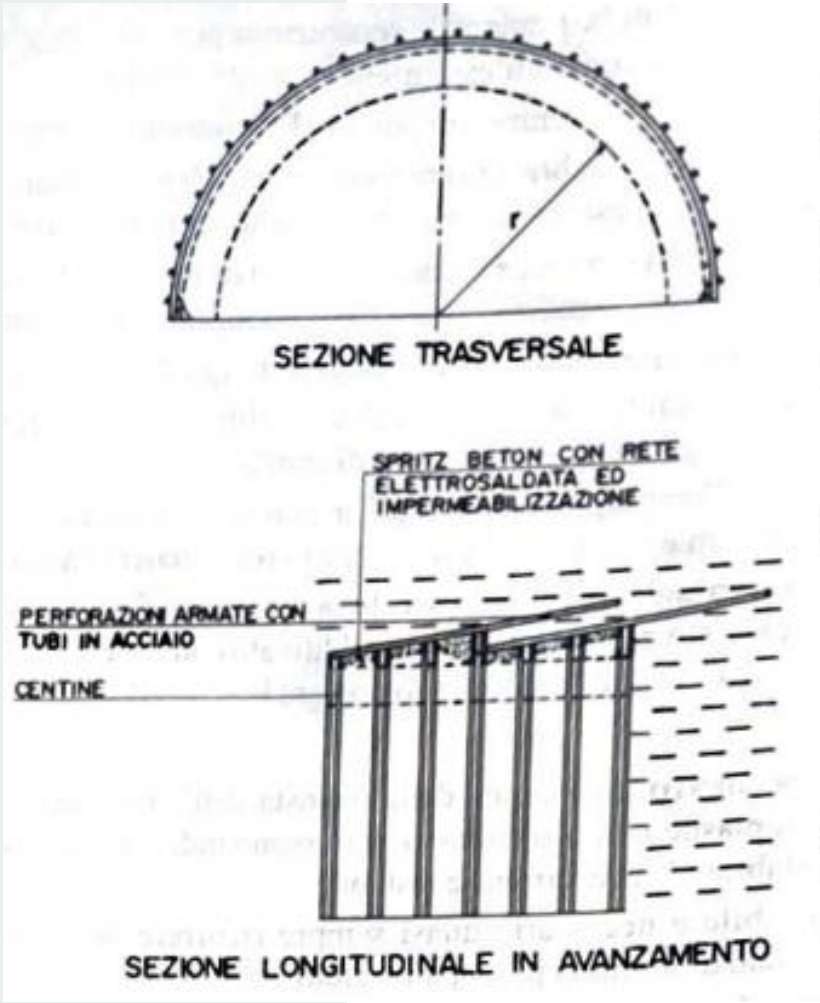
- → Con molta probabilità lo scavo con TBM diventa lavoro di routine aumentando la produttività
- → Possibilità di impiego di elementi prefabbricati per il rivestimento
- → Riduzione del numero di addetti ai lavori rendendo quindi il sistema meno sensibile al rincaro
- → Il materiale di scavo risultante (smarino) offre la possibilità dell'impiego di nastri trasportatori per l'evacuazione dello stesso. In più, il materiale si presta meglio per il trasporto in discarica o per la formazione di terrapieni senza la necessità di frantumazione.

SVANTAGGI:

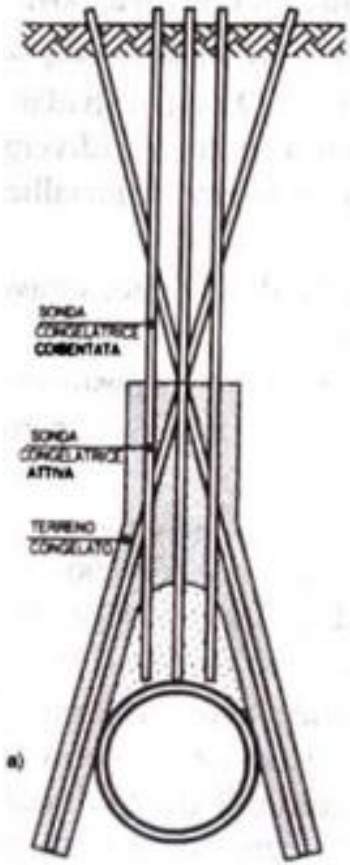
- → Limitata flessibilità nell'andamento al diametro di scavo
- → Impossibile quindi l'adattamento della sezione di scavo ad un eventuale aumento o diminuzione della sezione qualora richiesto dalla ventilazione (nel caso dei trafori autostradali)
- → Lavori supplementari difficili, tediosi e costosi nel caso in cui la TBM dovesse bloccarsi
- → Necessità, in alcuni casi, di costosi lavori di ripristino delle strade di accesso al cantiere onde permettere il trasporto della macchina in cantiere.

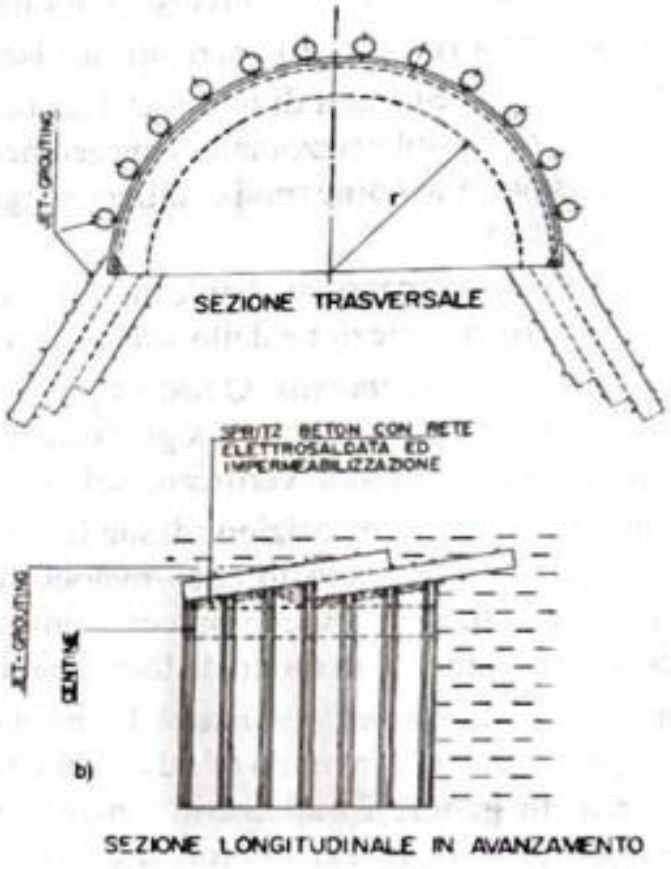
INTERVENTI DI PRECONTENIMENTO, PRECONSOLIDAMENTO E PRESOSTEGNO

Interventi di miglioramento.



Interventi di consolidamento mediante infilaggi metallici





Interventi di consolidamento mediante a) congelamento b) jet-grouting

… ECCO COME FUNZIONANO LE TBM (!)

3



ANALISI DI RISCHIO

4

*Rischio (R) = insieme di possibili **perdite** che un particolare evento può produrre ad uno specifico **elemento** in un determinato **intervallo di tempo**; le possibili perdite possono essere valutate in termini di vite umane o edifici distrutti o in termini economici (Undro, 1979)*

$$R = H \times V \times E$$

*Pericolosità (H) = probabilità di accadimento dell'evento in una data **area** ed in un dato **intervallo di tempo***

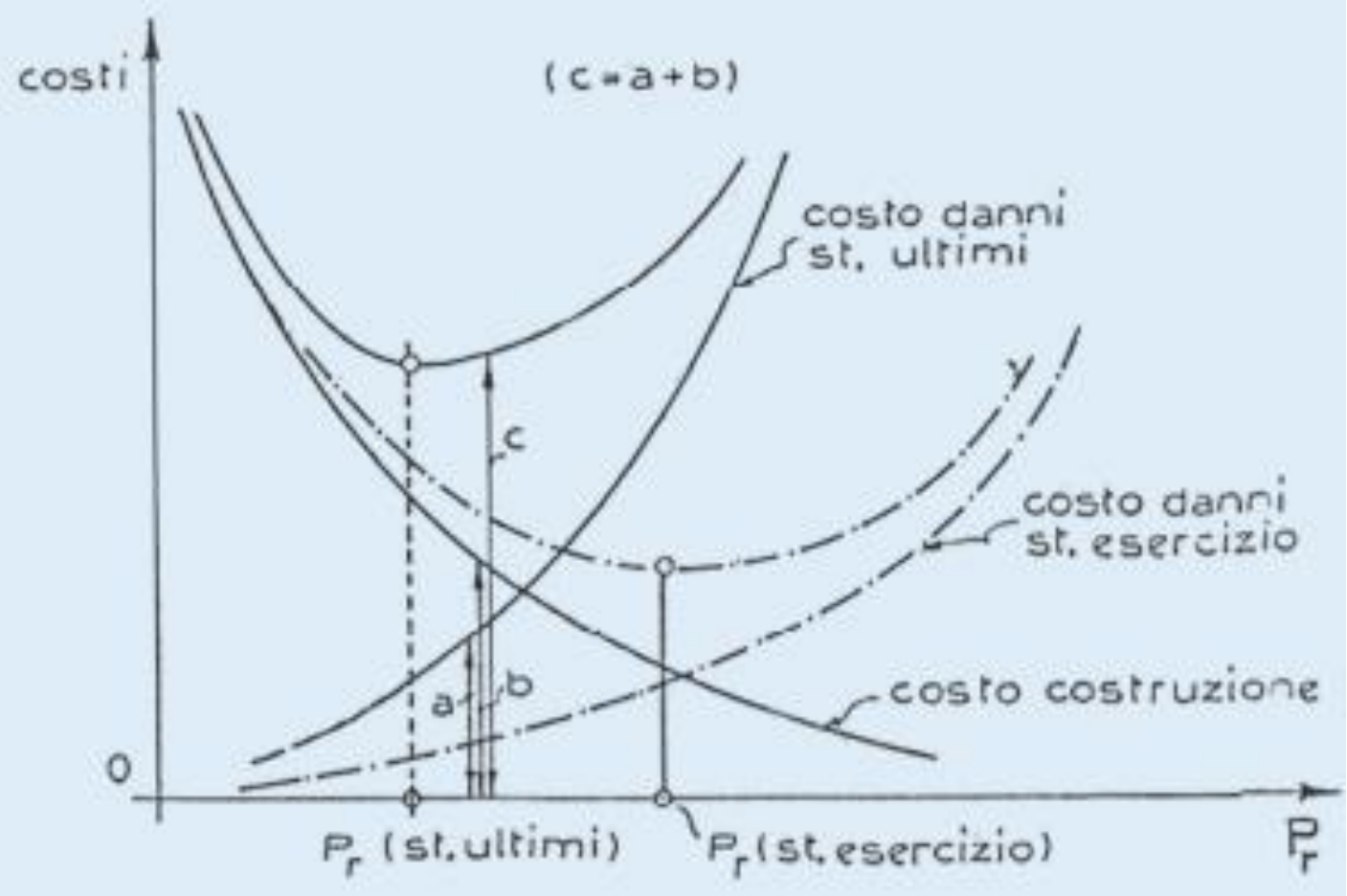
*Vulnerabilità (V) = **valutazione dei possibili effetti**, in termini di **perdite**, **danni**, **feriti** e **vite umane**, causati dall'evento*

Elementi a rischio (E) = include popolazione, edifici, strutture ed infrastrutture, servizi pubblici ed attività economiche

ANALISI DI RISCHIO (2)

4

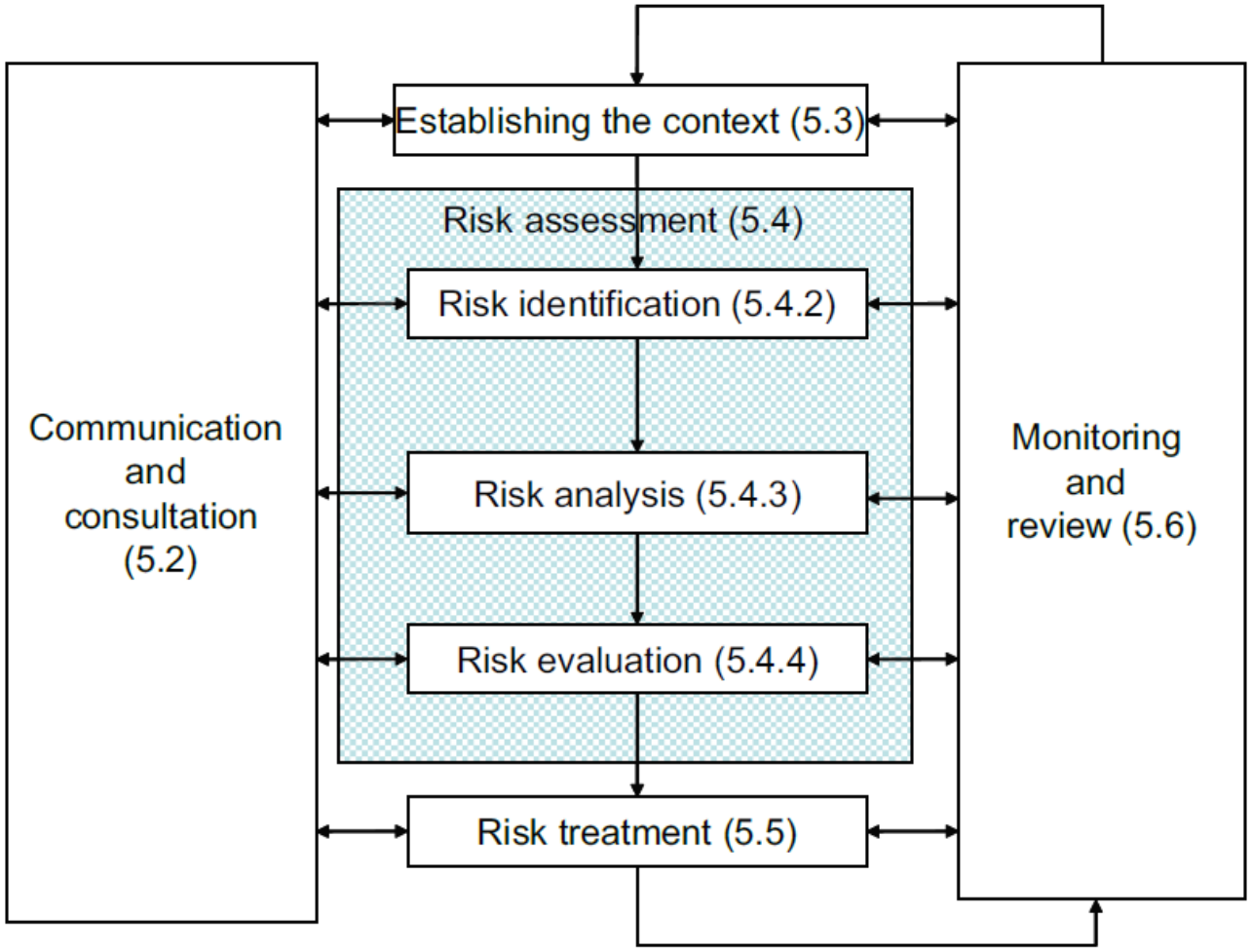
Analisi costi-benefici.
Probabilità di rovina in relazione ai costi dell'opera.



Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (3)

4



ISO 31000:2009(E)

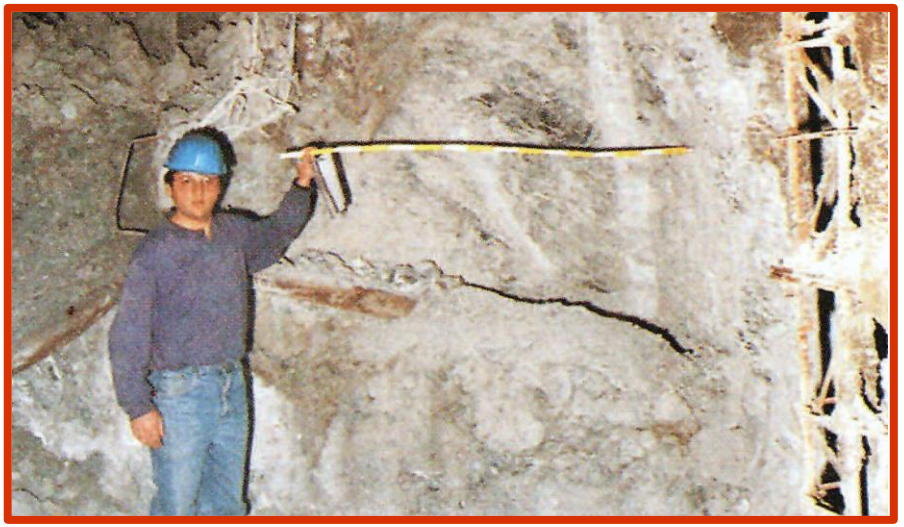
ANALISI DI RISCHIO (4)

Situazioni di rischio potenziale in galleria.

- *In fase di progettazione e costruzione*

1. ***Instabilità del fronte di scavo***
2. ***Instabilità del cavo, grandi deformazioni***
3. *Stato deformativo fortemente dissimetrico*
4. *Sezioni a litotipi misti*
5. *Rigonfiamento*
6. *Formazione di camini*
7. *Splaccaggio e sgretolamento*
8. *Faglie e sovraccarichi*
9. *Infiltrazioni e pressioni interstiziali*
10. *Dissoluzione e trasporto*
11. *Interferenze*
12. *Parietalità*
13. *Presenza di gas*





Lombardi et al., 1997 in Tanzini, 2015

Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (5)

4

Situazioni di rischio potenziale in galleria.

- ***In fase di progettazione e costruzione***

1. *Instabilità del fronte di scavo*
2. *Instabilità del cavo, grandi deformazioni*
3. *Stato deformativo fortemente dissimetrico*
4. ***Sezioni a litotipi misti***
5. *Rigonfiamento*
6. ***Formazione di camini***
7. *Splaccaggio e sgretolamento*
8. *Faglie e sovraccarichi*
9. *Infiltrazioni e pressioni interstiziali*
10. *Dissoluzione e trasporto*
11. *Interferenze*
12. *Parietalità*
13. *Presenza di gas*





Lombardi et al., 1997 in Tanzini, 2015

Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (6)

Situazioni di rischio potenziale in galleria.

- ***In fase di progettazione e costruzione***

1. *Instabilità del fronte di scavo*
2. *Instabilità del cavo, grandi deformazioni*
3. *Stato deformativo fortemente dissimetrico*
4. *Sezioni a litotipi misti*
5. *Rigonfiamento*
6. *Formazione di camini*
7. ***Splaccaggio e sgretolamento***
8. *Faglie e sovraccarichi*
9. ***Infiltrazioni e pressioni interstiziali***
10. *Dissoluzione e trasporto*
11. *Interferenze*
12. *Parietalità*
13. *Presenza di gas*





Lombardi et al., 1997 in Tanzini, 2015

Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (7)

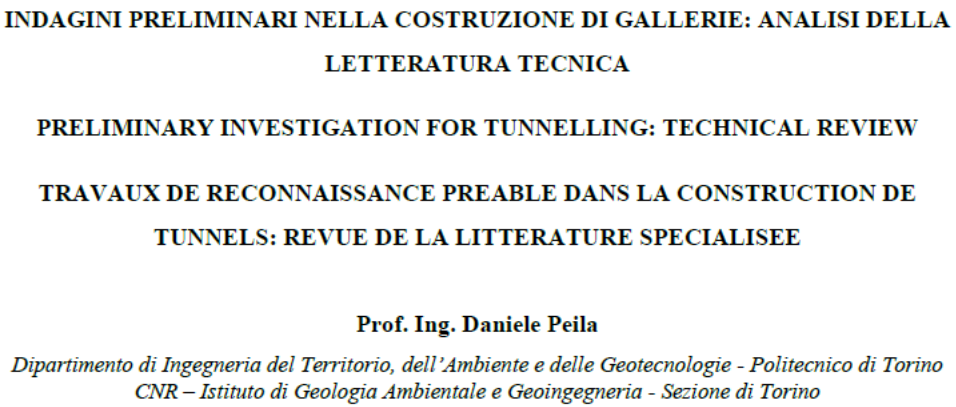
4

Situazioni di rischio potenziale in galleria.

- *In fase di esercizio*

1. *Interazione causata da altre opere di successiva realizzazione*
2. *Alterazioni morfologiche e idrogeologiche a lungo termine derivanti dalla realizzazione dell'opera*
3. *Danneggiamento dei rivestimenti in relazione a cause geomeccaniche*
4. *Aggressione chimica e/o fisica delle strutture*
5. *Sisma, rigetti di faglia*

Approfondimento



INDAGINI PRELIMINARI NELLA COSTRUZIONE DI GALLERIE: ANALISI DELLA LETTERATURA TECNICA

PRELIMINARY INVESTIGATION FOR TUNNELLING: TECHNICAL REVIEW

TRAVAUX DE RECONNAISSANCE PREABLE DANS LA CONSTRUCTION DE TUNNELS: REVUE DE LA LITTERATURE SPECIALISEE

Prof. Ing. Daniele Peila

Dipartimento di Ingegneria del Territorio, dell'Ambiente e delle Geotecnologie - Politecnico di Torino
CNR – Istituto di Geologia Ambientale e Geoingegneria - Sezione di Torino

Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (8)

4

In generale, esistono tre fasi distinte, da affrontare in successione coerentemente con l'avanzamento del progetto e della realizzazione. Esse sono ciascuna contenuta nella successiva, fino a giungere al processo complessivo di gestione del rischio e sono:

- *la valutazione (o l'identificazione) del rischio*
- *l'analisi del rischio*
- *la gestione del rischio*.



I passaggi fondamentali della fase di **valutazione del rischio** sono:

1. *identificazione degli elementi di pericolosità associati al progetto specifico (SRP)*

2. *valutazione delle conseguenze e degli impatti*

3. *stima delle probabilità di occorrenza*

4. *individuazione di obiettivi e necessità per l'analisi di rischio (condizioni al contorno);*

5. *quantificazione dei rischi*

6. *classificazione dei rischi*

7. *suddivisione delle competenze tra le diverse parti contrattuali.*

Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (9)

4

Una volta identificate e classificate le possibili sorgenti di rischio, si procede con la fase di **analisi**, che prende le mosse dalla compilazione di un apposito registro del rischio. I rischi in esso indicati, ordinati in termini di probabilità di occorrenza e di impatto, non devono limitarsi a quelli intrinseci di tipo geotecnico, ma possono essere specificati anche in relazione ai metodi realizzativi particolari. L'elenco ordinato permette di procedere alle successive fasi di progettazione degli **interventi di mitigazione e gestione**. Il registro deve riportare anche i nominativi delle persone responsabili del controllo. Infine, dopo aver applicato **i criteri di accettabilità del rischio prescelti**, risulta necessario definire e confrontare le strategie più appropriate e le soluzioni progettuali più adatte, le attrezzature più idonee da impiegare, le procedure realizzative più adeguate e le azioni contingenti.

In sintesi, le fasi di analisi del rischio prevedono:

8. *redazione e/o aggiornamento del registro del rischio*

9. *applicazione dei criteri di accettabilità del rischio*

10. *identificazione e analisi dei possibili interventi di mitigazione atti a limitare convenientemente i rischi calcolati.*

Pizzarotti, 2007

ANALISI DI RISCHIO (10)

4

La metodologia di gestione del rischio, infine, chiude il processo globale, interessando la fase realizzativa.

Durante questa fase si redige il cosiddetto **piano di mitigazione del rischio geotecnico**, che deve comprendere, oltre alle proposte di gestione e mitigazione del rischio, anche eventuali integrazioni dei dati geognostici di partenza, qualora questi fossero risultati insufficienti a caratterizzare in maniera esaustiva il materiale coinvolto dalla realizzazione dell'opera. In tal caso, il processo riparte dall'inizio con le integrazioni del caso. Nella fase di mitigazione, è essenziale che il grado di rischio residuo che permane dopo gli interventi venga portato a conoscenza di tutti gli interessati, per essere a sua volta gestito e mantenuto comunque sotto controllo.

L'aspetto della gestione si compone delle seguenti fasi:

11. *scelta delle misure di mitigazione da prevedere e della loro entità*

12. *verifica delle misure di mitigazione sulla base di dati di monitoraggio raccolti in corso d'opera*

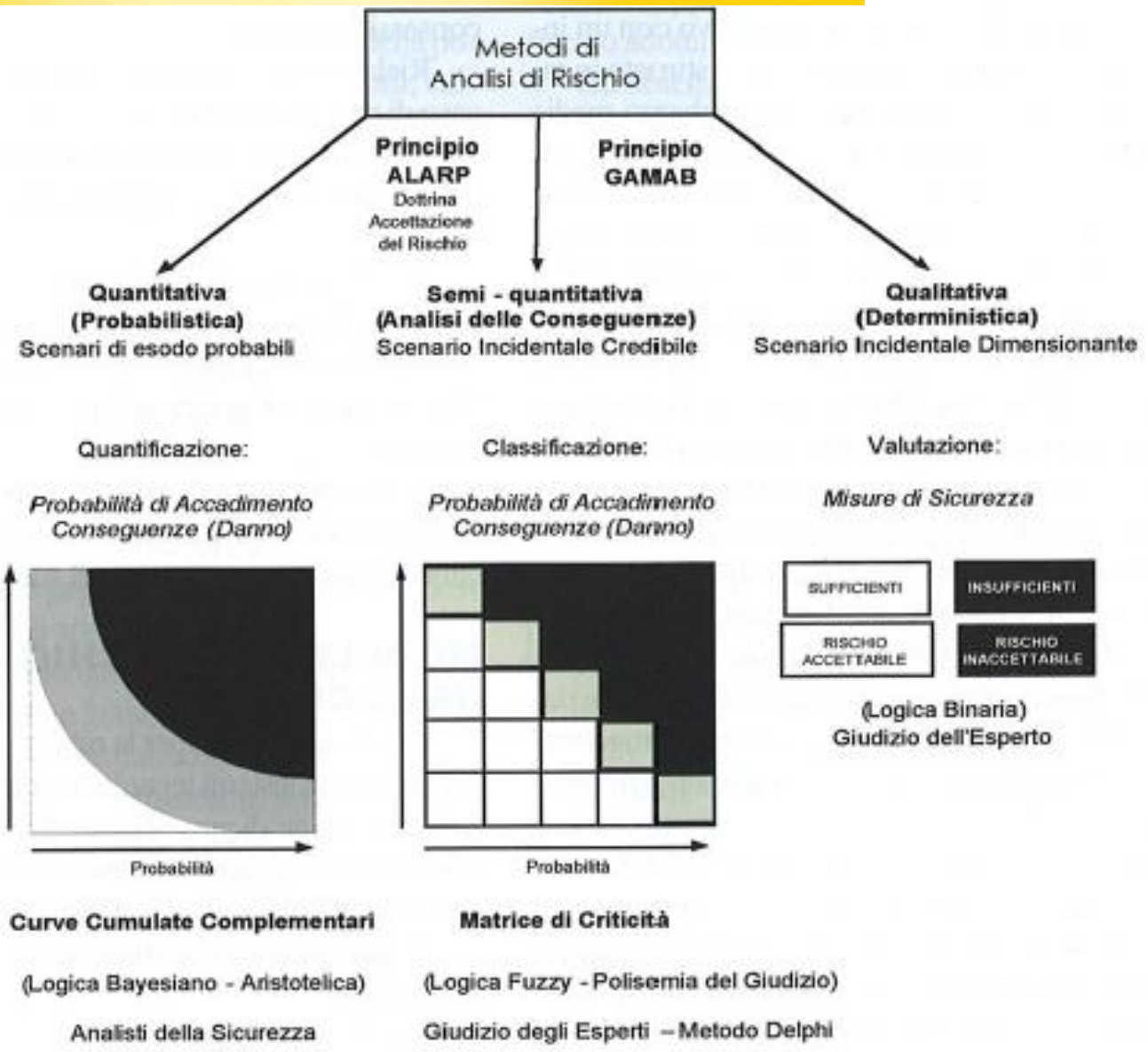
13. *in caso di superamento dei valori di soglia, introduzione di modifiche o varianti per riportare il livello di rischio al di sotto della soglia accettabile.*

Pizzarotti, 2007

METODI DI ANALISI DI RISCHIO



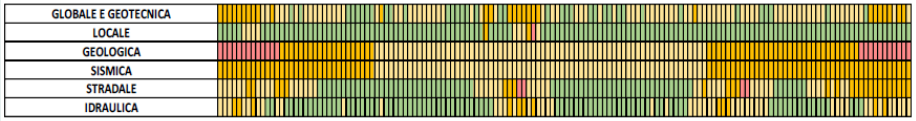
SICUREZZA
vs
ACCETTABILITÀ



D.M. 247 – 01.08.2022
LLGG – GALLERIE STRADALI

4

4. LIVELLO 2. ANALISI DEI RISCHI RILEVANTI E CLASSIFICAZIONE SU SCALA TERRITORIALE 14
4.1 Struttura generale del metodo di classificazione della classe di attenzione 15
4.2 Classe di attenzione strutturale globale e geotecnica 16
4.2.1 Stima del livello di pericolosità strutturale globale e geotecnica 17
4.2.1.1 Livello di conoscenza delle caratteristiche geotecniche dell'ammasso e affidabilità del modello geomeccanico 17
4.2.1.2 Caratteristiche geomeccaniche dell'ammasso roccioso e/o del terreno 17
4.2.1.3 Fattori esterni interagenti con la struttura della galleria 18
4.2.2 Stima del livello di vulnerabilità strutturale globale e geotecnica 19
4.2.2.1 Livello di difettosità 19
4.2.2.2 Rapidità del degrado nel tempo 19
4.2.2.3 Influenza della circolazione dell'acqua e presenza dello strato di impermeabilizzazione 20
4.2.2.4 Tipologia di galleria, materiali costituenti e tecniche e complessità costruttive 20
4.2.2.5 Determinazione della classe di vulnerabilità strutturale globale e geotecnica 22
4.2.3 Stima del livello di esposizione strutturale globale e geotecnica 23
4.2.3.1 I parametri primari: livello di Traffico Giornaliero Medio (TGM) e lunghezza della galleria 23
4.2.3.2 I parametri secondari e il calcolo della Classe di Esposizione 23
4.2.4 Stima della Classe di Attenzione Strutturale globale e Geotecnica 25
4.3 Classe di attenzione strutturale locale 25
4.3.1 Stima del livello di pericolosità strutturale locale 25
4.3.2 Stima del livello di vulnerabilità strutturale locale 26
4.3.3 Stima del livello di esposizione strutturale locale 27
4.3.4 Stima della Classe di Attenzione strutturale locale. 28
4.4 Classe di attenzione stradale 28
4.4.1 Stima del livello di pericolosità stradale 28
4.4.2 Stima del livello di vulnerabilità stradale 29
4.4.2.1 Evoluzione del degrado 29
4.4.2.2 Tipologie di sovrastrutture stradali 30
4.4.3 Stima del livello di esposizione stradale 30
4.4.4 Stima della Classe di Attenzione stradale 31
4.5 Classe di attenzione geologica associata al rischio frane 31
4.5.1 Definizione generale del metodo di determinazione della classe di attenzione legata al rischio frane 31
4.5.2 Stima del livello di suscettibilità geologica associata al rischio frane 32
4.5.2.1 Instabilità di versante 32
4.5.2.2 Misure di mitigazione 33
4.5.3 Stima del livello di vulnerabilità geologica associata al rischio frane 34
4.5.3.1 Rapporti tra galleria e condizioni morfologiche 34
4.5.4 Stima del livello di esposizione geologica associata al rischio frane 34
4.5.5 Stima della Classe di Attenzione Geologica 35
4.6 Classe di attenzione sismica 35
4.6.1 Definizione generale del metodo 35
4.6.2 Valutazione del livello di pericolosità sismica 35
4.6.2.1 Potenziali effetti di amplificazione sismica locale 36
4.6.3 Stima del livello di vulnerabilità legato al rischio sismico 37
4.6.4 Stima del livello di esposizione sismica 37
4.6.4.1 Traffico Medio Giornaliero (TGM) e lunghezza della galleria, alternative stradali, e traffico pesante 38
4.6.4.2 Strategicità dell'opera 38
4.6.5 Stima della classe di attenzione sismica 38
4.7 Classe di attenzione idraulica 38
4.7.1 Stima del livello di pericolosità idraulica 39
4.7.2 Stima del livello di vulnerabilità idraulica 42
4.7.3 Stima del livello di esposizione idraulica 43
4.7.4 Stima della classe di attenzione idraulica complessiva 44
4.8 Analisi multi-rischio e definizione della classe di attenzione complessiva 45



GLOBALE E GEOTECNICA	25,3%	55,5%	19,2%	0,0%
LOCALE	92,5%	5,5%	1,4%	0,7%
GEOLOGICA	0,0%	47,9%	35,6%	16,4%
SISMICA	0,0%	47,9%	52,1%	0,0%
STRADALE	47,9%	30,8%	18,5%	2,7%
IDRAULICA	58,9%	32,9%	8,2%	0,0%

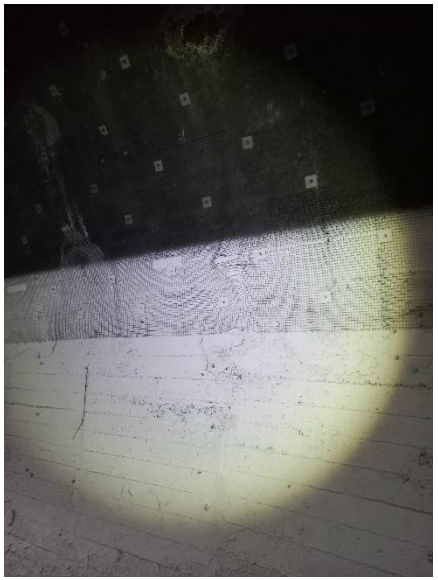
Figura 4.10 – Esempio di rappresentazione sintetica del Livello 2 (Classe di attenzione per ogni ambito per ogni singolo concio e relativo Indice di diffusione)

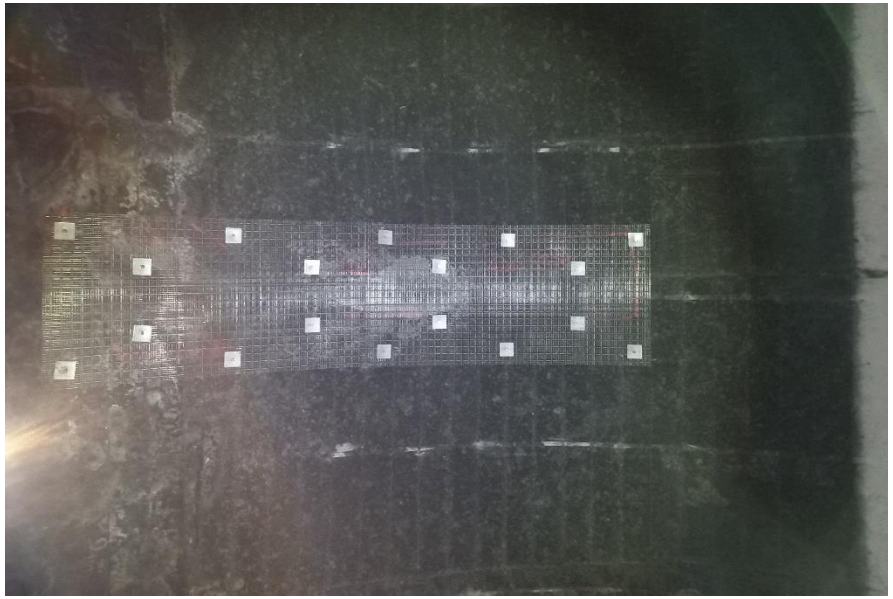
SISTEMI DI PROTEZIONE

5

Quando le condizioni di sicurezza non possono essere garantite con **rischi residui accettabili** con la manutenzione ordinaria, si deve decidere per l'abbandono dell'opera o si deve procedere con i lavori di ristrutturazione per l'adeguamento strutturale (risanamento e messa in sicurezza definitiva). Nelle more di eseguire i lavori di ristrutturazione, la sicurezza dell'esercizio può essere garantita mettendo in opera sistemi di protezione passiva temporanei (rapidi e poco costosi), quali l'installazione di **reti elettrosaldate adeguatamente chiodate al rivestimento/roccia per minimizzare i rischi associati al distacco di porzioni di rivestimento**.







SISTEMI DI PROTEZIONE (2)

5

Altri sistemi di protezione possono prevedere l'installazione di **tubi o canali di drenaggio** al fine di eliminare acqua fluente all'interno della galleria.
Ancora, l'impiego delle **onduline** che deve essere limitato ai soli giunti e per un periodo di tempo limitato (in quanto impediscono l'esame visuale del rivestimento): si tratta di un intervento di natura temporanea nelle more dei lavori di ristrutturazione.





D.M. 247 – 01.08.2022
LLGG – GALLERIE STRADALI (2)

Allegato B –
Catalogo dei difetti

Deterioramento degli schermi di protezione (*onduline*)





Estensione k1	**0,2** (appena presente)	**0,5** (~50% superficie)	**1** (~tutta la superficie)
Intensità k2	**0,2** (bassa)	**0,5** (media)	**1** (alta)

Descrizione

Il deterioramento delle "canalette" (elementi sottili spesso ondulati di rivestimento in metallo zincato, fibrocemento o plastica) si manifesta in diversi modi:

- *Deformazioni;*
- *Danni da urto;*
- *Perforazioni da ossidazione;*
- *Rottura degli ancoraggi per corrosione.*

Elementi rilevabili in ispezione utili a qualificare il difetto

Ispezione visiva per determinare la posizione e lo spazio tra lastra e rivestimento, grado si ossidazione degli ancoraggi e delle canalette, scorretto allineamento o sovrapposizione delle onduline.

Fenomeni di degrado correlati

I difetti associati a questo fenomeno possono essere: infiltrazioni d'acqua sul rivestimento oppure presenza di materiale caduto all'estradosso delle canalette.

D.M. 247 – 01.08.2022
LLGG – GALLERIE STRADALI (3)

5

La frequenza delle ispezioni è graduata come di seguito, anche in funzione della Classe di Attenzione attribuita a ciascuna galleria.

Tabella 7.2 – Frequenza delle ispezioni

Ispezione	*Classe di Attenzione e intervallo ispezione*			
	BASSA	MEDIO BASSA	MEDIO ALTA	ALTA
Iniziale	all'avvio della procedura di cui al Livello 1			
Approfondita	max 6 anni	max 4 anni	max 2 anni	max 1 anno
Periodica ordinaria	max 1 anno	max 6 mesi	max 3 mesi	max 2 mesi
Straordinaria (a seguito di eventi)	in occasione di evento di rilievo			

In presenza di schermi di protezione applicati al rivestimento, o di qualunque altro ostacolo che non consenta la sua ispezione visiva, nel corso della ispezione iniziale e delle prime ispezioni approfondite si dovrà necessariamente, se non già individuate le zone critiche da precedenti indagini già disponibili, procedere alla rimozione temporanea di tutti i pannelli applicati al rivestimento o comunque si adotteranno procedure che consentano si avere una dettagliata cognizione di tutte le porzioni di rivestimento. Per le ispezioni periodiche ed approfondite successive si potrà procedere a rimozioni dei pannelli localizzate, a campione o concentrate in alcune specifiche zone, secondo le indicazioni che saranno in proposito evidenziate in sede di attribuzione della Classe di attenzione di cui la Livello 2 e comunque a giudizio del responsabile di ispezione.

GRAZIE
DELL'ATTENZIONE!

Ing. Elena Di Mare, Ph.D
E-mail: elenadimare2016@gmail.com

Aprile 2026