

**UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PISA**



**Corso di laurea in Ingegneria Meccanica**

**Tesi breve di laurea**

**METODI E MACCHINE PER LA REALIZZAZIONE DI  
SOTTOPASSI STRADALI E FERROVIARI**

**Candidato: Gabriele Pritoni**

**Relatori: Prof. Costantino Carmignani, Prof.ssa Paola Forte**

**A.A. 2007/2008**

Data di laurea: 3/12/2008

Archivio tesi corso di laurea in ingegneria meccanica 22/08

Anno accademico 2007/2008

Consultazione consentita

*Ai miei genitori*

## **Introduzione**

Il crescente aumento del traffico e dei mezzi in circolazione negli ultimi trenta anni ha richiesto e richiede la costruzione di nuove infrastrutture per adeguare la rete viaria. Le nuove realizzazioni però vanno spesso a interferire con quelle esistenti, particolarmente nel nostro paese dove, soprattutto ma non solo in ambito urbano, gli spazi sono congestionati. L'interferenza tra due vie di comunicazione che si incrociano ma non devono o non possono collegarsi tra loro si risolve con la costruzione di un ponte o di un sottopasso, costituito nella quasi totalità dei casi da uno scatolare in cemento armato detto anche "monolite". Questa tesi si propone di elencare e commentare i vari metodi di realizzazione dei sottopassi monolitici stradali e ferroviari destinati al traffico pedonale, ciclabile, automobilistico o ferroviario basandosi su informazioni raccolte in gran parte direttamente sul campo, mancando in letteratura una copertura adeguata.

## **1. Classificazione dei sottopassi**

Si è scelto di effettuare una prima classificazione in base alla posizione in cui il monolite viene costruito: esso può essere realizzato direttamente nella sua posizione definitiva oppure può esservi traslato successivamente da uno spazio libero adiacente, grazie all'azione di martinetti idraulici.

Nel primo caso si parla di sottopasso costruito "in opera", nel secondo di sottopasso costruito "fuori opera" o "per traslazione" o "a spinta".

Una seconda classificazione è stata fatta in base alla presenza o meno di un sostegno della sovrastruttura che viene attraversata.

Ognuna delle quattro categorie individuate si divide infine, in base alla sovrastruttura da attraversare, in sottopassi "stradali" e "ferroviari".

Non è stata fatta alcuna distinzione in base alla destinazione d'uso dei sottopassaggi, essendo le variazioni dovute a un utilizzo piuttosto che a un altro limitate alle dimensioni esterne e allo spessore delle pareti e quindi ininfluenti ai fini della presente trattazione.

## 2. Costruzione del monolite

Il monolite è un'opera in cemento armato tradizionale, la cui realizzazione prevede dunque una prima fase di installazione delle armature, una seconda fase di cassetatura, una terza fase di getto del calcestruzzo e, infine, un congruo tempo di attesa per la maturazione del getto. La durata dell'intero processo varia con le dimensioni del sottopasso, passando da circa 50 giorni per un sottopasso corto ad uso pedonale (sezione esterna di circa 4 x 4 m e lunghezza di circa 30 m) a oltre 100 giorni per un sottopasso lungo ad uso stradale (sezione esterna di circa 12 x 6 m e lunghezza di circa 60 m). Quello che non varia con le dimensioni del monolite è il tempo di maturazione del getto, che è di circa 30 giorni ma che può essere accorciato fino a 10 giorni, aumentando però i costi, con l'utilizzo di particolari additivi detti "acceleranti".

La costruzione del monolite può iniziare solo dopo che sia stata scavata la trincea di varo, ovvero dopo che sia stato rimosso il volume di terreno che il monolite andrà ad occupare. Lo scavo può essere o meno protetto da paratie verticali provvisorie in funzione dello spazio disponibile. Se lo spazio non è limitato si può procedere allo scavo libero, creando le scarpate laterali che risultano inclinate di circa 45° rispetto al piano orizzontale; la larghezza dello scavo varia quindi con la profondità dello stesso. Se, al contrario, lo spazio è limitato, l'uso delle paratie, infisse nel terreno lungo il perimetro dello scavo e prima dell'effettuazione dello stesso, permette di realizzare una trincea con pareti verticali e di larghezza costante.

Le paratie di protezione sono in genere costituite da file di pali, di micropali o di palancole.

Pali e micropali sono infissi nel terreno con macchine perforatrici e riempiti di calcestruzzo e differiscono per il diametro e la modalità esecutiva (§ 6.2.2): fino a 300 mm si parla di micropali, oltre, di pali.



*Fig. 2.1 Trincea di varo realizzata in parte con scavo non protetto e in parte con scavo protetto da micropali*

La palancola è un componente costruttivo in acciaio laminato a caldo o a freddo con incastri, detti “gargami”, maschio-femmina che connessi tra loro durante l’infissione nel terreno (§ 6.2.1), formano una parete continua, detta “palancolato”. La caratteristica principale del palancolato consiste nella resistenza alla spinta laterale e soprattutto nella possibilità di sigillare ermeticamente il gargame con resina tipo in poliuretano per ottenere un palancolato a tenuta.



*Fig. 2.2 Palancolato con travi di rinforzo della paratia*

### 3. Sottopassi realizzati in opera

La costruzione del monolite direttamente nella sua posizione finale è, per forza di cose, interferente con la sovrastruttura da attraversare per tutto il tempo necessario a completare il processo. Dato che le interferenze significano interruzioni o rallentamenti del traffico, ovvero costi di cui si parlerà nella parte relativa agli aspetti economici, è sempre opportuno ridurle al minimo; i metodi innovativi per la realizzazione dei sottopassi vanno tutti in tale direzione e la costruzione in opera è destinata ad essere abbandonata, almeno nei casi in cui si attraversino sovrastrutture di una certa importanza.

#### 3.1 Sottopassi realizzati in opera con sostegno della sovrastruttura

Sostenere la sovrastruttura, sia essa una strada o un piano ferroviario, significa realizzare una struttura capace di sopportare temporaneamente i carichi che normalmente sono sopportati dal terreno sottostante, che può così essere rimosso.

##### 3.1.1 Sottopassi ferroviari

Per sostenere il piano ferroviario e permettere le lavorazioni inferiormente ad esso è necessario costruire un ponte con una certa luce libera. Per farlo è possibile in teoria utilizzare tutti i metodi di sostegno dei binari esposti nella parte riguardante i sottopassi realizzati a spinta (§ 4.1.2); nella pratica si utilizzano soltanto i ponti provvisori, il sistema Essen e, negli ultimi anni, le travi Bologna. Una volta installati questi sistemi si procede allo scavo della trincea. Non potendosi realizzare paratie verticali fra le rotaie, la presenza delle scarpe a  $45^\circ$  fa sì che il rapporto tra le dimensioni dell'opera e la luce che deve essere realizzata sia di  $1:3 \sim 1:4$ .

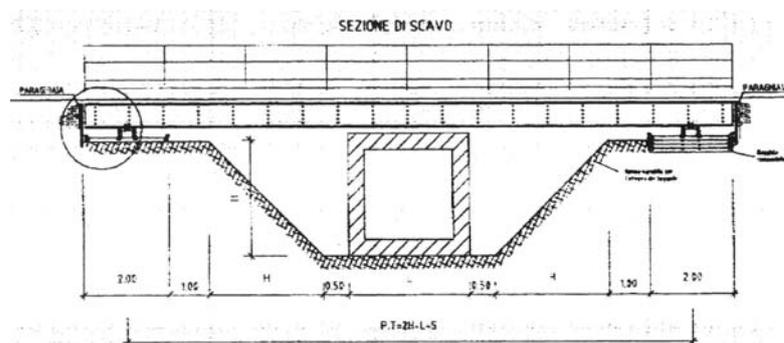


Fig. 3.1 Rapporto tra luce libera e dimensioni del monolite

### 3.1.2 Sottopassi stradali

Non risultano essere stati realizzati sottopassi stradali in opera con sostegno della sovrastruttura, anzi, non esistono in generale metodi consolidati di sostegno della sede stradale. Ne sono stati proposti due (§ 4.1.3): il metodo della piastra antitrascinamento e il metodo La Torretta. Solo il metodo della piastra è stato usato in via sperimentale con due sottopassi a spinta. Può rientrare in questa sezione l'uso dei ponti provvisori militari, cui si ricorre molto di rado per ragioni di costi. A rigore non si tratta di un vero e proprio sostegno della sovrastruttura ma di una sua temporanea sostituzione.

## **3.2 Sottopassi realizzati in opera senza sostegno della sovrastruttura**

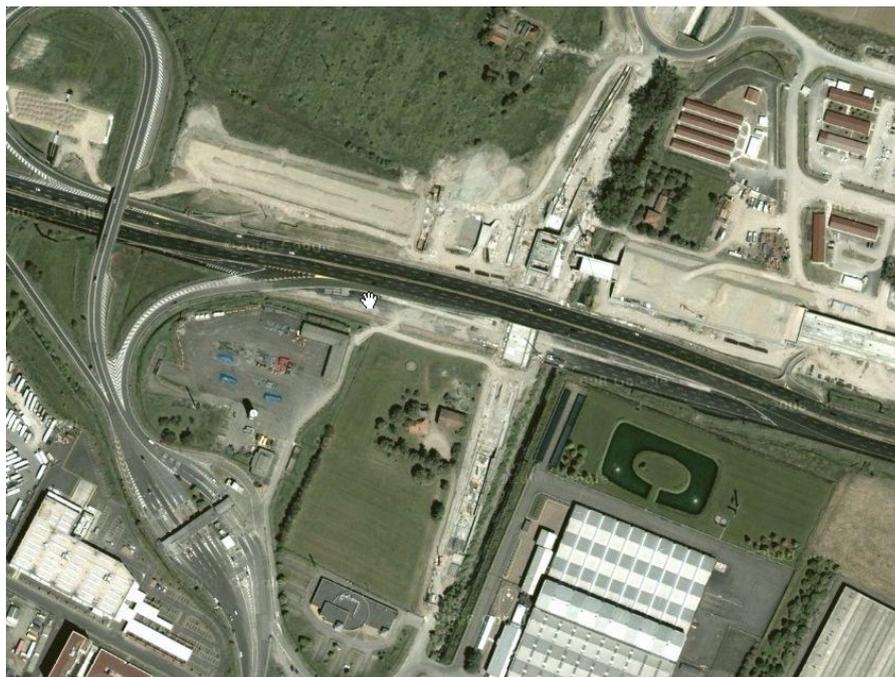
Questa metodologia di lavoro impone un'interruzione o una deviazione della sovrastruttura da attraversare, che nel tratto interessato dall'attraversamento sotterraneo deve essere smantellata.

### 3.2.1 Sottopassi ferroviari

Scavare e operare al di sotto dei binari senza che essi siano sostenuti significa interrompere il traffico ferroviario. Di conseguenza, ove non sia possibile istituire un trasporto alternativo su gomma o una temporanea ma comunque prolungata deviazione del traffico su altri binari, il sottopasso non può essere così realizzato. Questa metodologia di lavoro è dunque rara e confinata a linee pochissimo trafficate o a stazioni e scali industriali dotati di binari in numero tale da poter gestire il traffico anche durante la chiusura di alcuni di essi.

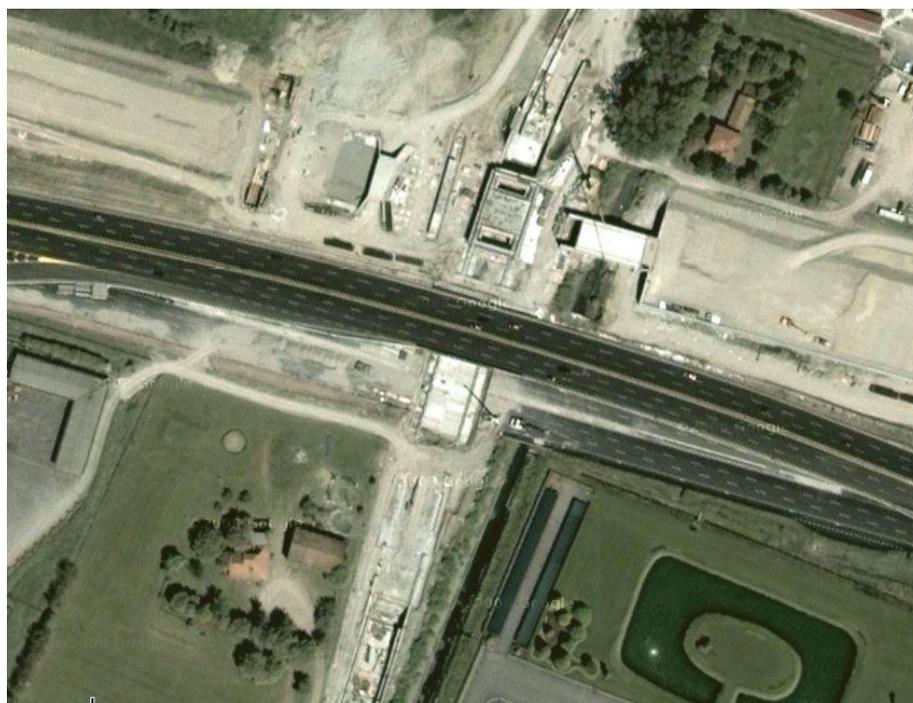
### 3.2.2 Sottopassi stradali

In campo stradale, contrariamente al caso ferroviario, la realizzazione in opera copre la quasi totalità dei casi poiché fino a pochi anni fa mancavano tecnologie in grado di costruire sottopassi stradali fuori opera, ovvero a spinta. Quando non sia possibile chiudere la strada al traffico per due – tre mesi, come già detto a proposito dei sottopassi ferroviari, si utilizza il “metodo delle varici”. Tale metodo consiste nella costruzione di corsie supplementari e nella deviazione su queste del traffico per il tempo necessario alla demolizione delle corsie principali, alla costruzione del monolite e alla ricostruzione delle corsie principali stesse.



*Fig. 3.2 Deviazione completa della sede autostradale nei pressi dell'uscita di Reggio Emilia sull'autostrada del sole A1*

Una volta terminato ciò si provvede alla demolizione delle corsie supplementari e al ripristino del traffico sul tracciato preesistente.



*Fig. 3.3 Particolare della varice realizzata*

La deviazione completa del tracciato implica la costruzione e la successiva demolizione di sei corsie per qualche centinaio di metri ma se non c'è lo spazio libero sufficiente da un lato della strada è necessario realizzare una doppia varice e costruire il sottopasso in due tempi. Supponendo di dover eseguire un sottopasso su un'autostrada con una carreggiata nord e una carreggiata sud e con spazio ai lati sufficiente solo per tre corsie le fasi di lavoro sono le seguenti. Realizzazione della varice Nord, deviazione del traffico in direzione Nord sulla varice e del traffico in direzione Sud sulla carreggiata Nord preesistente; demolizione della carreggiata Sud per il tratto interessante l'attraversamento e costruzione di metà monolite; ricostruzione della carreggiata Sud e realizzazione della varice Sud, poggiante anch'essa sul monolite che deve perciò essere convenientemente allungato in tale direzione; deviazione del traffico verso Sud sulla varice e del traffico verso Nord sulla carreggiata Sud ricostruita; demolizione della varice Nord precedentemente realizzata e della carreggiata Nord per il tratto interessante l'attraversamento e costruzione della seconda metà del monolite; ricostruzione della carreggiata Nord; ripristino del traffico sulle carreggiate Nord e Sud; demolizione della varice Sud. In totale, per una strada a  $n$  corsie per senso di marcia, si devono effettuare  $2n$  realizzazioni e demolizioni di corsie di cui  $n$  riguardanti le varici e dunque, come visto, di una certa lunghezza.

## 4. Sottopassi realizzati a spinta

La realizzazione di un sottopasso a spinta consiste nella costruzione del monolite e nella sua successiva traslazione mediante martinetti oleodinamici. La tecnica utilizzata è concettualmente simile a quella usata per l'infissione orizzontale di tubi in acciaio o in cemento armato ed è infatti nota con il nome di "spingi tubo". Rispetto alla costruzione in opera sono necessarie maggiori opere provvisionali e maggior spazio disponibile ma l'interferenza con la sovrastruttura è limitata al solo tempo di traslazione ed eventualmente al tempo di installazione e rimozione delle opere di sostegno di cui si parlerà in seguito. Le opere provvisionali da realizzare consistono sostanzialmente in una platea di varo e in un muro reggispinta. La platea di varo è una piattaforma in CA, alta circa 50 cm, sulla quale sarà costruito e scorrerà il monolite, da essa separato mediante un foglio in polietilene.



*Fig. 4.1 Platea di varo. Si nota il sistema di suzione dell'acqua*

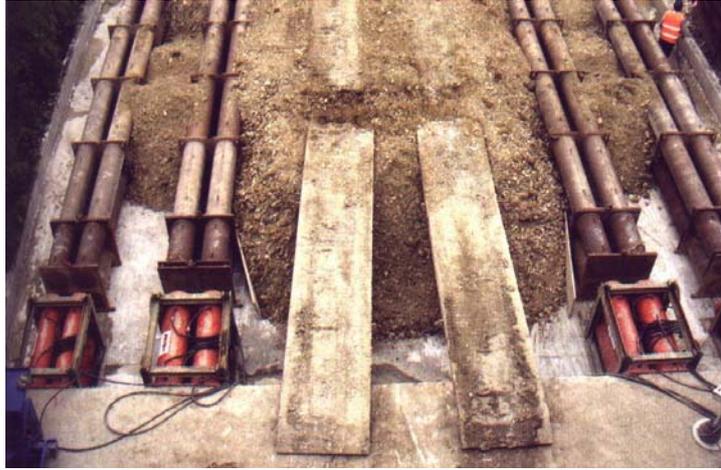
Il muro reggispinta è destinato a contrastare la spinta dei martinetti e deve essere adeguatamente ancorato al terreno mediante pali, micropali o file di palancole. Il suo dimensionamento e il metodo di ancoraggio dipendono dalla cedevolezza del terreno.



*Fig. 4.2 Posizionamento dei martinetti tra il monolite e il muro reggispinta*

I martinetti sono posizionati alla base del monolite e applicano gli sforzi solo sulla soletta inferiore, contrariamente al metodo di infissione dei tubi che prevede una distribuzione dei martinetti e dunque della forza di spinta su tutto il perimetro del tubo. La spinta del monolite avviene mediante la ripetizione di tre fasi: l'estensione del pistone del martinetto che provoca lo spostamento del monolite e del cilindro del martinetto stesso, il ritorno dei pistoni e l'inserzione di uno spessore di avanzamento appoggiato sulla platea, inizialmente tra i martinetti e il muro e successivamente tra i martinetti e un altro spessore, che trasmetta gli sforzi al muro reggispinta.

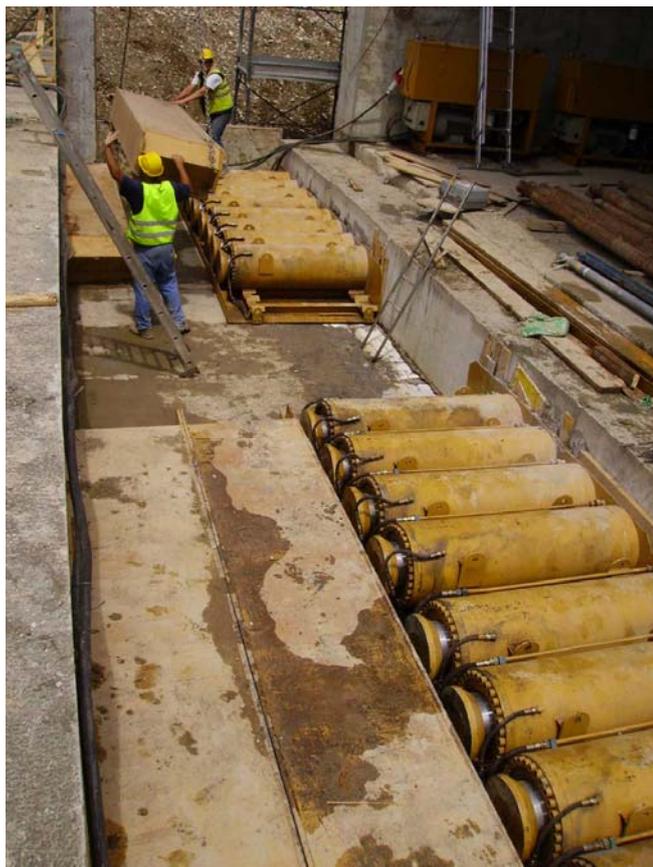
Gli spessori di avanzamento sono costituiti da blocchi metallici di forma cilindrica, nel qual caso se ne utilizza una colonna per ogni martinetto o batteria di martinetti, o a parallelepipedo, nel qual caso se ne utilizzano uno o due per tutti i martinetti.



*Fig. 4.3 Spessori di avanzamento cilindrici*



*Fig. 4.4 Spessori di avanzamento a parallelepipedo*



*Fig. 4.5 Inserimento di uno spessore di avanzamento*

Con un numero adeguato di spessori è possibile coprire tutta la lunghezza di traslazione; la trave costituita dall'insieme degli spessori è sottoposta a carico di punta ed è necessario prevedere degli ancoraggi alla platea che fungano da rompi tratta.



*Fig. 4.6 Serie di spessori di avanzamento*

Se la lunghezza di traslazione supera i 25 - 30m, per non impegnare un numero eccessivo di spessori di avanzamento spesso si preferisce sostituire la trave da essi costituita con un getto in cemento armato detto “di ripresa”, ancorato alla platea di varo, maturato il quale si riprende il processo.



*Fig. 4.7 Armatura del getto di ripresa*



*Fig. 4.8 Getto di ripresa in fase di maturazione*

I martinetti, pistoni idraulici a doppio effetto, sono disposti in batterie e comandati da centraline idrauliche. Le centraline sono costituite da una pompa a ingranaggi azionata da un motore asincrono trifase e garantiscono una mandata di olio, contenuto in un serbatoio, pressoché costante; la velocità di uscita del pistone del martinetto è quindi costante anch'essa e dipende dal numero di martinetti che la centralina serve contemporaneamente. Teoricamente non ci sono limiti al numero di martinetti che una singola centralina può servire, purché sia dotata di un serbatoio di olio sufficientemente grande; in pratica si cerca di limitare il numero di martinetti per ogni centralina per non avere una velocità di uscita dei pistoni troppo bassa. La massima velocità  $v$  si ottiene servendo un solo martinetto, se invece se ne servono  $n$  si otterrà una velocità di  $v/n$ . La forza esercitata da ciascun martinetto è funzione del diametro interno del cilindro e della pressione dell'olio, limitata da una valvola di sicurezza posta nella centralina.



*Fig. 4.9 Centralina asservita a 11 martinetti*

In fase di dimensionamento del sistema di spinta si tiene conto della massa del monolite e si ipotizza un coefficiente di attrito massimo, normalmente intorno al valore di 1,4; dalla massima forza di spinta necessaria si risale al numero di martinetti da installare. Facendo estendere i martinetti liberi, senza che siano inseriti nel sistema di spinta, la pressione dell'olio risulterà prossima allo zero, dovendo vincere soltanto gli attriti delle guarnizioni di tenuta; quando invece i martinetti sono utilizzati nella spinta del monolite, la pressione dell'olio salirà fino a che la forza totale non vincerà quella resistente all'avanzamento offerta dal monolite e solo allora potrà avere inizio la traslazione. Il monolite, sottoposto a un sistema di forze con risultante diversa da zero,

subirà un'accelerazione fino a raggiungere la velocità di estensione dei martinetti, che è circa costante; da quel momento in poi la sua traslazione avverrà anch'essa a velocità circa costante, essendo il sistema di forze agente molto vicino all'equilibrio. Se la resistenza offerta all'avanzamento supera la massima forza che i martinetti possono esprimere il sistema va in stallo, le valvole di sicurezza si aprono e le centraline provocano solo la circolazione dell'olio tra pompa e serbatoio senza che i pistoni possano estendersi.

Durante la traslazione vengono effettuati lo scavo e lo smarino del terreno che si viene a trovare all'interno della parte anteriore del monolite. Si crea un vero e proprio fronte di scavo, di dimensioni pari alla sezione esterna del monolite, che separa il volume di terreno che ancora si trova sotto la sovrastruttura da quello, vuoto, occupato dal monolite.



*Fig. 4.10 Scavo del fronte*

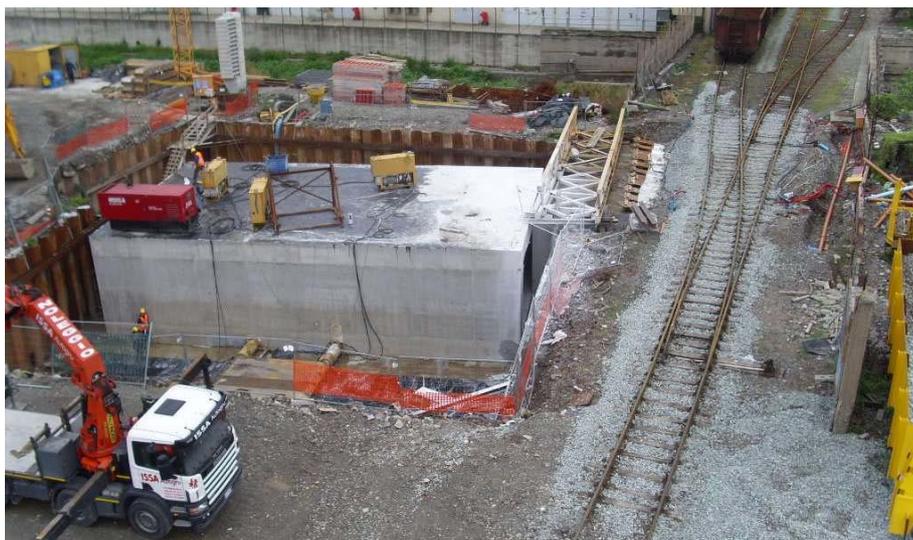
Il fronte di scavo assume un'inclinazione di circa  $45^\circ$  rispetto al piano di scorrimento, ragion per cui i monoliti destinati ad essere spinti presentano sulla faccia anteriore una protuberanza, detta rostro, che rispetta tale inclinazione. Il rostro termina in genere con corte lamiera, dette "di guida", ancorate al getto.



*Fig. 4.11 Parte anteriore del monolite con rostro*

Infiggendo il rostro nel terreno prima di iniziare lo scavo è possibile realizzare un fronte “protetto” dai franamenti, asportando solo il terreno che viene a trovarsi all’interno del tunnel.

La realizzazione di un sottopasso a spinta richiede la disponibilità di spazio all’esterno della sovrastruttura. Qualora lo spazio non fosse sufficiente a contenere tutta la lunghezza del monolite è possibile realizzarlo in due o più conci da costruire in tempi diversi, spingendo a più riprese. E’ possibile anche costruire i conci affiancati allo stesso tempo e poi traslarli lateralmente per proseguire la spinta.



*Fig. 4.12 Sottopasso realizzato in tre conci. Nella foto, il terzo concio durante la traslazione laterale che lo posizionerà in coda al secondo*



*Fig. 4.13 Il terzo concio visto dall'interno del secondo durante la traslazione*

#### **4.1 Sottopassi realizzati a spinta con sostegno della sovrastruttura**

La sovrastruttura può essere sostenuta con opere provvisorie o, più raramente, definitive. Il concetto base, come già detto a proposito dei sottopassi costruiti in opera, è quello di realizzare due appoggi, o sfruttarne due esistenti, e costruire un ponte di sostegno ivi appoggiato per poter scavare e operare liberamente al di sotto di esso. La realizzazione di appoggi veri e propri, per esempio pulvini in cemento armato, pali di fondazione o castelletti di travi in legno, detti anche “baggioli”, è difficoltosa perché sono essi stessi opere al di sotto della sovrastruttura e quindi provocano interferenze con il traffico. Alcune strutture di sostegno possono sfruttare come appoggi direttamente il terreno, risultando meno complesse da installare. Il sostegno può essere diviso in due sottocategorie: sostegno completo e sostegno parziale. Il sostegno completo, l'unico utilizzabile per la realizzazione di sottopassi in opera, consiste nella realizzazione di un ponte vero e proprio, sostenuto unicamente dai due appoggi; è utilizzabile soltanto per tratti di binario o di strada rettilinei o con curve di ampio raggio. Il sostegno parziale, al quale si deve ricorrere oltre una certa luce libera, necessita invece di un terzo appoggio centrale, costituito dal monolite stesso in fase di traslazione e quindi usato solo nel caso di sottopassi a spinta; può teoricamente essere utilizzato anche per tratti di binario o di strada curvi ma le complicazioni che ne derivano sono onerose. Al termine dell'infissione del monolite le opere di sostegno parziali vengono rimosse e viene ripristinato il normale assetto della sovrastruttura.

#### 4.1.1 Sottopassi ferroviari

I sottopassi ferroviari possono essere realizzati sia con sostegno completo che parziale ed esistono vari metodi per sostenere i binari che saranno spiegati in seguito, ciascuno con una propria limitazione sulla luce libera che si può ottenere prima di essere costretti all'uso del monolite come terzo appoggio. Tale appoggio è sfruttato grazie all'uso dalle cosiddette "travi di manovra".



*Fig. 4.14 Travi di manovra pronte all'uso prima della spinta del monolite*

Le travi di manovra vengono realizzate mediante l'accoppiamento di due travi metalliche a doppio T e infisse nel terreno, in numero dipendente dal metodo di sostegno e dalla luce libera del sottopasso, subito al di sotto della struttura di sostegno e prima della traslazione del monolite. La base superiore delle travi sostiene la struttura mentre la base inferiore può contare su appoggi. Dalla parte opposta al monolite da traslare, mediante interposizione di una piastra, essa è appoggiata su micropali; dalla parte del monolite, mediante interposizione di rulli di scorrimento, essa è appoggiata sulla soletta superiore del monolite stesso.



*Fig. 4.15 Travi di manovra e rulli di scorrimento prima dell'inizio della spinta*

Con l'avanzare della traslazione le travi di manovra trasferiscono gli sforzi che le traversine scaricavano sul terreno sottostante direttamente sul monolite, attraverso i rulli di scorrimento che vengono aggiunti. Se il piano ferroviario consta di più di due binari, due soli appoggi (micropali e monolite) per le travi di manovra non sono sufficienti ed è necessario installarne di intermedi. Gli appoggi intermedi sono costituiti da pali in legno che vengono conficcati verticalmente nel terreno, fra le traversine o fra i binari, allineandoli alla traccia della trave di manovra che vi poggerà sopra. Con il procedere della spinta, man mano che i pali vengono incontrati si effettua il loro tranciamento. Poiché durante la traslazione il monolite può variare il suo assetto altimetrico anche di alcuni cm, è necessario utilizzare dei cunei realizzati in legno da interporre tra le travi di manovra e la struttura di sostegno o tra le travi di manovra e il monolite per correggere l'assetto del binario. Tale operazione di correzione è svolta manualmente con l'ausilio di mazze.



*Fig. 4.16 Travi di manovra. Regolazione dell'assetto del binario*

Per poter utilizzare le travi di manovra è necessario realizzare la soletta superiore del monolite a ridosso della parte inferiore della struttura di sostegno dei binari, per poterla usare come appoggio per i rulli di scorrimento. La sezione del monolite deve essere quindi allungata verso l'alto indipendentemente dalla quota necessaria alla base del sottopasso.

#### 4.1.2 Metodi di sostegno

##### ***4.1.2.1 Fasci di rotaie***

Sono costituiti da un numero variabile di rotaie affiancate, generalmente della misura di 18 m o di 36m, con i funghi disposti in maniera alternata, che vengono collegate assieme e con le traverse mediante delle staffe ogni 1,5 m circa. Per la loro installazione è necessario, per ogni punto di collegamento che si deve realizzare, togliere il pietrisco (chiamato "ballast") fra le traverse sotto le rotaie per inserire una corta trave trasversale, costituita anch'essa da un pezzo di rotaia. Successivamente si depositano sulle traversine i fasci di rotaie e si collegano ai pezzi di rotaia trasversali sottostanti per mezzo di particolari staffe telescopiche, capaci di accogliere da 2 a 6 rotaie a seconda della rigidità del complesso che sia necessario ottenere.



*Fig. 4.17 Installazione dei fasci di rotaie*

I fasci appena descritti sono detti di tipo “Garutti” e sono noti come fasci “superiori”. Esistono, anche se di uso assai raro, anche dei fasci “inferiori”, che vengono posti sotto il binario e che possono essere formati da due ordini di rotaie (fasci inferiori doppi); per la loro installazione è necessaria la temporanea rimozione del binario. I fasci superiori si installano utilizzando delle “Interruzioni Programmate di Orario” (IPO) ovvero temporanee interruzioni del traffico ferroviario che l’ente proprietario dei binari ricava all’interno del normale orario di circolazione, della durata di due - tre ore. Su un binario armato con i fasci di rotaie i convogli devono passare a una velocità massima di 30 km/h.



*Fig. 4.18 Fasci di rotaie tipo “Garutti” in opera*

La luce libera massima che questo sistema di sostegno garantisce è di circa 4 m, oltre i quali è necessario l'utilizzo degli appoggi supplementari costituiti dalle travi di manovra. I fasci di rotaie non possono essere utilizzati in presenza di deviatori dato che in tali casi le rotaie sono situate nella parte centrale delle traversine e non lasciano spazio sufficiente.

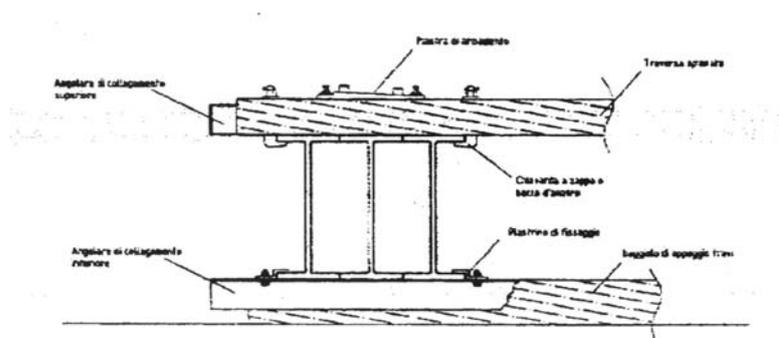
#### **4.1.2.2 Ponti provvisori**

I ponti provvisori, insieme con i fasci di rotaie, sono stati da sempre utilizzati dalle FS per la realizzazione di opere sotto i binari. Costano di travi d'acciaio, sciolte o accoppiate (travi gemelle), poste su appoggi realizzati da blocchi in conglomerato cementizio, gettati in opera o preferibilmente prefabbricati, o metallici. E' possibile utilizzare anche dei baggioli posti sotto il binario e realizzati in cemento armato o, in alcuni casi, in legname tenuto assieme da staffe metalliche.

Il ponte realizzato con travi sciolte è costituito da due coppie o due terne di travi laminare affiancate ed impacchettate tramite collegamenti costituiti da angolari a L 90x90 o 100x100 muniti di piastrine di stringimento posizionate sia sul lato tavolette superiore che su quello inferiore con passo di circa 1 m.

I collegamenti devono essere opportunamente controventati sul piano orizzontale e devono prevedere, specialmente per le travi più lunghe, inserimenti di crociere verticali tra le coppie o terne nonché l'inserimento di troccoli di legno duro a contrasto tra le ali delle travi affiancate per impedire cedimenti differenziati.

Sulle travi sono appoggiate le traverse, da scegliere di ugual spessore e opportunamente spianate, da ancorare alla tavoletta superiore delle travi con chivarde a zeppa o a becco d'anatra.



*Fig. 4.19 Travi sciolte, sezione*

Le travi gemelle sono costituite da due coppie di travi metalliche laminare di tipo HE, unite da collegamenti e controventi con giunzioni bullonate. Ciascuna coppia è costituita da due travi collegate da calastrelli, sui quali, a seconda della tipologia, possono essere collegati:

- i longheroni in legname sui quali fissare le piastre di armamento, ovvero le piastre che servono al bloccaggio della rotaia; tale configurazione consente tutte le possibilità di utilizzazione, in retta e in curva, permettendo di posizionare opportunamente le piastre stesse per mantenere l'isolamento elettrico del circuito di binario, che serve a trasmettere i segnali elettrici destinati al segnalamento;

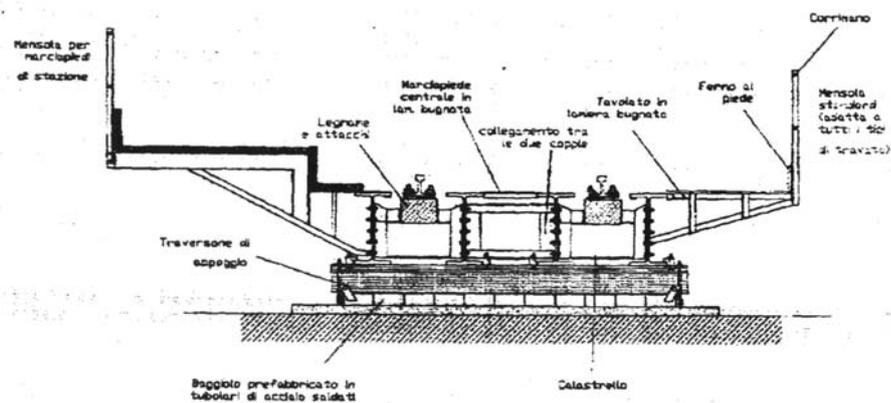


Fig. 4.20 Travata gemella con longheroni in legname, utilizzo in linea retta

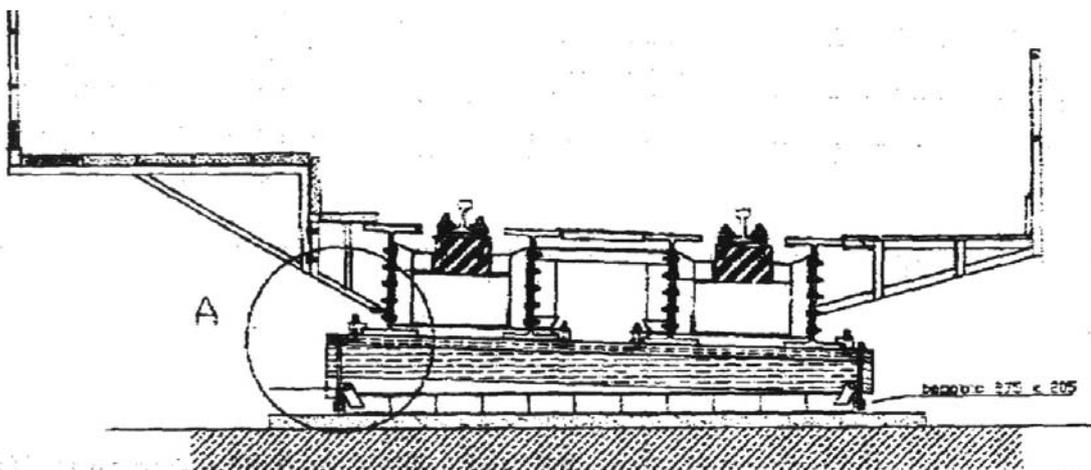


Fig. 4.21 Travata gemella con longherone in legno e sopraelevazione di 5 cm per utilizzo in curva

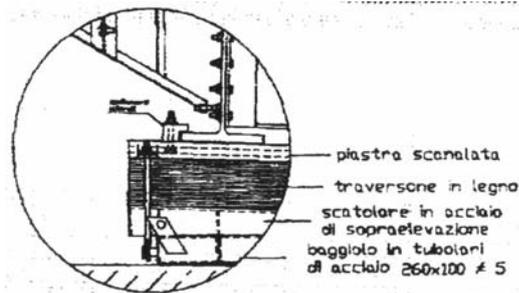


Fig. 4.22 Particolare A

- direttamente le piastre di armamento, munite di piastrine isolanti, per mantenere l'isolamento del circuito di binario; tale configurazione prevede l'utilizzo solo con binario in retta; per eliminare tale limitazione, su molte di tali travate, denominate HS, è previsto sull'altro lato dei calastrelli l'inserimento di legname longitudinale per consentirne l'utilizzazione anche in curva

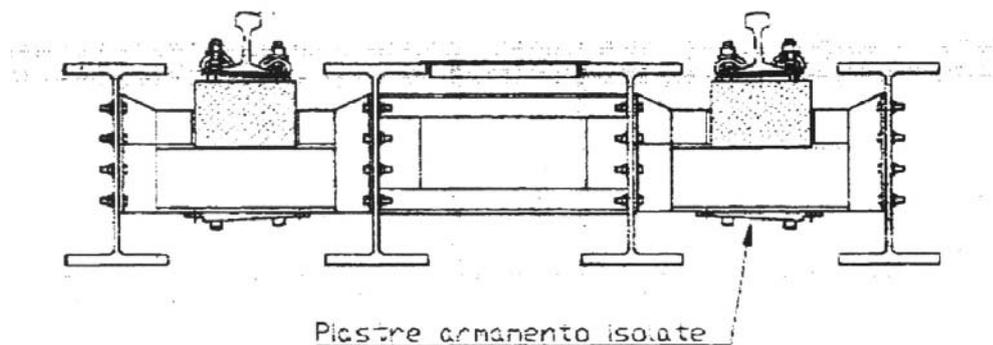


Fig. 4.23 Travata gemella di tipo HS posizionata per l'utilizzo in curva. Per l'utilizzo in rettilineo la travata viene semplicemente ribaltata

Le due coppie sono a loro volta unite tramite collegamenti bullonati sulle anime delle due travi interne e da controventi per contenere le sollecitazioni sul piano orizzontale.

L'impiego di queste strutture provvisorie consente di raggiungere luci fino a 30 m nel caso delle travi gemelle e fino a 25 m nel caso delle travi sciolte e permette velocità di percorrenza dei convogli da 30 km/h a 50 km/h.. Non è previsto l'utilizzo congiunto con le travi di manovra e, come per i fasci di rotaie, anche in questo caso è impossibile l'utilizzo dei ponti provvisori in presenza di deviatori. Anche le curve a raggio stretto risultano non sostenibili con tali sistemi.

Le travi gemelle sono utilizzate, oltre che per il sostegno provvisorio dei binari, anche per la realizzazione di ponti definitivi, per luci tra i 10 m e i 25 m.



*Fig. 4.24 Prove di carico su un ponte definitivo realizzato con travi gemelle*

Per il montaggio dei ponti provvisori è necessaria la rimozione del binario o, per le luci minori, almeno lo smontaggio delle traversine.

#### **4.1.2.3 Ponti Bologna**

Il ponte Bologna è costituito da un'unica trave scatolare in acciaio e costituisce un'alternativa all'uso delle travi gemelle. La sua utilizzazione è relativamente recente, essendo le prime opere realizzate con tale sistema degli anni '90.



*Fig. 4.25 Ponte Bologna con piastre di armamento*

Con il ponte Bologna è possibile coprire luci fino a 20 m, e, come per i ponti provvisori, non è possibile aumentare la lunghezza dei binari da sostenere inserendo le travi di manovra. Gli appoggi del ponte Bologna sono analoghi a quelli dei ponti provvisori, e cioè costituiti da pulvini in cemento armato o da baggioli.

L'installazione del ponte richiede la rimozione completa del binario e consente una velocità di percorrenza dei convogli di 80 km/h.



*Fig. 4.26 Ponte Bologna provvisorio in configurazione a doppio binario*

Sempre in analogia con i ponti provvisori, è possibile utilizzare i ponti Bologna per realizzare strutture definitive adatte al passaggio dei treni in piena velocità di linea. Permangono le limitazioni all'uso date dalla presenza di scambi e deviatori e di curve a raggio stretto.

#### ***4.1.2.4 Travette***

Il sostegno del binario con il metodo delle travette prevede l'utilizzo di due travi HE per ogni rotaia che vengono poste ai lati della rotaia stessa e collegate tra loro, negli interstizi fra le traversine, attraverso delle corte travi IPE, dette appunto travette.



*Fig. 4.27 Binario armato con travette*

Il collegamento delle travette trasversali alle travi longitudinali è effettuato mediante bullonatura; le travette portano nel centro una piastrina di armatura che serve per collegarle al binario.



*Fig. 4.28 Porzione di binario armato con travette*

Le prestazioni di questo sistema, nato intorno alla metà degli anni '90 all'interno delle FS, sono paragonabili a quelle dei fasci di rotaie.

#### ***4.1.2.5 Travi Essen***

Il Sistema Essen nasce in Germania alla fine degli anni ottanta e trova le sue prime applicazioni in Italia a seguito della nota ISC 234005893 del 14/06/95, con la quale le Ferrovie dello Stato ne convalidano l'impiego sul nostro territorio nazionale. Per la

steccatura del binario si utilizza un elemento strutturale fondamentale denominato “Ponte Essen”, costituito fondamentalmente da due strutture di sostegno simmetriche, ciascuna formata da quattro travi portanti in acciaio aventi sezione non standard a doppio T. L’altezza della sezione è di circa 20 cm, la lunghezza della trave è di circa 12 m. Le travi, riunite a coppie, sostengono la singola rotaia per mezzo di un complesso di dispositivi, denominati selle, poste trasversalmente alla rotaia stessa, tra una traversa e l'altra.



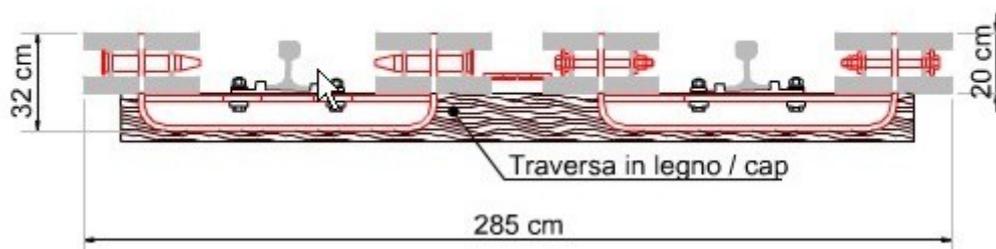
*Fig. 4.29 Posa in opera delle selle*

Il collegamento delle selle alle coppie di travi avviene attraverso spinotti calibrati, inseriti nei corrispondenti fori passanti previsti nelle alette delle "selle" e nell'anima delle travi longitudinali, mantenuti in posizione da ganasce fissate per mezzo di bulloni di serraggio.



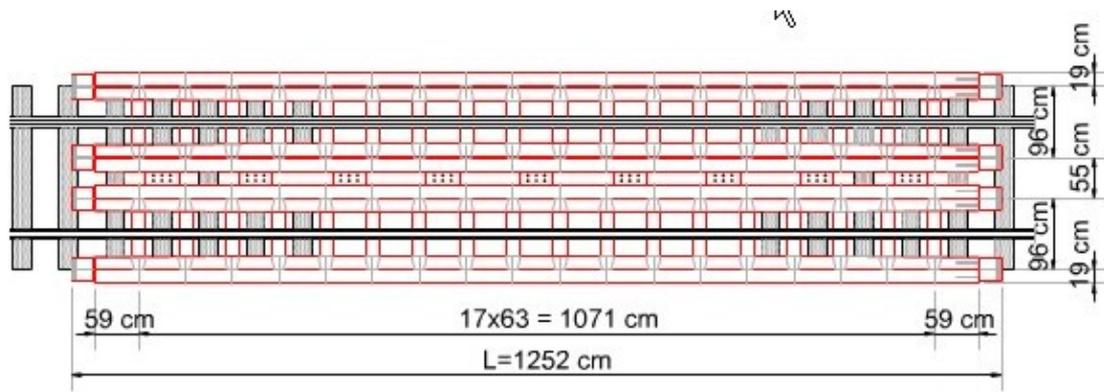
*Fig. 4.30 Posa in opera di una trave Essen. Sono visibili i fori per gli spinotti*

L'unione tra rotaia e "sella" è assicurata con l'impiego di dispositivi di fissaggio (piastre UNI 50/60 e relativo materiale di armamento) utilizzando appositi fori a forma di asola presenti sul piano di appoggio della sella, che consentono l'inserimento del "Ponte Essen" anche in presenza di tratti di binario in curva. L'isolamento elettrico del circuito di binario è ottenuto mediante l'interposizione di apposita "tavoletta" isolante in bachelite tra rotaia e piastra.



*Fig. 4.31 Sezione trasversale di una coppia di binari armati con travi Essen*

Il "Ponte Essen" trova appoggio su una rigida putrella sostenuta da un plinto di fondazione che corre parallelo alla direzione di spinta e che consente di trasferire il carico dei convogli al terreno con pressioni dello stesso ordine di grandezza di quelle trasmesse dalle traversine. La realizzazione del plinto e la posa in opera della putrella sono entrambe operazioni preliminari da effettuarsi in regime di IPO.



*Fig. 4.32 Vista planimetrica*

Trasversalmente le due strutture simmetriche di sostegno sono collegate da appositi piastroni bullonati presenti sulle coppie di travi interne.

L'ingombro verticale di tutta la struttura Essen è di 32 cm, tra il piano del ferro ed il piano di appoggio delle traverse, così da rispettare i limiti di sagoma bassa dei convogli in qualsiasi geometria di binario.

Il montaggio del "Ponte Essen" avviene anch'esso durante le IPO e quindi ha un'interferenza con il traffico ferroviario paragonabile a quella dei fasci di rotaie superiori. La struttura realizza un sostegno completo, ovvero un ponte vero e proprio semplicemente appoggiato, per luci fino a 6,20 m. Per luci maggiori è necessario l'uso di più ponti e delle travi di manovra, nel qual caso si parla di "Sistema Essen".

L'installazione del "Sistema Essen" prevede come prima operazione l'infissione nel corpo del rilevato ferroviario di pali in legno, in regime di IPO. Detti pali, normalmente lunghi 5 metri e di diametro 300 mm, vengono battuti in punti singolari lungo ciascuna trave di manovra allo scopo di costituirne appoggio verticale; l'infissione può essere evitata solo per quei terreni che presentano valori di stabilità e portanza elevati (valori propri o ottenuti da interventi di consolidamento). La presenza dei pali in legno determina per le travi di manovra uno schema statico di trave continua su "n" appoggi cedevoli elasticamente; la costante elastica è in genere rapportata all'abbassamento in funzione di un assegnato numero di colpi della massa battente. In tali condizioni di impiego le travi di manovra possono estendersi teoricamente indefinitamente nella direzione trasversale senza necessitare di altre opere di fondazione all'estremità. I pali sono battuti per tutta la lunghezza prefissata o sino a rifiuto.



*Fig. 4.33 Pali in legno per l'appoggio delle travi di manovra*

Inoltre i pali in legno costituiscono un elemento di consolidamento dello scavo al fronte di avanzamento, riducendone per costipamento gli eventuali fenomeni di instabilità locale sempre pericolosi per le sovrastanti strutture di sostegno. Successivamente vengono montati i ponti in serie su ciascun binario da sostenere; il numero impiegato dipende dalla larghezza dell'attraversamento e dalla direzione di spinta rispetto ai binari. I ponti poggiano, nella parte interessata dallo scavo in avanzamento, sulle travi di manovra, in acciaio del tipo HEB 400 e di lunghezza variabile in funzione della piattaforma, disposte ad un interasse non superiore in genere a 2,5 m. La disposizione delle travi di manovra è sempre ortogonale al binario e consente di ottenere, anche nel caso di monoliti con asse deviato rispetto alla retta ortogonale al binario, una griglia ortogonale di membrature (longherine del ponte ESSEN e travi di manovra) orientato lungo l'asse del binario.



*Fig. 4.34 Installazione delle travi di manovra*

Le longherine del ponte appoggiano sulle travi di manovra attraverso un supporto in legno che viene opportunamente vincolato sia alla trave di manovra tramite angolari sia alla piastra di attacco della rotaia a mezzo di tradizionali caviglie. Dovendo necessariamente essere perfettamente complanare il sistema delle travi di manovra, si agisce sulla forma e sulle altezze dei supporti in legno in corrispondenza di ogni punto di appoggio al fine di compensare eventuali differenze di quota. Esternamente allo scavo, i ponti trovano appoggio sul rilevato attraverso le esistenti traverse. Le travi di manovra sono inoltre vincolate nel piano orizzontale a mezzo di travi di controvento (travi di vincolo) caratterizzate da elevata rigidità flessionale. Dette travi, normalmente del tipo HEB 1000 o, se necessario, reticolari, vengono disposte alle due estremità delle travi di manovra e contrastate all'esterno mediante opportuni vincoli in grado di assorbire la forza orizzontale che agisce sulla struttura di sostegno conseguente allo scorrimento delle travi di manovra sulla soletta del monolite in avanzamento. I vincoli esterni di norma sono costituiti da gruppi di pali verticali (pali in legno F300 lunghi 7,0 m) sollecitati in testa da forza orizzontale.



*Fig. 4.35 Sistema Essen con travi di vincolo reticolari*

Nel caso di grandi attraversamenti, laddove occorre contrastare elevate forze di piano, sono presenti più travi di controvento ed i vincoli esterni possono anche realizzarsi mediante fondazioni su micropali. Durante la spinta, a seguito dello scavo in avanzamento, i pali in legno vengono via via tolti d'opera: le travi di manovra, quindi, da una parte trovano appoggio e scorrono su delle travi slitta fissate - parallelamente ai binari - sulle controtravi di manovra e sulla soletta del monolite, dall'altra appoggiano sui pali in legno ancora presenti e non interessati dallo scavo.



*Fig. 4.36 Pali in legno messi in luce dallo scavo durante l'avanzamento*

Opportuni dispositivi di compensazione (dispositivi di scorrimento), interposti tra le travi di manovra e le travi slitta, consentono attraverso l'inserimento di cunei e piatti in acciaio di compensare durante la traslazione gli inevitabili spostamenti verticali del monolite rispetto la direzione di progetto, analogamente ai cunei in legno descritti in precedenza (§ 4.1.1). Detti dispositivi sono liberi di scorrere sulle travi slitta qualora la direzione di spinta non risulti ortogonale all'asse dei binari.

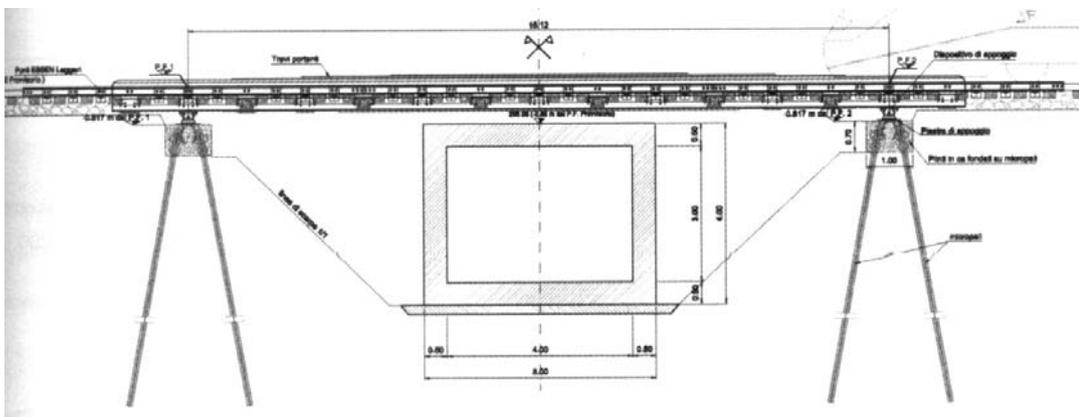
La sperimentazione eseguita all'Istituto di Scienza delle Costruzioni dell'Università di Catania nel 1995 ha omologato il "Ponte Essen" per una velocità di transito dei convogli ferroviari di 80 km/h mentre se si utilizza il "Sistema Essen" con le travi di manovra la velocità varia con la lunghezza del tratto di binario sostenuto pur rimanendo sempre maggiore di quella concessa dai fasci di rotaie.

In presenza di scambi, non essendo manifestamente possibile l'inserimento del "Ponte Essen", si prevede la progettazione e la costruzione di specifiche strutture in funzione delle caratteristiche del deviatoio e della posizione di questo rispetto all'attraversamento. Pertanto, ogni applicazione in presenza di scambi è da ritenersi unica e richiede un'unica struttura di sostegno, non ripetibile in altre condizioni. La struttura per deviatoio - stante la specificità dell'applicazione - è concepita per lavorare su portate non superiori a circa tre metri; essa trova quindi utilizzo nell'esecuzione d'interventi di medie e grandi dimensioni laddove è previsto l'utilizzo delle travi di manovra.



*Fig. 4.37 Sistema Essen in presenza di deviatoio. Sono visibili le travi di manovra*

Nel 2007 è stato omologato il “Ponte Essen Gemellato”, da utilizzarsi per sottopassi in opera, costituito da due ponti Essen in successione sostenuti da due travi maestre, gemelle, disposte parallelamente ai binari. Le due travi portanti, estradossate rispetto al piano del ferro, scaricano su appoggi fissi del tipo a disco elastomerico confinato e forniscono il sostegno alla passerella Essen. Come nel caso del “Ponte Essen” standard, le rotaie sono sorrette a loro volta da selle metalliche interposte tra le traversine e vincolate alla passerella. La passerella si appoggia, infine, su traverse in acciaio disposte a interasse longitudinale di 2,5 m che a loro volta sono sostenute dalle travi portanti. Si possono ottenere luci fino a circa 17 m.



*Fig. 4.38 Schema del “Ponte Essen gemellato”*



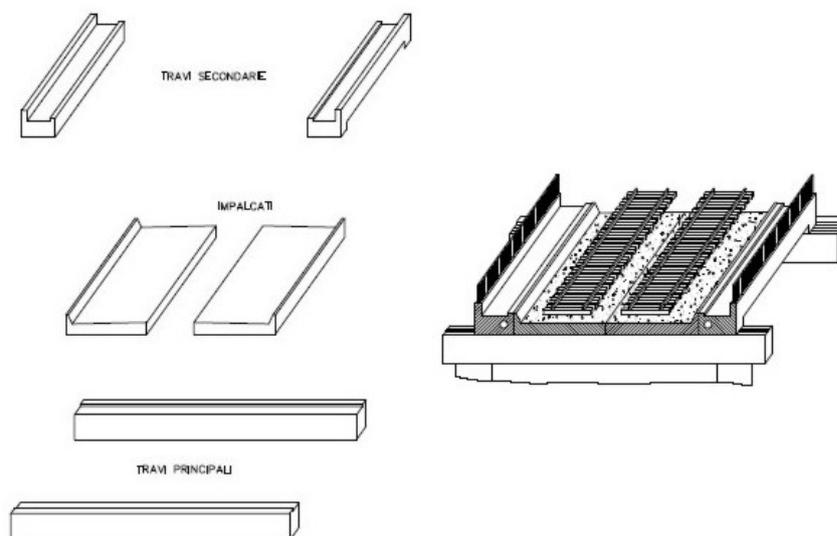
*Fig. 4.39 “Ponte Essen Gemallato” presso la stazione di Cernusco – Lombardone (MI)*

La larghezza della struttura ne confina l’utilizzo su linee dotate di un solo binario.

#### 4.1.2.6 La Torretta

Il metodo proposto dall'Ing. La Torretta prevede il sostegno dei binari con una struttura definitiva che non viene rimossa al termine dei lavori e che costituisce la parete superiore del sottopasso, che dunque in questo caso non è definibile, a rigore, monolitico.

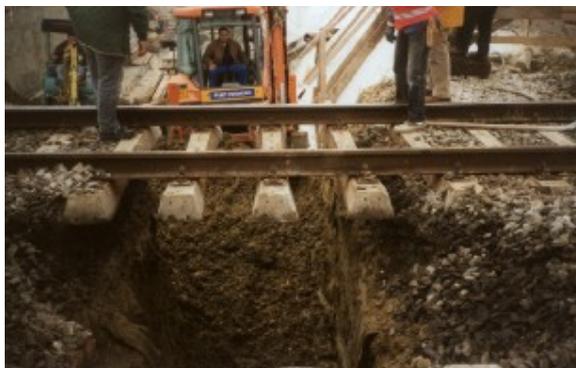
La struttura è realizzata con impalcati in cemento armato prefabbricati ed è utilizzabile su linee con al massimo due binari. Gli impalcati si appoggiano su due travi orizzontali che a loro volta si appoggiano ciascuna su due pali portanti in cemento armato infissi nel terreno tramite trivellazione e tubo camicia. Ai lati degli impalcati vengono appoggiate due travi secondarie destinate a sostenere i parapetti.



*Fig. 4.40 Strutture prefabbricate e schema di montaggio*

La prima operazione che si compie è l'infissione dei pali portanti, esternamente alla sede dei binari in modo da non interferire con il traffico ferroviario. I pali possono essere sostituiti ciascuno da quattro micropali del diametro di 300 mm opportunamente collegati fra loro in sommità. Successivamente, interrompendo il traffico sul primo binario, quello dalla parte del monolite, si realizzano gli alloggi per le travi principali, di dimensioni di circa 1 m x 1 m e lunghezza adeguata, scavando in orizzontale al di sotto del piano ferroviario; tali alloggi sono costituiti da un cassone all'interno del quale sarà inserita la trave e che sorregge il binario stesso. Inserito il cassone il traffico viene riaperto e interrotto sul secondo binario, sotto il quale si scava semplicemente per

realizzare gli alloggi. La trave a questo punto viene varata con sola interruzione del secondo binario, essendo il primo sostenuto dai cassoni.



*Fig. 4.41 Alloggio per la trave principale*

Una volta installate le travi e fissate che siano ai pali di sostegno si procede al taglio di uno dei due binari e alla posa in opera del primo impalcato; sull'impalcato viene quindi depositato il ballast e ricollocato il tratto di binario precedentemente rimosso.



*Fig. 4.42 Posa in opera di un impalcato*

La stessa operazione è ripetuta successivamente per il secondo binario, dopodiché la linea ferroviaria non subisce più interferenze.



*Fig. 4.43 Cantiere dopo la posa degli impalcati. Sono visibili le travi principali*

Prima di procedere allo scavo al di sotto degli impalcati e costruire le pareti verticali del sottopasso è necessario proteggere le pareti laterali con paratie di micropali orizzontali, per evitare franamenti. Una volta infissi i micropali si può scavare liberamente e realizzare le pareti in sottomurazione.



*Fig. 4.44 Realizzazione delle pareti laterali in sottomurazione. E' visibile in alto una trave principale*

### 4.1.3 Sottopassi stradali

Un sostegno del piano stradale può essere solo di tipo completo, mancando la possibilità di utilizzare le travi di manovra del caso ferroviario. La strada non ha infatti appoggi sul terreno di tipo discreto come le traversine ferroviarie né una rigidità longitudinale paragonabile a quella dei binari. Rientrano in questa categoria soltanto due metodi, dei quali solo uno è stato utilizzato in due occasioni.

#### ***4.1.3.1 Metodo “La Torretta”***

Il metodo “La Torretta” è stato solo proposto ma non mai utilizzato in campo stradale. Le modalità di esecuzione sono perfettamente analoghe al caso ferroviario (v), per cui richiedono delle interruzioni del traffico per l’installazione delle travi e degli impalcati.

#### ***4.1.3.2 Metodo della piastra antitrascinamento***

Il metodo della piastra antitrascinamento è stato utilizzato in via sperimentale alcuni anni or sono per due sottopassi sull’autostrada del sole A1, nei pressi di Bologna e nei pressi di Orte.

La tecnica può essere impiegata solo nei casi in cui l’estradosso del monolite rasenti il piano stradale e siano presenti più di una corsia per senso di marcia. Il metodo si basa sull’utilizzo di una piastra antitrascinamento.

Una volta terminate le operazioni preparatorie, quando il monolite è pronto alla spinta si interrompe il traffico sulle corsie lato monolite e lo si devia su quelle opposte, da cui la necessità di avere più corsie per senso di marcia.

Il monolite viene traslato fino a raggiungere la metà della carreggiata, demolendo le corsie soprastanti. A fine avanzamento viene posizionata sull’estradosso del monolite, previa stesa di grasso, la piastra antitrascinamento, costituita da un reticolo di travi saldate su lamiera.



*Fig. 4.45 Piastra antitrascinamento allestita sotto il piano stradale*

La piastra viene collegata, mediante tiranti regolabili, a una trave di ancoraggio a sua volta fissata al terreno con micropali o palancole.



*Fig. 4.46 Tiranti regolabili di collegamento della piastra antitrascinamento alla trave reticolare ancorata a terra*

Dopo aver riempito la piastra con conglomerato bituminoso e aver steso l'asfalto il traffico viene riaperto e deviato completamente sulle corsie appena ripristinate. La spinta a questo punto può procedere nella seconda metà della sede stradale, che viene anch'essa demolita, mentre il monolite scivola al di sotto della piastra antitrascinamento e del traffico soprastante.



*Fig. 4.47 Manto stradale steso sopra la piastra antitrascinamento*

Al termine della spinta vengono ripristinate le corsie appena demolite e il traffico può riprendere normalmente. La procedura descritta, in due fasi, è valida per strade a due corsie per senso di marcia; per strade con numero di corsie maggiore è possibile che l'avanzamento del monolite richieda più fasi e dunque diverse deviazioni di traffico.

#### **4.2 Sottopassi realizzati a spinta senza sostegno della sovrastruttura**

Ove sia consentito interrompere il traffico stradale o ferroviario per un periodo limitato di tempo tale da non consentire la costruzione del sottopasso in opera ma sufficiente ad effettuare la traslazione si può ricorrere a questa tecnica: lateralmente alla sovrastruttura, da entrambe le parti, si costruiscono rispettivamente una platea di varo, un muro reggispinta e metà del monolite. Successivamente si demolisce metà della sovrastruttura, si spinge la metà del monolite corrispondente nella sua posizione definitiva e si ripristina la strada o le ferrovie. Nel frattempo il traffico viene deviato sulla carreggiata o sul binario rimasti intatti. Si ripete poi l'intera sequenza per l'altra parte e si ottiene il lavoro finito.

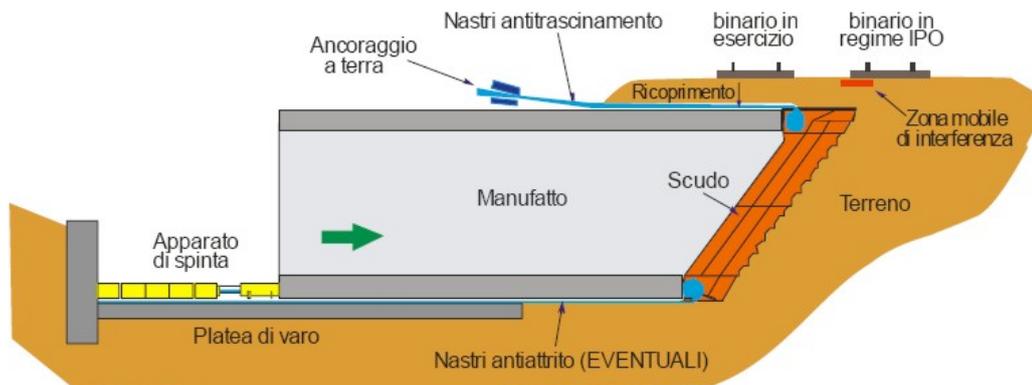


*Fig. 4.48 Metà di monolite pronta alla spinta. Si nota il ricoprimento molto basso*

Se l'infissione del monolite deve essere effettuata con il mantenimento dell'esercizio della sovrastruttura si ricorre alla Metodologia UCS spiegata di seguito.

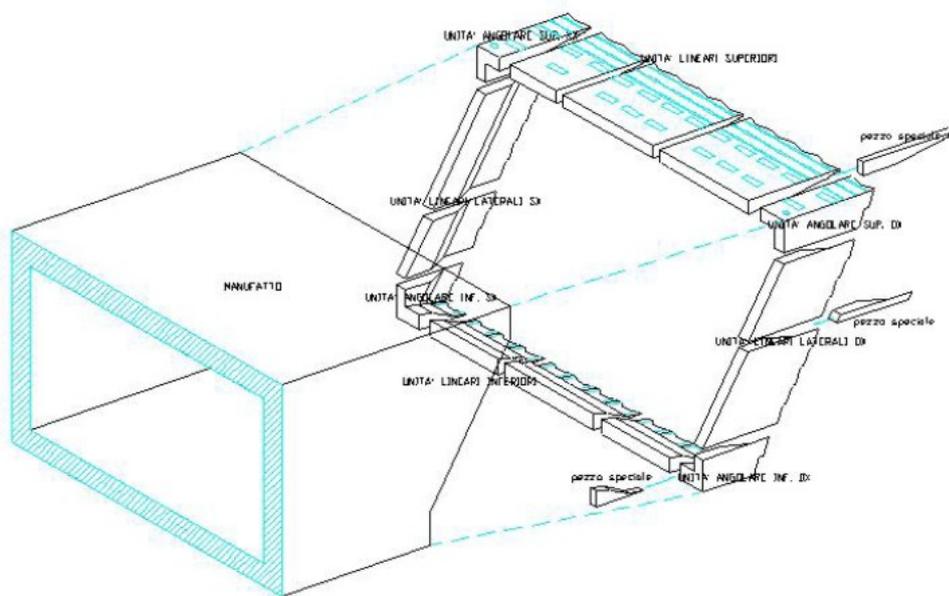
#### 4.2.1 Metodologia UCS

La metodologia UCS, utilizzabile sia per sottopassi ferroviari che stradali, è attualmente l'unico sistema utilizzato con successo per la realizzazione di sottopassi a spinta senza sostegno della sovrastruttura. Nata pochi anni or sono, deriva dallo sviluppo di una precedente tecnologia denominata "Istrice", utilizzata solo in campo ferroviario e adatta a sottopassi di modeste dimensioni. Gli elementi fondamentali che caratterizzano la metodologia UCS sono due: uno scudo metallico che viene posto anteriormente al manufatto e una serie di nastri antistriscinamento in lamiera.



*Fig. 4.49 Schema di funzionamento della Metodologia UCS*

Lo scudo metallico è una struttura scatolata modulare in lamiere saldate che costituisce, insieme a una parte in cemento armato, il rostro necessario alla protezione del fronte di scavo. Le pareti esterne dello scudo sono allineate con quelle del monolite e ne riproducono quindi il perimetro esterno. Anteriormente ciascuna parete, le due verticali, quella superiore e quella inferiore, termina con una lamiera semplice che costituisce un tagliente che si conficca nel terreno. I taglienti sono rinforzati da vomeri con funzione direzionale e di nervatura e le pareti aumentano la loro sezione man mano che ci si avvicina al monolite, diventando, da semplici, scatolate.



*Fig. 4.50 Schema costruttivo dello scudo modulare*

Il collegamento dello scudo con il rostro e quindi con il monolite è assicurato da barre filettate annegate nel getto e da bulloni. Procedendo con la spinta i taglianti si possono conficcare nel terreno, realizzando la protezione necessaria allo scavo del fronte, per una lunghezza molto maggiore rispetto ai rostri tradizionali, dotati delle sole lamiere di guida.



*Fig. 4.51 Scudo e monolite; una parte del rostro è in cemento armato*

All'interno della parte superiore dello scudo sono ricavati, nella struttura scatolata, dei vani adibiti a contenere le bobine dei nastri antitrascinamento in lamiera; i nastri possono uscire da feritoie ricavate nei coperchi dei vani stessi. Prima dell'inizio della spinta i nastri vengono ancorati a una trave detta "regginastri" che a sua volta è ancorata al terreno.



*Fig. 4.52 Nastri che fuoriescono dallo scudo prima dell'infissione nel terreno. Si nota la parte anteriore priva di nastri*

Quando il monolite si muove le bobine dei nastri si svolgono e si realizza una superficie che impedisce il trascinamento del terreno soprastante. I nastri che man mano si svolgono dai vani risultano infatti fermi rispetto al terreno mentre lo scorrimento avviene tra i nastri stessi e l'estradosso della soletta superiore del monolite che viene lubrificata con grasso. Le feritoie di uscita dei nastri sono poste a una certa distanza dal tagliente superiore, dovendo le bobine essere collocate nella parte scatolata dello scudo. La prima parte della parete superiore dello scudo risulta quindi priva della "protezione" dei nastri e sottopone il terreno soprastante a sforzi di taglio. Per evitare fenomeni di trascinamento si sfrutta il contrasto offerto dal terreno antistante che ancora non è interessato dallo scavo. Per le ultime fasi della traslazione, quando il volume di terreno antistante non sarebbe più sufficiente a realizzare tale contrasto, è necessario creare un contrasto artificiale costituito da terreno riportato.



*Fig. 4.53 Contrasto con terreno di riporto a fianco dell'autostrada*

Il contrasto artificiale subirà quindi il trascinamento durante le ultime spinte lasciando intatto il terreno al di sotto della sovrastruttura.



*Fig. 4.54 Distacco per trascinamento della parte anteriore del contrasto, a sinistra, che si viene a trovare sulla parte di scudo non coperta dai nastri*

Il comportamento meccanico del terreno, sottoposto agli sforzi di taglio e al costipamento, di lieve entità ma comunque presente, dovuto all'infissione dello scudo, fa sì che la zona circostante il tagliente superiore sia compressa; se il ricoprimento, ovvero la distanza tra il piano della sovrastruttura e l'estradosso del monolite, è inferiore a 1 m possono verificarsi dei rigonfiamenti in superficie.



*Fig. 4.55 Nastri ancorati alla trave “regginastri” durante la spinta del monolite*

La metodologia UCS non richiede alcun sostegno della sovrastruttura ma solo la temporanea interruzione del traffico sul binario o sulla corsia che sono di volta in volta interessati dal passaggio della punta dello scudo per ragioni di sicurezza poiché è in quella zona che potrebbero verificarsi fenomeni di instabilità del terreno. Non appena la punta supera il binario o la corsia, esso o essa si trova a poggiare sul monolite con l'interposizione dei nastri, dunque non subisce più nessuna interferenza e si può procedere alla riapertura al traffico.

L'applicazione dello scudo al monolite può avvenire prima della sua costruzione, nel qual caso le pareti posteriori dello scudo vengono usate come casseri anteriori del monolite, o successivamente, nel qual caso si rende necessario realizzare un getto detto “di chiusura” che completi le pareti laterali e superiore del monolite fino a far loro raggiungere quelle posteriori dello scudo.



*Fig. 4.56 Montaggio dello scudo sulla platea prima della costruzione del monolite*



*Fig. 4.57 Monolite costruito prima del montaggio dello scudo. Si notano i ferri di collegamento alle armature del getto di chiusura*

La metodologia UCS non presenta limitazioni dovute alla larghezza del monolite né al tipo di tracciato (rettilineo o curvo con qualsiasi raggio o, nel caso ferroviario, con scambi o deviatori) né all'ampiezza del ricoprimento; ricoprimenti maggiori di 1 m limitano i fenomeni superficiali dovuti all'infissione dello scudo mentre per ricoprimenti minori di 0,5 m è possibile operare con scavo a cielo aperto e successiva ricostruzione della struttura (reintegro del ballast o del binder) una volta che possa appoggiare sui nastri.

La velocità di traslazione varia da 0,4 m/h a oltre 1 m/h con la natura del terreno e con l'altezza del ricoprimento. Minori sono il ricoprimento e la coesione del terreno, maggiore dovrà essere l'attenzione dello scavo del fronte con conseguente velocità ridotta di avanzamento; se, al contrario, si è in presenza di terreno coeso e di grande ricoprimento, le operazioni di scavo del fronte potranno essere svolte più rapidamente. La massima velocità di avanzamento si ottiene per piccoli ricoprimenti e scavo a cielo aperto.

Il traffico ferroviario o veicolare può scorrere a velocità di linea sulla parte di sovrastruttura che ancora non è stata attraversata e sulla parte poggiante già sui nastri mentre, come detto, deve essere interrotto sulla parte interessata dal passaggio della punta dello scudo.

### **4.3 Problematiche connesse allo scavo e allo smarino**

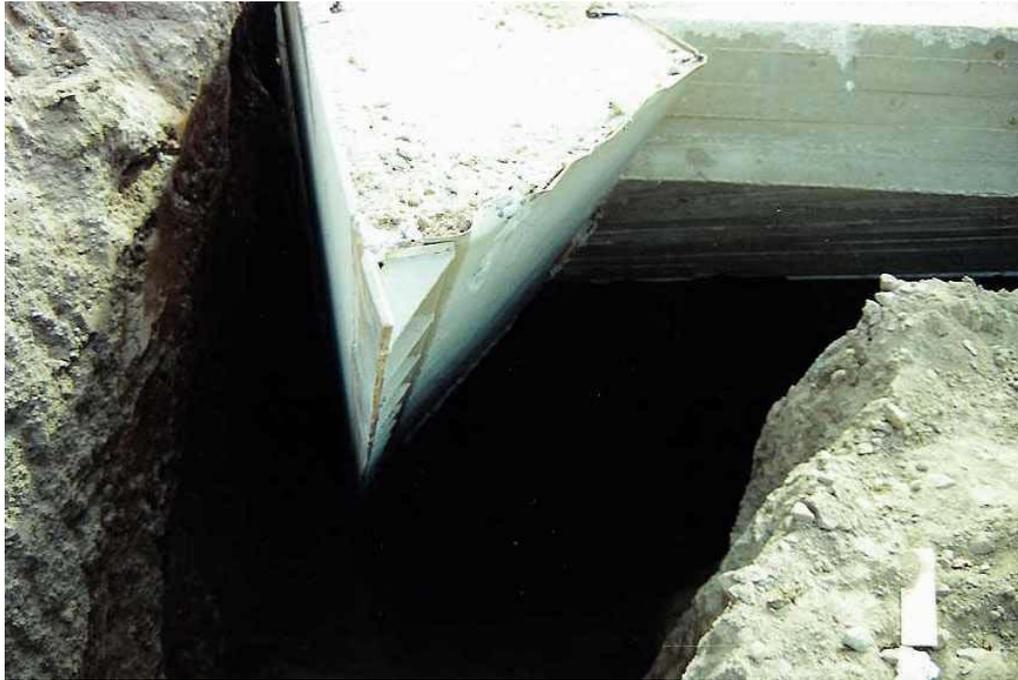
#### **4.3.1 Scavo**

Lo scavo del fronte nei sottopassi realizzati a spinta è un'operazione delicata. La protezione dai franamenti offerta dal rostro è infatti limitata dal fatto che le pareti non possono essere infisse nel terreno oltre un certo limite. Il volume che vanno ad occupare provoca infatti una compressione del terreno che fa aumentare la forza necessaria alla traslazione fino a renderla impossibile. Per queste ragioni è necessario che le operazioni di scavo e di spinta siano attentamente coordinate.



*Fig. 4.58 Scavo del fronte*

Nel caso della Metodologia UCS è possibile che, oltre all'aumento della forza di spinta, si verificano dei rigonfiamenti in superficie, cosa che non accade per tutti gli altri metodi che operano con scavo a cielo aperto. La Metodologia UCS consente però, per la conformazione dello scudo, una profondità di infissione maggiore di quella consentita dalle lamiere guida presenti sui rostri in cemento armato. Questi ultimi necessitano, per poter avanzare, una continua rimozione di terreno davanti alle pareti laterali, quindi in una condizione di protezione "limite". Le macchine che provvedono allo scavo provocano fatalmente, in questi casi, dei "fuori sagoma", ovvero dei vuoti di terreno esterni alla sezione del monolite che poi, immediatamente o con il tempo e le vibrazioni dovute al traffico soprastante, si ripercuotono in superficie sotto forma di abbassamenti generalizzati o di buche localizzate, dette "fornelli". Lo scavo del fronte è quindi direttamente collegato con la stabilità del terreno soprastante.



*Fig. 4.59 In questa immagine scattata dall'alto si vede come sulla sinistra, esternamente al monolite, si sia creato uno spazio vuoto*



*Fig. 4.60 Abbassamento localizzato del terreno dovuto alla formazione di un "fornello"*

Il tipo di terreno condiziona fortemente la forma del fronte di scavo che si può ottenere. Con terreni ghiaiosi e sciolti il fronte deve essere costantemente contenuto entro le pareti del rostro, con terreni argillosi e coesi è invece possibile scavare in “preavanzamento”, ovvero portare il fronte, che risulta quasi verticale, oltre la zona di protezione del rostro stesso. Questa seconda modalità di lavoro è la più auspicabile per la velocità di esecuzione perché consente di mettere in ombra le operazioni di inserimento degli spessori di avanzamento, connesse alla spinta, che possono essere svolte contemporaneamente allo scavo.

Un'altra problematica connessa allo scavo è quella relativa alla presenza nel terreno di trovanti, ovvero corpi estranei o massi.



*Fig. 4.61 Rimozione di un trovante dal fronte di scavo*

Trovanti anche di dimensioni relativamente grandi collocati in una zona centrale del fronte possono essere rimossi, eventualmente dopo essere stati parzialmente demoliti, senza particolari conseguenze; trovanti anche piccoli ma collocati in corrispondenza di una parete del rostro provocano invece franamenti o fuori sagoma (o rigonfiamenti superficiali nel caso della Metodologia UCS se il trovante è collocato in corrispondenza del tagliente superiore) dato che la loro rimozione avviene in una parte di spazio non protetta.

Tra le operazioni del ciclo di spinta, ovvero spinta - scavo - smarino, quella dello scavo è generalmente la più lenta e che perciò condiziona la velocità dell'intero processo.

### 4.3.2 Smarino

L'operazione di smarino, ovvero di trasporto del terreno scavato dal fronte fuori dal monolite, può avvenire con modalità assai diverse tra loro da caso a caso ed è corretto parlare di "sistemi" di smarino. Le variabili che condizionano le scelte progettuali sono la sezione del monolite, la sua lunghezza e il tipo di terreno.

Se la sezione del monolite è sufficientemente ampia da permettere al suo interno la presenza contemporanea di un autocarro e di una macchina caricatrice, generalmente una pala (§ 6.1.1), lo smarino è affidato a questi due mezzi.



*Fig. 4.62 Smarino effettuato caricando il terreno direttamente sull'autocarro*

Il numero di autocarri da utilizzare dipende dalla distanza della discarica dal cantiere e dal tipo di terreno, che in ambito urbano o industriale deve spesso essere posto in un'area di stoccaggio nelle vicinanze del cantiere per essere analizzato prima che sia autorizzato il suo smaltimento.

Con terreni poco coesi è possibile eseguire lo scavo del fronte direttamente con la macchina caricatrice e movimentare il terreno una sola volta. Con terreni coesi è necessario invece l'uso di due macchine separate, una per lo scavo del fronte e una per lo smarino.

Per sezioni più piccole possono essere adottate diverse strategie operative. E' possibile l'uso di più cassoni autoscaricanti o scarrabili da trasportare dal fronte all'esterno con fork-lift, lo sfruttamento della macchina caricatrice per effettuare anche lo smarino o l'utilizzo del monolite come stoccaggio temporaneo del terreno prima dello smarino definitivo da effettuarsi nei periodi in cui non si spinge (per esempio, in ambito ferroviario, tra un IPO e la successiva), specie se in cantiere è presente un numero limitato di mezzi. Monoliti lunghi rallentano le operazioni di smarino ma consentono un volume di stoccaggio superiore.



*Fig. 4.63 Accumulo di terreno nel tunnel durante la spinta in attesa dello smarino definitivo*

La condizione peggiore è quella di monoliti di piccola sezione e grande lunghezza, tipicamente usati per sottopassi pedonali di stazione, di dimensioni esterne di circa 4 m x 4 m; per sottopassi ad uso stradale la progettazione del sistema di smarino è soggetta a minori limitazioni.

## **5. Monitoraggio e ripristino della sovrastruttura**

La sovrastruttura che viene attraversata non rimane generalmente inalterata durante la costruzione del sottopasso, qualunque sia il metodo utilizzato.

Per i sottopassi ferroviari realizzati in opera, l'installazione e la disinstallazione delle strutture di sostegno non possono non avere delle ripercussioni sul piano dei binari; il discorso, banalmente vero per quelle strutture che richiedono il taglio del binario, rimane valido anche per le altre, che richiedono almeno la rimozione di parte del ballast. Per i sottopassi stradali realizzati in opera, la necessaria demolizione della carreggiata è di per sé un'alterazione e, sia in ambito ferroviario che stradale, il riempimento finale della trincea a fine lavori non riporta immediatamente il terreno allo status quo.

Per i sottopassi realizzati a spinta, le possibilità di variare l'assetto della sovrastruttura sono ancora maggiori, per il movimento del monolite sottostante e per le continue operazioni di scavo sul fronte.

Per queste ragioni, ogni volta che durante la costruzione del sottopasso sia mantenuto l'esercizio totale o parziale della sovrastruttura, è necessario monitorarla affinché sia garantita la sicurezza del traffico e in tutti i casi, al termine delle lavorazioni sotterranee, è necessario prevedere una fase di ripristino della sovrastruttura prima di riaprirla al traffico senza limitazioni. E' infine necessario effettuare dei controlli straordinari fino alla definitiva stabilizzazione del terreno.

### **5.1 Monitoraggio**

Non è solo la sovrastruttura a dover essere monitorata ma anche il terreno che viene scavato, per motivi di sicurezza legati agli eventi bellici. La bonifica bellica è prescritta per ogni opera sotterranea ed è particolarmente importante nei luoghi che sono stati oggetto di bombardamenti. Prima di dare l'autorizzazione allo scavo, il personale competente esegue un controllo con macchine radar che operano dalla superficie o, nei casi più a rischio, con sonde che vengono conficcate nel terreno per alcuni metri.

### 5.1.1 Caso ferroviario

Il monitoraggio dell'assetto plano-altimetrico dei binari viene eseguito dal personale tecnico RFI o da aziende certificate. La normativa prevede che in caso di cantieri siano misurate due grandezze: lo "sghembo" e la "pendenza della rampa".

Detta "soprelevazione" la differenza di quota relativa, misurata in millimetri, tra due rotaie di una sezione del binario (sezione perpendicolare alla direzione del binario), si definisce sghembo  $\gamma$  su base  $b$  il rapporto fra la variazione della soprelevazione di due sezioni di binario distanti  $b$  e  $b$  stesso:  $\gamma = (h_1 - h_2) / b$ . Misurando  $h$  in mm e  $b$  in m,  $\gamma$  risulta espresso in ‰.

Lo sghembo  $\gamma$  è direttamente collegato alla distribuzione del carico sulle ruote degli assali dei carri, le cui sospensioni possono sopportare deformazioni torsionali del piano dei binari fino a un certo limite prima di scaricare una ruota con il rischio di deragliamento.

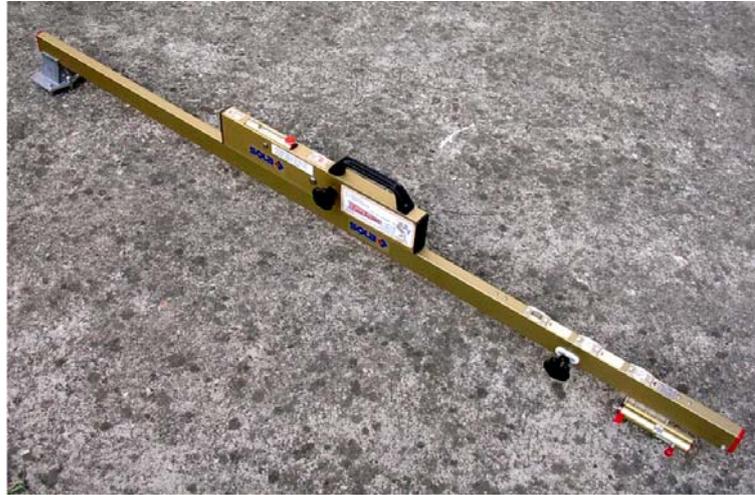
Si definisce pendenza della rampa  $p$  dei raccordi parabolici tra rettilineo e curva, il rapporto tra la sopraelevazione della curva e la lunghezza del raccordo. Analogamente nei raccordi di lunghezza  $L$  tra curve consecutive di raggio diverso (policentriche) aventi sopraelevazione  $h_1$  e  $h_2$  sarà  $p = (h_1 - h_2) : L$ . Misurando  $h$  in mm ed  $L$  in m,  $p$  risulta in ‰.

La pendenza della rampa e lo sghembo, come innanzi definiti, sono geometricamente indistinguibili; tuttavia è norma mantenere distinte le due dizioni, intendendosi con la prima una caratteristica "fisiologica" del tracciato e con la seconda la somma algebrica della pendenza del raccordo (ove esistente) più la difettosità del binario.

Le misurazioni di sghembo forniscono, sui tratti di binario in rettilineo ed in piena curva circolare, valori di sghembo connessi alla sola esistenza di difetti di livello trasversale del binario, mentre sulle rampe dei raccordi parabolici le misurazioni danno lo sghembo comprensivo della pendenza della rampa e dei difetti del binario.

La misurazione dello sghembo può essere effettuata con gli strumenti manuali (livelli calibri), nel qual caso i relativi valori sono detti "a binario scarico", o con carrozze o carrelli registratori dello stato geometrico del binario, nel qual caso i valori dello sghembo sono detti "a binario carico". Detti ultimi risultano, in generale, superiori a

quelli misurati a binario scarico poiché lo sghembo può aumentare a causa dei cedimenti elastici del binario dovuti alle sollecitazioni statiche e dinamiche.



*Fig. 5.1 Livello calibro da appoggiare sulle rotaie*

I valori limite dello sghembo misurato a binario scarico nel caso di binario in esercizio ma in corso di lavorazione, sul quale il transito dei treni avviene con rallentamento a causa di cantieri di rinnovamento, di risanamento, travate provvisorie ed altre analoghe situazioni di non piena efficienza del binario, sono i seguenti:

Base b in m	Sghembo $\gamma$ limite
3	5‰
6	3‰ se $p \leq 2‰$
6	4‰ se $p > 2‰$

*Tab. 5.1 Valori limite dello sghembo per binari in lavorazione*

La misura dello sghembo non rileva eventuali variazioni di quota assoluta di entrambe le rotaie, detto “livello longitudinale”, che deve essere misurata separatamente, con aste e livelle, prendendo dei riferimenti fissi. La variazione di quota è limitata, nelle linee elettrificate, dalle tolleranze sulla distanza della catenaria dal piano ferroviario e dal rischio di sovrapposizione e conseguente incastro dei respingenti posti fra i carri.

In caso di sottopassi realizzati a spinta è previsto anche il controllo dello “svio” ovvero il disallineamento trasversale del binario che non deve superare i 20 mm su base di misura di 20 m. La misurazione dello svio viene effettuata manualmente con corde tese una volta individuati eventuali punti singolari o tratti deviati.

Le misurazioni vengono svolte periodicamente nel caso di sottopassi realizzati in opera e spinta per spinta nel caso di sottopassi realizzati per traslazione. In base ai risultati delle misure si provvede con le eventuali azioni di ripristino.

### 5.1.2 Caso stradale

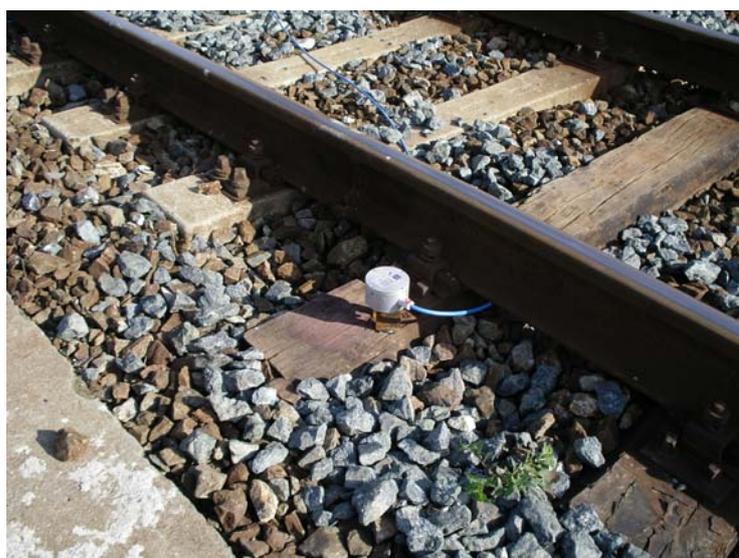
Il monitoraggio del piano stradale durante l'esercizio non può essere effettuato con metodi analoghi al caso ferroviario per la natura continua del traffico. Ove necessario è possibile utilizzare dei teodoliti laser automatici che, da posizione remota e sopraelevata, rilevino le variazioni di quota di punti prestabiliti anche in presenza di passaggio dei veicoli.

La sede stradale può tollerare delle deformazioni molto maggiori di quella ferroviaria prima che sia necessario intervenire, grazie alla diversa natura dei veicoli; è quindi sufficiente, nella maggior parte dei casi, un controllo oculare del personale.

### 5.1.3 Monitoraggio UCS

La metodologia UCS utilizza un proprio sistema di monitoraggio delle sovrastrutture attraversate, basato sull'utilizzo di inclinometri di precisione e di un sistema di trasmissione dei dati a una postazione remota.

Nel caso ferroviario gli inclinometri sono collegati alle traversine e misurano il dislivello trasversale da cui si può risalire allo sghembo.



*Fig. 5.2 Inclinometro di precisione per il monitoraggio dell'assetto del binario*

Nel caso stradale viene monitorata la corsia che di volta in volta è interrotta perché interessata dal passaggio della punta del rostro che, come precedentemente detto, corrisponde a una situazione di rischio. Gli inclinometri sono fissati a strutture rigide triangolari appoggiate sull'asfalto in tre punti. Dall'eventuale movimento dei punti di appoggio si risale alla deformazione del piano stradale.



*Fig. 5.3 Struttura per il monitoraggio della sede stradale*

A differenza del piano ferroviario, quello stradale ha una rigidità flessionale molto maggiore, essendo una struttura continua per la presenza dell'asfalto e dello strato sottostante che, seppur debolmente, è legato. Non risultano dunque possibili deformazioni localizzate, permesse invece dal ballast ferroviario.

## **5.2 Ripristino**

In base ai risultati delle misurazioni fornite dal sistema di monitoraggio si provvede alle eventuali operazioni di ripristino per mantenere l'esercizio della sovrastruttura in sicurezza.

Per correggere eventuali rigonfiamenti o abbassamenti generalizzati del terreno in superficie è possibile, per i sottopassi realizzati per traslazione, modificare entro certi limiti l'inclinazione del monolite durante la seconda metà della spinta, ovvero quando il baricentro del monolite ha superato la fine della platea di varo. Questo viene ottenuto

conformando la soletta inferiore del rostro a forma di rampa e regolando la profondità dello scavo. Se il monolite tende ad andare verso il basso è sufficiente non scavare e lasciare che la rampa si appoggi sul terreno; se viceversa il monolite tende a salire si scava fino a provocare un fuori sagoma inferiore togliendo ad esso l'appoggio. In entrambi i casi i risultati sono visibili dopo qualche metro di spinta. La metodologia UCS, non disponendo di un rostro ma di taglienti in lamiera, consente tali correzioni con l'uso di lame orientabili sul tagliente inferiore. L'entità delle correzioni che è possibile ottenere è dell'ordine del centimetro.



*Fig. 5.4 Parti inferiori dello scudo con taglienti orientabili*

### 5.2.1 Caso ferroviario

Nel caso di appoggio parziale, ovvero con sottopassi a spinta e travi di manovra, la regolazione dell'assetto plano-altimetrico viene effettuata con i cunei in legno; se invece l'appoggio è totale possono avvenire solo dei cedimenti in corrispondenza dei pulvini o dei baggioli, qualunque sia la modalità di realizzazione del sottopasso, sui quali si interviene.

Deformazioni localizzate dovute a fornelli o trovanti e deformazioni generalizzate ma non correggibili modificando l'inclinazione del monolite devono essere corrette con l'uso della macchina ricalzatrice (§ 6.3.1.2), che livella il binario riportando i valori di rampa e di sghembo entro i limiti di sicurezza.

### 5.2.2 Caso stradale

Interventi di ripristino possono essere necessari non solo sulle corsie mantenute in esercizio durante l'esecuzione di un sottopasso a spinta ma anche sulle varici costruite per i sottopassi in opera, che per la loro natura provvisoria non sono generalmente dotate di una base solida come le carreggiate definitive.

I piccoli avvallamenti, profondi fino a circa 2 cm, sono corretti con un reintegro del tappeto di usura con la macchina asfaltatrice (§ 6.3.2.2); avvallamenti più profondi necessitano prima della rimozione del tappeto con la macchina scarificatrice (§ 6.3.2.1) e del reintegro del "binder" (lo strato sotto il manto d'usura).



*Fig. 5.5 Avvallamento della superficie stradale*

I rigonfiamenti superficiali, per essere spianati, necessitano sempre della macchina scarificatrice.

## **6. Macchine utilizzate per la realizzazione dei sottopassi**

Il complesso di lavorazioni necessario al completamento dell'opera richiede un buon numero di macchine, data la varietà degli interventi da effettuare.

Macchine presenti dall'inizio alla fine del cantiere sono quelle di scavo e di smarino che sono le prime ad operare per realizzare la trincea e, generalmente, anche quelle che chiudono le operazioni.

Se gli scavi sono protetti da paratie di pali, micropali o palancole sono necessarie le rispettive macchine di installazione e rimozione e, nel caso di sottopassi eseguiti a spinta, si aggiungono anche le macchine idrauliche e di sollevamento per la movimentazione delle attrezzature di spinta.

Per effettuare gli interventi di ripristino della sovrastruttura, durante o al termine dei lavori, sono infine necessarie le macchine ferroviarie o stradali adatte.

La potenza è fornita alle macchine, nella quasi totalità dei casi, da un motore a scoppio a ciclo Diesel cui è collegata una pompa idraulica; l'olio in pressione, attraverso un sistema di servo valvole e condotti, raggiunge i pistoni o i motori idraulici da azionare. Si riporta di seguito una breve descrizione dei principi di funzionamento delle macchine citate.

### **6.1 Macchine di scavo e di smarino**

#### **6.1.1 Macchine tradizionali**

La macchina più versatile e universalmente utilizzata per ogni tipo di scavo di materiale non particolarmente coerente è l'escavatore cingolato, dotato di un braccio articolato e di una benna attaccati al corpo principale che appoggia sul carro attraverso una ralla. Il braccio articolato si muove sempre su un piano perpendicolare al piano di scorrimento dei cingoli e può ruotare attorno all'asse della ralla.



*Fig. 6.1 Escavatore cingolato*

L'escavatore è disponibile, fermo restando il principio di funzionamento, in diverse taglie; la suddivisione è fatta in base al peso della macchina: fino a 90 q si parla di “miniescavatori”, da 90 q a 200 q di “escavatori piccoli”, da 200 q a 300 q di “escavatori medi” e oltre i 300 q di “escavatori grandi”. I miniescavatori, e talvolta quelli medi, hanno un grado di libertà supplementare per il braccio, che può ruotare intorno a un asse parallelo a quello della ralla posto in corrispondenza dell'attacco del braccio stesso al corpo macchina. Il carro cingolato può essere sostituito da una base dotata di due assali gommati, con il vantaggio di una maggiore velocità e mobilità su tutti i fondi ma con il difetto di una motricità assai minore.

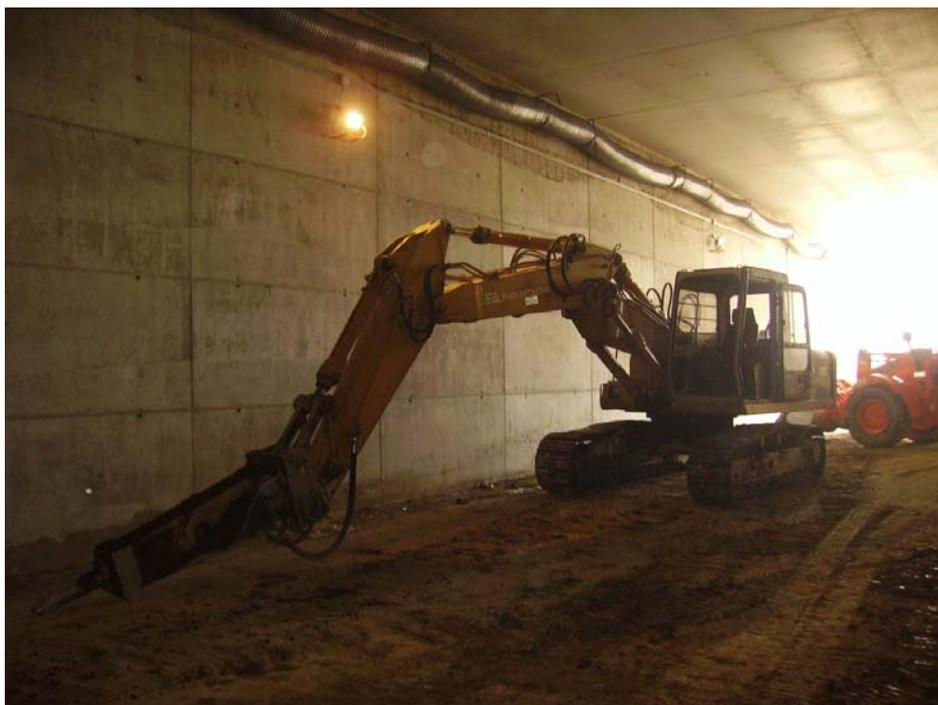


*Fig. 6.2 Miniescavatore*

La potenza installata negli escavatori di uso comune varia da meno di 30 kW per i piccoli miniescavatori ai circa 150 - 200 kW per gli escavatori medi.

In base alla sezione del monolite è possibile scegliere l'escavatore adatto. Per le più comuni sezioni per uso stradale si utilizza generalmente un escavatore medio mentre per i sottopassi pedonali si usa un miniescavatore.

Durante la realizzazione di un sottopasso deve essere sempre presente in cantiere un martello demolitore, accessorio che si può montare al posto della benna sull'escavatore adibito allo scavo ma che in genere è montato su un secondo escavatore dedicato. Il martello demolitore interviene per frantumare eventuali trovanti e, nel caso della Metodologia UCS, anche per profilare il fronte di scavo nelle vicinanze del tagliente superiore, potendo operare con maggior precisione rispetto alla benna di un normale escavatore.



*Fig. 6.3 Escavatore cingolato dotato di martello demolitore*

Il materiale rimosso dall'escavatore viene caricato sugli autocarri o semplicemente spostato dalla pala caricatrice, una macchina dotata di una benna frontale più grande, a parità di stazza, di quella di un escavatore e dotata di un sistema di bracci e leve concepiti per il sollevamento del carico e il suo successivo rovesciamento. Le pale caricatrici possono essere mobili su ruote gommate, nel qual caso sono dette

brevemente “pale gommate” o su cingoli, nel qual caso sono dette “pale cingolate”. Queste ultime, ormai sempre meno diffuse, sono più lente negli spostamenti ma più adatte a operare su terreni poco coesi e dotate di maggiore aderenza al suolo.

Come accennato a proposito delle problematiche relative allo scavo (§ 4.3.1) è possibile, in taluni casi, utilizzare una sola delle due macchine per entrambe le operazioni di scavo e di caricamento del materiale sugli autocarri. Nonostante non si tratti della sua principale peculiarità, la pala caricatrice viene infatti usata anche per piccoli lavori di scavo, quando le profondità siano molto limitate e per effettuare lavori di rifinitura e regolarizzazione della superficie posta in luce dallo scavo. Analogamente l’escavatore può essere usato per depositare direttamente il terreno contenuto nella benna nel cassone di un autocarro.



*Fig. 6.4 Caricamento dell’autocarro direttamente con l’escavatore adibito allo scavo*

### 6.1.2 Macchine innovative

L’innovazione nel campo delle macchine per movimento terra è limitata agli aspetti di efficienza meccanica più che alle macchine complete che sono sostanzialmente le stesse da oltre 50 anni. Ciò nonostante, malgrado i limiti dovuti agli aspetti economici di cui si parlerà in seguito, è possibile proporre macchine diverse da quelle tradizionali

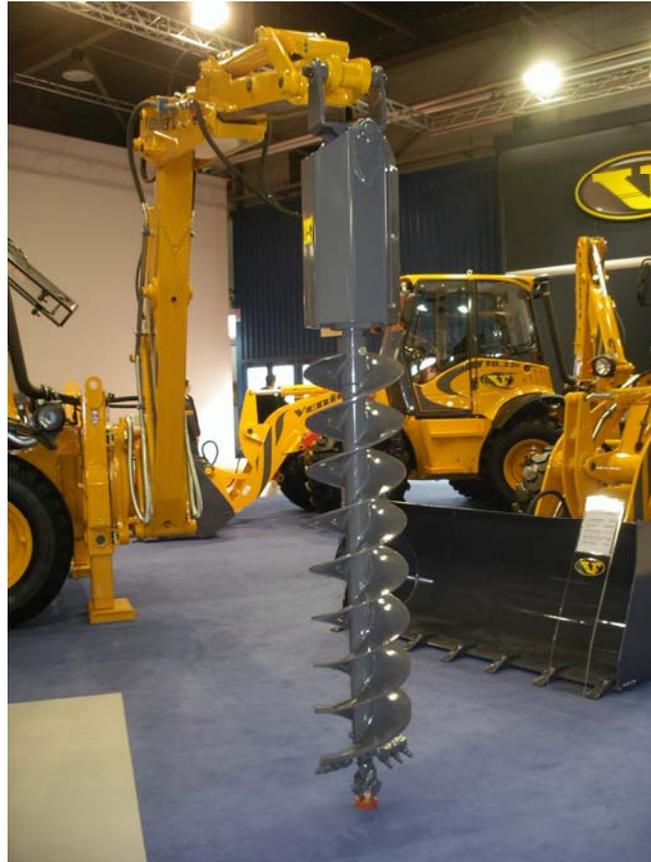
particolarmente per la Metodologia UCS (§ 4.2.1), l'ultimo sistema in ordine di tempo apparso sul mercato.

Per profilare il fronte di scavo è possibile utilizzare delle frese demolitrici al posto della benna dell'escavatore o del martello demolitore usato impropriamente. Tali frese, concepite per la frantumazione di materiali rocciosi, non hanno limitazioni per l'uso su materiali sciolti e possono essere una valida alternativa al martello demolitore anche in caso di presenza di trovanti.



*Fig. 6.5 Fresa demolitrice*

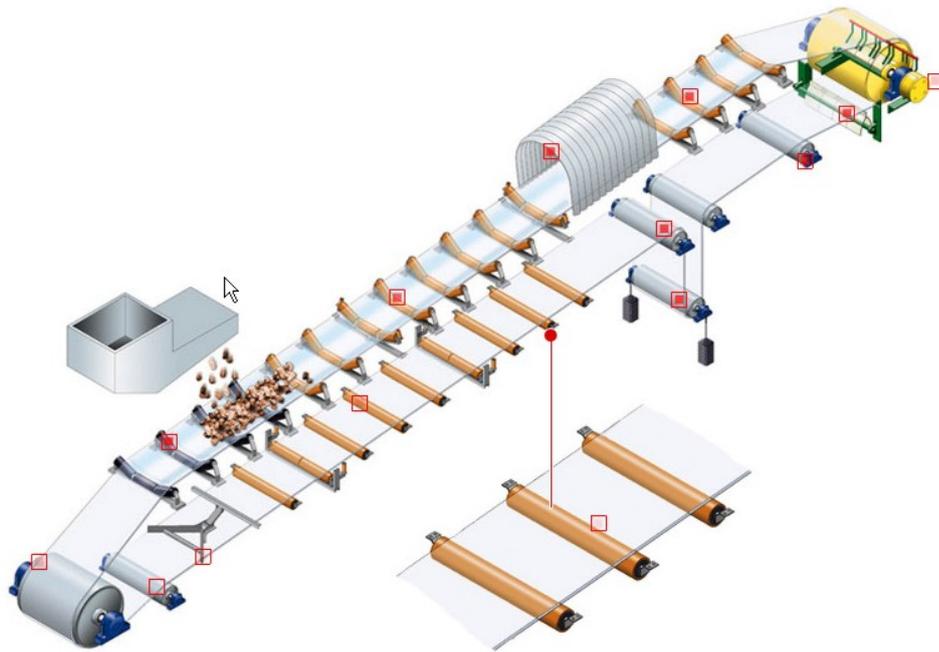
In terreni particolarmente coesi, per i quali la compressione nelle vicinanze del tagliente superiore ha maggiori effetti in superficie, è possibile effettuare delle perforazioni in preavanzamento in modo da liberare volume destinato all'espansione del terreno. Tali perforazioni vengono eseguite con trivelle idrauliche che possono essere montate sul braccio di un escavatore.



*Fig. 6.6 Trivella montata sul braccio di una macchina chiamata “terna”*

Per quanto riguarda i sistemi di smarino è possibile, non solo per la Metodologia UCS, utilizzare nastri trasportatori o sistemi aspiranti.

I nastri trasportatori, particolarmente adatti alla movimentazione di materiali sciolti che vi vengono deposti da una tramoggia di carico, possono con qualche accorgimento effettuare l'operazione di smarino di qualsiasi tipo di terreno. In caso di terreni umidi e coesi, per evitare il progressivo imbrattamento del nastro, fino a provocare il blocco del sistema, è necessario usare dei raschiatori e per prevenire l'intasamento della tramoggia di carico è necessario montarla su un sistema vibrante. Non vi sono limitazioni alla lunghezza della traslazione; i nastri trasportatori sono infatti utilizzati per estrarre le rocce di scavo da trafori stradali e ferroviari lunghi chilometri. Il nastro in materiale elastico scorre su selle. Quelle destinate a sostenere il nastro carico di materiale sono dette “stazioni superiori di andata”, quelle destinate a sostenere il nastro scarico “stazioni di ritorno”. In base alla portata necessaria, alla pezzatura e al peso del materiale trasportato si calcolano l'interasse tra le selle e la forza necessaria al tensionamento, ottenuta con rulli flottanti.



*Fig. 6.7 Schema di trasporto con nastro*

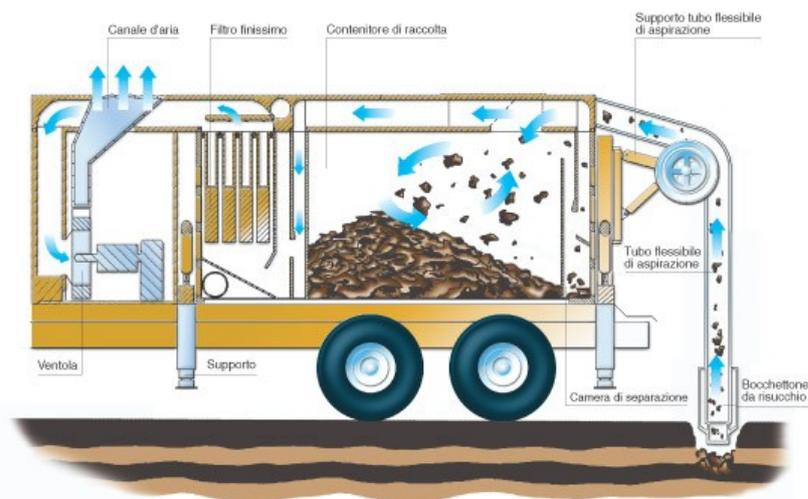
Il nastro trasportatore si muove, sostenuto dalle stazioni, tra due tamburi, di cui uno folle e uno motorizzato. Al di sotto della tramoggia di carico si trovano dei rulli di impatto, rivestiti in gomma.

I sistemi aspiranti, di recente immessi sul mercato, consentono la rimozione del materiale mediante una corrente d'aria. La macchina dedicata è l'escavatore aspirante, costituito da un'unità aspirante montata sul telaio di un autocarro e da un tubo flessibile.



*Fig. 6.8 Escavatore aspirante*

Il principio di funzionamento è quello del bidone aspiratutto, che trascina il materiale in una corrente d'aria di grande portata. La depressione necessaria è assicurata da turbine mosse direttamente dalla presa di forza dell'automezzo e varia in funzione del modello da 0,17 bar ad un massimo di 0,4 bar. Il materiale risucchiato viene eliminato dalla corrente d'aria nel veicolo mediante la forza di gravità; attraverso due sistemi di filtri, l'aria viene ripulita e immediatamente espulsa verso l'esterno.



*Fig. 6.9 Schema di funzionamento dell'escavatore aspirante*

Il serbatoio del veicolo, della capacità di circa  $8 \text{ m}^3$ , è ribaltabile su un lato e si svuota automaticamente in un cassone scarrabile che deve essere posto vicino al veicolo e trasportato a discarica quando pieno. Ad ogni svuotamento del serbatoio vengono ripuliti anche i filtri dell'aria, con getti di aria compressa in direzione opposta a quella dell'aria aspirata, generati da un compressore idraulico di cui la macchina è dotata. Le prestazioni della macchina dipendono dal tipo di terreno; è possibile, per terreni sciolti, disporre di un tubo di lunghezza fino a 100 m e scavare a profondità di 30 m. Il volume di aria aspirata è di circa  $42000 \text{ m}^3/\text{h}$ .

## **6.2 Macchine per l'installazione delle paratie di protezione dello scavo**

### **6.2.1 Batti palancole**

L'installazione delle palancole richiede una particolare pinza vibrante, montata generalmente su una macchina dedicata, di forma simile a un escavatore cingolato

tradizionale ma dotata di un braccio extra lungo. La pinza afferra la palancola a una estremità, il braccio la solleva in verticale per tutta la sua altezza (12 m o 18 m) e la posiziona nel punto di inserimento.



*Fig. 6.10 Sollevamento della palancola*

Il posizionamento preciso viene effettuato manualmente fino a far coincidere il gargame della palancola da infiggere con quello della palancola appena infissa. Verificato che sia l'incastro la pinza viene fatta vibrare per mezzo di un eccentrico posto in rotazione da un motore idraulico e il braccio viene progressivamente abbassato lasciando che la palancola penetri nel terreno per azione del proprio peso, di quello della pinza e delle vibrazioni; il braccio dell'escavatore non esercita forze verso il basso ma si limita ad accompagnare il movimento verticale della palancola e della pinza dalla quale è isolato per mezzo di uno smorzatore.



*Fig. 6.11 Infissione della palancola con vibrazione della pinza*

E' possibile utilizzare la pinza vibrante anche con una gru di sollevamento, semplicemente sostenendola con il gancio e alimentandola con una centralina idraulica.

### 6.2.2 Macchine per l'infissione di micropali

I micropali sono pali di fondazione realizzati in opera mediante trivellazione. Esistono vari tipi di micropali che si diversificano per scopi e modalità esecutive; quelli destinati alla costruzione di paratie protettive per gli scavi sono i cosiddetti micropali "con tubo camicia". La macchina che li realizza è una trivella idraulica dotata di un compressore d'aria. Il braccio guida della trivella viene posizionato sul punto di inserimento e viene appoggiato su di esso un tubo, filettato alle estremità, all'interno del quale si inserisce l'albero della trivella. La trivella viene azionata e spinta in profondità da un pistone idraulico che provvede anche all'infissione del tubo man mano che avanza.



*Fig. 6.12 Infissione orizzontale di un micropalo con tubo camicia*

Il terreno scavato viene espulso dall'interno del tubo stesso grazie all'azione dell'aria compressa che fuoriesce dalla punta della trivella grazie a un condotto interno all'albero. Terminata l'infissione del tubo, di lunghezza variabile tra 1,5 m e 3 m in base al tipo di macchina, viene ripetuto il processo sfilando la trivella, avvitando un secondo pezzo di tubo sul primo ed allungando l'albero della trivella che è anch'esso componibile. Raggiunta la profondità desiderata la trivella viene rimossa e si ottiene un foro cavo sostenuto dal tubo.



*Fig. 6.13 Infissione di micropali verticale. Sulla sinistra i tubi camicia filettati*

Il foro viene successivamente riempito di calcestruzzo e, trascorso il tempo di maturazione, è possibile procedere allo scavo; i tubi di armatura possono avere dei fori laterali e l'iniezione di calcestruzzo può avvenire in pressione così da ottenere un micropalo non solo riempito ma anche rivestito di malta; spesso le paratie sono dotate di un cordolo in cemento armato che collega tutte le estremità superiori dei micropali per irrigidire la struttura.

Il braccio guida della trivella è orientabile sul piano verticale per ottenere micropali inclinati utili al consolidamento di frane o di scavi. Nel caso che i micropali debbano essere successivamente tranciati, per esempio per il passaggio del monolite, vengono realizzati estraendo il tubo camicia contestualmente all'iniezione di calcestruzzo; l'armatura, in questo caso, è costituita da tondini di ferro da costruzione inseriti nel tubo prima della sua rimozione. E' possibile anche sostituire i tubi camicia metallici con tubi in vetroresina che presentano minore resistenza ad essere tranciati.



*Fig. 6.14 Micropali obliqui in vetroresina con tondino di armatura per il consolidamento di un fronte di scavo*

### 6.2.3 Macchine per la realizzazione di pali

I pali vengono realizzati con l'uso di una particolare trivella a forma di bicchiere che viene posta in rotazione da una macchina dedicata; sul fondo del bicchiere sono presenti le lame radiali che tagliano il terreno facendolo entrare all'interno del bicchiere stesso e

consentono l'abbassamento della trivella. Quando il bicchiere è pieno viene sollevato e svuotato e il foro risultante, al fine di evitarne il franamento, viene riempito di bentonite, un fango molto liquido. Si ripetono quindi le due fasi di lavoro – trivellazione e riempimento con bentonite – fino a raggiungere la profondità desiderata.



*Fig. 6.15 Macchina per la realizzazione di pali*

Successivamente si cala nel foro pieno di bentonite l'armatura cilindrica del palo, precedentemente preparata, e si procede al getto di calcestruzzo. Il calcestruzzo provoca la fuoriuscita della bentonite che può essere recuperata e il palo è pronto all'uso dopo il tempo di maturazione.

## 6.3 Macchine di ripristino della sovrastruttura

### 6.3.1 Macchine ferroviarie

#### 6.3.1.1 Caricatore ferroviario

Il caricatore ferroviario, meglio conosciuto come “Colmar” dal nome della fabbrica che lo ha introdotto, è una macchina concettualmente simile all’escavatore ma dotata di due assali supplementari con ruote ferroviarie che lo rendono capace di muoversi sui binari. Normalmente gommato, nel qual caso le ruote ferroviarie sono mosse direttamente dai pneumatici, può essere dotato anche di un carro cingolato.



*Fig. 6.16 Caricatore ferroviario*

Gli accessori che si possono montare sul braccio, tutti azionati idraulicamente, sono pinze, benne, ganci e tranciatrici. E’ destinato alla posa e rimozione dei binari, alla movimentazione del ballast e a tutte le operazioni di scavo e manutenzione del piano ferroviario.



*Fig. 6.17 Caricatore ferroviario con pinza. Si nota chiaramente il sistema di trazione su gomma e su rotaia*

Per operazioni di ripristino il caricatore è utilizzato per rimuovere il ballast tra le traversine, se dotato di benna piccola, o per distribuirlo ad uso della macchina rinalzatrice (§ 6.3.1.2). Dotato di benna grande riempita di ballast, viene usato come maglio per correggere lo svio delle rotaie, colpendo lateralmente le traversine; dopo tale operazione è sempre necessario l'intervento della macchina rinalzatrice.

### **6.3.1.2 Macchina rinalzatrice**

La macchina rinalzatrice, detta semplicemente “rinalzatrice” o “Matisa”, dal nome della ditta che le fabbricò per prima, è una macchina ferroviaria destinata al ripristino del profilo piano altimetrico dei binari. E' costituita da un carro centrale a forma di ponte e da uno o più piccoli carrelli, posti immediatamente davanti o dietro ai carrelli principali di sostegno e trazione della macchina, su cui sono alloggiati dei sensori.



*Fig. 6.18 Macchina rinalzatrice Plasser & Theuer*

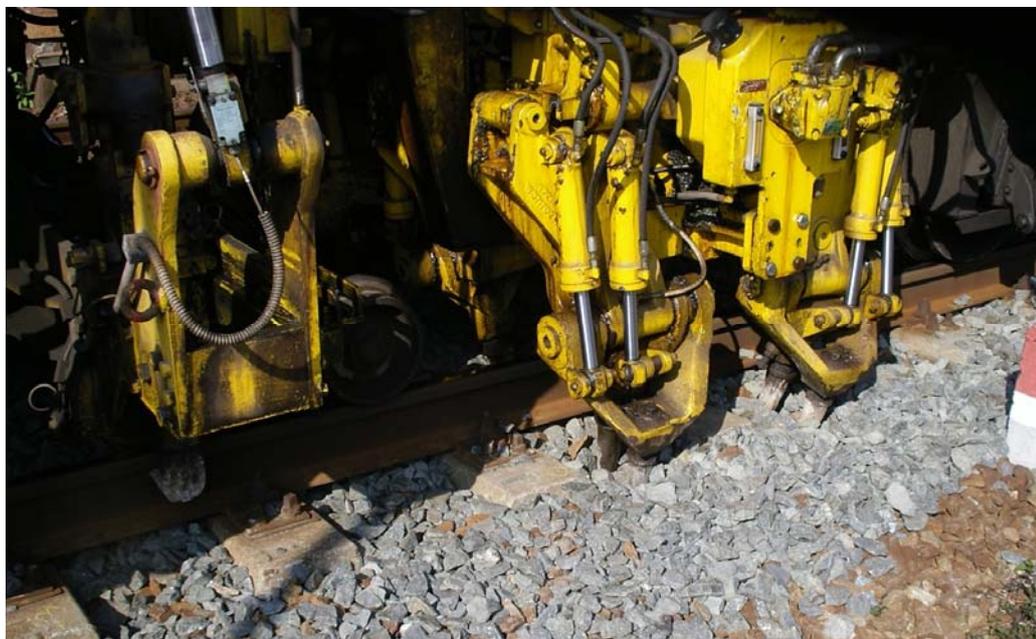
La rinalzatrice percorre il tratto di binario da ripristinare memorizzando, grazie ai sensori e al software di gestione, le quote altimetriche e i valori di sghembo presenti. Sulla base di questi dati il software fornisce i punti sui quali intervenire per ripristinare i valori corretti. L'intervento della rinalzatrice consiste nell'afferrare il binario con delle pinze e sollevarlo mentre dei martelli vibranti, detti "batte", penetrano nel ballast e lo costipano; quando il binario viene riappoggiato sul ballast si trova quindi a una quota più alta. Sia le pinze di afferraggio che le batte si trovano nella zona centrale del carro a forma di ponte, che ha i carrelli alle estremità.



*Fig. 6.19 Macchina rinalzatrice Matisa*

Prima dell'intervento della rinalzatrice è spesso necessario depositare del nuovo ballast sui binari, operazione effettuata con il caricatore ferroviario (§ 6.3.1.1) o con un carro

apposito dotato di un cassone con feritoie inferiori laterali e centrali che consentono al ballast di cadere al di qua e al di là di ciascuna rotaia, in posizione ideale per essere lavorato dalle batte.



*Fig. 6.20 Batte vibranti durante la compattazione del ballast. Sulla sinistra la pinza di sollevamento del binario*

La rinalzatrice, per quanto detto, può soltanto aumentare la quota assoluta delle rotaie ma non può abbassarla. Il dato fondamentale raccolto dai sensori è il punto a quota maggiore del tratto di binario, a partire dal quale il software indica il piano di intervento. Nonostante la quantità di elettronica presente a bordo permane una discreta quantità di operazioni da svolgere manualmente, ragion per cui l'equipaggio di una rinalzatrice è formato da almeno quattro operatori. E' manuale la messa in opera dei carrelli sensorizzati e il posizionamento delle batte sul piano orizzontale perché gli spazi fra le traversine nei quali devono operare variano in base alla presenza o meno di scambi, leve di comando, cavi o corpi estranei. La capacità produttiva varia in base alle condizioni del binario ma si aggira intorno ai 50 m/h.

La rinalzata può essere effettuata anche manualmente con l'uso di un attrezzo di sollevamento detto "binda", simile a un cric a vite senza fine, e di un martello vibrante mosso da un motore a scoppio. L'operazione risulta però molto lenta e si effettua in questo modo solo per punti singolari.



*Fig. 6.21 Rincalzatura manuale con martello vibrante*

## 6.3.2 Macchine stradali

### ***6.3.2.1 Macchina scarificatrice***

La macchina scarificatrice, o fresatrice a freddo, è costituita da una fresa a tamburo e serve a rimuovere il tappeto di asfalto ed eventualmente parte del binder prima di procedere al ripristino delle condizioni del piano stradale. Esistono scarificatrici di varie dimensioni, da quelle piccole a movimento manuale a quelle semoventi ad uso stradale di seguito descritte.



*Fig. 6.22 Macchina scarificatrice*

La fresa è posizionata al centro del corpo macchina che è mobile su quattro cingoli, posti su due carri alle estremità. Ciascun carro può ruotare su sé stesso indipendentemente dall'altro ed ogni cingolo è collegato alla macchina per mezzo di un sistema idraulico di sollevamento, con cui è possibile controllare la profondità dello scavo ed anche avanzare su superfici non complanari come nel caso di strade dissestate.



*Fig. 6.23 Particolare della fresatura*

La macchina è trasportata da un bilico direttamente sul cantiere sul quale deve operare, non essendo omologata per circolare su strada.

Il materiale asportato dalla fresa viene convogliato su un nastro trasportatore posizionato sulla parte anteriore della macchina che lo fa cadere direttamente nel cassone di un autocarro. La produttività dipende dalla profondità dello scavo e dal numero di passate necessario a completarlo in larghezza; si può assumere come valore medio, per gli usi comuni, una velocità di circa 400 m<sup>2</sup>/h.

### **6.3.2.2 Macchina asfaltatrice**

La macchina asfaltatrice, detta “vibro finitrice” o semplicemente “finitrice”, è destinata a stendere il manto di asfalto sul piano stradale. E’ un mezzo semovente dotato di un cassone anteriore, nel quale viene depositato il conglomerato bituminoso da stendere, e di due coclee che lo convogliano su nastri trasportatori che lo inviano alla parte posteriore, alla quale è attaccato un modulo detto “rasatrice”. La rasatrice è costituita da rulli riscaldati e vibranti che provvedono alla deposizione dell’asfalto e alla sua stesura. Lo spessore è regolabile modificando l’altezza degli appoggi esterni.



*Fig. 6.24 Macchina asfaltatrice*

La produttività è espressa in peso di conglomerato elaborato orario e, per macchine di medie dimensioni come quelle usate su strade e autostrade, è di circa 300 t/h. La velocità di avanzamento dipende dallo spessore che si desidera ottenere; per spessori usuali, di circa 30 mm, è dell'ordine del metro al minuto.

Prima di riaprire la strada al traffico è necessario il passaggio del compattatore vibrante, particolarmente per le strade destinate al traffico pesante, e l'attesa del tempo di raffreddamento dell'asfalto che, in base alla stagione e alla soleggiatura, ha una durata che varia dalle 5 alle 12 ore. E' possibile accelerare il raffreddamento con l'uso di acqua, pena una diminuzione della qualità e della durata dell'asfalto stesso.



*Fig. 6.25 Compattatore vibrante utilizzato per costipare il binder prima dell'asfaltatura*

## 7. Critica dei metodi di realizzazione

La valutazione dei metodi di realizzazione dei sottopassi non può prescindere dalle considerazioni economiche, affrontate nel capitolo seguente. Le condizioni economiche sono però dettate dal mercato che è mutevole e che segue sempre con un certo ritardo lo sviluppo tecnologico, soprattutto nel campo delle opere civili. E' quindi utile, se non indispensabile, procedere preliminarmente a una disamina tecnica delle metodologie attualmente in uso per costruire un sottopasso cercando di individuare pregi, difetti e limiti di ciascuna.

Per quanto riguarda i sottopassi in opera si è già accennato che il limite consiste nel tempo di interferenza con la sovrastruttura attraversata con i costi che ne derivano. Tecnicamente però un sottopasso realizzato in opera è insensibile ai disturbi dati dalla qualità delle lavorazioni in cemento armato: errori di parallelismo fra le pareti del monolite non hanno alcuna ripercussione su un sottopasso in opera mentre rendono difficile, se non impossibile, la sua infissione. Un monolite di sezione più piccola nella parte anteriore rispetto a quella posteriore opporrà una resistenza all'avanzamento sempre maggiore; viceversa, un monolite di sezione più larga nella parte anteriore produrrà un continuo fuori sagoma con franamenti laterali. I fuori sagoma sono creati da ciascuna parte di parete che fuoriesca dal profilo ideale. Anche l'estradosso della soletta superiore deve essere realizzato con cura poiché ogni difetto di planarità si ripercuote sulla sovrastruttura; questo è particolarmente importante in tutti quei casi in cui ci sia un basso ricoprimento. Se ne deduce che la cura realizzativa per i sottopassi a spinta deve essere maggiore con conseguente aumento delle operazioni di controllo e rettifica, che devono essere eseguite fin dalla prima opera provvisoria realizzata, la platea di varo. Eventuali difetti di planarità della platea si riproducono sulla soletta inferiore del monolite in modo speculare e durante la traslazione si hanno variazioni di assetto del manufatto.

Il limite maggiore alla costruzione dei sottopassi ferroviari in opera è dato comunque dalla ridotta luce libera garantita dai vari metodi di sostegno. L'uso delle travi gemelle e dei ponti Bologna, dotati rispettivamente di 30 m e di 20 m di luce disponibile è molto invasivo per il piano ferroviario, richiedendo la rimozione completa del binario sia all'installazione che alla rimozione. L'inclinazione delle scarpe laterali dello scavo

riduce poi la larghezza esterna effettiva raggiungibile dal monolite in maniera proporzionale con la profondità dello scavo stesso (Fig. 3.1).

Per i sottopassi a spinta, riguardo l'utilizzo dei metodi di sostegno della sovrastruttura, appare assai pesante la limitazione di avere l'estradosso della soletta superiore del monolite vicino al piano della sovrastruttura stessa; in caso di monoliti con piano inferiore di scorrimento distante oltre 8 m circa dal piano stradale o ferroviario lo spreco di cemento armato e il maggior volume di terreno da scavare, smarinare e trasportare a discarica, oltre a far lievitare i costi denuncia un basso rendimento generale della tecnologia.

Il sostegno ferroviario appare particolarmente limitante nei casi di attraversamento di più binari, come accade nelle stazioni, perché tutto il piano ferroviario è soggetto contemporaneamente a limitazioni del traffico per tutta la durata dei lavori. Le velocità di avanzamento della traslazione che si riescono ad ottenere sono assai limitate data la lentezza delle numerose regolazioni da effettuare che, come detto precedentemente, sono svolte manualmente. Per il sottopasso ferroviario realizzato a Firenze in Viale Belfiore nel 2002 con il sistema Essen (11 binari, monolite di dimensioni esterne 15x8x60 m), si è registrata una velocità di avanzamento di circa un metro al giorno.

La soggezione contemporanea di tutti i binari è particolarmente dannosa nel caso di prolungate interruzioni dei lavori dovute a problemi tecnici, naturali o burocratici. Possono infatti verificarsi dissesti nel terreno, che può necessitare di operazioni di consolidamento mediante iniezioni di materiale legante o con altri metodi prima di poter riprendere la spinta. Anche il sistema di spinta può dare origine a problemi, ad esempio collassi e rotture del muro reggispinta per cattiva realizzazione o per diminuzione della resistenza del terreno retrostante, cosa che può verificarsi per abbondanti piogge o per effetto della suzione dell'acqua in caso la falda sia interferente con la costruzione del sottopasso. Per queste ultime ragioni assumono grande importanza i sondaggi geologici che vengono effettuati prima di iniziare i lavori ma che non possono tutelare al cento per cento da imprevisti (trovanti, zone di terreno incoerenti) catalogati come "sorprese geologiche". La ricostruzione del muro reggispinta, pur effettuata con acceleranti, ha una durata di circa 10 giorni. I lavori possono essere interrotti anche in caso di calamità naturali come le alluvioni o, eventualità non rara nel nostro Paese, per problemi burocratici riguardanti autorizzazioni, competenze, sicurezza, mancati pagamenti e

fallimenti. Brevi interruzioni dei lavori sono infine dovute ai giorni festivi o, in ambito ferroviario, a periodi di indisponibilità di IPO. Con le strutture di sostegno in opera è inoltre impossibile l'uso della macchina ricalzatrice il che rende impensabile un eventuale riassetto del piano ferroviario e una sua riapertura al traffico a velocità di linea in attesa della ripresa dei lavori.

I fasci di rotaie hanno il pregio di utilizzare materiale facilmente reperibile in quanto tutti i magazzini ferroviari hanno delle rotaie a disposizione. Anche le corte travi di appoggio sono ottenute dal taglio di rotaie; il limite di questo sistema sta nella ridotta velocità di transito concessa ai convogli.

Il metodo delle travette è poco invasivo perché è sufficiente rimuovere una ridotta quantità di ballast ma il collegamento delle travette ai correnti è assicurato da un numero di bulloni elevato; questo, unito a una loro non facile accessibilità obbliga a onerose procedure di controllo.

Il metodo La Torretta è interessante ma complesso e necessita di gru di grande portata anche per sottopassi di sezione ridotta, il che ne impedisce l'utilizzo per grandi sezioni a causa degli impalcati troppo pesanti. Inoltre, come per i ponti provvisori e per i ponti Bologna, è necessario interrompere il traffico sul binario che deve essere rimosso.

Il sistema Essen, che attualmente è quello più utilizzato, è la massima espressione della tecnologia per il sostegno delle rotaie, potendo contare sul minor tempo di installazione e rimozione, sulla minore invasività e sulla maggiore velocità di transito concessa ai convogli rispetto a tutti gli altri sistemi. Permangono però i sopraelencati limiti fisiologici comuni a tutte le attrezzature di sostegno.

La Metodologia UCS risolve tutti i problemi citati. Non ha limitazioni riguardo la sezione del monolite né riguardo il ricoprimento, eliminando così gli sprechi di cemento armato e di terreno da scavare; limita il traffico soltanto su un binario o una corsia per volta e non lascia alcuna soggezione al traffico in caso di interruzione dei lavori. In tali eventualità è infatti sufficiente infiggere per qualche centimetro lo scudo nel terreno senza scavare, prestando attenzione alle eventuali ripercussioni superficiali, per ottenere un fronte di scavo protetto ed eventualmente, in base alla lunghezza dell'interruzione, consolidare il fronte di scavo stesso con terreno di riporto.



*Fig. 7.1 Consolidamento del fronte di scavo con terreno di riporto per interruzione prolungata dei lavori*

Per consolidare il fronte è possibile anche utilizzare lo “spritzenbeton”, ovvero "betoncino spruzzato". Consiste in un calcestruzzo con granulometria generalmente inferiore a 15 mm, dosaggio in cemento tipo 42,5 in ragione di 400-500 kg/m<sup>3</sup>, additivato con un accelerante di presa (silicato sodico o simili). L'applicazione avviene a spruzzo mediante aria compressa. In unione con una leggera armatura di rete elettrosaldata trova applicazione negli scavi in sotterraneo come opera di sostegno.



*Fig. 7.2 Consolidamento del fronte di scavo con “spritzenbeton”*

In terreni particolarmente sciolti è possibile unire al consolidamento con spritz beton l'infissione di micropali in vetroresina (Fig. 6.14). terminate queste operazioni il traffico può scorrere a velocità di linea azzerando i costi di fermo.

La Metodologia UCS, pur non presentando alcun fisiologico limite tecnico, risulta la modalità esecutiva più sensibile ai disturbi esterni. In caso di trovanti posizionati nella zona di terreno interessata dall'infissione del tagliante superiore, le ripercussioni sulla sovrastruttura possono essere pesanti: oltre alla deformazione, che comunque avviene sul binario o la corsia interrotti al traffico, il riempimento del fornello che spesso consegue alla rimozione di tali trovanti è un'operazione generalmente complessa, che deve essere svolta dall'alto con l'uso di mezzi e materiali non sempre immediatamente disponibili, soprattutto nei casi di attraversamento stradale.



*Fig. 7.3 Deformazione superficiale dovuta alla presenza di un trovante nella zona del tagliante superiore*

Per i sottopassi ferroviari normalmente gli interventi sono più facili inoltre non ci sono impedimenti al passaggio della macchina rinalzatrice data la mancanza di opere sui binari. La maggiore difficoltà, rispetto ai metodi con sostegno della sovrastruttura, di risolvere i problemi dovuti alla formazione di fornelli indica una maggiore sensibilità anche ai fuori sagoma laterali, che originano anch'essi svuotamenti di terreno che si ripercuotono in superficie. La differente strategia di correzione dell'assetto altimetrico del monolite agendo sulla zona del tagliante inferiore porta invece dei vantaggi alla Metodologia UCS per i fuori sagoma della zona inferiore dello scavo. Gli scavi

effettuati tradizionalmente per togliere l'appoggio alla parte anteriore del monolite e provocarne l'abbassamento lasciano fatalmente dei vuoti anche di notevole entità (è difficile controllare con precisione l'operato delle macchine di scavo) che nel tempo possono minare la stabilità del monolite; l'uso del tagliente orientabile origina invece un profilo di scavo molto regolare e costante con l'avanzamento. Un altro disturbo verso cui il sistema è sensibile riguarda i nastri antitrascinamento, sulla cui eventuale rottura non si può praticamente intervenire. I nastri possono rompersi per errore umano, ad esempio dimenticando materiale, o non eliminandolo completamente, sull'estradosso della soletta superiore del monolite; tale materiale, costituito da attrezzature, ballast o altro, con la traslazione finisce tra la soletta e i nastri, provocandone la lacerazione e la rapida rottura, dato che sono sottoposti a sforzi di trazione. L'estradosso della soletta superiore deve essere mantenuto sempre pulito ed è importante, oltre alla sua planarità e al parallelismo con la platea di varo per i motivi detti sopra, anche la sua finitura superficiale per preservare i nastri. Per ottenere una superficie liscia ed eliminare i difetti spesso si esegue sulla soletta un'operazione chiamata "elicotteratura", dal nome dello strumento che viene usato, l'"elicottero". Si tratta di una macchina che si spinge manualmente sul getto prima che solidifichi e che lo liscia per mezzo di pale orizzontali poste in rotazione da un motore elettrico o a scoppio. Talvolta si utilizza anche sulla platea di varo. Un altro fattore che può provocare la rottura dei nastri è il movimento laterale del monolite. Specie nelle prime fasi della traslazione è possibile che, soprattutto per i monoliti che vengono infissi con direzione obliqua rispetto al rilevato, l'asse di spinta ruoti leggermente a causa della resistenza non costante offerta dal terreno sulla sezione anteriore o per cedimenti differenziati del muro reggispinta. I nastri vengono quindi sottoposti ad azioni di taglio in direzione diversa da quella principale di scorrimento e questo può provocare increspature e rotture. Il sistema può tollerare la rottura di qualche nastro ma se si verificano rotture concentrate in una zona dello scudo il terreno soprastante tale zona è trascinato con il monolite con effetti dannosi sulla sovrastruttura. E' inoltre molto difficile, se non impossibile, procedere alla riparazione dei nastri rotti dato che sono accessibili solo dall'alto e che, se l'infissione non è immediatamente agli inizi, qualora si riuscissero a raggiungere i vani dei nastri rimarrebbe il problema del loro ancoraggio.

Gli effetti superficiali delle variazioni della quota altimetrica del monolite durante la spinta sono tanto più pericolosi quanto minore è il ricoprimento, che consente una

redistribuzione degli sforzi su una superficie maggiore e una deformata più regolare; il problema riguarda la Metodologia UCS soltanto nei casi di basso ricoprimento, tutti i metodi di sostegno parziale della sovrastruttura e il metodo della piastra antitrascinamento.

Riguardo il metodo della piastra antitrascinamento, esso risulta particolarmente critico proprio sotto l'aspetto delle variazioni altimetriche del monolite che origina deformazioni a gradino dell'asfalto. Se si tratta di avvallamenti è sufficiente effettuare una cosiddetta "ricarica" di asfalto; se si tratta di gradini, data l'impossibilità di usare la macchina scarificatrice sulla piastra, è necessario raccordare un tratto di strada più lungo. I due tratti autostradali attraversati con tale metodo hanno subito pesanti soggezioni del traffico proprio a causa di questo problema; in caso di deformazioni intollerabili della carreggiata con la piastra è impossibile deviare il traffico sull'altra che è sede dello scavo a cielo aperto per la seconda metà della traslazione del monolite. Il metodo della piastra presenta poi la stessa limitazione tecnica dei metodi di sostegno del piano ferroviario con appoggio parziale riguardo l'altezza del ricoprimento; il metodo infatti obbliga la quota della soletta superiore dell'estradosso indipendentemente da quella della soletta inferiore con i problemi che ne conseguono.

Tutti i sottopassi a spinta necessitano delle operazioni di smarino all'interno del tunnel. Se la sezione è sufficiente il materiale può essere caricato direttamente sugli autocarri, interrompendo le operazioni di scavo ma movimentando il terreno una sola volta; se la sezione è piccola da non consentire la presenza contemporanea di più mezzi nelle vicinanze del fronte lo smarino diventa lento. Anche le macchine innovative come i nastri trasportatori e i sistemi aspiranti vanno in crisi perché per i primi la tramoggia di carico è essa stessa una macchina, peraltro non semovente, nelle vicinanze del fronte, per i secondi il bocchettone deve essere movimentato e non sempre è possibile farlo manualmente. La ridotta capacità del serbatoio dei sistemi aspiranti obbliga infine a frequenti pause per il suo svuotamento.

Per la sicurezza dei lavoratori, la Metodologia UCS si può ritenere, in campo ferroviario, intrinsecamente superiore a tutti gli altri metodi data la drastica differenza di personale che deve essere presente sulle rotaie: non sono necessari addetti alla regolazione durante la spinta né operai e mezzi di installazione e rimozione delle opere di sostegno. Anche il sistema di monitoraggio dell'assetto dei binari richiede un minor

numero di addetti. In campo stradale la Metodologia UCS necessita di personale addetto al segnalamento del traffico per i cambi di corsia e per lo spostamento delle attrezzature di monitoraggio mentre con il metodo delle varici non è previsto personale sulla sede stradale. Considerando però anche l'utenza e confrontando i tempi di esecuzione della Metodologia UCS, circa una settimana in caso di sottopassi autostradali, rispetto a quello di un sottopasso in opera, circa tre mesi, si deduce che i rischi sono complessivamente assai minori nel primo caso. Le deviazioni del traffico sulle varici sono infatti pericolose anche se segnalate con cura, particolarmente nelle ore notturne.

Realizzare un manufatto a spinta senza sostegno della sovrastruttura con le modalità descritte all'inizio del § 4.2 comporta la costruzione di due muri reggispinta e un doppio allestimento del sistema di spinta oleodinamico. Inoltre il metodo è inapplicabile per ricoprimenti maggiori di 1 m, dato il volume di terreno da scavare e successivamente riportare. Considerate infine le pesanti soggezioni al traffico che impone e le demolizioni necessarie il sistema appare inferiore alla Metodologia UCS sotto tutti gli aspetti. Può essere interessante il suo utilizzo, solo per strade o ferrovie secondarie e con ricoprimenti molto bassi, in caso di mancanza di spazio laterale, laddove sarebbero necessari due conci e quindi comunque un doppio allestimento del sistema di spinta.

## **8. Analisi tecnico economica**

I costi di realizzazione di un sottopasso possono essere suddivisi in due categorie: costi derivanti dalla costruzione e costi di interferenza con la sovrastruttura, detti spesso “oneri di rallentamento”.

I costi di costruzione riguardano i materiali, la tecnologia e la manodopera nonché il noleggio delle macchine, i costi di installazione e rimozione del cantiere e i costi per le deviazioni e per le opere di ripristino della sovrastruttura programmate.

I costi di interferenza, generalmente minori di un ordine di grandezza rispetto ai primi, sono addebitati al committente dall’ente proprietario della strada o della ferrovia che devono essere attraversate e che subiscono soggezioni del traffico e, in definitiva, perdite economiche; in questa categoria sono inseriti anche i costi per le opere di ripristino straordinarie.

Appare evidente che sia da minimizzare la somma dei costi, meno chiaro è come gli oneri di rallentamento siano calcolati, visto che le scelte progettuali effettuate in Italia sembrano non seguire criteri precisi.

In ambito ferroviario non si può prescindere dalla riorganizzazione aziendale seguita alla fine delle FS (Ferrovie dello Stato), nel 1992, con la cosiddetta privatizzazione. La storia delle società che sono nate e morte e delle riorganizzazioni effettuate è estremamente complessa ed esula dagli intenti di questo capitolo; l’ultimo evento importante è avvenuto nel 2001 quando, seguendo le direttive europee che sanciscono la divisione tra il gestore della rete ferroviaria e il produttore dei servizi di trasporto, i due compiti sono stati affidati rispettivamente a RFI spa e a Trenitalia spa. Nelle intenzioni c’erano un aumento di efficienza e un calo delle perdite di cui FS era afflitta. Nei fatti RFI e Trenitalia sono entrambe controllate al 100% dalla stessa holding (Gruppo Ferrovie dello Stato), le aziende sono sempre in perdita, anche se in misura minore (2 miliardi di Euro nel 2006, 400 milioni di Euro nel 2008) e la qualità dei servizi non è migliorata.

RFI ha istituito un tariffario in cui sono elencati i costi per minuto di ritardo provocato in funzione del tipo di linea e di treno. Prima dell’inizio dei lavori viene firmata una convenzione con il committente in cui sono definiti i costi e i tempi delle lavorazioni (in

particolare la pianificazione delle IPO) e le penali per i rallentamenti imprevisti. Le perdite economiche derivanti dal ritardo dei treni non sono però costi vivi come quelli che si verificherebbero in un normale mercato dal danneggiamento di un'attività. E' notorio infatti che in Italia una percentuale rilevante di convogli subisca ritardi senza che l'utenza sia rimborsata in nessuna misura e che non si possa considerare il mercato dei trasporti un mercato di libera concorrenza: la scelta fra il trasporto pubblico e quello privato è di fatto ben diversa tra quella che si può effettuare in un supermercato fra due marche di uno stesso prodotto. Un ritardo dei treni non è in definitiva una perdita significativa di profitto o di clienti per RFI, almeno fino a che si mantiene entro certi limiti o non riguarda convogli veloci per i quali è previsto il rimborso, seppure con procedure laboriose.

La conseguenza del fatto che RFI e Trenitalia siano controllate dalla stessa holding e che i ritardi non siano, nella maggior parte dei casi, dei costi vivi, è che quando il committente di un sottopasso è RFI stessa, cosa che è accaduta e accade molto spesso nell'ambito dell'eliminazione dei passaggi a livello, gli oneri di rallentamento assumono un'importanza marginale e di conseguenza vengono fatte le scelte progettuali. Quando il committente è un ente esterno, sia esso un Comune, una Provincia, una Regione o un privato, gli oneri di rallentamento sono interamente addebitati e gli eventuali costi derivanti dal mancato rispetto della convenzione possono arrivare a superare quelli di costruzione.

La componente "velocità di esecuzione" ha quindi un peso diverso, nel computo economico, a seconda di chi sia il committente e non è possibile calcolare a priori gli oneri di rallentamento per operare le scelte progettuali.

Un altro elemento importante è che negli ultimi dieci anni il tentativo di risanamento di RFI sia stato fatto anche da pensionamenti anticipati del personale di terra senza che fossero effettuate nuove assunzioni. E' venuta così a mancare buona parte del personale esperto e, con essa, la possibilità di formare i lavoratori più giovani. Il problema, sentito particolarmente nelle officine di manutenzione del materiale viaggiante, ha riguardato e riguarda anche le squadre ponti, addette tra l'altro alla posa in opera delle strutture di sostegno dei binari.

Quanto detto spiega, in parte, la diffusione del sistema Essen, che se da un lato garantisce velocità più elevate di percorrenza ai convogli, dall'altro sfrutta personale

esterno per l'installazione e la rimozione, al contrario degli altri sistemi di sostegno che sono proprietà di RFI. L'elevazione della velocità di percorrenza dai 30 km/h consentiti dai fasci di rotaie ai 50 o 60 km/h consentiti dal sistema Essen ha un'importanza economica rilevante sulle linee più lente, con velocità di linea di 70 – 80 km/h, ma è assai marginale sulle linee più veloci. L'impossibilità di disporre delle strutture di sostegno di RFI per mancanza di personale e il livello di efficienza dell'azienda necessariamente basso per la mancanza di concorrenza e per il residuo culturale rimasto dalla gestione statale stanno però conducendo quasi sempre le scelte di progetto nella direzione del sistema Essen, che attualmente è quello più diffuso anche in contesti in cui, sulla carta, non risulta essere il metodo più economico.

In ambito stradale non esiste un tariffario unico riguardo gli oneri di rallentamento in quanto i gestori della rete stradale sono numerosi; solo per la rete autostradale se ne contano oltre quindici. I concetti espressi riguardo la concorrenza e i costi dei rallentamenti (il pedaggio autostradale è sempre dovuto) nell'ambito ferroviario possono essere estesi tuttavia anche a quello autostradale, che però si differenzia per la rarità dei casi in cui il committente sia lo stesso ente proprietario della strada. In definitiva comunque i costi dei ritardi ricadono quasi esclusivamente sull'utenza mentre gli oneri di rallentamento sono incassati dai gestori. L'unico caso in cui l'utenza è almeno indirettamente rimborsata è quello delle strade statali, provinciali e comunali. Entrambe le tecniche di recente proposte per i sottopassi stradali (Metodologia UCS e metodo della piastra antitrascinamento) hanno interferenze con la sovrastruttura molto minori rispetto al metodo delle varici che fino a pochissimi anni fa è stato l'unico utilizzato. A meno che non si tratti di attraversamenti di strade a due corsie o di importanza marginale, la cui temporanea deviazione con varici non presenti alcuna difficoltà, la Metodologia UCS e il metodo della piastra antitrascinamento hanno oneri di rallentamento non paragonabili, potendo i lavori essere completati in tempi dell'ordine dei giorni o delle settimane al posto dei mesi.

Quanto detto riguardo i problemi inerenti le scelte progettuali in ambito RFI può essere esteso a tutti gli appalti pubblici che, come è noto, dalla progettazione alla conclusione non sono guidati da criteri di efficienza e di profitto. E' raro che un sottopasso sia appaltato separatamente da altre opere; in genere rientra in progetti più ampi, per esempio costruzioni di svincoli o nuove strade, piazzali, parcheggi, all'interno dei quali

è un'opera economicamente poco rilevante rispetto all'appalto complessivo. I partecipanti alla gara di assegnazione della progettazione hanno così poco interesse a cercare la soluzione ottima per la costruzione del sottopasso. Una volta approvato il progetto è poi molto complesso variarlo anche se la cosa consentirebbe notevoli risparmi; il problema sorge al momento della costruzione del sottopasso e della stipula dei contratti di subappalto, sempre numerosi nei grandi appalti. Anche i prezzi associati ai capitolati, ovvero le descrizioni dettagliate dei lavori da eseguire e dei materiali da adoperare, spesso sono approssimativi, non differenziando fra scavo a cielo aperto e scavo del fronte che hanno costi per metro cubo diversi data la diversa attenzione che deve essere posta nelle due operazioni, delle quali la seconda risulta assai più lenta. Risulta quindi difficile separare le operazioni e i fondi ed effettuare un confronto economico tra i vari metodi prescindendo dalle condizioni complessive dell'appalto, cosa che sarebbe facile fare nel caso in cui il sottopasso fosse l'unica opera da realizzare.

Riguardo i costi di costruzione, la realizzazione del monolite è comune a tutti i metodi che si differenziano per le opere accessorie. Per i sottopassi in opera si deve installare la struttura di sostegno o deviare la strada o la ferrovia; per i sottopassi a spinta si devono costruire le opere provvisorie (platea di varo e muro reggispinga) e allestire il sistema di spinta oltre alle strutture di sostegno, ove presenti. Il costo di costruzione del monolite non è, a rigore, lo stesso per tutti i metodi: i sottopassi destinati a essere spinti necessitano infatti, oltre che del rostro anteriore, di una maggiore cura realizzativa nonché di operazioni supplementari come l'elicotteratura delle superfici. I maggiori oneri derivanti, di cui si deve tener conto, non superano in genere il 6-7% del costo del monolite grezzo.

Per quanto detto è possibile effettuare un confronto fra i costi di alcune metodologie realizzative solo sotto pesanti ipotesi di linearità del mercato, di trasparenza dell'appalto e di efficienza operativa che sono comunque condizioni cui si dovrebbe tendere. Il confronto non può riguardare tutti i metodi contemporaneamente date le condizioni esclusive per l'utilizzo dell'uno o dell'altro; non è possibile, ad esempio, confrontare il sistema Essen con le travi gemelle su linee in cui non sia possibile interrompere il traffico per il tempo necessario al varo del ponte provvisorio.

Considerando soltanto gli oneri di rallentamento e i costi di allestimento del sistema di spinta e delle eventuali opere di sostegno è possibile tracciare i seguenti diagrammi qualitativi di comparazione dei costi. Trattandosi di comparazioni di metodologie riguardanti i sottopassi a spinta il monolite è sempre dotato di rostro ed ha costi di costruzione poco differenti tra un metodo e l'altro.

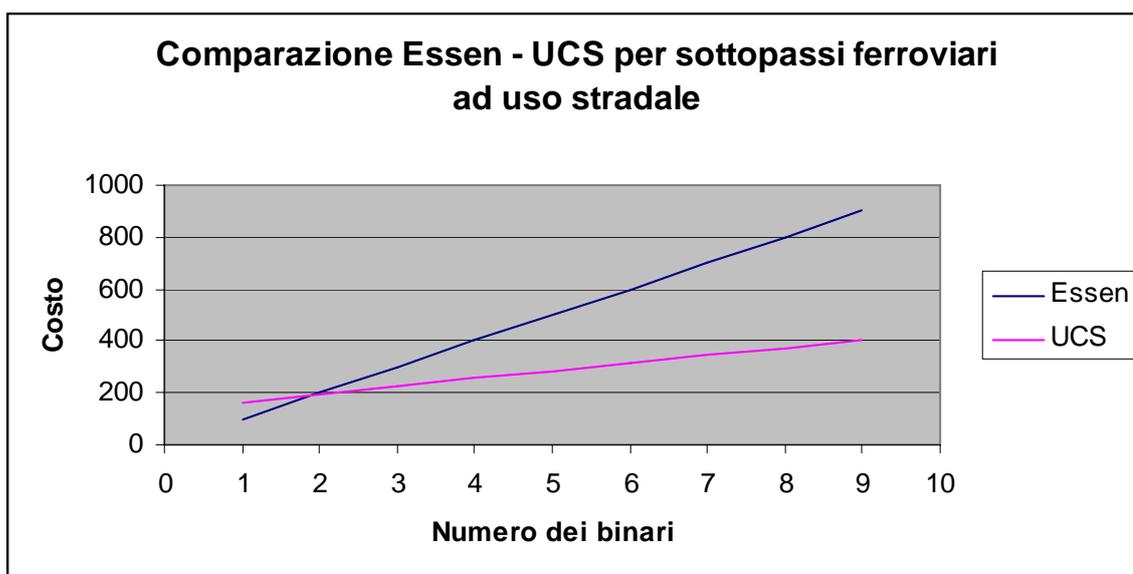


Fig. 8.1 Confronto dei costi in caso di utilizzo dell'appoggio parziale

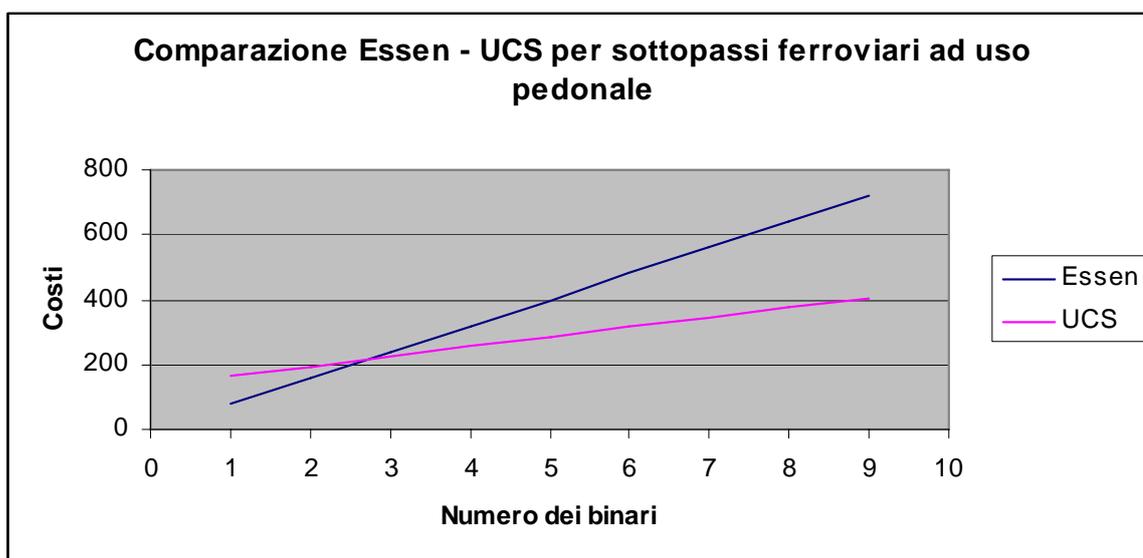
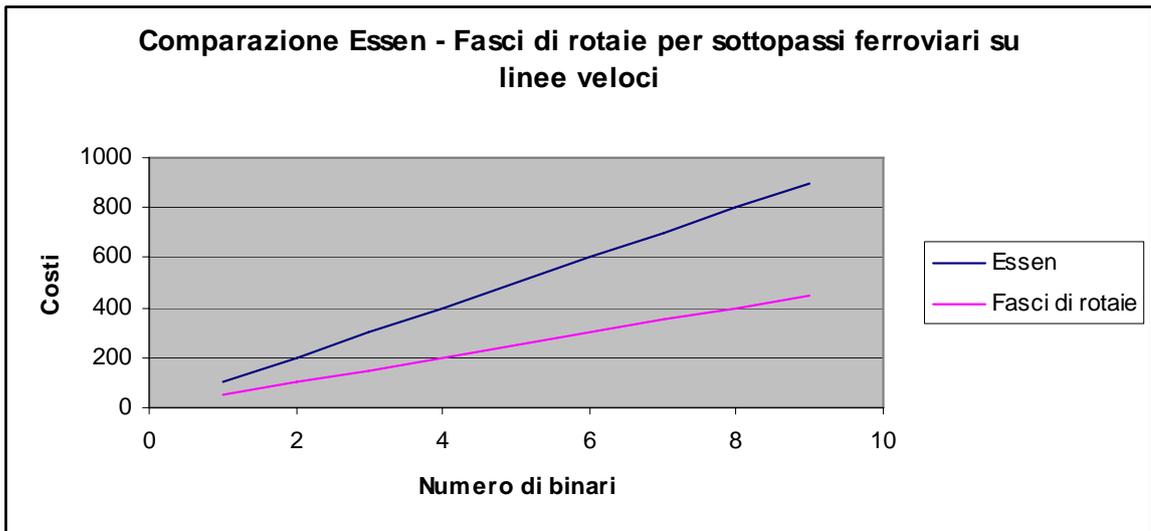
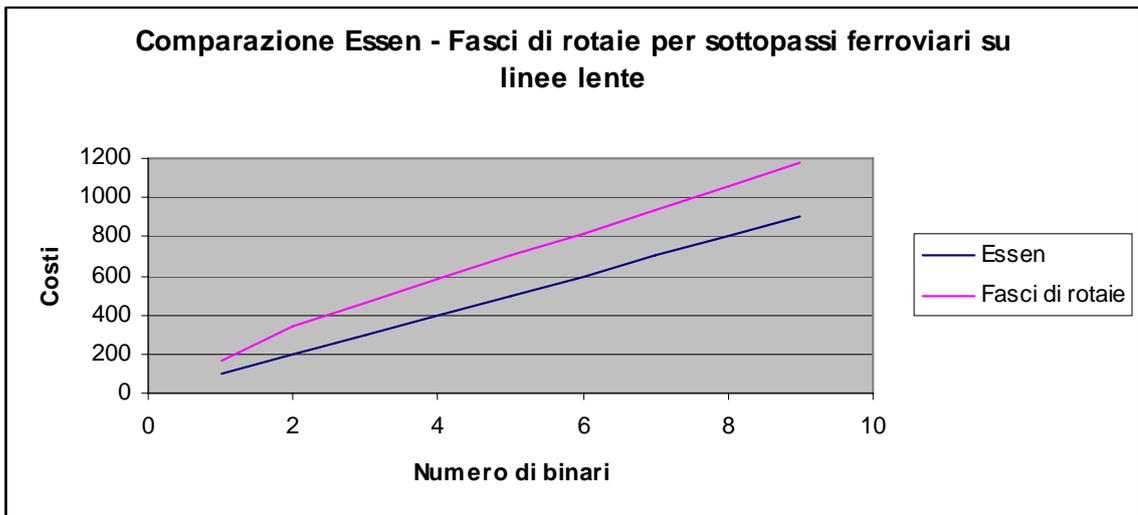


Fig. 8.2 Confronto dei costi in caso di utilizzo di appoggio totale (ponte Essen)



*Fig. 8.3 Confronto dei costi per linee con velocità di 140 km/h*



*Fig. 8.4 Confronto dei costi per linee con velocità di 80 km/h*

A vantaggio della Metodologia UCS sarebbero poi da considerare, varianti da caso a caso e impossibili da valutare in generale, gli oneri di rischio per fermo cantiere, che per quanto detto a proposito del consolidamento del fronte sono decisamente inferiori a tutti gli altri metodi.

## **9. Conclusioni**

Dall'analisi tecnico economica dei metodi di realizzazione dei sottopassi si può concludere quanto segue, auspicando un miglioramento del mercato e del meccanismo degli appalti.

Se il ricoprimento è inferiore a 1 m, per sottopassi di sezione piccola e lunghezza limitata che attraversano sovrastrutture di scarsa importanza (sottopassi pedonali o ciclabili sotto strade a due corsie o ferrovie mono binario) la soluzione migliore è l'uso delle varici o dei ponti provvisori con costruzione in opera; per sottopassi di lunghezza o sezione maggiore la Metodologia UCS è decisamente vincente per strade a più di due corsie o ferrovie con più di due binari; per le misure intermedie risultano competitivi con essa il sistema Essen e il sostegno con i fasci di rotaie.

Per ricoprimenti maggiori di 1 m la Metodologia UCS è il metodo realizzativo migliore per tutti i sottopassi.

## **10. Ulteriori sviluppi**

L'analisi dello stato dell'arte dei metodi di realizzazione dei sottopassi autorizza a ritenere che il progresso debba andare nella direzione dei metodi di infissione senza sostegno della sovrastruttura, che garantiscono interferenze limitate e rapidità di esecuzione.

E' auspicabile l'introduzione sul mercato di nuove tecnologie di questo tipo, da affiancare alla Metodologia UCS, e la progettazione di sistemi di scavo del fronte e di smarino del terreno più efficaci, veloci e flessibili grazie all'uso di macchine dedicate.

In ambito ferroviario sarebbe utile poter disporre di una macchina ricalzatrice capace di abbassare la quota del binario, asportando il ballast per azione meccanica o per aspirazione, risolvendo così un limite intrinseco dei sistemi di infissione senza scavo a cielo aperto.



## Bibliografia

- E. Antonucci, “Infrastrutture ferroviarie”, Bologna: Pitagora, 1993
- J.O. Bichel, T.R. Kuesel, E.H. King, “Tunnel engineering handbook”, New York: Chapman & Hall, 1996
- G. Bono, C. Focacci, S. Lanni, “La sovrastruttura ferroviaria”, Bologna: Collegio Ingegneri Ferroviari Italiani, 1997
- G. Canciani, “Criteri progettuali di rinnovo e potenziamento delle linee ferroviarie: modello di calcolo e di verifica della potenzialita’ di circolazione”, Trieste: Istituto di Strade e Trasporti, 1991
- F.A. Cicora, G. Pulvirenti, “Nuova metodologia di esecuzione di sottoattraversamenti autostradali in presenza di esercizio”, in “Strade e Autostrade”, n. 55 anno X, Gennaio/Febbraio 2006
- L.E. Criscuolo, “Installazione di scatolari mediante spinta oleodinamica”, in “Strade e Autostrade”, n.65 anno XI, Settembre/Ottobre 2007
- M. Lenzi, L. Impellizzieri, M. Falzacappa, “La tecnologia del ponte Essen Gemellato”, in “Strade e Autostrade”, n.65 anno XI, Settembre/Ottobre 2007
- P. Liotta, “Ripetizione in macchina dei segnali e condotta automatica dei treni : la circolazione dei treni, il circuito dei binari ... etc.”, Milano: Hoepli, 1973
- F. Policicchio, “Lineamenti di infrastrutture ferroviarie”, Firenze University Press, 2007
- M. Tanzini, “Scavo meccanizzato di opere sotterranee e gallerie”, Palermo: Flaccovio, 2008
- S. Torrisi, “Sulle gallerie autostradali a vani sovrapposti”, Catania: Istit. Strade Ferr. Aerop., 1992
- [www.gruppo-ucs.it](http://www.gruppo-ucs.it)
- [www.essenitalia.it](http://www.essenitalia.it)



## Indice

Introduzione .....	4
1. Classificazione dei sottopassi .....	5
2. Costruzione del monolite .....	6
3. Sottopassi realizzati in opera .....	8
3.1 Sottopassi realizzati in opera con sostegno della sovrastruttura.....	8
3.1.1 Sottopassi ferroviari .....	8
3.1.2 Sottopassi stradali .....	9
3.2 Sottopassi realizzati in opera senza sostegno della sovrastruttura.....	9
3.2.1 Sottopassi ferroviari .....	9
3.2.2 Sottopassi stradali .....	9
4. Sottopassi realizzati a spinta .....	12
4.1 Sottopassi realizzati a spinta con sostegno della sovrastruttura .....	20
4.1.1 Sottopassi ferroviari .....	21
4.1.2 Metodi di sostegno.....	23
4.1.2.1 Fasci di rotaie.....	23
4.1.2.2 Ponti provvisori.....	25
4.1.2.3 Ponti Bologna .....	28
4.1.2.4 Travette .....	29
4.1.2.5 Travi Essen .....	30
4.1.2.6 La Torretta .....	39
4.1.3 Sottopassi stradali .....	42
4.1.3.1 Metodo “La Torretta” .....	42
4.1.3.2 Metodo della piastra antitrascinamento .....	42
4.2 Sottopassi realizzati a spinta senza sostegno della sovrastruttura .....	44
4.2.1 Metodologia UCS .....	45
4.3 Problematiche connesse allo scavo e allo smarino .....	51
4.3.1 Scavo.....	51
4.3.2 Smarino.....	55
5. Monitoraggio e ripristino della sovrastruttura .....	57
5.1 Monitoraggio .....	57

5.1.1 Caso ferroviario .....	58
5.1.2 Caso stradale .....	60
5.1.3 Monitoraggio UCS.....	60
5.2 Ripristino .....	61
5.2.1 Caso ferroviario .....	62
5.2.2 Caso stradale .....	63
6. Macchine utilizzate per la realizzazione dei sottopassi .....	64
6.1 Macchine di scavo e di smarino.....	64
6.1.1 Macchine tradizionali .....	64
6.1.2 Macchine innovative.....	67
6.2 Macchine per l'installazione delle paratie di protezione dello scavo .....	71
6.2.1 Batti palancole .....	71
6.2.2 Macchine per l'infissione di micropali .....	73
6.2.3 Macchine per la realizzazione di pali .....	75
6.3 Macchine di ripristino della sovrastruttura .....	77
6.3.1 Macchine ferroviarie.....	77
6.3.1.1 Caricatore ferroviario.....	77
6.3.1.2 Macchina rinalzatrice .....	78
6.3.2 Macchine stradali.....	81
6.3.2.1 Macchina scarificatrice .....	81
6.3.2.2 Macchina asfaltatrice .....	82
7. Critica dei metodi di realizzazione .....	84
8. Analisi tecnico economica .....	92
9. Conclusioni .....	98
10. Ulteriori sviluppi.....	99
Bibliografia .....	101
Indice .....	103
Ringraziamenti.....	106



## Ringraziamenti

Per lo svolgimento della tesi ringrazio il prof. Carmignani e la prof.ssa Forte per la loro disponibilità e gentilezza, l'ing. Montecchiani della direzione opere civili di Roma di RFI per il materiale inviatomi e soprattutto l'ing. Cicora, titolare del brevetto UCS nonché mio zio, prezioso soprattutto nella prima parte della tesi, quella di raccolta delle informazioni, la più caotica, che si confà particolarmente al suo spirito bizzarro.

Il 17 Luglio 1994, mentre mi trovavo sul tetto della casa del mio amico Trino a festeggiare il mio compleanno e a guardare in tv la finalissima di Pasadena, quando Roberto Baggio tirò il rigore alto sulla traversa la delusione di aver perso il campionato del mondo di calcio si aggiunse, nel mio caso, a quella di aver bocciato l'esame di Chimica. Esatto. All'epoca facevo già l'università, da quasi un anno. Ho visto quattro campionati del mondo da studente, come Pelè da giocatore, e in scioltezza; ci sono entrati anche quattro Europei che, come noto, sono sfalsati di due anni. Pelè gli europei non li ha mai giocati. Considerando un'inflazione media del 2%, in questi 15 (quin-dici) anni le tasse versate per me all'ateneo pisano ammontano a ben 17241€ di cui 160€ di more perché talvolta ho pure mancato la scadenza. Mi piace pensare che siano andate tutte alla mensa, così da poter dire di aver offerto il pranzo a un sacco di gente.

Ringraziare qualcuno al termine di una carriera universitaria come la mia sarebbe quindi una presa in giro; l'unico responsabile di questa lunga agonia è infatti il sottoscritto.

Ciò nondimeno non ce l'avrei mai fatta da solo a superare tutti gli esami e non sto, con questo, ammettendo che ho copiato agli scritti ma solo che devo molto a diverse persone.

In primo luogo ringrazio la mia sorella Francesca che mi ha fatto da balia nei primi anni fornendomi preziosi consigli per la sopravvivenza (dove iscriversi, come prendere i posti, il panino migliore del bar, etc.), libri, appunti, dispense e aiuto al modico prezzo di un leggerissimo sarcasmo.

Un altro grazie va a Ale "Ciccio" Moroni, con il quale ho affrontato il durissimo quarto anno di corso (il suo quarto anno, io ero al settimo). Ricordo ancora che i primi giorni, dopo aver visto la mole di ore di lezione da seguire, i progettini da fare ("ini" per modo

di dire) e la difficoltà dei corsi che ci attendevano, dissi con gravità e fermezza: “E’ molto dura, ma se noi due ci mettiamo d’impegno, se ce la mettiamo tutta... allora uno come te ce la può fare”. Che poi è quel che è avvenuto.

Grazie a Mirco, le nostre numerose ore di studio a basso rendimento ci hanno fatto comunque aver ragione di esami a prima vista, e non solo a prima vista, improponibili.

Grazie al Motoclub formato da Robbie, Miche, Simpson e dal membro onorario a quattro ruote Lutz (ne chiamassi uno con il suo nome...), senza i quali sarebbe stato impossibile uscire vivi dagli esami di indirizzo del quinto anno (il loro quinto anno, io ero al decimo parecchio inoltrato); grazie perché mi hanno accolto come un amico nonostante il mio libretto fosse già ingiallito quando facevano l’esame di terza media.

Un grazie enorme va a Valentina, amica da sempre e vero guru degli ultimi anni, che mi ha detto cosa seguire e cosa studiare, come e quando, evitando che mi smarrissi definitivamente o per lo meno che mi smarrissi da solo; in due è stato molto più divertente. Non le perdono solo di non laurearsi insieme a me ma facciamo pari col fatto che non ho scritto la tesi in LaTeX. Grazie anche a Elena, sveglia delle coscienze di entrambi con i programmi che ci obbligava a scrivere e che ci hanno spronato anche se non li abbiamo mai rispettati.

Infine un grazie va ai miei genitori, non certo per i primi anni di studio nei quali mi hanno eccessivamente stressato né per quella quisquilia dei 17000€ quanto per gli ultimi anni in cui mi hanno fatto sentire finalmente unico protagonista nonché giustamente colpevole della mia situazione universitaria. Ai miei ho dedicato il lavoro di questa tesi senza la pretesa che sia sufficiente a ripagarli di tutti gli anni di vita che ho fatto loro perdere con la mia carriera dissennata; una prima rata forse la riesco a versare oggi.

Pur non volendo scivolare nei ringraziamenti riguardanti la vita e i massimi sistemi che secondo me esulano dalla laurea, non posso non ringraziare coloro che in quest’ultimo periodo, per me un filino complicato, mi sono stati vicini e mi hanno fatto sentire il loro affetto anche se ero ben rintanato come un orso, senza cui sarei fermo all’assorbitore dinamico che stavo studiando a metà Agosto. A loro va un abbraccio strettissimo.

Abbandono così il sistema dell’istruzione, lasciando il testimone al mio nipotino Federico, classe 2005, che vi è appena entrato. La verità è che ho aspettato tanto per questo, non volevo si sentisse solo ad iniziare questo cammino.