

Due casi di consolidamento con jet grouting suborizzontale per lo scavo di gallerie urbane con bassa copertura

P. ROBERTI, M. ZILLER*

SOMMARIO. Vengono illustrati due casi di contenimento del fronte di scavo per mezzo di colonne suborizzontali di terreno consolidato mediante *jet grouting* per lo scavo, in Germania, di gallerie con copertura limitata e situate in aree urbane densamente popolate.

Il primo esempio riguarda una galleria di metropolitana leggera a Bad-Godesberg, sobborgo meridionale di Bonn; il secondo una galleria metropolitana a Stoccarda. Entrambi i casi hanno richiesto un particolare impegno al fine di limitare il disturbo ad edifici ed a servizi di superficie posti in prossimità dello scavo, sia durante l'esecuzione del consolidamento che nel corso dello scavo.

Entrambe le gallerie sono a doppio binario ed hanno una sezione di 85 m² circa.

1. Generalità

La prima applicazione industriale di contenimento del fronte di scavo di una galleria per mezzo di colonne suborizzontali di terreno consolidato mediante *jet grouting* ebbe luogo dieci anni orsono, nel corso della costruzione della galleria di Campiolo, sulla linea ferroviaria Udine-Tarvisio. Da allora, tale tecnica ha conosciuto un'ampia diffusione in Italia e, progressivamente, ha trovato applicazioni nei paesi di lingua tedesca, in Austria dapprima, in Svizzera poi ed infine in Germania.

In tali paesi, tuttavia, il consolidamento mediante *jet grouting* orizzontale è stato prevalentemente utilizzato come supporto del metodo costruttivo più diffuso: il metodo austriaco (NATM). Ciò è avvenuto, particolarmente al ricorrere di due situazioni tipiche: la presenza di materiale granulare, prono a franare perché totalmente privo di coesione, e la vicinanza di servizi o arredi urbani, con conseguente necessità di limitare al minimo i cedimenti.

Nel seguito, si relaziona sulle vicende e sui risultati di due cantieri che, grazie all'iniziativa di un'impresa italiana, hanno segnato l'introduzione e l'accettazione in Germania del metodo. Qualche tempo dopo, il riconoscimento ufficiale è avvenuto con la pubblicazione del manualetto *Tunnelbau 1992*.

Chi ha già avuto esperienze di applicazioni analoghe non troverà in questa nota motivi particolari di novità. Potrà, tuttavia, documentarsi, nel dettaglio, sulle procedure esecutive e sui risultati strumentali ottenuti in merito alle deformazioni indotte nel terreno circostante. E trarrà utili informazioni numeriche di riferimento sulla praticabilità del metodo in condizioni limite.

2. Galleria urbana a Bad-Godesberg (Bonn)

2.1. Introduzione

Il tracciato della metropolitana leggera (*Stadtbahn*) che congiunge Bonn con la cittadina di Sieg, corre prevalentemente in superficie ed interferisce pesantemente con il traffico urbano nell'attraversamento del sobborgo residenziale di Bad-Godesberg. L'Assessorato per le opere in sotterraneo di Bonn (*Tiefbauamt*) ne ha quindi deciso il trasferimento parziale in sotterraneo con la realizzazione di due gallerie a foro cieco in zona urbana di 500 m e 150 m di lunghezza, rispettivamente. Di particolare impegno è risultata la prima, quella che congiunge le due stazioni di Wurzerstrasse a nord e di Plittersdorferstrasse a sud (Figg. 1 e 2).

La tratta in questione sottopassa, con copertura limitata (variabile da 3,5 a 6,8 m), una zona urbana densamente edificata e dotata di numerosi servizi sotterranei. Il tunnel attraversa l'arteria principale della città, la strada statale B9, percorsa da un flusso di veicoli che supera i 30.000 veicoli/ora nelle ore di punta, e corre in adiacenza alla linea ferroviaria Colonia-Francoforte sulla quale i treni possono raggiungere la velocità di 160 km/h. Per di più la linea di metropolitana leggera esistente insiste direttamente sulla sagoma di scavo.

In tali condizioni, lo scavo di una galleria a doppio binario (sezione di scavo di 85 m² circa) in terreno sciolto, previsto con il sistema del nuovo metodo austriaco (NATM), poneva seri problemi di stabilità e sicurezza.

Sulla base di precedenti esperienze italiane, l'Assessorato per i lavori sotterranei di Bonn (*Tief-*



Fig. 1 - Metropolitana leggera di Bonn - Galleria di Bad-Godesberg. Planimetria.

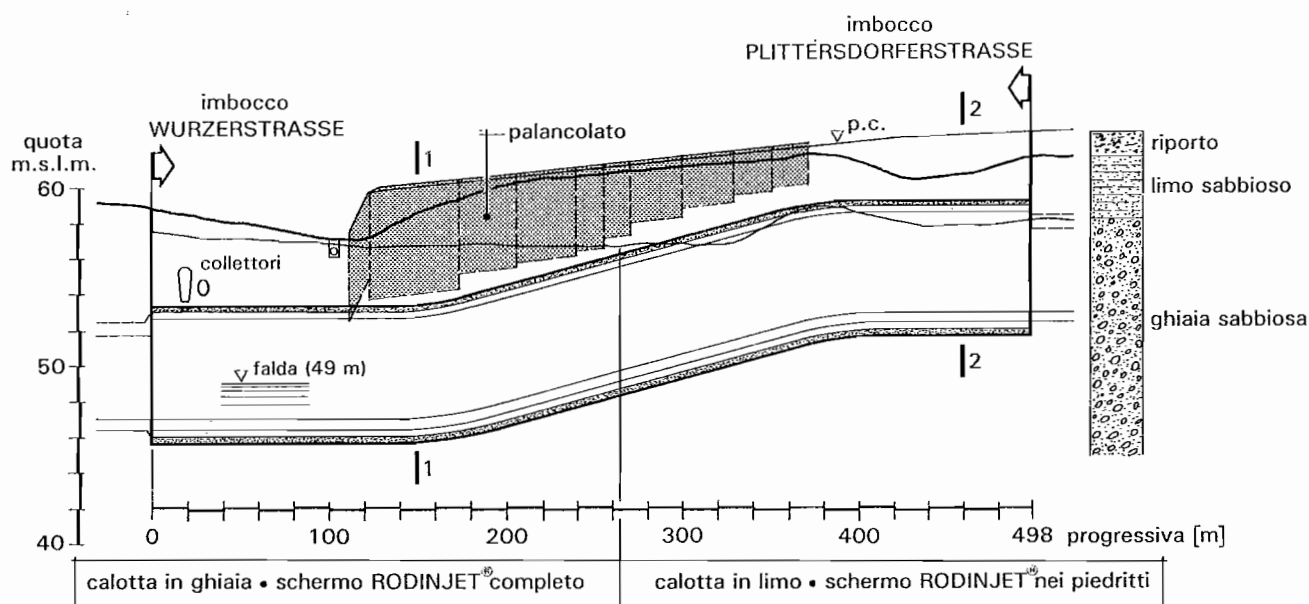


Fig. 2 - Metropolitana leggera di Bonn - Galleria di Bad-Godesberg. Sezione longitudinale.

bauamt) ha prescritto pertanto il consolidamento, mediante *jet grouting* orizzontale, delle formazioni sciolte superficiali.

2.2. Geologia

I terreni interessati dallo scavo sono alluvioni fluviali di origine recente (quaternario) situate nella valle del Reno (Fig. 2).

Al di sotto di un primo strato formato da riporti e da terreno vegetale di spessore variabile tra pochi decimetri e circa due metri, si incontra un primo strato sedimentario fine costituito da limi sabbiosi di media consistenza. Tale strato, che raggiunge uno spessore massimo di 4.5 metri, interessa la sezione di scavo in calotta per un tratto di 240 metri circa, a partire dal portale sud (*Plittersdorferstrasse*). All'interno di tale strato si incontrano livellette sabbiose ed argillose aventi spessore di alcuni centimetri ed inclusioni di materiale organico. Al di sotto dei limi si collocano sedimenti granulari sciolti di pezzatura medio-grossolana (costituiti principalmente

da ghiaie) che raggiungono la base rocciosa (roccia sedimentaria del Devoniano, composta principalmente da arenarie fini e marne) situata ben al di sotto dell'arco rovescio.

Lo strato ghiaioso è sede di falda ed ha una permeabilità molto elevata (dell'ordine di 1×10^{-2} m/s). La falda è direttamente influenzata dal livello del vicino fiume Reno ed ha una quota massima posta intorno a 50 m s.l.m. Nel corso dei lavori è stata temporaneamente ribassata al di sotto della quota di arco rovescio, mediante un sistema di pozzi a gravità realizzati a partire dalla superficie.

2.3. Descrizione dell'intervento di consolidamento

Per il consolidamento degli strati ghiaiosi sciolti, si è fatto uso del sistema RODINJET 1 (monofluido) che consiste nella fratturazione del terreno mediante getti di miscela di cemento ad alta pressione (fino a 50 MPa) con contemporanea miscelazione in posto.

Nella zona di calotta interessata dallo strato limoso coesivo, sono stati invece realizzati degli infilaggi di

barre di acciaio lunghe 4 m introdotte a percussione ad ogni metro di avanzamento dello scavo, aventi funzione di rinforzo preventivo blando.

Prima di iniziare i lavori in galleria, sono state realizzate alcune colonne RODINJET di prova, nella zona di scavo della stazione di Plittersdorferstrasse.

Prove preliminari - Nel mese di settembre 1990 sono state realizzate 8 colonne di prova suborizzontali di lunghezza compresa tra 10 e 12 metri (Fig. 3).

Tre di queste colonne erano state posizionate al confine tra la ghiaia ed il limo per verificare il comportamento del RODINJET nella zona di contatto. Tre colonne sono state realizzate in gruppo per riprodurre la geometria tronco-conica del trattamento e verificarne la continuità geometrica.

Nel corso delle prove sono stati misurati i sollevamenti in superficie e sono stati prelevati campioni di materiale rifluito, sottoposti successivamente a prove di compressione semplice. Al termine delle prove, le colonne sono state esposte per essere misurate e fotografate. Da esse sono stati anche ricavati alcuni campioni cilindrici da sottoporre a prove di compressione semplice. Nella Fig. 4 si mostrano tre colonne RODINJET scavate. Nella Fig. 5 sono riportati i diametri medi ottenuti in funzione del volume di miscela iniettato per metro di colonna. Nella Fig. 6 è diagrammata l'evoluzione della resistenza a compressione semplice nel tempo per i campioni di materiale rifluito e per quelli 'carotati', in funzione del tipo di terreno trattato. Sulla base dei risultati delle prove preliminari sono stati definiti i seguenti parametri per il trattamento:

- pressione 400 bar
- volume di miscela 250 l/m

- rapporto cemento/acqua 1 (in peso)
- tipo di cemento PZ35F

Schemi di trattamento - Essendo il diametro medio delle colonne in ghiaia di 60 cm, è stato fissato un interasse medio dei fori sul fronte di 47 cm, in

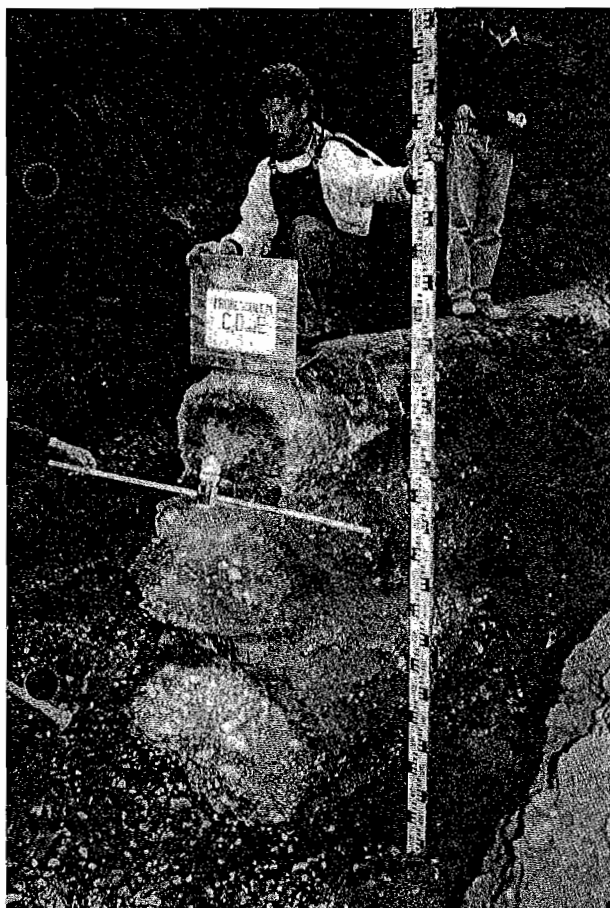


Fig. 4 - Campo prove preliminare. Terna di colonne dopo lo scavo.

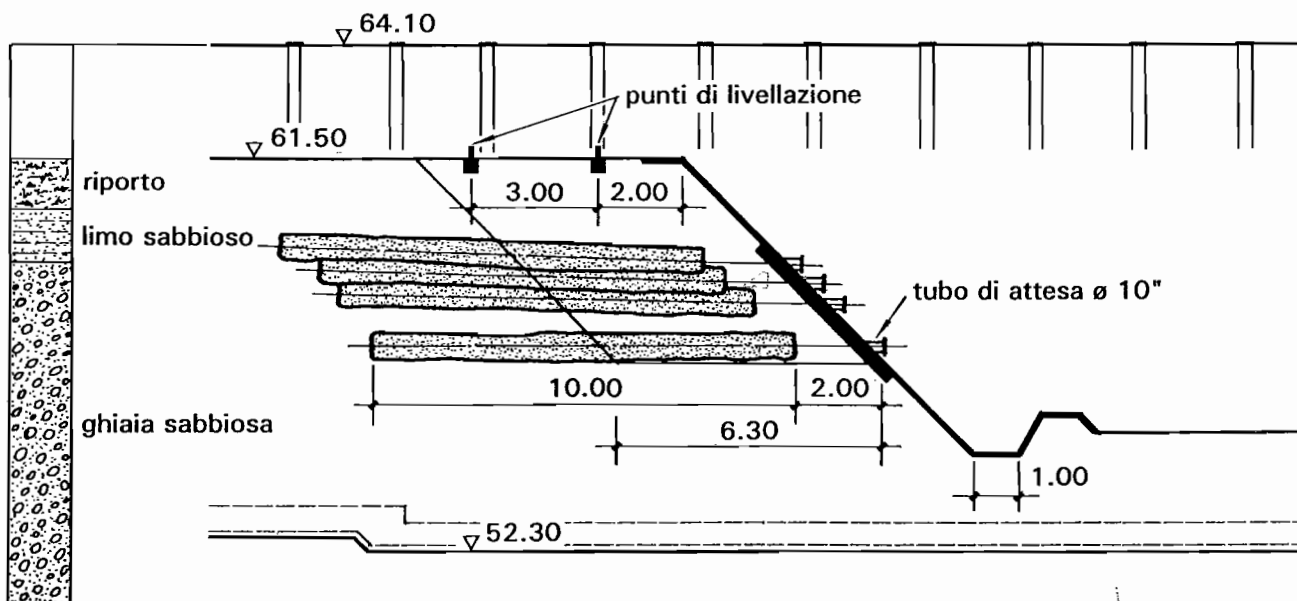


Fig. 3 - Campo prove preliminare. Schema delle colonne jet grouting.

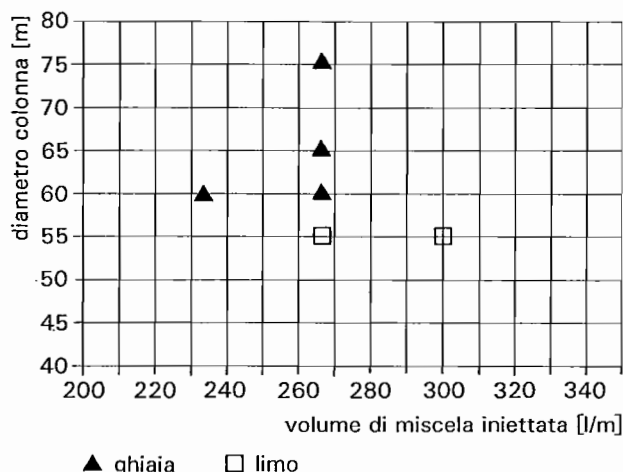


Fig. 5 - Campo prove preliminare. Diametro delle colonne in funzione del volume di miscela iniettata.

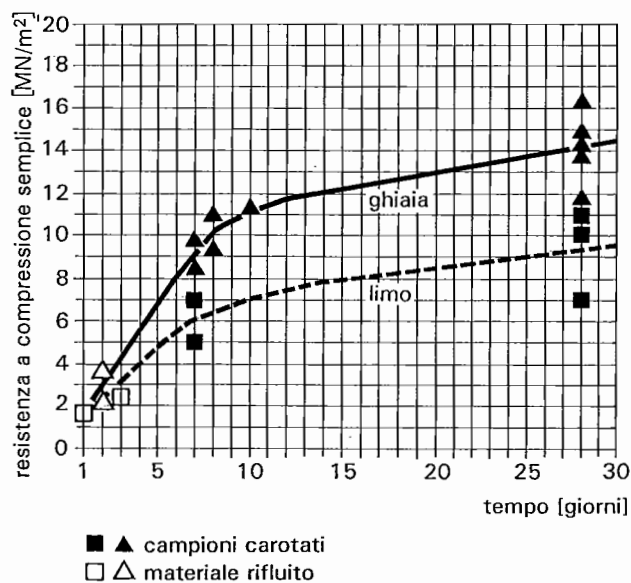


Fig. 6 - Campo prove preliminare. Evoluzione nel tempo della resistenza a rottura dei campioni di terreno consolidato.

modo da avere colonne secanti all'inizio e tangenti alla fine. Nella Fig. 7 è riportata in sezione longitudinale la geometria di un tampone standard (relativa alla tratta con calotta in ghiaia).

Come già detto in precedenza, il trattamento è stato differenziato in funzione del tipo di terreno, essendo il consolidamento mediante colonne *jet grouting* limitato alla zona ghiaiosa. Sono stati pertanto utilizzati due differenti schemi, relativi, rispettivamente, all'imbocco nord (calotta in ghiaia) e a quello sud (calotta in limo). A partire dall'imbocco nord, e per una lunghezza di 260 metri circa, la sezione di scavo è completamente in ghiaia. In questa tratta l'arco di colonne *jet grouting* copre tutta la zona di

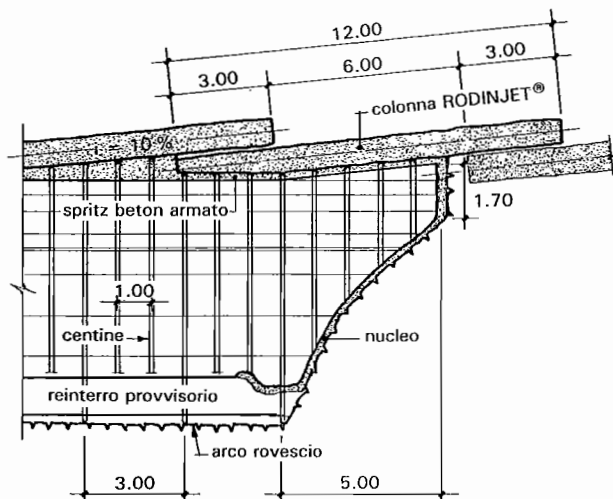


Fig. 7 - Galleria di Bad-Godesberg. Sezione longitudinale nei pressi del fronte di scavo.

calotta e piedritto (Fig. 8). Nell'avanzamento 'tipo' venivano realizzate 39 colonne suborizzontali. In Fig. 9 si può osservare la sonda SR 510 in fase di lavoro per la realizzazione del trattamento, mentre la Fig. 10 mostra il terreno consolidato in calotta, durante lo scavo. Particolari problemi si sono dovuti affrontare sia in perforazione che durante l'esecuzione del *jet grouting*. A causa della copertura estremamente limitata e nonostante le cautele adottate, si sono provocati nei primi avanzamenti notevoli sollevamenti in superficie, prodotti dalla formazione di sacche di miscela fluida in pressione. Era sufficiente, infatti, che il foro si intasasse per alcuni secondi durante il *jet grouting*, per provocare un immediato sollevamento localizzato che poteva arrivare anche a diversi centimetri. L'utilizzo di grossi volumi di miscela (250 l/m) favoriva ulteriormente tale fenomeno.

Per ridurre i sollevamenti sono state studiate le seguenti contromisure:

- Riduzione della pressione a 300 bar e del volume iniettato a 150 l/m per le colonne di calotta (su un arco di 100 gradi circa).
- Riduzione del volume iniettato a 200 l/m nella zona di piedritto.
- Realizzazione di perforazioni a vuoto, lasciate aperte, per lo scarico delle sovrappressioni, immediatamente al di sopra dei fori per il RODINJET di calotta (un foro ogni due colonne).

L'adozione di queste modifiche del sistema esecutivo, ottenute per successivi affinamenti, ha portato ad una riduzione del sollevamento medio in superficie a valori inferiori ai 10 mm, con una copertura di soli 3 metri al di sopra delle colonne. Nella

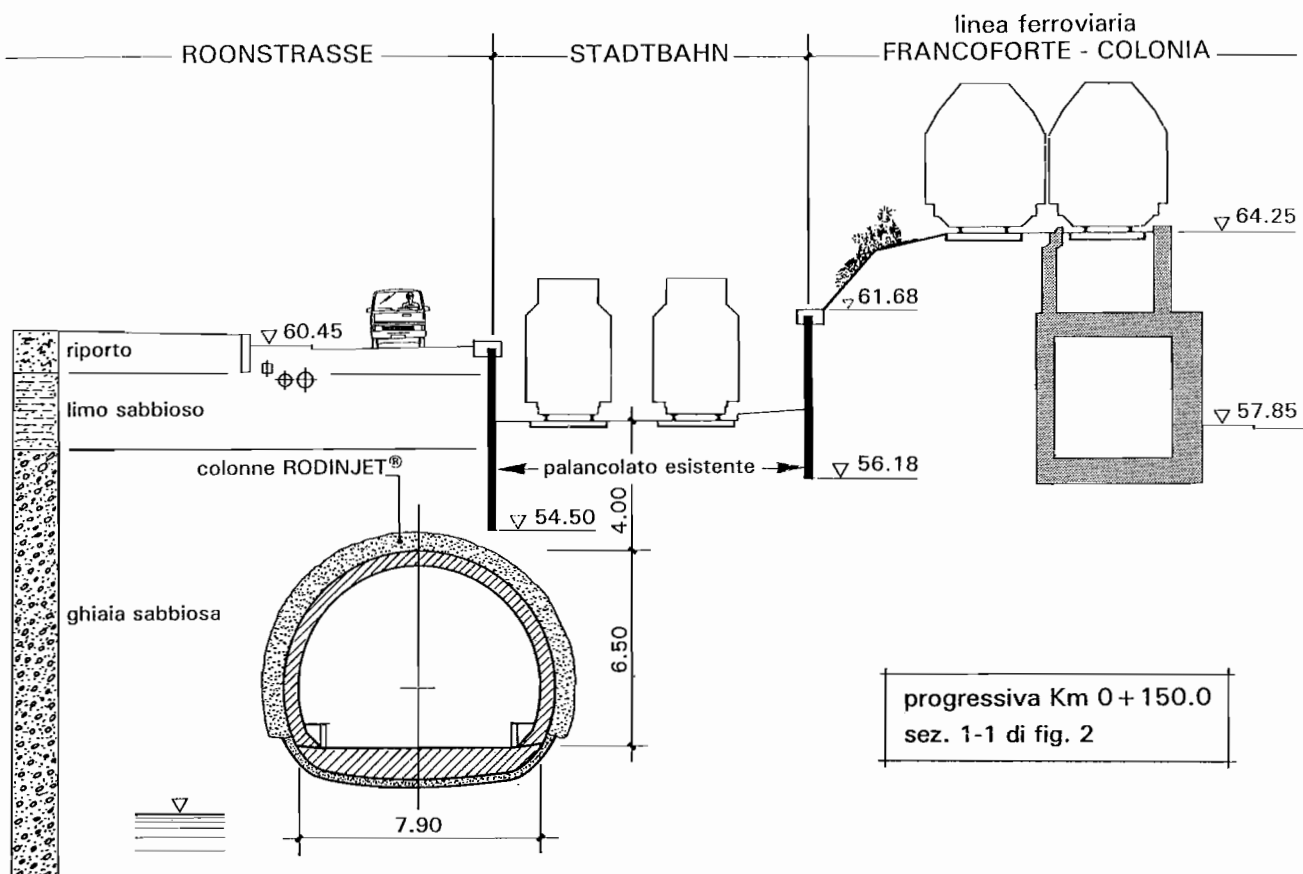


Fig. 8 - Galleria di Bad-Godesberg. Sezione 1-1 di Fig. 2.

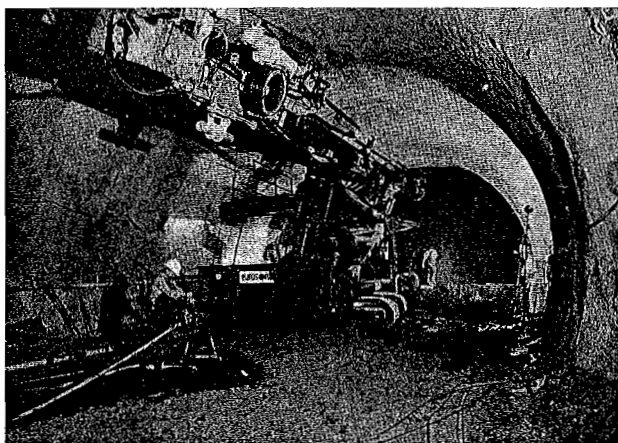
Fig. 9 - Colonne di Bad-Godesberg. Esecuzione del trattamento *jet grouting* al fronte.

Fig. 10 - Galleria di Bad-Godesberg. Vista dell'arco di terreno consolidato durante lo scavo.

Fig. 11 è riportato, in sezione longitudinale, l'inviluppo dei sollevamenti massimi in asse galleria: è evidente la riduzione di sollevamento ottenuta dopo la fase iniziale. Con questo schema sono stati realizzati in totale 31 tamponi, con avanzamento della galleria a sezione piena.

A partire dall'imbocco sud, e per una lunghezza di 240 m circa, lo strato limoso andava ad interessare lo scavo per un'altezza max. di 1.5 m in calotta.

In questa tratta (Fig. 12) le colonne RODINJET erano realizzate solo in ghiaia e come trattamento integrativo, nel limo, venivano infisse a secco, a percussione, delle barre di acciaio $\varnothing 28$ mm, lunghe 4 metri, poste ad interasse di 35 cm. L'infissione di tali

barre veniva ripetuta per ogni centina, ad intervalli di 1 metro. In questa tratta non si sono verificati sollevamenti ma solo sporadiche fuoriuscite di miscela in superficie che non hanno peraltro causato problemi particolari.

2.4. Metodo di scavo ed organizzazione del lavoro

Lo scavo della galleria avveniva secondo una procedura particolarmente studiata per ridurre al mi-

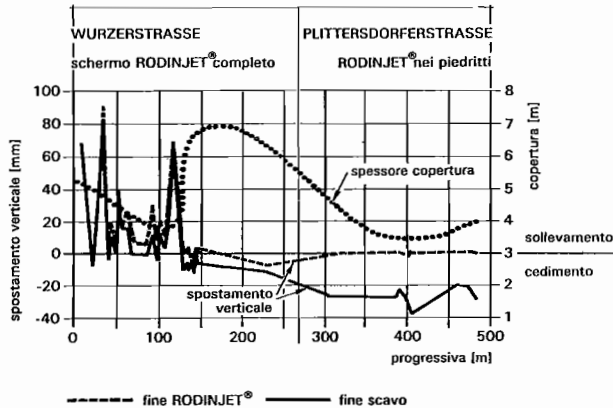


Fig. 11 - Galleria di Bad-Godesberg. Sollevamenti in superficie provocati dall'esecuzione del jet grouting e cedimenti conseguenti allo scavo della galleria.

nimo il disturbo. L'apertura del fronte di scavo era suddivisa in zone non superiori a 10-12 m², che venivano immediatamente ricoperte da uno strato di 3-4 cm di spritz-beton. Le centine venivano installate ad intervalli di 1 metro mentre lo scavo dell'arco rovescio seguiva a non più di 5 metri di distanza dal fronte. Una centina ogni tre veniva prolungata e chiusa nell'arco rovescio.

Il rivestimento provvisorio era costituito da uno spessore di 25 cm di spritz-beton armato con un doppio strato di rete metallica, così come il fronte dal quale venivano eseguite le perforazioni.

Lo schema e la metodologia di scavo hanno decisamente contribuito a contenere il cedimento in superficie, dovuto all'avanzamento, entro valori minimi (2-3 cm).

Per la realizzazione delle coronelle RODINJET, venivano utilizzati, dallo stesso personale, due gruppi di attrezzature poste ai due fronti. Lo scavo avveniva, in alternanza, con un avanzamento di 9 metri a tampone. Il lavoro era organizzato su due turni al giorno per 6 giorni alla settimana.

Il materiale rifluito, raccolto alla base del fronte, veniva pompato all'imbocco e, dopo l'indurimento, trasportato a discarica.

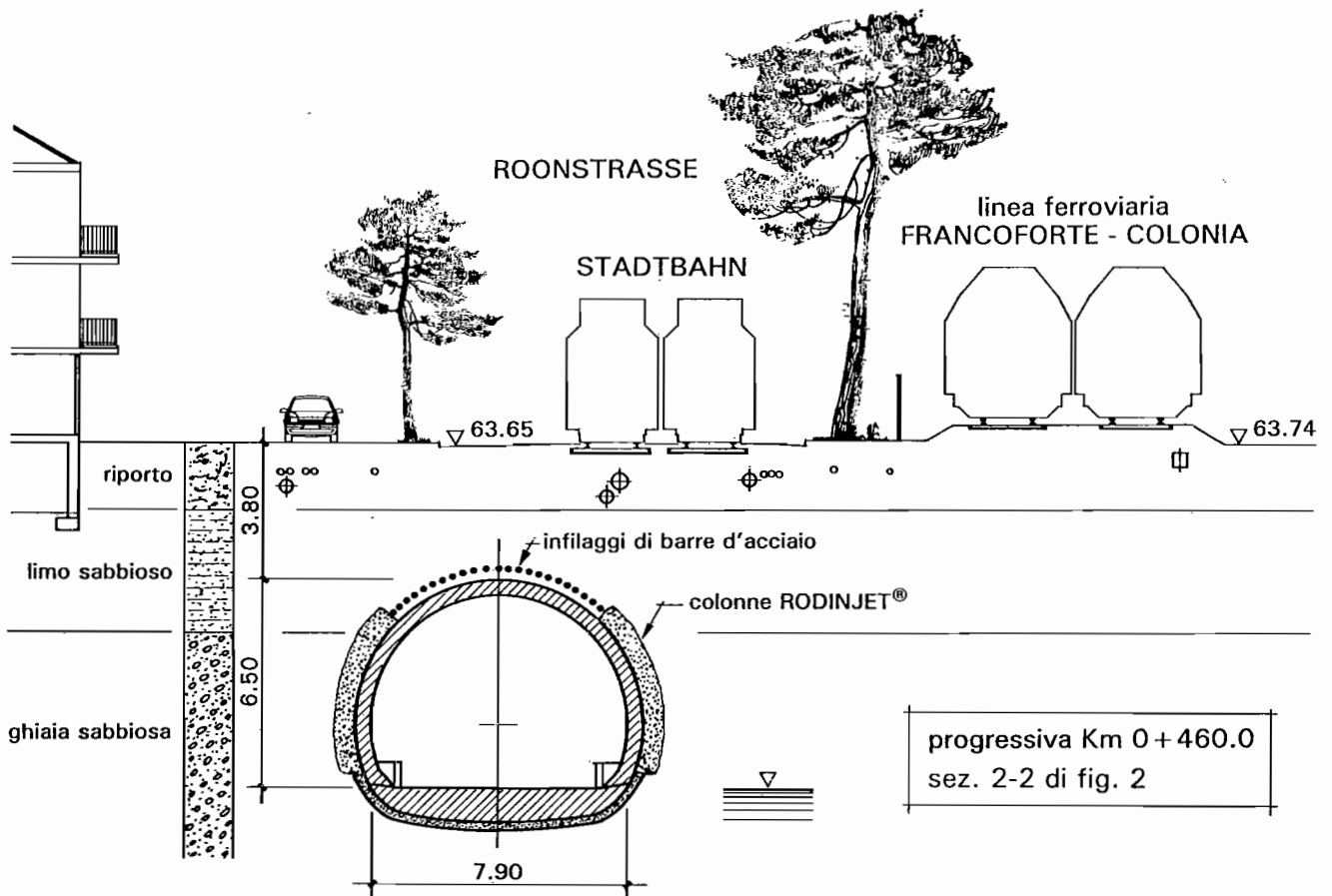


Fig. 12 - Galleria di Bad-Godesberg. Sezione 2-2 di Fig. 2.

2.5. Controlli in corso d'opera

Prove di laboratorio - Durante il corso del lavoro, sono stati confezionati 143 cubetti di materiale rifiuto. I campioni sono stati sottoposti a prove di compressione semplice a 28 giorni di maturazione. Tali prove hanno fornito i risultati riportati nella Fig. 13 ed i seguenti valori medi:

- resistenza a 28 gg. $22 \pm 10 \text{ MN/m}^2$
- densità a 28 gg. $16.5 \pm 2.5 \text{ KN/m}^3$

Il valore minimo richiesto dalle specifiche era di 6 MN/m^2 .

Misure topografiche - Sono state predisposte 10 sezioni per il controllo topografico dei sollevamenti in superficie (in media, una ogni 50 metri). Ogni sezione comprendeva 10 punti disposti ortogonalmente all'asse dell'avanzamento.

In aggiunta, 66 punti di controllo sono stati disposti lungo l'asse della galleria (ad intervalli compresi tra i 5 ed i 10 metri). Le misure avevano, di norma, frequenza giornaliera. Nel corso dei primi avanzamenti dall'imbocco sud, quando si sono avuti i problemi di sollevamento, si sono eseguite misure molto ravvicinate (fino ad una misura per ogni colonna) per poter analizzare le cause del fenomeno.

L'involuppo dei sollevamenti e dei cedimenti massimi (rispettivamente dopo l'esecuzione del RODINJET ed al termine dello scavo) è riportato nella Fig. 11. Si può notare come il cedimento finale nella

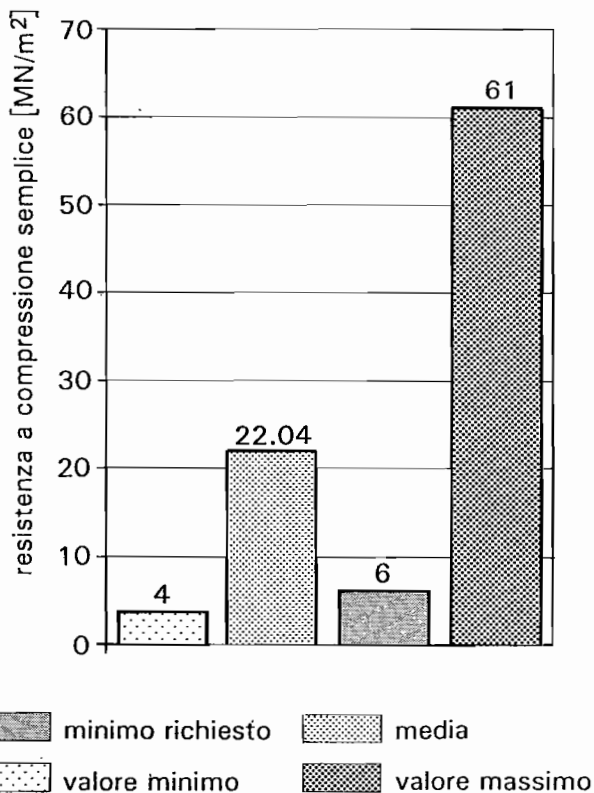


Fig. 13 - Resistenza a rottura di campioni confezionati con materiale rifiuto.

tratta con calotta in limo (valori massimi che superano i 30 mm) sia più elevato che nel resto della galleria. Là dove il trattamento RODINJET è stato condotto senza provocare sollevamenti, senza cioè mettere in coazione il terreno di copertura, il cedimento, al termine dello scavo, aumenta con il diminuire dello spessore della copertura. Nella Fig. 14 sono rappresentati gli spostamenti di superficie in sezione trasversale per due sezioni tipiche (con calotta in ghiaia ed in limo, rispettivamente).

Quantità eseguite e produzioni - In sette mesi si sono realizzati 55 trattamenti tronco-conici per un totale di circa 20.000 m di colonna. Il lavoro è stato completato con un mese di anticipo rispetto al programma iniziale, tra la metà di novembre 1990 e la prima settimana di luglio 1991.

Sono stati scavati 18 metri di galleria per settimana, corrispondenti a 2 avanzamenti, uno per imbocco. La velocità media di avanzamento dei due fronti era pertanto di 1,65 m per turno lavorativo.

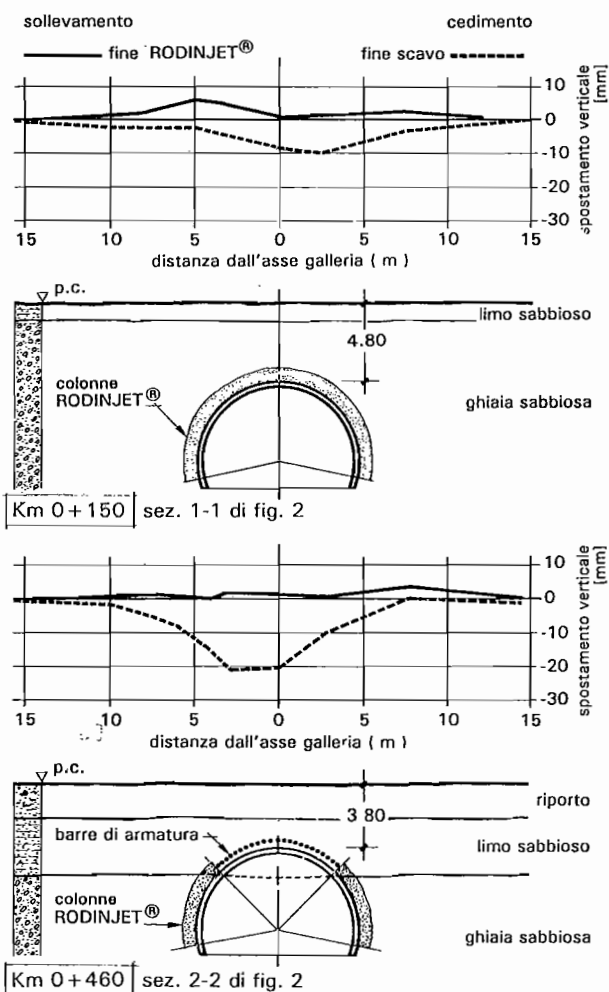


Fig. 14 - Galleria di Bad-Godesberg. Sollevamenti in superficie provocati dall'esecuzione del jet grouting e cedimenti conseguenti allo scavo della galleria in due sezioni tipiche.

3. Galleria della Fiera a Killesberg (Stoccarda)

3.1. Introduzione

La costruzione della linea «della Fiera» (*Killesberg-Messe*) a Stoccarda ha consentito di realizzare un collegamento rapido della stessa con il centro della città e la stazione ferroviaria. Il progetto prevedeva per gli ultimi 360 m di linea, in prossimità della Fiera, la costruzione di una galleria da realizzarsi a foro cieco, per la presenza di importanti arterie stradali e di edifici in superficie.

L'area della sezione di scavo della galleria a doppio binario varia tra un minimo di 85 ed un massimo di 110 m² con un raggio medio di 5,6 metri. La sezione di scavo, completamente in arenaria per i primi 213 metri, penetrava parzialmente, per un tratto di 150 metri circa, in una zona di riempimento di una antica cava. È stato studiato, per questa tratta, un intervento di consolidamento in calotta, eseguito in avanzamento rispetto allo scavo e limitato alla zona del riempimento, al fine di ridurre al minimo il disturbo alle strutture di superficie (in particolare alla Accademia delle Arti Figurative) ed il conseguente rischio di danni.

La copertura, nella zona interessata dall'intervento, varia tra un massimo di 13 ed un minimo di

9 metri. Sono stati realizzati 7 trattamenti troncoconici suborizzontali che coprono una lunghezza totale di 68 metri.

3.2. Geologia

La galleria attraversa nel tratto iniziale (a partire dall'imbocco est) unità rocciose evaporitiche (*Gipskeuer*) e terrigene arenaceo-marnose (*Schilf - sandstein*). A partire dalla progressiva 0 + 713.00 (213 m dall'imbocco est) lo scavo interessa parzialmente una antica cava di arenaria dove i residui della coltivazione sono stati, all'inizio del secolo, riversati alla rinfusa per ricolmare il vuoto lasciato. Il materiale di riempimento della cava presenta una struttura caotica, ricca di vuoti di varie dimensioni e non dotata di coesione propria. Nella parte basale del riempimento si alternano pseudo-stratificazioni limoso-argillose, create dal trasporto dei fini ad opera delle acque piovane, a zone di vespaio costituite da accumuli di blocchi di arenaria di varie dimensioni e senza matrice.

Nella Fig. 15 è riportato il profilo longitudinale della galleria nella tratta interessata dall'intervento di consolidamento. Nel profilo è indicato il confine tra arenaria e riempimento.

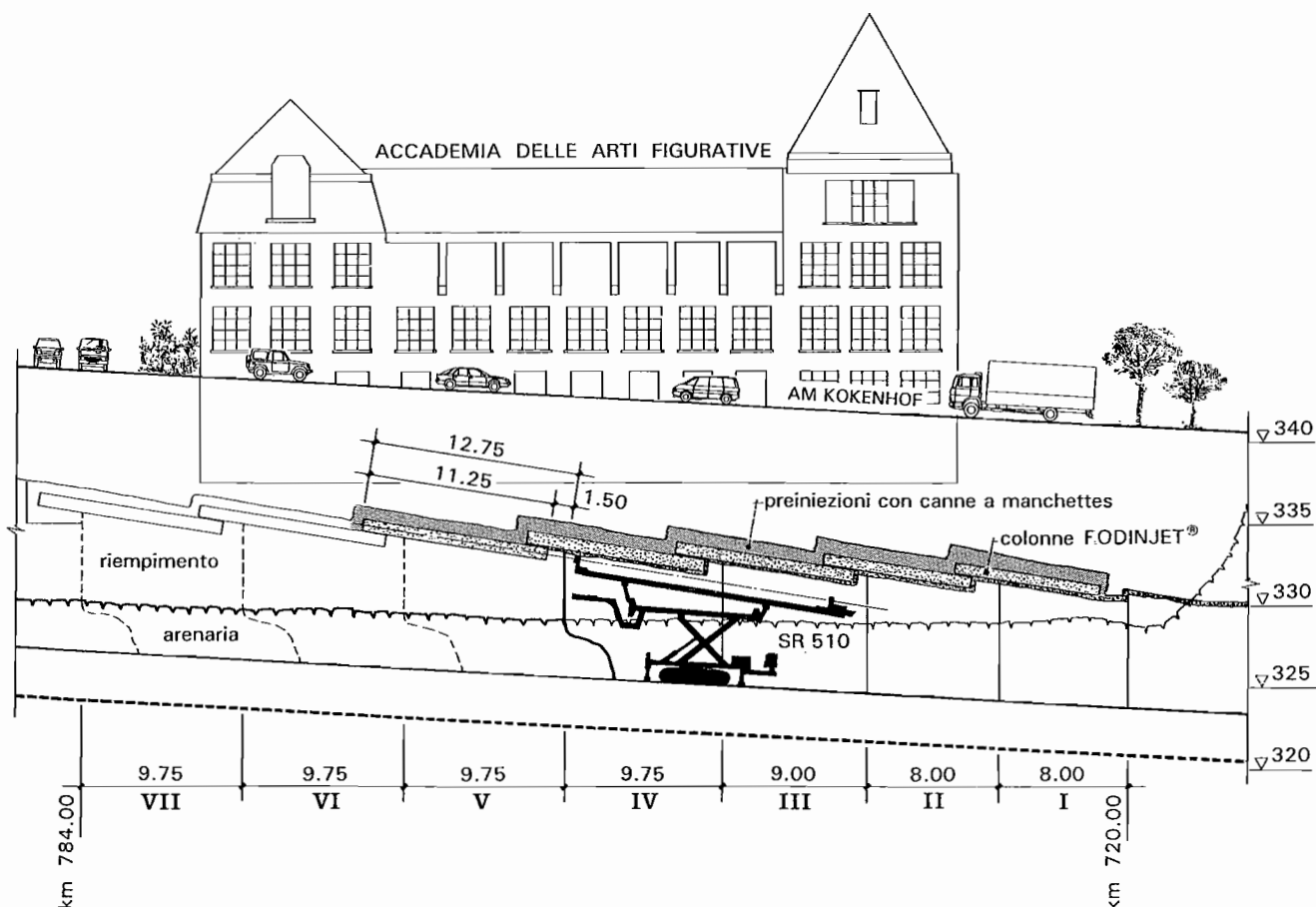


Fig. 15 - Galleria di Killesberg - Profilo longitudinale.

3.3. Descrizione dell'intervento di consolidamento

Nell'arenaria l'avanzamento era realizzato a piena sezione con il metodo NATM. Per il contenimento delle convergenze venivano installate, a tergo del fronte, oltre agli usuali *spritz-beton* armato e centine, delle raggere di chiodi. Nel tratto di avvicinamento alla cava erano stati, inoltre, realizzati, in calotta come protezione aggiuntiva, infilaggi di barre di acciaio iniettate con miscela di cemento.

Una tale struttura di rivestimento non era però sufficiente a garantire l'avanzamento dello scavo in sicurezza anche nella zona della cava, tenuto conto della presenza di edifici e della non elevata copertura. Per questo motivo è stato studiato l'intervento di consolidamento mediante colonne RODINJET 1 suborizzontali.

La presenza, nel materiale di riempimento della cava, di grossi vuoti la cui estensione e posizione non era nota a priori, creava però il rischio di svuotamenti delle colonne appena realizzate. Per limitare questo rischio, sono state realizzate iniezioni di riempimento preliminare in avanzamento. Nella Fig. 16 è schematizzato un intervento tipo, in sezione trasversale.

Iniezioni - Le iniezioni sono state realizzate mediante canne a manchette installate in fori suborizzontali lunghi 13 metri, disposti alternativamente al di sopra ed al di sotto delle future colonne RODINJET, ad un interasse medio di 1.4 metri.

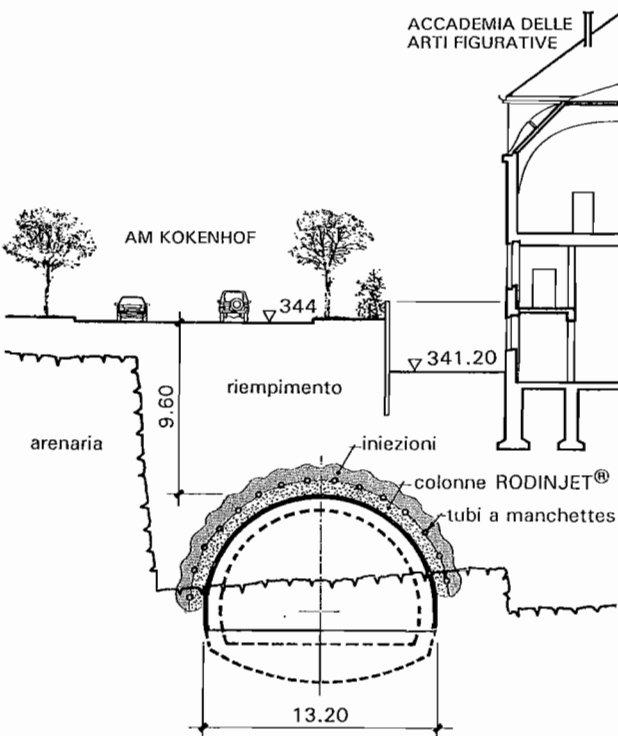


Fig. 16 - Galleria di Killesberg - Sezione trasversale.

Le perforazioni per l'installazione delle canne a manchettes in ferro, sono state eseguite ad aria e senza uso di rivestimento. Una volta realizzata la guaina, veniva iniettata, a bassa pressione ($8 \div 10$ bar), una sospensione cementizia plastica a basso dosaggio di cemento (250 kg/m^3), per il riempimento dei vuoti grossolani. Le iniezioni erano eseguite partendo dal fondo del foro a passi di 1 metro utilizzando un doppio otturatore. In ogni tratta veniva iniettato un volume di miscela massimo prefissato. L'iniezione veniva ripetuta nelle sezioni nelle quali non era stata raggiunta la soglia minima di pressione. Le quantità totali eseguite sono riassunte nella Tabella I.

Tabella I

Iniezioni		Media Tampone	Quantità Totale
Numero di fori	n	22	155
Perforazione	m	283	1980
Vol. miscela iniettata	m ³	52	361
Vol. terreno iniettato	m ³	325	2280
Vol. miscela/Vol. terreno		0.16	
Consumo cemento	t	14	99

Rodinjet 1 suborizzontale - Terminate le iniezioni si procedeva alla realizzazione dell'arco di colonne RODINJET 1. Le colonne avevano una lunghezza totale compresa tra 11 e 12.75 metri ed un interasse medio di 35 cm. Si è stimato un diametro medio delle colonne di 50 cm circa. In corrispondenza di ogni trattamento, lo scavo avanzava per tratte di lunghezza compresa tra 8 e 9.75 m. L'immorsamento delle colonne nel fronte (3 metri minimo a fine scavo) era sufficiente a garantire la stabilità dello stesso.

I parametri operativi per il *jet-grouting* erano i seguenti:

- cemento tipo: PZ35 F
- rapporto a/c: 0.8
- volume miscela: 233 l/m
- quantità cemento: 205 kg/m
- pressione: 400 bar

Le quantità totali eseguite sono riassunte nella Tabella II.

Tabella II

RODINJET®		Media Tampone	Quantità Totale
Numero di colonne	n	38	269
Perforazione	m	470	3293
RODINJET®	m ³	417	2922
Vol. miscela iniettata	m ³	103	723
Consumo cemento	t	91	637

3.4. Controlli in corso d'opera

Prove di laboratorio - Sono state eseguite, presso il laboratorio Prove Materiali dell'Università di Stoccarda (FMFA), prove di resistenza a compressione ad espansione laterale libera di cubetti di materiale rifluito dai fori durante il jet-grouting e prove analoghe su campioni carotati nelle colonne con determinazione del modulo elastico E (secondo la Norma DIN 1048).

I risultati delle prove di rottura sono riassunti nella Fig. 17 nella quale è riportata l'evoluzione nel tempo della resistenza del materiale trattato. Il modulo E medio a 28 giorni è di circa 3000 N/mm^2 con una resistenza media a 28 giorni di 19 N/mm^2 ed un rapporto E/R medio di circa 160.

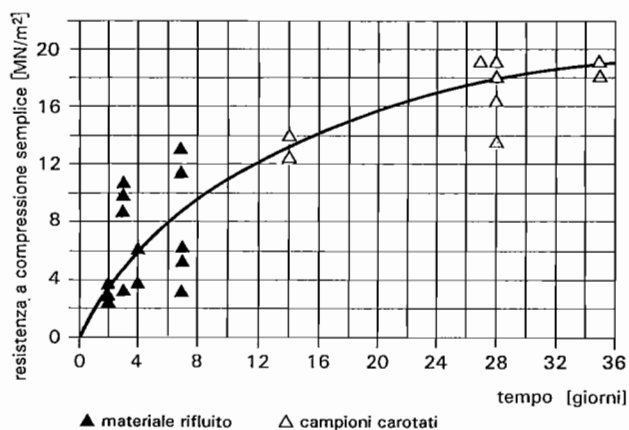


Fig. 17 - Evoluzione nel tempo della resistenza a rottura dei campioni di terreno consolidato.

Misure topografiche - Sulla strada e sugli edifici circostanti erano stati ubicati punti di livellazione misurati giornalmente. I cedimenti della strada, in corrispondenza dell'asse della galleria, hanno raggiunto un massimo di 35 mm nella tratta con minore copertura (9 metri). La loro evoluzione, in funzione della posizione del fronte, per tre punti rappresentativi, è riportata in Fig. 18. Nella Fig. 19 è illustrato l'andamento dei cedimenti in una sezione trasversale rispetto all'asse della galleria.

Gli edifici hanno avuto cedimenti limitati ad un massimo di tre millimetri e non sono stati rilevati danni o fessurazioni importanti. L'evoluzione media del cedimento dell'Accademia delle Arti Figurative (parete lato galleria) è riportata nella stessa Fig. 19 in funzione della posizione del fronte. La distanza minima tra la base della fondazione e lo scavo era di 6 metri circa. La convergenza delle pareti di scavo ha raggiunto un valore massimo di 10 mm.

I tempi di esecuzione, previsti inizialmente in tre mesi, sono stati largamente anticipati avendo realizzato tutto il lavoro di consolidamento in due mesi

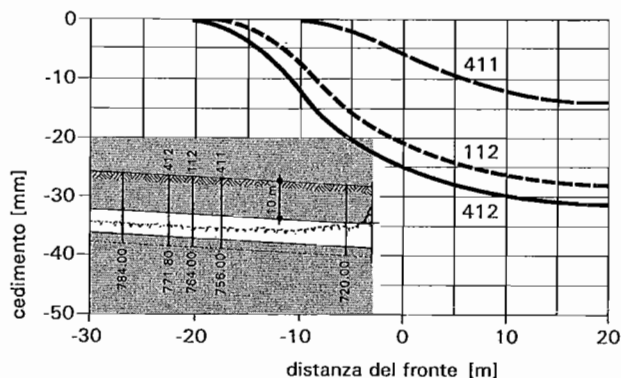


Fig. 18 - Cedimenti di tre punti posizionati, in superficie, sull'asse della galleria in funzione della distanza del fronte di avanzamento dello scavo.

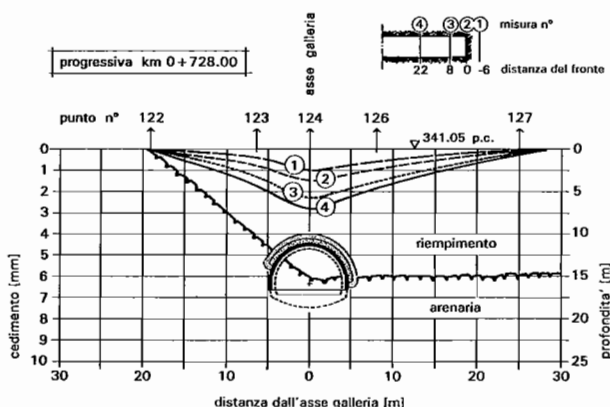


Fig. 19 - Cedimenti superficiali connessi allo scavo della galleria su quattro sezioni trasversali in funzione della distanza del fronte di scavo.

(65 giorni lavorativi). L'avanzamento medio dello scavo è stato di 1.1 metri per giorno solare.

BIBLIOGRAFIA

- AA.VV. (1992) - *Praktische Lösungen bei der voraussiehenden Schirminjektion unter Einsatz von Hochdruckinjektionen (HDI)*. DGE, Tunnelbau, Verlag Glückauf.
- DRAESE W. (1991) - *Tunnelbau in Bonn, Eine Technische Herausforderung*. Beton & Monierbau.
- McWILLIAMS F. (1991) - *Jet Setting under Bonn*. Tunnels & Tunneling, April.
- WALLIS S. (1991) - *Setting Settlement Standards*. Beton & Monierbau.
- WEISSBACH G., BLINDOW F.K. (1992) - *Anwendung Van Hochdruckinjektionen für den Tunnelvortrieb*. Felsbau, Mai.

SUMMARY

The paper describes two recent treatments of tunnel face confinement by sub-horizontal jet grouted columns carried-out in Germany, to allow the excavation of tunnels with shallow overburden located in densely inhabited built-up areas.

The first example deals with a subway tunnel at Bad-Godesberg, in the suburbs of Bonn, the other is about a subway in Stuttgart. In both cases the works in question were relevant to peculiar situations requiring particular care in order to minimize the disturbance to nearby buildings and to surface utilities located close to the excavation.

Both tunnels are double-tracked and have a section of approximately 85 square metres.