



## Applicazione della tecnica del compensation grouting per il controllo dei cedimenti indotti dallo scavo di gallerie al di sotto di un viadotto ferroviario

## Application of the compensation grouting technique to control induced by tunnel boring under a railway viaduct

*Dott. Ingg. Andrea PIGORINI(\*), Fausto IANNOTTA(\*\*), Francesco SACCHI(\*\*\*)*

**Parole chiave:** compensation grouting, monitoraggio, iniezioni di compensazione, controllo dei cedimenti.

**Keywords:** compensation grouting, monitoring, compensation injections, settlement control.

### 1. Introduzione

La realizzazione delle nuove linee ferroviarie A.V./A.C. sugli assi Milano-Napoli e Torino-Milano ha reso necessario progettare e realizzare importanti infrastrutture ferroviarie nei nodi delle grandi città interessate dalle due dorsali. Spesso la soluzione è ricaduta su opere in sotterraneo che meglio di altre permettono il rispetto del tessuto urbano esistente.

In particolare, la realizzazione della linea ferroviaria AV/AC Milano-Napoli ha previsto l'attraversamento della città di Bologna con un tracciato che si sviluppa per circa 10 km in sotterraneo, attraversando, sotto basse coperture, un contesto urbano ricco di interferenze e seguendo per il 70% circa dell'intero tracciato quello dell'attuale linea ferroviaria Bologna-Firenze che corre su un rilevato. Il rilevato si interrompe localmente laddove scavalcava, mediante ponti, la viabilità urbana principale. Di questi, il più lungo è il viadotto in muratura di Via Emilia Levante (fig. 1). La progettazione di due gallerie parallele, realizzate in scavo meccanizzato con tecnologia EPB, sottopassanti il ponte con copertura di circa 10 m dalle fondazioni, faceva attendere cedimenti intorno ai 20 mm, e potenzialmente fino a 50 mm. Tali cedimenti avrebbero indotto un'eccessiva distorsione, con rischi non tollerabili per la struttura del ponte.

Per tali ragioni, si è reso necessario intervenire a protezione del viadotto mediante una tecnologia che non avesse ripercussioni sull'esercizio ferroviario. Anche il contenimento dell'impatto dei cantieri sulla viabilità e sulle attività commerciali contigue, è risultato un requisito irrinunciabile, dato il contesto urbano densamente abitato e l'importanza della via Emilia sui trasporti locali. Gra-

### 1. Introduction

Construction of the new High Speed/High Capacity railway lines Milan-Naples and Turin-Milan made it necessary to design and construct important railway infrastructures in the heart of the main towns crossed by the two considered lines. Underground structures were considered the most suitable to respect the existing urbanization. In particular the High Speed/High Capacity railway line Milan-Naples passes through Bologna city while following a low-cover underground route of about 10 km. It crosses a highly urbanized area, rich of interferences, and runs for the 70% of its overall layout near to the embankment of the historical line Bologna-Florence. The embankment layout does locally interrupt to overpass the main urban road system. The longest overpass bridge is the masonry viaduct of Via Emilia Levante (fig. 1).

The design of two parallel tunnels, constructed with EPB-technology mechanized boring and passing beneath the bridge with a cover of about 10 meters from the foundations, allowed to predicting settlements of about 20 mm and potentially up to 50 mm. These settlements would have generated and excessive distortion and consequent unacceptable risks for the structure of the bridge. It was necessary for these reasons to protect the viaduct by adopting a particular technology that would have not impacted on the railway operation. The containment of the working site impact on both the road system and the contiguous business activities revealed to be a requirement that couldn't be renounced, considered the highly urbanized context and the importance of Via Emilia for local transports. Thanks to the compensation grouting injections, carried out by means of the guided drilling technique, the tunnel excavation below the Via Emilia Viaduct was successfully completed, confining the working site in small areas outside the road system and limiting the transit of the boring machine below the viaduct.

Construction works were farmed out according to the Merloni law (L. 109/94) while design and works supervision were assigned to Italferr on behalf of TAV.

(\*) Italferr – Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Gallerie.  
(\*\*) Italferr – Direzione Tecnica, U.O. Gallerie, Capo Settore Progettazione Gallerie.  
(\*\*\*) Italferr – Direzione Tecnica, Responsabile U.O. Corpo Stradale e Geotecnica.

## OSSERVATORIO

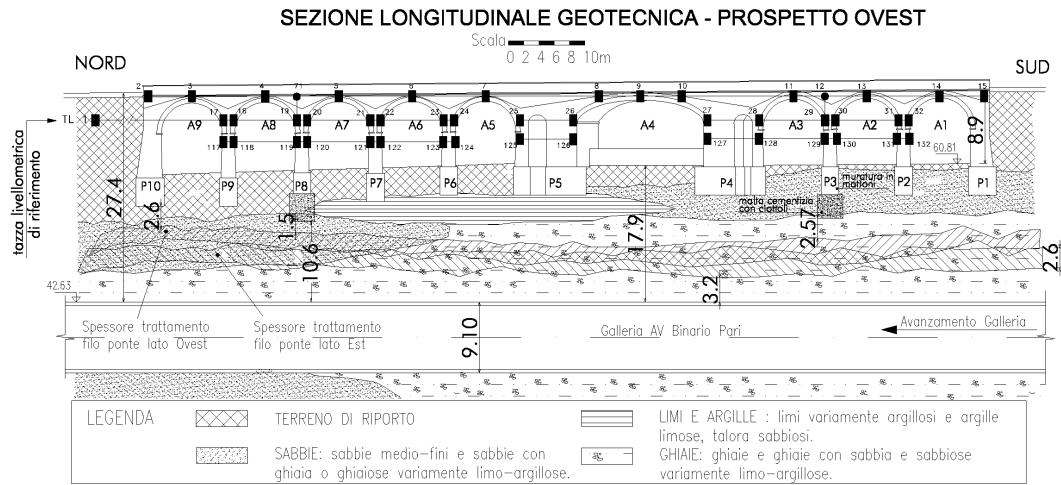


Fig. 1 - Sezione longitudinale del viadotto di Via Emilia Levante, con l'intervento di compensation grouting. *Longitudinal section of the viaduct of Via Emilia Levante with the compensation grouting intervention. (Longitudinal geotechnical section - West side view; North; South; Brick masonry; Mortar with cobblestones; Reference water level gauge; Treatment thickness on the West side of the bridge; Treatment thickness on the East side of the bridge; Tunnel excavation progress; HS tunnel - Up Line; Scale; Legend; Made ground; Sands: medium-fine sands and sands with gravel or variously silt-clayey gravelly sands; Silts and clays: variously clayey silts and silty clays, sandy at times; Gravels: gravels with sand and variously silt-clayey sandy gravels).*

zie alle iniezioni di compensation grouting, messe in atto attraverso la tecnica delle perforazioni guidate, lo scavo delle gallerie nel tratto al disotto del viadotto di Via Emilia è stato completato con successo, confinando il cantiere in piccole aree fuori dalla viabilità e limitando la soggezione al transito dei treni a un breve rallentamento, in- staurato a solo scopo precauzionale, durante il passaggio delle frese di scavo sotto il viadotto.

Il lavoro è stato gestito con appalto di sola esecuzione in regime Merloni (L. 109/94) con progettazione e direzione Lavori, per conto del committente TAV, di Italferr.

### 2. La struttura in elevazione del ponte e cedimenti ammissibili

Il viadotto è costituito da 8 archi a tutto sesto aventi una luce di 8m e da un arco ribassato con luce di 16m (indicato come arco A4 nella fig. 1) che attraversa in obliquo via Emilia.

La struttura si sviluppa per 112 m in lunghezza e 11 m in larghezza e si intesta alle due estremità nel rilevato ferroviario, alto circa 9 m sopra il piano di campagna. Ispezioni precedenti ai lavori avevano confermato il buono stato di conservazione della struttura, fatta eccezione per alcune fessure in chiave alle arcate A1 e A2, le uniche campate a non essere state oggetto di ricostruzione negli anni '40, in quanto scampate ai bombardamenti aerei della II guerra mondiale. Per esse è stato pertanto realizzato, prima dei lavori di scavo delle gallerie, un intervento di rinforzo delle volte con centinature in acciaio poste in opera con cuscinetti di contrasto (sistema Bullflex).

### 2. Bridge elevation structure and admissible settlements

The considered viaduct is composed of eight Roman arches of about 8m span and one flattened central arch of 16m span (named as arch A4 in fig. 1) that obliquely crosses over Via Emilia.

The brick bridge is 112m long and 11m wide and connects to the railway embankments at both ends, at a height of 9m above the ground level.

Specific inspections before the works confirmed the good preservation state of the structure with the exception of some cracks at the crown of the arches A1 and A2, the only spans that were not reconstructed in the 40's as not damaged by the aerial bombings of the II world war.

It was then carried out, before the tunnel excavation works, an intervention for the vault reinforcement with steel jack laggings laying on contrast bearings (Bullflex system).

Specific analyses were carried out in order to evaluate the sensitivity of the bridge structure to an induced subsidence field. A non linear calculation FEM model of the work was in particular implemented as much adherent as possible to the real structural response of the masonry work; that model was then used with the permanent and accidental loads of the real train transit. Under these modeling and loading hypotheses, specific displacements (rotations) were applied at the base of the viaduct piers and abutments and the ultimate rotations (ultimate displacements), rotations that is possible to impress to the bridge before local or global structure collapse, were then determined.

## OSSERVATORIO

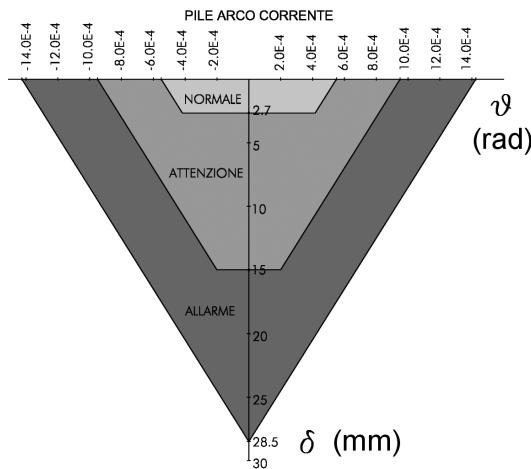


Fig. 2 - Domini di rotazione e cedimenti per le campate correnti del viadotto. Settlement and rotation domains for the Viaduct normal spans. (Normal arch piers; Normal; Attention; Alarm).

Al fine di valutare la sensibilità della struttura del ponte ad un campo di subsidenza indotta sono state svolte opportune analisi. In particolare è stato costruito un modello di calcolo FEM non lineare dell'opera, il più aderente possibile alla reale risposta strutturale della muratura, sottoposto ai carichi permanenti ed accidentali relativi al transito dei treni reali; sotto queste ipotesi di modellazione e di carico, tramite l'applicazione di spostamenti (rotazioni) imposti alla base delle pile e delle spalle sono state determinate le rotazioni ultime (spostamenti ultimi) che è possibile imprimere al ponte prima di avere il collasso locale o globale della struttura.

I calcoli strutturali hanno evidenziato la sensibilità della muratura alla combinazione di cedimenti differenziali e rotazioni relative tra le pile ovvero, in altri termini, l'interazione fra cedimenti e rotazioni ai fini della determinazione del comportamento a rottura. Tutto ciò è stato tradotto in un dominio (cedimento-rotazione, in fig. 2) che ha permesso di definire le coppie ammissibili di cedimento e rotazione relativa tra le pile di una campata. Il dominio è stato suddiviso in tre zone (normale, attenzione ed allarme) ad ognuna delle quali sono stati fatti corrispondere dei livelli di sicurezza e quindi delle azioni di intervento. In sostanza per piccole rotazioni relative, come quelle attese, i cedimenti differenziali fra le pile potevano raggiungere valori più alti. Tuttavia in progetto esecutivo si è preferito fissare un limite solo sui cedimenti differenziali per seguire un criterio più semplice e comunque conservativo. Il limite è stato fissato nel valore di 1:3000 della luce per ogni arcata, che in termini di cedimenti differenziali corrisponde a 2.7 mm per gli archi correnti e 5.4 mm per l'arco ribassato. Tali valori garantivano un certo margine anche sulla rotazione delle pile come di fatto si è poi osservato.

Structural calculations revealed the masonry structure sensitivity to the combination of differential settlements and relative rotations between piers that is, in other words, they shown the importance of the interaction between settlements and rotations for the evaluation of the rupture behavior. All this was converted in a specific domain (settlement-rotation, in fig. 2) that allowed to defining the admissible values of settlement and relative rotation between the piers of a span. This domain was divided into three ranges (normal, attention and alarm) each of them corresponding to specific safety levels and intervention actions. In substance the differential settlements between piers corresponding to the expected small relative rotations could reach higher values. A simpler and conservative criterion was anyway adopted by setting, in the executive design phase, a single limit for differential settlements. That limit was set to the value of 1:3000 of the arch span that corresponds, in terms of differential settlements, to 2.7 mm for the normal arches and 5.4 mm for the flattened arch. These values granted a certain margin on the pier rotation too as subsequently observed.

### 3. Stratigraphy and foundations of the bridge

The stratigraphic sequence comprises made ground up to 8m thick over a substantial depth of alluvial deposits of the Savena creek, extending almost till the plane of the tunnel invert. These deposits are predominantly gravelly sands or sandy gravels whose density ranges from medium to high level, with fine content (grit size less than 0,063 mm) generally lower than 15% in weight.

In this area the ground water level was found to be about 17m below the tunnel invert. Coring at the base of the piers P3 and P8 shown that the direct foundations of the viaduct reached the sandy and gravel layer (fig. 1).

### 4. Tunnel drilling and expected settlements

The two tunnels below the Savena creek viaduct were drilled completely in sandy and gravel grounds with a cover of about 10 m from the foundation plane of the viaduct (Figure 1, Figure 3). The distance between centers of the two tunnels is of 15 m; the prefabricated facing has an external diameter of 9,10m and is composed of 6 reinforced-concrete bolted ashlar of 0,4m diameter. The drilling diameter is of 9,4 m because of both the shield and the overburden excavation. The first tunnel to be constructed (Up Line Tunnel) is located directly below the viaduct while the center of the second tunnel (Down Line Tunnel) is 13m far from the centre of the viaduct (fig. 3).

The two EPB boring machines passed beneath the viaduct at a time-distance of 1 mouth, in the period July-August 2005, with a daily progress average speed of about 23 m.

The EPBS (Earth Pressure Balance Shield) technology

## OSSERVATORIO

### 3. Stratigrafia e fondazione del ponte

La sequenza stratigrafica comprende una coltre di terreni di riporto con spessore fino a 8 metri, sovrastante i depositi alluvionali del fiume Savena che si estendono fino al di sotto della quota dell'arco rovescio delle gallerie. Tali depositi sono costituiti principalmente da sabbie con ghiaia e ghiaie sabbiose da mediamente addensate ad addensate, con contenuto di fini (grani con dimensione inferiore a 0.063 mm) inferiore al 15% in peso.

In questa zona, la falda giace circa 17 metri al di sotto dell'arco rovescio. Carotaggi alla base delle pile P3 e P8 hanno evidenziato che le fondazioni del viadotto, di tipo diretto, si estendono fino a raggiungere lo strato di sabbie e ghiaie (fig. 1).

### 4. Scavo delle gallerie e cedimenti attesi

Le due gallerie al disotto del viadotto sono state scavate interamente nelle sabbie e ghiaie, con una copertura di poco oltre 10 m dal piano di fondazione del viadotto (figg. 1 e 3). L'interasse delle due gallerie è di 15m; il rivestimento prefabbricato ha un diametro esterno di 9.10 m ed è costituito da 6 conci bullonati in calcestruzzo armato, aventi uno spessore di 0.40 m. Il diametro di scavo è di 9.4 m per effetto dello spessore dello scudo e del sovraccavo. La prima galleria realizzata (Galleria Binario Pari) corre direttamente sotto il viadotto mentre l'asse della seconda (Galleria Binario Dispari) dista 13 m dall'asse del viadotto (fig. 3). Le due frese EPB hanno sottopassato il viadotto a distanza di un mese l'una dall'altra, nel periodo Luglio-Agosto 2005, con una velocità di avanzamento media giornaliera intorno ai 23 m.

La tecnologia EPBS (Earth Pressure Balance Shield) permette di limitare i cedimenti indotti dallo scavo potendo controllare la pressione applicata al fronte ed eseguendo, contemporaneamente all'avanzamento, iniezioni di intasamento a tergo dell'ultimo anello montato. I cedimenti indotti dipendono largamente dalla capacità di controllo delle operazioni di scavo, tese a garantire le pressioni progettualmente individuate attraverso un bilanciamento tra volumi scavati dalla testa con i volumi estratti dalla camera di scavo e dalle iniezioni sopra menzionate. I cedimenti prodotti in superficie dalle gallerie sono generalmente espressi come volume perso  $V_L$  (volume loss), dato dal rapporto, espresso in percentuale, fra il volume compreso fra il piano di campagna iniziale e quello deformato a seguito dello scavo e il volume nominale di scavo.

Il valore di riferimento progettuale per il volume perso  $V_L$  è stato fissato a 0.4%, in linea con la tecnologia impiegata, a cui corrispondono cedimenti differenziali delle pile di 20 mm, che si sarebbero sviluppati in poche ore, viste le velocità di scavo delle macchine, poi effettivamente realizzate.

L'impostazione dell'intervento di mitigazione dei cedimenti del viadotto prevedeva innanzitutto l'applicazione

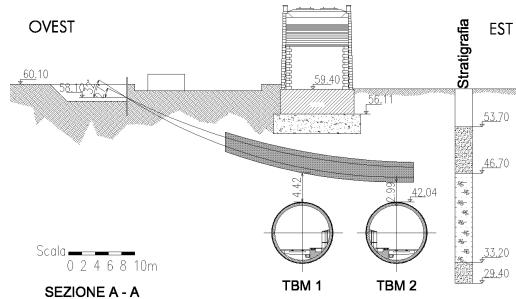


Fig. 3 - Sezione trasversale del viadotto e delle gallerie. *Cross section of the viaduct and the tunnels. (Section; Scale; West; East; Stratigraph).*

allows to limiting the ground settlements induced by tunnel excavation, making it possible to control the excavation front pressure and carry out, while the excavation progresses, tails skin grouting around the periphery of the last completed lining ring.

Settlements actually induced by tunnel construction process depend to a large extent on the control of the excavation operations aiming to guarantee the design pressures by balancing the volumes excavated by the boring machine head and both the volumes extracted from the excavation camera and the volumes concerning the above mentioned injections.

Tunneling induced settlements are usually expressed as volume loss,  $V_L$ , defined as ratio, in percentage, between the induced settlement volume and the nominal excavation volume. The design reference value of the volume loss  $V_L$  was set to 0,4%, according to the used technology, corresponding to differential settlements of 20mm between adjacent piers. Taking into consideration the actual excavation speed values, these settlements would have developed over few hours.

The viaduct settlement mitigation philosophy was above all based on the application of specific construction practices for the operation of the boring machine in the vicinity of the bridge aiming to reduce the volume loss. The compensation grouting was designed to both limiting the ground settlements generated in the normal operation of the boring machine and keeping the settlement values within the established ranges, even in case of ground and excavation behavior outside the expected limits. In this meaning the whole compensation system had then to be able to manage settlements corresponding to a volume loss value up to 1%. The volume loss values measured during the excavation of the two boring machines along a section of about 700m approaching the viaduct, with similar geotechnical characteristics, justified and reinforced the design approach. Measured settlements resulted indeed in overall volume losses ranging from 0,3% to 1%, corresponding to maximum settlements of 15 mm and 49mm at the level of the foundation laying plane. These data con-

## OSSERVATORIO

di procedure per la gestione della fresa in prossimità del viadotto in modo da ridurre il volume perso. Il compensation grouting è stato progettato per limitare, non solo i cedimenti prodotti in condizioni di normale funzionamento della fresa, ma per essere, altresì, in grado di riportare i cedimenti entro le soglie stabilite, anche nel caso di comportamento dei terreni e dello scavo fuori dai limiti attesi. In tal senso, l'intero sistema di compensation doveva quindi poter gestire cedimenti corrispondenti ad un valore di volume perso fino all'1%.

Durante i lavori questo approccio progettuale apparve ancor più giustificato visti i valori misurati durante lo scavo delle due frese lungo il tratto di approccio al viadotto (circa 700 m) avente caratteristiche geotecniche simili. I cedimenti misurati fornivano, infatti, volumi persi complessivi variabili da 0,3% a 1%, corrispondenti a cedimenti massimi al piano di posa delle fondazioni di 15mm e 49mm. Tali dati riaffermavano la necessità di adottare provvedimenti di salvaguardia per la sicurezza del viadotto.

### 5. Compensation grouting

#### 5.1. Aspetti generali

La tecnologia del Compensation Grouting consiste nell'eseguire iniezioni di miscela cementizia nella zona di terreno compresa fra la calotta della galleria e il piano di fondazione della struttura da proteggere. La miscela viene iniettata contemporaneamente al passaggio della fresa attraverso tubi di iniezione (canne à manchettes - TAMs) preventivamente installati e dotati di valvole di non ritorno. La miscela iniettata produce un innalzamento che si contrappone alla subsidenza indotta dallo scavo, in modo

firmato the necessity to adopt specific protection measures for the safety of the viaduct.

#### 5. Compensation grouting

##### 5.1. General aspects

The Compensation Grouting technology consists in injecting a concrete mix in the ground between the tunnel vault and the foundation level of the structure to protect. Mix is injected by pre-installed grouting tubes (canne à manchettes - TAMs) at the passage of the boring machine; the grouting tubes are equipped with no-return valves. The injected mix produces a rise that opposes to the excavation-induced subsidence thus keeping the settlements and distortions sustained by the structure within defined limits. Coordination and synchronization between drilling progress and compensation grouting are of great importance: settlements of the structure can then be limited during transit of the boring machine and they can be further reduced with rise injections after its transit (HARRIS et al., 1994, HARRIS, 2001).

In principle the applicability limit of the Compensation Grouting with respect to the volume to compensate is defined by the maximum productivity of the pumping system in relation to the evolution speed of the settlements.

In case that the pumping system productivity is not suitable it is possible to have a settlement control only by reducing the progress speed of the excavation front. A further flexibility is granted by both the type of mix and the space distribution of the injections.

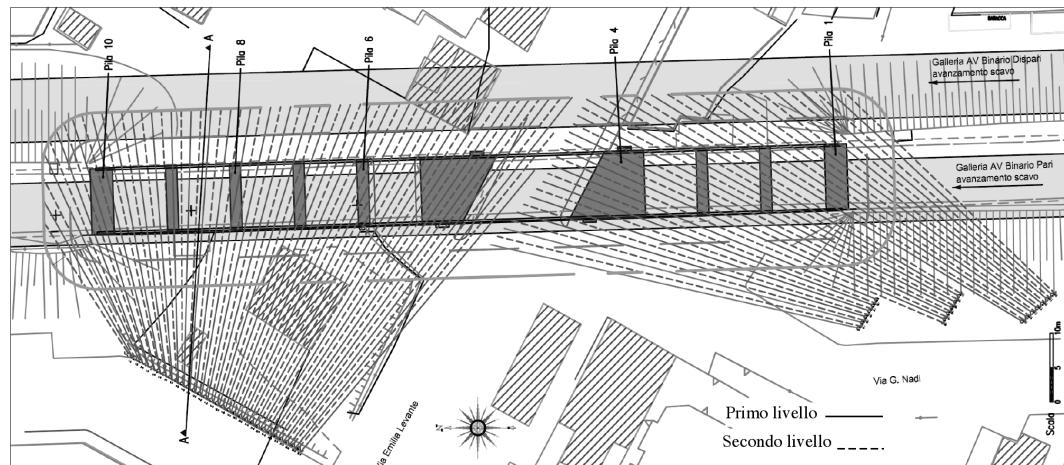


Fig. 4 - Planimetria del viadotto con l'impronta delle gallerie e dei tubi di iniezione. Plan view of the viaduct with the impression of the tunnel and the grouting tubes. (First level; Second level).

## OSSERVATORIO

da limitare cedimenti e distorsioni subiti dalla struttura entro limiti definiti (fig. 4).

Il coordinamento e la sincronizzazione fra l'avanzamento dello scavo e le iniezioni di compensazione sono di fondamentale importanza: in questo modo i cedimenti subiti dalla struttura possono essere limitati durante il passaggio della fresa e possono essere ulteriormente ridotti con iniezioni di sollevamento dopo il passaggio della fresa stessa (HARRIS et al., 1994, HARRIS, 2001). In linea di principio, il limite d'applicabilità del Compensation Grouting rispetto al volume da compensare è definito dalla produttività massima del sistema di pompaggio, in relazione alla velocità di evoluzione dei cedimenti.

Nel caso in cui la produttività del sistema di pompaggio non sia adeguata, è possibile controllare i cedimenti solo riducendo la velocità di avanzamento del fronte di scavo. Ulteriore flessibilità è fornita dalla scelta del tipo di miscela e dalla distribuzione spaziale delle iniezioni.

### 5.2. Metodologia di perforazione

L'applicazione del "Directional Drilling Technology", con cui l'installazione dei tubi d'iniezione fra la struttura muraria e le gallerie è stata eseguita direttamente dalla superficie, rappresenta l'aspetto più peculiare ed innovativo dal punto di vista tecnologico dell'intervento.

L'introduzione di questa tecnologia, evitando la più tipica soluzione costituita da pozzi circolari (6÷8 m d'ingombro planimetrico) e da perforazioni orizzontali eseguite dall'interno di questi ultimi, ha apportato notevoli vantaggi in termini di minore impatto del cantiere su un contesto urbano critico, per densità di costruito e per presenza di strade intensamente trafficate.

Rispetto alla classica metodologia "Trenchless", in cui interessa la sola precisione di entrata e di uscita con recupero dell'utensile di perforazione dalla parte finale, è stata richiesta una particolare precisione lungo l'intera lunghezza del foro.

### 5.3. Campo prove preliminare

Con l'esecuzione di un campo prova preliminare in una zona appositamente adibita, è stato possibile selezionare la tecnica di perforazione più idonea fra quelle correntemente in uso (martelli ad acqua, "mudmotor", utensili asimmetrici) e definire il relativo dispositivo di controllo in tempo reale dell'andamento piano-altimetrico del foro. Il sistema prescelto doveva avere, inoltre, la specificità di arrecare il minimo disturbo al terreno e consentire l'installazione dei tubi d'iniezione senza il loro danneggiamento.

Il campo prove preliminare, opportunamente attrezzato con strumentazione di superficie e geotecnica simile a quella poi utilizzata sulla struttura muraria (tazze livellometriche, punti di livellazione topografica di preciso-

### 5.2. Drilling methodology

The application of the "Directional Drilling Technology", the use of which allowed to installing the grouting tubes between the masonry structure and the tunnels directly from the surface, represents the most peculiar and innovative aspect of the considered intervention from a technological point of view.

The utilization of this technology allowed to avoiding the typical solution based on circular shafts (6÷8 m of planimetric dimensions) and horizontal drillings executed from inside the shafts. It revealed considerable advantages in terms of reduced impact of the working site on the specific urban context that is critical both for the high urbanization and the high traffic density.

While the classical "Trenchless" methodology is interested only in the entry and exit precision, being the drilling tool recovered from the end side, a particular precision all along the length of the drilling hole has been here required.

### 5.3. Preliminary test field

The realization of a preliminary test field in a specific and fit area allowed to selecting the most suitable drilling technique among the actually used ones (water motors, mud-motors, asymmetric tools) and to defining the relevant equipment for the real time control of the planimetric and altimetric profile of the drilling hole. Moreover the selected system had to possess the peculiarity to minimize the ground disturbance and to allow the installation of the grouting tubes without any damages of the ducts.

The preliminary test field, properly equipped with surface and geotechnical devices similar to the equipment subsequently used for the masonry structure (level-meter cups, points of precision topographic leveling, inclinometers and multi-base strainmeters) represented and important phase for:

- the verification of the drilling precision that is the spacing of the injection valves;
- the planning of the injection phases;
- the selection of the injection mixes;
- the estimation of the pre-treatment volumes;
- the verification of both rises and injection efficiency for dimensioning the injection plant;
- the verification and the evaluation of the displacement monitoring equipment.

As illustrated in fig. 5 the preliminary test field interested an area of about 70 m<sup>2</sup> that was injected with six grouting tubes equipped with valves at an installation level that is quite similar to the level of the viaduct compensation project. The evaluation of the compensation injection efficiency coefficient (GEF ground efficient factor) is

## OSSERVATORIO

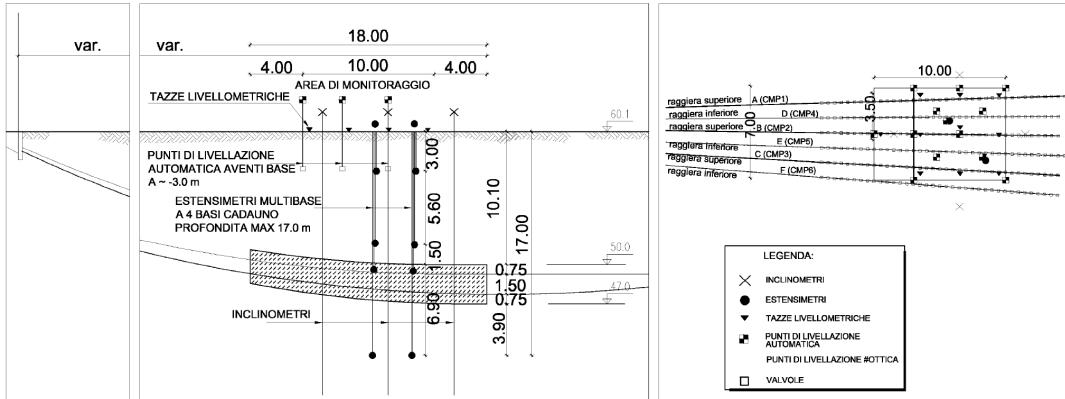


Fig. 5 - Campo prove preliminare: sezione trasversale e dettaglio planimetrico. Preliminary test field: cross section and planimetric detail. (Monitoring area; Legend:  $\times$  inclinometers;  $\bullet$  strainmeters;  $\blacktriangledown$  levelmeter cups; automatic leveling points;  $\blacklozenge$  optical leveling points;  $\square$  valves. Upper rig; Lower rig; Automatic leveling points at; Four-base strainmeters – maximum depth: 17 m).

ne, inclinometri ed estensimetri multibase), ha inoltre rappresentato una fase importante per:

- la verifica della precisione delle perforazioni e quindi della spaziatura delle valvole di iniezione;
- la pianificazione delle fasi di iniezione;
- la selezione delle miscele di iniezione;
- la stima dei volumi di pretrattamento;
- la verifica dei sollevamenti ed efficienza delle iniezioni per il dimensionamento dell'impianto di iniezione;
- la verifica e la valutazione della strumentazione di monitoraggio degli spostamenti;

Come mostrato nella fig. 5, il campo prove preliminare ha interessato un'area in superficie di circa 70m<sup>2</sup>, sotto la quale è stato iniettato il terreno con sei tubi d'iniezione valvolati, posti ad una quota molto simile a quella del progetto di compensazione del viadotto. Molto utile ai fini del dimensionamento degli impianti è la valutazione del coefficiente di efficienza delle iniezioni di compensazione (GEF ground efficient factor). Esso rappresenta il sollevamento espresso in mm ottenuto con l'iniezione di 1 l/m<sup>2</sup> di miscela. Noti i cedimenti da compensare e il tempo nel quale si svilupperanno, attraverso il coefficiente si determinano le portate di miscela da iniettare e quindi le linee di iniezione da attivare contemporaneamente per una determinata area, (in questo caso per una singola pila). Nel caso in esame il campo prove ha fornito un coefficiente GEF di 0.1. Per un cedimento da compensare di 15mm di una pila si è potuto così stimare un volume di circa 9.000 l di miscela da iniettare in 20 ore (450 l/ora).

Poiché il campo dei cedimenti della fresa avrebbe interessato due pile contemporaneamente, la potenzialità dell'impianto doveva essere almeno di 900 l/ora. In ogni caso si è messo in campo un impianto di più elevata potenzialità capace di alimentare contemporaneamente 16 li-

quite useful for dimensioning the injection plants. It represents the ground rise (expressed in mm) achieved with the injection of 1 l/m<sup>2</sup> of mix. Once known the settlements to compensate and their time evolution, the GEF coefficient allows to determine the injection mix flow rate and consequently the injection lines to activate simultaneously for a specific area (in this case for a single pier). The test field gave, for the case under examination, a GEF coefficient of 0.1. It was then possible to estimate a volume of about 9000 l of mix to inject in 20 hours (450 l/h) in order to compensate a settlement of 15 mm of a pier. As the settlement area of the boring machine would have interested two piers at the same time, the plant capacity had to be at least of 900 l/h. A higher capacity plant was anyway installed, being able to feed 16 injection lines at the same time in order to face possible more critical situations.

### 5.4. Pre-treatment and pre-compensation injections

The presence of mainly granulated materials with fine content lower than 15% in weight required the execution of a preliminary injection phase for ground treatment, aiming to reach a higher efficiency of the compensation intervention. The injections aimed to fill in, before the transit of the boring machines, the most permeable grounds that would have otherwise required an excessive quantity of mix to make the rise phenomenon to start. In particular it allowed to creating a kind of perimetrical "shell" for the subsequent compensation injections.

Such hypothesis referred to previous compensation grouting experiences where it had been already verified the necessity to pre-fill the voids with suitable concrete mixes in order to generate a controlled rise of the granulated grounds.

Similar compensation grouting experiences had been already carried out for the formation of the "Thames ter-

## OSSERVATORIO

nee di iniezioni per far fronte ad eventuali situazioni più critiche.

### 5.4. Le iniezioni di pretrattamento e pre-compensazione

Per il raggiungimento della massima efficienza dell'intervento di compensazione, data la presenza di materiali prevalentemente granulari con contenuto in fango inferiore al 15%, è stato necessario realizzare una fase preliminare d'iniezione di trattamento dei terreni. L'iniezione ha avuto lo scopo di intasare, prima dell'arrivo delle frese, i terreni più permeabili che avrebbero richiesto una quantità eccessiva di miscela prima dell'innesto del fenomeno di sollevamento e di creare una sorta di "guscio" perimetrale alle successive iniezioni di compensazione.

Tale ipotesi faceva riferimento a varie precedenti esperienze di compensation grouting in cui, per poter generare un sollevamento controllato nei terreni granulari, si era già verificata la necessità di riempire preliminarmente i vuoti con idonee miscele cementizie. In particolare, nella formazione "Thames terrace gravel" di Londra, avente granulometrie simili a quelle dei terreni di Bologna presenti al disotto del viadotto, e dove erano già state eseguite esperienze di compensation grouting, i quantitativi iniettati come pre-trattamento erano risultati essere nell'ordine del 5% del volume di terreno interessato.

Si sottolinea che nel pre-trattamento si è posta molta attenzione a non produrre uno strato di terreno ad elevata resistenza, poiché questa condizione avrebbe reso difficile attivare i fenomeni di "idro-fratturazione" richiesti nelle successive fasi di compensazione. Per tale motivo, si è previsto l'impiego di miscele con caratteristiche di buona penetratilità ma di bassa resistenza.

Con il campo prova, si è confermata la possibilità e la necessità di un pre-trattamento al fine di garantire una rapida risposta dei terreni alle successive fasi di compensazione dei sedimenti indotti ed in grado anche di bilanciare situazioni di non perfetto posizionamento delle valvole a causa di eccessivi scostamenti dei fori (nell'ordine di 0,40 m nel piano orizzontale e di 1,0 m nel piano verticale) dal loro allineamento teorico (fig. 6).

In base alle informazioni ottenute nel campo prova preliminare, si è proceduto nell'intervento vero e proprio caratterizzato dai seguenti aspetti progettuali e tecnologici più significativi:

- sono stati installati 96 tubi d'iniezione costituiti da tubi in ferro da 2" dotati di valvole "a Manchette" ogni 50 cm nella zona sottostante la struttura e per una fascia eccedente di 8 m rispetto all'impronta delle fondazioni del viadotto (fig. 4);
- le canne d'iniezione sono state installate su due livelli quasi paralleli ad una distanza reciproca verticale di circa 1,5 m., con il livello inferiore posto ad una distanza superiore ai 3 m rispetto alla calotta della galleria (fig. 1);

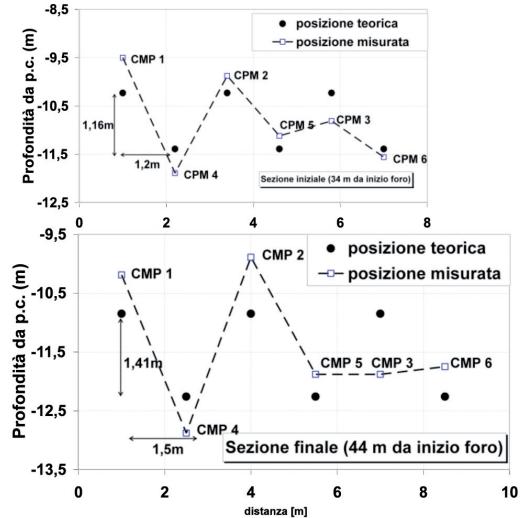


Fig. 6 - Deviazione verticale dei fori nel campo prova. Vertical deviation of the holes in the test field (Final section: 44 m from the hole origin; Design depth; Theoretical position; Measured Position; Distance).

"race gravel" in London, characterized by granulated material sizes not so different from those of the grounds below the Savena creek viaduct. In the London case the pre-treatment injected quantities resulted to be about 5% of the interested ground volume.

A great attention was paid, in the pre-treatment phase, not to produce a high-strength ground layer as this condition would have made difficult the initiation of the hydro-crack phenomena that are required in the subsequent compensation phases. For this reason specific mixes characterized by good penetrability and low strength were then selected.

The test field confirmed the possibility and the necessity of a pre-treatment phase in order to both guarantee a fast response of the grounds to the subsequent phases for the compensation of the induced settlements and balance situations of non perfect positioning of the valves, deriving from an excessive hole's position deviation (about 0,4m in the horizontal plane and 1,0m in the vertical plane) with respect to their theoretical alignment (fig. 6).

On the base of data gained in the preliminary test field the real intervention was started, characterized by the following most significant design and technological aspects:

- grouting tubes (2"- diameter iron ducts), equipped with valves "a Manchette", were installed every 50 cm in the area below the structure, along a ground strip that is 8 meter larger than the viaduct foundation impression (fig. 4);
- the injection rods were installed on two almost paral-

## OSSERVATORIO

- all'interno di ciascun livello, si è rispettata la condizione di una distanza orizzontale massima di circa 3 m, con uno sfalsamento planimetrico fra i due livelli di 1.5 m (fig. 4);
- le perforazioni sono state condotte con tre attrezzature utilizzando una doppia batteria costituita da un'asta interna di perforazione con "punta asimmetrica" (marteau a foro ad acqua o utensile a rotazione) e da un rivestimento esterno a seguire del diametro di 114 mm. Il controllo della direzione dei fori è stato eseguito con una combinazione di inclinometri ed emettitori radio montati sull'utensile; l'acquisizione della posizione avveniva in superficie via radio con un ricevitore posto sulla verticale dell'utensile di perforazione;
- al termine della perforazione il 10% dei fori sono stati comunque controllati con misure "dirette" eseguite con l'introduzione di strumenti all'interno delle canne d'注射 installate;
- le miscele utilizzate, nella formazione della guaina di intasamento del foro e nella fase di pre-trattamento, sono state definite in modo da permettere una sicura riapertura delle valvole e di poter effettuare successive idro-fratturazioni nel terreno già trattato. Allo scopo sono state utilizzate miscele con:
  - basso rapporto cemento/acqua ( $C/W = 0.1 \div 0.18$ );
  - alto contenuto complessivo di solidi mediante l'impiego di filler calcareo ( $(C+F)/W=1.1$ ) e stabilizzazione con bentonite idratata ( $B/W \approx 1\%$ );
  - valori di resistenza a compressione semplice compresi fra 0,3 e 0,8 MPa.

Con l'uso di tali miscele non si è risentito del tempo trascorso fra la fase di iniezione di pre-trattamento ed il passaggio delle due frese. Solo nelle successive fasi di pre-compensazione e compensazione sono state utilizzate miscele con un maggiore contenuto in cemento, escludendo invece l'impiego di filler ( $C/W=0.7$  e  $B/W=1\%$ ), comunque con resistenze a compressione contenute.

- È stata definita una strategia di iniezione che ha previsto, prima dell'arrivo delle frese le seguenti fasi di preparazione:
  - iniezioni di pre-trattamento con lo scopo di permeare il terreno e riempire i pori del terreno di miscela;
  - iniezioni di pre-compensazione per innescare nel terreno lo stato tensionale di incipiente sollevamento e renderlo subito pronto a trasformare le pressioni di iniezioni in aumento di volume. In tale fase si sono recuperati anche i sedimenti occorsi durante le fasi di perforazione.

Si deve osservare che nella parte sud del viadotto, ove si era evidenziata nella fase d'indagine una minore presenza di materiale fine, durante le perforazioni si sono osservati maggiori sedimenti indotti sulla struttura muraria che ha portato, durante la fase di intasamento dei fori, ad

level levels at a reciprocal vertical distance of about 1,5m, being the lower level distance from the tunnel vault greater than 5m (fig. 1);

- the condition of a maximum horizontal distance of about 3 m was respected within each single level, being 1.5m the planimetric offset between the two levels (fig. 4);
- drillings were carried out by three devices utilizing a double battery composed of an inner drilling rod with an asymmetrical drill (water hammer or rotation tool) and an outer cover of 144mm diameter. The hole-direction control was carried out by a combination of inclinometers and radio emitters installed on the equipment; the position was received via radio by a receiver point at the surface on the vertical of the drilling device.
- at the end of the drilling activity 10% of the holes was anyway controlled by "direct" measures carried out by introducing suitable instruments inside the installed injection rods;
- mixes used both in the pre-treatment phase and for the formation of the hole-filling sheath were defined in such a way to allow a safe reopening of the valves and to be able to do subsequent hydro-cracks in the pre-treated ground. Specific mixes were used for this purpose:
  - low concrete/water ratio ( $C/W = 0.1 \div 0.18$ );
  - high overall solid content achieved by using calcareous fillers ( $(C+F)/W=1.1$ ) and hydrated bentonite stabilization ( $B/W \approx 1\%$ );
  - simple compression-strength values ranging from 0,3 to 0,8 MPa.

The utilization of such mixes allowed not to suffer the time elapsed between the pre-treatment injection phase and the transit of the two boring machines. Mixes with a higher concrete content, being anyway low the compression strength, were only used in the subsequent pre-compensation and compensation phases while excluding the utilization of fillers ( $C/W=0.7$  e  $B/W=1\%$ ).

An injection strategy was planned to execute the following preparation phases before the arrival of the boring machines:

- pre-treatment injections aiming to permeate the ground and fill in the voids;
- pre-compensation injections in order to initiate the incipient-rise tensional state in the ground and make it ready to transform the injection pressures into volume increase. In such a phase all the settlements occurred during the drilling phase were compensated.

It has to be noted that the south part of the viaduct, where a lower level of fine material was found during the survey phase, revealed during the drilling phase both higher induced settlements on the masonry structure,

## OSSERVATORIO

assorbimenti doppi rispetto a quanto osservato nel lato nord (circa 30÷40 l/m) e una maggiore intensità di iniezione nella fase di pre-trattamento e pre-compensazione.

La fig. 8 riassume visivamente l'entità delle iniezioni preparatorie precedenti l'arrivo della prima fresa, mostrando le curve di uguale intensità di iniezione in litri/m<sup>2</sup>. Il grafico è stato ottenuto interpolando i volumi di miscela iniettati in ciascuna valvola misurati con contatori volumetrici. Si può osservare che l'intensità di iniezione varia tipicamente fra 200 e 300 l/m<sup>2</sup> per un volume di miscela totale iniettato di 714 m<sup>3</sup>, corrispondente al 7% del volume di terreno trattato, assumendo uno spessore continuo di 3 m per l'orizzonte trattato. Il completamento delle fasi di pre-trattamento e di pre-compensazione ha permesso di aumentare l'efficienza nell'indurre sollevamento con le iniezioni di compensazione vere e proprie durante il passaggio del fronte di scavo.

### 5.5. Monitoraggio

Come per ogni tecnica basata sull'osservazione, un aspetto fondamentale per il successo del compensation grouting è il monitoraggio. È evidente che nella tecnica del compensation è indispensabile attivare un monitoraggio continuo, e quindi necessariamente automatico, sia durante l'installazione che durante la fase di iniezione. Il sistema di monitoraggio deve poter seguire e fornire in tempo reale con precisione ed affidabilità:

- l'evoluzione dei cedimenti della struttura;
- i dati di avanzamento dello scavo della fresa;
- le quantità e le pressioni di iniezione per ogni valvola iniettata (di cui sono note le coordinate).

L'interfaccia di presentazione deve essere semplice e di rapida interpretazione.

Visti i particolari limiti di cedimento relativi assegnati alle campate (2,7 mm e 5,4 mm) si è dovuto mettere in atto un sistema di rilievo automatico di elevata precisione e affidabilità mediante tazze livellometriche a sensore di pressione e ad acquisizione automatica. I sensori hanno assicurato un'accuratezza delle misure dell'ordine del decimo di millimetro e si sono rivelati poco sensibili alle oscillazioni termiche. In ogni caso, per ridurre le influenze termiche anche proprie della struttura, il software di restituzione consente di mettere a confronto la deformata del ponte (rilevata ogni 15 minuti) con quella della stessa ora dei giorni precedenti. Sono stati installati un totale di 64 sensori posti su entrambi i prospetti del viadotto in chiave arco e all'imposta. Un secondo livello di sensori è stato collocato agli spigoli delle pile per rilevare in via indiretta la eventuale rotazione. La fresa era già dotata di un proprio sistema di monitoraggio automatico dei dati di avanzamento (tra cui posizione, pressioni al fronte, volumi e pressioni di iniezioni di intasamento). L'insieme dei dati confluiva in un computer posto in cantiere e collegato in rete, consentendo la valutazione e l'e-

leading to a double mix absorption with respect to the North side (about 30÷40 l/m), and a higher grouting intensity in the pre-treatment and pre-compensation phase.

Fig. 8 summarizes in a visual way the consistency of the preparation injections preceding the boring machine transit and illustrates the iso-grouting intensity curves in l/m<sup>2</sup>. The diagram is achieved by interpolating the mix volumes injected into each valve as measured by volumetric counters. It can be noted that the grouting intensity typically ranges from 200 to 300 l/m<sup>2</sup> for a total injected mix volume of 714 m<sup>3</sup> corresponding to the 7% of the treated ground volume, taking into consideration a continuous thickness of 3m. The completion of the pre-treatment and pre-compensation phases allowed to increasing the efficiency of the actual ground-rise induced by the compensation injections during the excavation front progress.

### 5.5. Monitoring

The success of the compensation grouting technique is related to the monitoring activity as for every technique based on the observation. The compensation grouting technique requires a continuous and then automatic monitoring both during the installation phase and the injection one. The monitoring system has to be able to measure and present in real time, with precision and reliability:

- the structure settlement evolution;
- the progress data of the boring machine excavation;
- the injection quantities and pressures for each injected valve (of which the coordinates are known).

The visualization interface has to be simple and easy to be interpreted. The particular relative settlement limits of the spans (2,7mm and 5,4mm) led to install a high precision and reliable automatic detection system using levimeter cups with pressure sensor and automatic acquisition.

Sensors guaranteed a measurement precision on the order of one tenth of millimeter and revealed to be not enough sensitive to thermal fluctuations. However the processing software allowed to comparing the bridge deformation curve (measured every 15 minutes) with the deformation curve measured at the same time of the previous days. Such process was necessary to reduce both the external thermal influences and the internal one. 64 sensors were installed on both views of the viaduct at the arch crown and the arch springer.

A second level of sensors was installed at the edges of the piers in order to indirectly detect possible rotations. The boring machine was anyway equipped with its own automatic system for monitoring the progress data (among which position, front pressures, volumes and pressures of the filling injections). All data were transmitted to a single computer in the working site. It was connected to a network system making then it possible to evaluate and analyze data in real time and consequently

## OSSERVATORIO

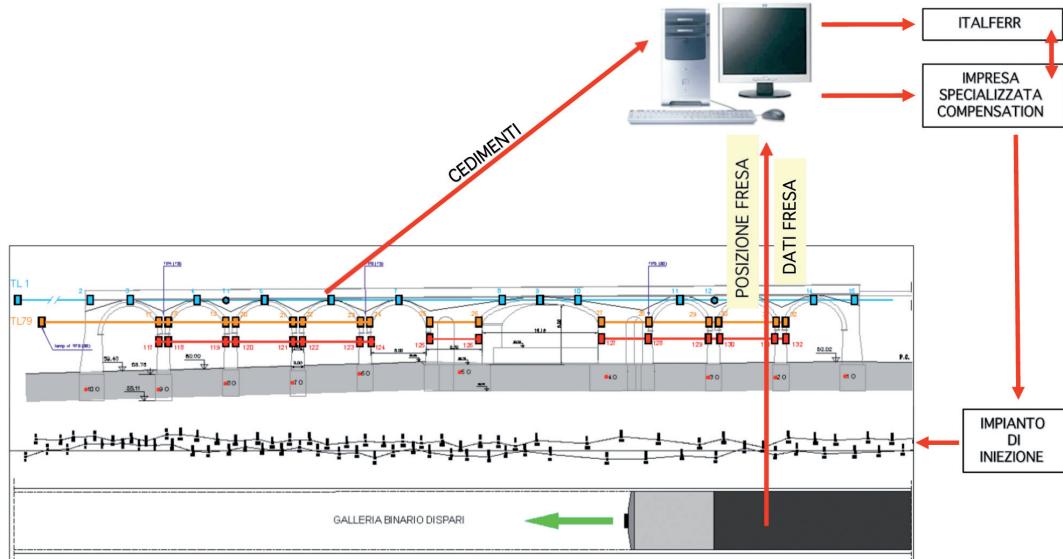


Fig. 7 - Schema di gestione dei dati di monitoraggio. *Management diagram of the monitoring data. (Down Line tunnel; Compensation-skilled company; Boring machine data; Boring machine position; Grouting plant; Settlements).*

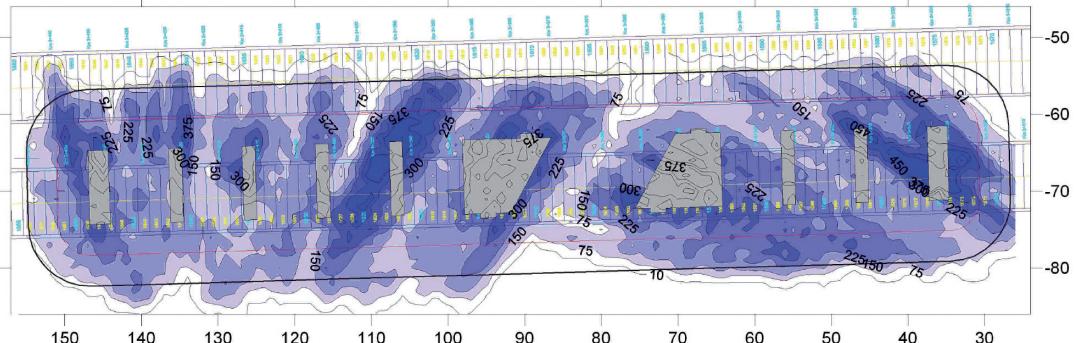


Fig. 8 - Intensità di iniezione durante il pre-trattamento e il pre-compensation (curve di isoquantità in  $l/m^2$ ). *Grouting intensity during the pre-treatment and the pre-compensation phases (iso-quantity curve in  $l/m^2$ )*

same dei dati in tempo reale al fine di attivare, quindi, le procedure di iniezione sulle varie pile (fig. 7). Un incontro giornaliero fra l'Appaltatore, l'Impresa specializzata ed Italferr (in qualità di Direttore lavori e Progettista) facilitava il coordinamento fra le attività di scavo della galleria e di iniezione in funzione dei dati registrati dal monitoraggio della struttura.

### 5.6. Criteri di intervento

Il confronto dei cedimenti differenziali misurati ( $d$ ) con i limiti di deformazione predeterminati, dava luogo a tre possibili situazioni a cui corrispondevano tre livelli di

activate the procedures of injection on the different piers (fig. 7). A daily meeting between the Contractor, the skilled company and Italferr (in quality of Designer and Work Supervisor) made it easy the coordination of the tunnel drilling and tunnel injection activities, depending on data recorded by the structure monitoring system.

### 5.6. Intervention criteria

Comparison between measured differential settlements ( $d$ ) and pre-determined deformation limits generated three possible situations corresponding to three intervention levels:

## OSSERVATORIO

intervento:

- normale (o zona verde)  $d < L/4000$ ;
- attenzione (o zona gialla)  $L/4000 \leq d < L/3000$ ;
- allerta (o zona rossa)  $d \geq L/3000$ ;

con  $L$  = luce delle arcate.

Nella zona verde le iniezioni di compensation potevano essere attivate per prevenire il cedimento differenziale.

Nella zona gialla il compensation doveva essere attivato e continuato fino a far ritornare la campata interessata nella zona Verde.

Nella zona Rossa si sarebbero dovuti attuare interventi anche sullo scavo della galleria o attuare interventi straordinari in funzione dello scenario in essere.

Poiché lo scavo è stato eseguito senza interruzioni, il controllo in campo è stato assicurato dall'Appaltatore dalla Direzione Lavori e dal Progettista su più turni per coprire giorni festivi e ore notturne.

### 5.7. Iniezioni di compensazione

Il volume perso atteso per la prima fresa è stato stimato intorno a 0,21% a partire da valori di cedimento registrati su 2 sezioni di monitoraggio in prossimità del viadotto, fuori dalla zona del materasso di intasamento e per la quale sono stati utilizzati parametri simili di gestione della fresa. I volumi iniettati e le curve di uguale intensità di iniezione durante il passaggio della prima fresa (Galleria Pari) sono riportati in fig. 9: si nota come le iniezioni siano concentrate al di sotto dell'impronta delle pile e allineate sopra la galleria in costruzione. Valori di intensità media di iniezione fra 10 e 50 l/m<sup>2</sup> sono stati registrati a seguito delle iniezioni condotte simultaneamente all'avanzamento della galleria per compensare i cedimenti indotti per un volume totale di 89 m<sup>3</sup> di miscela.

Valori più elevati dell'intensità media di iniezione, fra 100 e 200 l/m<sup>2</sup>, sono stati richiesti per le pile P9 e P10 in un tratto nel quale la fresa ha avuto dei problemi con le iniezioni di intasamento a tergo dello scudo e con il controllo delle pressioni al fronte, che hanno causato una riduzione della velocità di avanzamento per un periodo di circa 18 ore.

Per il passaggio della seconda fresa (Galleria Dispari), il volume totale di miscela iniettato è stato di 67 m<sup>3</sup> distribuito come appare in fig. 10. Le iniezioni in questa fase si sono concentrate sul lato Est del viadotto, più prossimo alla galleria. Sono state richieste intensità di iniezione fra 10 e 50 l/m<sup>2</sup> per mitigare i cedimenti a fronte di un volume perso atteso per la sola Galleria Dispari di 0,4% (intendendo per  $V_L$  della seconda galleria l'incremento prodotto dalla stessa rispetto a quello prodotto dalla prima) determinato in modo uguale a quanto descritto per la prima fresa.

Il valore significativamente più alto del volume perso per la seconda galleria è principalmente dovuto alla pros-

- normal (or green zone)  $d < L/4000$ ;
- attention (or yellow zone)  $L/4000 \leq d < L/3000$ ;
- alarm (or red zone)  $d \geq L/3000$  with  $L$ =arcade span.

In the Green zone the compensation injections could be initiated to prevent differential settlements.

In the Yellow zone the compensation injection had to be initiated and continued till the involved span returned within the Green zone.

In the Red zone it would have been necessary to carry out some interventions on the tunnel excavation or to actuate extraordinary interventions depending on the specific situation.

As the tunnel excavation was carried out without any interruption, the field control was guaranteed by the Contractor, the Work Supervisor and the Designer, working on different shifts to cover holidays and nighttime.

### 5.7. Compensation injections

The expected loss volume for the first boring machine was estimated to be around 0,21% starting from the settlement values recorded by 2 monitoring sections nearby the viaduct, outside the filling mattress area for which similar parameters were used for the boring machine operation and control.

The iso-grouting intensity curves and the mix volumes injected during the transit of the first boring machine (Up Line Tunnel) are illustrated in fig. 9: it can be noted that the injections are concentrated below the impression of the piers and are aligned over the tunnel under construction. Average values of the grouting intensity varying from 10 to 50 l/m<sup>2</sup> were recorded, following to the injections (amounting to an overall mix volume of 89 m<sup>3</sup>) carried out at the progress of the tunnel excavation aiming to compensate the induced settlements.

Higher values of the grouting intensity, ranging from 100 to 200 l/m<sup>2</sup>, were required for the piers P9 and P10 in a section where the boring machine had some problems with both the filling injections behind the shield and the pressure control at the excavation front, thus causing a reduction of the progress speed for a period of 18 hours.

As regard the transit of the second boring machine (Down Line Tunnel) the overall volume of the injected mix amounted to 67 m<sup>3</sup> according to the distribution of fig. 10. In this phase the injections were concentrated on the east side of the viaduct, close to the tunnel. The settlement reduction required grouting intensity values varying from 10 to 50 l/m<sup>2</sup>, being the expected volume loss of the sole Down Line Tunnel equal to 0,4% (the quantity  $VL$  concerning the second tunnel represents the increase generated by the second tunnel with respect to the first tunnel one), determined as described for the first boring machine.

The significantly higher value of the volume loss for the second tunnel is mainly due to the proximity of the two

## OSSERVATORIO

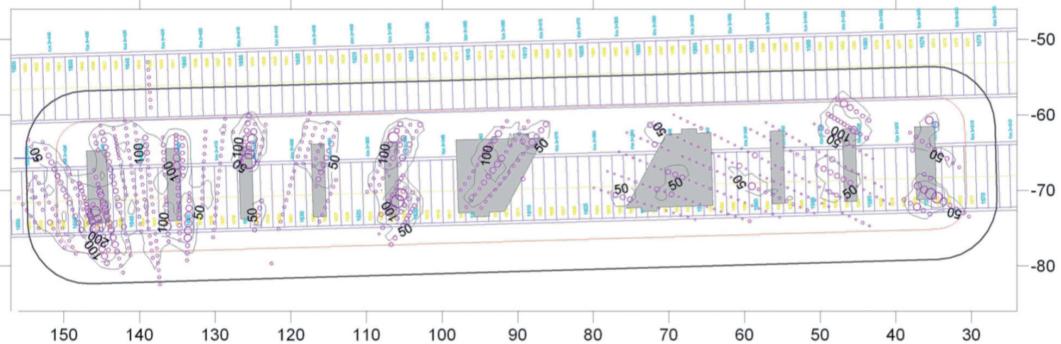


Fig. 9 - Intensità d'iniezione durante il passaggio della prima TBM (binario pari) (curve di isoquantità in  $\text{l/m}^2$  per valvole di iniezione). Grouting intensity during transit of the first TBM (Up Line) (iso-quantity curves in  $\text{l/m}^2$  for grouting valves).

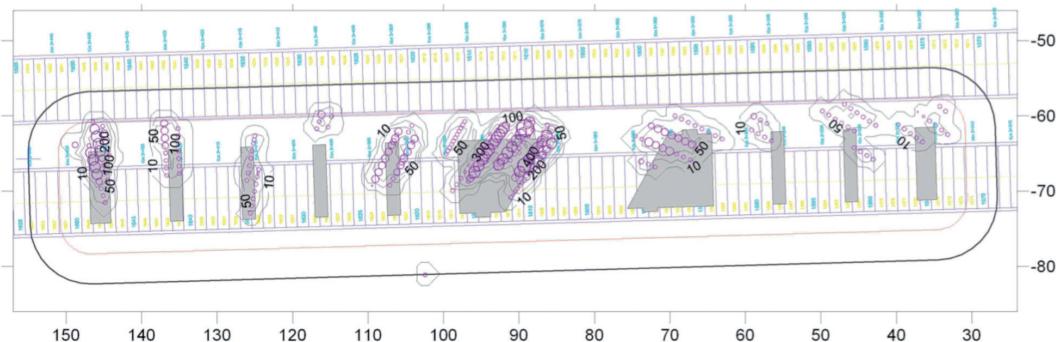


Fig. 10 - Intensità d'iniezione durante il passaggio della seconda TBM (binario dispari) (curve di isoquantità in  $\text{l/m}^2$  per valvole di iniezione). Grouting intensity during transit of the second TBM (Down Line) (iso-quantity curves in  $\text{l/m}^2$  for grouting valves)



Fig. 11 - Scala. Scale. (Volume of injected mix).

iniezione ben oltre i  $200 \text{ l/m}^2$  sono stati richiesti a seguito di uno stop di 18 ore della fresa per problemi legati al sistema di iniezione in coda che ha causato anche una perdita di pressione al fronte.

Per valutare gli effetti del compensation grouting è utile confrontare (fig. 12) la configurazione del ponte alle ore 14:00 del 2/07/05, quando la prima fresa era prossima alla pila P8, rispetto al profilo longitudinale dei sedimenti attesi per un valore di  $VL = 0.21\%$ . Nonostante il basso valore di volume perso, i sedimenti attesi in asse erano prossimi ai 10 mm con sedimenti differenziali fra la pila P7 e P8 di circa 1:1000. Il grafico superiore mostra l'inten-

sità (meno di 1 diametro) delle due gallerie. Si può notare ancora in fig. 10 come la pila P5 abbia richiesto volumi di iniezione molto più consistenti rispetto alle altre pile: valori di intensità di

tunnels (less than 1 meter). It can be noted that pier P5 required much higher injection volumes than the other piers: grouting intensity values higher than  $200 \text{ l/m}^2$  were required following to an 18-hour stop of the boring machine for problems connected to the tail injection system that caused even a pressure loss at the excavation front.

The effects of the compensation grouting can be usefully evaluated by comparing (fig. 12) the bridge configuration at the time 14:00 on July 2 -2005, when the first boring machine was close to the pier P8, and the longitudinal profile of the expected settlements for a value of  $VL = 0.21\%$ . Despite the low value of the loss volume, the expected axial settlements were close to 10 mm with differential settlements between piers P7 and P8 of about 1:1000. The upper curve shows the average intensity of the injections carried out below piers P1 to P8 (both at an intermediate date and at the end of the injection activity after the transit of the TBM1) in order to keep the absolute settlements below 4mm and the differential settlements quite below the specified limits. Dashed lines describe the

## OSSERVATORIO

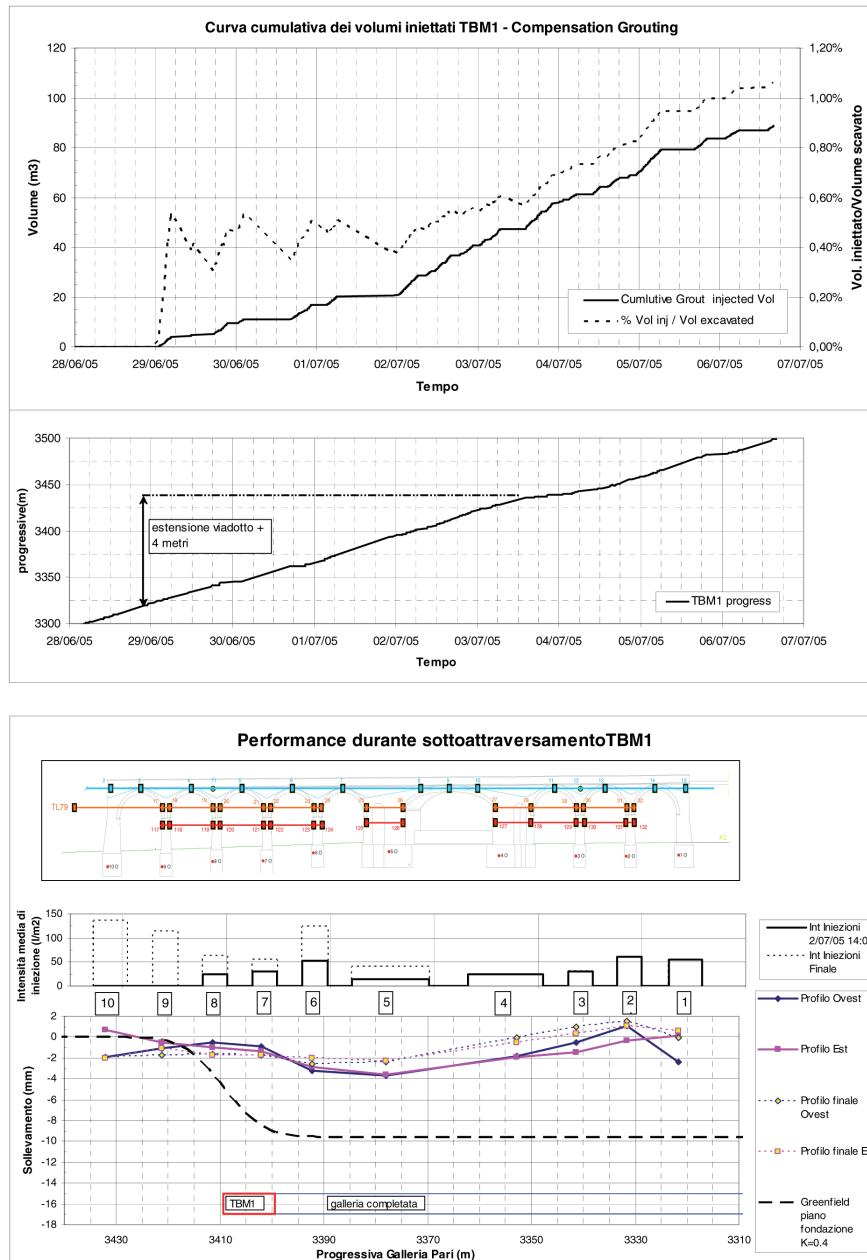


Fig. 12 - Monitoraggio dei sedimenti e dei volumi iniettati durante il passaggio della prima fresa (binario pari). *Settlement and injected-volume monitoring during the transit of the first boring machine (Up Line). (West side profile; East side profile; Final West side profile; Final East side profile; Foundation plane Greenfield; Grouting intensity; Final grouting intensity; Completed tunnel; Rise; Average grouting insensitivity; Kilometric point of the Up Line tunnel; Performance during TBM1 underpass; Kilometric Points; Viaduct length + 4 meters; Time; Volume; Injected volume/excavated volume; Cumulative curve of the injected volumes for the TBM1 – Compensation grouting).*

## OSSERVATORIO

sità media delle iniezioni condotte sotto le pile da P1 a P8 (sia alla data intermedia che alla fine delle operazioni di iniezione dopo il passaggio della TBM1), che hanno permesso di limitare i cedimenti assoluti a meno di 4mm e quelli differenziali a valori ben al di sotto dei limiti specificati. Le linee tratteggiate descrivono il profilo finale dei cedimenti longitudinali dopo il passaggio della prima fresa e mostrano un cedimento massimo inferiore ai 3 mm grazie alle iniezioni condotte successivamente alla data di riferimento sotto le pile, da P5 a P10. Senza l'intervento di compensation grouting i cedimenti finali del viadotto, a seguito del passaggio della prima fresa sarebbero stati intorno a 10 mm.

Un simile controllo dei cedimenti è stato effettuato anche per la seconda fresa.

Il rispetto dei parametri di controllo per la struttura, in termini di cedimenti differenziali e rotazioni relative tra le pile delle singole arcate, è evidenziato in fig. 13, dove è mostrata la storia temporale di tali parametri, in relazione ai domini definiti progettualmente, restituita in automatica dal sistema di monitoraggio.

final profile of the longitudinal settlements after the transit of the first boring machine and show a maximum settlement smaller than 3 mm thanks to the injections carried out below the pier P5 to P10 after the reference date. In absence of compensation grouting the final settlements of the viaduct, following to the transit of the first boring machine, would have amounted to about 10mm. A similar settlement control was carried out for the second boring machine too.

The respect of the structure control parameters, in terms of differential settlements and relative rotation among the piers of the single arcades, is shown in fig. 13. It represents the time

history of such parameters, in relation to the design domains, as automatically returned by the monitoring system.

### 5.8. Conclusions

The compensation grouting technique, first implemented in England, has its ideal application in the fine-grain over-strengthened grounds and in the thickened granulated grounds. This last ground type requires a pre-treatment

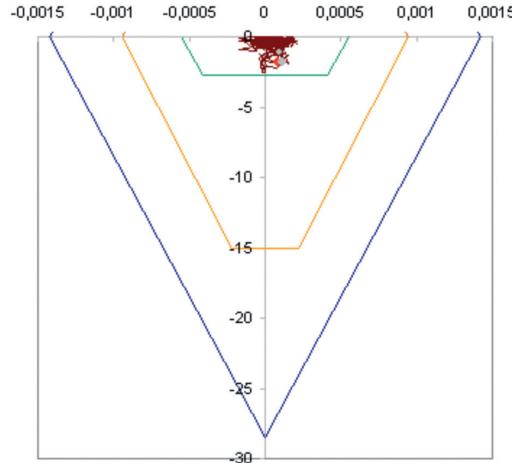


Fig. 13 - Andamento delle coppie cedimento differenziale - rotazione relativa di un'arcata tipica all'interno dei domini durante il transito della fresa pari. *Differential settlement-relative rotation values of a typical arcade at the transit of the Up Line boring machine.*

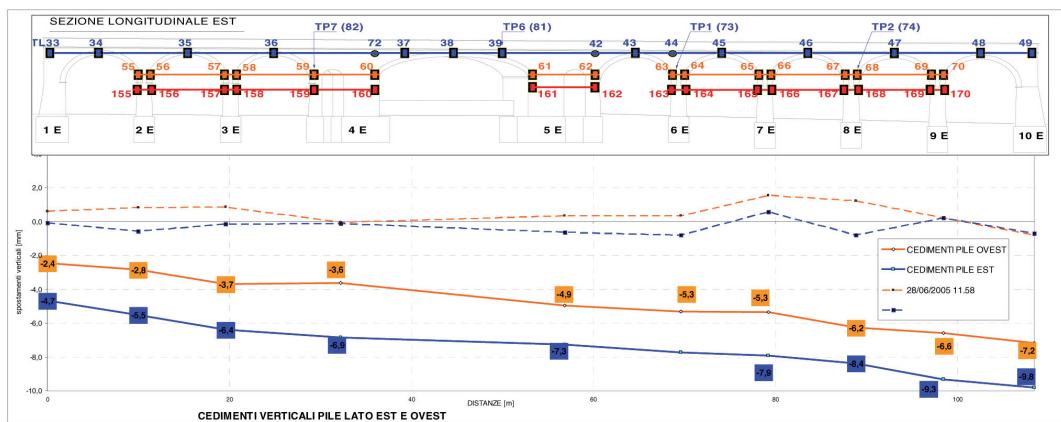


Fig. 14 - Configurazione finale del ponte dopo il passaggio di entrambe le fresse. Final configuration of the bridge after the transit of the two boring machines. (Longitudinal section - east side; West side pier settlements; East side pier settlements; Vertical settlements of the east side and west side piers; Vertical displacements).

## OSSERVATORIO

### 5.8. Conclusioni

La tecnica del compensation grouting, messa a punto in Inghilterra, trova la sua ideale applicazione nei terreni a grana fina sovraconsolidati e nei terreni granulari adensati. In quest'ultimi è necessario un pretrattamento la cui intensità è crescente con la permeabilità e la presenza dei vuoti. Non è adatta nei terreni coesivi saturi teneri (a basso modulo elastico), in cui le pressioni generate dalle misceli possono dar corso a cedimenti di consolidazione. Non vi sono particolari esclusioni strutturali fatta eccezione per fondazioni su pali, ma è necessario un adeguato spessore di terreno tra le gallerie e il piano delle fondazioni. Fondazioni rigide ed estese permettono un controllo più facile. Fondazioni puntuali richiedono una maggiore attenzione al controllo dei cedimenti/sollevamenti differenziali che possono generarsi.

I benefici ottenuti dall'applicazione di questa tecnologia per mitigare gli effetti dei cedimenti indotti dalla costruzione delle due gallerie con scavo meccanizzato al di sotto del viadotto ferroviario sono apparsi evidenti. I lavori di preparazione prima dell'arrivo della prima fresa hanno richiesto l'iniezione di 714 m<sup>3</sup> di miscela cementizia, ovvero circa il 7% del volume nominale del terreno trattato. Durante il passaggio delle due frese ulteriori 156 m<sup>3</sup> di miscela, pari a 0,9% del volume totale scavato per le due gallerie, sono stati iniettati simultaneamente all'avanzamento del fronte per mantenere, con successo, i cedimenti differenziali fra pile adiacenti al di sotto della soiglia di 1:3000 della luce di ogni arcata (fig. 14).

whose intensity increases at the increase of both the permeability and the presence of voids. This technique is not suitable to be applied to soft cohesive saturated grounds (with low elastic module) where pressures generated by the mixes can originate strengthening settlements.

There are no particular structural exclusions with the exception of the pile foundations but it is required a suitable ground thickness between the tunnels and the foundation plane. Rigid and extended foundations make the control easier. Punctual foundations require to pay a higher attention to the control of the differential settlements/rises that can originate.

The application of this technique for reducing the settlements induced by the mechanized boring of the two tunnels below the railway viaduct allowed to achieving evident benefits.

The preparation works before the transit of the first boring machine required the injection of 714m<sup>3</sup> of concrete mix that is the 7% of the nominal volume of the treated ground.

During the transit of the other two boring machines a mix volume of 156 m<sup>3</sup>, equal to the 0,9% of the overall excavated volume for the two tunnels, was injected at the progress of the excavation front. This procedure was successfully implemented in order to keep the differential settlements between adjacent piers below the value of 1:3000 of the span of each arcade (fig. 14).

### BIBLIOGRAFIA - REFERENCE

- [1] D.I. HARRIS, R.J. MAIR, J.P. LOVE, R.N. TAYLOR and T.O. HENDERSON, (1994), "Observations of ground and structure movements for compensation grouting during tunnel construction at Waterloo Station", *Geotechnique*. 44, 4, pp. 691-714.
- [2] HARRIS, (2001), "Protective Measures", Chapter 11 in *Building Response to Tunnelling - Volume 1: Projects and Methods*. (Eds. BURLAND et al.) Thomas TELFORD.