

L'uso delle resine poliuretatiche nel consolidamento delle piattaforme ferroviarie: metodi di progettazione e casi di studio

N. D'Alessandro¹, G. Del Vasto², R. Di Francesco³, V. Lamberti⁴, P. Olla⁵, P. Petrella³

¹RFI – Direzione Territoriale Produzione Ancona

²RFI – Direzione Territoriale Produzione Napoli

³Paolo Petrella Engineering – Milano

⁴RFI – Direzione Territoriale Produzione Verona

⁵RFI – Direttore commerciale Centro Sud Tirrenica

SOMMARIO: per risolvere annosi problemi di cedevolezza della piattaforma ferroviaria è stata usata, per la prima volta in Italia, la tecnica del trattamento del terreno mediante l'iniezione di resine poliuretatiche; la trasposizione di tale tecnica in ambito ferroviario, il cui uso nel consolidamento delle fondazioni costituisce prassi professionale da oltre un ventennio, non è avvenuta tout-court, ma ha richiesto un necessario adattamento (modifiche nel chimismo, progettazione di nuove macchine perforatrici, costruzione di appositi modelli fem) in relazione alla necessità di garantire il traffico ferroviario rispettando, nel contempo, tolleranze negli spostamenti dell'armamento dell'ordine di alcuni millimetri.

A distanza di due anni dal termine dei primi interventi la tecnica, rivelatasi altamente affidabile a condizione di rispettare determinati parametri progettuali ed esecutivi, è in procinto di divenire un format applicativo.

Keywords: consolidamento, piattaforma ferroviaria, resine poliuretatiche, permeazione, poroelasticità

1 INTRODUZIONE

Sebbene la tecnica del miglioramento dei terreni mediante iniezioni di apposite miscele - silicatiche, cementizie ed organiche (poliuretatiche) - sia in uso da diversi decenni (Gasc e Bertin, 1949), la diffusione di queste ultime in Italia risale agli anni '90 del secolo scorso, rimanendo confinata al consolidamento delle fondazioni e dei fronti di scavo delle gallerie.

Tale tecnica, basata sulla permeazione a bassa pressione (in genere $P_i = 3-5$ Atm) al fine di fornire il giusto gradiente idraulico ai componenti, consiste sostanzialmente nell'iniezione di una miscela di poliolo ed isocianato all'interno di modesti volumi di terreno con lo scopo di aumentarne la resistenza e diminuirne sia la deformabilità che la permeabilità; di conseguenza, richiedendo perforazioni di piccolo diametro (usualmente di 30 mm) e una cantieristica poco invasiva, ha rappresentato sin da subito un'ottima tecnica per applicazioni in ambiente urbano, mentre l'estensione ad altri ambienti (quale quello ferroviario) è sempre stato limitato da due fattori comunque sempre presenti (Flora e Lirer, 2012): a) la scarsa conoscenza dei processi fisico-meccanici coinvolti; b) l'incertezza dell'esito del trattamento in termini di estensione (raggio medio della colonna trattata) e di proprietà meccaniche del mezzo trattato.

L'estensione della metodologia al consolidamento delle piattaforme ferroviarie, tentato per la prima volta in Italia in sostituzione di metodologie ampiamente collaudate (es.: vibroflottazione; vibrocompattazione; colonne di ghiaia vibrocompattata; colonne di ghiaia vibrocompattata e cementata; jet-grouting, ecc.), ha richiesto lo studio di alcuni passaggi di traduzione della stessa al fine di renderla eseguibile in esercizio, ovvero al fine di garantire la continuità del traffico ferroviario rispettando i severi limiti imposti dal committente in termini di possibili sollevamenti o cedimenti dell'armamento. Il vantaggio di svolgere i lavori con queste modalità consta nel fatto che non si penalizza l'offerta commerciale rispetto alle lavorazioni tradizionali le quali, invece, implicano pesanti ripercussioni in termini di restrizioni di capacità nell'offerta economica erogata.

Si evidenzia, infine, che le resine appositamente sviluppate, grazie alla loro inerzia chimico-fisica, rientrano tra i prodotti industriali a maggiore compatibilità ambientale ai sensi della prescrizione dell'Unione Europea 2004/394/CE.

Ciò premesso, nel seguito sono dapprima descritti i metodi di studio per l'estensione della tecnica all'ambiente ferroviario e successivamente sono illustrati alcuni esempi applicativi relativi al consolidamento di piattaforme ferroviarie in trincea, a raso e in rilevato eseguiti con successo e collaudati.

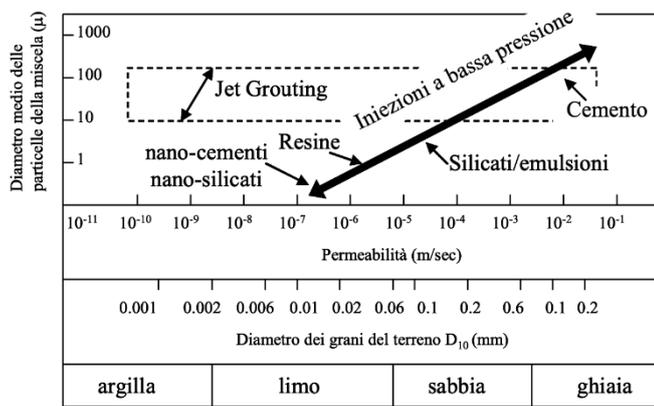


Figura 1 – Iniettabilità dei terreni in funzione della granulometria e della permeabilità (Flora e Lirer, 2011).

2 METODOLOGIA PROGETTUALE

2.1 Scelta della miscela consolidante

Rimandando a Flora e Lirer (2011) per la classificazione delle tecniche di consolidamento dei terreni, è essenziale evidenziare che la scelta della miscela consolidante richiede la conoscenza del processo d'iniezione, ovvero richiede la conoscenza degli effetti chimico-fisici derivanti dalla diffusione per permeazione all'interno dei vuoti interparticellari contestualmente all'interazione chimica con le particelle costituenti lo scheletro solido; per questo motivo, ovvero per la manifesta complessità dell'analisi, la scelta è solitamente condotta ricorrendo a criteri empirici basati sull'influenza della granulometria, ovvero della permeabilità.

Come si può notare dalla fig. 1, non esiste una miscela consolidante a "diffusione universale" quanto, piuttosto, diverse miscele ognuna con la propria capacità di penetrazione in funzione del diametro dei grani del terreno da trattare; è anche vero, però, che nella scelta della miscela occorre dover tenere conto anche di ulteriori fattori, quali: 1) della massa della miscela, ed in particolare del confronto con la massa dell'acqua (10 kN/m^3) che tende ad essere allontanata e sostituita con il processo di iniezione; 2) del tempo di presa, riferito al completamento del fenomeno chimico-fisico nella sua interezza.

Nel primo caso si può semplicisticamente considerare che (calcoli più esatti possono essere ottenuti ricorrendo all'equazione del bilancio di massa): a) i cementi sono utilizzati solo in presenza di terreni a grana grossa, ovvero di terreni che non rientrano nella casistica dei dissesti delle piattaforme ferroviarie; b) le resine (poliuretaniche) hanno pesi medi di volume di 6 kN/m^3 ; c) il peso di volume delle miscele di cemento microfina o nanocemento (con rapporto A/C 1:1) è di 14 kN/m^3 ; d) il peso di volume dei nanosilicati (nanosilice colloidale) è di 11.5 kN/m^3 .

In merito alla durata del fenomeno di consolidamento per iniezione occorre considerare che: A) i cementi microfina rientrano nel campo dei cementi,

richiedendo tempi dell'ordine dei giorni per la presa e l'indurimento; B) le resine poliuretaniche completano il processo di reazione e indurimento in pochi minuti; C) la sineresi della nanosilice colloidale si completa in tempi dell'ordine di diversi giorni.

In definitiva, si vede facilmente che le resine poliuretaniche rappresentano la migliore miscela consolidante sia in termini di peso di volume (inferiore a quello dell'acqua che tendono a sostituire) sia di tempi di indurimento, pur essendo relegate ad un ristretto campo di permeabilità appartenente ai limi sabbiosi (fig. 1); è anche vero, però, che con un opportuno sistema di perforazione il loro uso può essere esteso anche ai terreni argillosi.

2.2 Caratteristiche chimico-fisiche delle resine

Prima di entrare nel merito del metodo di perforazione, si premette che le resine poliuretaniche in commercio ed usate per le usuali applicazioni geotecniche si sono rilevate insoddisfacenti nei numerosi campi prova eseguiti su terreni diversi tra loro per natura litologica (argille, limi e sabbie nelle diverse combinazioni) e geologica (es.: terreni fluvioglaciali, alluvionali, colluviali, ecc.); difatti, con una pressione di espansione di diverse centinaia di kPa e un aumento in volume di un fattore 20, hanno sovente provocato sollevamenti indesiderati (e comunque superiori ai limiti imposti dal committente) dei modelli di piattaforma ferroviaria appositamente realizzati.

Il passaggio successivo è consistito nello sviluppo di diverse nuove tipologie di resine poliuretaniche a celle chiuse (ossia, non reagenti con l'acqua), basati sulla combinazione dei due componenti base, il poliolo e l'isocianato, con appositi additivi capaci di modificarne i tempi di crema, di gel e la densità a sua volta dipendente dalla pressione di espansione e dall'aumento di volume (tabella 1).

Tabella 1 – principali caratteristiche fisiche di alcune delle resine poliuretaniche appositamente sviluppate per applicazioni in ambiente ferroviario

Id.	Tempo di crema (sec)	Tempo di gel (sec)	Tempo di maturazione (min)	Densità libera (kN/m^3)
PP-DFR1 (permeante)	40	150	20	0.55
PP-DFR2 (portante)	30	65	5	0.45
PP-DFR3 (superportante)	30	65	5	1.6

In questo modo sono stati ottenuti quattro benefici: i) sono stati eliminati la quasi totalità degli effetti indesiderati associati a sollevamenti indesiderati senza controllo; ii) le diverse resine possono essere usate in concomitanza o singolarmente in relazione alla tipologia del dissesto e alla geometria della piattaforma

ferroviaria; iii) sono stati eliminati tutti i fenomeni di interazione chimica, riducendo l'analisi matematica del problema ad un fenomeno di permeazione che ne ha facilitato l'estensione del metodo a diverse casistiche senza dover ogni volta ricorrere ad impegnativi campi prova (in termini temporali ed economici); iiii) il prodotto finale è inerte e compatibile con l'ambiente, ossia non interagisce con lo scheletro solido e con l'acqua e non rilascia inquinanti.

Le diverse tipologie di resina differiscono tra loro non solo per gli additivi ma anche nel rapporto stechiometrico tra i componenti fondamentali, che a sua volta richiede l'uso di macchine per l'iniezione dotate di due pompe a rapporto stechiometrico variabile che, tramite altrettante tubazioni flessibili, spingono il poliolo e l'isocianato (preventivamente additivati) verso la pistola resinatrice (fig. 2).



Figura 2 – Esempio di macchina per l'iniezione delle resine poliuretatiche (www.magmamacchine.it).

L'iniezione, infine, avviene collegando la pistola resinatrice ad un tubo in pvc forato alle sole estremità, inserito nei fori ed al quale è stato preventivamente collegato un rubinetto universale.

2.3 Metodologia di perforazione

Le principali tecniche d'iniezione delle miscele consolidanti sono:

1. iniezione per permeazione, con la quale la miscela tende a riempire i vuoti senza apprezzabili variazioni di volume e struttura del terreno;
2. iniezione per idrofratturazione, che prevede la propagazione della miscela nel terreno attraverso una ragnatela di fratture il cui sviluppo avviene a scapito di (importanti) spostamenti del terreno;
3. iniezione per combinazione dei due metodi precedenti, ottenuta iniettando la miscela ad alta pressione;
4. iniezione solida di compattazione statica, valida per miscele molto dense che richiedono alte pressioni con conseguente compattazione del terreno secondo il concetto di espansione in cavità.



Figura 3 – Esempio di macchina perforatrice e particolare del martello a fondo foro.

Nel caso delle iniezioni di resine poliuretatiche in ambiente ferroviario è stata sviluppata una tecnica che prevede l'aerofratturazione del terreno mediante perforazione ad aria compressa seguita dall'iniezione per permeazione.

A tal proposito si veda la fig. 3, nella quale è illustrata una macchina perforatrice di piccole dimensioni appositamente predisposta, con la torre di perforazione capace di traslare su due assi orizzontali e di ruotare in tutte le direzioni; inoltre, è visibile anche il particolare del martello a fondo foro, avente un diametro esterno di 50 mm e un foro interno del diametro di 28 mm. In questo modo è stato possibile adottare la perforazione a "rotazione + aria compressa", che ha consentito di poter incrementare la porosità del terreno con conseguente estensione del campo di applicazione delle resine poliuretatiche anche ai terreni a grana fine di fig. 1; l'importante, nel rispetto dei limiti imposti dall'esercizio ferroviario, è eseguire alcune prove per ogni cantiere, al fine di poter costruire la curva "pressione di perforazione – volume d'aria immesso" il cui optimum dipende evidentemente della natura del terreno (intesa come granulometria e storia tensionale pregressa).

Per la valutazione teorica della pressione minima di rottura si può partire dall'ipotesi che questa debba eguagliare la seguente condizione:

$$P_{\text{fratt}} = \sigma'_{v0} K_0(\text{NC}) + c' \quad (1)$$

Lo sforzo efficace verticale può essere ricavato dal criterio di snervamento di Mohr-Coulomb generalizzato:

$$\sigma'_{v0} = \frac{\sigma'_{h0}(1+\sin\varphi') + 2c'\cos\varphi'}{(1-\sin\varphi')} K_0(\text{NC}) + c' \quad (2)$$

La sostituzione produce:

$$P_{fratt} = \sigma'_{h0} [1 - (\sin\phi')^2] + c'(2\cos\phi' + 1) \quad (3)$$

Nell'ipotesi che i fori siano ad interasse planimetrico i e raggiungano la profondità z , la pressione complessiva per portare a rottura un cilindro di terreno coassiale di raggio $i/2$ è:

$$P_{fratt} = \sum_{z=0}^{z=n} [\sigma'_{v0} [1 - (\sin\phi')^2] + c'(2\cos\phi' + 1)] (\pi i^2 / 4) \Delta z \quad (4)$$

A titolo di esempio, per $z = 6$ m, $i = 2$ m, $\gamma = 20$ kN/m³, $\phi' = 30^\circ$, $c' = 5$ kPa, $\Delta z = 1$ m e la falda coincidente con la superficie topografica si ottiene la pressione totale di fratturazione $P_{fr} = 7.5$ Atm, necessaria per snervare un volume totale $V = 18.84$ m³ di terreno da iniettare (da confrontare con le pressioni comprese nel range 4-14 Atm usualmente derivate dai campi prova per profondità, parametri e raggi analoghi); nell'ipotesi che la porosità sia $n = 0.5$, si ottiene un volume d'aria teorico $V_a = 9420$ litri.

Evidentemente la coppia "pressione di perforazione + volume d'aria" inizia con valori minimi in superficie per aumentare gradualmente con la profondità, con lo scopo di minimizzare gli spostamenti dell'armamento ferroviario.

Da un punto di vista pratico, la perforazione ad aria compressa consente alla batteria di aste di garantire la stabilità del foro anche in terreni difficili e in presenza di falda senza l'ausilio del lamierini di protezione; ciò a sua volta consente, una volta raggiunta la profondità di progetto, di poter inserire nel foro un tubo in pvc del diametro esterno di 21 mm e spessore di 3 mm attraverso la batteria di aste e il martello di fondo foro di fig. 3; infine, si estrae il sistema di perforazione e si innesta un rubinetto universale sulla testa del tubo al quale collegare la pistola resinatrice di fig. 2 (fig. 4).



Figura 4 – La perforazione ad aria compressa consente un'elevata produttività e snellezza delle lavorazioni.

2.4 Valutazione dell'efficacia delle iniezioni

L'efficacia delle iniezioni con miscele consolidanti è usualmente condotta ricorrendo all'esecuzione di prove penetrometriche statiche e dinamiche (fig. 5) o, talora, anche a prove pressiometriche (es.: Mansueto et al., 2007).

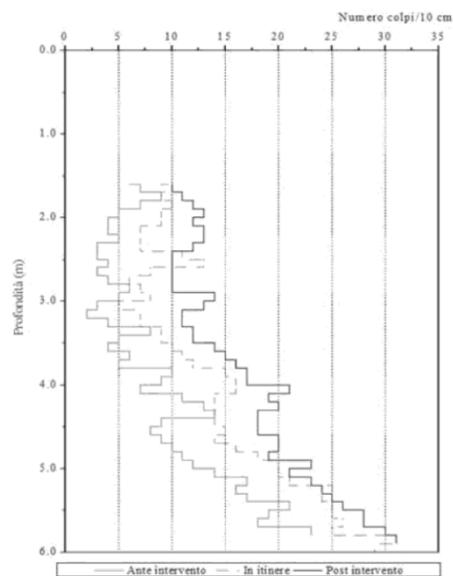


Figura 5 – Esempio di prove penetrometriche dinamiche eseguite prima e dopo un intervento di consolidamento delle fondazioni con resine poliuretaniche (Berengo V., 2013), con il profilo del numero di colpi all'incirca traslato lungo l'asse delle ascisse.

La valutazione, alquanto rapida da eseguire, può essere sia qualitativa che quantitativa, potendo usare le ormai ben note correlazioni empiriche per stimare l'angolo di resistenza al taglio e il modulo elastico prima e dopo l'intervento di consolidamento.

È comunque bene evidenziare che gli effetti delle resine poliuretaniche si riverberano in maniera importante sul modulo di deformabilità e sulla coesione efficace (non determinabile con le prove in sito) ed in misura ridotta (ma comunque sempre rilevante) sull'angolo di resistenza al taglio, così come emerso da prove di laboratorio (taglio diretto e triassiali consolidate non drenate) condotte su campioni prelevati in diversi campi prova.

Ad esempio, dal grafico di fig. 5 emerge che il numero di colpi nei primi 3 metri passa da una media di 3 ad una media di 12; applicando banalmente la relazione della Japan Road Association (1990) si ottiene $\phi'_{pre} = 21.7^\circ$ e $\phi'_{post} = 28.4^\circ$, con un incremento del 30.9% in linea con quanto misurato in laboratorio; allo stesso modo, per terreni con $c' = 2-5$ kPa (valori tipici dei terreni NC a grana fine, onnipresenti in tutti i dissesti osservati) il valore finale è sempre maggiore di 15-20 kPa, con un incremento minimo del 300%.

Un ulteriore metodo (qualitativo, ma comunque efficace) per valutare gli effetti del consolidamento con le resine poliuretaniche consiste nell'eseguire tomografie geoelettriche 2D-3D pre/post-intervento con coppie di stendimenti posizionate ai lati dei binari, a

loro volta tarate tramite prove penetrometriche (fig. 6).

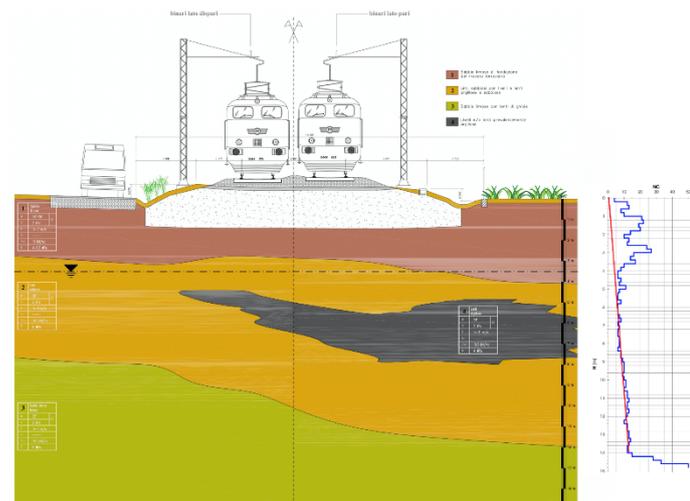


Figura 6 – Esempio di sezione stratigrafica trasversale costruita a partire da una tomografia 3D (lunga 250 m) tarata tramite prove penetrometriche dinamiche; nel dettaglio, si vede una crosta di essiccazione superficiale, seguita da limi argillosi e infine da sabbie dense

Tale metodologia consente: a) di poter costruire modelli geologici e geotecnici ad alta affidabilità, sui quali innestare la progettazione geotecnica in maniera mirata e a carattere puntuale; b) di poter fornire agli operatori alle macchine perforatrici schede giornaliere relative al settore in lavorazione, al fine di poter tarare la pressione di perforazione e il volume d'aria immesso anche per singolo foro; c) di poter valutare, in sede di collaudo, le variazioni di resistività associate al volume trattato con le resine poliuretaniche. In definitiva, le informazioni descritte (derivate sia dai campi prova che dai primi cantieri) hanno consentito di poter costruire modello di calcolo affidabili ai quali affidare valutazioni sull'efficacia delle iniezioni in termini di estensione del trattamento.

2.5 Costruzione dei modelli fem

L'uso della perforazione ad aria compressa seguita dall'iniezione di resine poliuretaniche ha consentito di ricondurre il problema all'analisi della permeazione in terreni fratturati, per i quali sono sconosciuti la risposta del terreno alla propagazione di un mezzo diverso dall'acqua, la geometria della ragnatela di fratture e la sua reale estensione rispetto all'asse dei fori; un ulteriore problema è dato dalla simulazione dell'incremento di resistenza dei terreni permeati.

Al fine di superare il primo limite si è partiti dall'analisi della propagazione dei flussi laminari nei mezzi porosi di Müller-Kirchenbauer (1968), che applicata al caso specifico ha comportato la determinazione la permeabilità K_{tr} del sistema terreno-resina in funzione della permeabilità del terreno K e della viscosità e del peso di volume dell'acqua e della resina:

$$K_{tr} = K(u_w/\gamma_w)(u_r/\gamma_r) \quad (5)$$

A titolo di esempio, per $K = 6 \times 10^{-9}$ m/s si è ottenuto $K_{tr} = 9 \times 10^{-13}$ m/s. La soluzione è data dall'uso della perforazione ad aria compressa e dallo studio del chimismo delle resine il quale deve garantire tempi di gel e di crema molto rapidi, dell'ordine delle decine di secondi, oltre i quali inizia il decremento di K .

Per quanto riguarda la simulazione degli effetti dovuti alla fratturazione indotta dall'aria compressa è stato utilizzato il modello elastoplastico Multilaminato, dato dalla combinazione del criterio di snervamento di Menetrey e William (1995) con il legame costitutivo multisuperficie di Zienkiewicz e Pande (1977).

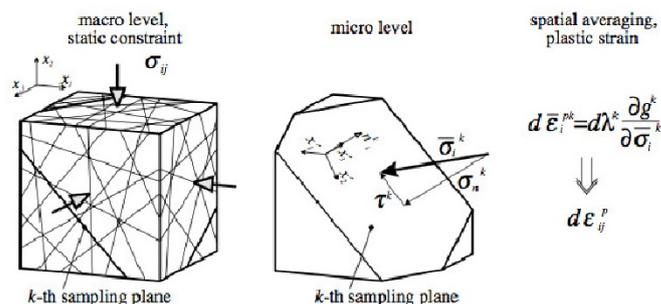


Figura 7 – Descrizione schematica della struttura di un modello a multisuperficie plastica (Cudny e Vermer, 2004).

Il modello prevede che un terreno a matrice omogenea isotropa sia intersecato da un numero elevato di piani di discontinuità variamente orientati nello spazio (fig. 7) e che l'incremento di deformazione plastica sia ottenuto come somma del contributo di ciascuna discontinuità, a sua volta calcolata a livello microstrutturale.

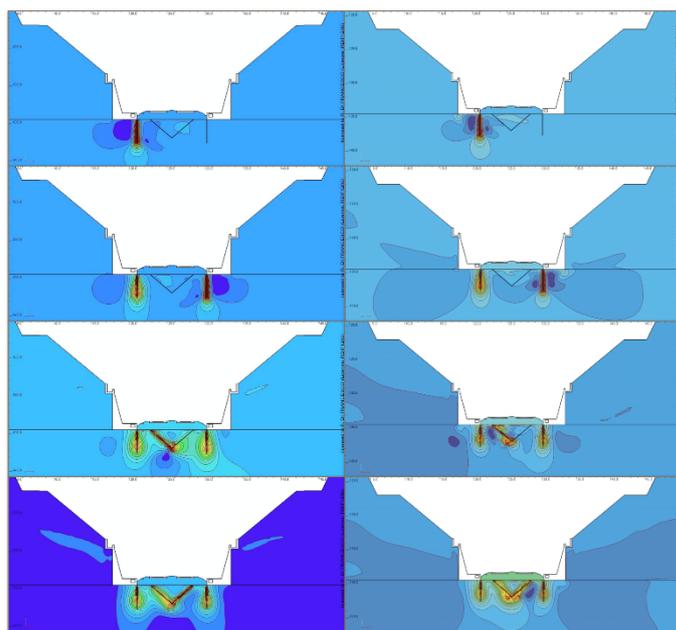


Figura 8 – Simulazione della permeazione su più fori confrontando la risposta del legame di Mohr-Coulomb (a sinistra) con il Multilaminato

Come si può vedere dalla fig. 8, la diffusione della resina tende ad essere più circoscritta con il modello Multilaminare rispetto, ad esempio, al classico legame di Mohr-Coulomb; inoltre, è risultata anche essere più aderente alle conclusioni derivate dai campi prova, a condizione di implementare piani di fratturazione paralleli e ortogonali rispetto all'inclinazione dei fori.

La diffusione della resina è stata simulata come un flusso concentrato rispondente alla legge di Darcy:

$$q_i = -K_{ij} \frac{\partial}{\partial x_j} \left(\frac{u}{\gamma_w + z} \right) \quad (6)$$

Gli elementi noti sono la portata del flusso imposta ad ogni foro, derivata statisticamente dai campi prova in funzione della natura litologica del terreno, e il tempo di gel delle resine derivato dalla tabella 1; ciò ha consentito di simulare la crescita della pressione interstiziale dall'inizio delle iniezioni fino alla completa dissipazione tramite la teoria della consolidazione accoppiata di Biot (1941; 1955; 1956a), scritta in forma compatta in funzione della permeabilità K_i , delle pressioni in eccesso u_e (fig. 8) e della deformazione volumetrica ε_v :

$$\frac{K_i}{\gamma_w} \nabla^2 u_e + \frac{\partial \varepsilon_v}{\partial t} = 0 \quad (7)$$

L'ultimo problema tecnico, connesso con l'incremento della coesione efficace (è stato trascurato l'incremento sia dell'angolo di resistenza al taglio che del modulo elastico), è stato risolto ricorrendo ad una procedura sperimentale e ad una operativa.

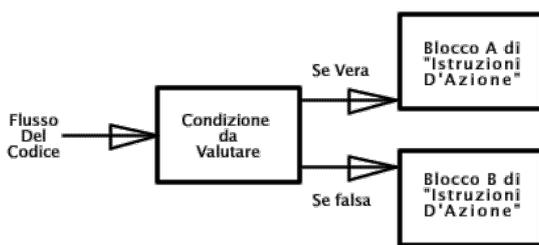


Figura 9 – Schema per la scrittura delle stringhe di programmazione legate alla procedura sperimentale

La procedura sperimentale (usata per la simulazione dei campi prova) poggia sullo schema di figura 9 e prevede la scrittura di stringhe di programmazione con passi condizionati del tipo “if ... then” tramite le procedure offerte dai software di calcolo; posta $u_e = 0$ la pressione in eccesso iniziale, la stringa verifica per ogni nodo della mesh la condizione “ $u_e > 0$ ” per attribuire un incremento di 15 kPa (cautelativo) della coesione efficace.

La procedura operativa (usata nelle applicazioni professionali) prevede un pre-calcolo di verifica dell'estensione delle iniezioni; segue l'assegnazione

di funzione temporali al terreno interessato che incrementano la coesione nella finestra temporale corrispondente al tempo di maturazione di tabella 1.

Concludendo, con i modelli fem sono stati determinati anche gli interessi usuali tra le iniezioni ($i = 0,75-1,5$ m), con i quali può essere calcolato il volume teorico di resina da iniettare sfruttando i concetti applicati all'equazione (5):

$$V_r = V(\mu_w/\mu_r)P \quad (8)$$

Per $V = 9420$ litri (paragrafo 2.3), $P_1 = 3$ Atm (Introduzione), $\mu_w = 0.001$ Pa·s e $\mu_r = 0.3$ Pa·s si ottiene $V_r = 94$ l; essendo $z = 6$ m, si ottiene un assorbimento medio di 15.7 l/m.

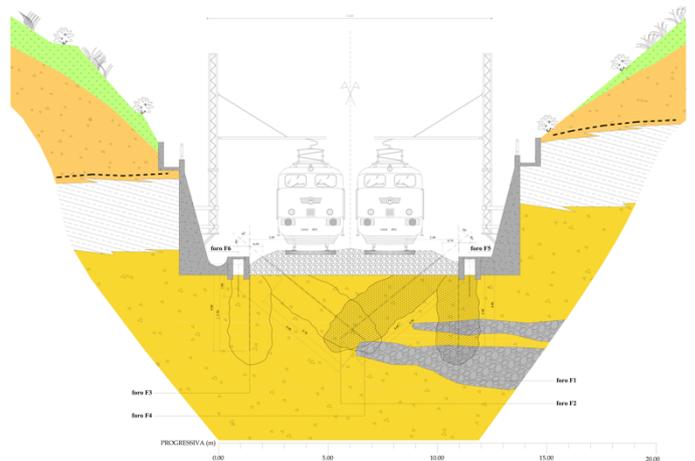


Figura 10 – Sezione stratigrafica tipo della trincea ferroviaria di San Giorgio in Salice e relativa tipologia di intervento

3 UN CASO DI STUDIO: LA PIATTAFORMA IN TRINCEA DI SAN GIORGIO IN SALICE (VR)

3.1 Geologia e dissesti

La piattaforma ferroviaria, corrispondente alla sezione di fig. 8 e 10, è fondata su terreni fluvioglaciali prevalentemente limoso-sabbiosi, con presenza di sacche sabbiose e di lenti argillose che determinano tre tipi di problemi sia localizzati che diffusi: 1) il ristagno di acqua in superficie per soglia di permeabilità; b) la risalita di sabbia per liquefazione ciclica indotta dal traffico ferroviario, con invasione della piattaforma e problemi di stabilità per galleggiamento delle traversine; c) l'afflusso di acque per azione di linee preferenziali di drenaggio drenate dalle scarpate laterali.

Il transito è dell'ordine dei 270 passaggi al giorno, compresi treni merci superpesanti da 17 MN.

3.2 Metodologia di intervento

L'intervento è stato realizzato con fori verticali eseguiti ai lati della piattaforma con interasse di 1.50 m, aventi lo scopo di realizzare una barriera all'acqua, intervallati a fori inclinati di 50° ($i = 1.50$ m) necessari per consolidare i terreni sottostante l'armamento (fig. 4); la lunghezza dell'intervento è stata di 550 m ed ha previsto l'uso della sola resina PP-DFR2 di tabella 2; inoltre, alle due estremità è stato creato uno slab diminuendo progressivamente la profondità di iniezione, al fine di evitare la formazione di una brusca variazione longitudinale di rigidità.

L'intervento è stato eseguito in esercizio, con la sola precauzione di diminuire la velocità di transito a 140 km/h, ed è stato collaudato con l'esecuzione delle tomografie geoelettriche di controllo; a distanza di due anni il transito periodico dei treni certificatori (capaci di rilevare spostamenti dell'ordine del millimetro) non ha più fornito alcuna anomalia.

4 UN CASO DI STUDIO: LA PIATTAFORMA A RASO FOLIGNO - ASSISI

4.1 Geologia e dissesti

La linea corre lungo la parte interna della Valle Umbra, ossia di un graben colmato da terreni lacustri e alluvionali; ai bordi sono presenti rilievi montuosi dai quali prendono origine conoidi alluvionali che si interdigitano con quelli della piana antistante. Lo spessore dei depositi raggiunge i 120-150 metri.

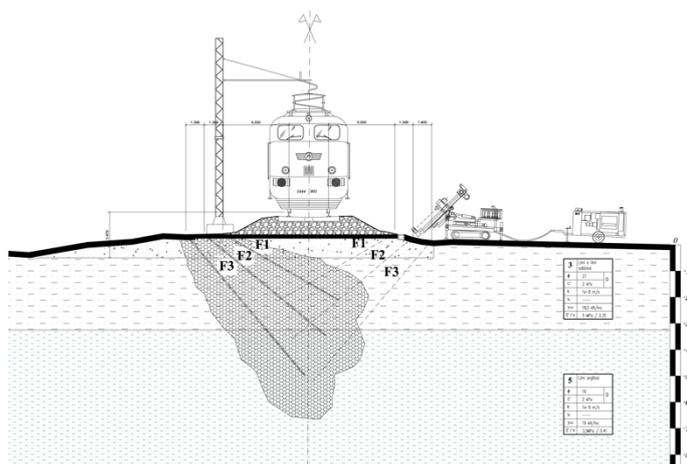


Figura 11 – Sezione stratigrafica tipo e tipologia di intervento

La piattaforma ferroviaria in dissesto interagisce sistematicamente con un banco costituito da limi e limi sabbiosi, di spessore variabile in direzione latero-verticale e passante verso il basso a limi argillosi (fig. 11); al di sotto è presente uno strato di ghiaie sabbiose costituente uno strato rigido di riferimento; poiché la falda è ubicata al tetto di queste ultime, i terreni sovrastante sono saturi per i primi metri e in condizioni

di parziale saturazione nella restante parte in affioramento.

La piattaforma ferroviaria manifesta locali problemi di stabilità (con abbassamenti disuniformi di qualche centimetro) durante la stagione estiva, quando il grado di saturazione dei limi in affioramento diminuisce ulteriormente; ciò comporta la necessaria diminuzione della velocità di transito proprio in occasione del maggior afflusso turistico con evidenti, notevoli ripercussioni economiche.

4.2 Metodologia di intervento

L'intervento, eseguito su diversi tratti per una lunghezza complessiva di 5400 metri, è illustrato in fig. 11 ed è basato sulla perforazione di tre ordini di fori per lato (denominati F1, F2 ed F3) con inclinazione e lunghezza variabile.

Nei fori in basso (F3 ed F3, eseguiti in quest'ordine) è stata inietta la resina portante PP-DFR2 di tabella 1 (ad alta espansione verticale, alta pressione di rigonfiamento e bassa densità), mentre per i fori F1 (eseguiti per ultimi) immediatamente sottostanti la piattaforma è stata usata la resina superportante PP-DFR3 (a bassa espansione verticale, bassa pressione di rigonfiamento ed alta densità); in questo modo si è cercato di realizzare uno strato rigido di base (minimizzando gli effetti dovuti al possibile sollevamento del terreno) sul quale poggiare uno strato super-rigido di interazione con l'armamento, avente il duplice scopo di consolidare il terreno e di riconcentrare gli sforzi trasmessi dal traffico ferroviario in uno spessore ridotto.

5 UN CASO DI STUDIO: LA PIATTAFORMA IN RILEVATO DI BORGOFORTE (VR)

5.1 Geologia e dissesti

La piattaforma corre in rilevato sulla piana alluvionale del fiume Po, il cui sottosuolo è costituito da un banco superficiale di argille compressibili oloceniche passanti verso il basso a limi sabbiosi e a sabbie dense; il livello piezometrico è posto a -3 m dal piano di campagna, mentre dalle indagini geognostiche è emerso che il rilevato, risalente agli inizi del secolo scorso, è stato realizzato con terreni scavati in loco.

In sostanza, la cedevolezza del rilevato (che si esplica con deformazioni della piattaforma ferroviaria e con lo sviluppo di locali collassi delle scarpate) è imputabile alle scadenti caratteristiche fisico-meccaniche dei terreni argillosi con i quali è stato realizzato. L'elevato spessore del ballast è un chiaro indice dei cedimenti elastoplastici e di consolidazione manifestati dalle argille compressibili sottostanti ed è quantificabile in oltre mezzo metro; dal monitoraggio è emerso che i cedimenti del sottosuolo sono ormai esauriti.

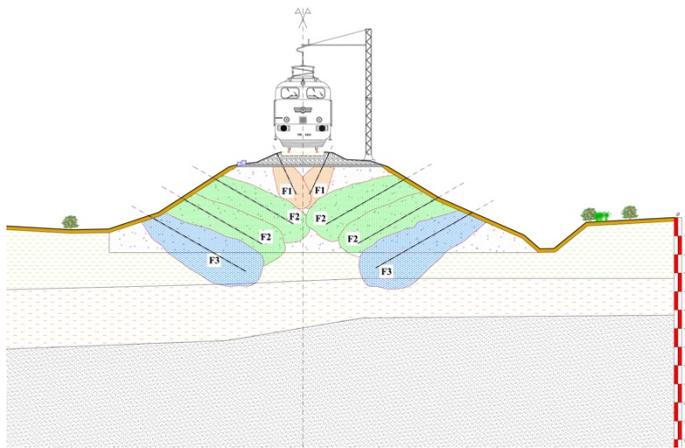


Figura 12 – Sezione stratigrafica con tipologia d'intervento del rilevato di Borgoforte (MN)

5.2 Metodologia di intervento

La fig. 12 illustra la tipologia d'intervento, che prevede la realizzazione di 4 ordini di fori nella seguente successione: 1) una fila di fori F3 in basso, nei quali iniettare la resina PP-DFR1 (ad alta espansione orizzontale, alta pressione di rigonfiamento e bassa densità); 2) due file di fori F2 al centro, con iniezione di resina PP-DFR2; 3) una fila di fori F1 sotto la piattaforma ferroviaria, con iniezione della resina PP-DFR3.

6 CONCLUSIONI

L'introduzione in ambiente ferroviario della tecnica del consolidamento dei terreni con resine poliuretatiche è estremamente recente e tuttora in fase di sviluppo tecnologico; anzi, nonostante i numerosi campi prova e gli studi di durata pluriennale (stante le estreme difficoltà operative per garantire l'esercizio ferroviario, il rispetto dei severi limiti di tolleranza negli spostamenti dell'armamento e la necessità di non invadere il ballast con le resine), ogni nuovo intervento è l'occasione per successivi raffinamenti e/o perfezionamenti della tecnica di intervento che riguarda non solo la chimica delle resine (compatibile con l'ambiente), ma anche le macchine perforatrici, la metodologia di perforazione e quella del necessario monitoraggio in tempo reale eseguito per l'intera durata delle lavorazioni.

BIBLIOGRAFIA

- Berengo, V. 2013. Ground improving injections underneath historical buildings: five case histories as an overview of a technique. *Geotechnical Engineering for the Preservation of Monuments and Historic Sites*. Taylor & Francis Group, London, 165-174.
- Biot, M.A. 1941. General Theory of Three-Dimensional Consolidation. *Journal of Applied Physics*, 12(2), 155-164.

- Biot, M.A. 1955. Theory of elasticity and consolidation for a porous anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, 12, 182-185.
- Biot, M.A. 1956a. Theory of deformation of a porous viscoelastic anisotropic solid. *Journal of Applied Physics*, 27(5), 459-467.
- Cudny, M & Verner, P.A. 2004. On the modelling on the anisotropy and destructuration soft clays within the multilaminate framework. *Computer and Geotechnics*, 31, 1-22.
- Flora, A. & Lirer, S. 2011. Interventi di consolidamento dei terreni: tecnologia e scelte di progetto. *Relazione Generale dal Invito, XXIV CNG, Napoli, Vol. 1, 87-148, AGI Editore.*
- Flora, A. & Lirer, S. 2012. Osservazioni su alcune delle tecniche di consolidamento dei terreni più diffuse in Italia. *Ingenio, Sistema Integrato per l'Ingegnere.*
- Gasc, Y. & Bertin, R. 1949. *Les Fondations et Reprises en Sous-Ouvre*. Editions Eyrolles, Paris.
- Japan Road Association, 1990. *Specification for Highway Bridges*. Part. IV.
- Menétrey, P. & William, K.J. 1995. A triaxial failure criterion for concrete and its generalization. *ACI Structural Journal*, 92(1), 311-318.
- Müller-Kirchenbauer, H. 1968. *Zur Theorie der Injektionen*. Veröffentlichungen des Instituts für Bodenmechanik und Felsmechanik der Universität Fridericiana Karlsruhe, Heft 32.
- Mansueto F., Gabassi M., Paschetto A., Vinco G., 2007. Modellazione numerica di un intervento di consolidamento del terreno di Fondazione di un palazzo storico sito in Rue Joseph Maitre sulla collina di Montmartre realizzato con resine poliuretatiche ad alta pressione d'espansione. *XXIII CNG, Abano Terme, Vol. 1, 277-284 Patron Editore.*
- Zienkiewicz, O.C. & Pande, G.N. 1977. Time-dependent multilaminate model of rocks – A numerical study of deformation and failure of rocks masses. *Int. J. Numer. Anal. Mech. Geomech.*, 1(3), 219-247.

The use of polyurethane resins in the consolidation of railway's platforms: design methods and case studies.

Abstract: to solve years of problems about the railway platform's compliance, in Italy, for the first time, it has been used the technique of injecting the soil with polyurethane resins; the transposition of this technique in the railway sector, whose use in the consolidation of foundations has been a professional practice for more than 20 years, has not happened all court, but it has demanded a necessary adaptation (modifications in the chimismo, planning of new drilling machines, construction of appropriate fem models) in relation to the need to ensure rail traffic while respecting, at the same time, tolerances in the movement of the order armament by few millimeters. After two years from the end of the first interventions, the technique, found highly reliable provided that it complies with certain programming and executive parameters, is in the process of becoming an application format.

Keywords: consolidation, railway's platforms, polyurethane resins, performing, poroelasticity.