

Il consolidamento dei sottosuoli stradali

The road subsoil consolidation

Riassunto

Il degrado dei sottofondi stradali rappresenta una delle principali cause di cedimenti, deformazioni e fessurazioni della pavimentazione, generando impatti significativi sulla sicurezza e sulla continuità della viabilità. In tale contesto, le iniezioni di resine poliuretatiche espandenti rappresentano una soluzione tecnica rapida e non invasiva per il consolidamento dei terreni delle infrastrutture stradali.

Questa tecnologia, inizialmente sviluppata per il risanamento di fondazioni civili, è oggi largamente applicata anche nel settore stradale grazie alla sua capacità di ristabilire la capacità portante dei terreni e contrastare i fenomeni di cedimento differenziale, senza la necessità di scavi o interruzioni del traffico. Le resine, iniettate attraverso fori di piccolo diametro, espandono infatti rapidamente, compattando il terreno circostante o generando microfrazture controllate nei terreni coesivi con un impatto minimo sulle sovrastrutture.

The deterioration of road subgrades is one of the main causes of settlement, deformation, and cracking of the pavement, with significant impacts on safety and traffic continuity. In this context, the injection of expanding polyurethane resins represents a fast and non-invasive technical solution for the consolidation of road infrastructure soils.

This technology, initially developed for the rehabilitation of civil building foundations, is now widely applied in the road sector thanks to its ability to restore the load-bearing capacity of soils and counteract differential settlement phenomena, without the need for excavation or traffic interruptions. The resins, injected through small-diameter holes, expand rapidly, compacting the surrounding soil or generating controlled micro-fractures in cohesive soils, with minimal impact on the superstructure.

Summary

Un approccio innovativo con le iniezioni di **resine espandenti**

1. Le resine poliuretaniche espandenti

Le resine poliuretaniche espandenti rappresentano il risultato di una reazione chimica esotermica tra due componenti principali, un poliolo e un isocianato, che innesca un'importante espansione volumetrica della miscela, conseguenza della notevole quantità di anidride carbonica (CO_2) che si genera. In un lasso di tempo estremamente breve, tipicamente pochi minuti, la miscela si indurisce transitando rapidamente dallo stato liquido a quello solido.

Il materiale finale è una resina caratterizzata da elevatissime proprietà meccaniche, sia in termini di rigidità che di resistenza alla compressione: la combinazione di simili caratteristiche permette la relativa iniezione a diverse profondità nel terreno attraverso l'utilizzo di fori di piccolo diametro (inferiori a 26 mm). Tale approccio minimizza il disturbo alle sovrastanti fondazioni e pavimentazioni stradali, rendendo l'intervento meno invasivo e più rapido rispetto alle tecniche tradizionali. L'applicazione mira così a conferire al terreno degradato un decisivo miglioramento delle

sue caratteristiche geomeccaniche, ristabilendo la capacità portante e riducendo i cedimenti differenziali. Nello specifico, una volta iniettata nel sottosuolo l'espansione della resina può essere paragonata all'espansione di una cavità sferica o cilindrica all'interno di un mezzo continuo. Il processo si conclude naturalmente allorché si raggiunge un equilibrio tra la pressione di rigonfiamento generata dalla resina in espansione e la pressione di confinamento esercitata dal terreno circostante. Le due grandezze determinano in modo cruciale il rapporto tra il volume finale e il volume iniziale della resina in corrispondenza della pressione di equilibrio (P^*).

Partendo dall'incremento della tensione media di confinamento, da una condizione iniziale (P_0) pre-iniezione a una di equilibrio (P^*) post-iniezione, è possibile stimare l'aumento di parametri chiave che caratterizzano un mezzo particellare.

Tra questi spiccano l'incremento della densità del terreno, della sua resistenza al taglio e della rigidità. Si tratta di un approccio progettuale concettualmente simile a quello degli interventi di compaction grouting

ben noti nel mercato, che utilizzano ad esempio l'immissione in pressione di conglomerati cementizi ad alta densità nel sottosuolo per addensare e consolidare il terreno. La differenza sostanziale risiede nella natura del materiale iniettato e nella rapidità di reazione, che nelle resine poliuretaniche è notevolmente superiore.

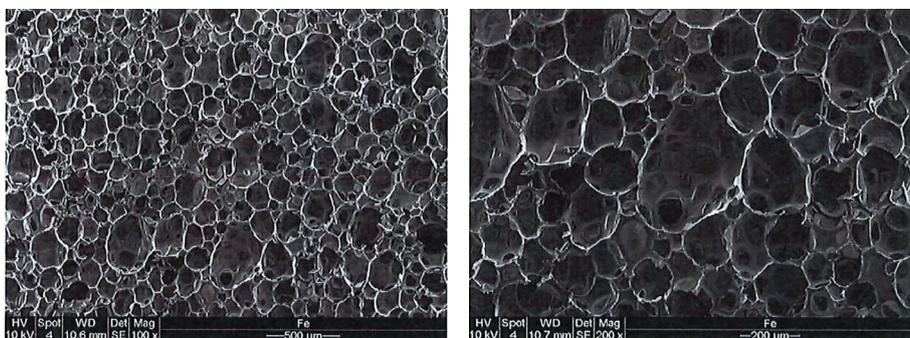


Fig. 1A e 1B. Immagini di una resina poliuretaniche espansa senza confinamento ottenute al microscopio elettronico

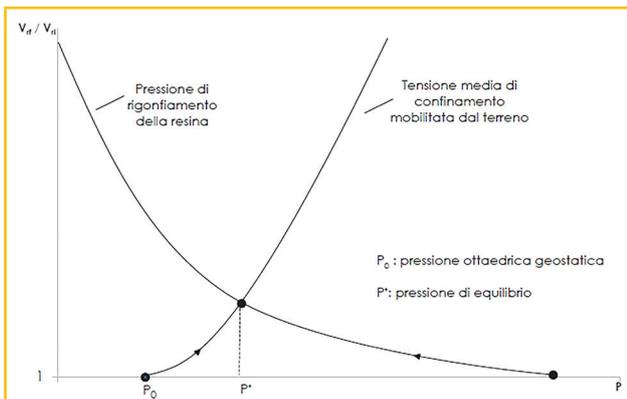


Fig. 2. Andamenti qualitativi del rapporto di rigonfiamento (V_{rf}/V_{ri}) in funzione della pressione di rigonfiamento della resina e della tensione media di confinamento del terreno

2. Caso studio: il consolidamento del sottofondo stradale sulla SP HU-3107 a Huelva, in Spagna

Le soluzioni di consolidamento e di incremento delle proprietà meccaniche dei terreni sono applicate in modo diffuso nel settore stradale.

Un esempio rappresentativo è un intervento eseguito in Spagna, sulla strada provinciale HU-3107, arteria strategica che collega i comuni di Beas e Cándón e che ha richiesto un provvedimento risolutivo nel tratto compreso tra la p.k. 9+900 e la p.k. 12+435.

Il segmento stradale, oggetto di un intervento prioritario all'interno di una più ampia programmazione di manutenzione e di adeguamento delle infrastrutture, aveva evidenziato significative deformazioni del manto di usura e una diffusa presenza di fessurazioni longitudinali, la cui genesi è stata ricondotta a complessi processi di instabilità idro-meccanica degli strati di sottofondo.

3. Caratterizzazione del problema e analisi delle cause

Le anomalie superficiali sulla pavimentazione si manifestavano in modo diffusa lungo tutto il tratto interessato e a distanza variabile dalle cunette. Questa correlazione è data dall'entità di penetrazione di acqua nella piattaforma stradale.

Un'accurata analisi stratigrafica in situ ha rivelato la presenza di uno strato di sottobase dello spessore di circa 70 cm che presentava una compattazione adeguata. Tuttavia, la criticità maggiore è emersa dall'a-

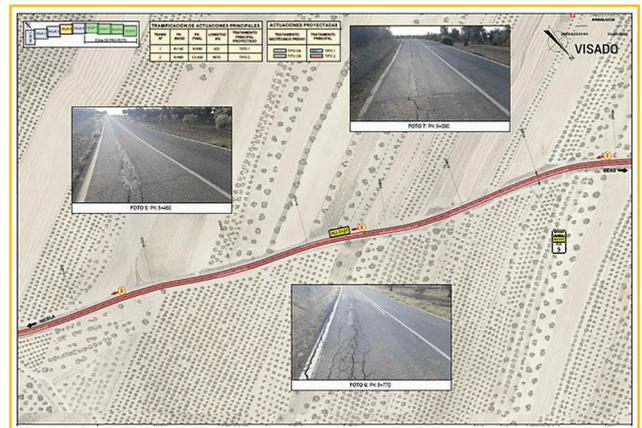


Fig. 3. Planimetria del tratto stradale interessato della strada provinciale HU-3107

nalisi dello strato sottostante, in quanto la sottobase poggiava direttamente su un substrato argilloso. La problematica principale risiedeva nella natura di quest'argilla che aveva subito processi ciclici di rigonfiamento e di essiccazione, fenomeni direttamente imputabili alla mancanza di rivestimento delle cunette lungo l'intero sviluppo del tracciato. L'assenza di un'adeguata impermeabilizzazione dei canali di scolo favoriva poi l'infiltrazione diretta dell'acqua meteorica nel terreno di fondazione, elemento che alterava in modo significativo il regime idrico del sottosuolo, inducendo variazioni volumetriche significative nel materiale argilloso coesivo (shrink-swell behavior). I ripetuti processi di rigonfiamento dovuti all'assorbimento d'acqua e la successiva essiccazione dell'argilla di fondazione, con derivante perdita d'acqua, generavano sollecitazioni differenziali e deformazioni permanenti nella sovrastruttura della pavimentazione stradale.



Fig. 4. Deformazioni superficiali e fessurazioni longitudinali

Le deformazioni non solo compromettevano l'uniformità e l'integrità del manto bituminoso ma acceleravano anche il degrado superficiale e la propagazione delle fessure.

Tale scenario comportava un significativo degrado delle condizioni di sicurezza stradale, aumentando il rischio di incidenti per gli utenti e richiedendo pertanto interventi di manutenzione straordinaria frequenti e, di conseguenza, onerosi.

4. La progettazione dell'intervento con un software di calcolo

La risoluzione della complessa problematica descritta è stata resa possibile grazie all'impiego del software di calcolo avanzato S.I.M.S. 2.0, strumento sviluppato in stretta collaborazione con il Dipartimento di Geotecnica del Politecnico di Torino che ha dimostrato la sua efficacia nella modellazione dettagliata di diverse tipologie di fondazioni e terreni.

L'applicazione della tecnologia ha quindi permesso di determinare con precisione la pressione di equilibrio e il consumo ottimale di resina necessari per gli interventi di consolidamento, ottimizzando l'efficienza e l'economicità dell'intervento.

Il processo di progettazione condotto attraverso il S.I.M.S. 2.0 si è articolato in diverse fasi metodiche, a partire da un'accurata raccolta e inserimento di dati di input, raggruppati in categorie specifiche:

- parametri del sito: includono lo spessore del terreno da trattare, la profondità della falda acquifera, il valore medio del numero di colpi (NSPT) ottenuto da prove penetrometriche dinamiche standard, e il valore medio di resistenza alla punta (Qc) derivante da prove penetrometriche statiche (CPT). Tali dati forniscono un'immagine chiara delle condizioni geotecniche iniziali del sottosuolo;
- parametri meccanici del terreno: comprendono la coesione efficace (c'), l'angolo di resistenza al taglio efficace (φ'), l'indice dei vuoti (e) e la conducibilità idraulica (k). Si tratta di parametri cruciali per la simulazione del comportamento del terreno sotto carico e per la predizione della propagazione della resina;
- dati della fondazione stradale: riguardano la tipologia di fondazione, i suoi parametri geometrici (per esempio larghezza e spessore della pavimentazio-

ne), il carico agente sulla fondazione derivante dal traffico veicolare e la profondità dal piano campagna. L'obiettivo primario dell'output del software era l'ottenimento della condizione di equilibrio tra il terreno e il bulbo di resina espansa. Il risultato critico è stato ottenuto basandosi su due variabili chiave:

- la tipologia e le caratteristiche specifiche della resina poliuretanicata scelta, selezionata in base alle proprietà geotecniche del terreno e agli obiettivi di consolidamento;
- la geometria dell'iniezione, definita in termini di interasse tra le iniezioni e la pressione di iniezione.

Dall'analisi dei risultati di output è stato possibile ricavare i valori medi finali di NSPT e Qc.

5. Il sistema di iniezione Multipoint

Un ulteriore elemento chiave che ha potenziato in modo decisivo l'efficacia dell'intervento è stato l'utilizzo del sistema di cannule Multipoint, un brevetto esclusivo di Uretek, sistema che si avvale di tubi di iniezione multiforo in acciaio progettati con un fondo cieco per garantire il controllo ottimale della fuoriuscita della resina.

La peculiarità dei tubi risiede nella presenza di fori laterali sulla loro superficie, il cui numero e diametro sono variabili e determinati con estrema precisione. Questa variabilità dipende strettamente dalla lunghezza della cannula e dalla profondità specifica da raggiungere all'interno del terreno.

La configurazione ottimale dei fori non è definita in modo empirico ma è il risultato di un'approfondita ricerca e sviluppo: viene infatti stabilita attraverso analisi di modellazione numerica basate sul metodo agli elementi finiti e approfondite prove di laboratorio. Queste ultime, simulando iniezioni in aria libera e in condizioni controllate, consentono di individuare lo schema di foratura del tubo più efficiente con l'obiettivo primario di garantire una fuoriuscita di resina in stato liquido a portata costante durante l'intero processo di iniezione.

Tale approccio ingegneristico avanzato assicura una distribuzione omogenea e controllata della resina nel volume di terreno target, massimizzando l'efficacia del consolidamento e minimizzando sprechi o iniezioni incontrollate.

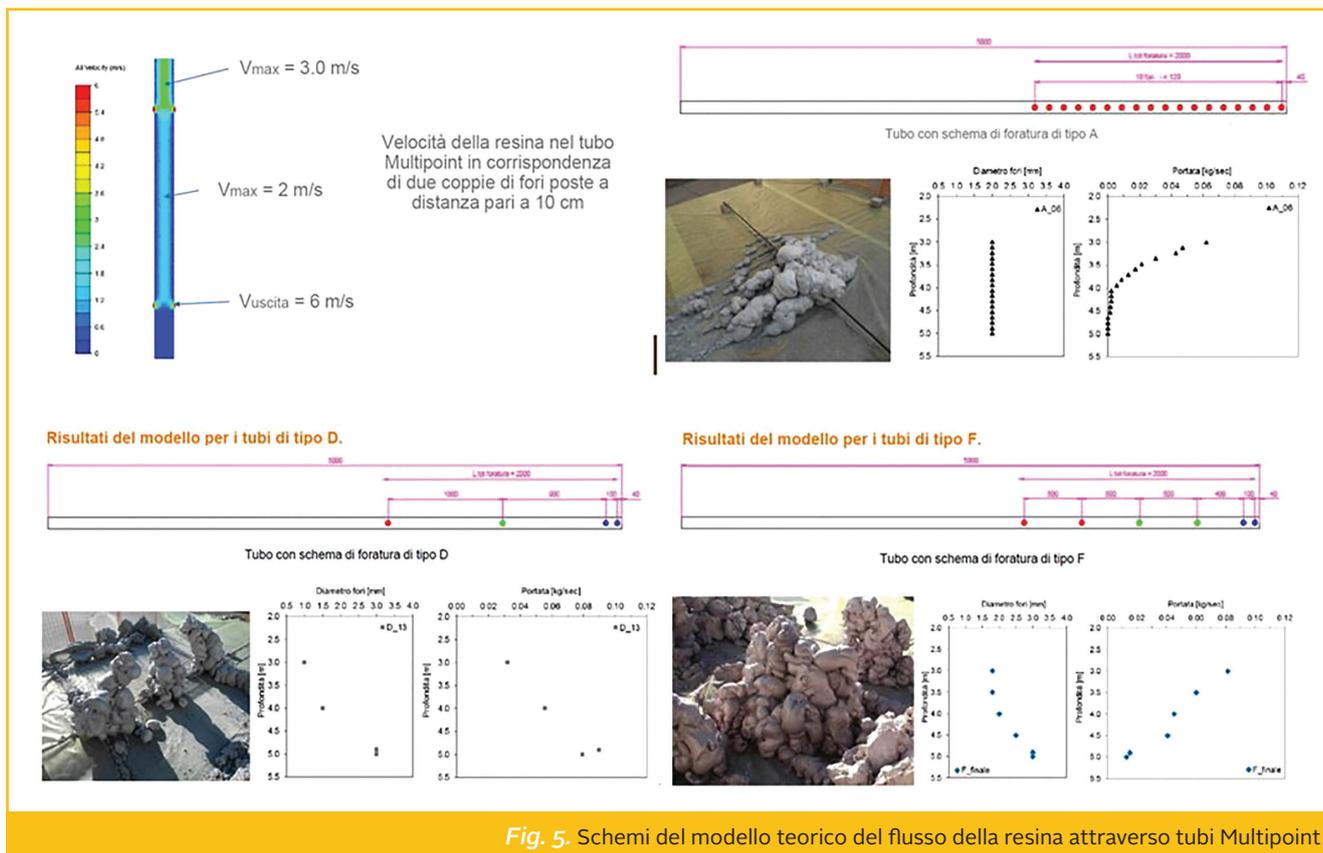


Fig. 5. Schemi del modello teorico del flusso della resina attraverso tubi Multipoint

6. Le iniezioni di resine espandenti

A seguito della fase di progetto che ha incluso la determinazione dell'estensione della superficie stradale da consolidare (nel caso specifico della SP HU-3107, circa 5.000 m²), si è passati alla fase di intervento operativo. Per il caso specifico, è stata utilizzata la metodologia di consolidamento brevettata Uretek Deep Injections, soluzione non invasiva riconosciuta per la sua versatilità in quanto si adatta efficacemente sia a terreni a grana grossa sia a grana fine, grazie ai meccanismi di permeazione e fratturazione controllata precedentemente descritti.

L'intervento inizia con la realizzazione di fori di piccolo diametro, tipicamente inferiori a 30 mm e con un'interasse variabile (fino a 150 cm), per raggiungere con precisione la profondità di terreno da trattare, in questo caso fino a -1,7 m dal piano stradale.

All'interno dei fori vengono inserite le cannule multiforo del sistema Multipoint che convogliano i due componenti della miscela di resina direttamente nel terreno. Inizialmente, quando è ancora allo stato liquido, la resina permea il terreno (nei terreni granulari) o lo frattura (nei terreni coesivi).

Successivamente, in pochi secondi, la resina espande il suo volume di circa 10-15 volte, raggiungendo una pressione di rigonfiamento che può arrivare fino a 10.000 KPa (10 MPa).

La pressione esercita un'azione di compattazione e addensamento sul terreno circostante.

È fondamentale sottolineare che le iniezioni sono mirate specificamente al volume di terreno maggiormente sollecitato dalle tensioni indotte dal carico sovrastante, come valutato e modellato secondo la teoria di Boussinesq.

I tempi di reazione estremamente rapidi della resina che in pochi secondi passa dallo stato liquido a quello solido impediscono propagazioni significative e incon-

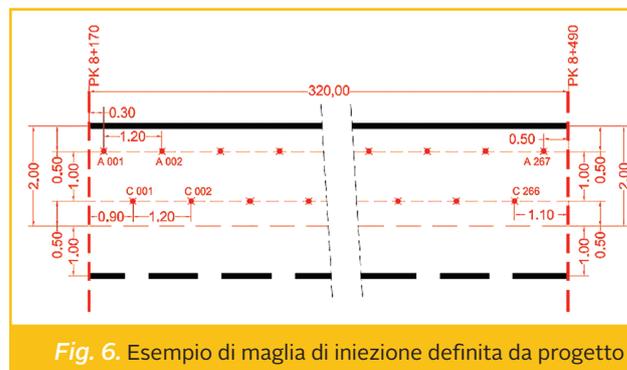


Fig. 6. Esempio di maglia di iniezione definita da progetto



Fig. 7. Posa in opera delle cannule Multipoint, secondo la maglia di progetto



Fig. 8. Esecuzioni di prove penetrometriche comparative post-intervento di consolidamento

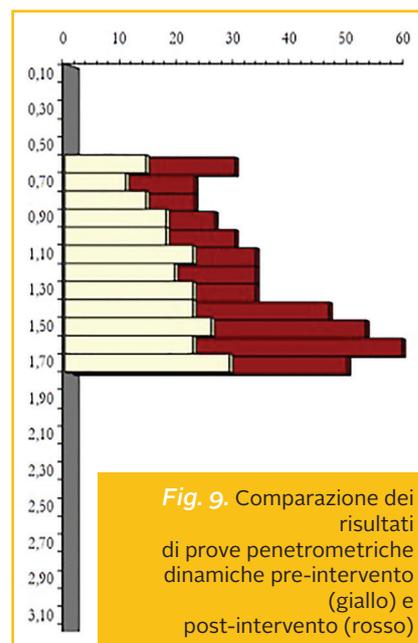


Fig. 9. Comparazione dei risultati di prove penetrometriche dinamiche pre-intervento (giallo) e post-intervento (rosso)

trollate della resina dal punto di iniezione, garantendo così una localizzazione precisa dell'intervento.

L'espansione della resina prosegue finché il terreno trattato non raggiunge un grado di addensamento tale da impedire un'ulteriore riduzione del suo volume. A quel punto, l'ulteriore espansione della resina si traduce in un sollevamento controllato della sovrastruttura. L'intero processo è costantemente monitorato da livelli laser di alta precisione che rilevano in tempo reale l'andamento dell'intervento: non appena si registra il principio di sollevamento della pavimentazione stradale, l'iniezione viene prontamente interrotta e conclusa. Questo monitoraggio continuo garantisce la massima validità dell'intervento e previene sollevamenti eccessivi o non desiderati.

L'efficacia dell'intervento è ulteriormente verificabile anche attraverso prove geotecniche aggiuntive in situ pre- e post-intervento, come ad esempio le prove penetrometriche dinamiche (SPT) e le prove pressiometriche comparative.

Questi test diretti confermano e validano i valori medi finali di NSPT e Q_c previsti e ricavati attraverso la modellazione software, dimostrando tangibilmente il miglioramento delle proprietà meccaniche e della capacità portante del sottofondo stradale.

7. Conclusioni

L'intervento effettuato sulla SP HU-3107 ha previsto l'impiego di resine poliuretaniche espandenti per il

trattamento dei sottofondi stradali soggetti a cedimenti e deformazioni localizzate in un contesto che presentava problematiche legate alla perdita di capacità portante del terreno, con ripercussioni sulla regolarità e sicurezza del piano viabile.

La pianificazione dell'intervento è stata pertanto supportata da un sistema di modellazione geotecnica, utilizzato per individuare le zone di criticità e definire un metodo di intervento mirato e la tecnologia impiegata ha permesso di operare senza scavi con attrezzature che consentono un controllo puntuale della distribuzione delle resine nel terreno.

Le attività si sono svolte in tempi contenuti, riducendo l'impatto sulla circolazione stradale e le condizioni del terreno sono state monitorate attraverso prove eseguite prima e dopo il trattamento, al fine di valutare le variazioni nei parametri geomeccanici e la risposta del sottofondo all'intervento.

Nel contesto della manutenzione stradale, la soluzione adottata si configura come una valida alternativa agli interventi tradizionali, contribuendo al miglioramento della sicurezza della rete viaria e al prolungamento della vita utile delle infrastrutture.



⁽¹⁾ Responsabile Marketing e Comunicazione di Uretek Italia SpA

⁽²⁾ Ingegnere, Business Development Manager di Uretek Italia SpA