

## Nanosilice colloidale: una concreta possibilità alternativa di consolidamento

L. Mancinelli, M. Gatti, A. Marzi, G. Porroni

Luca Mancinelli, Rocksoil SpA

Martino Gatti, Rocksoil SpA

Andrea Marzi, Impregilo SpA

Giorgio Porroni, BASF Construction Chemicals Italia SpA

Quarry & Construction – n. 591 giugno 2012 - Pagg. 61-66

### Introduzione

Si propone in queste pagine una sintesi di un particolare intervento di consolidamento condotto a Monza (MB) nell'ambito dei lavori di ammodernamento della Statale 36 in relazione alla costruzione del nuovo collettore fognario "Alto Lambro", una condotta interrata circolare del diametro interno di 250 cm (esterno 300 cm) e della lunghezza complessiva di 2.8 km. La soluzione impiegata ha visto l'utilizzo di "nanosilice colloidale", un materiale dalla grande capacità penetrativa, in alcuni casi seria alternativa ai più consueti sistemi di iniezione cementizia o jettiniezione.

Poco invasivo poiché la sua dimensione nanometrica richiede basse pressioni di mandata, assolutamente inerte dal punto di vista chimico, esente da solventi e componenti tossici, il materiale restituisce discreti tassi di coesione alla matrice del terreno, migliorandone contestualmente le caratteristiche deformative.

### Descrizione e posa del materiale impiegato

Il materiale di iniezione descritto in queste pagine è costituito da una sospensione acquosa in cui sono disperse particelle nanometriche di silice colloidale. Queste particelle sono costituite da quarzo ( $\text{SiO}_2$ ) con distribuzione tetraedrica degli atomi che ne conferisce l'amorficità, il che rende la miscela completamente minerale, altamente reattiva e maggiormente stabile rispetto ad altri composti cristallini a base di quarzo.

Nella fase realizzativa, alla sospensione viene aggiunto un accelerante che, in funzione del dosaggio, consente di regolare il tempo di lavorabilità del prodotto (per es. una percentuale in volume del 20% consente a temperatura standard di 20°C la formazione di un gel in pochi minuti).

Il prodotto, prima della gelificazione, presenta una viscosità bassissima (molto prossima a quella dell'acqua: circa 10 mPa.sec rispetto a 1 mPa.sec), vale a dire una elevatissima capacità di permeazione e penetrazione, che risulta molto performante nelle iniezioni di consolidamento in terreni stratificati limo-sabbiosi.

La seguente tabella riassume le principali caratteristiche dei componenti e della miscela.

	Dimensione media delle particelle [ $10^{-9}\text{m}$ ]	Area specifica [ $\text{m}^2/\text{g}$ ]	Viscosità [mPa.sec a 20°C]	Densità [kg/l a 20°C]	Concentrazione $\text{SiO}_2$ [%]	PH
<b>Nanosilice colloidale</b>	4	750	ca 10	1.10	15	10 +/- 1
<b>Accelerante</b>	-	-	ca 1	1.07	-	7
<b>Miscela</b>	-	-	ca 10	1.10	-	9.8

Tabella 1 – Caratteristiche materiali consolidanti

Una volta composta la miscela costituita da nanosilice e accelerante, la posa deve essere condotta con l'ausilio di un packer di iniezione. In contesti sabbiosi o ghiaiosi è consigliabile ricorrere a packer a doppio otturatore previa posa di canne valvolate a manchette. Una alternativa alla premiscelazione è ovviamente l'impiego di una attrezzatura a doppio componente di pompaggio con miscelatore.

Il risultato dell'intervento di iniezione nel terreno, dopo il tempo di formazione del gel, consiste in un miglioramento delle caratteristiche meccaniche, con incremento di coesione e valori di resistenza a compressione che possono raggiungere 1 MPa circa. Particolarmente efficaci nei terreni sabbiosi e limoso/sabbiosi i trattamenti a base di nanosilice colloidale consentono di effettuare lavorazioni migliorando le condizioni geotecniche. I vantaggi di questo sistema, rispetto ad altre tecniche più tradizionali (iniezioni cementizie, jet-grouting, resine espansive etc.), sono diversi:

- ridotta invasività e possibilità di trattare porzioni in maniera selettiva;
- rispetto dell'ambiente in quanto la nanosilice colloidale è un composto di minerali inorganici privo di solventi e sostanze tossiche, aspetto che garantisce la più completa sicurezza ambientale e soprattutto l'assoluta salvaguardia nei confronti di contaminazioni delle falde;
- regolabilità del quantitativo di miscela iniettata in funzione della permeabilità del terreno, finalizzata all'ottenimento delle caratteristiche meccaniche desiderate, evitando dispersioni o sprechi di prodotto.

I risultati ottenibili in termini di resistenza meccanica sono inoltre inferiori rispetto, per esempio, all'impiego di un jet-grouting; tale aspetto può possedere, come nel caso in cui si debba procedere ad avanzamenti all'interno del terreno trattato, una notevole importanza.

### **Descrizione generale del lavoro**

Nell'ambito dei Lavori di Ammodernamento della Strada Statale n. 36 a Monza (MB) sono state realizzate alcune importanti opere idrauliche. Il nuovo assetto viabilistico, che vede anche la presenza di una importante galleria artificiale a doppia canna posta al disotto di V.le Lombardia, ha richiesto infatti la modifica e l'integrazione del sistema fognario locale, sistema che serve un distretto molto densamente popolato e produttivo.



Figura 1 - Attrezzatura di spinta



Figura 2 - Elementi prefabbricati di rivestimento



Figura 3 - Vista interna collettore

Al fine di contenere i disagi agli abitanti e gestire al meglio le interferenze con i molti sottoservizi presenti e con un territorio densamente abitato, per le lavorazioni si è adottata la tecnica del minitunnel con scudo direzionale aperto e di spingitubo. Tale sistema ha richiesto la realizzazione di camere di spinta mono o bidirezionali (Figura 1) da cui far partire la testata di scavo e inserire via via gli elementi costituenti il rivestimento dei condotti (Figura 2 e Figura 3), e camere di recupero da cui estrarre la stessa testata a una interdistanza compresa tra 150 e 400 m circa.

Viste le caratteristiche del lavoro il consolidamento è stato proposto per le diverse finalità quali

- Tamponi di ingresso/uscita dello spingitubo dalle camere di spinta e recupero

Lo spingitubo in oggetto è stato calato e recuperato in appositi pozzi scavati tra paratie di micropali sostenuti da uno o più ordini di tiranti/puntoni. Per consentire l'ingresso e il recupero della struttura è stato necessario evitare la presenza di tiranti sulla sua impronta, garantendo adeguati franchi e, soprattutto, procedendo al taglio dei profilati metallici che costituiscono la struttura delle paratie.

Durante le fasi di scavo come a tagli eseguiti, è stata garantita la stabilità della zona di ingresso/uscita mediante adeguati tamponi di terreno consolidato, elementi che hanno l'effetto di contenere le spinte del terreno sulle paratie.



Figura 4 - Dettaglio fronte consolidato



Figura 5 - Dettaglio piccolo rilascio in fronte non consolidato

- **Presidi diffusi in corrispondenza di avanzamento parallelo a tubazioni interrato esistenti ritenute di particolare importanza**

In corrispondenza del passaggio dello spingitubo in prossimità di condotte di particolare importanza, per le loro dimensioni o per il fatto che possano costituire un particolare pericolo si è proposta un'attività di presidio locale mediante consolidamento. La finalità di tale intervento è stata quella di preservare l'integrità delle opere presenti riducendo al minimo effetti di cedimento differenziale, normalmente legati a eccessivi volumi persi o a effetti di trascinamento del manufatto.

- **Presidio localizzato in corrispondenza di edifici**

Lo spingitubo in oggetto è avanzato, per la gran parte del suo tracciato, al di sotto di strade o aree in cui non erano presenti fabbricati. In corrispondenza di alcune situazioni particolari sono stati proposti consolidamenti preventivi al fine di minimizzare gli effetti del passaggio del manufatto a spinta.

- **Presidi locali in corrispondenza di attraversamenti / interferenze**

Vista la fitta rete di sottoservizi, più o meno importanti, che lo spingitubo ha dovuto sottopassare, si è proposto in alcune situazioni, un consolidamento preventivamente realizzato dalla superficie.

Dopo l'esecuzione di un campo prova in cui sono stati testati due set di trattamenti, l'uno con rapporto additivo reagente/nanosilice pari al 10%, l'altro con rapporto additivo reagente/nanosilice pari al 20% e differenti tipi di maglie (1.25x1.25 mxm, 1.00x1.00 mxm e 0.75x0.75 mxm), si sono definite differenti modalità operative.

Visti i risultati ottenuti la scelta si è orientata su geometrie quadrate di lato 1.0 m per i tamponi e 0.50 m per il presidio di fabbricati e manufatti, sempre con fori sfalsati. Le iniezioni sono state eseguite attraverso tubazioni in rame valvolate del diametro di 1" e lunghezza variabile a seconda della profondità di trattamento, inserite in prefori da 30 mm. Sulla base delle caratteristiche delle formazioni presenti e della resa osservata si è optato per l'impiego di un massimo di 50 kg di prodotto per metro cubo di terreno trattato, con aggiunta di accelerante per regolare il tempo di lavorabilità e formazione del gel in ragione del 15÷20% in volume a seconda delle situazioni.



Figura 6 – Attività di consolidamento dalla superficie





Figura 7 – Dettaglio canne di iniezione

La verifica della resa del trattamento è stata effettuata anche procedendo ad alcuni sondaggi a carotaggio continuo, con prelievo di campioni da testare in laboratorio. Le immagini di Figura 8 e Figura 9 mostrano due campioni della stessa formazione, ghiaia con sabbia limoso debolmente argillosa con clasti eterometrici da subarrotondati a ben arrotondati di natura prevalente calcarea e mediamente alterati, di cui solo il primo risulta trattato con nanosilice.

La resa mostra chiaramente il discreto livello di coesione raggiunto.

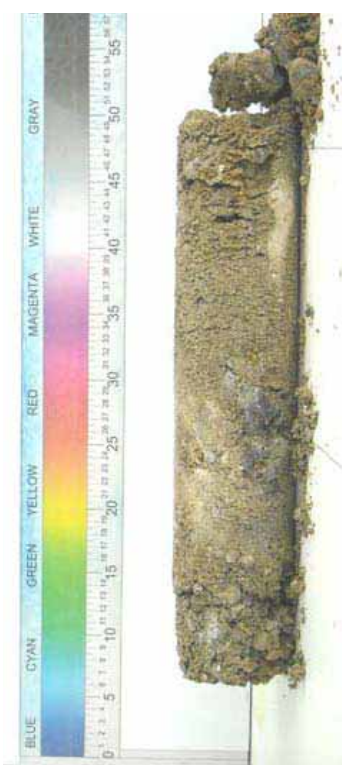


Figura 8 – Campione di terreno trattato con nanosilice



Figura 9 – Campione di terreno vergine

## Modello geotecnico

I terreni presenti nelle zone di intervento sono di natura alluvionale costituiti da riporti limosi sabbioso/argillosi nella parte superficiale (spessore massimo 3.0 m circa), da uno strato di spessore massimo di circa 6.0 m di sabbie e/o sabbie limose mediamente addensate e da una formazione di base di sabbie e ghiaie addensate. I livelli piezometrici sono stati rilevati a profondità di circa 19.0 m da piano campagna, abbondantemente al disotto della zona di attività degli spingitubo.

Si presentano di seguito i parametri medi utilizzati per caratterizzare i terreni interessati dagli scavi del collettore fognario come dedotti dalle prove in situ e di laboratorio disponibili e da esperienze maturate in contesti simili.

Unità	Profondità	Descrizione	$\gamma$ [kN/m <sup>3</sup> ]	c [kPa]	$\phi$ [°]	E [MPa]	$\nu$
1	0>z>-3m	Limi sabbioso/argillosi	18÷19	0÷5	23÷25	8	0.3
2	-3m>z>-9m	Sabbie/sabbie limose	18÷19	0	26÷30	30	0.3
3	z<-9m	Sabbie/ghiaie	18÷19	0	38÷42	50	0.3

Tabella 2 – Parametrizzazione geotecnica

In cui

$\gamma$ : peso di volume

c: coesione

$\phi$ : angolo di attrito interno

E: modulo di Young

$\nu$ : coefficiente di Poisson

Sulla base degli esiti del campo prova e della tecnologia di consolidamento adottata, iniezioni di nanosilice colloidale, il terreno trattato è stato meccanicamente definito tramite una coesione di 50 kPa e un modulo elastico doppio rispetto alle condizioni originarie.

## Modello numerico

Si presentano di seguito gli esiti di due elaborazioni numeriche sviluppate sul tratto di collettore Monza-Muggiò (diametro interno 250 cm) in corrispondenza di una sua porzione che lo vede correre al disotto di una condotta interrata in esercizio. Il consolidamento proposto ha avuto la finalità di preservare il manufatto esistente, limitando gli effetti dello scavo e i cedimenti a esso correlati.

Le analisi proposte, condotte con un codice di calcolo a elementi finiti, sono le seguenti:

studio con terreno non consolidato e presenza contemporanea della condotta esistente e del nuovo collettore

studio con terreno consolidato e presenza contemporanea della condotta esistente e del nuovo collettore

In Figura 10 è rappresentata la situazione con la presenza della zona di terreno consolidato attorno alla condotta esistente, mantenuta in esercizio durante i lavori.

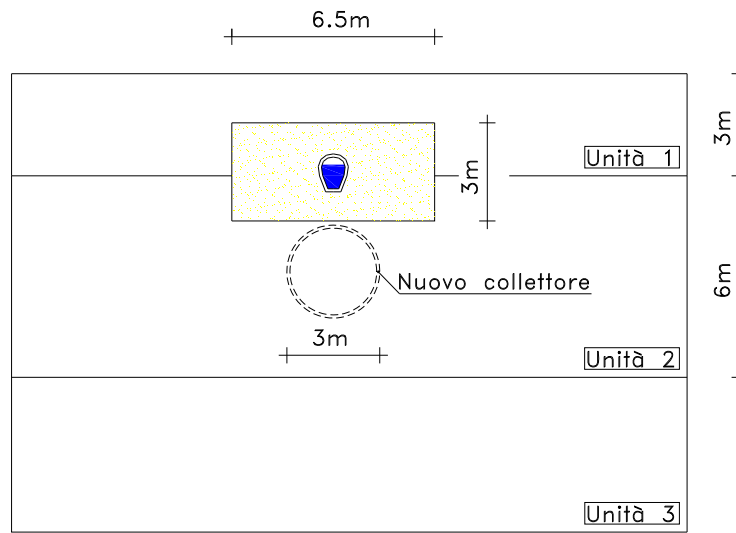


Figura 10 – Schema di analisi

Le Figure 11-18 illustrano le caratteristiche e gli esiti dell'analisi comparativa effettuata sul caso in esame.

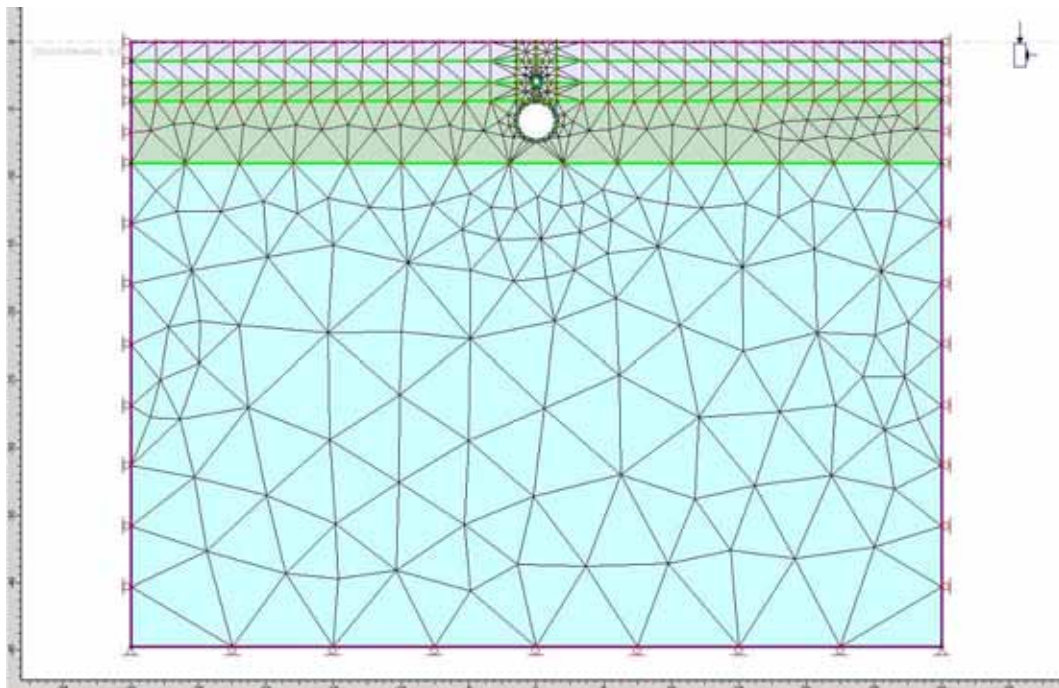


Figura 11 – Analisi 1 – Mesh di calcolo



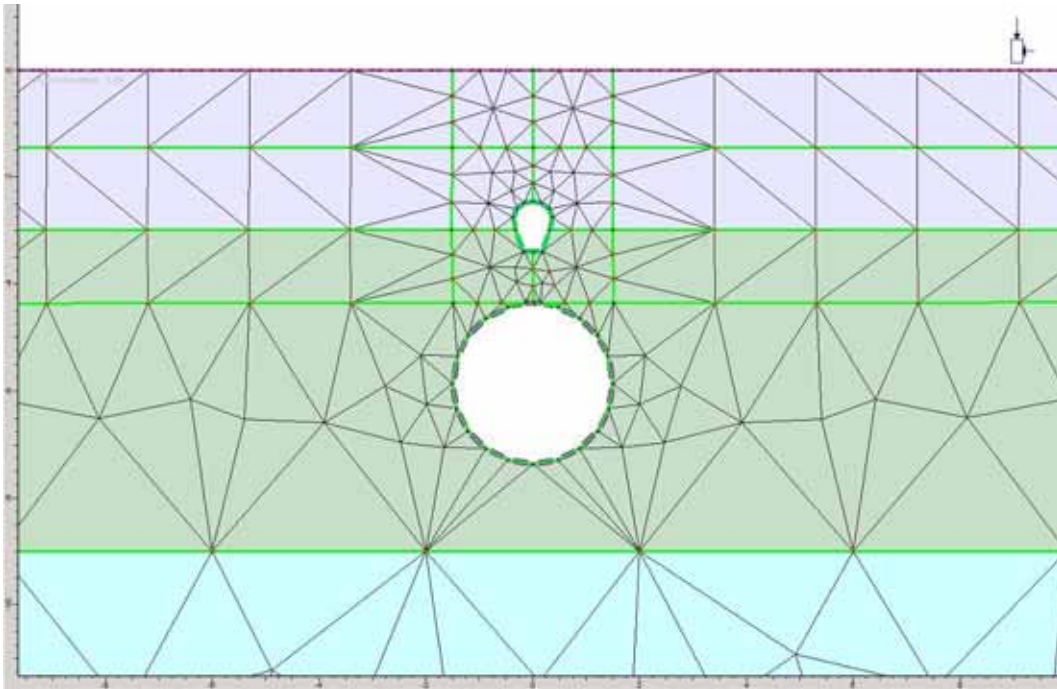


Figura 12 – Analisi 1 – Mesh di calcolo – Dettaglio

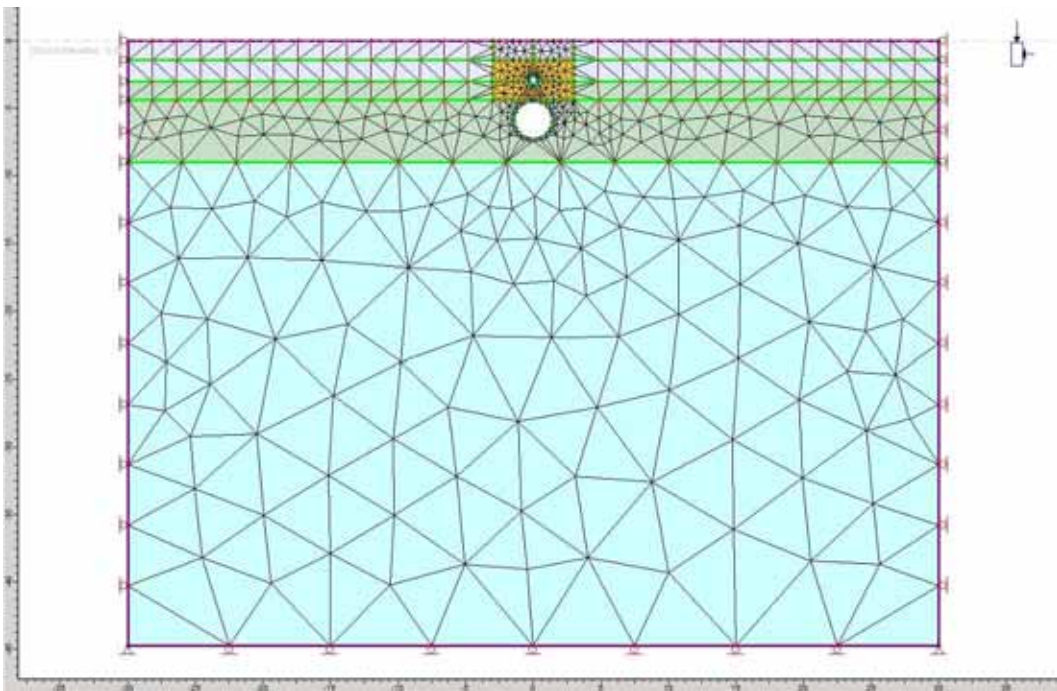


Figura 13 – Analisi 2 – Mesh di calcolo

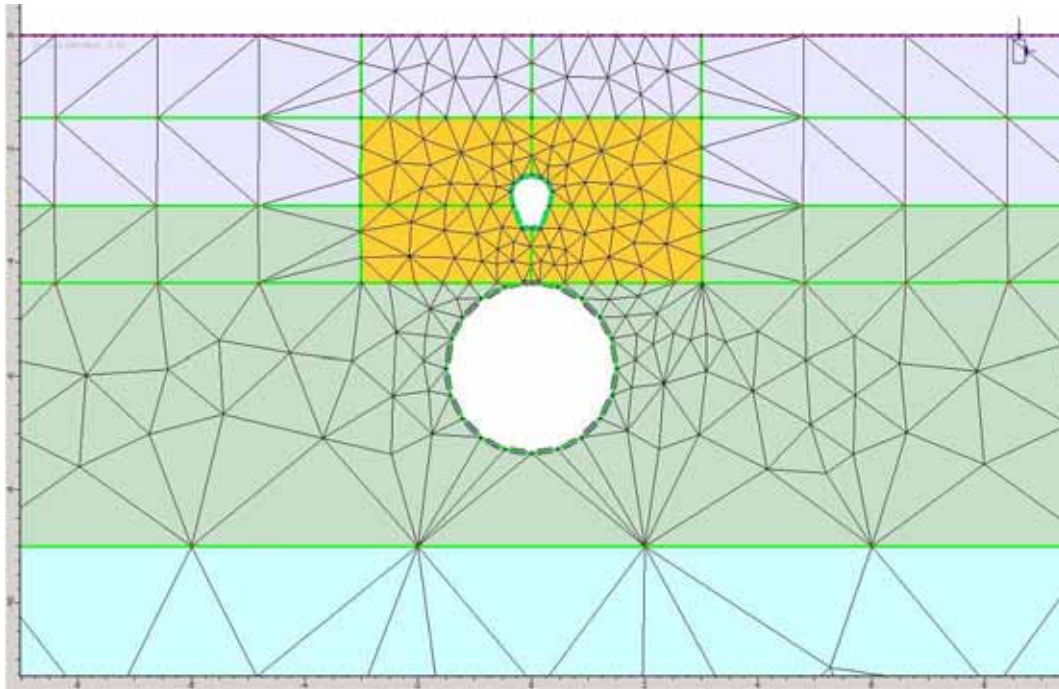


Figura 14 – Analisi 2 – Mesh di calcolo - Dettaglio

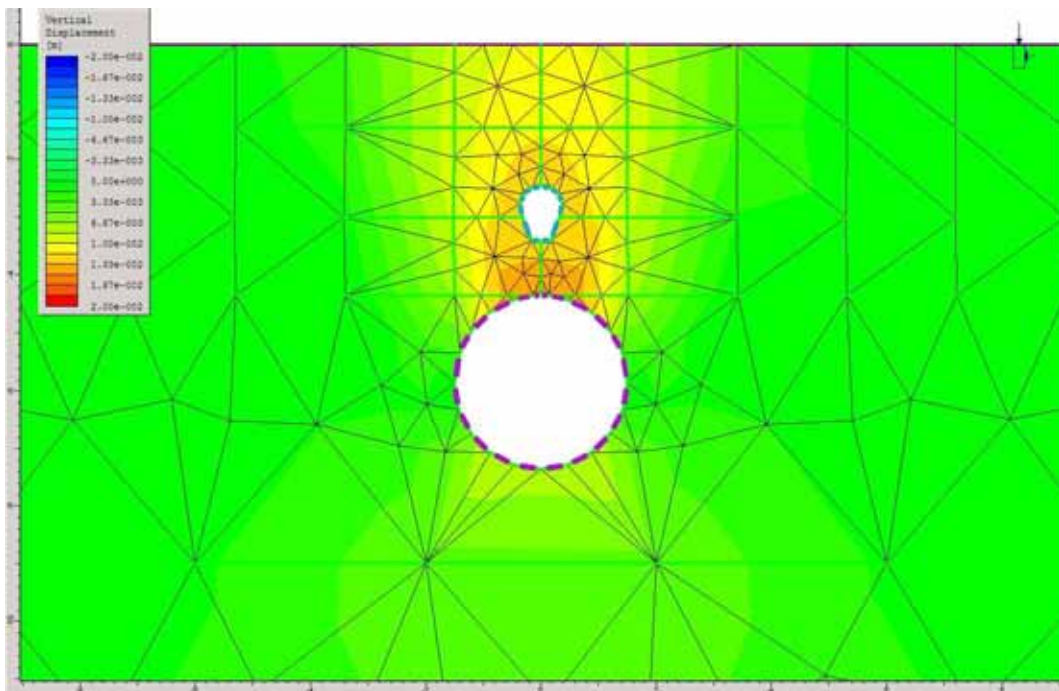


Figura 15 – Analisi 1 – Spostamenti verticali

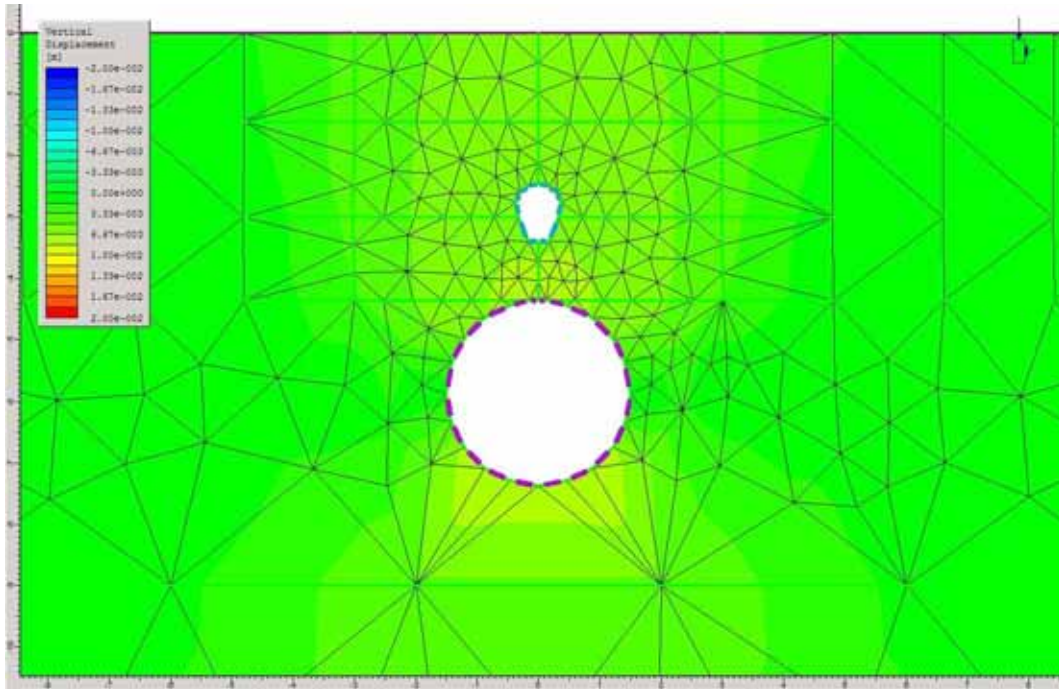


Figura 16 – Analisi 2 – Spostamenti verticali

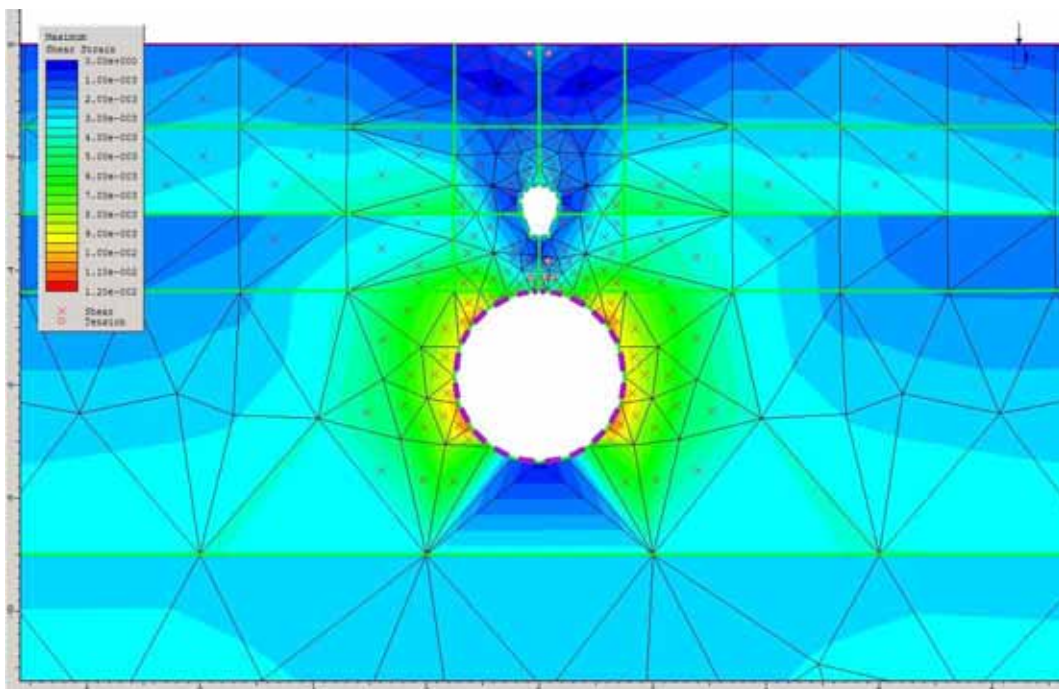


Figura 17 – Analisi 1 – Deformazioni a taglio con indicazione delle plasticizzazioni



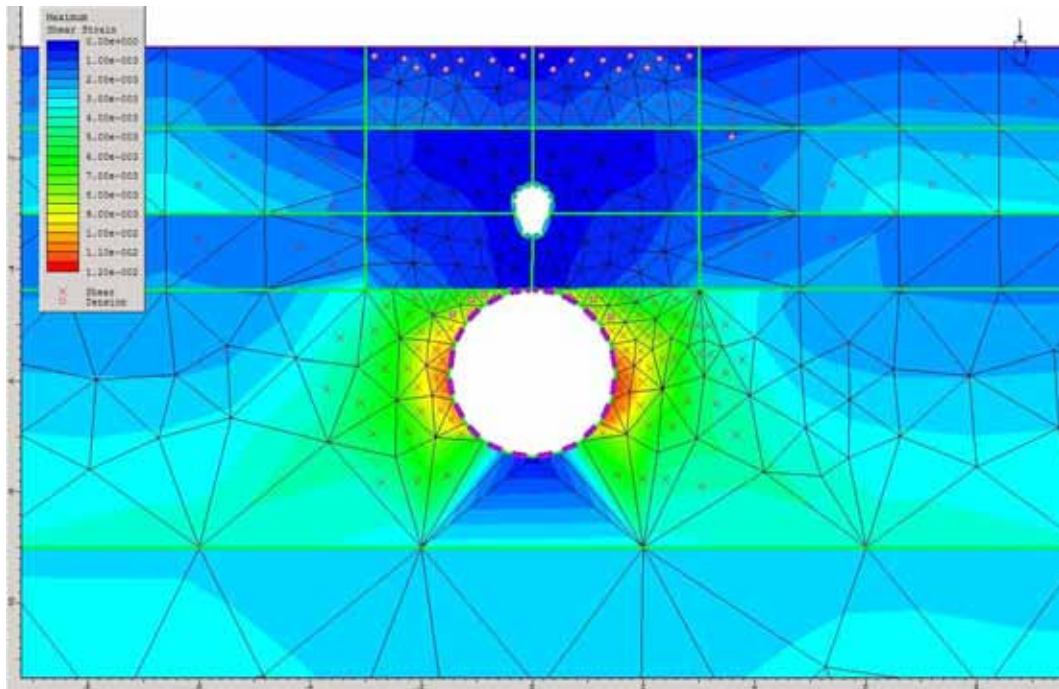


Figura 18 – Analisi 2 – Deformazioni a taglio con indicazione delle plasticizzazioni

I risultati delle Analisi 1 e 2 mostrano come l'effetto del consolidamento riduca notevolmente il cedimento e l'entità delle plasticizzazioni nella zona dello scavo. Nel primo caso si osserva un classico comportamento di "richiamo" nella direzione dell'area di scavo; tale situazione viene a essere praticamente evitata dal trattamento che, grazie alla sua estensione geometrica e alle sue buone caratteristiche meccaniche, crea una sorta di protezione alla zona di attività di avanzamento del nuovo collettore e un contemporaneo confinamento alla tubazione esistente.

## Bibliografia

- Bowles J. E. – *Fondazioni*, McGraw Hill, 1991
- Cassani G., Mancinelli L. – *Monitoring surface subsidence for low overburden TBM tunnel excavation: computational aids for driving tunnels* – IACMAG Torino 2005
- Cassani G., Mancinelli L. – *The use of guidelines in tunnelling* – ITA-AITES Congress – Praha, May 5-10 2007
- Lancellotta R. – *Geotecnica*, Zanichelli, 1987
- Mancinelli L. – *Evaluation of superficial settlements in low overburden tunnel TBM excavation: numerical approaches*. Geotechnical and geological engineering - Vol. 3, n. 3 – June 2005 - pp. 263-271
- Tuma J. – *Engineering mathematics handbook*, Mc Graw Hill, 1970
- Verruijt A. – *A complex variable solution for a deforming circular tunnel in an elastic half plane*. Int. J. Numer. Methods Geomechanics, Vol. 21, p. 77-89, 1997
- Zienkiewicz O. C. – *The finite elements method*, Mc Graw Hill, 1967