

CONSOLIDAMENTO DEI TERRENI DI FONDAZIONE CON RESINE ESPANDENTI

Geol. Fabio Montagnani: INDAGO v. De Amicis, 14 50052 Certaldo tel 0571/632640
Fax:0571/636086 E_Mail:infondagosnc.it

Ing. Leonardo Falciani: INDAGO Snc Certaldo (Fi)

Geol. Fausto Berti: INDAGO Snc Certaldo (Fi)

Geol. Stefano Magini: INDAGO Snc Certaldo (Fi)

RIASSUNTO

Il consolidamento dei terreni di fondazione con resine espandenti rappresenta una tecnica di intervento abbastanza recente ma molto sviluppata sul mercato. La letteratura scientifica ed in genere il "Kow How" su questo argomento risultano scarsi sebbene si tratti di un intervento di miglioramento geotecnico del terreno di fondazione.

Tre campi prova sperimentali eseguiti per conto della società _____ ed un bagaglio di c.a 80 cantieri di consolidamento eseguiti con diverse tipologie di indagini geognostiche, sia finalizzate alla definizione delle patologie edilizie e dei processi cinematici che risultano coinvolti nei fenomeni di dissesto strutturale analizzati, sia finalizzate al controllo ed al collaudo dei risultati ottenuti dall'intervento, ci hanno consentito di elaborare lo studio sintetizzato nel presente articolo.

In questo contributo vengono esposti i risultati sia di elaborazioni teoriche condotte per la modellizzazione del processo di iniezione, attraverso l'implementazione di un modello matematico di analisi geomeccanica del continuo su di un caso reale, sia l'illustrazione e l'elaborazione dei risultati delle indagini e delle verifiche geotecniche condotte su diversi cantieri.

I risultati ottenuti consentono di potere definire un primo quadro complessivo sulle caratteristiche dell'intervento, sui limiti di impiego della tecnologia, sui meccanismi cinematici coinvolti nel processo di consolidamento, sulla variazione delle condizioni tensoriali e delle caratteristiche geotecniche dei terreni trattati.

ABSTRACT

The consolidation of the foundation soils with expanding resins is a relatively new technique but highly developed market. The scientific literature and in general the "Kow How" on this topic are scarce, although it is an intervention of improvement geotechnical _____ foundation _____ soil. Three field test and a bag of about 80 case history of consolidation carried out with different types of soil tests, both for defining illnesses building and kinematic processes that are involved in the structural instability phenomena analyzed, is aimed at

controlling and testing of results of surgery, have allowed us to develop the study summarized in this article. In this paper shows the results of both theoretical elaborations carried out for modeling of the injection process, through the implementation of a mathematical model of geomechanical analysis of continuous on a real case, both the illustration and the processing of the results of and geotechnical investigations conducted on different sites.

The results obtained allow to be able to define a first overall picture of the characteristics of the technique, the limits of use of the technology, the kinematic mechanisms involved in the consolidation process, the variation of condition tensor and geotechnical characteristics of the soils treated.

INQUADRAMENTO GENERALE DELLA TECNICA

Generalità

Le resine espandenti rappresentano uno dei metodi di consolidamento del terreno di fondazione di fabbricati interessati da patologie edilizie di dissesto con fessurazioni strutturali.

Per consolidamento del terreno di fondazione di un fabbricato si intende un intervento finalizzato a ridurre le problematiche di interazione tra sovrastruttura e terreno di appoggio (come rotture del terreno per superamento della resistenza al taglio, cedimenti assoluti e/o differenziali eccessivi, ecc) e viene di norma eseguito quando il fabbricato presenta patologie edilizie di dissesto strutturale legate e problematiche che coinvolgono il terreno di appoggio.

La tecnica di consolidamento con resine espandenti è una tecnica relativamente giovane (c.a 20 anni) eseguita in Italia da un numero esiguo di imprese (c.a 5). La tecnica risulta coperta da diversi brevetti depositati ed è anche per questo che non risulta molto conosciuta nei suoi vari aspetti tecnico-progettuali ed esecutivi con una sostanziale scarsità di letteratura scientifica sull'argomento.

Gli interventi di consolidamento realizzati con tale tecnica non risultano soggetti sostanzialmente a nessun atto autorizzativo sia di tipo edilizio sia per ciò che concerne la normativa sulle costruzioni in zone sismiche. In particolare per quanto concerne il disposto di cui all'NTC 2008, sebbene al par. 6.10 sia affrontata la problematica del consolidamento geotecnico, molti uffici sismici regionali non dispongono il deposito per questa tipologia di interventi.

La tecnica delle resine espandenti può essere più propriamente ascritta, come vedremo meglio in seguito, tra le tecniche di costipazione più che di consolidamento. Il processo di consolidazione avviene infatti quando, in virtù dell'applicazione di forze, si determina l'insorgenza nel terreno di sovrappressioni dell'acqua interstiziale che, essendo limitate al volume di terreno interessato dal bulbo delle tensioni, risultano difficilmente dissipabili nei brevi tempi di solidificazione della resina e soprattutto in terreni fine a scarsa permeabilità. Viceversa la tecnica di costipazione, intesa come processo artificiale che ingenera una variazione delle caratteristiche geomeccaniche del terreno, se riferita ad una variazione dei parametri di resistenza al taglio e soprattutto di

compressibilità può essere meglio associata all'azione geo-meccanica operata dalle sovrappressioni indotte dal rigonfiamento delle resine.

Lo studio illustrato nel presente articolo relaziona sui risultati delle analisi e delle verifiche condotte su alcuni campi prova sperimentali realizzati per conto della società

e sugli studi condotti su diversi cantieri eseguiti con sostanzialmente due tipologie di approccio: un approccio empirico consistito nell'effettuazione di diverse tipologie di indagini geognostiche pre e post iniezione che hanno consentito di verificare il comportamento geomeccanico dei terreni a seguito degli interventi di iniezione; un approccio teorico attuato attraverso l'implementazione di un modello matematico di analisi geomeccanica del continuo di una porzione elementare di terreno reale attraverso il quale è stato simulato il processo di iniezione e confrontati i risultati teorici del modello con quelli reali misurati in sito.

Dalle elaborazioni eseguite è stato così possibile trarre delle deduzioni analitiche sulle variazioni statistiche dei parametri geotecnici in relazioni alle caratteristiche fisiche, di resistenza al taglio e di compressibilità dei terreni sui casi di studio analizzati. Inoltre il modello analitico predisposto ha consentito di definire il tipo di regime di comportamento geomeccanico, le variazioni dello stato tensoriale e di deformazione indotta che si ha durante un'iniezione.

La tecnica di consolidamento con resine non risulta sempre ed univocamente impiegabile in tutti i casi dove si riscontrano patologie edilizie di dissesto strutturale di immobile. Nel proseguo verranno forniti una serie di elementi che consentono di verificare la fattibilità qualitativa dell'intervento sulla base delle caratteristiche strutturali dell'immobile e delle caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione.

Specifiche di intervento

La tecnica delle iniezioni di resine consente il consolidamento della zona nodale "fondazione-terreno in posto" mediante l'iniezione, al di sotto del piano di appoggio fondale di resine epossidiche poliuretaniche, polimeri organici termoplastici bicomponenti costituiti da poliolo ed isocianato. L'iniezione può avvenire all'interfaccia terreno-fondazione e talvolta risulta ripetuta in profondità formando una sorta di strutture colonnari allo scopo di raggiungere strati più profondi eventualmente anche questi interessati dall'azione dei sovraccarichi strutturali.

L'iniezione viene eseguita attraverso la messa in posto di cannule di rame o di alluminio ($\Phi = 15$ c.a mm) inserite all'interno di pre-fori realizzati con trapani industriali che attraversano le strutture fondali. L'iniezione avviene attraverso l'utilizzo di tools a più vie. Il materiale iniettato è formato da due componenti la cui miscelazione determina una reazione esotermica con formazione di un nuovo composto, a rapida solidificazione, che aumenta sensibilmente di volume.



Fig. 1 – Fasi di perforazione e di iniezione durante un intervento di consolidamento con resine espandenti

La notevole forza di espansione delle resine (generalmente di c.a fino a 500 Kpa ma risultano documentate forze notevolmente superiori), che causa un aumento di volume dello stesse in dipendenza dei valori di tensione di confinamento variabile tra. 10 e 60 volte, risulta il meccanismo di azione fondamentale della tecnica. Le azioni che si inducono nel terreno determinano:

1. Un riempimento delle cavità e dei vuoti presenti al di sotto della fondazione;
2. Una riattivazione di tutti i punti scaricati della fondazione lavoranti a mensola;
3. un costipamento del terreno di fondazione.

Nella figura seguente vengono schematizzate le geometrie fondamentali dell'intervento.

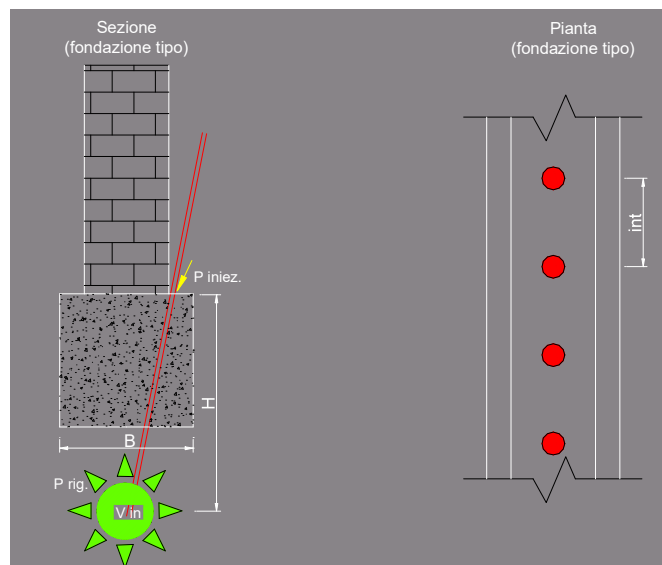


Fig. 2 – Schema geometrico di iniezione di resine

I dati di progetto riferiti ai cantieri oggetto della seguente sperimentazione risultano i seguenti:

- P_{iniez} : Pressione di iniezione: 10-12 atm
- Densità della miscela: $1,15 \text{ T/m}^3$
- Tempo di solidificazione: $\geq 1 \text{ min}$
- V_{in} : Volume medio iniettato: 50-70 Kg/ml
- P_{rig} : Pressione di rigonfiamento: 5 Kg/cm^2
- H_{max} : Profondità massima di iniezione: 3-4 m
- Int : Interasse medio delle iniezioni: 1.5 m

Modello qualitativo di iniezione

Allo scopo di definire più concretamente la distribuzione del materiale iniettato nel sottosuolo prima ancora di ricavare informazioni quantitative sulla variazione dei parametri geomeccanici, sono stati realizzati due campi prova di sperimentazione geotecnica.

Il primo ha inteso rappresentare una iniezione su di un terreno non sovraccaricato, mentre il secondo è stato realizzato al di sotto di una fondazione di un edificio di culto caratterizzato da una fondazione a sacco nastriforme caricata con una pressione di 80 Kpa. Entrambi i siti sono stati preventivamente parametrizzati con sondaggi e prove di laboratorio e con prove CPT in situ; le prove sono state successivamente poi ripetute a seguito dell'iniezione.

Prima di descrivere il modello è necessario specificare che questo può essere ritenuto rappresentativo solo della tecnica analizzata nella sperimentazione.

L'indagine visiva condotta attraverso la realizzazione di trincee ubicate sull'asse di iniezione ci ha inoltre consentito di rilevare:

1. geometria in 3D del bulbo di invasione della resina (bulbo di iniezione)
2. rapporto tra il bulbo di iniezione e quello di consolidazione
3. volume e densità in sito della resina iniettata

L'indagine successiva di tipo geognostico e geotecnico ci ha consentito di acquisire una serie di elementi quantitativi sull'azione di consolidamento operata in termini di variazione dei parametri geomeccanici e variazioni dello stato tensoriale del materiale a seguito dell'iniezione. Tali risultati verranno esposti ai paragrafi successivi.

Nella figura successiva è rappresentato in retinato con bordo giallo il "bulbo di iniezione" cioè la zona al di sotto del piano di appoggio fondale vive si è distribuita la resina. In questa zona la resina si localizza in un fitto reticolo ramificato con spessori variabili tra 0.2 e 3 mm. Il centro di simmetria dell'ellisse ($e=0.98$) risulta spostato di poco verso l'alto (0.2 m) rispetto al punto di iniezione per la presenza del vicino piano di appoggio fondale

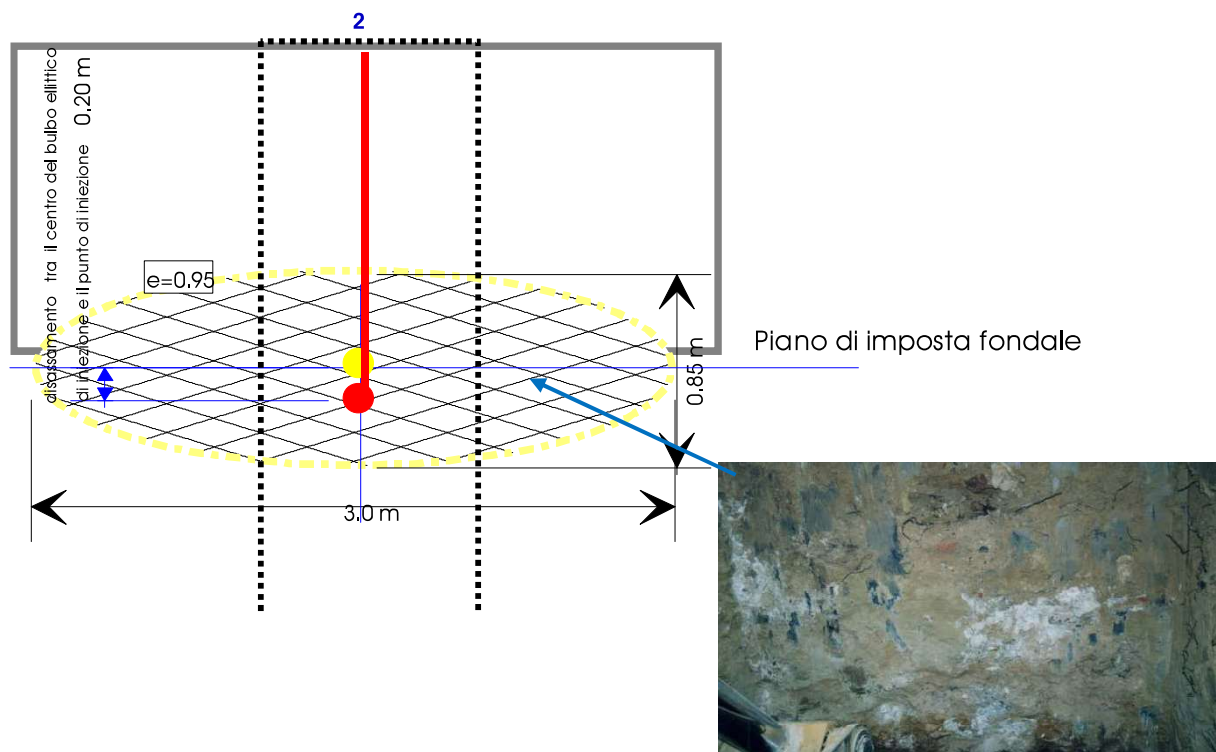


Fig. 3 - Bulbo di iniezione su una iniezione confinata

In questo meccanismo cinematico un ruolo importante può essere svolto dalla presenza di orizzonti compatti e/o pseudo-litoidi presenti al di sotto del piano di appoggio fondale che fungono da orizzonte di contrasto verso il basso del meccanismo di consolidazione. Inoltre la presenza di sovraccarichi strutturali incrementa ulteriormente le condizioni tensoriali presenti nella zona di iniezione favorendo la fuoriuscita della resina da tale area.

Nella figura 4 è invece rappresentato il bulbo di iniezione su una iniezione libera in terreno normal-consolidato senza sovraccarica. In questo caso è rappresentato da una semisfera con raggio di 1.5 m.

Il reticolo di resina risulta con spaziatura e persistenza decrescente verso l'alto dove per contro si registra un incremento forte dello spessore di riempimento che può arrivare anche a 10-15 cm. Tale redistribuzione risulta giustificata dal fatto che avvicinandosi alla superficie il terreno risulta in uno stato tensionale caratterizzato da pressioni molto basse e molto inferiori alle pressioni di rigonfiamento. Inoltre si rileva la presenza di discontinuità preesistenti legate alla presenza delle strutture pedogenetiche dove la resina si incunea allargandole e riempiedone le cavità.

Il disassamento tra il punto di iniezione ed il centro di simmetria del semicerchio risulta molto maggiore e pari a 75 cm

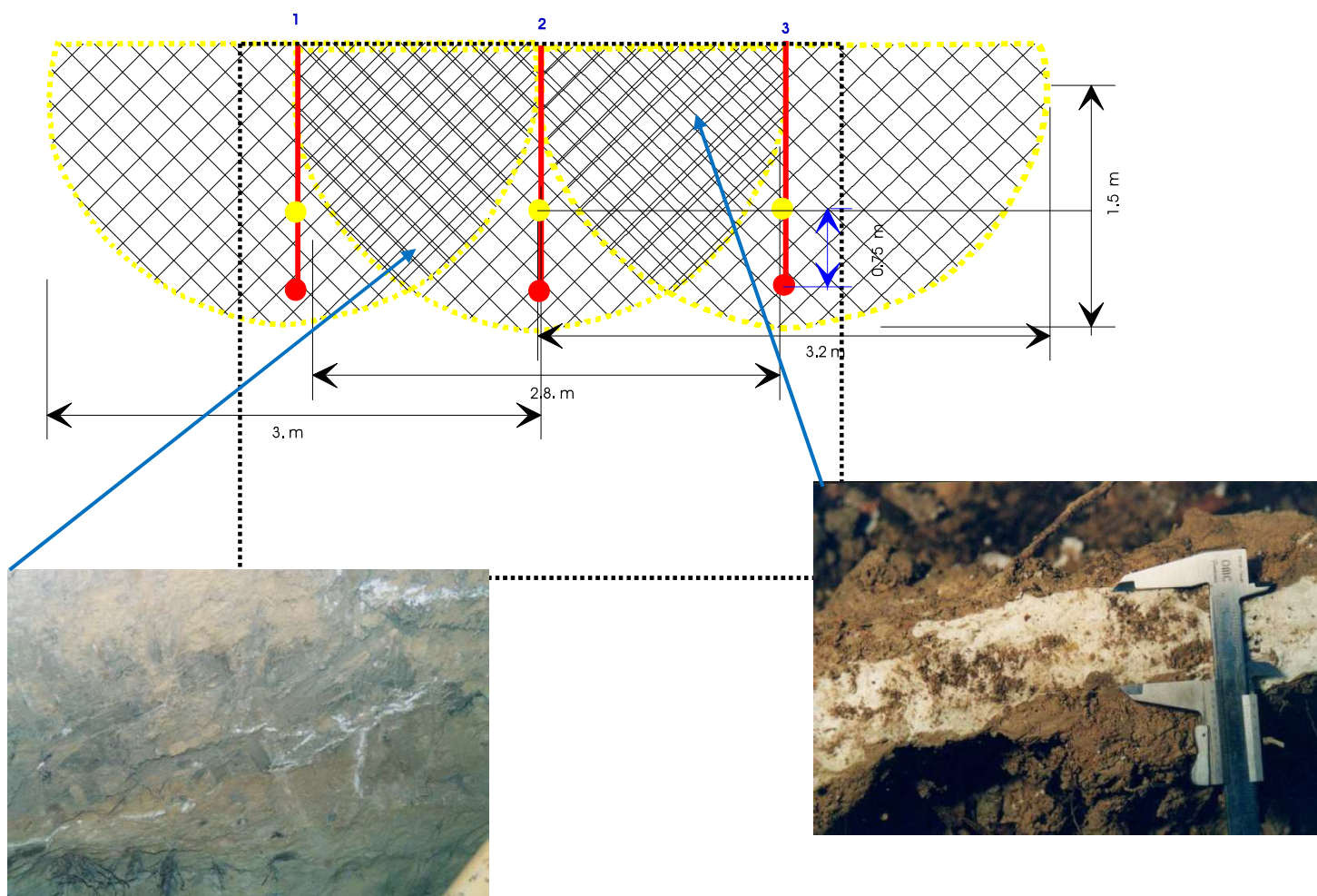


Fig. 4 - Bulbo di iniezione su una iniezione libera

Caratteristiche di impiego

Sulla base di quanto precedentemente esposto in relazione alle specifiche esecutive della tecnica di consolidamento oggetto di studio, appare evidente che essa si può impiegare su edifici poggianti su fondazioni di tipo superficiale a trave rovescia o a plinti con base fondale a profondità non superiore ai 2-3 m dal piano di calpestio più basso. Più difficile risulta l'impiego su fondazioni superficiali a platea, in quanto le iniezioni, anche se eseguite lungo allineamenti, potrebbero innescare l'insorgenza di lesioni lungo le intelaiature trasversali agli allineamenti stessi.

Anche il consolidamento su travi rovesce, con larghezza $B > 1.5-2$ m, potrebbe risultare problematico, a meno di non procedere con iniezioni parallele, interne ed esterne alla muratura dell'immobile, eseguite preferibilmente in contemporanea. Il limite della larghezza delle trave appare, in quest'ultima situazione, quello di 3 metri.

Interventi di consolidamento su edifici di vecchia costruzione con assenza di elementi strutturali orizzontali e verticali di collegamento e con solai non strutturali possono risultare problematici per il rischio di fuoriuscite di resina e contropinte sulle murature. In questo contesto è importante una attenta analisi strutturale dell'immobile al fine di verificare tali problematiche.

Tra le condizioni geometriche risultano importanti non solo quelle inerenti le caratteristiche della sovrastruttura ma anche quelle inerenti il substrato di fondazione. In tale senso bisogna rilevare l'importanza di eseguire sempre una corretta indagine geologico-stratigrafica e geotecnica, allo scopo non solo di rilevare le cause del dissesto in relazione ai processi deformativi in atto, ma anche di individuare gli orizzonti geotecnici scadenti, la cui variazione dello stato tensoriale ha comportato l'innescio del movimento.

Sempre a proposito delle caratteristiche del terreno fondale vi sono dei chiari limiti d'impiego della tecnica in relazione alle caratteristiche granulometriche e geotecniche.

Terreni chiaramente grossolani, sia sciolti che coesivi, risultano difficilmente consolidabili con questa tecnica in quanto i valori di tensione a rottura di tali litotipi sono ben superiori alle pressioni di iniezione e di rigonfiamento della resina, per cui non può essere ipotizzato un comportamento elasto-plastico del materiale, ma solo elastico (v. modello matematico di iniezione).

Anche terre coesive e rocce con una resistenza alla compressione semplice $Q_u > 1 \text{ MN/m}^2$ (10 Kg/cm^2) e quindi una coesione non drenata $C_u > 5 \text{ Kg/cm}^2$ risultano difficilmente consolidabili in ragione delle elevate caratteristiche di resistenza al taglio.

Un'ultima condizione d'impiego sembra concernere le caratteristiche idraulico-idrologiche del terreno di fondazione. Sebbene la reazione chimica di formazione della resina risulti una reazione esotermica con sviluppo di calore fino a temperature di ca. 70°C e sebbene i tempi di solidificazione della resina risultino decisamente bassi (c.a. 1 min), la presenza di flussi di falda eccessivamente elevati potrebbe comportare un parziale dilavamento durante l'iniezione. Queste in verità risultano situazioni molto particolari e difficilmente riscontrabili in natura in quanto

presuppongono la presenza non solo di terreni altamente permeabili ($K > 1 \text{ E-2 m/s}$), ma anche di una piezometria elevata (a livello del piano fondale) e soprattutto di gradienti idraulici molto elevati (ad esempio legati alla presenza di zone di ricarica montane o pedemontane vicine all'area di intervento).

Per quanto concerne le cause ed i processi cinematici coinvolti nella fenomenologia di dissesto possono essere ricavate le seguenti tabelle riepilogative con colori a semaforo: verde: impiegabile; giallo: scarsamente impiegabile/moderatamente efficace; rosso: non impiegabile/inefficace.

Tab.1 Cause derivanti da movimenti propri del terreno

Cause	Processo/i agente/i	Effetti
Stratificazioni di modesto spessore di terreni di diversa consistenza (natura del terreno)	Consolidazione	Cedimenti immediati, normalmente di piccola entità, in terreni sabbioso-ghiaiosi e cedimenti di consolidazione e secondari nei terreni a grana fine (argille e limi). In presenza di strati di terreno torboso i cedimenti sono normalmente molto elevati per l'alta compressibilità delle sostanze organiche in essi contenute.
Variazioni laterali nelle caratteristiche geotecniche del terreno di fondazione (natura del terreno)	Consolidazione e/o Rottura differenziale	Cedimenti differenziali tra diverse zone della struttura fondale; possibili rotture localizzate con innesco di cedimenti.
Presenza di caverne o cunicoli artificiali o naturali (natura del terreno)	Rottura	Sprofondamento della fondazione per rottura della volta del cunicolo. Questo processo avviene normalmente in aree urbanizzate con presenza di caverne artificiali realizzate in tempi storici o in aree con una precedente attività estrattiva. Più raramente si può avere la rottura di colte di cavità carsiche anche in aree di pianura.
Riporti non stabilizzati (natura del terreno)	Costipamento	Cedimenti in seguito alla costipazione del materiale per il carico del fabbricato; l'azione di costipazione provoca una riduzione delle cavità dovute a materiali marcescibili (legnami) o in trasformazione (calcinacci, rottami di ferro ecc)

Cause	Processo/i agente/i	Effetti
Fenomeni franosi veloci	Rottura	Slittamenti e scivolamenti spesso disastrosi per superamento della resistenza al taglio dei pendii.
Fenomeni franosi lenti	Rottura	Colamenti superficiali lenti che possono dare luogo a cedimenti nella parte di fondazione interessata dal movimento.
Abbassamento della falda idrica (estrazione di acqua con pozzi o per lunghi periodi di siccità)	consolidazione	Contrazione di terreni a grana fine per essiccazione delle argille con conseguenti cedimenti spesso differenziali.
Innalzamento della falda per nuova costruzione di un bacino di ritenuta	Filtrazione e sifonamento	Rottura di argini per superamento del gradiente idraulico critico, rigonfiamento di terreni con elevato tenore di argilla.
Asportazione di materiale in aree acclivi	rottura	Alterazione della stabilità dei versanti con possibili rotture locali o generalizzate

Tab..2 Cause derivanti da azioni mutue tra terreno e costruzione

Cause	Processo/i	Effetti
-------	------------	---------

	agente/i	
Eterogeneità della struttura fondale (1-fondazioni impostate a quote diverse, 2-coesistenza di più tipologie fondali per uno stesso edificio, -3 fondazioni con stesso carico unitario, ma con superfici di contatto di diversa estensione) (azioni statiche)	Consolidazione	Cedimenti non uniformi (differenziali) dovuti nel primo caso ad un diversità del comportamento geotecnico del terreno di fondazione, nel secondo caso ad un diverso valore del carico unitario trasmesso dalle varie tipologie fondali e nel terzo caso ad una diversa estensione del bulbo delle pressioni che interessando strati di terreno a maggiore profondità può provocare maggiori cedimenti.
Presenza di fondazioni non collegate (azioni statiche)	Consolidazione	Spostamenti relativi delle basi fondali in seguito anche a piccoli cedimenti differenziali del terreno
Distribuzione irregolare del carico sul terreno	Consolidazione	Cedimenti differenziali
Variazioni di carichi nei terreni adiacenti (azioni statiche)	Consolidazione e/o rottura	Cedimenti o rotture localizzate in prossimità della zona di nuovo carico
Azioni sismiche	Rottura e/o liquefazione	Fenomeni di rottura o liquefazione del terreno di fondazione con conseguenti crolli o ribaltamenti dell'intero edificio.
Azioni dinamiche persistenti (vibrazioni prodotte dal traffico viario o dovute al funzionamento di macchinari industriali) (azioni dinamiche)	Consolidazione e/o liquefazione	Nei terreni argillosi si ha consolidazione per riduzione dei vuoti, nei terreni sabbioso-ghiaiosi di tipo monogranulare possono innescarsi anche fenomeni di liquefazione dinamica.
Swelling Clay: variazione stagionale dell'umidità e del grado di saturazione delle argille	Essiccamento e rigonfiamento delle argille	Nei terreni argillosi si ha consolidazione per variazione delle caratteristiche fisiche del terreno dovute all'essiccamento estivo con forti cedimenti sia assoluti sia differenziali mentre in periodo invernale di ha rigonfiamento con parziale richiusura delle lesioni a causa delle sovra spinte ingenerate dal riconfiamento

ASPETTI GEOTECNICI

Modello matematico

Allo scopo di ricavare informazioni quantitative sul comportamento geomeccanico dei terreni sottoposti a consolidamento con questa tecnica è stato implementato un modello matematico con un programma di calcolo di analisi geomeccanica del continuo agli elementi finiti (Flac)

Il modello matematico è stato elaborato sul modulo sperimentale rappresentato da un intorno significativo della CPT2 eseguita sul cantiere di Massa finale (Mo).

La sperimentazione è consistita nell'iniezione della resina nel foro di prova CPT. Nel foro cementato in superficie sono stati introdotti circa 105 Kg della resina corrispondenti ad un volume $V=0.95 \text{ m}^3$ calcolati con $\rho=110 \text{ Kg/m}^3$.

Una volta completate iniezione ed espansione della resina, è stata eseguita a breve distanza di ca. 30 cm dal foro di iniezione una seconda prova CPT che ha riscontrato un miglioramento sensibile, variabile lungo la profondità, dei valori di resistenza alla punta.

La figura seguente mostra i valori della resistenza alla punta delle due prove CPT2 e CPT2A a confronto:

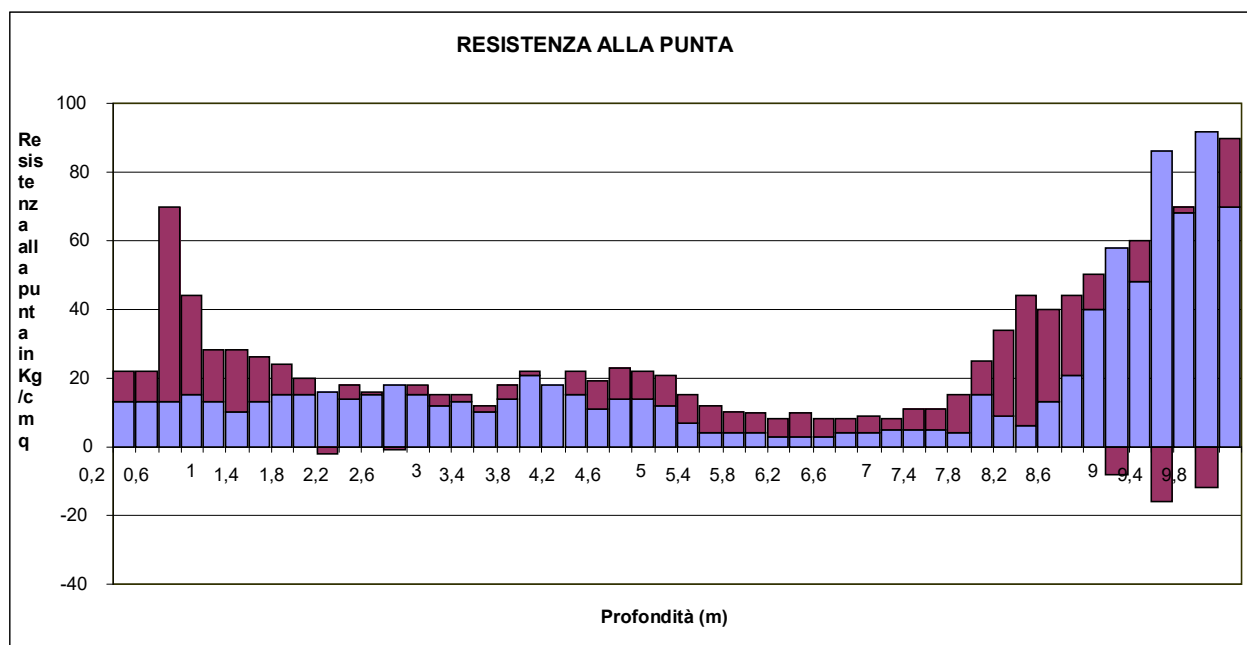


Fig. 5 – Cantiere di Massa Finale (Mo) – Prove penetrometriche pre (CPT2) e post iniezione (CPT2A) a confronto

Le assunzioni del modello risultano le seguenti:

- Il terreno è considerato in prima approssimazione, per i terreni argillosi incontrati dalla prova, praticamente impermeabile nei confronti della resina.
- La pressione caratteristica di rigonfiamento della resina, esercitata per ca. 1 minuto, è di 5 Kg/cmq.
- Attraverso la prova CPT sono stati individuati 4 strati omogenei sotto il profilo geomeccanico con i seguenti parametri geomeccanici:

	densità [Kg/mc]	Cu [Kpa]	c' [Kpa]	φ [°]	E [Mpa]	K [Mpa]	Eu = Ku [Mpa]	G [Mpa]
strato 1	1700	75.0	2.0	28.0	4.5	5.0	50	1.7
strato 2	1700	25.0	8.0	20.0	1.25	1.4	15	0.5
strato 3	1700	75.0	2.0	28.0	3.75	4.2	40	1.4
strato 4	1700			35.0	20	22.2		7.4

Tab. 3 – parametri geotecnici del modello geomeccanico

Dove:

C_u =coesione non drenata

Φ =angolo di attrito interno in condizioni non drenate

C' =coesione drenata

E = Modulo di Young o modulo di deformazione elastica lineare

K =Modulo di Bulk o modulo di compressibilità

E_u =Modulo elastico non drenato

G = Modulo di elasticità tangenziale o Modulo di taglio

Per la definizione del modello bidimensionale (2D) è stato definito un modulo (box) di 12 m di profondità e di 6 m di sviluppo lineare.

Il modello, suddiviso negli orizzonti geotecnici precedentemente descritti, ha ricavato le tensioni in sito geostatiche iniziali dovute alla gravità. Nella figura 4.5 è riportata la distribuzione iniziale delle tensioni orizzontali, risultate ca. 1/3 di quelle verticali (Le pressioni sono espresse in Pascal (Pa): $2E+4 \text{ Pa} = 0.2 \text{ Kg/cm}^2$).

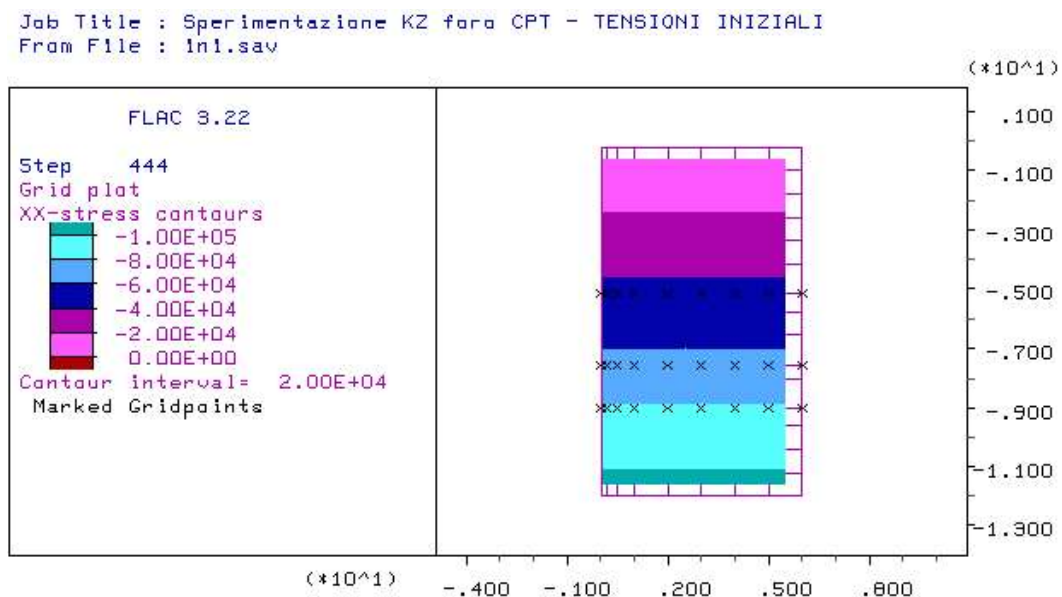


Fig. 6 – distribuzione iniziale delle pressioni orizzontali -

In prima analisi è stata valutata la risposta puramente elastica del terreno, in assenza di rottura per taglio.

Nella figura successiva, riferita alla situazione post iniezione, viene rappresentata la distribuzione degli spostamenti orizzontali del terreno (misure in m con contur interval di 0.25 cm).

I valori ottenuti sono risultati dell'ordine del cm e concentrati nell'unità più deformabile dello strato 2

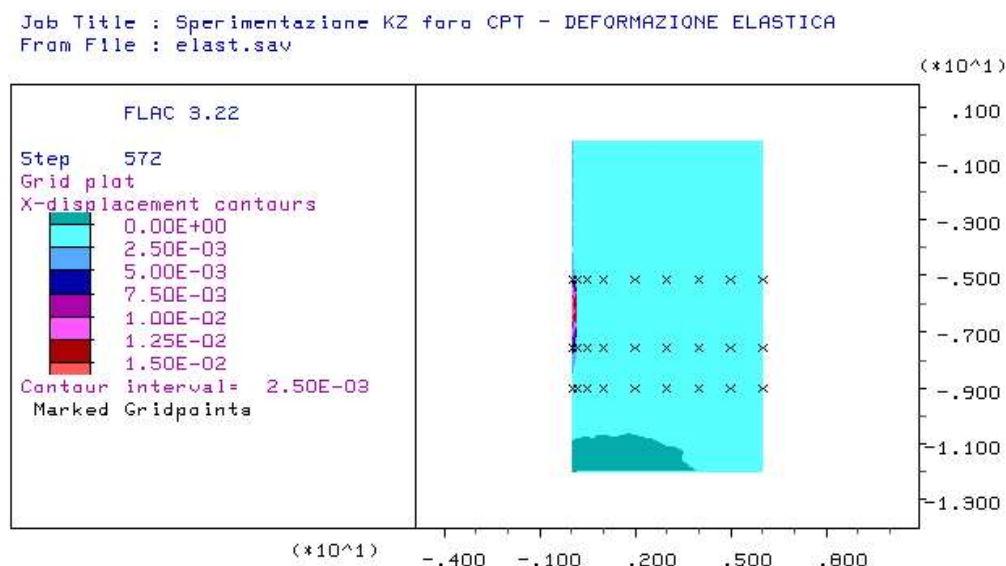


Fig. 7 – Distribuzione degli spostamenti orizzontali

Questa modellizzazione, sebbene corretta e valida negli stadi iniziali dell'iniezione dove ancora le deformazioni prodotte risultano scarse, non spiega le volumetrie di resina coinvolte nell'iniezione ed inoltre non spiega le variazioni dello stato tensoriale del volume di terreno consolidato immediatamente prospiciente la verticale di iniezione e misurati dall'incremento dei valori di resistenza penetrometrica iniziale..

La concentrazione delle tensioni nelle zone più deformate e le conseguenti deformazioni risultano evidenti dalla analisi successiva, nella quale si è assunto un modello più reale di comportamento del terreno, ossia di tipo elasto-plastico con criterio di rottura che segue i parametri di Mohr-Coulomb.

Il risultato della simulazione è riportato, ancora con la distribuzione dello stress orizzontale, per l'ultimo step analizzato, oltre il quale il calcolo si interrompe per problemi geometrici delle celle più deformate. Lo spostamento sull'unità più deformabile è notevole, dell'ordine del metro.