

1. PREMESSA

Nelle operazioni di recupero e di manutenzione straordinaria capita sempre più spesso che un edificio abbia problemi di fondazioni tali da rendere necessario un loro consolidamento. Negli ultimi anni sono sorti, a causa anche del fenomeno dell'abusivismo edilizio, edifici con fondazioni palesemente sottodimensionate o che nel corso del tempo hanno subito spostamenti o modifiche del terreno che ne hanno inficiato la capacità portante.

Avendo occasione di osservare frequentemente il fenomeno, ho potuto constatare che le proporzioni del problema sono notevolmente aumentate: infatti, negli ultimi anni a causa di **stagioni sempre più calde e sempre meno piovose**, sono stati interessati da cedimenti differenziali verticali, manifestatisi con lesioni più o meno gravi, un numero notevolissimo di edifici.

Quello che sorprende i proprietari ed, a volte, anche i tecnici chiamati a risolvere i problemi, è che **sono interessate al fenomeno anche alcune case con strutture murarie solide**, nuove ed antiche, che hanno subito nella loro vita secolare diverse vicissitudini ed, a volte, terremoti, senza tuttavia subire danni apprezzabili.

Spesso gli assestamenti del terreno sotto le fondazioni sono superficiali e localizzati, e provocano rotture di mattoni all'interno della muratura portante con lesioni appariscenti sia all'esterno che all'interno, altre volte i cedimenti interessano gli strati più profondi per questo le ripercussioni sulle strutture fuori terra sono più diffuse e di minore entità.

In questi casi il tecnico deve esaminare, una volta acquisiti dati necessari, **una serie d'interventi possibili** (sottofondazioni alla necessaria profondità, sottofondazioni profonde tramite pali o micropali, iniezioni di resine all'interno del terreno sotto le fondazioni, etc.); ognuno di questi interventi va progettato con la massima cura e precisione, e realizzato con altrettanta perizia in modo da

Consolidamento del terreno di fondazione con iniezioni di resine espandenti

garantire non solo l'eliminazione delle lesioni, ma anche la causa che le ha prodotte.

Negli ultimi venti anni, dopo una certa diffidenza iniziale, si sono diffusi altri metodi il cui scopo non è quello di creare una nuova struttura, ma quello di intervenire con **un consolidamento del terreno al di sotto delle fondazioni oggetto di cedimenti.**

Queste tecniche vengono sempre più scelte da parte dei tecnici progettisti per il fatto di non essere invasive e ad impatto cantiere quasi zero, quindi applicabile anche per centri storici e/o vecchie strutture con fondazione a sacco, ma soprattutto per i costi contenuti rispetto alle tecniche tradizionali sopra menzionate.

2. DESCRIZIONE DELLA TECNICA

La tecnica consente il consolidamento del nodo terreno-fondazione, previo riempimento di cavità e fessurazioni di ogni tipo, mediante forte compattazione fino al raggiungimento dello stato limite, anche negli strati più profondi interessati dalla fondazione da consolidare, mediante l'iniezione in profondità di resine espandenti la cui azione determina una diminuzione dell'indice dei vuoti.

L'iniezione viene eseguita attraverso la messa in posto di cannule di rame o di alluminio ($\Phi=16\text{mm}$) inserite all'interno di pre-fori (*vedi fig. 1*) che attraversano le strutture fondali.

Consolidamento del terreno di fondazione con iniezioni di resine espandenti



Fig. 1 - Fase lavorativa – Foratura

Il materiale iniettato, che viene monitorato da lettori laser, 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. (vedi fig. 2)

La notevole forza di espansione delle resine (fino a 5 Kg/cm^2), che causa un aumento di volume delle stesse resine di ca. 30 volte, solo se non c'è confinamento mentre nel terreno l'aumento sarà attorno a 4-5 volte, risulta il meccanismo di azione fondamentale della tecnica. Le azioni che si inducono nel terreno determinano non solo un riempimento delle zone vucolari ma anche e soprattutto un costipamento del terreno di fondazione. (vedi fig. 3)



Fig. 2 - Fase lavorativa – Iniezione e monitoraggio



Fig. 3 – Effetti dell'iniezione di resina espandente

I parametri che caratterizzano il meccanismo di azione dell'intervento di consolidamento, al di sotto di un'ipotetica fondazione sono schematizzati nella fig. 4 e nella successiva didascalia.

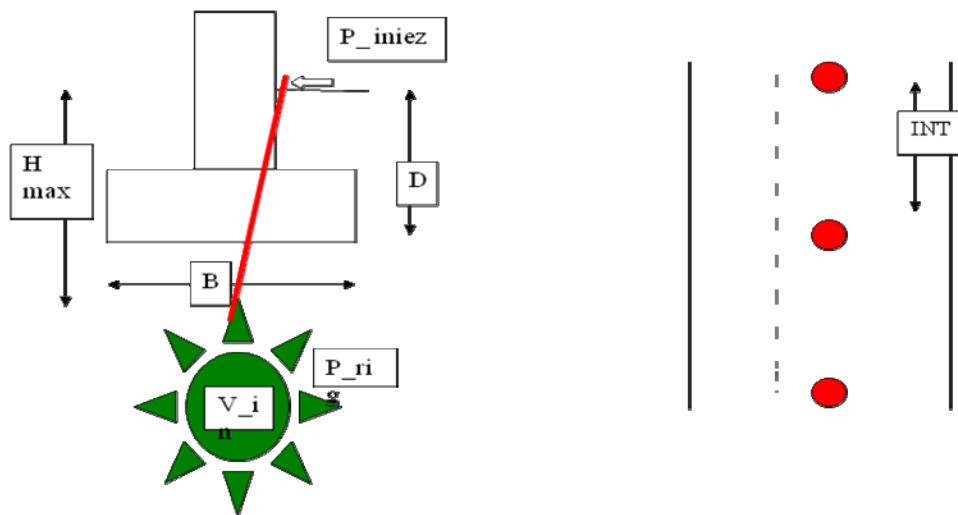


Fig. 4 - Schema d'intervento sotto una fondazione tipo

- ✚ P_{iniez}: Pressione di iniezione: 10-12 atm
- ✚ Densità della miscela: 1,15 T/m³
- ✚ Tempo di solidificazione: 1min
- ✚ V_{in}: Volume medio iniettato: 50-70 Kg/ml
- ✚ P_{rig}: Pressione di rigonfiamento: 5 Kg/cm²
- ✚ H_{max}: Profondità massima di iniezione: 3-4 m
- ✚ Int: Interasse medio delle iniezioni: 1 ÷ 1,5m

3. CARATTERISTICHE D'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 3-4 m dal piano di calpestio. 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 $B > 1,5 \div 2,0$ 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 della trave appare, in quest'ultima situazione, quello di 3 metri.






Tra le condizioni geometriche risultano importanti non solo quelle inerenti alle 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'insacco del movimento.

Nel caso in cui questi orizzonti venissero localizzati a profondità maggiori di $5,0 \div 6,0$ metri dal piano di iniezione, una loro compattazione, che risultasse significativa, sarebbe alquanto problematica, a meno di non impiegare tecniche di iniezione diverse (prefori profondi eseguiti con macchine a rotazione preventivamente cementati in superficie).

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

Consolidamento del terreno di fondazione con iniezioni di resine espandenti

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. In tale situazione per bassi volumi di resina si avrebbe un immediato sollevamento della sovrastruttura senza che ciò comporti una compattazione del substrato. Questa tipologia di terreni può essere classificata schematicamente nella seguente tabella che segue la classificazione granulometrica AGI:

-  Ghiaie grossolane
-  Ghiaie sabbiose
-  Ghiaie sabbiose-limose
-  Sabbie con ghiaia
-  Sabbie ghiaiose

Anche terre coesive e rocce con una resistenza alla compressione semplice $Q_u > 1,00 \text{ MN/m}^2$ ($10,00 \text{ Kg/cm}^2$) e quindi una coesione non drenata $C_u > 5,00 \text{ Kg/cm}^2$ 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 ($< 1 \text{ min}$), 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 ($K > 1\text{E}^{-2} \text{ m/s}$), 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 ricariche montane o pedemontane vicine all'area di intervento).

Allo stato attuale non risulta possibile definire dei limiti di applicabilità analitici e ben definiti della tecnica in riferimento a tali situazioni; le ipotesi di intervento in situazioni idrogeologiche di questo tipo dovranno essere opportunamente vagliate di volta in volta.