

INTERVENTI VOLTI ALL'ELIMINAZIONE DI PROBLEMI DI CEDIMENTI DIFFERENZIALI OCCORSI AD EDIFICI SITI IN AREE DENSAMENTE POPOLATE A MEZZO DEL SISTEMA SOILFRAC

Nanni E.
Keller Fondazioni S.r.l.

Guerra C.
Studio Tecnico ITS

Casagrande M.
Studio Antao

SOMMARIO

Il presente articolo si riferisce ad alcuni interventi già realizzati nel territorio della Repubblica di S. Marino durante l'anno 2001. Tali lavorazioni si prefiggevano quale obiettivo l'eliminazione dei cedimenti differenziali occorsi ad edifici ubicati in ambiente urbano a mezzo di iniezioni di miscela cementizia a bassa pressione. Data la delicatezza del problema è stata necessaria un'approfondita analisi geotecnico geognostica, la quale ha permesso ai progettisti di basare i loro calcoli su dati derivanti da svariate prove geotecniche in sito ed in laboratorio nonché su di un monitoraggio dei movimenti del terreno e delle fessure degli edifici protrattosi per parecchi mesi. Durante le lavorazioni è inoltre stato eseguito un controllo costante della situazione a mezzo di strumenti ottici attraverso il quale si è potuto, soprattutto durante la fase d'iniezione, adattare il progetto alla risposta del terreno. Il fatto di operare in ambiente urbano ha obbligato gli operatori ed i progettisti a continui controlli anche sugli edifici posti nelle vicinanze dell'area d'intervento che non dovevano in nessun modo essere influenzati dalle lavorazioni.

1 DESCRIZIONE DELLA PROBLEMATICATA

Nel recupero di edifici storici lesionati, il consolidamento delle fondazioni nonché l'eliminazione dei cedimenti differenziali che provocano fessurazioni alle strutture è un passo indispensabile che spesso presenta problematiche non facili.

Oltre alle difficoltà geologiche e geotecniche, gli aspetti più difficoltosi sono legati alla frequente complessità strutturale di fabbricati che nel corso dei secoli hanno subito continue modifiche e sono dotati di fondazioni discontinue e realizzate con tipologie peculiari.

Si deve quindi agire in contesti particolari, dove le tecniche di sottofondazione tradizionali, con rinforzo delle fondazioni esistenti, presentano grandi difficoltà esecutive e spesso risultano di dubbia efficacia non consentendo inoltre un sollevamento del corpo di fabbrica laddove questo si rendesse necessario.

In questo articolo saranno descritti due interventi di consolidamento e sollevamento eseguiti in differenti situazioni geologico geotecniche che rappresentano due casi estremi per la loro collocazione urbanistica, essendo uno relativamente isolato ed il secondo in pieno centro storico in una piazza densamente popolata.

Gli edifici ai quali si fa riferimento sono: la Chiesa di Sant'Andrea Apostolo sita nel Castello di Acquaviva (Repubblica di S. Marino) e l'antico frantoio Belluzzi sito nella piazza principale del castello di Serravalle (Repubblica di S. Marino).

In entrambi i casi si è eseguito l'intervento di bonifica e sollevamento ricorrendo a tecniche d'iniezione a bassa pressione che migliorano le caratteristiche del terreno di fondazione, aumentandone la capacità portante e riducendone la sensibilità verso le variazioni di umidità.

2 CONCETTO TECNICO

2.1 Iniezioni tipo Soilfrac

La tecnica del Soil - fracturing venne sviluppata nel campo dell'industria petrolifera come sistema per aprire o allargare le vie di scorrimento naturali del petrolio fino ai pozzi. Negli anni '60 si è preso spunto da questi procedimenti per sviluppare una serie di interessanti applicazioni nel campo della geotecnica.

A mezzo di questa tecnica si produce l'apertura di vie di scorrimento nel terreno (fracs) dove una miscela di iniezione a composizione calibrata costituita da farina di calcare, cemento e bentonite penetra ed indurisce. Ripetuti cicli di iniezione inducono un miglioramento delle caratteristiche geomeccaniche in ogni tipo di terreno e preludono all'eventuale sollevamento.

Attraverso l'utilizzo di queste tecniche è possibile contrastare i cedimenti, operare una ricomprensione del sistema fondazione-terreno e realizzare una bonifica di fondazioni dislocate, degradate o "svuotate".

La sospensione iniettata ha un contenuto molto alto di legante solido che penetrando a pressione forma delle sacche per rotture localizzate (claquage controllato), così facendo si formano all'interno del terreno delle così dette lamelle che estendendosi in direzione verticale imprimono al terreno una tensione orizzontale con effetto di consolidamento.

Iniezioni ripetute portano ad un'estensione delle ramificazioni di queste lamelle con un conseguente innalzamento delle tensioni sia verticali che orizzontali.

L'aggiunta di questo volume di materiale solido nel terreno porta poi quale risultato finale ad un sollevamento controllato dell'ammasso sovrastante il piano iniettato.

Il controllo dei lavori avviene attraverso la scelta di specifici parametri (pressione, quantità, numero fasi), dei punti d'iniezione ed il controllo dell'evolversi temporale del processo.

Questo ultimo è reso possibile da una misurazione a brevi intervalli di tempo della reazione del terreno a mezzo di letture topografiche del movimento del corpo di fabbrica sovrastante che si presume essere ad esso sensibile.

Il sistema Soilfrac si basa, per ottenere i risultati voluti, su specifici sistemi e tecniche di controllo e misura appositamente sviluppati.

Solo un controllo strumentale affidabile e gestito in tempo reale consente infatti la riuscita di cicli di sollevamento successivi.

L'iniezione avviene attraverso appositi tubi in acciaio con valvole dotate di manschette in gomma ogni 50 cm messi in opera nella zona da consolidare attraverso la preventiva realizzazione di un preforo.

La profondità d'iniezione viene scelta in modo da mantenere un cuscinio di terreno tra la fondazione ed il piano d'iniezione in modo che questo possa arrotondare le punte di tensione provocate dalle iniezioni consentendo un sollevamento più omogeneo.

2.2 Fasi operative

Per poter procedere alle iniezioni è necessaria la preventiva messa in opera nel terreno da trattare di canne valvolate annegate nella miscela di guaina, la disposizione delle quali viene definita in funzione delle condizioni del sito.

Attraverso queste canne che non hanno nessun fondamento statico ma servono solamente quale condotto per poter raggiungere la profondità alla quale si intende intervenire, si procede all'iniezione a mezzo di appositi flessibili attrezzati al fondo con un doppio otturatore speciale.

Questi ultimi consentono il raggiungimento delle singole valvole nonché di aprirle iniettando la miscela a pressione, permettendo così un'iniezione mirata valvola per valvola.

La prima fase d'iniezione realizzata sul lato esterno dell'edificio da consolidare serve a creare un contrasto alla spinta delle iniezioni delle fasi successive.

La seconda fase serve a ripristinare il contatto fondazione terreno attraverso un costipamento grossolano del sottosuolo e riempimento di eventuali cavità naturali o create con la perforazione, e viene realizzata con iniezioni ripetute su tutta l'area fino al verificarsi dei primi accenni di sollevamento.

La terza fase detta di stabilizzazione induce una mobilitazione del terreno fino al raggiungimento di un primo sollevamento superficiale dello stabile con un massimo di 1 – 2 mm.

Nella quarta fase, di sollevamento, si procede a passi di sollevamento limitati riportando "in bolla" l'edificio interessato dall'intervento attraverso un innalzamento omogeneo dello stabile.

I cicli d'iniezione vengono ripetuti e le canne valvolate vengono mantenute operative per lunghi periodi in modo da poter ripetere le iniezioni in futuro qualora si rendesse necessario.

2.3 Monitoraggio topografico dell'area di cantiere a mezzo di strumenti di precisione

Data la delicatezza degli edifici sui quali si opera è necessario che ogni sollevamento avvenga con una

velocità compatibile con il tempo necessario alle strutture ed al terreno d'impasto per un loro riassetamento.

Nel caso in cui si intervenga su edifici in buone condizioni il parametro al quale fare riferimento durante il sollevamento è l'angolo d'inclinazione tangenziale.

Il valore limite dell'inclinazione tangenziale sotto il quale tenersi per evitare fessurazioni è cautelativamente da tenersi limitato ad un valore pari ad 1/1000 della luce libera (Foeste T. e Cactus M., 1999).

Per verificare che questo avvenga è indispensabile un monitoraggio topografico dell'area di cantiere a brevi intervalli di tempo.

Il programma dei controlli stabilito prevede una livellazione ottica dell'edificio rispetto ad un punto fisso scelto al di fuori dell'area d'influenza degli effetti delle iniezioni eseguita almeno due volte al giorno, un controllo continuo delle fessure interne all'edificio considerate più rilevanti ed un monitoraggio costante di fessurimetri applicati esternamente all'edificio in corrispondenza delle fessurazioni più evidenti.

Lo scopo dei dati rilevati è quello di valutare l'effetto delle perforazioni/iniezioni sui movimenti dell'edificio per poi decidere il programma del ciclo d'iniezioni seguente a quello appena terminato che può essere adattato alle mutevoli esigenze agendo sulla pressione d'iniezione, che si attesta mediamente su valori vicini ai 10 bar, sulla scelta delle valvole da iniettare e sulla quantità di miscela iniettata.

La disposizione dei punti di monitoraggio viene scelta in modo tale da essere distribuita omogeneamente sull'area dell'intervento.

Tutti i dati raccolti vengono rielaborati in schede e grafici per consentirne una lettura più immediata e semplice.

3 ANTICO FRANTOIO BELLUZZI – SERRAVALLE

L'antico frantoio Belluzzi è un edificio articolato in più corpi di fabbrica situato all'interno del centro storico di Serravalle, in un contesto geologico tipico e semplice.

L'edificio si trova all'interno del nucleo storico dell'abitato di Serravalle, su di un'altura posta in destra orografica del Torrente Ausa, nella parte Nord Orientale del territorio della Repubblica di San Marino.

3.1 Inquadramento geologico

L'abitato di Serravalle è inserito nella fascia più esterna dell'Appennino romagnolo-marchigiano, geologicamente caratterizzata dai depositi neoautoctoni della successione umbro-marchigiana-romagnola.

Nel Quaternario la morfogenesi ha determinato le attuali forme del rilievo e la deposizione di terreni di copertura di diversa natura, origine e spessore.

Il substrato è costituito dalle Peliti grigio-azzurre del Pliocene, rappresentate da argille limose e siltiti grigie azzurre, dure e sovraconsolidate, in strati spessi 2 - 30 cm. all'interno delle quali si ritrovano intercalazioni sabbiose grigie di spessore generalmente centimetrico.

I depositi di copertura sono costituiti da argille limose nocciola, alterate, con materia organica e lenti sabbiose o talora detritiche, che verso il basso passano solitamente ad argille limose grigio variegata, più consistenti, dove permangono lenti sabbiose e materia organica.

3.2 Descrizione dell'edificio e caratterizzazione dei dissesti

L'antico frantoio Belluzzi mostra un'articolata struttura su più piani sfalsati ed è costituito da tre corpi di fabbrica e da locali seminterrati.

Il corpo di fabbrica più antico risale all'XI - XII secolo mentre le restanti porzioni sono state realizzate nel XV secolo e nel XVIII secolo; questa ultima fu ristrutturata nel 1976, periodo a cui risale anche la costruzione dei locali seminterrati.

E' probabile che l'edificio sia dotato di fondazioni dirette nastriformi, costituite verosimilmente da cordoli di larghezza superiore di 20 - 40 cm rispetto ai muri portanti soprastanti e con piano di posa a 100 - 150 cm dal piano campagna, realizzate con pietrame di varia pezzatura legato da malte cementizie di diversa natura.

I proprietari osservarono le prime fessurazioni negli anni 1989 - 1990, anche se nelle murature si riconoscono le tracce di diverse lesioni antiche.

Nel 1997 si assistette ad un aggravarsi della situazione, con aumento dell'entità delle fessurazioni esistenti e la comparsa di nuove lesioni.

Nel 1999 e nel 2000 le lesioni progredirono ulteriormente, fino a giungere ad un quadro fessurativo grave, caratterizzato da molteplici lesioni con orientazione ed estensione variabile ed aperture fino ad oltre il centimetro.

Le lesioni risultano concentrate nella parte Nord Orientale dell'edificio, che appariva abbassata rispetto al resto della struttura.

3.3 Indagini geognostiche e monitoraggio

L'indagine geognostica realizzata nella primavera del 2001, si è articolata in tre sondaggi stratigrafico a carotaggio continuo (S1, S2, S3), ed in tre prove penetrometriche dinamiche leggere (P1, P2, P3). Sia i fori dei sondaggi che quelli delle prove penetrometriche sono stati strumentati con piezometri a tubo aperto.

Sui campioni indisturbati prelevati durante le perforazioni si sono eseguite diverse prove di laboratorio.

L'evoluzione delle lesioni è stata monitorata da 6 fessurimetri installati su alcune delle lesioni principali o più significative.

3.4 Stratigrafia e caratterizzazione geotecnica

Sulla base dei dati raccolti nel corso dell'indagine geognostica, il profilo stratigrafico nell'immediato sottosuolo dell'area in esame è stato ricondotto al seguente schema.

- Riporto antropico

Argilla limosa plastica rimaneggiata con pietrame e macerie

- Livello A1

Coperture Eluvio Colluviali - Membro superiore

Argilla limosa nocciola, alterata, da essiccata a umida, da plastica a consistente, con materia organica, calcinazioni e passaggi sabbiosi talora umidi.

- Livello A2

Coperture Eluvio Colluviali - Membro inferiore

Argilla limosa nocciola variegata, alterata, a luoghi moderatamente umida, da moderatamente plastica a consistente, alterata, con passaggi sabbiosi ossidati. Si osservano passaggi maggiormente plastici, rare calcinazioni e scarsa materia organica.

- Livello B'

Substrato allentato

Argilla limosa e siltite grigia, in starti spessi da 3 a 10 cm, disarticolati, con frequenti bande e striature nocciola e variegata, asciutta e consistente, con veli sabbiosi nocciola leggermente umidi ed ossidati, poi grigi ed asciutti.

- Livello B (oltre 7.50 / 8.50 mt. dal p.c.)

Substrato

Argilla limosa e siltite grigia, in starti spessi da 3 a 10 cm, asciutta e sovraconsolidata, con veli millimetrici di sabbia fine grigia.

Ognuna delle unità litostratigrafiche è stata caratterizzata geotecnicamente come riassunto nella seguente tabella 1.

3.5 Risultati monitoraggio

La variazione del livello della superficie piezometrica è stata monitorata per un periodo di circa tre mesi, nel corso dei quali si sono registrati 12 eventi meteorici di modesta entità insufficienti per bilanciare la naturale tendenza all'abbassamento della falda che si verifica con l'approssimarsi della stagione estiva

Nel medesimo tempo di osservazione i fessurimetri hanno registrato movimenti massimi di 1 - 2 mm, concentrati sulla parte Est del fabbricato.

3.6 Cause dei dissesti

Sulla base delle indagini geognostiche e dal monitoraggio geotecnico è stato possibile ricondurre i dissesti del frantoio Belluzzi ad alcuni fattori principali.

- Presenza di terreni a prevalente componente pelitica (argille e limi), dotati di un elevato potenziale di rigonfiamento.

- Vulnerabilità delle fondazioni esistenti e loro inadeguatezza o vetustità in relazione al tipo di terreno presente.

- Variazioni del contenuto in acqua nei terreni a componente pelitica con conseguente mutamento del volume occupato in relazione a oscillazioni della superficie piezometrica. Un ruolo secondario può essere imputato all'impermeabilizzazione e copertura di aree adiacenti all'edificio.

Ruoli minori possono essere attribuiti ad infiltrazioni idriche nel sottosuolo conseguenti a scavi, in particolare nelle vicinanze delle fondazioni, all'essiccamento del

terreno di fondazione, sempre in conseguenza di scavi ed alla costruzione di nuovi pozzi o all'emungimento eccessivo dai pozzi esistenti.

Tabella1. Parametri geotecnici

			Livello A1	Livello A2	Livello B'	Livello B
			Copertura eluvio colluviale		Substrato allentato	Substrato
			Membro superiore	Membro inferiore		
Peso dell'unità di volume	γ	ton/m ³	1.95 2.00	1.95 2.00	2.05	2.10
Coesione non drenata	Cu	ton/m ²	8.00 12.00	10.00 20.00	20.00 25.00	>25.00
Coesione efficace	C'	ton/m ²	0.0	0.0	0.75 1.25	1.75 2.25
Angolo efficace di resistenza al taglio	ϕ'	°	17 19	18 20	22 24	24 26
Angolo residuo di resistenza al taglio	ϕ	°	8 10	8 10	8 12	8 12
Modulo di deformabilità drenato	E'	ton/m ²	800 1200	1200 2000	2000 3000	3000 5000
Modulo di compressibilità	Mv	cm ² /Kg	0.02 0.008	0.01 0.005	0.005 0.002	0.002

3.7 Descrizione dell'intervento di consolidamento

La complessità strutturale dell'edificio e la scarsa disponibilità di spazi di manovra hanno determinato la disposizione spaziale delle canne di iniezione.

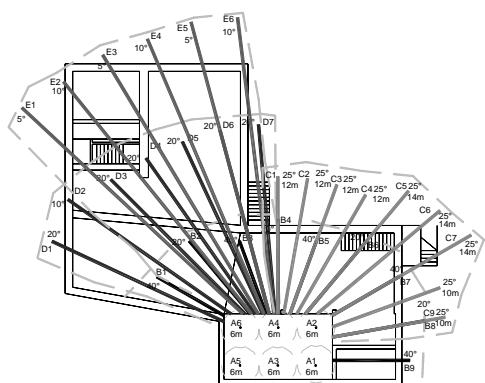


Figura 1. Pianta perforazioni

La presenza di locali interrati dove eseguire le perforazioni ha rappresentato un vantaggio, anche se è stato necessario utilizzare apparecchiature particolari con ingombri ridotti quali una sonda a rotopercolazione idraulica a motore elettrico.

Ciò ha permesso d'installare la maggior parte dell'impianto cantiere sul cortile antistante il corpo di fabbrica limitando gli ingombri nei locali interrati aventi spazi ridottissimi.

Ulteriori accortezze adottate, rese sempre necessarie dalla scarsità di spazio, sono state ad esempio l'utilizzazione di rulli metallici sui quali avvolgere i flessibili e di un premiscelato secco che ha permesso di limitare ad uno i silo necessari.

La disposizione delle 37 canne d'iniezione risulta piuttosto articolata.

Sono state realizzate 5 batterie di canne di iniezione (A, B, C, D) con più ordini e diverse inclinazioni.

La prima batteria (A) è stata realizzata al di sotto dei locali interrati, con due ordini di tre canne verticali lunghe 6 metri.

La seconda batteria (B) è composta da 9 canne in due ordini. Nel primo le canne sono lunghe 8 metri ed inclinate di 40° dall'orizzontale (B1, B3, B5, B7, B9); nel secondo le canne sono della stessa lunghezza, inclinate di 20° dall'orizzontale (B2, B4, B6, B8) ed attestate 80 cm più in alto. Le canne della batteria B sono disposte planimetricamente a formare un ventaglio di circa 160° con i due ordini che si alternano.

La terza batteria (C) è costituita da 9 canne lunghe da 10 a 14 metri ed inclinate di 25° dall'orizzontale in tre ordini paralleli. Le canne della batteria C sono disposte planimetricamente a formare un "mezzo ventaglio" di 90° sul lato orientale del fabbricato.

La quarta batteria (D) è costituita da 7 canne lunghe 16 metri divise in due ordini alternati. Le canne del primo ordine sono inclinate di 20°, quelle del secondo sono inclinate di 10°. La batteria D forma planimetricamente un "mezzo ventaglio" di 70° sul lato occidentale dell'edificio.

La quinta batteria (E) è formata da 6 canne lunghe 24 metri divise in due ordini alternati. Il primo ordine ha canne inclinate di 10°, il secondo ha canne inclinate di 5°.

La batteria E forma planimetricamente un “mezzo ventaglio” di 50° sul lato occidentale dell’edificio.

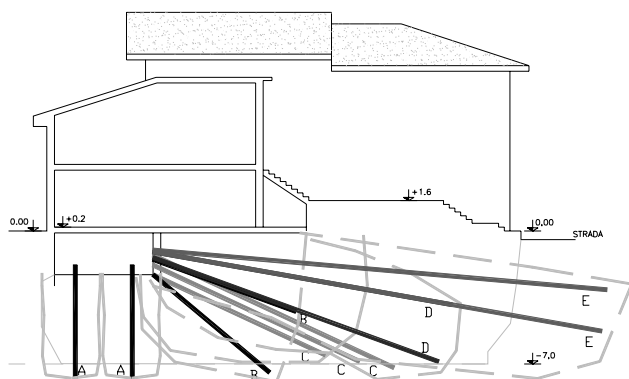


Figura 2. Sezione perforazioni

Per il monitoraggio del fabbricato durante l’esecuzione dell’intervento sono stati installati una serie di 32 placchette topografiche sulle murature esterne e 3 sugli edifici vicini nonchè alcuni fessurimetri interni, oltre a quelli già installati in precedenza.

Le placchette topografiche misurano i sollevamenti ed i cedimenti dell’edificio rispetto a punti esterni considerati fissi.

Le iniezioni di miscela sono avvenute in 7 cicli, ripetuti sui vari ordini di canne valvolate in funzione dei dati forniti dal monitoraggio. In totale i cicli d’iniezione sono durati 13 giorni con una quantità totale di miscela iniettata pari a 30.950 [l].

Alla fine dell’intervento si è ottenuto il consolidamento del volume di terreno che va dal piano d’imposta delle fondazioni al substrato, fino cioè ad una profondità di 6 – 8 metri su tutta l’impronta dell’edificio, con un totale pari a 3.500 [m³] di terreno trattato.

Questo rende un indice di efficienza pari a:

$$\eta = \frac{39.950}{3.500} = 8,8 \left[l / m^3 \right] \cong 0,9\% \quad (1)$$

Il che equivale a dire ca. 9 [l] di miscela iniettata per [m³] di terreno trattato.

Oltre al consolidamento del terreno si è ottenuto un generale sollevamento del fabbricato che ha registrato valori compresi tra i 4,5 ed i 22,5 mm.

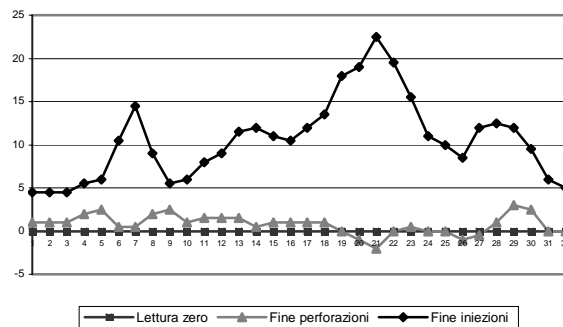


Figura 3. Diagramma andamento movimenti

Va registrato che a distanza di 9 mesi dall’intervento, dopo un periodo in cui l’edificio si è assestato continuando a salire in alcuni punti, a causa probabilmente del comportamento rigonfiante di questo tipo di argille, e a scendere laddove era stato più sollevato; i movimenti registrati anche recentemente hanno mostrato valori inferiori al limite di errore dovuto alle letture ottiche e considerato pari a 0,5 mm.

4 CHIESA DI SANT’ANDREA APOSTOLO – ACQUAVIVA

Il complesso parrocchiale di Sant’Andrea è costituito dalla chiesa, risalente alla fine del XVIII secolo e costruita su un fabbricato più antico, e dalla canonica adiacente di poco successiva. E’ situato poco distante dal centro storico di Acquaviva, ai piedi del versante Nord occidentale del massiccio di Monte Cerreto in corrispondenza del raccordo tra le rupi calcaree e il declivio che scende, con forme meno accentuate, verso il corso del Torrente San Marino.

4.1 Inquadramento geologico

L’abitato di Acquaviva è situato nella parte occidentale della Repubblica di San Marino inserito nel complesso quadro geodinamico della Coltre della Val Marecchia, dove terreni alloctoni appartenenti a domini eterogenei e diversificati sono sovrascorsi su unità autoctone appartenenti alla successione umbro-marchigiana-romagnola.

Il complesso parrocchiale di Sant’Andrea si trova in prossimità del contatto tra le unità epiliguri che costituiscono il Massiccio del Monte Cerreto (Formazione di San Marino, Formazione di Monte Fumaiolo e Formazione di Acquaviva) e le unità liguri, rappresentate dalle Argille Varicolori della Val Marecchia.

La Formazione di San Marino (Langhiano – Serravalliano inf.) presenta litologia variabile, e nel sito in oggetto è costituita da calcari organogeni grigio biancastri massivi, in banchi spessi 1 - 3 metri, diffusamente fratturati, passanti verso l’alto a biocalcareni grigio giallastre in strati spessi 10 - 100 cm, talora laminati, diffusamente fratturati.

La stratificazione è disposta a reggipoggio e a traverpoggio, con la massima pendenza in direzione Sud ed inclinazioni di $25^\circ \div 35^\circ$.

La fratturazione è un carattere tipico di questa formazione; le discontinuità sono contraddistinte da orientazione molto variabile, apertura da meno di 1 mm ad oltre 10 cm, sviluppo da qualche centimetro a diverse decine di metri.

Le Argille Varicolori della Val Marecchia (Cretacico – Eocene inf.) sono costituite da argille, argilliti ed argilliti marnose, da grigio a policrome, intensamente tettonizzate, con differenziazioni marnose, calcareo-marnose ed arenitiche; la caoticità e l'intensa tettonizzazione sono le principali caratteristiche di questa formazione, all'interno della quale è assai difficile riconoscere porzioni di assetto stratigrafico più regolare.

Altro carattere tipico è la presenza di una fratturazione, che pervade il materiale alla microscala e alla macroscala e delimita "scaglie" di varia dimensione, separate da superfici lucide e a volte striate (facies "a scaglie").

Sono inoltre frequenti relitti di orizzonti lapidei di vario spessore e natura (marne, calcari marnosi, calcareniti, arenarie), fogliettati, disarticolati e smembrati fino a presentarsi sotto forma di blocchi eterometrici (trovanti).

Per ciò che riguarda le altre formazioni citate, i litotipi della formazione di Monte Fumaiolo (Serravalliano), sono costituiti da biocalcareni giallastre alternate ad arenarie glauconitiche giallo verdastre, in strati di spessore variabile da 5 a 50 cm, con frequente laminazione incrociata. I terreni della Formazione di Acquaviva (Tortoniano sup. - Messiniano inf.) sono rappresentati da conglomerati poligenici in banchi che verso l'alto passano ad areniti grigie e giallastre in strati spessi 10 - 50 cm, con intercalazioni conglomeratiche e passaggi pelitici (argille grigio turchine).

I depositi superficiali possono essere distinti in Coperture argillose e Detrito di Falda.

Le coperture argillose si ritrovano a valle del sito indagato, e possono essere considerate come il prodotto dell'alterazione chimico fisica dei litotipi di substrato delle Argille Varicolori combinata all'azione dei processi di modellamento del versante. Sono costituite da argille limose nocciola, a luoghi policrome, umide e plastiche, con passaggi detritici, blocchi rocciosi calcarei e materia organica.

Il detrito di falda ha uno spessore che supera i 20 metri e costituisce il risultato del modellamento dei versanti occidentali del Monte Cerreto da parte degli agenti morfogenetici. E' costituito da detrito calcareo e calcarenitico biancastro, grigio chiaro e giallastro, eterometrico, in clasti da angolosi a sub arrotondati, in matrice limoso sabbiosa nocciola o grigia. Si osservano talora passaggi argillosi sottili e blocchi rocciosi fratturati di dimensioni superiori al metro cubo.

Le litologie dei clasti sono correlabili con le parti più competenti di tutte le formazioni epiliguri presenti a monte del sito, con predominanza di elementi litici provenienti dalla Formazione di San Marino e dagli orizzonti conglomeratici della Formazione di Acquaviva.

Si rinviene anche materiale antropico di riporto, costituito generalmente da materiale analogo a quello che compone il detrito di falda, con in più macerie e pietrame di varia pezzatura.

Tutta l'area circostante il complesso parrocchiale di Sant'Andrea è caratterizzata dalla diffusa presenza di accumuli e depositi di versante di notevole dimensione ed estensione.

L'indagine geognostica ha evidenziato la particolare forma del detrito di falda, che si approfondisce in maniera repentina proprio in corrispondenza dell'edificio in oggetto, con un andamento "in contropendenza" del limite inferiore.

Una morfologia simile non è inquadrabile nell'attuale contesto climatico dove non si riconoscono processi geomorfologici in grado di originare accumuli di questo tipo, ma va correlata con il regime morfogenetico presente durante le fasi glaciali quaternarie (Würm e Riss in speciale modo).

La storica predisposizione al dissesto della zona va imputata sia alla presenza di antichi movimenti di versante periodicamente riattivate, sia alle scadenti caratteristiche geotecniche dei terreni di copertura.

Scendendo verso il corso del Torrente San Marino si osservano anche aree a morfologia calanchiva e pseudocalanchiva, interessate da recenti interventi di bonifica.

La circolazione idrica del sottosuolo mostra flussi idrici copiosi ed è fortemente influenzata dalla presenza del detrito di falda e dalla struttura geologica.

Il massiccio di Monte Cerreto è costituito dai terreni con un buon grado di permeabilità, dovuto sia alla fratturazione sia alle litologie, mentre le sottostanti Argille Varicolori sono pressoché impermeabili.

Il limite Formazione di San Marino - Argille Varicolori costituisce quindi un livello di scorrimento preferenziale basale per tutti i flussi idrici che si raccolgono nell'area occupata dal massiccio di Monte Cerreto.

Il complesso parrocchiale di Sant'Andrea si erge proprio dove si può supporre che i flussi idrici raccolti a monte risalgano e vengano convogliati nel corpo detritico.

La sorgente di Acquaviva, distante poche decine di metri, presenta apporti copiosi ed ha un carattere perenne, e potrebbe rappresentare in questo quadro una risorgente di troppo pieno.

4.2 Descrizione dell'edificio e caratterizzazione dei dissesti

Il complesso parrocchiale di Sant'Andrea è costituito da due corpi di fabbrica principali (chiesa e canonica).

Le parti più antiche sono costruite in pietra, mentre parte degli ampliamenti più recenti (1933) sono in muratura.

Al di sotto della chiesa esistono locali interrati che sono stati utilizzati come ossario fino a qualche decina di anni fa.

Le fondazioni sono costituite da cordoli in conglomerato cementizio da cui sono spiccati i muri portanti ed a tratti i muri sono semplicemente appoggiati

al terreno. Non si possono formulare ipotesi sul piano di imposta ne tantomeno sul tipo di materiali usati.

I muri portanti hanno spessori variabili tra 50 e 70 cm nella parte più antica e di circa 30 cm nella parte degli ampliamenti.

I primi dissesti documentati risalgono agli anni trenta, quando venne realizzato uno sperone in calcestruzzo immediatamente a valle della chiesa.

Una prima analisi approfondita della situazione avvenne nel 1983, e allora fu rilevato un quadro fessurativo diffuso ed in evoluzione.

Venne quindi realizzata una sottofondazione parziale tramite micropali, anche se non fu possibile collegare i micropali alle fondazioni esistenti cosa che pregiudicò il raggiungimento degli obiettivi dell'intervento.

Nel recente passato il quadro fessurativo si è nuovamente modificato con nuove fessurazioni e riattivazione di alcune delle lesioni già rilevate nel 1983.

La situazione è apparsa particolarmente grave nell'angolo Sud Ovest della canonica, al punto che nell'autunno 2000 è stata dichiarata l'inagibilità del fabbricato.

4.3 Indagini geognostiche e monitoraggio

La campagna di indagini in sito si è articolata in 5 sondaggi stratigrafici (S1, S2, S3, S4, S5) e in 5 prove penetrometriche dinamiche leggere (P1, P2, P3, P4).

Nel foro dei sondaggi S1 e S3, sono stati installati tubi inclinometrici per il monitoraggio delle deformazioni del versante. Nel foro dei sondaggi S2, S3, S4 sono stati installati piezometri a tubo aperto. Sul fabbricato sono stati installati 9 fessurimetri.

L'indagine geognostica è avvenuta in due fasi.

Nell'autunno 1999 sono stati eseguiti i sondaggi S1, S2 e tutte le prove penetrometriche dinamiche.

Nel settembre 2000 sono stati eseguiti i sondaggi S3, S4 e S5.

4.4 Stratigrafia e caratterizzazione geotecnica

Sulla base dei dati raccolti nel corso dell'indagine geognostica, il profilo stratigrafico nell'immediato sottosuolo dell'area in esame è stato ricondotto al seguente schema.

· Livello A1 – Coperture argillose di versante

Argilla limosa e limo, da bruno nocciola a grigio, alterata, da plastica a molto plastica, da leggermente umida a umida, con detrito diffuso calcareo, calcarenitico e calcareo marnoso, eterometrico. Si osservano passaggi con materia organica e calcinazioni e blocchi rocciosi calcarei di dimensioni superiori al metro cubo.

· Livello A2 - Detrito di falda

Alternanze di detrito calcareo e calcarenitico grossolano in matrice limoso sabbiosa nocciola, talora scarsa, e sabbia nocciola con ghiaia e detrito. I clasti si presentano da sub angolosi a sub arrotondati.

Si riscontrano passaggi argillosi plastici ricchi di materia organica e blocchi rocciosi calcarei o calcarenitici di dimensioni superiori al metro cubo

· Livello B1 - Substrato - Formazione di San Marino

Calcere organogeno biancastro e grigio chiaro in banchi, diffusamente fratturato, passante lateralmente e verso l'alto a calcarenite grigio giallastra in strati spessi 50 - 150 cm. Si osservano porzioni estremamente fratturate

· Livello B2' - Substrato allentato - Argille Varicolori della Val Marecchia

Argilla ed argillite da grigia a policroma, intensamente tettonizzata con facies scaglie, consistente, leggermente plastica ed umida, con bande di alterazione e diffusi trovanti marnosi e calcareo marnosi

· Livello B2 - Substrato - Argille Varicolori della Val Marecchia

Argilla ed argillite da grigia e policroma, intensamente tettonizzata con facies scaglie, consistente, con diffusi trovanti marnosi e calcareo marnosi e passaggi marnosi disarticolati

Ognuna delle unità litostratigrafiche è stata caratterizzata geotecnicamente come riassunto nel seguito.

4.5 Risultati del monitoraggio

Nei tubi piezometrici è stata rilevata la presenza di una falda che durante il periodo di osservazione ha mostrato variazioni piuttosto contenute.

I due tubi inclinometrici sono stati installati in momenti diversi e non hanno evidenziato movimenti di versante netti, ne tantomeno superfici di scorrimento. I movimenti registrati dall'inclinometro S1 sono nell'ordine di 1 cm all'anno, e associabili ad una deformazione plastica e lenta del versante la cui direzione di spostamento coincide sommariamente con la massima pendenza.

L'inclinometro installato nel foro di sondaggio S3, in corrispondenza della zona del fabbricato in cui si sono evidenziati i dissesti maggiori, non ha evidenziato alcun tipo di movimento.

I fessurimetri posizionati sulle lesioni più gravi hanno evidenziato spostamenti fino a oltre 10 mm con predominanza delle componenti verticali.

4.6 Cause dei dissesti

Il quadro geologico, geomorfologico e idrogeologico in cui è inserito il complesso parrocchiale di Sant'Andrea è estremamente complesso, e nonostante l'accurata campagna di indagini geognostiche ed il monitoraggio geotecnico, sono rimasti alcuni interrogativi.

Il quadro fessurativo, l'evoluzione cinematica delle lesioni, le letture inclinometriche e piezometriche hanno comunque permesso di formulare ipotesi plausibili sulle possibili cause dei dissesti.

Il terreno su cui appoggiano le fondazioni, seppure marcato da disomogeneità è da considerarsi nel suo insieme come un materiale di tipo incoerente, è quindi

complessivamente dotato di una sufficiente capacità portante.

La strumentazione geotecnica di monitoraggio del versante non ha evidenziato deformazioni di entità tale da essere considerate tra le principali cause dei dissesti.

Le possibili cause sono quindi da ricercare in una variazione nelle condizioni idrologiche nel sottosuolo, che potrebbero aver determinato variazioni volumetriche tali da indurre i dissesti osservati.

Tabella 2. Parametri geotecnici

			Depositi superficiali		Substrato		
			Livello A1 Coperture argillose di versante	Livello A2 Detrito di falda	Livello B1 Formazione S. Marino	Livello B2'	Livello B2
			Argille varicolori				
Peso dell'unità di volume	γ	ton/m ³	1.9	1.8 ÷ 2.0	2.2 ÷ 2.4	2.0 ÷ 2.1	2.1
Coesione non drenata	Cu	ton/m ²	4.0 ÷ 10.0	/	/	15.0 ÷ 20.0	20.0 ÷ 25.0
Coesione efficace	C'	ton/m ²	0.0	0.0	4.0 ÷ 8.0	0.5 ÷ 0.75	0.75 ÷ 1.25
Angolo di resistenza al taglio	ϕ	°	16 ÷ 18	30 ÷ 35	38 ÷ 42	18 ÷ 20	20 ÷ 22
Angolo residuo di resistenza al taglio	ϕ_r	°	10 ÷ 12	/	/	10 ÷ 12	10 ÷ 12
Modulo di deformabilità drenato	E'	ton/m ²	80 ÷ 100	600 ÷ 800	/	180 ÷ 300	300 ÷ 400
Coefficiente di compressibilità	Mv	cm ² /Kg	0.010 ÷ 0.25	/	/	/	/
Densità relativa	Dr	%	/	25 ÷ 50	/	/	/
Resistenza alla compressione monoassiale	Rm	Kg/cm ²	/	/	200 ÷ 300	/	/
Tensione limite per attrito laterale	τ_{lim}	MPa	/	0.1 ÷ 0.15	3.0 ÷ 4.0	/	/
Grado di sovraconsolidazione	OCR		1.0 ÷ 2.0	1.0	/	4.0	>4.0

Sia un aumento dei flussi idrici, ovvero un innalzamento della falda freatica, sia una loro diminuzione, ovvero abbassamento, possono considerarsi come la causa principale dei dissesti.

Un aumento dei flussi idrici nei terreni di fondazione può aver provocato un progressivo cedimento, legato ad un dilavamento della matrice fine dai livelli detritici.

L'aumento dei vuoti può avere determinato un assestamento.

Una diminuzione della superficie piezometrica può aver causato l'essiccamento delle porzioni pelitiche, che di conseguenza diminuiscono il loro volume

Un ulteriore importante ruolo nel determinare assestamenti verticali del terreno, potrebbe essere svolto dall'erosione chimica (carsismo) dei clasti detritici. Questo tipo di fenomeni, infatti, si può sviluppare in presenza di abbondanti flussi idrici e di litologie carbonatiche.

In ogni caso i dissesti sono da correlare principalmente a variazioni volumetriche indotte nei terreni da mutamenti nella circolazione idrica sotterranea, mentre non si sono evidenziate deformazioni del versante tali da giustificare le lesioni osservate.

A tutto ciò va ovviamente aggiunta la vulnerabilità delle fondazioni esistenti, discontinue, poco approfondite, e realizzate con malte e materiali ormai degradati.

4.7 Descrizione dell'intervento e risultato finale

Anche in questo caso la complessità strutturale del fabbricato da consolidare è stata una delle difficoltà

maggiori, unitamente all'articolato quadro litostratigrafico. Gli spazi di manovra sono risultati però più ampi.

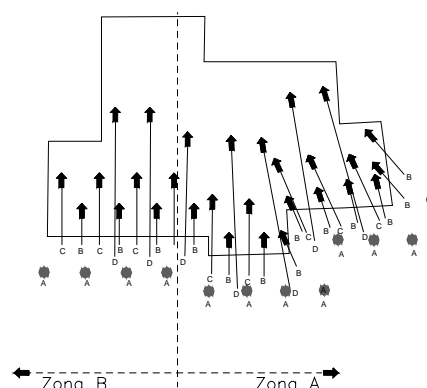


Figura 4. Pianta Perforazioni

Si sono installate 39 canne valvolate disposte in quattro batterie (A, B, C e D) con inclinazione decrescente.

La batteria A è composta da 12 canne con lunghezza pari a 10 mt. inclinate di 87° rispetto all'orizzontale.

La batteria B è composta da 11 canne lunghe 10 mt. ed inclinate di 72°.

La batteria C è costituita da 10 canne lunghe 12 mt. ed inclinate di 60°.

La batteria D è formata da 5 canne lunghe 16 mt. ed una canna lunga 14 mt. inclinate da 19° a 40°.

Tutte le serie sono disposte in modo da convergere verso il centro del fabbricato.

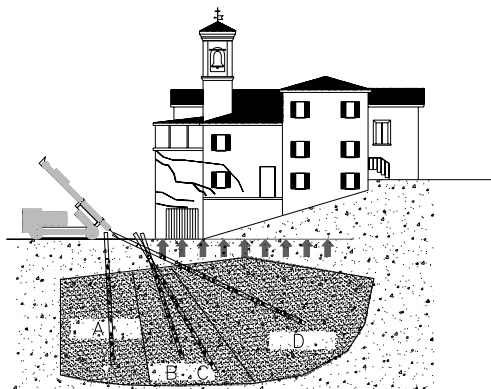


Figura 5. Sezione Perforazioni

Le iniezioni sono state eseguite in 4 cicli lungo un periodo di 29 giorni durante i quali sono stati iniettati un totale di 48.501 [l] di miscela.

Il consolidamento ha interessato il terreno di fondazione per una profondità di 7 – 9 metri, su una superficie di poco superiore alla metà dell'impronta del fabbricato arrivando ad un totale di ca. 7.000 [m³] di terreno trattato.

Questo rende un indice di efficienza pari a:

$$\eta = \frac{48.501}{7.000} = 6,9 \left[l / m^3 \right] \cong 0,7\% \quad (2)$$

Il che equivale a dire ca. 7 [l] di miscela iniettata per [m³] di terreno trattato.

Anche in questo caso si è potuto constatare il sollevamento complessivo del corpo di fabbrica che è risultato compreso tra i 5 ed i 60 mm sui 10 punti di rilevamento scelti.

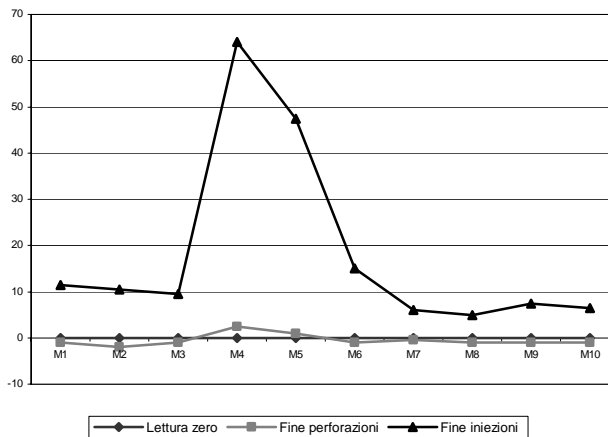


Figura 6. Diagramma andamento movimenti

La parte maggiormente danneggiata è stata demolita e ricostruita poiché le fessurazioni avevano raggiunto ampiezze tali da disarticolare la muratura.

Anche in questo caso si è protratto il monitoraggio per ca. 10 mesi dopo la fine delle lavorazioni durante i quali i rilievi hanno mostrato un andamento analogo a quello precedentemente analizzato con una stabilizzazione dei movimenti occorsa ca. 1 mese dopo il termine delle iniezioni.

5 CONCLUSIONI

L'applicazione del metodo di consolidamento descritto ha ottenuto risultati molto positivi ed incoraggianti. I due casi illustrati rappresentano due situazioni molto diverse in cui si richiedeva il consolidamento di complessi architettonici di pregio.

Nell'antico Frantoio Belluzzi le difficoltà principali sono state di tipo logistico ed esecutivo mentre il quadro geologico si presentava piuttosto semplice.

Il complesso parrocchiale di Sant'Andrea al contrario offriva un buon agiamento alle attrezzature, in un contesto geologico molto complicato.

In sintesi, il sistema di iniezioni tipo Soilfrac offre numerosi vantaggi, primi fra tutti la notevole gamma di applicabilità in diverse situazioni litostratigrafiche e la possibilità di intervenire dall'esterno degli edifici senza interessare in maniera diretta le fondazioni esistenti.

D'altro canto sono richieste attrezzature specifiche, manodopera molto specializzata ed un costante monitoraggio.

ABSTRACT

This article is dealing with the soil capacity improvement through a method of low pressure injection causing a so called soil fracturing.

The soil fracturing was invented in the '60 in the oil drilling industry to create deep fracs in order to make the flow of the oil to the well easier.

In the '70 the developments of this method brought to some interesting geotechnical applications.

The goal of the injections made under buildings interested by differential settings is to recreate a contact between foundations and soil to improve the soil capacity underneath the existing foundations and to lift the building where needed.

The advantages of the method especially when dealing with historical buildings located in urban area and in limited space conditions are various.

It is possible with this deep injections method to act directly on soil without caring of the conditions and shape of the existing foundations.

It is possible to improve the quality of the soil all over the building area and the deepness which can be achieved is basically unlimited.

The article describes the applications of the method to the Acqaviva Church and to the Belluzzi oil mill where the injection of cement mix made in several series through valved steel pipes made possible to eliminate the differential settings occurred in the last few years.

The monitoring of the buildings which have been made in the last 10 months and still continue show that in both cases the buildings are stable.

