

Iniezioni di miglioramento sotto gli edifici storici: cinque casi reali come esemplificazione di una tecnica

V. Berengo

PhD presso l'Università di Padova

ABSTRACT: l'approccio di progettazione geotecnica per interventi in siti storici o su monumenti di pregio è fortemente influenzato dall'invasività della tecnica scelta. Gli interventi di miglioramento del terreno tramite iniezione di resine espandenti permettono di compattare il terreno e di riempire i vuoti sotto le fondazioni in modo non invasivo. In questo articolo sono illustrate le diverse possibilità offerte da questa tecnica attraverso la descrizione di cinque casi reali realizzati in tutt'Europa. In particolare, per ognuno di essi verranno sottolineati gli aspetti peculiari che lo caratterizzano, allo scopo di declinare tutte le fasi del progetto d'intervento e dell'intervento stesso, associandovi un esempio tipico. In termini di progettazione si possono usare diverse filosofie, dall'approccio statistico fino all'analisi numerica tridimensionale. Vista l'importanza storica degli edifici, si rende poi necessario il monitoraggio continuo dei siti d'intervento, così come l'esecuzione di prove comparative sul terreno per valutare l'efficacia del trattamento d'iniezione.

1 INIEZIONI DI MIGLIORAMENTO APPLICATE AL RESTAURO DI EDIFICI STORICI

1.1 *Introduzione*

Spesso la pratica ingegneristica porta l'ingegnere a confrontarsi con il restauro di edifici storici affetti da fessurazioni che evolvono lungo la vita utile dell'edificio stesso.

La comparsa e l'evoluzione del quadro fessurativo sono in generale dovute all'insorgenza di cedimenti differenziali. Questi, a loro volta, sono provocati da modifiche sull'edificio, come ampliamenti, o ad una variazione nella distribuzione dei carichi, o del livello di falda, oppure anche delle proprietà indice del terreno a livello chimico.

Indipendentemente dalla causa del cedimento, due sono le possibili soluzioni: il rinforzo del sistema fondale o, in alternativa, il miglioramento del terreno di fondazione tramite tecniche non invasive in grado di garantire il minor impatto possibile, specie in presenza di edifici storici. L'iniezione di resine poliuretatiche può essere efficacemente utilizzata a questo scopo dal momento che è in grado di migliorare il terreno fondale senza provocare vibrazioni che disturbino gli edifici sovrastanti.

1.2 *La tecnologia Uretek Deep Injections®*

La Uretek Deep Injections® è una tecnologia ben nota che consiste nell'esecuzione, nel terreno di fondazione dell'edificio fessurato, di iniezioni della

resina ad alta pressione di espansione Geoplus® il cui scopo è quello di indurre un netto miglioramento nelle proprietà geo-meccaniche del terreno; le proprietà della resina Geoplus® sono dettagliatamente descritte in Favaretti et al. 2004.

Le fasi operative di iniezione, descritte nel seguito, non necessitano di scavi invasivi né di sistemi di connessione tra le strutture di fondazione ed è perciò una tecnica particolarmente adatta per intervenire sugli edifici di pregio storico.

Piccole quantità di materiale espansivo vengono iniettate con precisione sotto il livello delle fondazioni in quegli elementi di volume in cui lo stato tensionale raggiunge i suoi valori di picco; dopo l'iniezione, la resina inizia immediatamente ad espandere e l'elevata pressione di espansione che sviluppa garantisce un'adeguata compattazione del terreno. Il processo porta quindi alla compattazione del terreno circostante, e poi, in presenza di sovrastrutture in superficie non troppo pesanti, anche ad un sollevamento.

Il meccanismo di espansione può essere studiato teoricamente come una cavità sferica (o cilindrica, se lungo l'asse d'intervento le iniezioni sono molto vicine l'una all'altra) che espande in condizioni quasi-statiche. Il terreno può essere modellato con una legge costitutiva di tipo lineare elastico – perfettamente plastico con un criterio di rottura alla Mohr – Coulomb, e può essere considerato soggetto inizialmente ad uno stato di tensione isotropo.

Durante la prima parte del processo di espansione, quando la pressione interna della cavità

aumenta, il terreno mostra comportamento elastico; dopo aver raggiunto uno specifico valore, iniziano a manifestarsi deformazioni plastiche, fino al raggiungimento di una pressione limite (σ_{lim}), raggiunta la quale si assume che la resina solidifichi (Dei Svaldi et al. 2005).

Il modello analitico del processo di espansione, insieme alla legge di espansione della resina, sono stati ricavati da studi di laboratorio e utilizzati per sviluppare un software, Uretex S.I.M.S. 1.0, in grado di predire un indice di miglioramento del terreno trattato con la resina Geoplus®.

Il software Uretex S.I.M.S. 1.0 computerizza il modello teorico: durante la prima fase di iniezione, grazie all'espansione del materiale iniettato, i vuoti tra le particelle vengono riempiti, il terreno risulta compattato e la sua rigidità aumenta. In condizioni di terreno normalconsolidato, questo comporta l'incremento dello stato tensionale orizzontale fino a valori comparabili con quelli della tensione verticale, nell'intorno del punto di iniezione. Quando viene raggiunto uno stato tensionale isotropo, la pressione di espansione si sviluppa anche in direzione verticale, inducendo un sollevamento della superficie (Schweiger et al. 2004). L'isotropia dell'aumento di volume è chiaramente una semplificazione, dal momento che la pressione di espansione, in condizioni di terreno omogeneo, si sviluppa prima sui piani tensionali di minor valore.

La qualità delle previsioni offerte dal modello analitico è stata verificata in sito attraverso diversi casi reali: l'affidabilità delle previsioni teoriche è risultata aumentare all'aumentare della qualità delle indagini geotecniche.

Il software Uretex S.I.M.S. 1.0, comunque, mette i progettisti in grado di ottenere rapidamente i parametri del terreno necessari per l'esecuzione di un'analisi FEM, con cui modellare l'intero intervento.

1.3 Le fasi del processo di restauro

L'intero processo di progettazione dell'intervento di restauro sull'esistente è fatto di diverse fasi che permettono di eseguire al meglio la tecnica di intervento. Innanzitutto è necessario conoscere le condizioni in sito tramite delle indagini preliminari: è necessario tracciare la stratigrafia del terreno associandovi i parametri fisici e geomeccanici ottenibili da indagini geotecniche (prove CPTU e MAIW), così come si rende necessario conoscere adeguatamente la geometria del sistema fondale. Solo a questo punto il processo di iniezione può essere studiato attraverso il modello analitico sopra descritto e/o tramite l'analisi numerica, allo scopo di comprendere come effettuarlo al meglio. Durante il processo di iniezione la procedura viene monitorata da ricevitori elettrici ancorati all'edificio allo scopo

di misurare i cedimenti verticali. Contemporaneamente, come anche ad intervento concluso, un sistema di monitoraggio (Easy Crack Monitor®) viene messo in funzione per garantire il controllo automatico degli spostamenti relativi tra i lembi delle fessure esistenti per assicurarsi che non si aprano ulteriormente ma che si siano effettivamente stabilizzate.

Ad intervento eseguito si rende necessario investigare di nuovo il terreno per accertarsi dell'avvenuto miglioramento in termini di resistenza: prove CPTU e prove pressiometriche vengono effettuate al termine del processo di iniezione per confrontarne il risultato con quelle effettuate precedentemente. Di seguito ciascuna di queste fasi verrà presentata attraverso uno specifico caso reale in cui la tecnologia Uretex® è stata applicata.

2 INDAGINI PRELIMINARI E POST-INTERVENTO

2.1 *Palatium Vetus ad Alessandria*

Nel caso del restauro di Palatium Vetus ad Alessandria si è reso necessario comprendere con precisione la geometria del sistema fondale dell'edificio per stimare lo stato tensionale indotto sul terreno ed è stato altresì di fondamentale importanza conoscere le proprietà geomeccaniche del terreno stesso per pianificare il processo di iniezione al meglio.



Figura 1. Palatium Vetus ad Alessandria

Palatium Vetus (Figura 1) è infatti il più antico edificio della città: fu costruito nel 1170 nel cuore dell'abitato ed è stato ristrutturato ed ampliato così tante volte che lo stato tensionale sotto le fondazioni è certamente variato rispetto al suo assetto originario. La configurazione finale è formata da un corpo unico a due livelli poggiante su fondazioni di diverso tipo. Per indagarne la tipologia si sono condotte una serie di perforazioni utilizzando una perforatrice manuale (massima energia per: 12-14 Joule, frequenza: 1200-2800 colpi al minuto), in grado di produrre fori di 26 mm di diametro (Figura 2). Le perforazioni sono state fatte lungo i muri perimetrali per identificare la profondità della base delle fondazioni, ma anche a distanza crescente dal

muro per evidenziare l'eventuale presenza di allargamenti o di travi di connessione tra i plinti.

Sono state indagate nel complesso quattordici aree tutt'intorno all'edificio (Figura 2): si è così scoperto che i muri sono in laterizio senza discontinuità e che il livello delle fondazioni varia da 0.5 m a 3.2 m di profondità; sotto di esse giace uno strato di 10-15 cm di frammenti lapidei.

Si è stimato un incremento di carico trasmesso al terreno dovuto agli interventi di restauro che, in alcune zone, ha raggiunto anche il 50% del carico originario (la media è di circa il 18-20%), cosicché lo stato tensionale che ne deriva varia all'incirca da 0.35 MPa a 1.19 MPa, in funzione della tipologia di fondazioni.

Per valutare la capacità portante del terreno è stata condotta una campagna geognostica completa: due prove penetrometriche, un sondaggio con prove SPT unito ad indagini di laboratorio (prove edometriche e di taglio) sui campioni prelevati. La stratigrafia è risultata composta da uno strato di riporto superficiale dello spessore variabile da 1.5 m ai 2.4 m

dell'edificio, si è ritenuto parimenti importante non interferire con le murature esistenti e pertanto la tecnologia Uretex[®] è stata ritenuta particolarmente adatta.

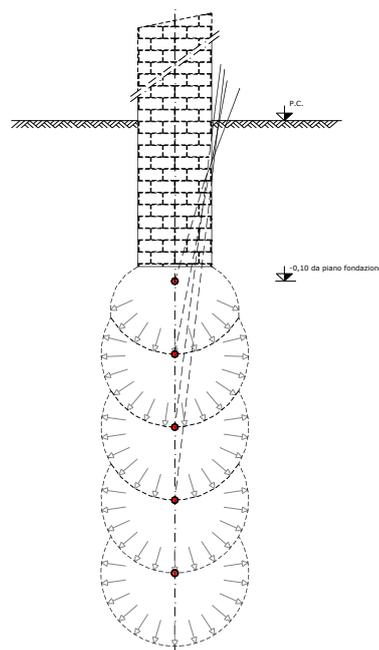


Figura 3. Il procedimento di iniezione

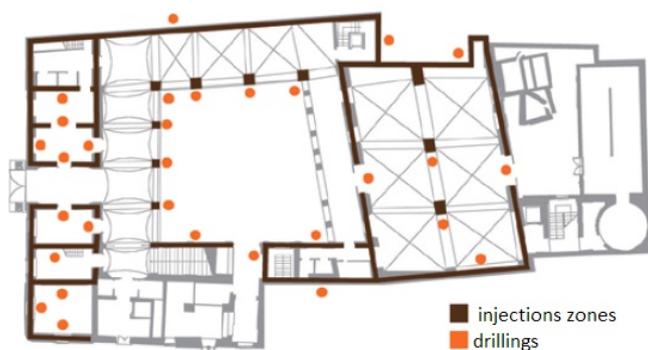


Figure 1. Sopra: Indagine delle fondazioni a Palatium Vetus. Sotto: mappa dei sondaggi conoscitivi e delle iniezioni

Segue uno strato argilloso di 3.0 m di spessore quindi 1.0 m di sabbia e limo. Sotto agli strati meno resistenti si trova uno strato di maggior rigidità dello spessore di 10 m costituito da sabbia e ghiaia.

Dal momento che però gli strati superficiali hanno una capacità portante relativamente scarsa si è deciso di intervenire stabilizzando il terreno attraverso l'applicazione della tecnologia Uretex Deep Injections[®].

Lo scopo è stato quello di incrementare le proprietà meccaniche del terreno fondale in modo da renderlo in grado di sopportare il carico trasmesso dalle fondazioni. Considerato il valore storico

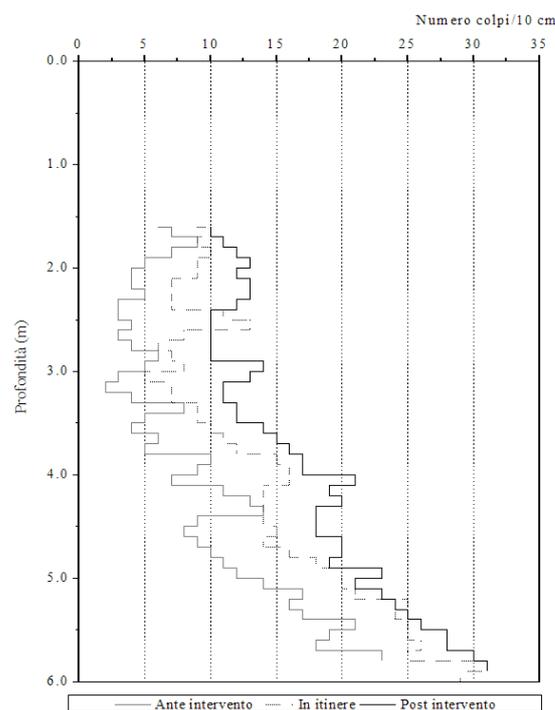


Figura 4. Prove penetrometriche prima e dopo l'intervento di iniezione a Palatium Vetus

Il progetto di intervento è stato fatto utilizzando il software Uretex S.I.M.S. 1.0 precedentemente descritto (per dettagli ulteriori al lettore si segnala l'articolo di Pasquetto et al., 2011). Le iniezioni sono state effettuate con una perforatrice manuale, identica a quella utilizzata per investigare le fondazioni, a cinque diverse profondità, comprese tra la base delle fondazioni e i 3.5 m sottostanti, ad

interasse di 0.6 m, attraversando la fondazione stessa come descritto in Figura 3. Con questa procedura si garantisce lo sviluppo di vibrazioni molto basse. Per verificare l'incremento della resistenza del terreno quattordici prove penetrometriche comparative sono state portate a termine nella zona d'intervento, secondo la normativa vigente italiana (NTC 2008): in Figura 4 si mostra come l'incremento dei valori delle proprietà meccaniche sia stato di oltre il 40% nei punti critici, anche se bisogna considerare che il test ha un puro valore comparativo e non assoluto. La campagna preliminare (geotecnica e per l'identificazione delle geometrie) assume quindi un ruolo chiave: oltre che permettere una corretta progettazione dell'intervento, consente infatti di comparare le proprietà del terreno prima e dopo le iniezioni.

3 ANALISI NUMERICA

3.1 La torre di Città di Castello

Il caso della torre di Città di Castello è emblematico nel mostrare come l'analisi numerica 3D possa essere decisiva nel pianificare l'intervento durante la sua stessa esecuzione.

La torre, risalente al XIII secolo, è una struttura snella di forma parallelepipedica (base: 6.10 m x 6.8 m, altezza massima: 39.8 m) che pende nella direzione della piazza principale su cui si affaccia, ed anche verso la via contigua: come la vediamo oggi è il risultato di diversi collassi e successive ricostruzioni avvenuti nel corso della sua storia.

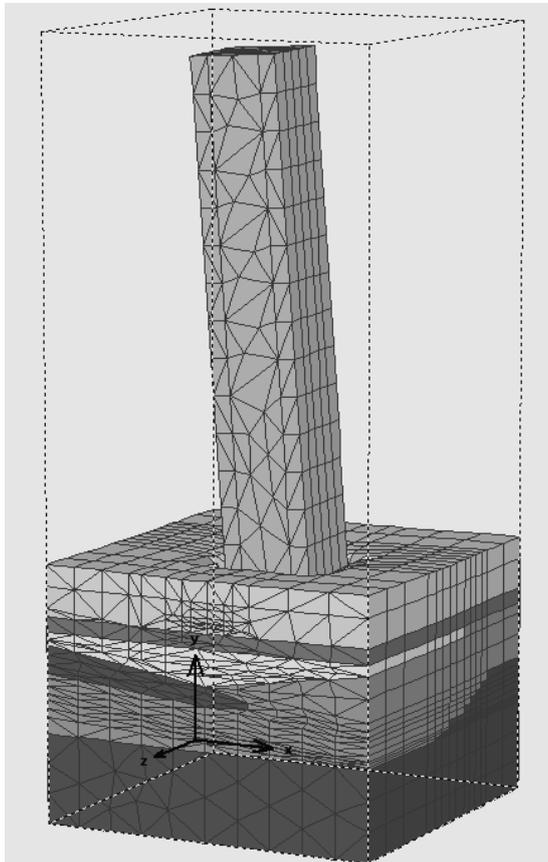


Figura 5. Mesh della torre di Città di Castello per analisi FEM

SOIL TYPE	PARAMETER					
	γ_{sat}	E	c'	ϕ	ψ	Constitutive law
	kN/m^3	kPa	kPa	$^\circ$	$^\circ$	
Replenishment (Silty Clay)	19.5	6250	31	23	-	Mohr-Coulomb
Replenishment (Sandy Silt)	20.0	4000	30	28	-1	Mohr-Coulomb
Replenishment (Sand)	18.5	3000	0	32	-	Mohr-Coulomb
Sandy Silt	20.0	8000	18	30	-3	Mohr-Coulomb
Silty Sand	20.0	9000	18	30	-2	Mohr-Coulomb
Clay and Clayey Silt	21.2	13000	10	27	-	Mohr-Coulomb

Tabella 1. Stratigrafia del terreno e relative proprietà geotecniche a Città di Castello per la modellazione FEM

In particolare, a seguito del terremoto del marzo del 2007, si è aperta una fessura di 4 cm nel giunto sismico tra la torre e il Palazzo del Vescovo, dovuta ad un cedimento differenziale; quest'ultimo ha anche fortemente peggiorato la pendenza della torre, che è passata a sporgere verso la piazza di 78 cm, contro i 72 cm precedenti.

Per modellare correttamente l'attuale configurazione della torre e avere una previsione affidabile degli esiti di un possibile intervento di stabilizzazione, è stata condotta un'analisi numerica tridimensionale usando il software commerciale Plaxis 3D Tunnel.

La stratigrafia del terreno di fondazione, con relative proprietà geomeccaniche, è stata tracciata sulla base di quattro sondaggi, una prospezione radar e diverse prove di laboratorio sui campioni prelevati.

Sotto uno strato di riporto disomogeneo dello spessore variabile tra 1.5 m e 5.7 m, è stata rinvenuta un'alternanza di sabbie limose e limi sabbiosi seguita da uno strato sottostante di argilla e limi argillosi ad una profondità variabile tra i 10.0 m e i 13.0 m. I parametri di ciascuno strato sono riassunti in Tabella 1 mentre il valore di OCR si può considerare leggermente maggiore dell'unità.

La torre è stata modellata come dato iniziale in posizione verticale, quindi sono state simulate le fasi costruttive fino a raggiungere la configurazione finale (Figura 5).

Una prima analisi ha rivelato come, ad essere responsabile della rotazione della torre sia, oltre alla stratigrafia relativamente complessa caratterizzata dalla presenza di lenti di materiale sovraconsolidato in strati maggiormente deformabili, il posizionamento delle fondazioni a diversi livelli (più superficiali verso la piazza $-x < 0$ - e verso la viuzza contigua $-z > 0$ -).

L'errore tra la pendenza ottenuta numericamente riproducendo le fasi costruttive e quella misurata in sito, è risultato essere inferiore del 4%, risultato ritenuto accettabile.

In corrispondenza delle fondazioni con quota d'imposta più superficiale è presente uno strato maggiore di terreno deformabile, cosa che ha condotto all'instaurarsi di un cedimento differenziale e alla conseguente rotazione della torre, che pende proprio in direzione delle fondazioni più superficiali, disamina che è stata confermata attraverso la modellazione numerica FEM (Figura 5).

In corrispondenza dell'interfaccia terreno-fondazione dal lato della piazza, lo stato tensionale raggiunge i suoi valori massimi (attorno ai 700 kPa) esattamente in corrispondenza del cedimento maggiore, come mostrato in Figura 6 (sopra). In particolare, le tensioni esercitate eguagliano i valori della resistenza limite, ossia il terreno ha raggiunto una condizione di equilibrio plastico (mobilitazione piena della capacità portante): questa è la diretta conseguenza della redistribuzione tensionale dovuta all'eccentricità del carico trasmesso dalla torre inclinata.

In Figura 6 (sotto) appare evidente il duplice meccanismo di rottura mobilitato: quello superficiale, giusto sotto la quota d'imposta delle fondazioni, è un tipico meccanismo di rottura per punzonamento e si limita ai primi strati limo-sabbiosi, mentre il meccanismo di rottura profondo dipende dallo stato tensionale trasmesso agli strati più profondi. I due effetti sono certamente correlati, dipendendo il secondo dal primo.

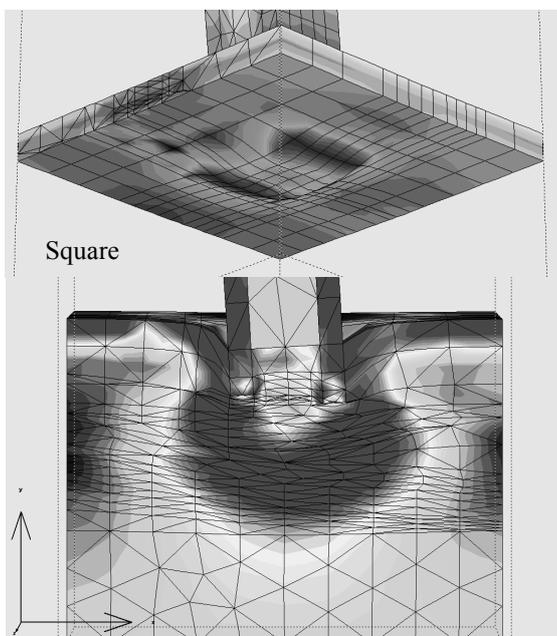


Figura 6. Distribuzione dello stato tensionale tagliante prima delle iniezioni: vista 3D (sopra), sezione trasversale (sotto)

Le iniezioni sono state modellate come un'espansione volumetrica degli elementi solidi, forzando il valore di deformazione volumetrica degli elementi secondo l'aumento di volume calcolato con il software Uretex S.I.M.S. 1.0. Nel far ciò è stato possibile determinare con accuratezza le quantità di resina da iniettare, considerando, infatti, che il tempo di reazione del materiale iniettato è sufficientemente veloce da impedire alla resina di fluire nel terreno: questa si mantiene invece nelle vicinanze del punto di iniezione. E' stata effettuata un'analisi tenso-deformativa per ogni fase di iniezione prevista, simulando l'iniezione di materiale come un'espansione dell'elemento di

volume situato esattamente in corrispondenza del punto di iniezione

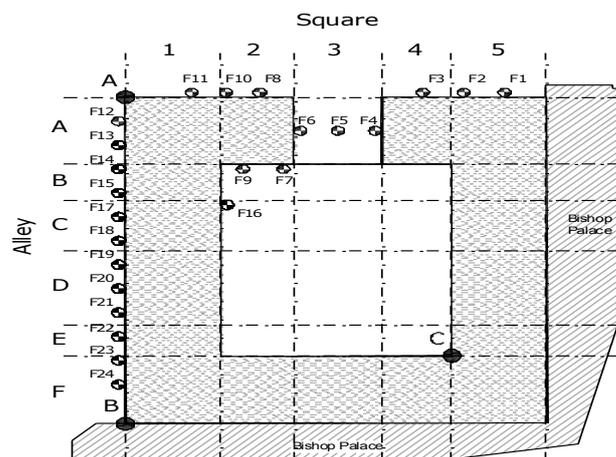


Figure 7. Distribuzione dei punti di iniezione e ponti di monitoraggio

(secondo le coordinate x, y e z). L'incremento di rigidità del terreno trattato e di quello circostante è stato valutato a partire dall'output del software Uretex S.I.M.S. 1.0.

Sulla base delle indicazioni dell'analisi numerica è stato redatto il progetto esecutivo d'intervento con le iniezioni situate come mostrato in Figura 7. Il progetto e la dislocazione del sistema d'iniezioni sono stati volta per volta aggiustati in tempo reale, in funzione della reazione mostrata dalla torre alle iniezioni precedenti e in funzione dei risultati predittivi del modello numerico.

In quattordici giorni di lavoro sono stati iniettati 2475.5 kg di resina: la quantità di materiale utilizzato non è stata costante ogni giorno, ma è dipesa dal monitoraggio in tempo reale degli esiti e dalla modellazione numerica. In Figura 8, che rappresenta i risultati dell'analisi FEM in termini di tensione tagliante relativa (ossia il rapporto tra le tensioni di taglio esistenti e quelle resistenti calcolate con il criterio di rottura di Mohr Coulomb), appare chiaramente come le iniezioni riducano fortemente lo stato tensionale nel volume di terreno trattato.

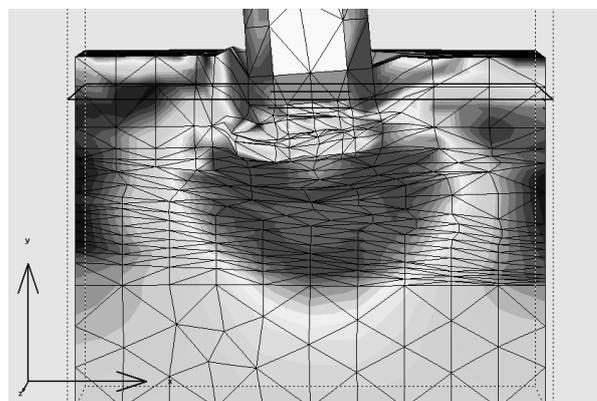


Figure 8. Distribuzione dello stato tensionale tagliante dopo le iniezioni

Durante tutto il processo di iniezione, e anche oltre, è stato fatto operare un sistema di monitoraggio elettronico: la curva tempo/cedimenti di Figura 9 mostra quanto lievi siano le differenze tra i cedimenti calcolati e quelli realmente occorsi dopo ogni fase di iniezione (A e B rappresentano le condizioni di piena espansione e di espansione nulla in due punti di controllo). Il risultato conferma l'attendibilità del modello numerico nel riprodurre il processo di iniezione della resina. D'altro canto da Figura 10 si evince come la velocità di cedimento misurato decresca rapidamente nel tempo dopo l'intervento di stabilizzazione.

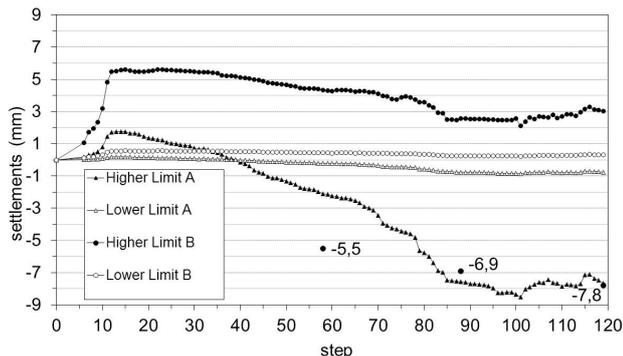


Figura 9. Curve tempo-cedimento calcolate e le misure reali per la torre di Città di Castello

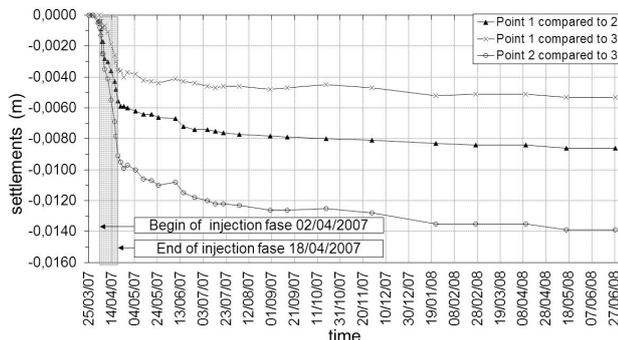


Figura 10. Cedimenti misurati nel tempo nei punti di controllo

4 FASI DI INTERVENTO

4.1 La "Punta della Dogana" a Venezia

Il caso di "Punta della Dogana" a Venezia è esemplificativo di come talvolta l'intervento debba essere necessariamente schedato in fasi. Ciò può essere dovuto a condizioni al contorno particolari che talvolta possono persino indurre modifiche al progetto in corso d'opera.

La "Punta della Dogana" è il luogo a Venezia storicamente deputato al commercio. L'edificio di forma trapezoidale fu costruito nel 1677 sulle basi del progetto dell'architetto Giuseppe Benoni (Figura 11).

Il corpo principale ha una larghezza variabile da 16 m a 75 m e i solai poggiano su dieci muri in mattoni, paralleli l'uno all'altro, come descritto in Figura 11. Le fondazioni sono costituite da muri in

laterizio e giacciono su quattro diversi substrati a seconda della posizione: direttamente sul terreno, su una piattaforma rigida a sua volta poggiata a terra oppure su pali lignei, o ancora sulle fondazioni di una torre esistente.

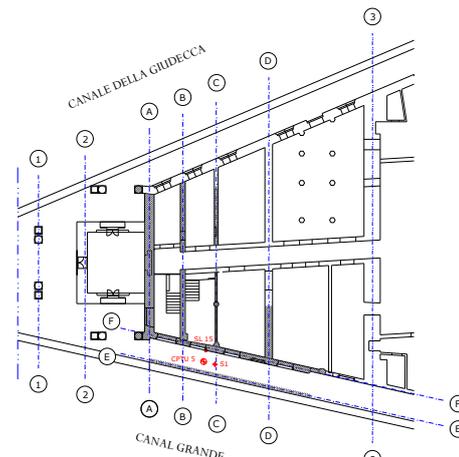


Figura 11. Punta della Dogana: mappa (sopra), vista (sotto)

L'imposta del sistema fondale varia da 0.69 m a 2.84 m di profondità.

Nel maggio 2003, durante il rifacimento delle rive del "Canal Grande" (il canale principale della città) per mezzo di micropali, si verificarono cedimenti della riva a ridosso di "Punta della Dogana" e dell'edificio stesso. Questi causarono la riapertura di vecchie fessurazioni e l'insorgere di nuove ad opera di tre meccanismi: cedimenti differenziali verticali, allungamenti lungo la direzione dei muri interni e di spina e rotazione delle facciate, specialmente quella sul "Canal Grande". A quel tempo gli spostamenti delle rive erano già monitorati, e il monitoraggio è stato fatto proseguire anche dopo l'episodio evidenziando un deciso trend di cedimento: assumendo pari a zero la misura del 31.07.2002, la curva cedimento-tempo riportata in Figura 12 mostra un deciso aumento dei cedimenti tra il 30 aprile e il 15 maggio per tutti i caposaldi, specialmente quello denominato SL15 in corrispondenza del "Canal Grande", che è continuato a cedere anche l'anno successivo, mentre gli altri si sono fermati.

La ragione fu individuata nel fenomeno idraulico del sollevamento: lungo le rive infatti il profilo stratigrafico è costituito da una sequenza di strati coesivi seguiti da quelli granulari a partire da -6.3 m sul livello del mare. Poiché il recupero delle rive ha richiesto di confinare la parte di canale antistante

l'edificio con palancolate di tipo Larssen per poi estrarvi l'acqua e quindi scavare fino a raggiungere la base della riva, la pressione dell'acqua nello strato sabbioso, più profondo della palancola, è rimasta indisturbata, mentre la sovrappressione di filtrazione si è concentrata negli strati argillosi superiori riducendo lo stato tensionale efficace alla base della riva e causando così la perdita di equilibrio e il successivo collasso della struttura.

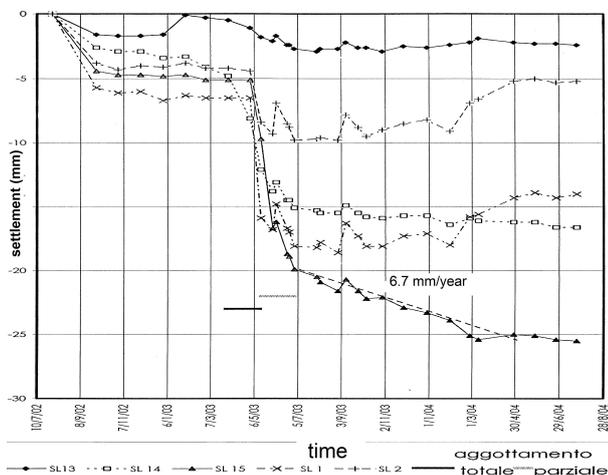


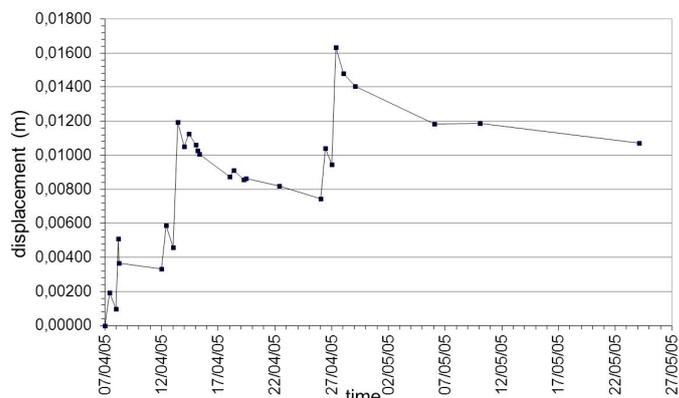
Figura 12. Curve tempo- cedimento in corrispondenza dei diversi caposaldi

Il restauro dell'edificio ha previsto una serie di interventi per arrestare i cedimenti e, qualora questi fossero stimati come eccessivi, per riportare la quota d'imposta dei punti critici al livello precedente. Dal momento che i cedimenti sono stati causati da variazioni nello stato tensionale efficace del terreno di fondazione, la tecnologia Uretex Deep Injections® è stata ritenuta la più adatta allo scopo. E' infatti flessibile a sufficienza per poter subire modifiche in corso d'opera in funzione della risposta del terreno ed inoltre le iniezioni di resina possono indurre il rigonfiamento con relativa facilità.

Le iniezioni sono state effettuate in tre fasi temporali distinte per permettere alla sovrappressione interstiziale di dissipare. Al contempo, il disturbo indotto dall'incremento di pressione dei pori venne limitato diminuendo le quantità di resina iniettata e programmando la sequenza di iniezione di modo che lo stesso volume di terreno venisse interessato dal processo di iniezione una e una volta soltanto. La prima fase ha avuto luogo nel novembre del 2004: le iniezioni sono state realizzate a partire dalla base delle fondazioni fino a 8.5 m sotto il livello medio del mare in corrispondenza della facciata, e fino a -5.0 m sul lato opposto. Insieme alle iniezioni puntuali sono state effettuate anche delle iniezioni colonnari lungo la riva per creare una sorta di struttura di contenimento per le iniezioni successive. La seconda e la terza fase furono invece portate a termine l'anno seguente e furono meno invasive: i dettagli si trovano Gabassi et al. (2011).

La risposta della struttura è stata monitorata due volte al giorno dalla fine della prima fase nei punti di iniezione, ed ogni quindici giorni tra una fase di iniezione e l'altra.

Figura 13. Curva tempo-cedimento rilevata per il punto di controllo 17



controllo 17

Quel che si è osservato è stato l'aumento temporaneo dell'acqua in pressione nei tubi di iniezione, come conseguenza dell'espansione della resina, specialmente durante la prima fase. L'incremento di pressione interstiziale e la seguente dissipazione hanno provocato l'insorgere di cedimenti, ma nelle fasi successive il fenomeno è diminuito fino a che il trend non si è addirittura invertito, mostrando un recupero del cedimento occorso.

In Figura 13 la curva dei cedimenti nel tempo del punto di controllo "17", posto a ridosso del caposaldo SL15 dal lato del "Canal Grande", mostra il recupero per ciascuna fase d'intervento.

5 INTERVENTI DI RIPRISTINO DELLE STRUTTURE

5.1 La cappella di Saint Nicodème in Francia



Figura 14. Chapelle Saint Nicodème in Francia

Ci sono dei casi in cui il consolidamento del terreno deve essere necessariamente affiancato dal restauro delle strutture perché queste sono state seriamente

danneggiate: è il caso della cappella di Saint Nicodème in Francia (Figura 14).

Si trova nel Cantone del Baud in Bretagna e le sue origini risalgono al Rinascimento francese: fu infatti costruita tra il 1520 ed il 1539 dall'architetto J. Le Layec.



Figura 15. La torre pendente della cappella Saint Nicodème

Dal punto di vista architettonico la cappella appartiene ad un periodo di transizione stilistica, poiché la forma è ispirata alle architetture medievali mentre le decorazioni si avvicinano al repertorio rinascimentale. La struttura è a croce latina: la navata è lunga 31 m e larga 7 m, la torre principale raggiunge un'altezza di 50 m ed ha base rettangolare (di lati 11 m e 20 m, rispettivamente)

Nel 1914 fu rilevata la presenza di fessurazioni dovute a problemi alle fondazioni della torre; nel 1926 un'indagine geognostica rivelò che il sottosuolo era costituito prevalentemente da scisti sciolti e sensibili all'umidità: questa è la ragione più probabile dell'instabilità della torre.

Tra il 1927 ed il 1930 venne iniettato del calcestruzzo nel sottosuolo per consolidarlo, ma, in ogni caso, proprio nel 1927, si osservò che la torre pendeva verso sud (Figura 15). Nell'ultima indagine, di recente esecuzione, è poi venuta alla luce la presenza di uno stato fessurativo dovuto all'infiltrazione di vapor d'acqua e ad una scorretta canalizzazione delle acque.

Per far fronte alla criticità della situazione del complesso, vennero programmati due tipi di intervento: il consolidamento del terreno e il restauro delle murature, entrambi a mezzo di iniezioni. Il consolidamento si sarebbe effettuato con la tecnologia Uretex Deep Injections® precedentemente descritta, mentre la stabilizzazione delle murature sarebbe stata fatta con una seconda tecnologia

chiamata Uretex Walls Restoring® che consiste in iniezioni il cui scopo è quello di riempire con un legante i vuoti nei giunti tra i mattoni. Più precisamente la tecnica consiste nel perforare la muratura danneggiata, inserirvi i tubi di iniezione ed iniettare all'interno la resina IDRO CP 200 che si espande riempiendo le cavità presenti. Le proprietà meccaniche della resina una volta solidificata sono abbastanza simili a quelle della malta: quando viene iniettata è allo stato liquido ma la solidificazione avviene in soli 60 secondi, insieme all'espansione e al raggiungimento della consistenza definitiva.

L'intervento sulla cappella è stato effettuato in due fasi: in aprile e in maggio del 2009, quindi in ottobre dello stesso anno. All'inizio e alla fine sono state eseguite delle prove pressiometriche per confrontare i valori di resistenza del terreno prima e dopo l'intervento e valutare la performance del trattamento. I risultati sono riportati in Tabella 2 e mostrano un incremento significativo del modulo elastico e dell'indice di plasticità del terreno

Before (2003)	After (2009)
17.8<E<88.2 MPa	21.8<E<136 MPa
1.96<PI<4.01 MPa	2.96<PI<5.94 MPa

Tabella 2. Valori pressiometrici prima e dopo l'intervento alla cappella di Saint Nicodème

6 MONITORAGGIO A LUNGO TERMINE

6.1 Edificio del XIX secolo a Ginevra

Il caso di seguito riportato evidenzia l'importanza del continuo monitoraggio dell'evoluzione nel tempo dell'ampiezza delle fessurazioni, per assicurarsi dell'avvenuta stabilizzazione.

L'edificio oggetto d'intervento a Ginevra (Figura 16) è un complesso residenziale risalente al 1828 costituito da nove corpi indipendenti che mostrava forti segni di peggioramento del suo stato fessurativo. E' stato costruito sulle fondazioni dell'antica cinta di fortificazione della città ma solo un lato dell'edificio poggia su di esse, mentre l'altro si fonda su un antico strato di materiale di riporto: questa è la causa dell'insorgenza delle fessurazioni.



Figura 16. L'edificio oggetto d'intervento a Ginevra

Al tempo della costruzione dei cedimenti differenziali visibili ad occhio nudo si erano già manifestati, dal momento che lo strato poggiate direttamente sul terreno cominciò a cedere immediatamente: le prime misure risalgono al 1976 ed ora il massimo cedimento differenziale ha raggiunto i 20 cm, mentre la velocità di cedimento è otto volte superiore a quella iniziale; inoltre diverse cavità sono state rinvenute nel sottosuolo durante l'indagine geotecnica preliminare all'intervento di ripristino (Figura 17).

L'insieme di tutte queste considerazioni unito al vincolo di non poter accedere all'interrato dell'edificio ha portato alla decisione ricorrere alla tecnologia Uretex Deep Injections®.



Figura 17. Cavità nel sottosuolo ginevrino

Le iniezioni sono state effettuate a diversi livelli per un'estensione complessiva di 280 m, allo scopo di riempire le cavità sottostanti l'edificio e di consolidare il terreno, come nei casi precedenti.

In Figura 18 è riportato il trend di cedimento nel tempo in corrispondenza dei punti di controllo prefissati: emerge chiaramente l'avvenuta stabilizzazione a seguito del trattamento. Le iniezioni hanno, invero, causato anche un lieve cedimento localizzato dovuto al processo di iniezione stesso, ma il grafico mostra che nel complesso il fenomeno di cedimento è stato arrestato.

Dopo l'intervento di stabilizzazione il sistema di monitoraggio Easy Crack Monitor System® è stato installato per valutare l'effettiva stabilizzazione delle lesioni. Il sistema permette l'acquisizione e la lettura automatica degli spostamenti relativi tra due lembi di una fessura e/o tra due parti di un edificio e/o tra due elementi strutturali. E' composto da uno o più strumenti di lettura che vanno posizionati in corrispondenza delle fessure da monitorare, e da una centralina di acquisizione e trasmissione dei dati (Figura 19). Lo strumento di lettura, rigidamente connesso alla parete, rileva ad intervalli di tempo regolari gli spostamenti relativi tra due porzioni rigide lungo due direzioni ortogonali: le letture degli spostamenti sono fatte nello stesso punto per entrambe le direzioni, con una precisione non

maggiore di 0.5 mm. Ogni sistema di monitoraggio è dotato anche di un sensore di temperatura. La centralina di controllo ha la funzione di raccogliere i dati dei diversi lettori e trasmetterli via GPRS ad intervalli regolari ai server di raccolta e di visualizzazione.

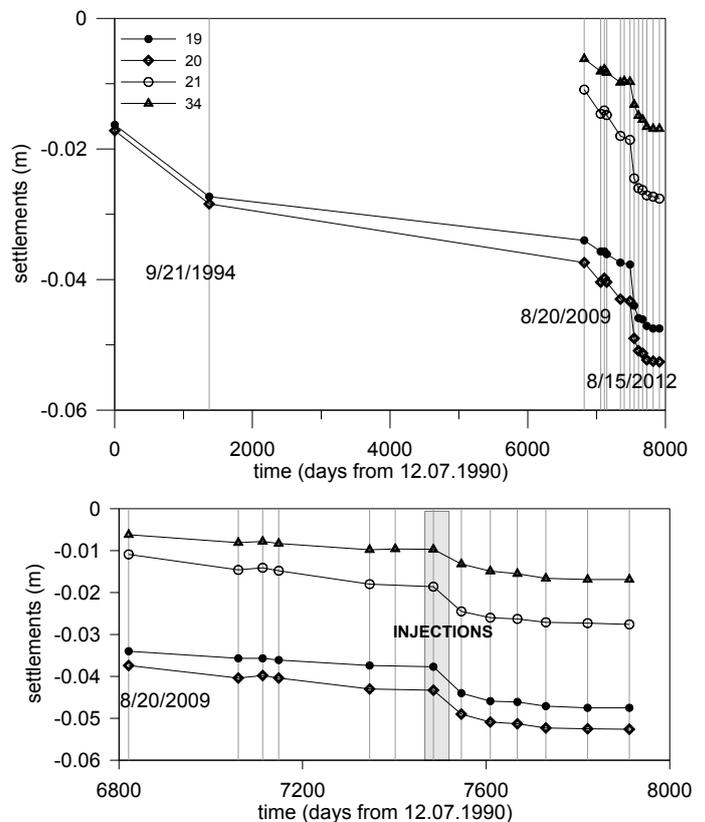


Figura 18. Sopra: Curve cedimento- tempo per diversi caposaldi. Sotto: ingrandimento delle misure prima e dopo l'intervento



Figura 19. Easy Crack Monitor System®

I risultati del monitoraggio sono riportati in Figura 20: le fessure si sono stabilizzate, dal momento che non si rilevano ulteriori spostamenti lungo le direzioni X o Y anche quando si hanno variazioni di temperatura. Si può affermare che entrambi gli obiettivi, di consolidamento e di stabilizzazione delle lesioni, sono stati raggiunti con la tecnica delle iniezioni.

7 CONCLUSIONI

La descrizione dei cinque casi reali sopra riportata ha permesso di delineare le fasi d'intervento

necessarie quando si devono restaurare edifici o monumenti storici.

La maggior parte delle volte le lesioni sono dovute a cedimenti differenziali causati da un eccessivo carico applicato sul terreno o dalle scarse proprietà meccaniche del sottosuolo su cui poggia l'edificio.

Gli interventi di consolidamento del terreno con le iniezioni di resine espandenti, come la tecnologia Uretex Deep Injections[®], permettono di compattare il terreno e di riempire gli eventuali vuoti sotto le fondazioni in modo non invasivo.

Le indagini preliminari risultano però un passo fondamentale per conoscere il profilo stratigrafico con le proprietà meccaniche dei terreni, così come per conoscere la geometria della fondazione nel dettaglio, come descritto nel caso di Palatium Vetus.

Poiché il progetto deve essere il più accurato possibile, in casi particolari si rende necessaria l'analisi numerica per modellare al meglio la risposta del terreno e della struttura prima dell'esecuzione. Questa strategia è stata efficacemente applicata nel caso della torre di Città di Castello.

Nel caso, invece, dell'edificio di Punta della Dogana a Venezia, è stato necessario programmare nel dettaglio la tempistica delle fasi di iniezione, modificandone i dettagli in corso d'opera se necessario, per permettere alla sovrappressione interstiziale di dissipare tra una fase e l'altra.

Alla fine dell'intervento è bene sempre effettuare una seconda indagine geotecnica per verificare l'efficacia delle iniezioni, come infatti è stato fatto in tutti i casi presentati.

E' inoltre molto utile monitorare regolarmente l'apertura delle fessure per assicurarsi della loro stabilizzazione, come descritto nel caso dell'edificio di Ginevra, in cui si è utilizzato il sistema Easy Crack Monitor System[®].

L'esecuzione accurata di tutte le fasi descritte assicura l'ottima riuscita dell'intervento di restauro, come testimoniano i cinque casi oggetto del presente articolo.

8 BIBLIOGRAFIA

- Dei Svaldi, A. Favaretti, M. Pasquetto, A. & Vinco, G. 2005. Analytical modelling of the soil improvement by injections of high expansion pressure resin. In 6th International Conference on Ground Improvement Techniques; Congress proceedings, Coimbra, 18-19 July 2005: 577-584.
- Favaretti, M. Germanino, G. Pasquetto, A. & Vinco, G. 2004. Interventi di consolidamento dei terreni di fondazione di una torre campanaria con iniezioni di resina ad alta pressione d'espansione. In XXII Convegno Nazionale di Geotecnica; Congress proceedings, Palermo, 22-24 October 2004: 357-364. Bologna: Pàtron.
- Gabassi M., Pasquetto A., Vinco G. & Mansueto F., 2010. 3D FEM analysis of soil improving resin injections underneath a mediaeval tower in Italy. Atti 7th European Conference on Numerical Methods in Geotechnical Engineering NUMGE 2010, Trondheim, pp. 827-832
- Gabassi M., Pasquetto A., Vinco G. & Masella A., 2011. Consolidamento del terreno di fondazione del palazzo di Punta della Dogana in Venezia realizzato con iniezioni di resina poliuretanic. In XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica; Congress proceedings, Naples, 22-24 June 2011: 457-463. Bologna: Pàtron.
- Pasquetto A., Gabassi M., Vinco G. & Massone G., 2011. Adeguamento della capacità portante del terreno di fondazione di "Palatium Vetus" ad Alessandria con iniezioni di resina espandente. In XXIV Convegno Nazionale di Geotecnica; Congress proceedings, Naples, 22-24 June 2011: 525-530. Bologna: Pàtron.
- Schweiger, H. F. Kummerer, C. Otterbein, R. & Falk, E. 2004. Numerical modelling of settlement compensation by means of fracture grouting. *Soils and foundations* 44 (1): 71-86

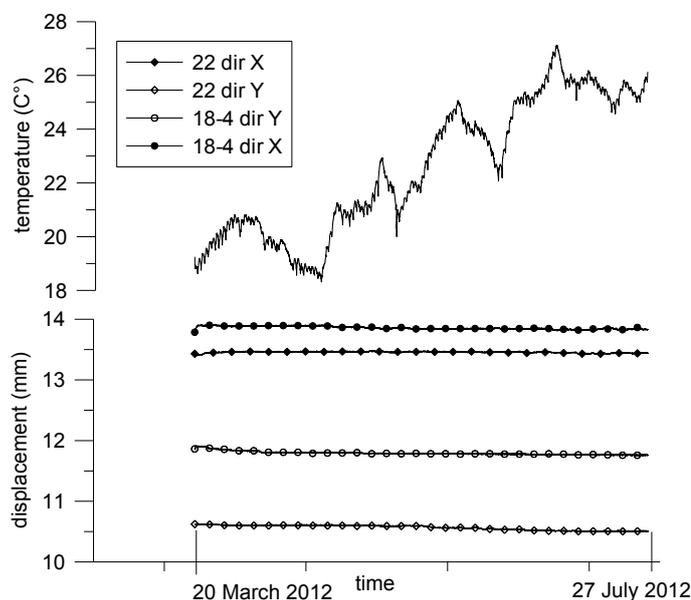


Figura 20. Curve tempo-spostamento relativo- temperatura per due lesioni (in direzione X e Y)

Se poi le strutture dell'edificio ceduto risultano seriamente danneggiate (per esempio le murature), anch'esse possono essere trattate tramite iniezioni di resina, come descritto nel caso della cappella di Saint Nicodème in Francia.