

# Tecniche di consolidamento delle fondazioni

*Stefano Sudati, ICMQ SpA*

Per consolidamento delle costruzioni si intende l'insieme di quei processi di conoscenza, di progetto e di intervento messi in atto per far recuperare ad un edificio le sue caratteristiche strutturali, perse a causa di un'azione di degrado, ad esempio sismica, o di altre azioni di natura antropica o naturale. Considerato il patrimonio edilizio italiano, la maggior parte delle azioni di consolidamento avvengono su strutture in muratura portante realizzate spesso secondo le regole dell'arte senza fare alcun calcolo strutturale, a differenza delle strutture in cemento armato la cui realizzazione è da sempre avvenuta secondo la scienza delle costruzioni. Spesso gli interventi di consolidamento strutturale sono affiancati da altri interventi di recupero o di restauro.

Certamente la conoscenza storica della costruzione in muratura è fondamentale per una buona valutazione della sicurezza sismica e per poter eseguire un buon intervento di miglioramento ma a questo proposito i problemi riscontrabili sono quelli di tutti i comuni edifici, anche nel caso di beni appartenenti al patrimonio culturale tutelato: è infatti difficile valutare o ritrovare i dati dei materiali e della costruzione alla loro origine, valutare le modifiche intercorse nel tempo e se i fenomeni di degrado derivano dalle trasformazioni antropiche o sono dovute al terremoto. D'altronde una campagna di indagini su tutto l'edificio sarebbe troppo costosa e a volte anche invasiva.

Talvolta, tramite modelli si possono effettuare ipotesi sulla tipologia dei materiali, ma l'attendibilità del modello a cui si fa poi riferimento per una valutazione non possono essere sempre disponibili in maniera completa. Per questo motivo, vi possono essere livelli di conoscenza differenti in funzione delle indagini e dei rilievi svolti, i cui risultati vengono poi impiegati per valutare gli interventi realmente necessari. Grazie a queste indagini si possono individuare diversi fattori che servono per valutare la struttura:

- identificazione della costruzione e della struttura;
- rilievo geometrico complessivo di fessurazione;
- ricostruzione della storia della struttura;
- identificazione dei materiali e del loro stato di degrado;
- conoscenza del sottosuolo e delle fondazioni.

Accanto al consolidamento delle costruzioni e delle strutture vere e proprie, esistono anche interventi mirati sulle fondazioni o in particolare nei terreni di fondazione.

## **Caratteristiche a cause dei cedimenti**

La stabilità nel tempo di una costruzione è assicurata dalla corretta progettazione, realizzazione e manutenzione delle opere di fondazione che rappresentano il necessario collegamento tra la struttura e il terreno. È proprio quando non sono garantite le necessarie condizioni di equilibrio statico tra struttura e terreno che si innescano i cedimenti differenziali.

Ogni terreno è costituito da una fase solida (particelle di natura mineralogica, organica e chimica), da una fase fluida (acqua e minerali in essa disciolti) e da una fase gassosa (aria contenuta nel terreno). Il terreno che sostiene l'opera di ingegneria e con la quale l'opera interagisce viene definito volume significativo; all'interno di questo volume, laddove si è in presenza di cedimenti, diventano necessari interventi di consolidamento e di stabilizzazione del terreno.

I cedimenti superficiali sono spostamenti verticali del piano di posa della fondazione, risultato delle deformazioni del terreno che tecnicamente si definiscono "cedimenti differenziali verticali". Un cedimento delle fondazioni costituisce comunque un evento non trascurabile e talvolta piuttosto pericoloso per la sicurezza e la stabilità dell'opera. Crepe e fessure su pavimentazioni e pareti sono solo i sintomi finali del cedimento, ovvero quando la struttura non sopportando più le deformazioni collassa e si lesiona, ma anche la difficoltà di apertura o di chiusura delle finestre può indicare le prime manifestazioni di cedimento.

Molte possono essere le cause che alterano l'equilibrio del terreno agendo sulle sue proprietà chimico-fisiche. Si va dalla sollecitazione dinamica alle vibrazioni prodotte ad esempio da traffico veicolare pesante ed intenso, alle infiltrazioni di fluidi (acque meteoriche o perdite fognarie), da scavi profondi alla realizzazione di sopraelevazioni - in entrambi i casi con conseguente variazione dello stato di tensione del terreno -, dalla suzione dovuta a radici di piante ad alto fusto alla riduzione del contenuto d'acqua, ad esempio per siccità.

## **Tecniche di indagine su strutture e terreni di fondazione**

Per quanto riguarda le strutture dell'edificio è possibile eseguire indagini dirette o indirette più o meno invasive a seconda delle specifiche necessità di verifica. In base agli strumenti adottati si possono eseguire diverse prove e indagini, ad esempio: endoscopie, prove sclerometriche, termografie, impiego di Georadar, tomografie soniche, magnetoscopie, prove soniche ed ultrasoniche, carotaggi, test di laboratorio, fotometrie, prove a trazione diagonale della muratura.

Per quanto riguarda invece il terreno di fondazione possono essere condotte prove e indagini di laboratorio o in situ e tra queste distinguiamo indagini e prove di tipo geotecnico e geofisico.

Le prove geotecniche sono prevalentemente rivolte alla determinazione dei parametri meccanici dei terreni ma soffrono di due importanti limitazioni: sono puntuali e spesso non ripetibili. Al contrario le indagini geofisiche moderne consentono valutazioni in ambiente tridimensionale e ripetibile grazie alla loro mini invasività. Fermo restando l'utilità di integrare le due tipologie diagnostiche, nell'ambito dei problemi di cedimento dei terreni in ambito urbano edificato trova giusta collazione la tomografia di resistività elettrica 3D. Questa tecnologia diagnostica si è rivelata di grande utilità proprio perché in grado di rilevare la presenza di acqua e vuoti nel terreno; in particolare permette di identificare perdite fognarie, livelli di falda, distribuzioni volumetriche litologiche, concentrazioni di acqua e presenza di vuoti. Se applicata a supporto di interventi di consolidamento, questa tecnologia consente di raccogliere in tempo quasi reale significative quantità di dati del terreno anche sotto alle costruzioni, gestendo scenari complessi e dinamici che necessitano di una scrupolosa e professionale osservazione dei fenomeni di consolidamento in atto durante il trattamento, permettendo di osservarne gli effetti per la verifica dei risultati attesi e nel caso di adattare il progetto in corso d'opera, così come indicato dalle Norme tecniche sulle costruzioni Dm 14/01/2008 e s.m.i.

## **Metodi di consolidamento**

Esistono varie tipologie di metodi che consentono di ottenere il consolidamento del terreno. Un metodo, ad esempio, consiste nell'iniezione mirata di resina poliuretana espandente nel terreno di fondazione di edifici e manufatti interessati da cedimenti differenziali verticali. Si tratta di iniezioni di stabilizzazione e consolidamento del terreno e non di impermeabilizzazione delle strutture di fondazione.

L'iniezione avviene a bassa pressione, secondo quantitativi definiti in funzione degli effetti man mano osservati in corso d'opera nel terreno di fondazione, fin quando le risultanze delle misure di controllo eseguite in parallelo all'intervento di rimedio non dimostrino che il terreno di fondazione ceduto abbia raggiunto una consistenza simile a quella del terreno limitrofo e non afflitto da cedimenti, il cui stato viene preso come riferimento. Gli strumenti diagnostici impiegati in corso d'opera possono consistere, ad esempio, in rilievi geofisici mediante tomografia di resistività elettrica e in prove penetrometriche eseguite in modo mirato grazie alle risultanze delle indagini geofisiche preliminari.

La resina poliuretana per iniezione abbina due componenti principali, poliolo e isocianato, che vengono mescolati al momento dell'iniezione e che vengono prodotti su specifiche prestazioni prestabilite.

Il campo di applicazione primario è costituito da interventi sul terreno di fondazione di manufatti che hanno subito cedimenti, in terreni di qualsiasi natura. La resina impiegata consente la calibrazione dei parametri fisico chimici per ottenere le prestazioni necessarie in relazione all'intervento specifico e non ha controindicazioni ambientali. In funzione delle diverse densità ottenibili è idonea anche per il riempimento di cavità o per la riduzione del rischio liquefazione dei terreni. Dato il rapido tempo di reazione, la resina rimane confinata nel raggio di circa 1,5 m dal punto di iniezione (condizione valida in assenza di fratture preesistenti nel terreno).

Quando i rilievi geologici e tecnici acquisiti in corso d'opera nella zona di intervento (zona ceduta) raggiungono i valori misurati nelle zone non cedute, l'intervento può considerarsi concluso.

Un altro metodo, ad esempio, prevede l'intervento mediante iniezioni di resina espandente su uno o più livelli di profondità alle quali viene associata una presso-infissione di micropali in acciaio rullato. L'intervento mediante infissione di micropali in acciaio rullato può essere adottato per il consolidamento e la riduzione dei cedimenti attesi di fabbricati sia esistenti che in costruzione.

L'intervento mediante la combinazione di resina espandente e micropali è impiegato soprattutto per il consolidamento di fondazioni in cemento armato, tuttavia, mediante l'adozione di alcuni accorgimenti esecutivi, viene utilizzato anche per il consolidamento di edifici in muratura. Esso prevede l'applicazione di un sistema combinato che sfrutta la capacità consolidante delle resine espandenti a libera diffusione unitamente alla capacità portante dei micropali a presso-infissione in acciaio rullato ed è mirato al raggiungimento delle seguenti finalità:

- consolidamento ed incremento di portanza del terreno sottostante le fondazioni;
- riempimento di cavità, fessurazioni e micro vuoti eventualmente presenti;
- ripristino della superficie di contatto tra terreno e fondazioni allo scopo di uniformare la distribuzione dei carichi;
- sollevamento di almeno un millimetro della struttura soprastante;
- trasferimento in profondità totale o parziale del peso dell'edificio;
- efficacia immediata dei micropali di acciaio posti in opera, micropali attivi.

Un ultimo metodo che prendiamo in esame è quello invece che prevede la posa in opera di micropali a presso infissione in acciaio rullato al fine di trasferire in profondità parte del carico in fondazione. Esso risulta essere particolarmente indicato soprattutto per il consolidamento di fondazioni in calcestruzzo armato, tuttavia, mediante l'adozione di alcuni accorgimenti esecutivi, può essere utilizzato anche per il consolidamento di edifici in muratura. L'infissione dei micropali non è possibile in terreni granulari con clasti di diametro elevato e in terreni rocciosi, tuttavia in terreni con tali caratteristiche solitamente non si rende necessario un intervento di palificazione.

### **Attività di ispezione sulle procedure utilizzate**

Il Servizio ispezioni di ICMQ può effettuare verifiche non solo in rispondenza a precise disposizioni di legge (come ad esempio la verifica dei progetti ai fini della validazione), ma anche a fronte di esigenze di carattere volontario finalizzate a qualificare, proprio attraverso una certificazione, un determinato prodotto, processo o servizio. Nei casi sopra illustrati delle varie metodologie di intervento per il consolidamento dei terreni (con riferimento alla norma Uni Cei En Iso/Iec 17020 per le attività di ispezione con emissione di rapporti e certificati di ispezione) ICMQ ha esaminato le procedure seguite dai soggetti operanti. L'ispezione è stata finalizzata a verificare che il singolo metodo fosse applicato nel rispetto di quanto indicato nel rispettivo Manuale delle procedure redatto dall'azienda in conformità alle norme di settore: dalla pianificazione alle strumentazioni utilizzate, fino all'esecuzione e alla rendicontazione dell'intervento eseguito. Sono state dunque controllate la chiarezza, la completezza e l'adeguatezza delle procedure per quanto attiene sia la definizione del processo base (diagnostica, progetto dell'intervento, esecuzione dell'intervento, monitoraggio in corso d'esecuzione, controllo dell'efficacia dell'intervento, rendicontazione e validazione), sia la definizione delle procedure correlate: cantierizzazione e consegna lavori da parte del committente, sicurezza sul lavoro, tutela del know how, chiusura lavori, prevenzione e gestione degli eventuali effetti collaterali, gestione dei reclami.

Sono stati esaminati anche i certificati relativi ai prodotti d'iniezione (caratteristiche fisiche-meccaniche e compatibilità ambientale), ai requisiti tecnici e alle caratteristiche dei materiali impiegati e ai sistemi diagnostici e di monitoraggio impiegati, inclusi i software di restituzione e di elaborazione dei dati.

### **Verifiche in campo**

A seguito dell'esito positivo dell'attività di ispezione sulla parte procedurale, in alcuni casi è stata poi verificata sul campo, con esito positivo, la conformità degli interventi eseguiti alle procedure stesse. Oltre alle verifiche svolte inizialmente, ogni anno vengono condotte periodicamente analoghe ispezioni su diversi cantieri sia in Italia che all'estero, differenti per entità e complessità. In particolare, per ciascun cantiere vengono valutati dapprima gli aspetti relativi alla qualifica e alla sicurezza degli operatori, alle strumentazioni e ai mezzi utilizzati e successivamente, dopo l'apertura dei lavori, si valuta il progetto dell'intervento e la sua regolare esecuzione, fino alla rendicontazione tecnica finale.



Figura 1 - Campione terreno trattato con resina