

Cedimenti differenziali del terreno di fondazione e danni agli edifici

AUTORE: Massimo Chiarelli, Ingegnere geotecnico progettista

ABSTRACT

Lo svilupparsi di insufficienze fondazionali di vario genere, legate soprattutto al manifestarsi di cedimenti verticali delle opere di fondazione degli edifici, culminano in taluni casi in crolli parziali e/o totali dei manufatti. La lettura delle sintomatologie in situ, ed in particolare del quadro fessurativo, è il primo passo per predisporre interventi di consolidamento adeguati, ricorrendo alla tecnica più rispondente, al fine di rendere l'intervento minimamente invasivo e duraturo.

Danni connessi al comportamento del sottosuolo

È un dato di fatto che in Italia cresce più il cemento che la popolazione. Sono i dati ISPRA che ci danno la dimensione di questo fenomeno che avanza nel nostro paese al ritmo di 2 metri quadrati al secondo.

Conseguenza diretta di ciò è l'edificazione in aree un tempo considerate periferiche e/o a rischio idrogeologico e sismico ma anche in terreni con scarse qualità meccaniche e, molto spesso con la presenza di acqua di falda superficiale.

È proprio la costruzione di opere in terreni sempre più scendenti ha portato alla necessità di prevenire tutta una serie di problematiche che si possono verificare nella realizzazione di opere di ingegneria civile e che se trascurati arrecherebbero dissesti e danni importanti alle strutture delle opere che su di esso sorgono.

Dette problematiche riguardano essenzialmente la previsione ed il controllo dei cedimenti delle fondazioni che dipendono in primo luogo dal tipo di terreno, impermeabile o drenante, incoerente o coesivo, caratterizzato o meno dalla presenza della falda e da innumerevoli altri fattori che influiscono sui parametri geotecnici e sulla resistenza al taglio del sottofondo. Soprattutto in presenza di terreni di tipo argilloso, dal comportamento variabile nel breve e nel lungo periodo, sensibili alla presenza d'acqua, accade che gli abbassamenti differenziali nel corso del tempo avvengano per steps successivi, anche in relazione ad eventi, o lavori, che si svolgono nelle aree limitrofe ai manufatti. Diretta conseguenza dell'abbassamento gravitativo delle fondazioni di un edificio, sono le lesioni e deformazioni che si possono propagare anche alle strutture murarie fuori terra. Le tipiche fessure strutturali di un edificio per cedimento delle fondazioni hanno andamenti obliqui, tendenzialmente a 45°, con aperture che si ampliano verso il basso.

Cedimenti indotti dall'oscillazione del livello di falda

Nei terreni caratterizzati da elevata permeabilità (esempio: strati sabbiosi con ghiaia mediamente addensate) le fluttuazioni del livello di falda eventualmente presente oppure di un alto gradiente idraulico che si può creare per edifici in prossimità di canali, nei depositi alluvionali lungo i corsi dei fiumi, specchi d'acqua o fasce costiere, sono spesso causa di "scavernamenti" all'interno dello strato sabbioso (con trasporto di materiale fine), i quali si ripercuotono sugli strati più superficiali ingenerando dei cedimenti che potrebbero anche manifestarsi con basculamenti del terreno al di sotto delle fondazioni stesse. Nei terreni coerenti,

L'abbassamento della falda provoca cedimenti mai compensati integralmente dai rigonfiamenti che questi materiali argillosi subiscono, quando il livello dell'acqua cresce nuovamente. Costituiscono fonte di lesioni anche inopportuni innalzamenti della falda in costruzioni con fondazioni a platea e piani interrati a causa della notevole spinta di Archimede che queste strutture subiscono verso l'alto. Spesso le alluvioni lasciano pavimenti lesionati al centro delle stanze per fenomeni di rigonfiamento che si evidenziano soprattutto, quando l'acqua che aveva invaso i piani terra e/o interrati lascia le abitazioni precedentemente invase. Mancando la "zavorra", direttamente presente sui pavimenti, ma essendo ancora presente nel sottosuolo si crea una pressione dal basso verso l'alto che può raggiungere spesso anche carichi superiori ad una tonnellata al metro quadrato.

Classificazione dei cedimenti

Quando si parla di cedimenti è opportuno specificare l'intervallo temporale in cui questi si esplicano. Essi infatti possono manifestarsi sia in fase costruttiva che nel corso della vita utile dell'edificio con un andamento più o meno regolare tra porzioni costruite dello stesso manufatto.

Si può allora parlare di:

1. **Cedimenti a lungo termine:** intendendo con "lungo termine" un intervallo temporale pari alla vita utile dell'edificio; la tipologia di cedimenti che si possono manifestare in questo caso, è quella differenziale;
2. **Cedimenti a breve termine:** già in fase costruttiva si possono manifestare i primi spostamenti della base d'imposta delle fondazioni, dovuti ad una parziale consolidazione degli strati, causata dalla lenta applicazione dei carichi. Non si perviene in tale modo alla crisi del terreno per rottura dello stesso, ma si possono avere anche in questo caso cedimenti non trascurabili che, specie negli edifici in muratura, producono una fessurazione della muratura stessa. Il verificarsi di questi primi spostamenti può tuttavia assicurare una loro diminuzione nel corso della vita utile dell'edificio.

Diagnosi e interpretazione delle forme del dissesto

Il primo segnale evidente a cui occorre prestare particolare attenzione è la presenza di crepe sui muri, sotto le armature dei solai e nei pavimenti. Spesso accade anche che porte e finestre non si aprono più con la stessa facilità di un tempo e pavimenti o marciapiedi adiacenti all'edificio si avvallano o rigonfiano a seconda dei movimenti del terreno sottostante. Si deve individuare la zona ceduta della fondazione, a seguito dell'analisi delle lesioni visibili nelle strutture in elevazione. L'analisi del quadro fessurativo e deformativo deve individuare la natura del dissesto statico e valutarne la gravità in modo da determinare l'eventuale urgenza dell'intervento stando sempre ben attenti a cogliere i degni strutturali probanti. Le lesioni in un edificio compaiono, quando la struttura fondale non è sufficientemente rigida per

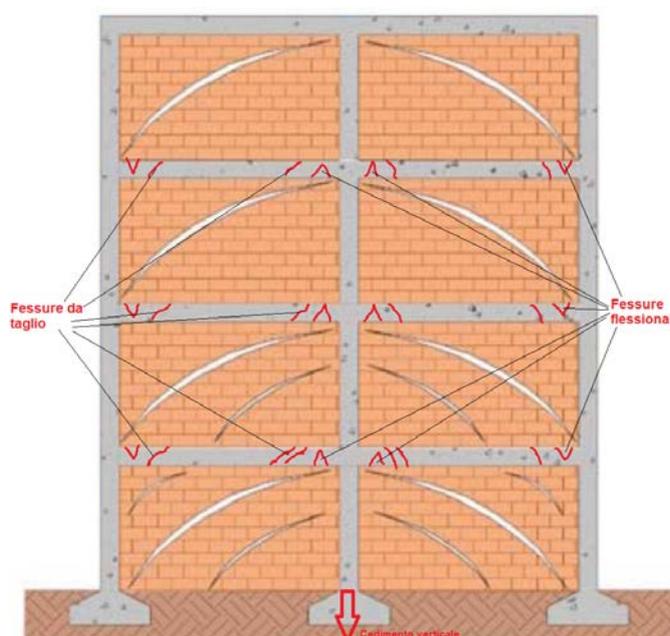


Figura 1-Tipiche fessurazioni in una struttura intelaiata in c.a. a seguito di un cedimento verticale in fondazione.

assorbire la differenza degli assestamenti del terreno su cui insiste. D'altro canto, esiste in Italia uno dei patrimoni storici immobiliari più prezioso ed antico al mondo che occorre tutelare e conservare per renderlo fruibile anche a chi verrà dopo di noi: stiamo parlando degli edifici storici di cui è ricolmo il nostro paese e che ogni anno attraggono visitatori da tutto il mondo. Questi edifici essendo realizzati in muratura necessitano di interventi mirati e spesso molto impegnativi per tutelarne la loro bellezza. Proprio in questi edifici i tipici dissesti legati ai cedimenti sono ben leggibili e riconoscibili nei quadri fessurativi in facciata e possono essere raggruppati in tre principali categorie:

- 1) lesioni "ad arco" all'interno della muratura che si innescano in maniera preferenziale in corrispondenza delle aperture per raggiungimento della resistenza a trazione massima della muratura. Tale comportamento è riconducibile a quello di una trave in semplice appoggio con freccia massima in mezzeria. Questo tipo di cedimento differenziale è sicuramente il più pericoloso per provoca una distorsione angolare β , data dal rapporto δ/L tra il cedimento differenziale tra due punti e la loro distanza. Per edifici in muratura tale valore deve essere inferiore a $1/600$.
- 2) lesione a taglio delle pareti derivante dal cedimento differenziale che interessa in maniera differente le fondazioni su cui sono realizzati sia i muri di facciata esterni che interni.

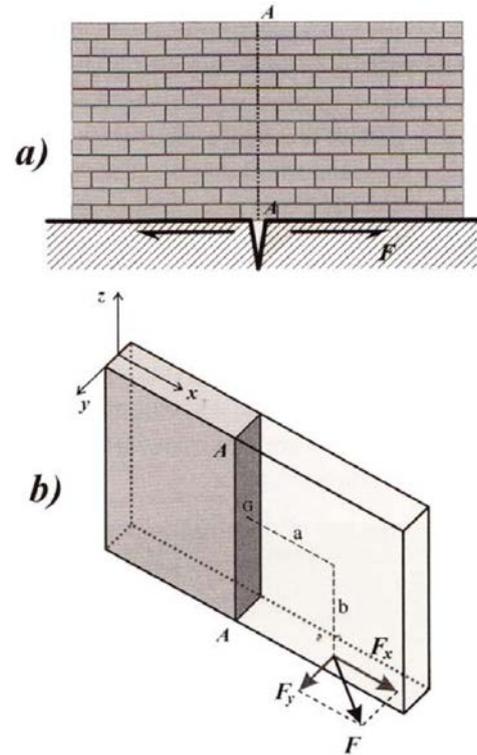


Figura 2- Lesione di un paramento murario di fondazione sollecitato nel piano. Da Cucco F., *Statica e consolidamento degli edifici storici*, Grafill, Palermo, 2008.

È possibile inoltre, fare un'ulteriore distinzione in termini di direzione; i cedimenti possono essere infatti:

- **Cedimenti orizzontali.** In questo caso il moto del terreno si trasmette per attrito alla struttura di fondazione imponendo una forza F che può avere componenti trasversali, complanari o oblique rispetto al piano della muratura, provocando cinematismi più o meno dannosi in termini di lesioni e dissesti (Figura 2). La componente F_x esercita uno sforzo normale di trazione pari a $N=F_x$ e un momento $M_y=F_x*b$. La componente F_y impone invece uno sforzo di taglio pari a $T_y=F_y$, un momento flettente $M_x=F_ya$ ed un momento torcente pari a $M_x=F_y*b$. La tipologia fessurativa associata a sforzi tenso-flessionali di questo tipo, si sviluppa dal basso verso l'alto provocando la formazione di due paramenti distinti in movimento reciproco ma comunque complanari; qualora

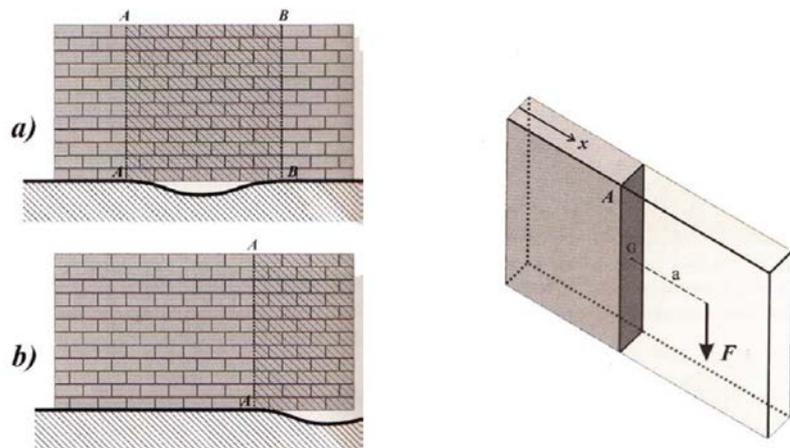


Figura 3- Schematizzazione dei cedimenti verticali (zona intermedia o terminale). Da Cucco F., *Statica e consolidamento degli edifici storici*, Grafill, Palermo, 2008.

formazione di due paramenti distinti in movimento reciproco ma comunque complanari; qualora

invece siano prevalenti le componenti di torsione e taglio, la lesione sarà inclinata con uno spostamento reciproco su piani diversi.

- **Cedimenti verticali.** I cedimenti verticali possono invece riguardare porzioni diverse del paramento murario; se interessano una zona intermedia, la parte afflitta da cedimento resta sospesa rispetto allo spostamento del terreno, presentando un vincolo di incastro fisso agli estremi della porzione interessata; se interessa invece una zona marginale si origina un comportamento a mensola. La parte isolata tende a cedere sviluppando lesioni paraboliche ad arco mentre, nel secondo caso, fessurazioni di dimensioni limitate oblique. Nel caso di cedimento verticale terminale (Figura 3), il peso del cuneo isolato F , provoca un taglio $T_z=F$ e un momento flettente $M_y=F*a$. La rottura del paramento può manifestarsi alternativamente con una lesione inclinata a taglio o una verticale provocata dallo sforzo di flessione a momento.

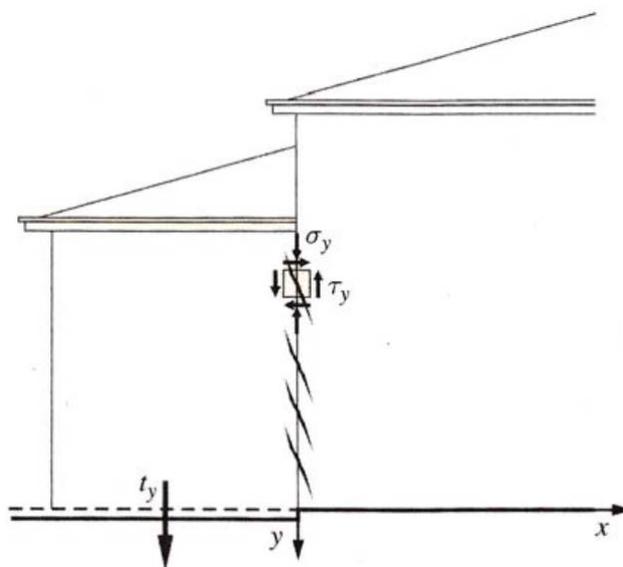


Figura 4 - Lesione per traslazione verticale. Da Pisani M.A., *Consolidamento delle strutture: guida ai criteri, ai materiali e alle tecniche più utilizzati*, Hoepli, Milano, 2008.

Parlando di cedimenti verticali è opportuno considerare inoltre, che essi possono occorrere anche per il moto rigido reciproco di due edifici contigui interessati da variazioni differenziali dello stato tensionale del sedime di pertinenza. L'interfaccia sarà caratterizzata da sforzi di compressione dovuti al peso del paramento e sforzi tangenziali dovuti alla traslazione, che si esplicheranno con fratture a 45° nella parte centrale e verticali alle estremità. Di solito questo fenomeno è riscontrabile soprattutto tra edifici appartenenti ad epoche di costruzione diverse, il cui sottosuolo è interessato di conseguenza da fenomeni di consolidamento in momenti successivi.

Cedimenti indotti da scavi in sotterraneo

In special modo in ambito urbano, la realizzazione di opere in sotterraneo come possono essere le infrastrutture di trasporto, possono presentare diverse problematiche relativamente all'interazione tra l'opera in costruzione e le infrastrutture adiacenti e/o sovrastanti. Infatti, l'effetto si risente al livello del piano campagna in modo tanto più sensibile quanto più superficiali sono le gallerie stesse: lo scavo e le modalità con cui questo viene effettuato



Figura 5 - Danni su edifici a seguito dei cedimenti avvenuti durante la costruzione della metropolitana di Palermo.

producono uno sviluppo di cedimenti che si propagano anche a grandi distanze e possono avere un impatto a volte perfino catastrofico con l'ambiente urbano. La valutazione dell'impatto della realizzazione di gallerie metropolitane sulle strutture e/o reti di servizi sovrastanti rappresenta, quindi, un passo cruciale del percorso progettuale, in particolare nelle aree caoticamente urbanizzate ed intensamente antropizzate. Conseguentemente, risulta di fondamentale importanza la valutazione dei potenziali danni indotti, in modo da prevedere con una mirata azione di monitoraggio, adeguati interventi di mitigazione e salvaguardia. Infatti, è oggi possibile ricorrere a soluzioni innovative offerte dallo sviluppo delle tecniche di miglioramento e rinforzo dei terreni in termini di caratteristiche meccaniche: stiamo parlando del preconsolidamento. Il controllo degli effetti indotti dallo scavo di gallerie in ambiente urbano, quindi, è di estrema importanza ed attualità. Per la realizzazione di reti di trasporto metropolitano, spesso il principale requisito di progetto è quello di ridurre al minimo gli effetti sulle strutture limitrofe specialmente se ad essere interessato potrebbe essere il patrimonio storico e artistico ovvero, gli splendidi centri storici delle nostre città. La valutazione degli effetti sulle strutture è cosa non semplice e scaturisce da analisi di carattere multidisciplinare che richiedono l'interazione tra competenze proprie non solo dell'ingegneria geotecnica e strutturale, ma anche dell'archeologia, dell'architettura, del restauro e della conservazione dei beni monumentali.

Modalità generali di intervento

Le modalità di intervento dipendono strettamente dalle cause che hanno prodotto il cedimento di fondazione. Se le cause che hanno prodotto il dissesto sono, invece, attribuibili ad errori nel dimensionamento dei plinti o travi di fondazione e/o a scavi o costruzioni realizzati in adiacenza alla costruzione interessata dal cedimento che hanno determinato il raggiungimento di una nuova situazione di equilibrio (sebbene con una configurazione fessurata degli elementi strutturali ed accessori), si potrà procedere al solo risanamento del quadro fessurativo. A questo scopo si potranno effettuare sigillature delle lesioni degli elementi strutturali in c.a. mediante iniezioni con sistemi epossidici. Per le fessure sugli intonaci si potrà ricorrere alla realizzazione di una rasatura armata con rete in fibra di vetro che verrà successivamente tinteggiata.

Tipo di struttura	Danno/rischio	Criterio	Valore limite
Edifici intelaiati e in muratura armata	Danno strutturale Lesioni in tramezzi e tompagni Aspetto visivo Collegamento ai servizi	Distorsione angolare Distorsione angolare Rotazione rigida Cedimento totale	$1/150 \div 1/250$ $1/300$ $50 \div 75$ mm (sabbie) $75 \div 135$ mm (argille)
Edifici alti	Funzionalità di ascensori	Rotazione dopo l'installazione	$1/1.200 \div 1/2.000$
Edifici in muratura portante non armata	Lesioni da deformata con la concavità verso l'alto (<i>sagging</i>) Lesioni da deformata con la concavità verso il basso (<i>hogging</i>)	Rapporto di inflessione Rapporto di inflessione	$1/2.500$ (L/H = 1) $1/1.250$ (L/H = 5) $1/5.000$ (L/H = 1) $1/2.500$ (L/H = 5)
Ponti in generale	Difficoltà dei veicoli nel transito Dissesti strutturali Funzionalità	Cedimento totale Cedimento totale Spostamenti orizzontali	100 mm 65 mm 40 mm
Ponti a campata multipla	Danni strutturali	Distorsione angolare	$1/250$
Ponti a luce singola	Danni strutturali	Distorsione angolare	$1/200$

In generale per edifici in muratura diverse sono le tipologie di interventi che variano, come già detto, in funzione delle cause che hanno prodotto i dissesti. Riportiamo a seguire con delle schematizzazioni o immagini, alcune tipologie di interventi che è possibile eseguire o che sono stati eseguiti per il ripristino di alcuni danni.

Figura 6 – Valori ammissibili cedimenti sulle strutture.

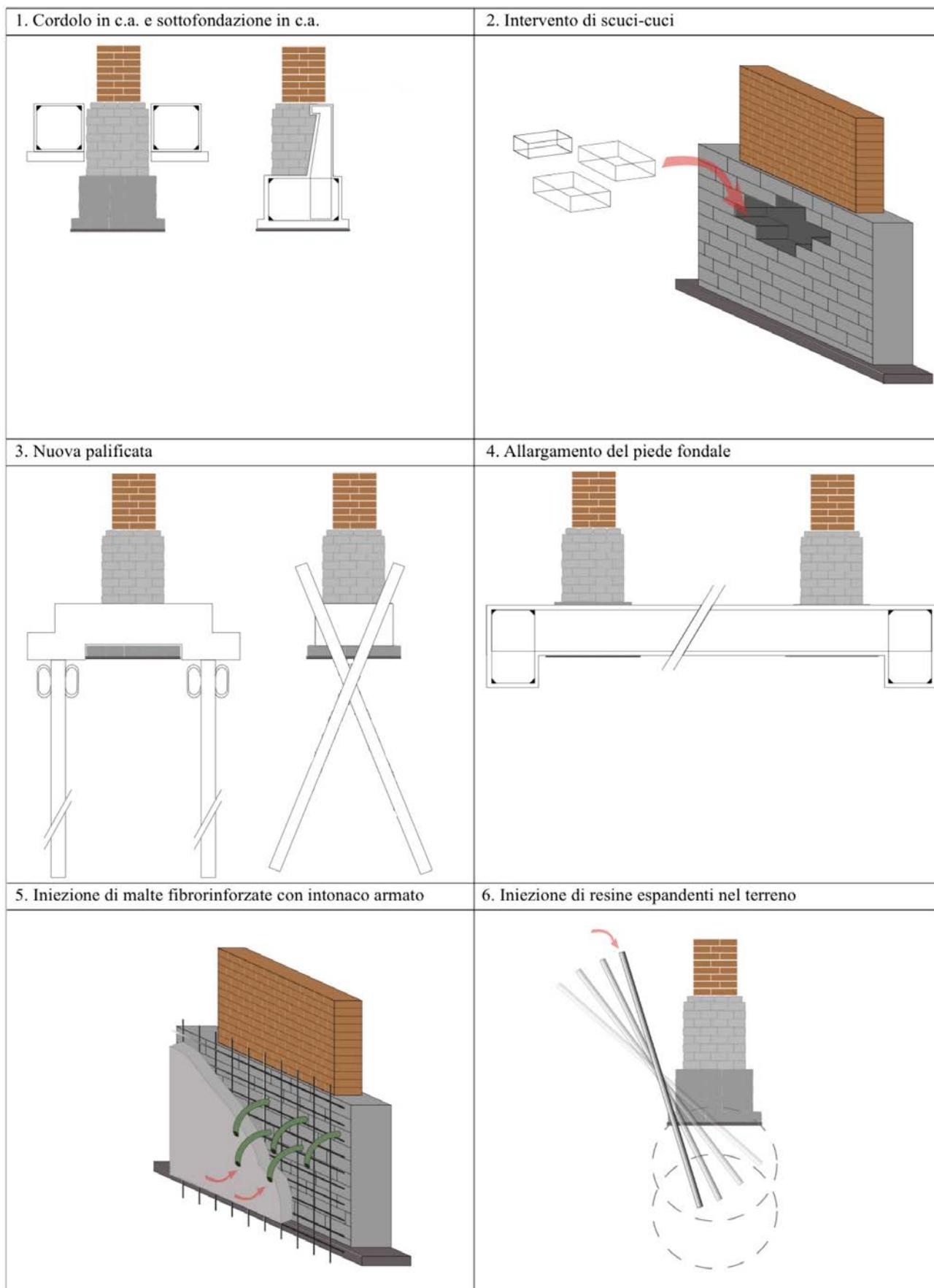


Figura 7 – Schematizzazione di alcuni interventi eseguiti sulle fondazioni in muratura.



Figura 8 - Esempio di sostegno/rinforzo delle fondazioni in muratura con una trave in acciaio su micropali. A destra sollevamento e sostegno della trave di fondazione in c.a. di un fabbricato mediante micropali infissi collegati con piastre in acciaio alla trave stessa – Foto ditta Cusi snc di Reggio Emilia.



Figura 9 – Esempio di allargamento della base di fondazione. Nella foto a destra l’allargamento poggia su una fila di micropali in acciaio.

Bibliografia

- [1]. M. Chiarelli – “L’Arte del costruire gallerie” – Editrice | Uni Service, Trento, 2009.
- [2]. M. Chiarelli – “Analisi dei cedimenti per gallerie a doppia canna” - “Strade & Autostrade” n°125, EDI-CEM Srl, Milano.
- [3]. M. Chiarelli – “Le vibrazioni degli edifici indotte dalle ferrovie sotterranee” - “Strade & Autostrade” n°44, EDI-CEM Srl, Milano.
- [4]. L. Coppola – “I dissesti strutturali e da sisma delle opere in calcestruzzo armato” - Università degli Studi di Bergamo Facoltà di Ingegneria.