



## I cedimenti nelle fondazioni. Spunti di approfondimento da un'indagine peritale

di Pierpaolo Cicchiello (\*)

### Oggetto della perizia

Oggetto della perizia, svolta per conto del CTU incaricato dal Tribunale Civile di Monza, sede staccata di Desio, sono le lesioni comparse in un appartamento ubicato al piano primo di un edificio, con tre livelli fuori terra, sito in Bovisio Masciago (MB), adiacente ad un'area su cui sono stati costruiti dei box interrati.

Definire il danno, subito da una struttura, in seguito ai cedimenti della sua fondazione, non è un'operazione univoca, dal momento che il concetto stesso di danno è legato a molteplici fattori, che dipendono dal tipo di struttura e dalla sua destinazione. Non è, quindi, necessario intendere in maniera univoca il danno solo come comparsa di crepe, fessure, ma, con una "lettura" più corretta e coerente, vanno considerate anche le modifiche dell'assetto d'insieme, relativamente alla destinazione d'uso ed alla funzionalità della struttura.

È risultato evidente come a ridosso dello scavo, la muratura su cui si scaricano i solai presentasse un'apertura che lascia operante un tratto di muratura di circa 1,5 m, formante lo spigolo del fabbricato pre-esistente (foto seguente).

Lo stato d'efficienza di sistemi di fondazione di edifici in muratura risulta fortemente influenzato dalla stabilità del terreno di fondazione. Come è ben noto, la presenza di edifici contigui, nei quali possono essere avviati lavori di manutenzione o ampliamento, la presenza di alberi di grosso fusto, eventuali dissesti dei sistemi fognari, scivolamenti dei versanti e frane, possono, in diverso grado, penalizzare la statica di una costruzione, attraverso azioni distorsionali, che vengono trasmesse dalle fondazioni a contatto con il terreno. I lavori, iniziati nell'aprile 2008, con la demolizione delle costruzioni esistenti sull'area destinata alla nuova edificazione, hanno, poi, visto la realizzazione di una berlinese di micropali lungo il perimetro. La realizzazione della para-

tia, in micropali tubolari d'acciaio, vincolata con due ordini di tiranti, ha preceduto lo sbancamento dell'area. Le berlinesi sono strutture di sostegno, di tipo flessibile, realizzate mediante cortine di micropali verticali. In funzione dell'altezza di terreno che sono chiamate a sostenere, o in base alla profondità di scavo di progetto, possono essere realizzate a sbalzo oppure ancorate. Esse possono essere costruite secondo due differenti tipologie. Si può adottare una spaziatura dei micropali relativamente ridotta (30-100 cm), con armatura costituita da tubo o, meno frequentemente, profilato ad H. Si può, in alternativa, adottare una spaziatura dei micropali più ampia (150-300 cm), ed un'armatura costituita da profilati ad H ed integrazione, per la parte emergente, con lastre prefabbricate o tavole in legno inserite tra le ali dei profilati. Le berlinesi costituiscono un'alternativa valida alle opere di sostegno più tradizionali, con diaframmi in c.a. o paratie di pali trivellati accostati, se il terreno non è adatto allo scavo o alla perforazione di elementi di grandi dimensioni, per la presenza di materiale lapideo, se è consentita soltanto la mobilitazione di attrezzature di dimensioni contenute, o qualora non sia richiesto che lo scavo di sbancamento a valle dell'opera avvenga sotto falda.

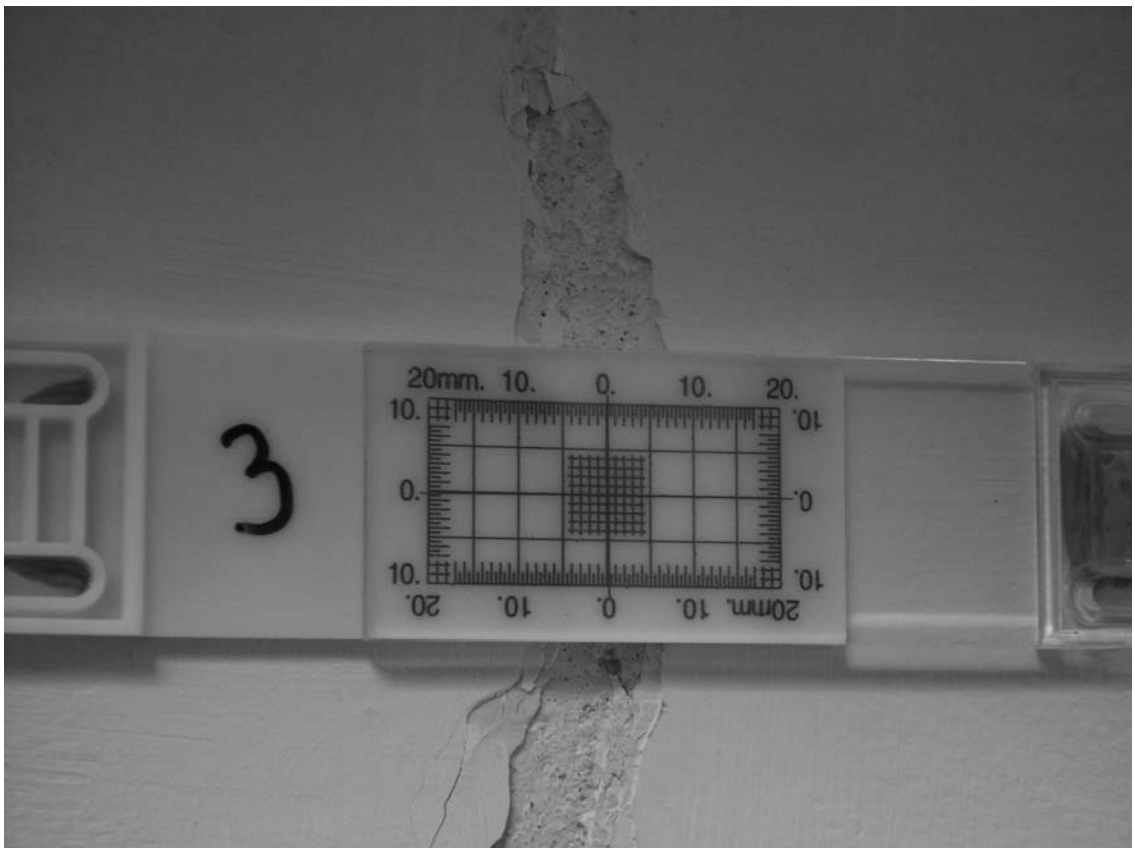
Alla data del primo sopralluogo (aprile 2009), nel cantiere adiacente all'immobile oggetto di perizia, i lavori erano in corso, la struttura in conglomerato cementizio armato ultimata e si stava montando la copertura in legno. L'edificio in costruzione è costituito da due piani sotterranei, da adibire a box, e due piani fuori terra, oltre che sottotetto, ad uso abitativo, i cui pilastri sono stati realizzati in aderenza alla costruzione adiacente. L'edificio sotto osservazione è un fabbricato a corte, con un piano terra (commerciale artigianale), in disuso, piano primo e secondo (residenza), oltre ad un sottotetto non accessibile. La struttura portante, in muratura, risale presumibil-



mente agli anni '50. I collegamenti verticali sono costituiti da una scala comune, in muratura, che si attesta su due ballatoi disposti sulla facciata interna. Le murature perimetrali, in mattoni pieni, sorreggono solai latero-cementizi. Si è verificato che i solai dell'edificio pre-esistente, paralleli al confine di proprietà, con orditura monodirezio-

nale, sono del tipo latero-cementizio gettato in opera.

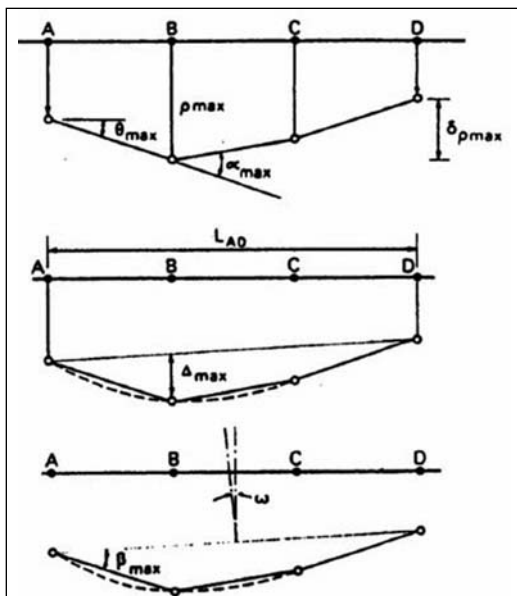
Sull'immobile sono stati posizionati n. 10 fessurimetri, al fine di poterne monitorare lo stato fessurativo che, dopo circa cinque mesi (tempi d'indagine ridotti da esigenze di giustizia), non aveva mostrato segni apprezzabili d'evoluzione.



### Approfondimenti preliminari

I cedimenti delle fondazioni superficiali, spostamenti verticali del piano di posa, costituiscono il risultato delle deformazioni verticali del terreno sottostante la fondazione. I cedimenti fondali sono tra le maggiori, e più diffuse, cause di dissesto statico o di perdita di funzionalità di un'opera. Tra le cause di tali cedimenti, di varia natura, quelle più ricorrenti (Cestelli Guidi, 1975) sono scarsa o errata conoscenza dei suoli e sottodimensionamento delle fondazioni.

Al fine di rendere comprensibile il fenomeno, si ritiene utile esporre i valori ammissibili dei diversi parametri che definiscono cedimenti assoluti e differenziali, riferiti e misurati, come consuetudine, a specifiche variabili, illustrate nella figura che segue (Burland e Wroth, 1974), in cui vengono rappresentati i parametri usati per esprimere cedimenti assoluti e differenziali.



I punti A, B, C e D possono sia rappresentare i plinti isolati di un sistema di fondazioni superficiali, ma anche i punti di un muro, di una trave, d'una fondazione a platea. Assumendo la precedente codifica a guisa di riferimento, i parametri indicatori significativi sono:

- $\rho_i$ , cedimento del punto i (i = A, B, C, D)
- $\rho_{max}$ , cedimento massimo
- $\delta\rho$ , cedimento differenziale, differenza fra i cedimenti di due punti
- $\delta\rho_{max}$ , cedimento differenziale massimo
- $\theta$ , rotazione (pendenza sull'orizzontale della congiungente due punti consecutivi)
- $\theta_{max}$  rotazione massima
- $\omega$  rotazione rigida, pendenza sull'orizzontale della congiungente i due punti A e D di estremità
- $\Delta$  inflessione relativa, distanza del punto i (i = B, C), rispetto alla retta congiungente le estremità
- $\Delta_{max}$  inflessione relativa massima ( $\Delta_{max} = \Delta B$ ),  $\Delta/L$  rapporto d'inflessione, rapporto fra l'inflessione relativa e la lunghezza totale
- $\alpha$  deformazione angolare, (negativa per concavità verso il basso – *jogging*, positiva per concavità verso l'alto – *sagging*), ossia la rotazione totale in un punto
- $\beta$  rotazione relativa o distorsione angolare, rotazione della congiungente due punti rispetto alla retta congiungente le estremità.

Nella Tabella che segue, si riportano i valori di **distorsione angolare limite** suggeriti da Bjerrum (1963), ed in quella successiva i valori ammissibili di alcuni parametri di deformazione secondo Sowers (1962).

Tab. I - Distorsioni angolari limite secondo Bjerrum (1963)

Categoria di danno potenziale	$\tan\beta$
Limite oltre il quale possono sorgere problemi in macchinari sensibili ai cedimenti	1/750
Limite di pericolo per strutture reticolari	1/600
Limite di sicurezza per edifici in cui non si ammettono fessurazioni	1/500
Limite oltre il quale possono apparire le prime fessure nei tamponamenti e difficoltà nell'uso dei carri ponte	1/300
Limite oltre il quale possono essere visibili inclinazioni di edifici alti	1/250
Notevoli fessure in muri di tamponamento e muri portanti in laterizio	1/250
Limite di sicurezza per muri portanti in laterizio con $h/L < 1/4$ .	1/150
Limite oltre il quale si devono temere danni strutturali negli edifici	1/150

Tab. 2 - Valori ammissibili di alcuni parametri di deformazione delle strutture per Sowers (1962)

Tipo di movimento	Fattore di limitazione	Valore ammissibile
Cedimento massimo $\rho_{\max}$ (cm)	Collegamento a reti di servizi	15÷30
	Accessibilità	30÷60
	Probabilità di cedimenti differenziali in:	
	a) murature portanti	2,5÷5
	b) strutture intelaiate	5÷10
	c) ciminiere, silos	7,5÷30
Rotazione rigida Tan $\omega$	Stabilità al ribaltamento	Dipende da posizione baricentro
	Operatività di macchine:	
	a) macchine tessili	0,003
	b) turbogeneratori	0,0002
	c) binari di carro ponte	0,003
	Drenaggio di superfici pavimentate	0,01÷0,02
Rotazione relativa Tan $\beta$	Murature portanti multipiano	0,0005÷0,001
	Murature portanti ad un piano	0,001÷0,02
	Lesioni di intonaci	0,001
	Telai in c.a.	0,0025÷0,004
	Pareti di strutture a telaio in c.a.	0,003
	Telai in acciaio	0,002
	Strutture semplici d'acciaio	0,005

In generale si possono svolgere le seguenti considerazioni:

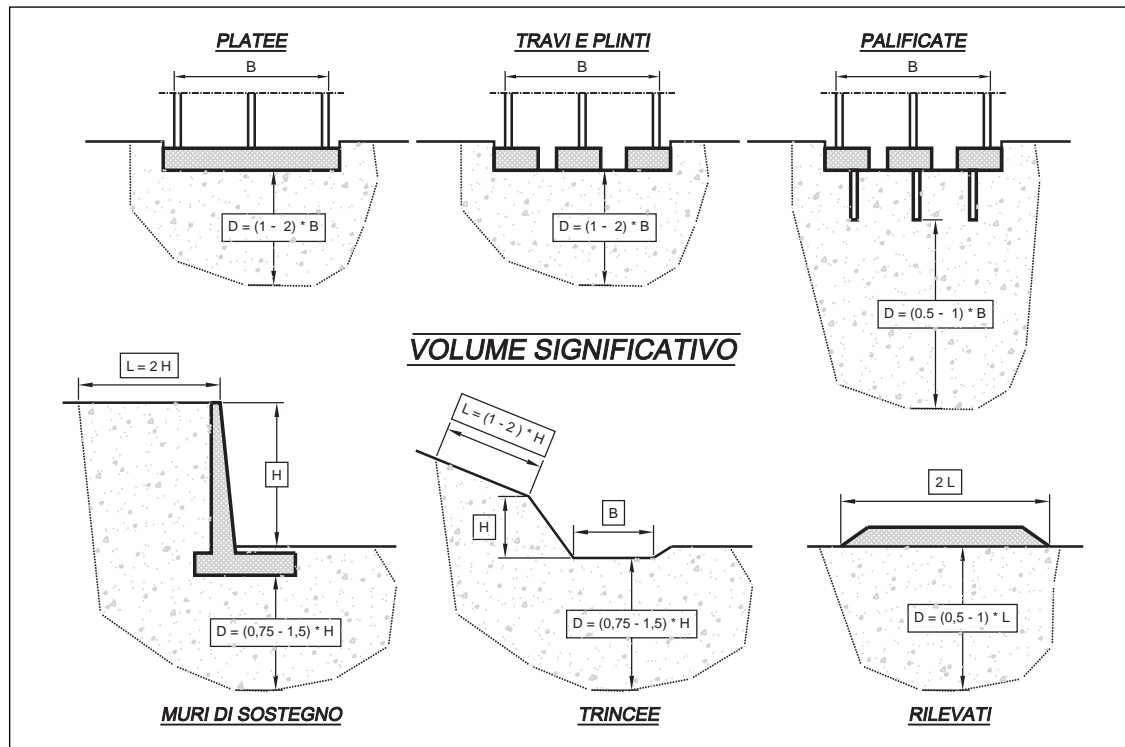
- risultano ammissibili cedimenti maggiori su terreni argillosi che su terreni sabbiosi, che avvengono più gradualmente nel tempo, permettendo alla struttura di adeguarsi;
- gli edifici a telaio sopportano, meglio di edifici a muratura portante, cedimenti differenziali, per la minore fragilità;
- i muri con significative funzioni portanti sopportano meglio deformazioni angolari con concavità verso l'alto che verso il basso;
- le strutture lunghe sopportano meglio le inflessioni relative.

Le deformazioni verticali sopra esposte, conseguenze di un'alterazione dello stato tensionale, possono essere l'effetto del carico trasmesso dalla fondazione stessa o da fondazioni vicine, ma anche di una variazione delle pressioni interstiziali, per esempio a causa di un abbassamento della falda.

Per quanto riguarda il carico trasmesso dalla fondazione, la stima dei cedimenti attesi è necessaria, onde poterne valutare l'ammissibilità in esercizio. Per poter stimare i cedimenti occorre conoscere, nel **volume significativo** del sottosuolo, stratigrafie, stato tensionale, la relazione tensioni-deformazioni-tempo, per tutti i terreni interessati. Il volume significativo rappresenta lo strato di

terreno in grado di subire modifiche tensionali effetto dei carichi deformativi trasmessi dall'opera. Nella figura seguente se ne fornisce indicazione nei casi più generali.

L'estensione del volume significativo può essere influenzato dalle opere esistenti al contorno e nell'intorno, da cedimenti in atto o dalla presenza di falde. Per le opere di stabilità dei pendii o dei fronti di scavi, il volume significativo da prendere in considerazione va sempre al di sotto dei piani di scorrimenti più probabili, onde avere la certezza di prendere in esame anche i terreni nelle condizioni più sfavorevoli. Come per altri problemi geotecnici, la cui complessità rende ardua una soluzione "in forma chiusa", anche la stima dei cedimenti fondali viene affrontata "per parti", con il ricorso a modellazioni parziali, talvolta empiriche, ma accurate quanto serve per fornire una risposta quantitativa affidabile ad ogni passo del procedimento. È essenziale avere il senso della complessità del problema fisico, unitamente alla consapevolezza dei limiti dei modelli e degli schemi adottati. Il calcolo dei cedimenti di fondazioni superficiali deve prevedere, in sequenza seriale, calcolo delle tensioni litostatiche, stima degli incrementi tensionali, adozione delle leggi tensioni-deformazioni-tempo, determinazione sperimentale dei parametri significativi per ciascuno degli strati presenti nel vo-



lume significativo, calcolo delle deformazioni verticali, determinazione della dinamica temporale dei cedimenti.

**Cedimenti di fondazioni superficiali su terreno coesivo saturo**

Il cedimento di una fondazione superficiale, posta su terreno coesivo saturo, si compone di tre parti: cedimento immediato  $S_i$ , cedimento di consolidazione  $S_c$ , e cedimento viscoso  $S_v$ .

$$S = S_i + S_c + S_v$$

A causa della limitata permeabilità del terreno coesivo, con le usuali ipotesi di scheletro solido ed acqua incompressibili, all'istante di applicazione del carico la deformazione avviene in condizioni non drenate, ovvero la deformazione volumetrica è zero ed il cedimento consegue solo a deformazioni di taglio. Se l'area di carico è circoscritta, il cedimento immediato della fondazione è unito ad un sollevamento del terreno limitrofo. Ne deriva che, in condizioni edometriche, il cedimento immediato è zero, poiché sono impediti rigonfiamenti laterali. Le tensioni generate dal carico applicato causano sovrappressioni interstiziali nel terreno fondale che portano alla consolidazione, la quale, in condizioni edometriche, è monodimensionale, mentre per carico applicato su di una striscia è piana, ed è tridimensionale per carico agente su un'area di ampiezza ridotta. Durante la consolidazione, vengono a

ridursi i vuoti nel terreno, con deformazioni volumetriche e cedimenti che crescono nel tempo, sino all'esaurimento delle sovrappressioni interstiziali. A processo di consolidazione terminato, quindi a tensioni efficaci costanti, si possono avere altre deformazioni, cedimenti per viscosità dello scheletro solido (*creep*). Per i terreni aventi grana fine, il cedimento di consolidazione rappresenta la parte predominante del cedimento complessivo. Il cedimento secondario o viscoso, salvo il caso di torbe o argille organiche, viene di norma trascurato.

**Cedimenti di fondazioni superficiali su terreni incoerenti.**

A causa della natura granulare delle sabbie, è più probabile che si verifichino cedimenti assoluti e differenziali importanti a causa delle vibrazioni, effetto di macchinari, terremoti, traffico, piuttosto che non a causa della pressione trasmessa alle fondazioni dalle sovrastrutture. Sono stati, comunque, elaborati vari metodi per la stima dei cedimenti di fondazioni superficiali su sabbia, la maggior parte dei quali sono empirici o semi-empirici, caratterizzati dall'osservazione di casi reali. L'esistenza di molti metodi è indicativa del fatto che nessuno di essi sia sufficientemente accurato. La stima accurata dei cedimenti di fondazioni su sabbia non è invero importante, perché modesti, immediati e tali da esaurirsi durante la costru-

zione. Fa eccezione il caso, infrequente per strutture in calcestruzzo e muratura, possibile per quelle in acciaio, alluminio, legno, in cui il carico accidentale è superiore al carico permanente. Poiché, inoltre, è alquanto difficile prelevare campioni indisturbati di sabbia su cui svolgere prove di laboratorio, i più diffusi metodi di calcolo del cedimento di fondazioni superficiali su sabbie si basano sui risultati di prove in campo. I metodi attualmente più accreditati sono il metodo di *Burland e Burbri-dge* (1985), basato sui risultati di prove penetrometriche dinamiche (SPT) ed il *metodo di Schmertmann* (1970-1978), che trae spunto dai risultati di prove penetrometriche statiche (CPT).

#### **Cedimenti assoluti e differenziali ammissibili.**

Dopo avere stimato l'entità dei cedimenti di una fondazione superficiale, si tratta di valutarne l'ammissibilità, in relazione al manufatto soprastante. Il problema è complesso per una serie di fattori, di cui si richiamano, senza pretesa di esaustività, quelli più rilevanti.

- Il carico trasmesso dalla fondazione al terreno, finora assunto quale dato noto del problema, per entità e distribuzione in realtà non è affatto un dato, ma un'incognita, essendo variabile nel tempo e dipendendo dall'interazione terreno-fondazione-struttura in elevazione. Inoltre, per le strutture in cui il carico variabile è prevalente, o comunque rilevante, occorre valutarne l'aliquota da mettere in conto per la stima dei cedimenti. Infatti, se per la verifica della capacità portante si deve considerare la combinazione di carico più sfavorevole, per il calcolo dei cedimenti si deve distinguere tra cedimenti immediati, prodotti dal carico massimo, e cedimenti di consolidazione, prodotti da un carico medio di lunga durata.
- Una parte non trascurabile del cedimento può essere dovuto a cause diverse dal carico trasmesso dalla fondazione, quali i carichi trasmessi dalle fondazioni vicine, anche se non appartenenti allo stesso organismo strutturale, ma anche dalle modifiche al livello di falda, dal rigonfiamento dei terreni argillosi, da frane, dagli scavi in aderenza, dalle vibrazioni.
- L'ammissibilità dei cedimenti dipende molto dalla vulnerabilità della struttura

portante, tenendo presente che le strutture isostatiche sono meno vulnerabili, e delle strutture portate (tramezzi, infissi, collegamenti impiantistici), oltre che dalla destinazione d'uso.

- A tutto ciò va aggiunta l'aleatorietà nella stima dei cedimenti, sia per il modello geotecnico semplificato, sia per il metodo di calcolo approssimato.

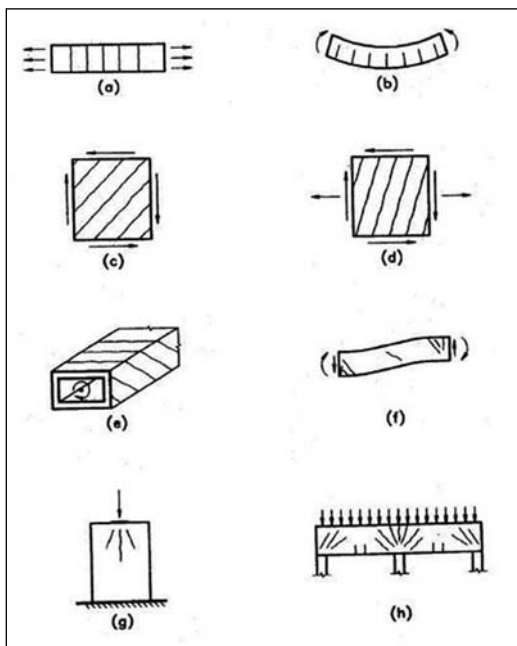
Pertanto, l'Ingegnere dovrà fare tesoro dell'esperienza propria e altrui, avendo particolare attenzione all'osservazione di casi reali.

Un cedimento uniforme non determina variazioni nello stato tensionale della struttura in elevazione: potrebbero essere ammissibili cedimenti anche di valore elevato, purché compatibili con la funzionalità dell'opera. Al contrario, cedimenti differenziali e movimenti di rotazione rigida, alterando le sollecitazioni nella struttura, sono più pericolosi per l'integrità della medesima e di ciò che essa sostiene. Ma, dato che il cedimento differenziale cresce all'aumentare del cedimento assoluto, vengono posti limiti al secondo, in modo da ottenere maggiori garanzie sul rispetto dei cedimenti differenziali.

#### **Elementi per interpretare i segnali di dissesto**

**Stati Fessurativi.** La fessurazione è il segnale visibile di più comune ed immediata percezione e, opportunamente interpretata, è una prima traccia per individuare l'esistenza di comportamenti anomali e per valutarne la gravità. Un primo passo, per comprendere l'origine di uno stato fessurativo, è quello di collegarlo a configurazioni deformate ed a distribuzioni di sforzo che consentano di individuare le direttrici principali di trazione. In materiali fragili, le fessure tendono a svilupparsi normalmente a tali direttrici. L'esame del comportamento delle fondazioni, e l'analisi strutturale dei corpi in elevazione, forniscono utili elementi per comporre in forma coerente distribuzioni di spostamenti, di sforzi e per giustificare gli effetti che ne seguono in termini fessurativi. Gli stati fessurativi riguardanti le strutture in c.a. sono, tra tutti, quelli maggiormente caratterizzati e quelli che suscitano, in genere, allarme maggiore. A questo proposito

va sottolineato che la condizione fessurata è una condizione fisiologica e non patologica delle strutture in c.a. Lo sviluppo della fessura è inizialmente perpendicolare alla direzione principale di trazione nel calcestruzzo: l'andamento del quadro fessurativo segue l'andamento degli sforzi principali di compressione, il cui tracciato può aiutare a visualizzare il flusso delle forze agenti sulla struttura. La diffusione e l'ampiezza delle fessure consentono di stimare lo stato tensionale. Nella figura seguente (Collins, Mitchell, 1991), si mostra una correlazione tra geometria dei principali quadri fessurativi e corrispondenti stati elementari di sollecitazione, con riferimento ai casi di trazione semplice, flessione semplice, puro taglio, flessione e taglio, fessurazione per concentrazioni locali di sforzo dovute a carichi o a reazioni vincolari concentrate di elevata intensità.



Con l'eccezione dei casi elementari di pura trazione e di pura flessione, la direzione degli sforzi principali di compressione, a fessurazione avvenuta, muta con l'incremento di azioni. La direzione iniziale della fessura non viene influenzata dall'armatura. Con l'instaurarsi della fessurazione, i flussi delle compressioni sono influenzati dalle armature. A fessurazione avvenuta, gli sforzi principali di compressione e la giacitura delle fessure nuove tendono verso la direzione dell'armatura che fornisce il maggior contributo irrigidente. Questa variazione nel-

la direzione delle fessure è di rilievo nelle parti di struttura soggette a stati pluriassiali e con armatura unidirezionale.

### Elementi per la diagnosi

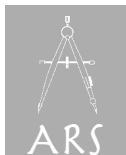
**Valutazioni Statiche Essenziali.** La raccolta di dati sulla struttura ed il loro esame sistematico consentono di impostare correttamente le valutazioni tecniche, per formulare un giudizio sulla sicurezza dell'opera. Tali valutazioni comportano stima di pesi propri e sovraccarichi, esame delle possibili vie di scarico fino alle fondazioni, e la verifica sommaria delle principali strutture portanti. Qualora rimangano elementi di incertezza, per esempio sull'effettiva quantità di armature interne e sul loro stato di conservazione, si potrà scegliere di acquisire maggiori informazioni con nuove ispezioni locali, ricorrere ad indagini meno frequenti ma altrettanto diffusamente disponibili (prove pacometriche, con i martinetti piatti, con indagini soniche ed ultrasoniche, ecc.) oppure, in fase di calcolo, assumendo ipotesi peggiorative. Sempre nei casi di incertezza, può convenire saggiare direttamente la risposta della struttura con una prova di carico, il cui esito positivo è condizione necessaria ma non sufficiente per garantire la sicurezza della struttura. La sperimentazione diretta, oltre a sollecitare la struttura fino ad indurre le massime sollecitazioni previste per il suo esercizio, fornisce utili indicazioni circa un corretto comportamento elastico, sull'entità di spostamenti e deformazioni, sui loro residui allo scarico e sulla sensibilità alle fessurazioni.

### Analisi Sperimentali e Monitoraggio.

Una sperimentazione può ritenersi utile se fornisce grandezze rappresentative, misurate con adeguata precisione, interpretabili teoricamente. È opportuno, prima di procedere con una sperimentazione, svolgere una o più modellazioni delle prove, con simulazioni numeriche, per individuare i parametri significativi, il loro ordine di grandezza, ma anche la precisione degli strumenti in grado di coglierle.

**Analisi Strutturali FEM.** Gli sviluppi dell'analisi strutturale consentono di studiare problemi anche complessi, in diversi settori applicativi. L'efficacia di tali analisi dipende dalla attendibilità dei dati di partenza,





dalla correttezza dell'impostazione del problema, dalla pre-visione delle finalità perseguite. Le informazioni desunte dal monitoraggio e quelle dedotte dall'analisi teorica consentono, nel loro complesso di giungere ad efficaci diagnosi strutturali.

Nel caso della nostra indagine, in conclusione, il fatto che i cedimenti fondali, subiti dall'edificio pre-esistente, abbiano generato fessurazioni tanto più marcate quanto più ci si approssimasse all'edificio di nuova formazione, trova coerenza con la ricostruzione della dinamica dei fenomeni osservati ed una lettura assolutamente coerente con la diagnostica strutturale.

#### Bibliografia d'approfondimento

- 1 Cestelli Guidi C., (1975), *Geotecnica e Tecnica delle Fondazioni*, U. Hoepli Editore.
- 2 Yamaguchi E., *Structural Engineering Handbook – Basic Theory Of Plates And Elastic Stability*, 1999
- 3 Hicks, *Standard Handbook Of Engineering Calculations*, 4th ed, 2004
- 4 Lemaitre D., *Engineering Damage Mechanics – Ductile, Creep, Fatigue and Brittle Failures*, 2005
- 5 Braja, *Principles of Geotechnical Engineering*, 5th ed, 2006
- 6 Cicchiello P., (2010), *Diagnostica Strutturale*, Maggioli Editore, S.Arcangelo di Romagna
- 7 Di Francesco R., (2008), *Lesioni degli edifici, Applicazione di geotecnica e geofisica nell'analisi dei cedimenti delle fondazioni*, U. Hoepli Editore, Milano
- 8 McLean A.C., Gribble, C.D., (1983), *Geology for civil engineers*, E&FN Spon
- 9 Hearn E.J., (1997), *Mechanics of materials* 2, 3rd ed, Butterworth Heinemann