



MODELLI GENERALI PER LA SPIEGAZIONE CAU- SALE DI COLLASSI STRUTTURALI

S. Arangio
Università degli Studi di Roma La Sapienza

F. Bontempi
Università degli Studi di Roma La Sapienza

C. Crosti
Università degli Studi di Roma La Sapienza

SOMMARIO

I crolli (o collassi o crisi) strutturali sono tendenzialmente eventi speciali, molto infrequenti nella Società Civile, contrassegnati da una dinamica complessa. Data questa generale complessità, la spiegazione e l'individuazione delle cause e della loro evoluzione è, dunque, operazione non immediata e non semplice.

Uno dei punti di partenza, in questo compito, consiste nel riconoscere che una crisi strutturale nel suo sviluppo temporale presenta generalmente dei caratteri ripetitivi. Tra questi caratteri, come illustrato nei riferimenti bibliografici sotto riportati, uno che riveste una particolare importanza è il fatto che, se da una parte si può individuare una causa scatenante ben precisa, anche se in genere di modesta entità, dall'altra, questa causa è strettamente correlata a tutto un retrofondo di concause, spesso di ben maggiore entità, che preparano la possibilità dell'evento "crollo". Il presente contributo vuole appunto rivedere questi concetti e illustrarne l'attualità e l'applicabilità.

SUMMARY

The structural collapses (or failures or crisis) are very uncommon events in Civil Society, with a complex dynamic. Given this general complexity of a structural collapse, the explanation and the identification of its causes and its development are, therefore, not immediate and simple.

One of the starting points in this task is to recognize that a structural crisis in its temporal development usually has repetitive characters. Among these characters, as shown in the references below, is that, if on one hand one can identify a triggering factor, although typically of small relevance, on the other hand this opens the way to a whole background of reasons, often of much greater magnitude, which prepare the possibility of this event "collapse." The aim of this paper is to review these concepts and show their relevance and applicability.

1. INTRODUZIONE

Il processo di ricerca e di indagine volto a risalire alle cause di una crisi strutturale e alla sua evoluzione temporale è un'attività delicata e difficile che va a svelare il comportamento intimo di una struttura e le sue relazioni con l'ambiente in cui è inserita. E' inoltre fondamentale indagare, operazione estremamente delicata e eticamente profonda, sulla condotta dei vari attori coinvolti (progettista, costruttore, ...utenti).

Il problema da risolvere è capire e spiegare perché si sia verificata una crisi strutturale, sia essa un crollo di un'intera costruzione o di una parte rilevante di essa o una rottura di un elemento strutturale, e come essa si sia sviluppata. In considerazione della rilevanza per la Società Civile delle conseguenze di una crisi strutturale, il problema comprende anche l'individuazione delle responsabilità civili e penali.

La Fig. 1 riporta un tipico schema di lavoro tracciato su una lavagna in cui sono via via segnati e collegati gli aspetti che possono concorrere alla risoluzione del problema. La soluzione va trovata per via iterativa, attraverso l'esame della documentazione e le analisi numeriche e sperimentali, oltre alla possibile escussione di attori coinvolti. Nel suo complesso, si tratta di un processo incrementale e non lineare che per convergere ha bisogno di precise strategie e tattiche, allo stesso tempo valide dal punto di vista concettuale e applicabili dal punto di vista pratico.

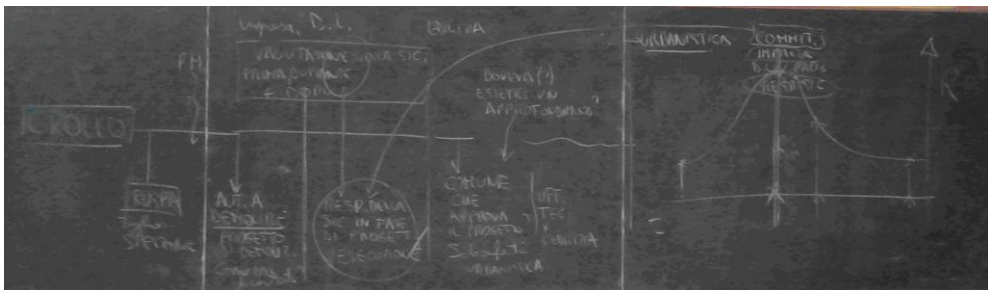


Figura 1. Schema di lavoro nel processo di ricerca e di indagine volto a risalire alle cause di una crisi strutturale e alla sua evoluzione temporale.

Questo contributo vuole portare all'attenzione alcuni concetti che, in base all'esperienza degli autori, possono essere utili nell'impostazione e nello svolgimento delle attività volte alla ricerca delle cause e delle modalità di una crisi strutturale.

I primi due concetti, complessità (*COMPLEXITY*) e sviluppo di una crisi secondo il modello di Reason (*SWISS CHEESE MODEL*), rimandano a caratteristiche generali che possono essere presenti nei sistemi strutturali e nei loro collassi e che quindi devono essere considerati da chi svolge le operazioni peritali.

Per tenere conto di queste due caratteristiche e fornire delle indicazioni operative, sono in seguito presentati i concetti di scomposizione (*BREAKDOWN*), sviluppo temporale (*TIME-LINE*) e profilo di responsabilità (*RESPONSABILITY PROFILE*).

Infine, è richiamato il concetto di fidatezza strutturale (*dependability*) come antidoto, ovvero attitudine progettuale, allo sviluppo di crisi strutturali.

2. COMPLEXITY

Una definizione di complessità (*COMPLEXITY*) interessante dal punto di vista operativo può essere data considerando la Fig.2 ripresa da Perrow (1984). Per l'analisi di un qualsiasi sistema o per la risoluzione di un problema, s'immagina di introdurre in uno spazio tridimensionale tre assi che misurano rispettivamente:

1. i caratteri non lineari presenti nel sistema o nel problema: ad esempio, considerando gli aspetti prettamente meccanici, si può avere non linearità di materiale, che può essere debole, come nel caso di presenza di duttilità, o forte, come nei casi di non resistenza a trazione; considerando un livello più alto, di elemento o di struttura, i casi di instabilità possono introdurre aspetti altamente non lineari;
2. le interazioni e le connessioni fra diverse parti del sistema o fra diversi aspetti del problema; se questi accoppiamenti sono stretti, si ha una situazione complessa, a differenza di quella in cui gli accoppiamenti sono laschi, esistendo margini di comportamento e di risorse (*system slack*);
3. le incertezze o le ambiguità presenti nel sistema o nel problema; possono essere aleatorietà connesse a incertezze stocastiche o ambiguità e incertezze epistemiche.

Nel sistema di riferimento così definito, la complessità aumenta man mano che ci si allontana dall'origine degli assi.

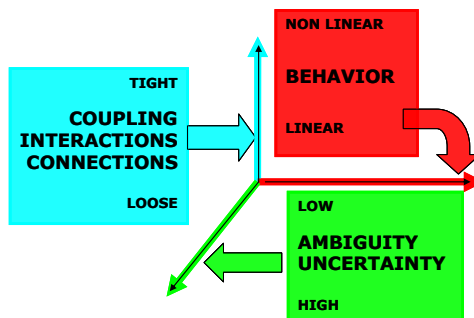


Figura 2. Aspetti che concorrono dalla complessità di un problema.

Un esempio concreto, interessante e attuale, di situazione strutturale che presenta i tre aspetti sopra indicati, e quindi deve essere giudicata come complessa, è quella delle costruzioni esistenti inserite in un aggregato edilizio.

Il concetto di costruzione esistente è stato introdotto dal D.M.14.09.05 ed è attualmente presentato nel Capitolo 8 del D.M.14.01.08, capitolo che definisce i criteri generali per la valutazione della sicurezza e per la progettazione, l'esecuzione ed il collaudo degli interventi sulle costruzioni esistenti. È definita costruzione esistente quella che abbia, alla data della redazione della valutazione di sicurezza e/o del progetto di intervento, la struttura completamente realizzata. I criteri generali di cui al paragrafo 8.2 riportano:

La valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi su costruzioni esistenti devono tenere conto dei seguenti aspetti:

- la costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione;
- possono essere insiti e non palesi difetti di impostazione e di realizzazione;
- la costruzione può essere stata soggetta ad azioni, anche eccezionali, i cui effetti non siano completamente manifesti;
- le strutture possono presentare degrado e/o modificazioni significative rispetto alla situazione originaria.

Nella definizione dei modelli strutturali, si dovrà, inoltre, tenere conto che:

- la geometria e i dettagli costruttivi sono definiti e la loro conoscenza dipende solo dalla documentazione disponibile e dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive;
- la conoscenza delle proprietà meccaniche dei materiali non risente delle incertezze legate alla produzione e posa in opera ma solo della omogeneità dei materiali stessi all'interno della costruzione, del livello di approfondimento delle indagini conoscitive e dell'affidabilità delle stesse;
- i carichi permanenti sono definiti e la loro conoscenza dipende dal livello di approfondimento delle indagini conoscitive.

Si dovrà prevedere l'impiego di metodi di analisi e di verifica dipendenti dalla completezza e dall'affidabilità dell'informazione disponibile e l'uso, nelle verifiche di sicurezza, di adeguati "fattori di confidenza", che modificano i parametri di capacità in funzione del livello di conoscenza relativo a geometria, dettagli costruttivi e materiali.

Dalla O.P.C.M. 3274/2003 - §11.5.4.3.2 Aggregati edilizi, si ricava invece la definizione di aggregato edilizio:

Un aggregato edilizio è costituito da un insieme di parti che sono il risultato di una genesi articolata e non unitaria, dovuta a molteplici fattori (sequenza costruttiva, cambio di materiali, mutate esigenze, avvicinarsi dei proprietari, etc.). Nell'analisi di un edificio facente parte di un aggregato edilizio occorre tenere conto perciò delle possibili interazioni derivanti dalla contiguità strutturale con gli edifici adiacenti, connessi o in aderenza ad esso. A tal fine dovrà essere individuata, in via preliminare, l'unità strutturale (US) oggetto di studio, evidenziando le azioni che su di essa possono derivare dalle unità strutturali contigue.

Ove necessario, tale analisi preliminare dovrà considerare l'intero aggregato, al fine di individuare le relative connessioni spaziali fondamentali, con particolare attenzione al contesto ed ai meccanismi di giustapposizione e di sovrapposizione.

...

Tra le interazioni strutturali con gli edifici adiacenti si dovranno considerare: carichi (sia verticali che orizzontali, in presenza di sisma) provenienti da solai o da pareti di US adiacenti; spinte di archi e volte appartenenti ad US contigue; spinte provenienti da archi di contrasto o da tiranti ancorati su altri edifici. La rappresentazione dell'US attraverso piante, alzati e sezioni permetterà di valutare la diffusione delle sollecitazioni e l'interazione fra le US contigue.

Oltre a quanto normalmente previsto per gli edifici non disposti in aggregato, dovranno essere valutati gli effetti di: spinte non contrastate causate da orizzontamenti sfalsati di quota sulle pareti in comune con le US adiacenti; effetti locali causati da prospetti non allineati, o da differenze di altezza o di rigidità tra US adiacenti, azioni di ribaltamento

e di traslazione che interessano le pareti nelle US di testata delle tipologie seriali (schiere).

La rilettura di questi stralci normativi alla luce della definizione operativa di complessità data, permette di sottolineare gli aspetti di non linearità, interazione e incertezza presenti nel caso di costruzioni esistenti inserite in aggregati edilizi.

Infine, prima di chiudere questa sezione sulla complessità di un sistema o di un problema, è utile considerare due altri concetti che portano ad affinare la complessità in termini strutturali.

Il primo fa riferimento alla **sensibilità di sistema o di un problema a un parametro**: la Fig.3 discrimina fra un parametro che può influenzare sensibilmente la risposta (a sinistra), rispetto a un parametro che risulta non determinante ai fini della risposta (a destra).

La traduzione in termini meccanici del concetto di sensibilità può portare al concetto di **robustezza strutturale**: la Fig.4, mostra come la qualità del sistema strutturale indicato dalla curva in verde, nonostante assuma un valore più alto in fase iniziale, decresca bruscamente nel tempo, mentre la qualità del sistema rappresentato dalla curva in blu, nonostante parta da un livello inferiore, decresce molto meno, indicando quindi un comportamento robusto del sistema.

Situazioni strutturali in cui ci sia alta sensibilità a qualche parametro o mancanza di robustezza possono essere complesse e portare a collassi disastrosi.

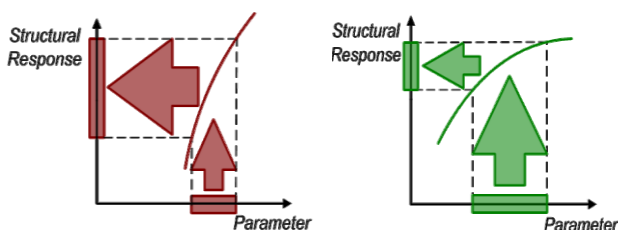


Figura 3. Sensibilità della risposta strutturale rispetto a un parametro: fra i due casi, quello di sinistra è il più rilevante e quindi critico.

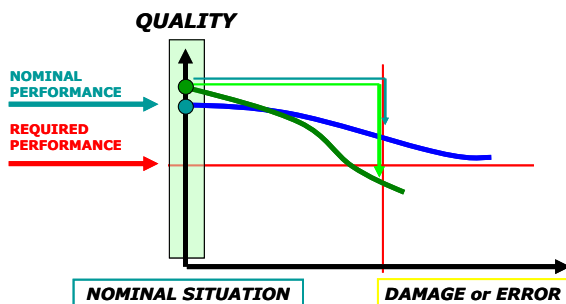


Figura 4. Robustezza strutturale: la costruzione con la risposta in blu è robusta a differenza della costruzione con la risposta in verde.

3. SWISS CHEESE MODEL

E' interessante notare che, malgrado la enorme varietà di situazioni accidentali e la peculiarità di ciascuna di esse, esiste un modello generale in grado di rappresentare in termini sintetici la genesi e lo sviluppo di un disastro. Infatti, secondo Reason (1990), si può immaginare un modello di sviluppo composto da una serie di passi (Fig.5). Questi passi possono essere concettuali o reali e possono riguardare aspetti materiali o comportamenti umani: ciascuno di essi può essere visualizzato come una parete ideale.

E' esperienza comune che nessuno di questi passi sia esente da errori o deficienze: queste debolezze di ciascuno strato, più o meno grandi, rappresentano falle (*faults & errors*) nel sistema. Se queste falle si allineano, allora il sistema può essere perforato e quella che era una minaccia (*hazard*) si concretizza in una crisi (*failure*).

In altri termini, un sistema strutturale può essere pensato come composto da uno strato di *layer* difensivi: ciascuno di questi layer può essere imperfetto e di per sé non è detto che queste singole mancanze portino al collasso del sistema. Questo avviene solo quando più mancanze si coagulano in un fenomeno critico. Il nome inglese di questo modello *SWISS CHEESE MODEL* (formaggio svizzero con i buchi!), materializza queste considerazioni.

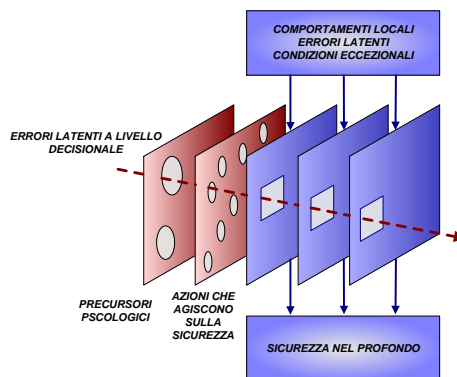


Figura 5. Modello generale di sviluppo di un disastro (Swiss Cheese Model).

4. BREAKDOWN

Nei due paragrafi precedenti, si è ricordata la nozione di complessità e si è introdotto un modello generale che spiega la genesi e lo sviluppo degli incidenti, dei collassi strutturali o dei disastri. Sebbene il quadro appaia sconcertante in termini di capacità di identificazione delle cause e di spiegazione della dinamica, esistono due strumenti operativi che permettono di raggiungere lo scopo.

Il primo strumento per affrontare queste situazioni è basato sulla scomposizione gerarchica/funzionale di un problema o di un sistema (*BREAKDOWN*), come illustrato in Fig.6. A tale quadro si arriva usando sia una strategia *top-down* (approccio deduttivo), sia una strategia *bottom-up* (approccio induttivo): nella realtà, l'approccio è di tipo misto, con l'utilizzo di

metodi di *reverse engineering* e tecniche di *back-analysis*.

Sempre dal punto di vista operativo, la prima e fondamentale applicazione del concetto di scomposizione riguarda la strutturazione del quesito peritale che si deve affrontare, come illustrato nello schema di Fig. 7: qui, a parte i dettagli volutamente resi non leggibili, sono evidenti 3 parti importanti da analizzare, composte, rispettivamente da 7, 2 e 3 punti specifici.

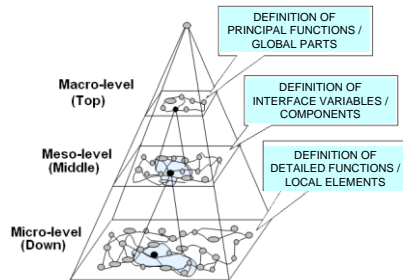


Figura 6. Scomposizione gerarchica/funzionale di un problema / di un sistema.

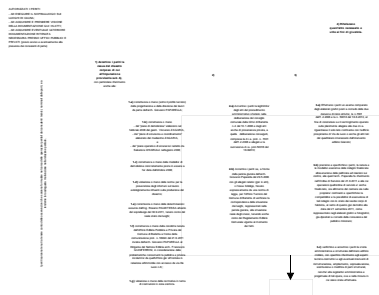


Figura 7. Esempio di scomposizione logica del quesito peritale.

5. TIMELINE

Al punto precedente si è visto come il problema dell'individuazione delle cause di un collasso può essere scomposto con una rappresentazione di tipo spaziale; in questo paragrafo è invece presentata una rappresentazione temporale dei passi che hanno condotto al collasso stesso. Si parla quindi di una scomposizione temporale (*TIMELINE*), come illustrata in Fig. 8. In questo schema sono disposti lungo una catena i vari momenti (*step*) che ritenuti significativi per la struttura, partendo dalla sua concezione, passando per tutte le fasi autorizzative e la fase di progettazione, arrivando alla sua materiale realizzazione e infine all'evento che ha scatenato il collasso.

In ciascuna di queste fasi è differente l'oggetto dell'attenzione. Ad esempio, infatti:

1. nella fase amministrativa / autorizzativa ci si concentra sulla possibilità e sulla correttezza dell'intervento sul piano urbanistico e sul piano edilizio;
2. nella fase progettuale / strutturale si entra nel merito della concezione della costruzione, ad esempio nella comprensione del sistema strutturale esistente nel caso di

un edificio crollato interno ad un aggregato edilizio; si verifica il rispetto del quadro normativo tecnico e le modalità dello sviluppo del progetto ovvero della sua elaborazione e redazione;

3. nella fase realizzativa, l'attenzione è rivolta sia agli operatori impegnati nell'attività costruttiva sia a chi sta intorno alla stessa, attraverso ad esempio: la redazione del piano di sicurezza e coordinamento; la redazione del piano di demolizione come parte del precedente; la redazione del piano operativo di sicurezza; le attività di controllo da parte degli attori coinvolti (committente, direttore lavori, responsabile sicurezza, ...); le attività di vigilanza da parte delle istituzioni.

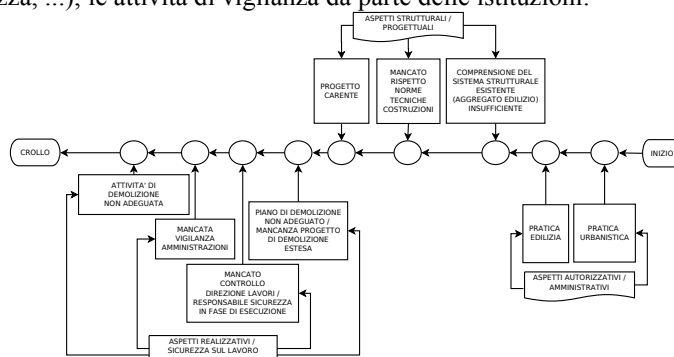


Figura 8. Esempio di sviluppo temporale di una situazione che porta ad un crollo (da destra a sinistra).

Sebbene per semplicità individuate come distinte e consecutive, tra queste fasi esistono sovrapposizioni e influenze reciproche che vanno a sovrapporsi e a intrecciarsi.

Nella costruzione di questo sviluppo temporale, nello studio del caso in esame, a poco a poco appare che uno di questi *step* è centrale nello sviluppo del collasso: questo diventa lo **snodo causale del processo**, in altre parole il punto attorno cui ruota la dinamica che ha portato alla crisi. La Fig.9, illustra come, individuato lo snodo causale, per passi successivi, si possono ordinare in cascata gli altri *step* che hanno portato al disastro. La vicenda nel suo sviluppo è così compresa. Va rilevato che, coerentemente con il modello di Reason visto prima, il disastro, sia pure attivato da una causa contingente (riportata con il numero 4 in Fig.9), è stato però preparato e reso possibile da motivi più profondi, distanti anche nel tempo, e di solito quindi non individuabili da una lettura superficiale dell'evento.

6. RESPONSABILITY PROFILE

Associato allo sviluppo temporale delle vicende che hanno condotto al collasso, è individuabile un profilo che misura le responsabilità dei vari attori, come rappresentato schematicamente in Fig.10 (*RESPONSABILITY PROFILE*). Anche questa rappresentazione è coerente con Reason, per il quale non è l'ultimo attore che è da ritenere il maggiore, o perfino, l'unico responsabile del disastro, ma deve essere valutata l'intera storia.

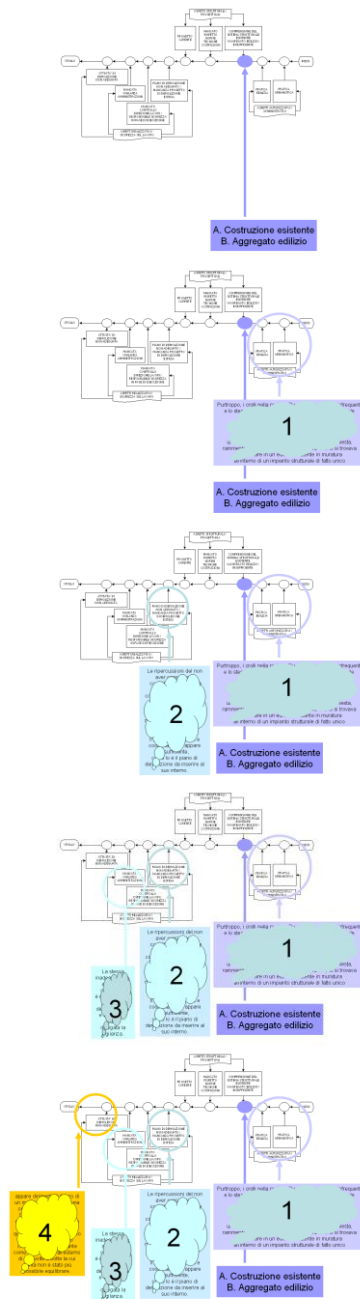


Figura9. Esempio di sviluppo temporale in cascata di una situazione che porta ad un collasso dopo l'individuazione dello snodo causale.

