

Verso una definizione quantitativa di classi di rischio sismico degli edifici

Gian Michele Calvi¹ ■

Premesse dal passato

Sono passati più di trent'anni da quando, studente del quarto anno, ascoltavo il professor Giorgio Macchi parlarci di metodi probabilistici, semiprobabilistici e di stati limite per il progetto, l'analisi e la verifica delle strutture. Citava Julio Ferry Borges e il *Joint Committee on Structural Safety* e faceva riferimento al primo *CEB/FIP² Model Code*, che venne poi trasferito pressoché integralmente nelle norme italiane. Era un metodo alternativo e opzionale, che pochissimi usavano.

Negli anni successivi molti importanti personaggi (ad esempio Ditlevsen, Madsen, Krenk, Lind³) hanno sviluppato concetti di progettazione strutturale ottimizzata sulla base di costi globali da stimarsi sull'intera vita dell'opera (*structural design optimization based on life cycle costs*), ma se ci si domandasse quanto questi concetti siano usciti dagli ambiti accademici per diventare reali strumenti di progettazione temo che le risposte sarebbero deprimenti. Di argomenti anche più esoterici da porre a base della progettazione (*life-cycle cost analysis; life quality index – LQI*) si parla da circa venti anni, senza che gli *ingegneri veri* ne siano nemmeno sfiorati.

Nel mondo dell'ingegneria sismica, è inevitabile accettare logiche probabilistiche⁴, quanto meno in relazione alla bassa probabilità del verificarsi delle azioni di progetto ed alla conseguente accettazione di stati di danno più elevati. Tuttavia, anche in questo ambito, due problemi hanno molto limitato l'uso reale di concetti probabilistici: la difficoltà del linguaggio e la credibilità in ambito applicativo degli scienziati che ne sviluppavano la teoria.

È ben noto che negli Stati Uniti si parlava di *Per-*

formance Based Earthquake Engineering dalla fine degli anni ottanta⁵, ma nonostante l'intelligenza dell'approccio sviluppato e proposto da Allin Cornell con il *SAC Project⁶*, il messaggio non sarebbe arrivato molto lontano senza l'intervento di Helmut Krawinkler⁷, che grazie alla sua reputazione da ingegnere progettista e al suo contributo alla semplificazione del linguaggio, lo ha reso più credibile e digeribile agli *ingegneri veri*.

Senza implicare indebiti accostamenti ai grandi nomi che ho voluto citare, vorrei tentare, nelle poche pagine che seguono, di mettere qualche pulce nell'orecchio agli *ingegneri veri*.

Forse ci si può fare qualcosa con l'*expected annual loss*.⁸

Convenzionalità e probabilità nella sicurezza sismica

Da un punto di vista concettuale, il livello minimo di sicurezza sismica da attribuire ad un edificio di nuova costruzione si basa su due scelte fondamentali:

- la definizione del terremoto di progetto, in termini ad esempio di periodo medio di ritorno o di probabilità di superamento annua di un'intensità dello scuotimento del terreno;
- la probabilità di collasso accettata per un edificio nel caso in cui si verifichi l'evento di progetto.

Ad esempio, se il periodo di ritorno medio dell'intensità di progetto è fissato in 500 anni (oppure se la probabilità di superamento annua è fissata in circa 0.002) e se la probabilità di collasso accettata in tale evento è fissata nell'1%, allora la probabilità di collasso annua

¹ Presidente, Fondazione Eucentre - Centro Europeo di Formazione e Ricerca in Ingegneria Sismica, Pavia.

² CEB: *Comité Européen du Béton*, fondato nel 1953 (da Balency-Béarn, Nennig, Base, Rüschi, Torroja, Wästlund e altri). FIP: *Fédération Internationale de la Précontrainte*, fondata nel 1952 (da Freyssinet, Torroja, Magnel e altri).

³ Ditlevsen O. and H.O. Madsen (1996) - *Structural Reliability Methods*, Wiley; Madsen H.O., Krenk S. and N.C. Lind (1986) - *Methods of structural safety*, Prentice Hall.

⁴ Pinto P.E., Giannini R., Franchin P. (2007) - *Seismic Reliability Analysis of Structures*, IUSS Press.

⁵ SEAOC (1995) - *Vision 2000, A framework for performance-based engineering*, Structural Engineers Association of California, Sacramento

⁶ Cornell C.A., Jaylender F., Hamburger R.O., Foutch D.A. (2002) - Probabilistic basis for 2000 SAC Federal Emergency Management Agency Steel Moment Frame Guidelines. *Journal of Structural Engineering*. **128**:4. 526-553.

⁷ Zareian F. and Krawinkler H. (2012) - Conceptual performance-based seismic design using building-level and story-level decision support system, *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*. DOI: 10.1002/eqe.2218.

⁸ Una presentazione più estesa di quanto segue è riportata nella pubblicazione seguente. Ne farò una traduzione in italiano per il prossimo numero di questa rivista. Calvi G.M. (2012) - *Alternative Choices and Criteria for Seismic Strengthening*, Invited Keynote Lecture, Proceedings of the 15th WCEE, Lisbon.

accettata è circa pari a 0.00002, ovvero a circa due diviso centomila.

È evidente che si tratta in entrambi i casi di valori convenzionali, ma è altrettanto evidente che utilizzare un terremoto di progetto più raro, ovvero prescrivere una probabilità di collasso più bassa, comporta maggiori costi e possibili cambiamenti, anche rilevanti, delle tecniche di costruzione da utilizzare.

D'altra parte, nel caso di nuove costruzioni i costi e le difficoltà progettuali e costruttive crescono in modo sostanzialmente proporzionale alla probabilità di collasso accettata ed, entro certi limiti, crescono in modo meno che lineare rispetto alla riduzione della probabilità di collasso (cioè se si riduce di dieci volte la probabilità di collasso annua i costi crescono, ma non di dieci volte).

Risorse, necessità e priorità negli interventi sull'esistente

Quando si considera il problema degli edifici esistenti, le cose, ovviamente, cambiano:

- ridurre la probabilità di collasso può comportare costi molto diversi da caso a caso;
- può essere relativamente semplice raggiungere una certa probabilità di collasso e molto difficile raggiungerne una di poco inferiore;
- conseguentemente potrebbe risultare antieconomico voler raggiungere ad ogni costo una certa probabilità di collasso prescritta a priori.

Va inoltre considerata l'enorme sproporzione tra le necessità di riduzione del rischio e le risorse disponibili, in termini di denaro, tecnici, imprese, tempo.

In considerazione di quest'ultima osservazione, sono stati sviluppati diversi metodi per definire razionalmente una priorità di intervento e di uso delle risorse, in generale considerando come parametro significativo il livello di rischio sismico di un edificio.

Va sottolineato che con la parola *rischio* si intende una combinazione di *pericolosità* (= probabilità che si verifichi un evento sismico di determinata intensità), *vulnerabilità* (= probabilità che si produca un determinato livello di danno a seguito di un evento di determinata intensità) ed *esposizione* (= valutazione probabilistica delle conseguenze sociali ed economiche determinate dal raggiungimento di determinati livelli di danno).

Sulla base della valutazione del livello di rischio, nel passato sono state anche assegnate risorse pubbliche, in una logica di prevenzione, ovvero di riduzione del rischio, applicando quindi una logica basata sul principio "*interveniamo prioritariamente dove il rischio è maggiore*".

Uso ottimale delle risorse

Mi pare evidente che su un piano strettamente razionale di uso ottimale delle risorse, la logica dovrebbe piuttosto essere del tipo "*interveniamo prioritariamente dove a parità di impiego di risorse si produce una maggiore riduzione del rischio*".

È peraltro altrettanto chiaro che l'applicazione di una logica di questo tipo implica valutazioni più complesse, che includono la definizione di possibili modalità di intervento, la stima del loro costo e la stima dei benefici ottenibili, quantificando in termini economici il valore della riduzione del rischio attesa.

Valutazione del rischio

Una corretta valutazione del rischio sismico ed una sua quantificazione economica, comporta una serie di analisi successive, talvolta rappresentate nel mondo scientifico con un integrale triplo di non immediata comprensione, che possono essere così riassunte:

1. Analisi di pericolosità – per valutare la probabilità che al sito di costruzione venga superato un certo valore di un parametro significativo dell'input, per esempio un certo valore di accelerazione al terreno.
2. Analisi strutturale – per valutare quali sono le probabili conseguenze sull'edificio in termini di parametri di risposta (ad esempio la deformazione ad un piano) in funzione del parametro di input.
3. Analisi del danno – per quantificare i danni strutturali e non strutturali conseguenti al raggiungimento di determinati livelli dei parametri di risposta.
4. Analisi dei costi – per stimare i costi diretti ed indiretti conseguenti al raggiungimento di determinati livelli di danno. La quantificazione economica può essere espressa in percentuale del costo stimato di ricostruzione.

Stima delle perdite attese

Il rischio può essere espresso in termini di perdite annue medie attese, normalmente indicate in letteratura con la sigla **EAL**, che sta per *expected annual loss*.

È utile fare qualche esempio per capire che cosa si intende con EAL.

Si consideri ad esempio il caso (accademico) di un edificio per il quale si stima che l'intensità dello scuotimento del terreno con periodo di ritorno medio di 2000 anni induca il collasso (quindi una perdita corrispondente al costo di ricostruzione, RC), mentre qualsiasi intensità del moto con periodo di ritorno più breve non induca nessun danno. In tal caso le perdite annue medie

attese sono circa pari a: $100\% / 2000 = 0.05\%$ di RC. Cioè mediamente si perde ogni anno lo 0.05% del costo di costruzione.

Si consideri invece un edificio in cui si prevedono perdite pari al 30% del costo di ricostruzione per l'intensità del moto con periodo di ritorno di 200 anni. In tal caso si ha $EAL \approx 30 / 200 = 0.15\%$ di RC.

Nel caso reale di combinazione di intensità del moto con probabilità diversa che producono livelli di danno diversi le perdite annue attese risultano da un integrale.

Studi effettuati da diversi ricercatori indicano che le perdite annue attese per un edificio moderno costruito secondo norme sismiche "normali" sono normalmente comprese tra 0.5 e 1.0% del costo di ricostruzione, mentre per edifici costruiti in assenza di norme sismiche è raro riscontrare valori inferiori al 2.5% di RC.

Tecniche di intervento

Le possibili modalità di intervento per il miglioramento della risposta sismica di un edificio (ovvero per la riduzione della sua vulnerabilità), possono essere suddivise in quattro categorie fondamentali:

- Rinforzo ed incremento delle capacità deformative di elementi strutturali esistenti (ad esempio travi, pilastri, fondazioni, solai) mediante l'applicazione di cerchiature in calcestruzzo, acciaio, fibre di carbonio, fibre di vetro.
- Inserimento, all'esterno o all'interno dell'edificio di nuovi elementi strutturali, quali ad esempio pareti in calcestruzzo o telai in acciaio.
- Introduzione di sistemi di isolamento sismico, alla base o ad un certo piano dell'edificio.
- Aggiunta di elementi atti a ridurre la domanda conseguente all'azione sismica, ad esempio dissipatori viscosi o masse accordate.

È possibile stimare il costo di ciascun tipo di intervento su un edificio in via preliminare, sulla base di analisi relativamente semplici. È ovvio che le stime dei costi possono variare molto da caso a caso, ma se si volesse indovinare un valore medio, sia pure, ripeto, caratterizzato da grande dispersione, si potrebbe azzardare un valore dell'ordine dei 250 euro per metro quadrato, che corrisponderebbe a circa il 20% di un valore di ricostruzione ipotizzato nell'ordine dei 1200 euro per metro quadrato.

Analisi costi – benefici

L'esecuzione di diverse combinazioni di interventi comporta ovviamente costi diversi ed induce riduzioni diverse delle perdite annue attese, potenzialmente influenzando in modo diffe-

rente su livelli di prestazione corrispondenti ad eventi con diversa probabilità di accadimento.

Ad esempio un intervento di isolamento manterrebbe piccole perdite per terremoti deboli, non in grado di attivare il sistema, ridurrebbe pressoché allo stesso livello le perdite attese per eventi più rari, sino all'evento teoricamente in grado di distruggere il sistema di isolamento.

Un intervento con aggiunta di pareti potrebbe ridurre le perdite attese a causa di spostamenti relativi (l'edificio diventa più rigido) ed aumentare le perdite attese a causa dei livelli di accelerazione ai piani (una maggiore rigidità può comportare accelerazioni più elevate).

È concettualmente possibile stimare la riduzione delle perdite medie annue attese (il solito EAL) in caso di interventi diversi, caratterizzati a loro volta da costi diversi, e calcolare conseguentemente il tempo necessario per raggiungere il punto di pareggio fra le somme investite e la riduzione delle perdite.

Si noti che tra le perdite attese vanno considerate quelle indirette connesse alla temporanea non utilizzabilità dell'edificio. Nel caso di un edificio residenziale, ad esempio, si potrebbe stimare che una persona occupi mediamente 25 metri quadrati ed una sua ricollocazione altrove costi 50 euro al giorno. Con tali ipotesi è immediato calcolare perdite indirette pari a circa lo 0.17 % del costo di ricostruzione per ogni giorno di inagibilità. Tale valore corrisponde all'intero costo di ricostruzione trascorsi 588 giorni. Le conseguenze sono evidenti, anche in relazione alle logiche di costruzione temporanea post evento.

Un parametro per la classificazione sismica di un edificio

Il parametro che sintetizza le perdite annue attese – EAL – può essere usato come un parametro globale di valutazione della "qualità sismica" di un edificio, meglio, con un'espressione più accurata, della sua "resilienza sismica", che si potrebbe indicare con RS.

Ad esempio (sottolineo, ad esempio: eventuali valori da utilizzare nella pratica dovrebbero derivare da estese discussioni ed essere ampiamente condivisi, anche in relazione all'inclusione o meno delle perdite indirette) si potrebbe stabilire che un edificio con EAL minore di 0.5% del costo di ricostruzione (RC) sia in classe di resilienza sismica A, cioè:

se $EAL < 0.5\% RC$ allora $RS = A$

ed analogamente, sempre ad esempio:

se $EAL < 1.0\% RC$ allora $RS = B$

se $EAL < 2.0\% RC$ allora $RS = C$

Ogni edificio potrebbe diventare oggetto di certificazione sismica in caso di interventi di ristrutturazione, in analogia a quanto avviene in ambito energetico.

Tra i possibili effetti di una certificazione della resilienza sismica si possono ipotizzare:

- La disponibilità di un fondamento razionale per la scelta di un intervento di miglioramento sismico, in cui a determinati costi dovrebbero corrispondere adeguati cambiamenti di classe.
- La disponibilità di una base razionale per la stima di un premio assicurativo annuale, con la conseguenza di potere più facilmente ipotizzare forme di obbligatorietà di forme assicurative.
- La possibilità di quantificare l'aumento del valore di un edificio a seguito di un intervento di rinforzo.

- Un incremento delle difficoltà di commerciabilità per edifici a bassa resilienza, una loro diminuzione di valore e una conseguente maggiore motivazione per intervenire.
- La possibilità di studiare ipotetici benefici fiscali sulla base di effettivi e quantificati effetti favorevoli per la società.

GIAN MICHELE CALVI

