

RISCHIO SISMICO E CRITERI DI PROGETTAZIONE

Marco BOZZA *

* *Ingegnere Strutturale, già Direttore della Federazione regionale degli Ordini degli Ingegneri del Veneto (FOIV), Amministratore di ADEPRON*

DEFINIZIONE DEL PROBLEMA

Il rischio sismico è la misura dei danni che, in base al tipo di sismicità, di resistenza delle costruzioni e di antropizzazione (natura, qualità e quantità dei beni esposti), ci si può attendere in un dato intervallo di tempo, ed è determinato da una combinazione della *pericolosità sismica*, della *vulnerabilità sismica* e dell'*esposizione sismica*, così definite:

pericolosità sismica è la probabilità che in una data area ed in un certo intervallo di tempo si verifichi un terremoto che superi una soglia di intensità, magnitudo o accelerazione di picco (PGA) di nostro interesse;

vulnerabilità sismica è la probabilità che una struttura di un certo tipo possa subire un certo livello di danneggiamento a seguito di un terremoto di una determinata intensità;

esposizione sismica è costituita da tutto ciò che è stato realizzato dall'uomo, la cui condizione e il cui funzionamento può essere danneggiato, alterato o distrutto dall'evento sismico.

Più precisamente si definisce allora il **rischio sismico** la probabilità che a causa delle azioni di un terremoto un dato sistema funzionale (una persona o una comunità, un edificio o un complesso di costruzioni, un insediamento o una regione), nel corso di un assegnato periodo temporale (un anno, la vita nominale del sistema,...), subisca danni (meccanici, funzionali,...), e da questi derivino perdite per una collettività (coloro che occupano il sistema, gli abitanti di una regione o di una nazione, una classe sociale,...) riguardanti determinate risorse (vite umane, salute, standards, beni economici, valori culturali,...).

Lo studio di questa problematica presuppone che venga istituito un modello matematico volto a determinare il comportamento sismico del terreno sede del sistema. Esso richiede diverse impostazioni a seconda che la sorgente sismica sia superficiale o profonda.

Nel primo caso la fonte energetica e la regione perturbata interagiscono strettamente; ciò da' luogo ad una molteplicità di fenomeni, generalmente macroscopici e difficilmente schematizzabili, noti come *problemi di sorgente*. Nel secondo caso, sicuramente il più frequente e di maggiore interesse, l'energia irradiata dalla sorgente si propaga attraverso il terreno sotto forma di *onde sismiche* le quali raggiungendo il sistema, ne determinano lo scuotimento. Valutare il rischio sismico locale significa determinare in che modo e in che misura le caratteristiche dei terreni superficiali, attraversati dalle onde sismiche, alterano il rischio sismico atteso in un sistema funzionale ipoteticamente collocato su un terreno di riferimento di caratteristiche omogenee.

Partendo dalla considerazione che la rete degli strumenti sismici è prevalentemente distribuita su terreni rigidi e pianeggianti, si assume di riferimento questa situazione e si considera noto l'atto di moto che ivi si realizza. Si pone di conseguenza il problema di valutare il comportamento sismico dei terreni meno compatti, non pianeggianti o, di tipo misto. Ciò comporta la trattazione sequenziale di due tematiche di grande importanza.

- La prima riguarda il comportamento dinamico del terreno e più precisamente le alterazioni ad esso apportate dalle oscillazioni cicliche indotte dal sisma. Queste alterazioni possono ridursi a variazioni più o meno accentuate della capacità portante, della deformabilità o della spinta sulle opere di sostegno, oppure causare veri e propri fenomeni di instabilità, particolarmente pericolosi nei terreni potenzialmente liquefacibili o posti in pendio.
- La seconda, nota come *amplificazione locale*, ha per oggetto le modifiche del moto sismico associate alle caratteristiche locali del suolo. La trattazione di questi problemi presuppone una conoscenza esaustiva delle proprietà morfologiche, litologiche, stratigrafiche, idrogeologiche e geotecniche del terreno.

RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO

Evidentemente, come detto, il rischio sismico è legato alla probabilità che si verifichi un evento sismico di date caratteristiche, e al danno che tale evento può arrecare. Per quanto riguarda il danno, è necessario distinguere il danno alle persone e il danno alle strutture. Per ridurre entro limiti ragionevoli il rischio sismico, c'è attualmente un largo consenso sul criterio di imporre due diverse condizioni di progetto:

1) *le strutture devono essere progettate in modo da poter sopportare in regime elastico le sollecitazioni indotte da terremoti la cui intensità corrisponde, con riferimento alle caratteristiche sismiche della zona in esame, ad un periodo di ritorno dell'ordine della vita nominale della struttura (si assume in generale per gli edifici normali per abitazioni un tempo di ritorno dell'ordine di 100 anni);*

2) *le strutture devono possedere sufficienti riserve di resistenza, oltre il limite elastico, per sopportare senza crolli le azioni di un terremoto di intensità tale da fare ritenere estremamente improbabile il verificarsi di un terremoto di intensità maggiore. Il terremoto che deve essere considerato in questa seconda condizione di progetto è quindi caratterizzato da un tempo di ritorno notevolmente maggiore di 100 anni, dell'ordine di $10^3 \div 10^4$ anni.*

È evidente, da quanto sopra, che la condizione 1) tende soprattutto a limitare i danni per le costruzioni, mentre la condizione 2) fa chiaro riferimento alla salvaguardia della vita umana.

Il riferimento alla durata nominale delle costruzioni è logicamente giustificato per i terremoti non eccezionali che devono essere sopportati in regime elastico. In sostanza tutte le costruzioni della zona interessata dal terremoto devono essere in grado di sopportare, senza consistenti danneggiamenti, condizioni di carico che statisticamente si verificheranno nel corso della loro vita nominale. Sarebbe, al contrario, del tutto ingiustificato il riferimento alla durata delle costruzioni nel caso di eventi sismici del tutto eccezionali, in quanto diventa in tal caso determinante la sicurezza delle vite umane e non considerazioni di tipo economico: ci si preoccupa di proteggere la vita e dell'uomo e non l'edificio. In questa ottica i parametri fondamentali diventano la durata della vita umana, la densità media e la distribuzione della popolazione nella zona considerata.

Come detto all'inizio, non esiste la possibilità di controllare i terremoti: si possono invece individuare provvedimenti nella progettazione e nella costruzione delle strutture che consentano di ridurre l'entità del danno in caso di sisma e quindi, in sostanza, il rischio sismico, che comunque non può essere annullato. Rimane pertanto un rischio residuo che deve essere confrontato con quello che la collettività ritiene di poter accettare. In sostanza le costruzioni dovrebbero essere realizzate in modo tale da comportare un rischio minore o, al limite, uguale al rischio accettabile.

DETERMINAZIONE DEL RISCHIO ACCETTABILE

Si consideri dapprima il rischio di natura essenzialmente economica connesso con il terremoto non eccezionale. In questo caso il rischio sismico può essere ridotto rendendo più severi i provvedimenti da seguire nella realizzazione delle opere: l'appesantimento di tali provvedimenti comporta ovviamente un aumento del costo di costruzione. Si deve a questo punto confrontare tale aumento iniziale di costo con la diminuzione di spesa che, statisticamente, si dovrà sostenere nel corso della vita dell'opera conseguente alla riduzione del rischio sismico. Il rischio logicamente accettabile diventa allora quello per ridurre il quale si devono adottare provvedimenti tali da comportare aumenti del costo dell'opera maggiori dei benefici economici connessi con la riduzione del rischio stesso. Il rischio accettabile viene pertanto individuato da un'analisi costi-benefici, alla quale si tende far sempre maggiore ricorso nella maggior parte dei problemi di ingegneria.

Esaminando il problema del rischio accettabile per quanto attiene la sicurezza della vita umana, si potrebbe, in linea di principio, ricorrere anche in questo caso ad un'analisi costi-benefici. Questo richiederebbe una monetizzazione della vita umana, operata la quale, il rischio sismico si configurerebbe come rischio puramente economico. Può, tuttavia, essere seguito un approccio diverso. Tutte le attività umane comportano un certo rischio che viene, più o meno coscientemente, accettato dalla popolazione: ebbene il rischio sismico accettabile potrebbe essere quello strettamente confrontabile con altri tipi di rischio connessi con la stessa condizione umana. Da un'analisi di questo tipo si verrebbe ad individuare un rischio sismico accettabile dell'ordine di 10^{-7} morti per anno e per persona esposta (tale valore del rischio è di circa 3 ordini di grandezza inferiore a quello relativo all'impiego dell'automobile con 10^{-4} morti per anno e per persona esposta).

RISCHIO SISMICO E PROGETTAZIONE STRUTTURALE

Verifica delle condizioni di progetto

Per quanto riguarda la possibilità di condurre a termine in modo corretto, e con la necessaria attendibilità, le condizioni di progetto 1) e 2), si deve osservare che la situazione è sostanzialmente differente.

La verifica della condizione 1) richiede la determinazione della risposta di un sistema lineare a un dato spostamento delle fondazioni. Le tecniche e le conoscenze attuali consentono di effettuare tale calcolo con la richiesta attendibilità. È richiesta, inoltre, la definizione di un terremoto caratterizzato da tempi di ritorno del tutto paragonabili a quelli cui si riferiscono informazioni sufficientemente attendibili dei terremoti verificatesi in passato. Tale definizione può allora essere fatta in modo ragionevolmente accettabile.

La verifica della condizione 2) richiede invece che si tenga conto del comportamento dinamico dei sistemi lineari. Le conoscenze in questo campo sono del tutto inadeguate. È inoltre necessario considerare terremoti con tempi di ritorno notevolmente più lunghi rispetto ai periodi di osservazione disponibili. La definizione di terremoti di questo tipo presenta allora grandi incertezze.

La tendenza attuale per superare queste difficoltà, almeno per le costruzioni ordinarie, è quella di condurre una sola verifica che riunisca, in via approssimata, le due sopra definite. Nella pratica si opera nel modo seguente:

sulla base delle caratteristiche sismiche della regione, individuate essenzialmente da elaborazioni statistiche delle informazioni disponibili sui terremoti precedenti verificatesi, vengono fissate le caratteristiche del terremoto di riferimento per il calcolo in campo elastico delle strutture. Tale calcolo viene effettuato in modo del tutto convenzionale. I coefficienti di sicurezza da applicare nella verifica vengono stabiliti in funzione del grado di garanzia della estrapolabilità delle statistiche sismiche. Per definire il comportamento delle strutture si introduce, oltre ai parametri elastici, un coefficiente empirico, dipendente dal tipo strutturale, che tiene in qualche modo conto della capacità di adattamento plastico della struttura stessa.

Considerazioni sulla progettazione

Nella realizzazione di edifici in zone sismiche è necessario tenere in conto alcune importanti considerazioni:

- Il grado di sicurezza richiesto agli edifici in caso di sisma deve essere diverso a seconda delle funzioni cui l'edificio è destinato. E' evidente che il crollo di edifici con alto livello di occupazionalità (scuole, cinema, ospedali ecc.) comporta danni che possono essere di ordini di grandezza diversi da quelli connessi con il crollo di normali edifici di civile abitazione. Per quanto riguarda gli ospedali è addirittura necessario che questi, dopo il terremoto, possano consentire il ricovero e la necessaria assistenza sanitaria di persone rimaste ferite durante il terremoto stesso. La messa fuori servizio di un ospedale potrebbe aggravare seriamente, in termini di perdite di vite umane, le conseguenze di un eventuale terremoto.
- Particolare attenzione deve essere posta nella progettazione di certi servizi che, se di grande importanza in condizioni normali, possono divenire vitali in caso di sisma (ad esempio il servizio antincendio).
- Particolare attenzione deve essere posta anche nella progettazione delle opere stradali (ponti, viadotti ecc.). Il crollo di queste opere renderebbe estremamente difficile l'opera di soccorso, e quindi aggravare le conseguenze del terremoto.
- Criteri particolarmente severi devono essere prescritti per certi edifici o strutture industriali (impianti chimici, impianti nucleari ecc.), in quanto il loro danneggiamento, oltre certi limiti, potrebbe comportare danni ingentissimi nella zona (fuoriuscita di sostanze nocive, contaminazione da radiazioni nucleari ecc.).
- Una certa attenzione deve essere posta nella realizzazione di certe opere (tramezzi, impianti elettrici, ecc.) il cui danneggiamento, anche se di scarsa importanza ai fini della salvaguardia della vita umana, può portare a danni economici particolarmente severi. L'analisi delle conseguenze di terremoti verificatisi nel passato recente, in zone per le quali erano in vigore legislazioni antisismiche, ha messo chiaramente in luce che tali legislazioni si sono mostrate sostanzialmente adeguate per quanto riguarda le strutture, mentre sono risultate non idonee per il contenimento dei danni economici. Molti edifici hanno presentato strutture praticamente intatte, o poco danneggiate, con danni complessivi dell'ordine del 30% ÷ 50% del valore totale dell'immobile dovuti appunto ai danneggiamenti subiti dagli impianti e dalle opere di rivestimento.
- Un'analisi accurata dei fatti verificatisi porta chiaramente alla conclusione che provvidenze di piccole entità, e quindi di basso costo, avrebbero consentito una sostanziale riduzione dei danni economici conseguenti al terremoto.

Le considerazioni sopra esposte devono essere attentamente valutate in fase di progetto e realizzazione dell'opera, anche quando non venga esplicitamente richiesto nella normativa vigente.

DETERMINAZIONE DEL TERREMOTO DI RIFERIMENTO DI PROGETTO

Il primo problema che deve essere affrontato, e risolto con ragionevole attendibilità, è la determinazione del terremoto cui fare riferimento per la progettazione delle costruzioni. Il terremoto stesso deve essere definito in modo idoneo per il progettista strutturale. Allo stato attuale tale definizione può essere fatta nei seguenti due modi:

- *dando l'andamento dell'accelerazione del suolo, in funzione del tempo, nelle diverse direzioni;*
- *attraverso lo spettro di risposta, definito come l'insieme di una famiglia di curve che danno sulle ascisse le frequenze, o il periodo, e sulle ordinate i valori massimi delle accelerazioni, delle velocità e degli spostamenti di una serie di oscillatori semplici aventi ciascuno un valore assegnato dello smorzamento e della frequenza propria.*

Il secondo modo, quello normalmente seguito, consiste nel definire lo spettro di risposta individuato dalla forma spettrale e dal valore massimo dell'accelerazione al suolo. Questo problema può essere risolto determinando in primo luogo il valore massimo dell'intensità o della magnitudo del sisma, caratterizzato da un prefissato tempo di ritorno (dell'ordine di 100 anni), e, successivamente, associando a questo sisma il valore massimo dell'accelerazione del suolo. La soluzione della prima parte del problema richiede, tra l'altro, l'elaborazione statistica dei dati disponibili sui terremoti che nel passato hanno interessato la regione all'esame. Fenomeni di questo tipo non possono essere trattati in modo deterministico, in quanto le conoscenze dei fenomeni stessi, e delle cause che li hanno originati, non sono adeguate. E' allora necessario affidarsi ad una elaborazione statistica degli eventi passati, nell'intento di formulare previsioni di tipo probabilistico per quelli futuri.

A questa elaborazione sono generalmente associate altre indagini, i cui risultati possono fornire informazioni di particolare importanza per la valutazione dell'intensità del terremoto cui fare riferimento per il progetto delle costruzioni. Tali indagini possono riguardare:

- *la determinazione delle condizioni litologiche, stratigrafiche, idrologiche e geologiche della regione;*
- *la identificazione delle strutture tettoniche presenti nella regione;*
- *la valutazione del comportamento, durante i precedenti terremoti, dei materiali geologici della superficie e degli strati giacenti sotto il sito;*
- *la correlazione, quando possibile, degli epicentri e delle zone macrosismiche di più alta intensità con le strutture tettoniche collocate nella regione;*
- *la valutazione se faglie eventualmente presunte debbano essere considerate attive e, in questo caso, si dovrà determinare:*
 - *la lunghezza della faglia;*
 - *la relazione della faglia con le strutture tettoniche della regione;*
 - *la natura, l'entità e la storia geologica degli spostamenti lungo la faglia, con particolare riferimento alla valutazione del massimo spostamento riferito a ciascun terremoto lungo la faglia.*

Attraverso le indagini e gli studi sopra indicati sarà possibile determinare il massimo terremoto che può statisticamente verificarsi durante la vita nominale delle costruzioni.

Particolare importanza riveste, ai fini della soluzione del problema, la elaborazione statistica degli eventi sismici passati. Tale elaborazione viene normalmente effettuata facendo riferimento alla "Teoria dei valori estremi", che consente l'elaborazione di una carta probabilistica degli estremi, nella quale sono riportati i valori della intensità dei terremoti in funzione del tempo di ritorno. Se, come quasi sempre si verifica un fenomeno di questo tipo, la funzione di ripartizione degli evento è di tipo esponenziale, i punti rappresentativi dei terremoti massimi relativi a ciascun gruppo di n osservazioni sono sostanzialmente allineati. Risulta allora possibile, e relativamente attendibile, una estrapolazione di dati storici per la valutazione del terremoto con un tempo di ritorno dell'ordine di 100 anni, soprattutto in considerazione del fatto che le informazioni sui terremoti passati sono relativi a periodi di tempo comparabili con il tempo di ritorno del terremoto di progetto.

Per una valutazione di prima approssimazione è possibile fare ricorso a relazioni nelle quali sono sintetizzate, per una determinata zona sismica, le informazioni riguardanti la frequenza e l'intensità dei terremoti. Tali informazioni sono generalmente condensate nella funzione $N(M)$, definita come il numero medio N dei terremoti con magnitudo maggiore di M che si verificano in un anno nella zona considerata.

L'analisi di numerosi dati sperimentali, basate su tecniche del tipo di quelle sopra indicate, ha condotto a proporre la seguente semplice espressione: $N(M)=10^A \cdot 10^{-BM}$, con A e B costanti caratteristiche per ciascuna zona. Per regioni con caratteristiche simili all'Italia, i valori di A e di B , riferiti mediamente ad una superficie di 10^6 Km^2 , sono i seguenti: $A=6,13$ e $B=1,03$.