

di Alessandro Pignagnoli

ABSTRACT

Dall'entrata in vigore della normativa italiana **NTC2008**, la cosiddetta "pericolosità sismica" dei vari siti del nostro territorio è stata trattata su base statistica. Il modello adottato, chiamato MPS04, è stato elaborato da INGV nei primi anni 2000.

Su questo modello dell'azione sismica non c'è mai stato molto dibattito fra gli ingegneri. Quasi non se ne parla (a parte qualche caso isolato) nei corsi universitari di ingegneria sismica; i seminari per ingegneri sono rarissimi; manca anche il materiale di discussione.

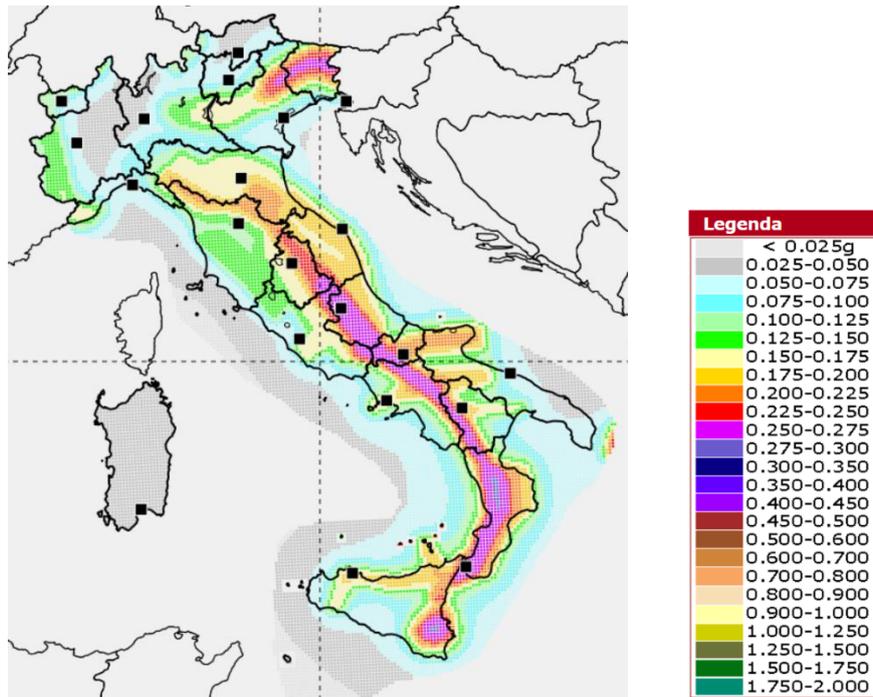
Ci sono però state, e ci sono, tante polemiche, in particolare sugli spettri adottati per l'azione sismica, in quanto alcuni sostengono che le azioni conseguenti siano sotto-stimate. Questo modo di ragionare, un tanto al chilo, che non spiega i motivi e non propone alternative, non può essere accettato. Allora, dopo anni di (mia) colpevole trascuratezza, ho deciso di riordinare il materiale in mio possesso e di metterlo a disposizione di tutti i colleghi, sperando possa essere utile per avviare poi un dibattito serio, basato su dati, e non su opinioni più o meno fantasiose.

Si tratta ovviamente, nella prima parte, di una trattazione ridotta all'osso, anche per la mia limitata conoscenza degli argomenti, e solo per fare emergere i punti chiave dei modelli adottati. Poi nella parte conclusiva traggio alcune prime osservazioni, commenti e spunti di riflessione che mi auguro possano essere raccolti dai colleghi che trattano la materia.

1) DESCRIZIONE DEL MODELLO STATISTICO ADOTTATO

La scelta di individuare l'azione sismica di progetto a partire da mappe pericolosità basate su un modello probabilistico, per le norme italiane e per noi tutti è stata una specie di rivoluzione a cui, forse, come ingegneri non ci siamo ancora completamente abituati.

Come per ogni modello della realtà fisica, ci sono vantaggi e svantaggi, problematiche, rischi applicativi, ma anche ampi margini per futuri sviluppi.



Mappa di pericolosità INGV sulla base di MPS04

Nel modello MPS04 il parametro prescelto per individuare la pericolosità è l'accelerazione di picco al suolo "a_g", su suolo rigido, associata a una forma spettrale (quindi in realtà una terna: a_g, F₀, T_c).

Nel seguito si analizzerà il modello statistico che sta alla base delle mappe MPS04.

Il **processo sismogenetico** che genera gli eventi è stato considerato di tipo stocastico **poissoniano**. Quindi si assume quanto segue:

- Gli eventi sono indipendenti fra loro (non esistono dipendenze fra i vari eventi);
- Non esistono eventi simultanei;
- il processo è stazionario, quindi qualsiasi evento è indipendente dall'istante in cui avviene;
- la distribuzione degli eventi è poissoniano.

Queste ipotesi, che definiscono il processo stocastico poissoniano, ovviamente nella realtà non sono esattamente aderenti al fenomeno, ma il modello ha una sua attendibilità e ha il vantaggio della semplicità. In particolare esso è governato da un solo parametro: λ , che rappresenta il **numero medio di eventi in un certo arco di tempo Δt** . Questo numero è alla base di tutta l'elaborazione statistica.

Primo problema affrontato: stabilire il numero λ di eventi (nel caso specifico sono quelli che superano una certa soglia di a_g), che possono avvenire in un certo sito in un certa finestra temporale Δt , ad esempio 50 anni. Quindi $\lambda = N/\Delta t$, rappresenta una **frequenza media**. L'inverso, $1/\lambda$, è il **tempo di ritorno T**, ed è sempre un dato medio.

Esempio: sappiamo che alcuni tipi di eventi avvengono 3 volte in 100 anni:

allora: $\lambda = 3/100=0.03 \implies Tr = 33$ anni

La distribuzione di probabilità nel modello di Poisson.

Il modello di Poisson ha una sola variabile: **N**, che rappresenta il numero medio di eventi.

La probabilità **P(n)** associata a un numero **n** di eventi (dove “n” è numero naturale, compreso lo zero), fissato il numero medio è N, vale:

$$P_N(n) = \frac{N^n * e^{-N}}{n!} \quad (1)$$

Grafichiamo allora la probabilità che avvengano **n** eventi, rispetto a un **N** fissato: metto in ascisse la variabile **n** e in ordinate la probabilità **P**. Esempio: per un numero medio di eventi **N =10**.

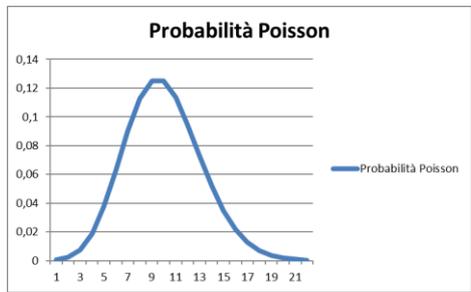


Figura 1: Distribuzione di Poisson

Per gli scopi della pericolosità sismica, occorre poter variare la finestra temporale Δt ; quindi scrivo **N** come segue:

$N = \lambda * \Delta t$, dove λ è la frequenza degli eventi selezionati, che devo avere nota; ad esempio la ricavo da un catalogo, o con altri metodi (vedi nel seguito).

ESEMPIO: Dai dati storici so che in una finestra di 150 anni si sono verificati 5 eventi con le caratteristiche che cerco: quindi ricavo $\lambda = 5/150 = 0.033$ eventi/anno.

Se la finestra temporale è $\Delta t=50$ anni, il numero di eventi $N= 0.033 * 50 = 1.65$

Notare le seguenti proprietà della distribuzione di Poisson:

- La somma delle probabilità vale 1 (ovvero 100%);
- il caso **n=0 (nessun evento)** corrisponde a una probabilità non nulla: $P_N(0) = N^0 * e^{-N} / 0! = e^{-N}$
- Quindi, **la probabilità che si verifichi almeno un evento (n>0) vale:**

$$P(n>0)=1- e^{-N}=1- e^{-\lambda*\Delta t} \quad (2)$$

Oppure posso scrivere:

$$P(n>0)=1- e^{-N}=1- e^{-\Delta t/T} \quad (3)$$

Esempio: ci interessa la probabilità che si verifichi, in un certo sito, almeno un evento avente $a_g=0.01g$ in una finestra temporale $\Delta t = 50$ anni.

Dai dati storici so che in una finestra di 150 anni si sono verificati 5 eventi: quindi ricavo $\lambda = 5/150 = 0.033$ eventi/anno.

La probabilità che cerco vale: $P=1-e^{-0.033*50} = 1-0.19=0.81$ (81%)

La probabilità che si verifichi almeno un evento, data dalla (2) o (3), è chiamata anche “Probabilità di eccedenza”.

Tempo di ritorno: è definito come l'inverso della frequenza λ : $T_R= 1/\lambda$. Quindi nell'esempio precedente il tempo di ritorno risulta: $T_R= 150/5 = 30$ anni

Curva di Pericolosità.

Il parametro prescelto a descrivere l'evento, come già detto, è **un valore prestabilito minimo di a_g** . Se conosco la frequenza media degli eventi λ per una a_g minima fissata, posso calcolarne la probabilità.

Esempio: fisso il valore minimo di $a_g=0,1g$; ricavo dai dati storici che, in un certo sito, ho avuto 2 eventi pari o superiori a quel valore in 150 anni. Allora la frequenza $\lambda = 2/150 = 0.013$; tempo di ritorno: 75 anni

La probabilità che si verifichi almeno uno di questi eventi in 50 anni vale:

$$P^{50}(0.01g) = 1-e^{-0.013*50} = 1-0.52=0.48 \quad (48\%)$$

Variando il valore di a_g , a parità di finestra temporale Δt , posso costruire delle curve di probabilità in funzione del valore di a_g . Tali curve si chiamano **“Curve di Pericolosità”**, che costituiscono l'obiettivo finale da raggiungere.

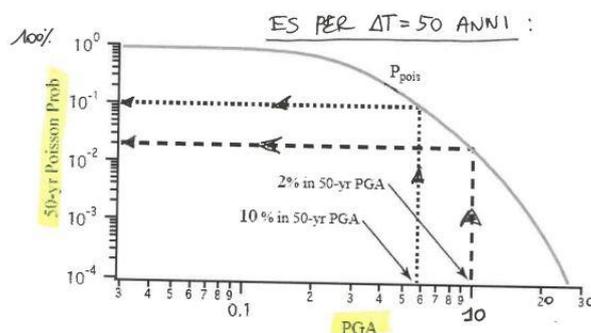


Figura 2: Da Dario Albarello 2013: curva di pericolosità di un sito

Riassumendo, se conosco λ (frequenza media degli eventi che sto cercando, pari o superiori ad a_g) in un certo sito, posso calcolare la relativa probabilità P che avvenga **almeno un evento** pari o maggiore di a_g (soglia minima) in una certa finestra temporale Δt .

Viceversa, se conosco la probabilità $P(a_g)$, posso trovare la frequenza media, o il tempo di ritorno T_R , perché la formula può essere invertita, come segue:

$$T_R = 1/\lambda = - \Delta t / \text{Log}_e (1-P(a_g)) \quad (4)$$

che è la relazione riportata nella NTC (formula 3.2.0).

La curva di pericolosità è riportata nella NTC (negli allegati della NTC2008) sotto forma tabellare, esprimendo a_g in funzione di T_R .

Esempio: Voglio calcolare il tempo di ritorno di un evento avente a_g pari o superiore a 0.01g in un certo sito, sapendo che ha una probabilità del 10% in una finestra di 50 anni.

$$T_R = - 50 / \text{Log}_e (1-0.1) = 475 \text{ anni.}$$

Zone sismo-genetiche e i metodi per calcolare λ in un sito specifico

Quindi, utilizzando il modello di Poisson, tutto il problema si riconduce a trovare il numero λ , cioè il n° di eventi pari o superiori a un certo valore a_g , riferito a un certo sito (ad esempio quello individuato con il triangolo rosso in figura). Devo riuscire a calcolare questo numero anche se gli eventi che lo generano provengono da zone sismogenetiche poste a chilometri di distanza, e se di queste zone ne ho più d'una (Es: la circonferenza rossa in figura).

Inoltre occorre un metodo che sia generalizzabile a tutti i possibili siti del territorio nazionale per poter costruire delle mappe puntuali.

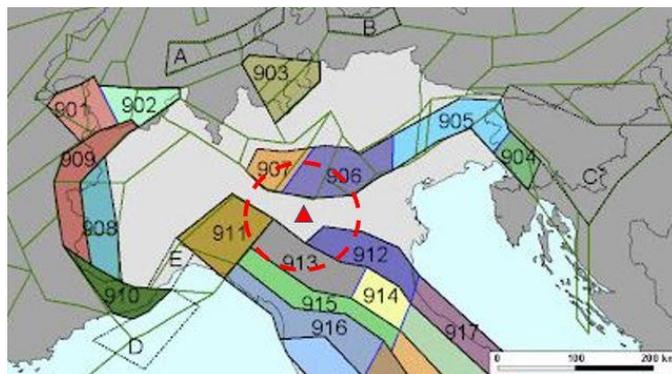


Figura 3: Dato un sito (triangolo rosso), intercetto tutte le zone che possono generare risentimenti in quel sito.

Per trovare λ di un certo sito ci sono sostanzialmente due strade possibili:

- 1) Avere a disposizione un database di dati riferiti al sito specifico, cioè un “catalogo sismico di sito” che riporta già il numero di eventi con i valori del mio parametro di interesse (es: a_g)... ma è abbastanza improbabile, e soprattutto questo non è generalizzabile a tutti i siti possibili.
- 2) Utilizzare il **metodo di Cornell**, che è generale, anche se presenta passaggi abbastanza delicati e di non univoca interpretazione.

Nota: Occorre tenere presente che nei “cataloghi sismici”, gli eventi sono elencati come segue:

- Coordinate dell’ **epicentro**;
- **Magnitudo**; ma solo i più recenti hanno una magnitudo “strumentale”, e quindi oggettiva; per gli eventi storici si devono operare “stime” di magnitudo.

Il metodo di Cornell

E’ un metodo che ha come obiettivo quello di calcolare la probabilità $P(a_g)$ di un certo evento di valore a_g in un certo sito, a partire dalle probabilità di eventi possibili in zone sismo-genetiche limitrofe (sorgenti) poste a una certa distanza “D”. Nell’esempio della figura soprastante si tratta di porzioni delle ZS 906, 912,913, ecc.

Il metodo parte dal presupposto che gli eventi di interesse per una certa zona sismica, cioè quelli che possono creare risentimenti minimi “ a_g ” nel sito prescelto:

- provengano da zone sismogenetiche i cui “punti” di appartenenza si comportano tutti allo stesso modo, ciascuno con eventi fra loro indipendenti, nella stessa finestra temporale Δt .
- La distribuzione degli eventi nella sorgente sia poissoniana;
- Per ogni sorgente, vi sia un legame esponenziale fra il tasso “ r ” di eventi generati e la Magnitudo, del tipo

$$\text{Log}(r)=a-bM \quad (5)$$

(con a e b costanti fissate) quindi, fissata **M**, posso trovare il tasso di eventi “**r**” di quella zona ZS.

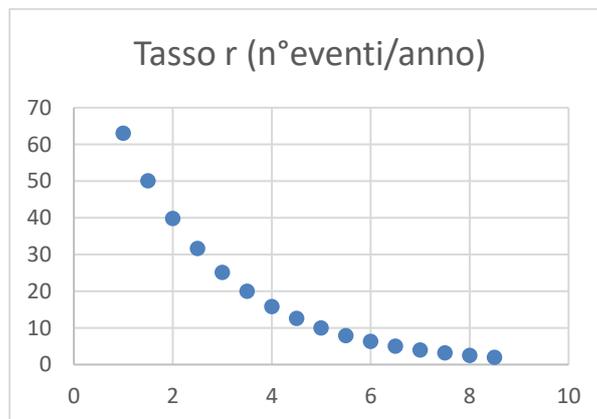


Figura 3: In ascisse la magnitudo **M**, in ordinate il tasso “**r**” di eventi/anno

Devo selezionare solo gli eventi che generano una certa a_g nel mio sito, posto a distanza "D". Questo si fa con le **leggi di attenuazione**. Sono leggi "empiriche" che legano, ad esempio, la a_g nel sito alla magnitudo M della sorgente, tenendo conto dell'attenuazione dovuta alla distanza D. La forma è del tipo :

$$a_g = 10^{a+bM-\log(D)} \quad (6)$$

dove:

a e b sono costanti, M è la Magnitudo, D è la distanza tra il mio sito e l'ipocentro (distanza che il segnale deve percorrere), quindi $D=\sqrt{d^2+h^2}$, dove d è la distanza epicentro-sito e h è la profondità dell'ipocentro.

Se fisso a_g "soglia" del mio sito e D posso calcolare M "soglia" nella sorgente:

$$M = (\log(a_g) - a - \log(D)) / b \quad (7)$$

Allora, per ogni sorgente potenziale i-esima, fissato a_g del mio sito e conoscendo la distanza D tra sito e sorgente, calcolo la magnitudo M minima nella sorgente e, con la (6), il numero di eventi r; con r calcolo il numero di eventi v_i (nel mio sito) nell'unità di tempo:

$$v_i = N / \Delta t \quad (8)$$

per la sorgente i-esima, che è la **frequenza media di accadimento** della sorgente i-esima.

Nota: Oltre che per il parametro $a_{g,picco}$, sono state proposte leggi di attenuazione per ogni parametro caratteristico dello scuotimento che interessa le elaborazioni sismiche: v_{picco} (picco di velocità), $a_g(T)$ (la a_g associata a un periodo T), ecc., sempre in funzione dei parametri di partenza M,D, con opportuni coefficienti a,b (Sabetta e Pugliese 1987-1989).

Trovato il contributo v_i nel mio sito dovuto alla sorgente i-esima, ripeto il calcolo per tutte le possibili sorgenti.

A questo punto, **se conosco la frequenza media di accadimento v_i** (la frequenza λ) nel mio sito generato da ogni zona sismogenetica, per un certo a_g fissato, (si dimostra che) **posso sommare tutti i contributi** e ottenere il $\lambda(a_g)$ del mio sito.

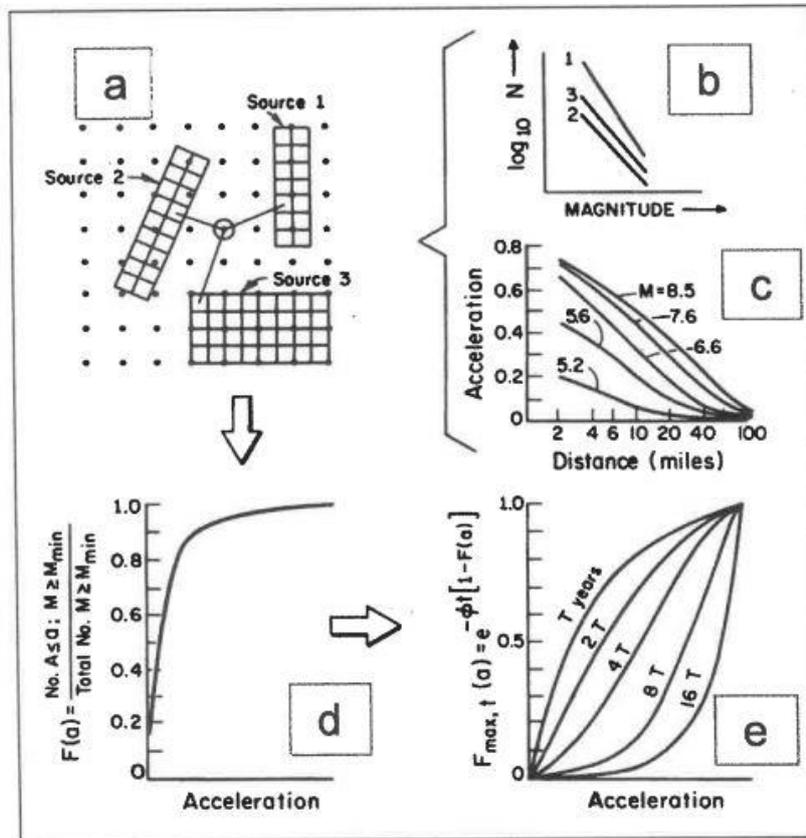
$$\lambda(a_g) = v_1 + v_2 + v_3 + \dots + v_m \quad (9)$$

dove "m" è il numero totale delle sorgenti sismiche possibili selezionate . Praticamente sto aggregando i contributi.

Riassumendo:

- 1) Prendo un sito, su cui voglio eseguire il calcolo;
- 2) Fisso una finestra temporale: esempio $\Delta T=50$ anni
- 3) Fisso un valore di a_g soglia: esempio 6 m/s^2
- 4) Trovo tutte le zone sismogenetiche di interesse che possono produrre effetti pari o superiori ad a_g prescelto, e ne calcolo la frequenza v_i ;

- 5) Calcolo la frequenza degli eventi $\lambda (a_g)$ nel sito prescelto, utilizzando la (9);
- 6) Calcolo la probabilità di eccedenza con la (2) o la (3);
- 7) Costruisco la curva di pericolosità (Figura 2), variando i valori di a_g e ripetendo il calcolo, mantenendo la finestra temporale fissa (50 anni).



(from Algermissen & Perkins 1976)

La curva di pericolosità, successivamente, può essere invertita, fissando la probabilità di eccedenza e trovando a_g . La circolare, ad esempio, riporta il seguente grafico (con T_R al posto della probabilità P)

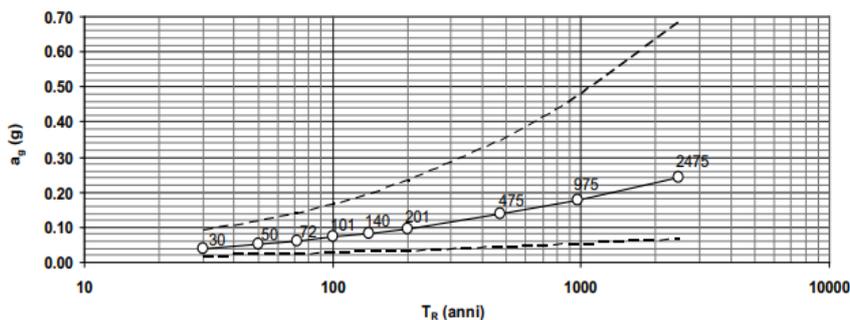
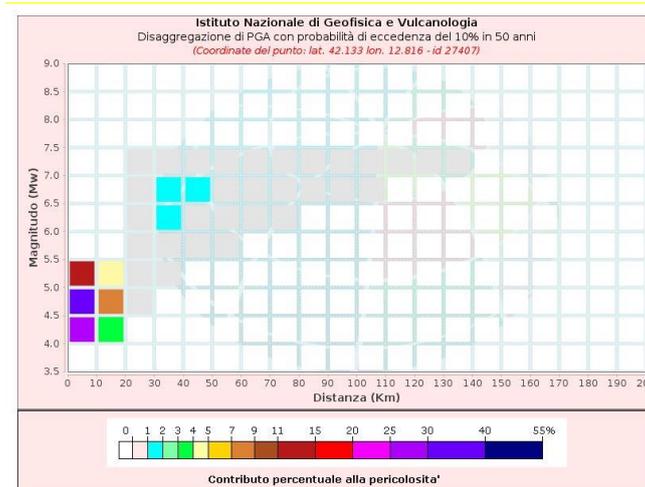


Figura C3.2.1 a – Variabilità di a_g con T_R : andamento medio sul territorio nazionale ed intervallo di confidenza al 95%

Avendo aggregato i contributi con la relazione (9), posso anche visualizzarli disaggregati, per vedere il contributo v_i di ogni scoppia Magnitudo-distanza, fissata la a_g e la relativa probabilità (<https://esse1-gis.mi.ingv.it/>).



Esempio di disaggregazione dei vari contributi per un certo sito

Anche gli altri parametri caratteristici del moto sismico possono essere determinati allo stesso modo perché, come detto, sono state proposte leggi di attenuazione per ogni parametro. In particolare sono stati ricavati gli **spettri di risposta a probabilità uniforme**, nei quali ogni periodo individua un'accelerazione spettrale di probabilità fissata. Questi sono gli spettri riportati nella NTC, a tutti ben noti ([Progetto DPC-INGV - S1](#)).

In generale, in conseguenza di tutto quanto detto, si verifica che **gli spettri a "probabilità uniforme" cambiano forma all'aumentare del tempo di ritorno**. Questo è logico in quanto, gli eventi con tempo di ritorno maggiori sono riferiti a magnitudo più elevate che danno maggior contributo per le basse frequenze (periodi lunghi).

Alcune precisazioni:

- Le sorgenti non sono dei punti, bensì delle zone abbastanza vaste di territorio, che quindi vengono discretizzate in "celle" minime che (si assume) hanno tutte lo stesso comportamento;
- La discretizzazione deve essere accettabile per poter calcolare le distanze dal sito, anche quando il mio sito di interesse è interno alla ZS;
- La perimetrazione scelta per le ZS incide sul calcolo della pericolosità;
- Il dato assunto, per ogni evento sismico registrato, è singolo (il più forte). Noi però sappiamo che, in realtà, gli eventi sismici sono costituiti da una sequenza di eventi, che in genere si raggruppano attorno a un evento principale, il "mainshock". A volte però gli shocks possono essere anche due o tre fra loro paragonabili, e di questo attualmente non si tiene conto. Nel seguito sarà opportuno tornare su questo punto.

Segnalo, a supporto di quanto appena detto, una vecchia pubblicazione di Sabetta e Paciello del 1993, reperibile su internet, dove si riporta l'esempio dello studio della pericolosità sismica della città di Roma, spiegando:

- le varie problematiche da affrontare;

- il confronto fra l'applicazione del metodo del catalogo sismico (che per Roma esiste) e quello di Cornell;
- il riferimento ad articoli sulle leggi di attenuazione proposte;
- come si modificano i dati di pericolosità al variare della geometria delle ZS;
- ecc.

Si riporta anche un esempio di spettri di risposta a "probabilità uniforme" per Roma (vedi immagine seguente), spiegando i contributi apportati dalle varie zone sismiche limitrofe.

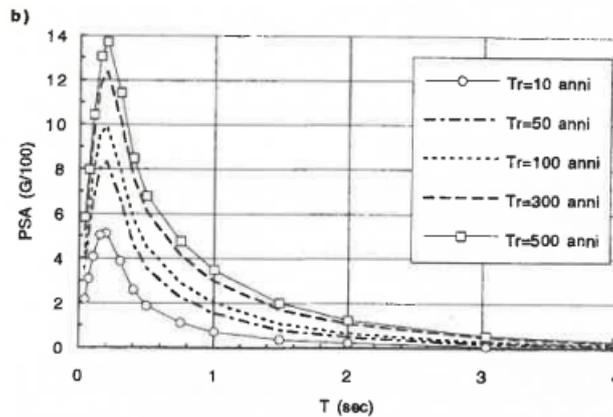


Fig. 5 - Spettri di risposta a pericolosità uniforme (smorz. = 5%) calcolati per diversi periodi di ritorno (T_r) e per un sito di tipo rigido:
 a) spettri di pseudo-velocità in funzione della frequenza;
 b) spettri di pseudo-accelerazione in funzione del periodo.

Da articolo di Sabetta e Paciello del 1993: Spettri città di Roma

2) UTILIZZO DEI DATI DAL PUNTO DI VISTA APPLICATIVO-INGEGNERISTICO

Tutto quanto illustrato in precedenza ci consente di valutare meglio come utilizzare in modo ragionato le mappe della NTC. Le prime constatazioni sono le seguenti:

- C'è un netto cambio di paradigma rispetto al passato: non abbiamo più a che fare con valori di accelerazione sismica fissati in modo deterministico, bensì valori legati a valutazioni statistiche;
- Il parametro prescelto per definire la pericolosità, o il risentimento in un sito, è l'accelerazione di picco al suolo: a_g . A questo è associato uno spettro in accelerazione a smorzamento convenzionale. Sappiamo bene che tali dati non descrivono l'input in modo completo ed esaustivo. Inoltre i risultati (mappe e valori) dipendono da varie approssimazioni, sia di modello che di dati di partenza, soprattutto per l'interpretazione dei dati storici di magnitudo;
- quando si ha una sequenza sismica, non vengono considerati gli eventi diversi da quello prescelto (il mainshock). Questo significa che, se si vuole che la struttura non crolli a fine sequenza, il progetto dovrà essere tale da poter superare una certa quantità di eventi aggiuntivi rispetto a quello considerato nelle mappe;
- i dati sono associati a una fissata probabilità di eccedenza. Questa probabilità non la fissa il progettista, bensì il legislatore. Ad esempio: se il legislatore ha fissato una probabilità di

superamento del 10% in 50 anni, significa che il valore di a_g riportato ha il 10% di probabilità di essere superato in quella finestra temporale fissata;

- Gli spettri della norma sono ricavati a partire dagli spettri originari dei modelli di pericolosità, mantenendo il valore di a_g di attacco e “normalizzando” la forma spettrale tramite i coefficienti T_C e F_0 . Nel seguito si riporta un estratto della Circolare:

Il valore di a_g è desunto dalla pericolosità di riferimento, attualmente fornita dallo INGV, mentre F_0 e T_C^* sono calcolati in modo che gli spettri di risposta elastici in accelerazione, velocità e spostamento forniti dalle NTC approssimino al meglio i corrispondenti spettri di risposta elastici in accelerazione, velocità e spostamento derivanti dalla pericolosità di riferimento.

Propongo allora alcune prime riflessioni, lasciando a sviluppi futuri un più ampio dibattito con i colleghi.

a. Il concetto di “Salvaguardia della vita”.

Si riporta, prima di tutto, la definizione di SLV contenuto nella NTC2018:

- **Stato Limite di salvaguardia della Vita (SLV):** a seguito del terremoto la costruzione subisce rotture e crolli dei componenti non strutturali ed impiantistici e significativi danni dei componenti strutturali cui si associa una perdita significativa di rigidità nei confronti delle azioni orizzontali; la costruzione conserva invece una parte della resistenza e rigidità per azioni verticali e un margine di sicurezza nei confronti del collasso per azioni sismiche orizzontali;

Il concetto è abbastanza vago e non si specifica se per “terremoto” s’intenda un evento, quindi se sia ammesso il crollo al secondo evento, oppure se s’intenda l’intera sequenza sismica. Se lo scopo è consentire la messa in salvo degli occupanti, è sufficiente superare un solo evento. Se invece ci si aspetta di superare tutta la sequenza, visto che non è possibile riparare le strutture fra una scossa e l’altra, la struttura dovrà garantire una prestazione ben superiore rispetto al primo caso.

Anche su questo discorso, quindi, occorrerebbe distinguere almeno fra le tre grandi categorie sopra menzionate.

b. Suscettibilità della struttura alle variazioni di input

Se è vero che sul dato dell’input sismico c’è incertezza, occorre anche capire come può il progetto tenerne conto. Su questo punto occorre necessariamente distinguere fra:

- strutture progettate in resistenza, quindi senza duttilità;
- strutture progettate in gerarchia delle resistenze;
- strutture dotate di dispositivi.

In quanto la differenza di comportamento è notevole. Le ultime, a differenza delle altre, possono teoricamente superare “n eventi” tutti uguali senza problemi e non risentono in modo particolare di variazioni sull’azione di input. Le prime, invece, saranno in grado di superare il primo evento ma non è detto che riescano a incassare tutto il danno accumulato fino alla fine della sequenza. Le seconde, cioè le strutture progettate in termini di resistenza, quindi tipicamente quelle a comportamento fragile, corrono un rischio aggiuntivo rispetto a tutte le altre. Infatti un evento che dovesse superare la a_g di riferimento, porterebbe inevitabilmente al crollo.

c. I picchi degli spettri

Il metodo utilizzato per normalizzare gli spettri non tiene conto dei picchi. E questo è ragionevole se si pensa a strutture a comportamento duttile, tenendo conto che si tratta di spettri elastici con indice di smorzamento convenzionale al 5%; meno logico se si pensa a strutture senza duttilità, peraltro ammesse dalla stessa NTC, per le quali i picchi potrebbero risultare fatali.

d. Utilizzo di accelerogrammi

E' evidente che l'utilizzo degli accelerogrammi deve essere in un qualche modo ricondotto alla pericolosità intrinseca degli spettri della NTC. Pertanto gli accelerogrammi (che siano 3 terne, o 7 terne, oppure oltre) devono per forza risultare nel loro insieme spettro-compatibili. Tuttavia nella NTC non si dice molto su questo argomento, che è lasciato alla sensibilità del progettista.

e. Note finali

Tutto quanto riportato in questo testo, che costituisce una raccolta personale di documenti, sintesi di seminari e riflessioni, non ha alcuna pretesa di completezza né di rigore scientifico; lo scopo è solo quello di supportare i colleghi che intendono approcciarsi alla tematica, sperando di fare cosa utile.

Segnalo che sono in corso ulteriori sviluppi del modello MPS04.

Ulteriori riflessioni e valutazioni sono rimandate a future trattazioni, e ringrazio chi, eventualmente, vorrà contribuire con correzioni, precisazioni, osservazioni, aggiunte.

27-02-2023

l'autore

Ing. Alessandro Pignagnoli