

Valutazione della pericolosità sismica

SABETTA F. (*), PACIELLO A. (**)

1. - INTRODUZIONE

Si definisce pericolosità sismica di un sito assegnato la probabilità di eccedenza di un parametro descrittivo del moto del terreno (intensità, picco di accelerazione, valori spettrali, ecc.) in un determinato intervallo di tempo. Tale probabilità viene normalmente calcolata stimando l'andamento del periodo medio di ritorno (T) o della frequenza di eccedenza ($1/T$) del parametro selezionato.

Nel caso del centro storico di Roma sono stati utilizzati due diversi metodi di tipo probabilistico per la valutazione della pericolosità: il primo, nel seguito indicato come «metodo del catalogo di sito», è basato sulla utilizzazione di un catalogo sismico locale che riporta per ogni evento il risentimento osservato in Roma; il secondo, basato sullo schema proposto da Cornell (1968) e di seguito indicato come «metodo di Cornell», prevede l'utilizzo oltre che di un catalogo sismico, di una zonazione sismogenetica e di una legge di attenuazione. Per una verifica dei risultati ottenuti è stato infine utilizzato un terzo metodo, di tipo deterministico, basato sulla stima dei massimi terremoti storici risentiti a Roma.

2. - METODO DEL CATALOGO DI SITO

Le ricerche effettuate sulla sismicità di Roma hanno permesso la compilazione del «catalogo dei terremoti di Roma» (vedi capitolo 6) costituito da 656 eventi con risentimento accertato a Roma.

Come già osservato nel suddetto capitolo, il ruolo di centro politico, religioso e culturale svolto

dalla città per oltre due millenni ha permesso di raccogliere numerosi dati al sito, anche relativi ad eventi sismici dei quali si conosce il risentimento a Roma ma non l'origine.

Un catalogo di sito è estremamente utile in quanto permette di evitare i passaggi più critici della catena metodologica che porta all'assegnazione della pericolosità: non è necessario definire le sorgenti sismogenetiche, né caratterizzarle assumendo una relazione di ricorrenza delle intensità e soprattutto non serve una legge di attenuazione per riportare al sito le intensità epicentrali osservate nelle diverse sorgenti. In definitiva, con l'utilizzo di un tale catalogo, la pericolosità si ottiene direttamente dai risentimenti al sito, opportunamente raggruppati in classi di intensità e normalizzati secondo il relativo intervallo di completezza, vale a dire il periodo di tempo durante il quale si ritiene che la maggior parte dei risentimenti appartenenti alla classe di intensità siano stati effettivamente riportati in catalogo. Gli intervalli di completezza utilizzati per le intensità macrosismiche di sito (capitolo 6) sono: a partire dall'anno 1000 per $I_s \geq VII$; dal 1500 per $I_s \geq VI$; dal 1700 per $I_s \geq IV$; dal 1870 per $I_s \geq III$.

Dal numero annuo di risentimenti per ciascuna classe si calcola l'andamento dell'intensità in funzione del periodo di ritorno che è riportato in fig. 1 (curva tratteggiata) ed in tab. 1 (prima riga). Va sottolineato che, adottando come è consuetudine la distribuzione di Poisson per i tempi di intercorrenza dei terremoti, associare, ad esempio, a un evento di intensità VI un periodo di ritorno di 100 anni, significa dire che in 100 anni tale evento ha una probabilità di eccedenza uguale a $1 - e^{-1}$ e cioè pari

(*) Servizio sismico Nazionale, Roma.

(**) ENEA, Roma.

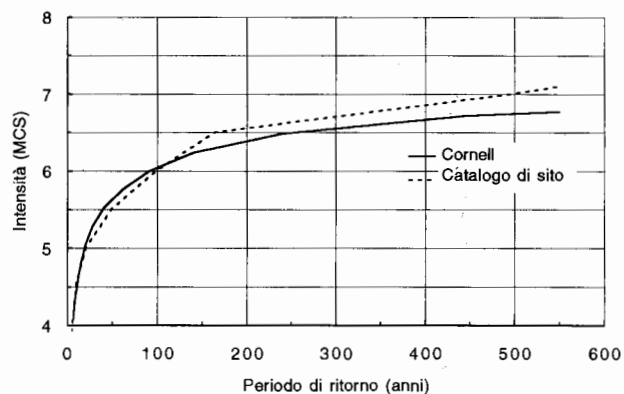


Fig. 1 - Intensità macrosismica in funzione del periodo di ritorno per i risultati ottenuti attraverso l'utilizzazione del catalogo di sito (curva tratteggiata) e l'applicazione del metodo di Cornell (curva continua).

a circa il 63%. Infatti la probabilità $p(1,t)$ di avere almeno un evento di periodo di ritorno T nel tempo t è data da:

$$p(1,t) = 1 - e^{-t/T}$$

In base alla eq. 1 è possibile calcolare altre statistiche di interesse, come i valori aventi una probabilità di eccedenza assegnata in un certo intervallo di tempo.

I risultati del metodo descritto possono essere espressi solo in termini di intensità macrosismica, poiché questo è l'unico parametro rappresentativo dell'entità del moto riportato nel catalogo di sito. Quando però l'analisi di pericolosità è finalizzata a valutazioni di tipo ingegneristico o rappresenta il primo passo per uno studio di rischio sismico, risulta necessario fornire i risultati anche in termini di altri parametri, quali i valori di picco del moto del terreno o i valori spettrali.

TAB. 1 - Valori dell'intensità macrosismica corrispondenti a diversi periodi di ritorno ottenuti col catalogo di sito e con il metodo di Cornell per diverse ipotesi di zonazione.

INTENSITÀ MACROSSISMICA (MCS)	PERIODO DI RITORNO (anni)			
	50	100	200	500
<i>Catalogo di sito</i>	V-VI	VI	VI-VII	VII
<i>Metodo di Cornell</i>				
Tutte le zone	V-VI	VI	VI	VII
Solo zona 31	IV	IV	V	V-VI
Esclusa zona 31	V	V-VI	VI	VII
Tutte le zone con zona 31 ridotta	V-VI	VI	VI-VII	VII

Il calcolo della pericolosità implica in questo caso una serie di scelte, generalmente soggettive, la cui combinazione può portare a risultati differenti, sebbene si utilizzino gli stessi dati di base.

La valutazione della pericolosità con un catalogo di sito, oltre a dare un quadro realistico in termini di intensità, diventa allora uno strumento particolarmente importante per verificare l'affidabilità dei risultati ottenuti con altri metodi.

3. - METODO DI CORNELL

Il metodo proposto da Cornell per la valutazione della pericolosità sismica si basa su due ipotesi di lavoro: i tempi di intercorrenza dei terremoti seguono la distribuzione statistica di un processo poissoniano (gli eventi sono indipendenti tra loro e stazionari nel tempo) e la distribuzione statistica della magnitudo è di tipo esponenziale (vale una relazione del tipo $\log(N) = a - bM$ fra numero di terremoti e loro magnitudo). L'applicazione del metodo di Cornell prevede i seguenti passi.

1) *Identificazione delle zone sismogenetiche*: è stata utilizzata la zonazione sismogenetica del territorio italiano proposta dal GNDT (Scandone et alii, 1991) che considera 58 zone omogenee dal punto di vista strutturale e sismogenetico. In particolare, come mostrato nella fig. 2, sono state considerate le zone sismogenetiche (ZS) comprese tra la 28 e la 41 che risultano di interesse per Roma. L'ipotesi alla base del metodo è che la sismicità di ogni zona sia uniforme e cioè che ciascun punto al suo interno abbia la stessa probabilità di essere epicentro di un futuro terremoto.

2) *Scelta del catalogo sismico, filtraggio e completezza*: è stato utilizzato il catalogo CNR-P.F.G. (Postpischl, 1985), filtrato, per eliminare le repliche e garantire l'ipotesi di indipendenza degli eventi, secondo un metodo (Veneziano & Van Dyck, 1985) che permette di stimare evento per evento le dimensioni della finestra spazio-temporale da considerare. Gli intervalli di completezza utilizzati sono: a partire dall'anno 1250 per $I \geq IX$; dal 1680 per $I > VII$; dal 1780 per $I > VI$; dal 1850 per $I > IV$. La fig. 2 mostra, suddivisi in tre classi di intensità, gli epicentri dei terremoti considerati.

3) *Conversione Intensità/Magnitudo*: i valori di magnitudo utilizzati sono quelli indicati nel catalogo PFG come magnitudo strumentali; in mancanza del dato strumentale (e cioè per gli eventi più antichi che sono la maggior parte) è stato usato il valore

di magnitudo calcolato a partire dall'intensità epicentrale tramite la relazione di conversione proposta da Karnik (Karnik, 1969).

4) *Scelta delle leggi di attenuazione*: per l'intensità è stata utilizzata la relazione di attenuazione isotropa di Grandori (Grandori et alii, 1991); per il picco di accelerazione, il picco di velocità e i valori dello spettro di risposta le relazioni di attenuazione proposte da Sabetta e Pugliese (Sabetta & Pugliese, 1987; Pugliese & Sabetta, 1989) riferite a terreni di tipo rigido e a distanze epicentrali.

Per il calcolo della pericolosità è stato utilizzato il codice di calcolo «Seisrisk III» (Bender & Perkins, 1987) con un'incertezza di 15 km associata alla definizione dei bordi delle zone sismogenetiche. Le analisi sono state effettuate in termini di intensità, picco di accelerazione (PGA), picco di velocità (PGV) e valori dello spettro di risposta corrispondenti a 14 frequenze.

Va sottolineato che i risultati che si ottengono per i valori di picco e i valori spettrali dipendono dal tipo di relazione intensità/magnitudo utilizzato. Ad esempio, l'impiego della relazione recentemente proposta da Rebez (convegno GNGTS 1993) in luogo di quella di Karnik, porta ad un aumento dei valori di PGA di circa il 30%; tale variazione è comunque compresa all'interno dell'incertezza associata alla legge di attenuazione.

I risultati ottenuti col metodo di Cornell in termini di intensità sono riportati, per diversi periodi di ritorno, in fig. 1 (linea continua) e tab. 1 (seconda riga). Come si può notare i risultati, nell'ambito dell'incertezza minima corrispondente a mezzo grado di intensità, coincidono con quelli ottenuti col catalogo di sito; si conferma pertanto la validità delle scelte fatte nell'applicazione del metodo di Cornell (zonazione, filtraggio del catalogo, legge di attenuazione).

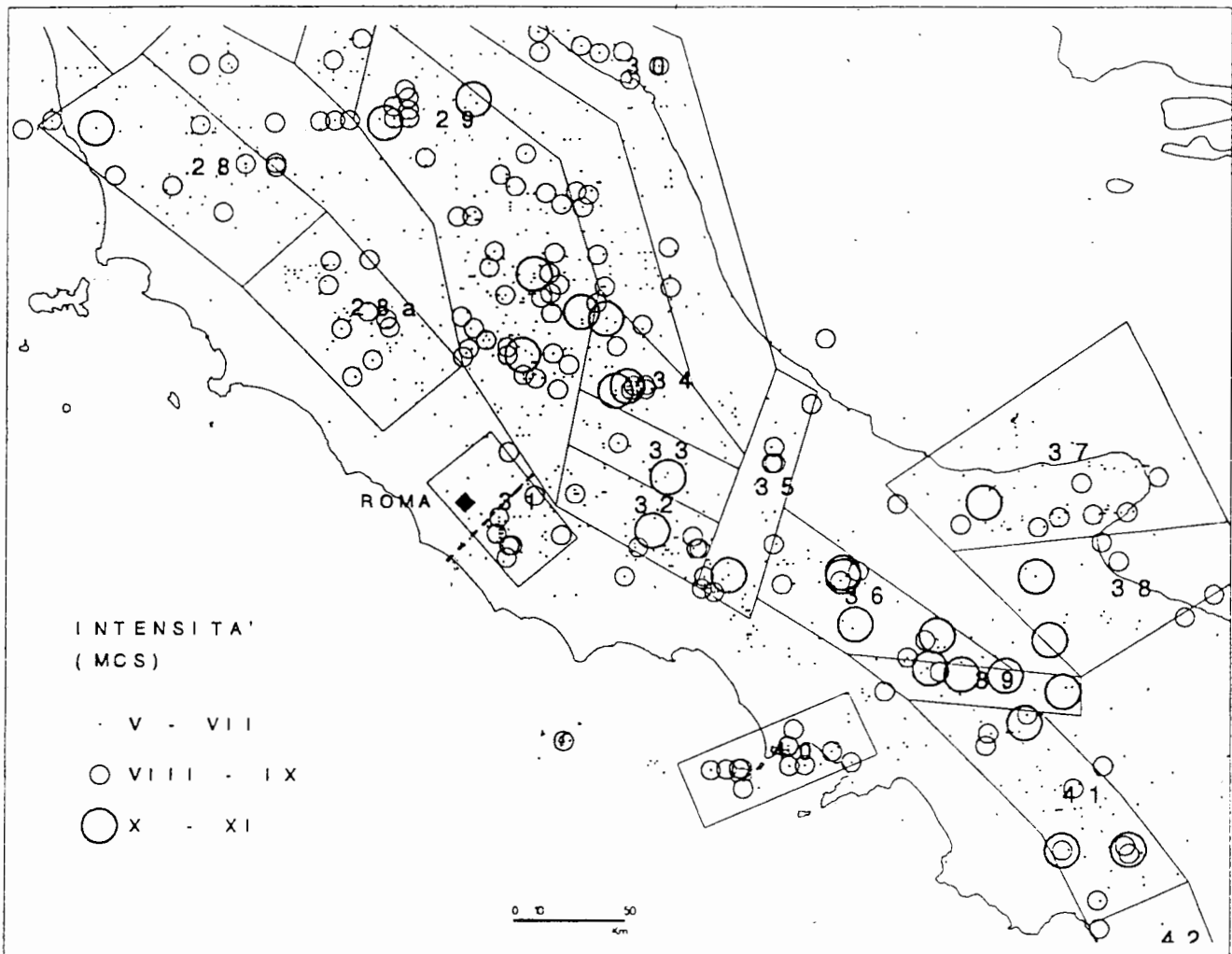


Fig. 2 - Zone sismogenetiche ed epicentri utilizzati per il calcolo della pericolosità di Roma.

I risultati ottenuti in termini di PGA a diversi periodi di ritorno sono riportati nella prima riga di tab. 2 e mostrano valori piuttosto elevati (per $T=500$ anni si raggiunge 0,1 g) per un sito a bassa sismicità come Roma. Questo risultato ha portato a una considerazione più attenta del contributo delle diverse ZS prossime a Roma.

Come si può vedere in fig. 2 la città di Roma è compresa all'interno della zona n° 31. Tale zona tiene conto essenzialmente della sismicità dei Colli Albani che si concentra nella sua parte sud-orientale e che è caratterizzata da frequenze di comparsa piuttosto alte e da intensità non elevate ($I_{\max} = \text{VIII}$ grado, $M_{\max} = 5$). Come già accennato la metodologia di Cornell assume una distribuzione equiprobabile degli epicentri all'interno di ogni ZS; ciò significa che la sismicità viene «spalmata» in modo uniforme su tutta la superficie della zona, indipendentemente dalla localizzazione originale degli eventi. Ne consegue che una parte della sismicità dei Colli Albani viene attribuita al sito di Roma, con distanza epicentrale pari a zero. Il contributo della zona 31 è mostrato in tab. 1 (righe 3 e 4) per l'intensità e in tab. 2 (righe 2 e 3) per l'accelerazione.

In termini di intensità il contributo della zona 31 è del tutto trascurabile e la sua esclusione (riga 4) porta ad un risultato quasi coincidente con quello globale (riga 2), tranne che per i bassi periodi di ritorno dove l'elevato tasso di ricorrenza dei terremoti dei Colli Albani contribuisce a un aumento di circa mezzo grado.

TAB. 2 - Valori del picco di accelerazione corrispondenti a diversi periodi di ritorno ottenuti con il metodo di Cornell per diverse ipotesi di zonazione

PICCO DI ACCETTAZIONE (g/100)	PERIODO DI RITORNO (anni)			
	50	100	200	500
Tutte le zone	5.20	6.60	8.00	10.42
Solo zona 31	5.12	6.55	7.96	10.43
Esclusa zona 31	2.19	2.68	3.30	4.10
Tutte le zone con zona 31 ridotta	3.01	3.62	4.18	5.13

In termini di accelerazione invece, il contributo della zona 31 è predominante per tutti i periodi di ritorno e la sua esclusione dal calcolo della pericolosità (riga 3 di tab. 2) porta a una riduzione di oltre il 50% nei valori di PGA. Tale risultato dipende dal fatto che i terremoti dei Colli Albani riportati al sito di Roma, danno un contributo elevato in termini di alte frequenze del moto, a cui

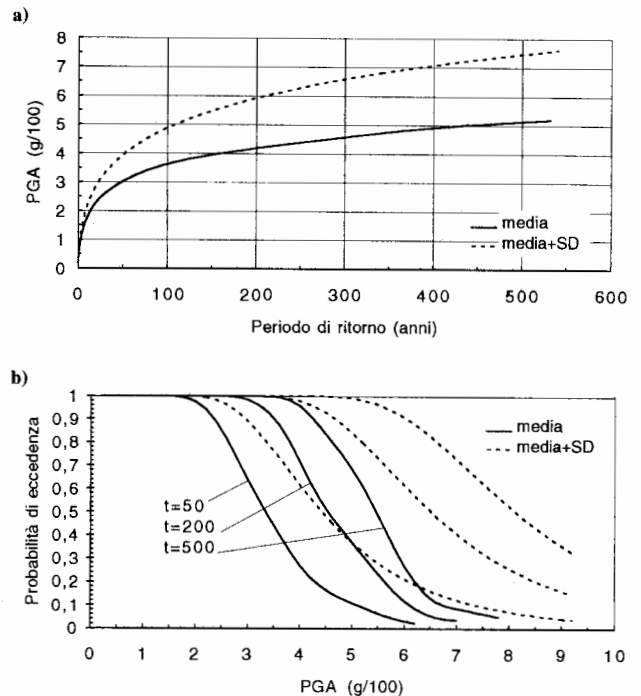


Fig. 3 - a) picco di accelerazione in funzione del periodo di ritorno; b) probabilità di eccedenza del picco di accelerazione per periodi di osservazione pari a 50, 200 e 500 anni. Le linee tratteggiate si riferiscono ai valori medi più la deviazione standard ricavata dalla legge di attenuazione.

è associato il PGA, mentre contribuiscono in maniera irrilevante alle frequenze medio-basse a cui è generalmente associato il danno e quindi l'intensità macrosismica. È questo un caso in cui la definizione accurata dei limiti della ZS che include il sito in esame assume una particolare importanza.

È stato pertanto deciso di modificare la ZS n° 31, come mostrato dalla linea tratteggiata in fig. 2, riducendola alla sua parte sud-orientale e quindi escludendo la città di Roma. I risultati sono mostrati nella riga 5 di tab. 1 e nella riga 4 di tab. 2, rispettivamente per intensità e PGA. I valori di intensità coincidono con quelli ottenuti dalla zonazione originale mentre i valori di accelerazione sono ridotti di quasi il 50% portando a un risultato decisamente più realistico di quello ottenuto inizialmente. La suddetta zonazione modificata è stata utilizzata per ottenere tutti i risultati descritti nel seguito.

Le figure 3a e 4a mostrano l'andamento del PGA e del PGV in funzione del periodo di ritorno. Oltre alla curva corrispondente ai valori medi è riportata anche (linea tratteggiata) quella che si ottiene utilizzando la deviazione standard associata alla legge di attenuazione (Sabetta & Pugliese, 1987) e che corrisponde a un aumento di circa il 45% per l'accelerazione e di circa il 65% per la velocità.

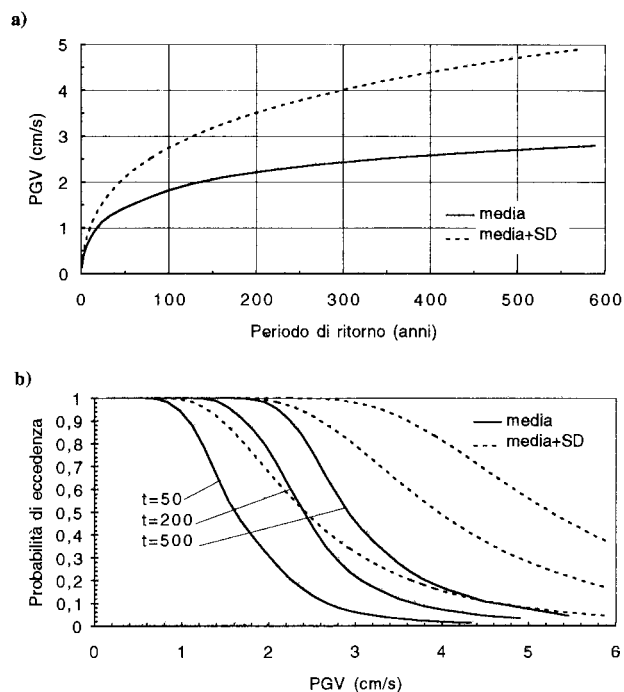


Fig. 4 - a) picco di velocità in funzione del periodo di ritorno; b) probabilità di eccedenza del picco di velocità per periodi di osservazione pari a 50, 200 e 500 anni. Le linee tratteggiate si riferiscono ai valori medi più la deviazione standard ricavata dalla legge di attenuazione.

Nelle figure 3b e 4b è riportato, rispettivamente per PGA e PGV, l'andamento della probabilità di eccedenza che si ottiene utilizzando la distribuzione di Poisson (eq. 1) per diversi periodi di osservazione. Ad esempio, i valori medi di PGA aventi una probabilità di eccedenza del 10%, sono pari a circa 5 centesimi di g in 50 anni e a circa 7 centesimi di g in 500 anni.

In fig. 5a sono mostrati, in scala logaritmica ed in funzione della frequenza, gli spettri di risposta di pseudo-velocità che hanno una probabilità del 63% di essere ecceduti in corrispondenza dei periodi di ritorno indicati. I valori spettrali sono stati ricavati dalla legge di attenuazione (Pugliese & Sabetta, 1989) per uno smorzamento del 5% e per un sito di tipo rigido. È interessante notare come la forma spettrale si modifichi al crescere del periodo di ritorno: aumenta infatti il contenuto in basse frequenze poiché diventa più importante il contributo delle sorgenti appenniniche (zone 32, 33 e 34 in fig. 2), caratterizzate da magnitudo più elevate e tasso di ricorrenza più basso rispetto alla sorgente dei Colli Albani. In fig. 5b gli stessi risultati sono rappresentati in termini di accelerazione e in scala lineare in funzione del periodo.

In fig. 6a sono riportati, in funzione del periodo di ritorno, i valori spettrali di accelerazione, con smorzamento del 5%, in corrispondenza a diversi valori del periodo proprio della struttura. In fig. 6b è mostrato l'andamento della probabilità di eccedenza degli stessi valori spettrali per periodi strutturali di 0.2 e 0.4 sec. e per tempi di osservazione pari a 50, 200 e 500 anni. Ad esempio, i valori dello spettro di accelerazione con periodo di 0.4 sec. aventi una probabilità di eccedenza del 10%, sono pari a circa 8.5 centesimi di g in 50 anni e a circa 14 centesimi di g in 500 anni.

Per tenere conto degli effetti di amplificazione legati alle condizioni litologiche locali si è utilizzata la classificazione di sito proposta nel già citato lavoro di Pugliese e Sabetta (1989) sulla stima di spettri di risposta. Tale classificazione, basata sulle caratteristiche litologiche delle postazioni accelerometriche italiane, prevede la distinzione tra terreni di tipo rigido (velocità stimata delle onde di taglio superiore a 800 m/s) e terreni di tipo alluvionale

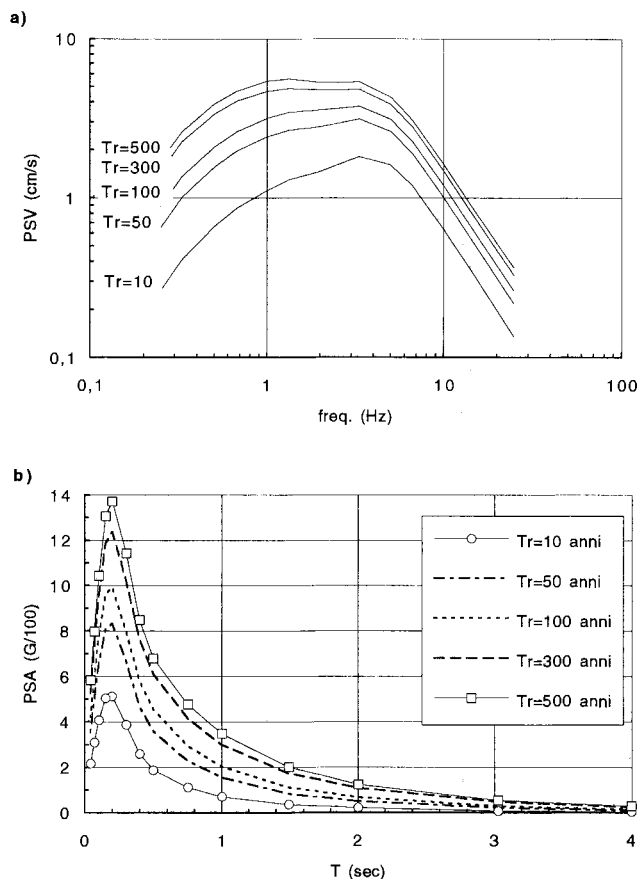


Fig. 5 - Spettri di risposta a pericolosità uniforme (smorz. = 5%) calcolati per diversi periodi di ritorno (Tr) e per un sito di tipo rigido: a) spettri di pseudo-velocità in funzione della frequenza; b) spettri di pseudo-accellerazione in funzione del periodo.

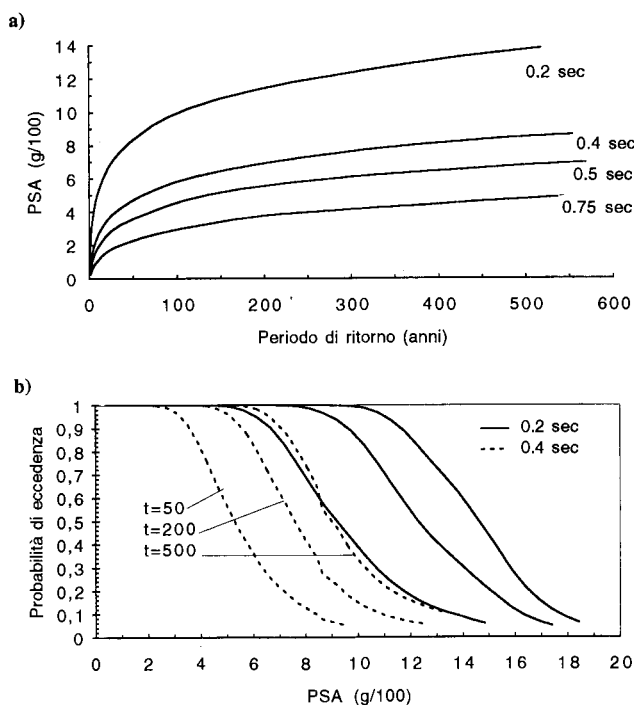


Fig. 6 - a) valori dello spettro di pseudo-accelerazione (smorz. = 5%) relativi a 4 diversi periodi (0,2, 0,4, 0,5, 0,75 sec.) in funzione del periodo di ritorno;

b) probabilità di eccedenza dei valori spettrali di accelerazione di periodo 0,2 e 0,4 sec. per tempi d'osservazione pari a 50, 200 e 500 anni.

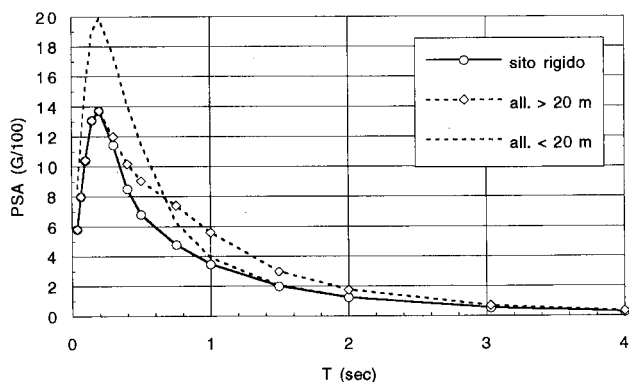


Fig. 7 - Spettri di risposta pseudo-accelerazione (smorz. = 5%) corrispondenti a un periodo di ritorno di 500 anni in funzione delle caratteristiche litologiche di sito (siti rigidi, alluvioni con spessore < 20 m, alluvioni con spessore 20 m).

(velocità media delle onde di taglio compresa tra 400 e 800 m/s). Per tenere conto della possibile amplificazione alle alte frequenze associata a siti alluvionali sottili, i terreni alluvionali vengono suddivisi a seconda dello spessore della formazione, portando alla definizione di tre categorie di sito: 1) siti rigidi; 2) siti alluvionali con spessore inferiore ai 20 m; 3) siti alluvionali con spessore maggiore od uguale a 20 m. La fig. 7 mostra gli spettri di accelerazione a pericolosità uniforme, corrispondenti a un periodo di ritorno di 500 anni, per le tre

categorie di sito suddette. I siti alluvionali sottili mostrano, rispetto ai siti rigidi, un fattore di amplificazione compreso tra 1,4 e 1,7 nel campo dei bassi periodi (0,04 - 0,8 sec); le alluvioni profonde sono invece caratterizzate da un fattore di amplificazione variabile tra 1,3 e 1,6 nel campo dei lunghi periodi (0,4 - 3 sec).

4. - MASSIMI EVENTI STORICI

I risultati dell'analisi della sismicità storica (capitolo 6) hanno mostrato che i maggiori risentimenti sismici in Roma sono dovuti a terremoti della zona dell'Aquilano e di quella dei Colli Albani. In base ai dati storici, è stata fissata, se pur con un certo grado di approssimazione, una magnitudo massima pari a 7 e una distanza dal centro storico di Roma di 85 km per l'Aquilano; una magnitudo massima pari a 5 e una distanza di 20 km per i Colli Albani. Applicando direttamente la legge di attenuazione (Pugliese & Sabetta, 1989), sono stati calcolati gli spettri di risposta corrispondenti alle coppie di magnitudo e distanza suddette che vengono messi a confronto in fig. 8 con quelli ottenuti dall'applicazione del metodo di Cornell. Lo spettro corrispondente a un periodo di ritorno di 50 anni è evidentemente dominato dal contributo della sismicità dei Colli Albani (alto tasso di ricorrenza e basse magnitudo) ed è simile a quello calcolato per $M=5$ e $R=20$ km. Lo spettro a periodo di ritorno di 500 anni è invece influenzato, nella parte a bassa frequenza, dalle sorgenti appenniniche (basso tasso di ricorrenza e alte magnitudo) e si avvicina a quello calcolato per $M=7$ e $R=85$ km. Inoltre, per frequenze superiori a 5 Hz, entrambi gli spettri deterministici ($M=5$ e $M=7$) coincidono con quello a periodo di ritorno di 500 anni. I valori che si ottengono con gli spettri a pericolosità uniforme sono, per alcuni campi di frequenza, più bassi di quelli calcolati deterministicamente attraverso la stima dei massimi terremoti storici poiché, come già discusso in precedenza, il metodo di Cornell assume una distribuzione equiprobabile degli epicentri dei terremoti sull'intera superficie delle zone sismogenetiche.

5. - CONCLUSIONI

I risultati ottenuti con diversi metodi di analisi sono sostanzialmente coincidenti tra loro ed in buon accordo con quanto recentemente ottenuto da altri

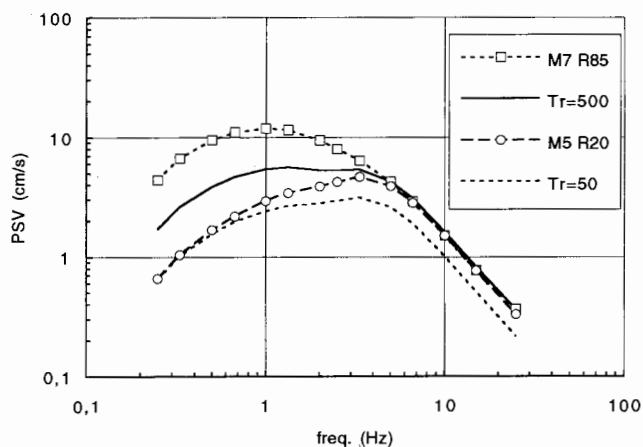


Fig. 8 - Confronto tra gli spettri di risposta ottenuti dalla legge di attenuazione rispettivamente per $M=7$, $R=85$ km e per $M=5$, $R=20$ km (curve con simboli) e gli spettri di risposta a pericolosità uniforme calcolati per periodi di ritorno pari a 50 e 500 anni.

autori per una valutazione della pericolosità sismica a scala nazionale (Slejko *et alii*, 1993). Come era giusto aspettarsi la pericolosità di Roma risulta piuttosto modesta rispetto al contesto nazionale:

– i valori ottenuti per un periodo di ritorno pari a 50 anni sono per l'intensità macrosismica V-VI MCS, per il picco di accelerazione e di velocità su terreni rigidi rispettivamente 0.03 g e 1.45

cm/s; per lo spettro di risposta, prendendo come riferimento un periodo di 0.4 secondi, si ottengono 0.047 g su terreno rigido e 0.056 g su terreno alluvionale profondo;

– per un periodo di ritorno di 500 anni si ottiene invece un'intensità pari a VII MCS, un PGA di 0.05 g un PGV di 2.7 cm/s ; per lo spettro di risposta a 0.4 secondi si ottengono 0.085 g su terreno rigido e 0.102 g su terreno alluvionale profondo.

Nonostante le incertezze associate ad alcune scelte necessariamente soggettive da effettuare nella valutazione della pericolosità (zonazione, filtraggio del catalogo, conversione intensità/magnitudo, legge di attenuazione) si ritiene che i suddetti risultati possano essere ragionevolmente considerati dei valori medi da utilizzare per una valutazione del rischio sismico del centro storico di Roma. Come limite superiore si possono utilizzare i valori ottenuti dall'analisi deterministica dei massimi terremoti storici che, per magnitudo pari a 7 e distanza epicentrale di 85 km, corrispondono a 0.06 g per il PGA, 4.6 cm/s per il PGV e 0.13 g per lo spettro di risposta su terreno rigido in corrispondenza a un periodo di 0.4 secondi.