

Alcune considerazioni sulla sicurezza delle costruzioni e sulla scelta del rischio sismico accettabile*

G. GRANDORI **

1. Introduzione

E' ormai generalmente riconosciuto che il concetto di « rischio accettabile di collasso »¹ è la chiave per una impostazione razionale del problema della sicurezza delle costruzioni. L'applicazione esplicita e sistematica di questo concetto nella formulazione delle norme di sicurezza incontra tuttavia non lievi difficoltà.

Difficoltà obiettive derivano dal fatto che il calcolo della probabilità di collasso richiede l'impiego di modelli matematici in generale molto complessi, ma ancor più dal fatto che per alcune delle variabili aleatorie in gioco non si possiedono informazioni statistiche sufficientemente estese. Sorgono inoltre serie difficoltà psicologiche, poiché la scelta di un rischio accettabile conduce necessariamente a dover prendere posizione su problemi estremamente delicati, quale quello del numero accettabile di vittime.

Mi propongo qui di discutere alcune delle difficoltà ora accennate e di illustrare i tentativi che si stanno facendo per superarle. E' utile, a tal fine, schematizzare il problema dividendolo in tre parti:

1) *il problema tecnico*, cioè il problema della valutazione della probabilità di collasso di una costruzione, probabilità che dipende in modo essenziale dalla severità delle norme di progetto adottate;

2) *il problema economico*, che comprende la valutazione dei costi diretti e indiretti, sia in fase di costruzione sia in caso di collasso, costi che dipendono ancora dalla severità delle norme;

3) *il problema degli intangibili*, dizione sotto la quale vengono raggruppati tutti i costi e benefici non monetari, quali il numero atteso di vittime o il livello di qualità dell'esistenza dell'individuo o della comunità.

Il problema tecnico e quello economico possono presentare caratteristiche anche molto di-

verse a seconda del tipo di costruzione considerato. Ne deriva che anche i metodi di approccio possono differire in modo sostanziale da caso a caso. Mi limiterò, per questi problemi, ad illustrare in seguito un modello proponibile per il caso particolare delle costruzioni in zona sismica.

Il problema degli intangibili presenta invece alcuni aspetti di carattere generale sui quali vale la pena di soffermarsi brevemente.

2. Il problema degli intangibili

I livelli di rischio oggi accettati, nel campo delle costruzioni come in molti altri campi, non si fondano su di una esplicita analisi dei costi e dei benefici. E' tuttavia largamente sentita l'esigenza di razionalizzare la scelta del rischio accettabile.

Ciò non significa che si tenda a ridurre l'intero problema ad una pura questione di calcolo: vi sono scelte di base sui pesi da attribuire ad alcuni fattori morali, sociali, psicologici che sfuggono ad ogni impostazione strettamente tecnica. Razionalizzare significa solo isolare e chiarire i fattori ora detti, così che le scelte di base possano essere fatte in modo più consapevole.

I tentativi di razionalizzazione finora fatti consistono essenzialmente nella proposta di indici di valutazione quantitativa dei principali costi e benefici non monetari.

Fra i costi, l'elemento di gran lunga più importante è il rischio per le vite umane, rappresentato quantitativamente dal numero medio annuo di vittime che una certa attività o condizione umana comporta (eventualmente rapportato ad altre grandezze come in seguito vedremo). Qualche autore ritiene che questo numero sia rappresentativo della gravità del rischio indipendentemente dalla distribuzione degli eventi nello spazio e nel tempo. E' un'ipotesi che semplifica il problema, ma sulla quale altri autori non concordano. A parità di numero medio annuo di vittime, osservano questi ultimi, una strage localizzata ed istantanea è più grave di una serie di incidenti diluiti nello spazio e nel tempo.

* Conferenza di apertura dell'XI Convegno di Geotecnica, Milano, marzo 1973.

** Prof. ing. Giuseppe GRANDORI, ordinario di *Scienza delle Costruzioni* al Politecnico di Milano.

Se si accetta la seconda tesi, si è naturalmente condotti a proporre dei pesi per le diverse distribuzioni degli incidenti. Si osservi, d'altra parte, che non si può comunque evitare l'attribuzione di pesi diversi a rischi che pur comportano un ugual numero medio annuo di vittime. Un rischio si presenta, ad esempio, assai diverso se è diluito su un grande numero di persone oppure se è concentrato su poche persone, così che il rischio individuale diventa altissimo.

Ma anche a parità di rischio individuale, oltre che di numero medio annuo di vittime, vi sono delle differenze profonde nei livelli di accettabilità, sulle quali la comunità si è già pronunciata con il proprio comportamento e delle quali non si può non tener conto. E' classica ad esempio la differenza fra rischi volontari ed involontari: sembra accertato che ciascuno di noi è ben lontano dal permettere che gli venga fatto dagli altri ciò che tranquillamente si fa da se stesso.

Come indice numerico di base per la misura di un rischio (al quale deve poi essere applicato, come si è detto, un peso opportuno) viene di solito considerato il rapporto:

$$P = \frac{\text{numero di vittime}}{\text{persona - ora di esposizione}}$$

Lo STARR ha valutato l'indice P, ad esempio, per i trasporti automobilistici ed aerei. Egli ha così constatato che il livello di rischio accettato per queste attività varia nel tempo, ma tende ad assestarsi (nella figura 1 è riportato l'andamento di P nel tempo per la motorizzazione privata negli Stati Uniti). E' interessante osservare che per

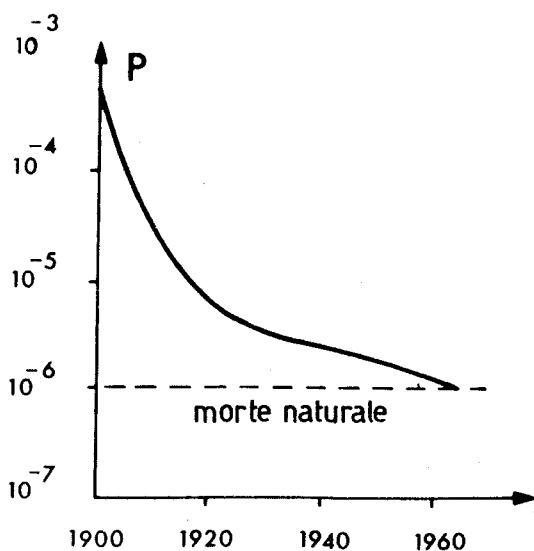


Fig. 1. — Andamento nel tempo dell'indice P (numero di vittime per persone-ora di esposizione relativo alla motorizzazione privata).

i trasporti, sia automobilistici sia aerei, il livello di rischio accettato si assesta sul valore di P corrispondente al rischio medio di morte per cause naturali. Qualche autore ha osservato che analisi quantitative di questo tipo, riferite a rischi ben noti e che la comunità ha accettato, possono costituire un riferimento per il giudizio di accettabilità di rischi nei riguardi dei quali la comunità non ha ancora assunto chiaramente un comportamento consapevole; ciò che accade quando il rischio connesso ad una attività è difficilmente valutabile per via intuitiva, oppure quando si tratta di una nuova attività.

Per quanto riguarda i benefici non monetari, legati al livello di qualità dell'esistenza, è stato proposto (da Starr e da altri autori) di misurare il beneficio, che la comunità ricava o si aspetta da una data attività, attraverso la spesa totale annua che la comunità dedica all'attività stessa. In tal modo un beneficio non monetario viene tradotto in termini monetari basandosi su un giudizio (che si ritiene fondato) operativamente espresso dalla comunità. Seguendo questa traccia, è stato proposto il seguente indice per il confronto dei rischi dal punto di vista degli intangibili:

$$Q = \frac{\text{spesa totale annua}}{\text{numero medio annuo di vittime}}$$

In base ad alcune statistiche relative agli Stati Uniti, è stato trovato che per le attività di produzione industriale l'indice Q vale in media 50×10^6 dollari/vittima, con un minimo di 5×10^6 per l'industria estrattiva mineraria ed un massimo di 200×10^6 per l'industria automobilistica. Per l'attività del semplice viaggiare in automobile si ha invece all'incirca $Q = 1 \times 10^6$ dollari/vittima.

Un tentativo di applicazione delle considerazioni sopra esposte a un problema concreto è stato fatto dal WIGGINS, il quale ha proposto per la città di Long Beach un criterio di scelta del rischio sismico accettabile, basandosi sull'indice P. Il criterio proposto dal Wiggins può essere esposto schematicamente come segue.

- 1) Calcolare l'indice P per alcuni dei più comuni e meglio conosciuti rischi, che possano considerarsi come consapevolmente accettati dalla comunità.
- 2) Calcolare l'indice P per il rischio sismico, in funzione del coefficiente sismico di base assunto a rappresentare la severità delle norme.
- 3) Costituire un consiglio di saggi eletti dalla comunità, con il compito di attribuire opportuni

pesi ai diversi rischi e di scegliere quindi, per confronto, il valore accettabile dell'indice P per il rischio sismico.

4) Una volta fissato il valore di P, ricavare dalla correlazione di cui al punto 2) il coefficiente sismico di base.

A proposito del criterio di Wiggins si può osservare, in primo luogo, che i giudizi di accettabilità espressi operativamente dalla comunità nei riguardi di rischi già noti da tempo possono essere non esenti da critiche anche sostanziali. Si deve dunque usare molta cautela nell'assumerli come giudizi di riferimento. Ma si potrebbe pensare, in verità, che il consiglio dei saggi sappia interpretare nel modo più opportuno tali giudizi.

Una critica più difficile da superare è la seguente: il criterio di Wiggins non tiene conto degli aspetti economici del problema. Ed è invece naturale pensare che, se il costo di prevenzione è molto basso, sia giusto ridurre al minimo il rischio; mentre se il costo di prevenzione è estremamente alto si è portati a ritenere accettabile un rischio più elevato. E' ben vero che è molto difficile trovare il modo di giudicare se sia giusto spendere una certa somma di denaro per salvare una vita umana, ma questo è in realtà il problema di fondo per la soluzione del quale dobbiamo cercare dei criteri almeno orientativi.

E' stato anche proposto di usare, per il confronto fra rischi diversi, l'indice Q, nel quale l'aspetto economico è presente. Ma è facile obiettare che nell'indice Q l'aspetto economico entra solo come misura dei benefici attesi, mentre manca anche qui la considerazione del costo di prevenzione. Si ripropone quindi lo stesso problema.

Una indicazione utile può essere messa in luce analizzando meglio l'affermazione che i giudizi di accettabilità espressi dalla comunità per alcuni rischi ben conosciuti possono costituire una base per i nostri confronti. Ammettiamo pure che per una data attività sia stato raggiunto un buon equilibrio tra costi e benefici. Dal punto di vista del rischio accettato ciò ha un preciso significato: la struttura tecnologica della attività considerata è tale che una ulteriore diminuzione del rischio comporterebbe un costo che la comunità ritiene eccessivo. Ciò non conduce necessariamente ad un confronto diretto fra una vita umana ed una somma di denaro, purché il giudizio della comunità venga interpretato nel modo seguente: il costo addizionale necessario per salvare una vita umana in più nell'attività specifica considerata, è più alto dell'analogo costo addizionale relativo ad altre attività; è quindi più conveniente

(nel senso che si salva così un maggior numero di vite umane) destinare le risorse della comunità a diminuire i rischi delle altre attività.

Le osservazioni ora esposte ci suggeriscono dunque un nuovo indice di confronto che potrebbe rendere più consapevoli le scelte della comunità: *il costo addizionale per vita salvata*. Cercheremo di calcolare tale indice per il caso particolare del rischio sismico, nel quale si può pensare in prima approssimazione che il costo e il numero di vite salvate dipendano da un solo parametro: il coefficiente sismico di base che caratterizza la severità delle norme.

3. Analisi costi-benefici per costruzioni in zona sismica

Per impostare una analisi costi-benefici nel campo dell'ingegneria sismica è necessario pervenire ad una stima quantitativa di tre elementi essenziali:

- 1) il costo addizionale di costruzione, che, per un dato sito e un dato tipo di costruzione, dipende dalla severità delle norme adottate in sede di progetto;
- 2) il costo monetario diretto o indiretto dei danni che deriveranno dai futuri terremoti;
- 3) il numero atteso di vittime dovute ai crolli.

Per quanto riguarda il costo addizionale di costruzione, non vi sono nella letteratura risultati di ricerche sistematiche. In generale viene stimato che il costo addizionale possa variare fra il 2 % e il 6 % del costo totale della costruzione.

Sul costo monetario dei danni le informazioni disponibili sono vaghe e contraddittorie. In una relazione preparata dallo U.S. Department of Commerce, il costo dei danni sarebbe stato in California, nel periodo 1933-1967, pari a 1 dollaro/abitante/anno. In Earthquake Engineering Research, una stima per i prossimi 30 anni, nella stessa zona, conduce ad un costo di 10 dollari/abitante/anno.

Si tratta di dati globali che comprendono zone di sismicità diversa e tutti gli edifici esistenti, anche quelli costruiti prima dell'entrata in vigore delle norme sismiche. Essi non sono dunque utilizzabili per la ricerca del costo addizionale per vita salvata, per un dato tipo di edificio e per un sito di data sismicità, in funzione del coefficiente sismico di base.

In alcuni recenti lavori, pubblicati da D. BENEDETTI e da chi vi parla, è presentato un modello

di calcolo per la valutazione del costo addizionale ora detto. Il modello può essere brevemente descritto nel modo seguente.

a) *Sismicità del sito* — La sismicità del sito nel quale si immagina che debba essere eseguita la costruzione è stata definita attraverso le quattro ipotesi qui di seguito riportate.

1) Il sito faccia parte di una zona sismicamente omogenea, con distribuzione uniforme di epicentri, la cui attività sismica sia rappresentata da una correlazione fra la magnitudo M e il periodo di ritorno T . E' stata considerata, a titolo di esempio, la correlazione fra M e T indicata con SC nella figura 2, che è valida per la California meridionale e si riferisce ad un'area

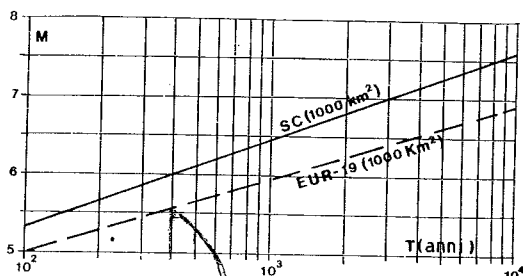


Fig. 2. — Correlazione fra Magnitudo e periodo di ritorno per la California meridionale (linea intera) e per la zona europea n. 19 (linea a tratti).

di 1000 km². Della linea tratteggiata indicata con EUR-19 discuteremo più avanti.

2) Si supponga che la massima accelerazione del terreno nella zona epicentrale, a_M , dipenda da M secondo una legge nota. Sempre a titolo di esempio sono state considerate due correlazioni fra a_M e M , ricavate dalla letteratura per la California meridionale ed indicate nella figura 3 con 1 e 2. Nella fascia delimitata dalle due curve dovrebbe collocarsi, se esiste, la correlazione reale.

3) L'accelerazione massima del terreno nel sito considerato sia uguale ad a_M se la distanza epicentrale è minore di R ; sia invece nulla se detta distanza è maggiore di R .

La distanza R è così definita:

$$R \text{ (miglia)} = 10 + 2 (M-4),$$

non considerandosi valori di magnitudo minori di 4. In base alle ipotesi finora introdotte si ricavano le correlazioni fra a_M e T indicate nella figura 4, che danno una misura della attività sismica del sito in esame.

4) Tutti i terremoti che si verificano nel sito

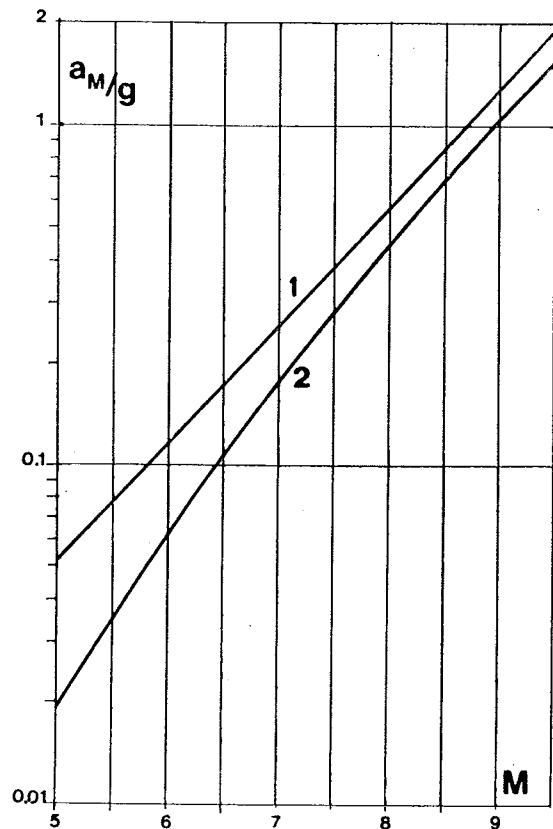


Fig. 3. — Correlazioni fra Magnitudo e massima accelerazione del terreno proposte da diversi autori per la California meridionale.

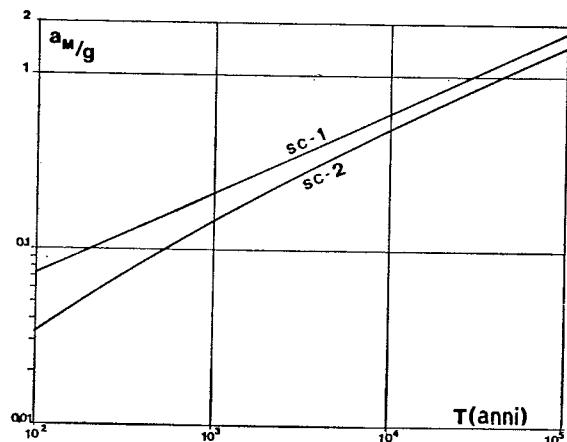


Fig. 4. — Correlazioni fra massima accelerazione del terreno e periodo di ritorno.

abbiano spettri di risposta simili fra loro. La forma di tali spettri di risposta è definita da uno spettro di risposta normalizzato, riportato nella figura 5 e valido per $a_M = 0.1$ g.

b) *Costo addizionale di costruzione e costo dei danni* — E' stato considerato un solo tipo di costruzione: un edificio per abitazione con struttura portante a telaio in cemento armato e do-

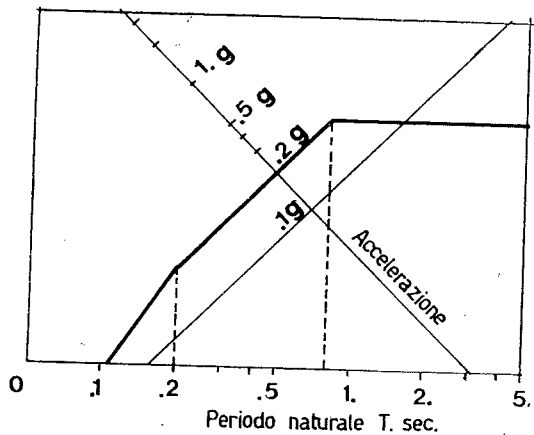


Fig. 5. — Spettro di risposta normalizzato per $a_M = 0.1$ g.

tato di pareti di controvento. Lo schema dell'edificio, di dieci piani, è riportato nella figura 6.

La struttura portante dell'edificio è stata dimensionata per diversi valori del coefficiente sismico di base, seguendo per la distribuzione delle forze e per gli altri dettagli di progettazione le

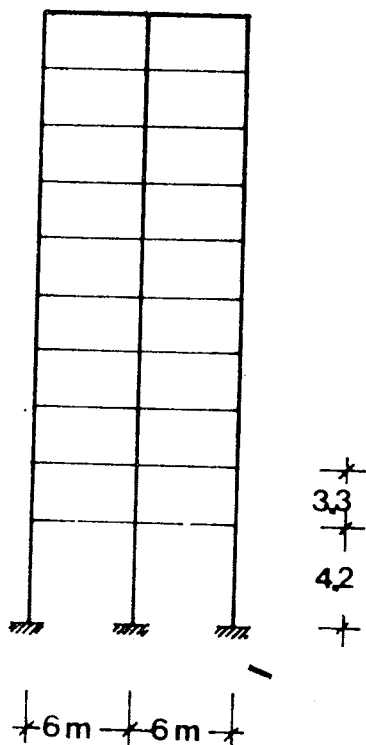


Fig. 6. — Schema della struttura portante dell'edificio considerato.

prescrizioni previste dalle nuove norme sismiche italiane di prossima emanazione. Una volta dimensionata la struttura, è stato possibile valutare l'accelerazione di crollo e quindi, in base alla sismicità del sito, la probabilità di crollo (v. figura 7). La probabilità di crollo risulta ovviamente funzione del coefficiente sismico di base, C , assunto per il dimensionamento.

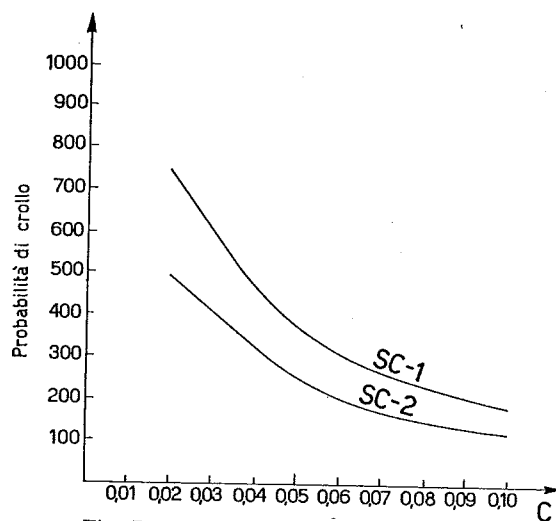


Fig. 7. — Probabilità annua di crollo.

Il costo aggiuntivo di costruzione, rispetto al caso di forze orizzontali nulle, è rappresentato dalla curva a della figura 8. Le ordinate della curva a sono state poi diminuite del costo corrispondente a $C = 0.01$, che è stato ritenuto equivalente al costo della verifica alla azione del vento. Si è così ottenuta la curva b .

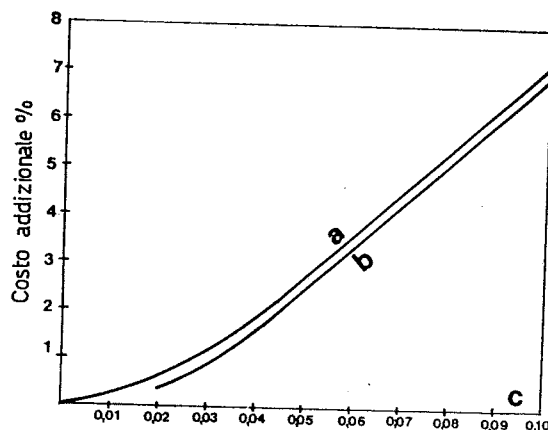


Fig. 8. — Costo aggiuntivo di costruzione in funzione del coefficiente sismico di base.

La stessa curva b è riportata nella figura 9 in termini di dollari/abitante/anno. Le altre due curve nella stessa figura sono state ottenute aggiungendo il costo dei danni, sempre nelle due ipotesi di partenza circa la correlazione fra a_M ed M . Il costo dei danni è stato valutato nel modo seguente.

Per ogni valore di C era nota l'accelerazione di collasso. Si è allora supposto che i danni comincino a manifestarsi quando $a_M/g = 0.05 + C$, e dipendano linearmente da a_M raggiungendo il 100% quando a_M eguaglia l'accelerazione di collasso (v. figura 10). I danni sono stati infine

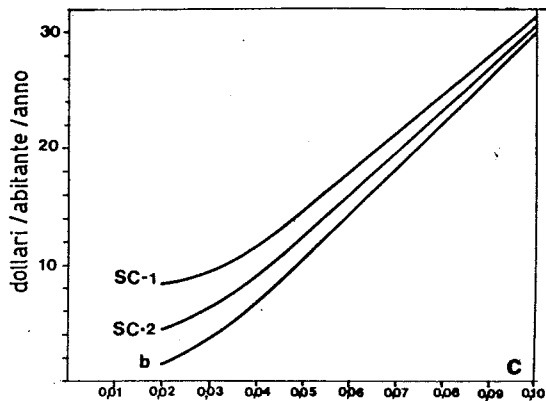


Fig. 9. — Costo aggiuntivo di costruzione e costo totale (compresi i danni).

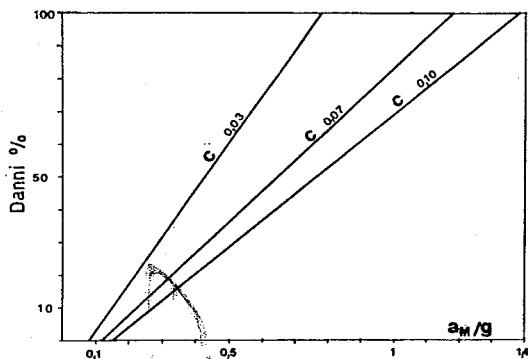


Fig. 10. — Ammontare dei danni (in % del valore totale della costruzione) in funzione del coefficiente sismico di base e della massima accelerazione del terreno durante un terremoto.

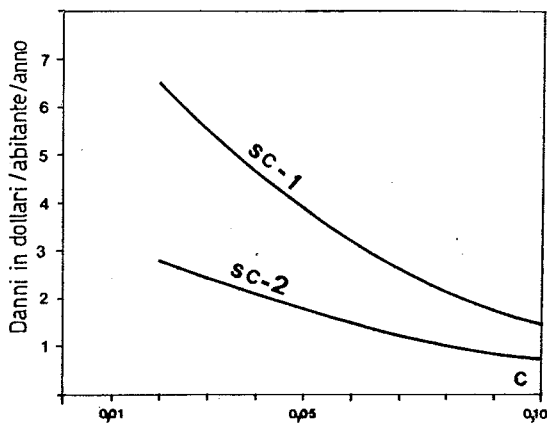


Fig. 11. — Danni previsti.

aumentati del 50 % per tener conto in via approssimata dei costi indiretti. Il costo totale dei danni è rappresentato nella figura 11: i risultati di questo calcolo non sono in disaccordo con le valutazioni globali ricavate dalla letteratura e citate poc'anzi.

c) *Costo aggiuntivo per vita salvata* — E' stata innanzitutto ricavata, dalle statistiche dei terre-

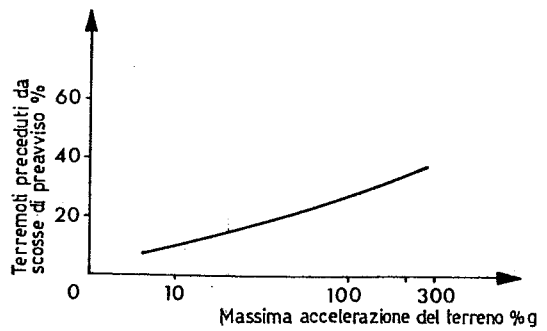


Fig. 12

moti italiani, la percentuale di terremoti nei quali la scossa principale è preceduta da scosse di preavviso notevolmente più deboli. Detta percentuale varia con a_M ed è riportata nella figura 12.

E' stata quindi introdotta l'ipotesi che per i terremoti che provocano il collasso senza preavviso il numero di vittime sia uguale a quello degli abitanti; mentre per i terremoti con deboli scosse di preavviso si è supposto che non si verificano vittime. Il numero medio annuo di vittime derivante da tali ipotesi è rappresentato nella figura 13, sempre in funzione del coeffi-

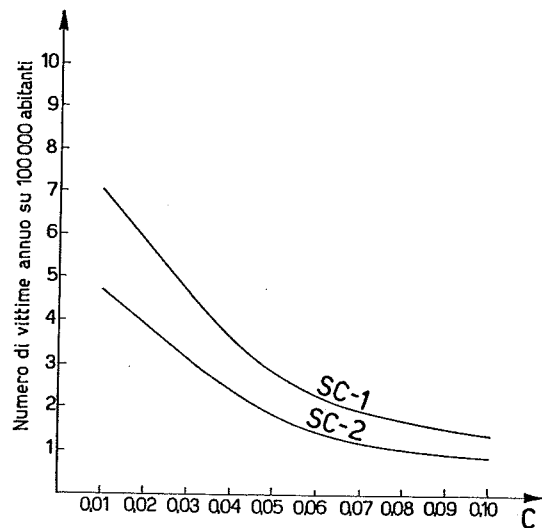


Fig. 13

ciente C assunto per il progetto e per le due diverse ipotesi circa la correlazione fra a_M ed M.

Dagli elementi di costo e da quelli sul numero delle vittime è stato infine possibile ottenere le curve $\Delta D/\Delta L$ della figura 14. Il rapporto incrementale $\Delta D/\Delta L$ rappresenta il costo aggiuntivo necessario per salvare una vita umana in più, e dipende ovviamente dal valore di C con il quale si sta operando.

Le linee tratteggiate sono ottenute in modo

identico a quelle intere, ma trascurando il costo dei danni.

Le curve in alto a sinistra nella figura 14 sono state ottenute con le stesse modalità, ma partendo dalla correlazione fra M e T valida per la zona europea 19, nella quale è compresa l'Italia centrale (linea tratteggiata nella figura 2). Questi ultimi risultati servono solo a mostrare la sensi-

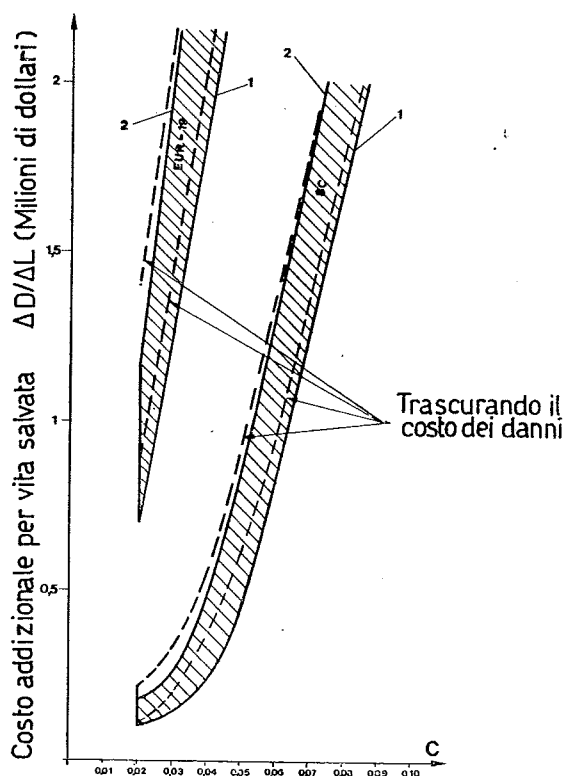


Fig. 14.

bilità del modello alla correlazione M-T, ma non possono in alcun modo essere riferiti alle effettive condizioni dell'Italia centrale, per la quale non sono noti né una correlazione fra a_M e M, né uno spettro medio di risposta.

4. Conclusioni

Molto lavoro sarà ancora necessario prima che gli aspetti quantitativi di questa ricerca possano essere considerati significativi da ogni punto di vista. Sembra, però, che possano farsi fin d'ora alcuni commenti non privi di interesse.

1) Se la correlazione fra a_M ed M è nota con le incertezze rappresentate dalle differenze delle due curve della figura 3, la dispersione dei risultati finali non è grave.

2) Il costo dei danni ha poca influenza sui risultati finali, così che sembra lecito trascurarli oppure tenerne conto con schemi di calcolo più semplificati.

3) La correlazione fra M e T ha grande influenza sui risultati finali. Ciò potrebbe consentire di migliorare la differenziazione fra diverse zone sismiche per quanto riguarda la severità delle norme di progetto.

4) Il problema della scelta del rischio sismico accettabile è naturalmente ancora lontano da una soddisfacente soluzione. Si può tuttavia sperare che l'indice $\Delta D/\Delta L$ possa essere di qualche aiuto, insieme ad altri indici che sono stati proposti o che potranno esserlo in futuro, nell'operare delle scelte sempre più consapevoli, tendenti cioè ad equilibrare gli sforzi della comunità nel campo della prevenzione.

E' ben vero che, anche ammesso che venga raggiunto un soddisfacente equilibrio fra i diversi rischi, resterà sempre il problema di scegliere l'ammontare globale delle risorse da dedicare alla prevenzione di tutti i rischi. E qui il confronto con i benefici che si potrebbero trarre per altra via dalle stesse somme di denaro diventerà l'elemento decisivo. Ma questo è forse un problema per i nostri nipoti, ammesso che nel frattempo le condizioni di vita dell'umanità sul nostro pianeta non siano talmente cambiate da proporre il problema della sicurezza in termini completamente diversi e oggi imprevedibili.

BIBLIOGRAFIA

- STARR C. (1969) — *Social Benefit versus Technological Risk*. Science, vol. 165, Sept.
- WIGGINS J. H. (1972) — *The Balanced Risk Concept: new approach to earthquake building codes*. Civil Engineering ASCE, August.
- CRUMLISH J. D., WIRTH G. F. (1967) — *A Preliminary Study of Engineering Seismology Benefits*, U.S. Department of Commerce, Rockville, Maryland.
- (1969) — *Earthquake Engineering Research*. Nat. Academy of Sciences, Washington.
- GRANDORI G., BENEDETTI D. (1972) — *Problemi connessi con la scelta del rischio sismico accettabile*. Ist. Lombardo Accademia di Scienze e Lettere, (A), vol. 106.
- GRANDORI G., BENEDETTI D. (1972) — *On the Choice of the Acceptable Seismic Risk*. 4th European Symposium on Earthquake Engineering, London.
- GRANDORI G., BENEDETTI D. (1973) — *On the Choice of the Acceptable Seismic Risk - A new Approach*. 5th World Conference on Earthquake Engineering, Rome.

SUMMARY

Some consideration on the safety of construction and on the selection of the acceptable seismic risk

The proper choice of the safety factor requires an accurate cost-benefit analysis. As is well known these analyses present considerable difficulties if one wishes to face the problem in a general way from the technical point of view. Besides, there are no generally accepted criteria for formulating a quantitative evaluation of the intangibles, among which the most important is the risk to human life. However, it appears indispensable that research should be started in the field which leads

to some numerical results.

Here the problem of intangibles is discussed and a simplified analytical model is proposed for the case of seismic risk. The basic idea is that the comparison with other risks is the most realistic instrument for the choice of an acceptable level of the specific considered risk. The conclusion reached is that a fundamental index for comparison and decision is the incremental cost of investment necessary to save, on average, one human life a year. An evaluation of such an index, valid as a first approximation, is given for this simplified model.

