

Alcuni elementi essenziali di sismologia applicati all'ingegneria

di Giovanni Menditto (*)

1. L'origine degli eventi sismici

Un terremoto (*earthquake*), secondo l'ipotesi "tettonica", è originato da un'improvvisa variazione dello stato tensionale in un punto od in una zona terrestre, con rilascio di energia sotto forma di *onde elastiche* (*stresswaves*), conseguente ad un rapido fenomeno di fratturazione della roccia e quindi di spostamento di blocchi rocciosi lungo delle superfici di discontinuità (*faglie*) (1).

Questo naturale ed inesorabile processo di trasformazione della crosta terrestre è noto come "deriva dei continenti".

Il punto in cui è collocata l'improvvisa variazione, che dà origine al terremoto (centro di rottura), è detto *sorgente sismica*, *fuoco* (*focus*) o *ipocentro*. Esso è il baricentro dell'energia di deformazione liberata.

La nozione di *ipocentro* è legata alla distanza a cui si osserva il fenomeno rapportata alla superficie effettiva di frattura.

Il punto della superficie terrestre sulla verticale passante per l'*ipocentro* è detto *epicentro* (*epicenter*).

Profondità ipocentrale è la distanza tra ipocentro ed epicentro.

Le *profondità ipocentrali* variano da pochi chilometri a centinaia di km sotto la superficie terrestre.

È evidente che una sorgente di onde elastiche non può essere un punto geometrico e quindi l'*ipocentro* (o rispettivamente epicentro), come sopra definito, è solo una rappresentazione estremamente semplificata della realtà fisica.

Un punto di osservazione del sisma sulla superficie terrestre è chiamato *stazione*. Si definisce *distanza ipocentrale* (rispettivamente *epicentrale*) la distanza tra il punto di stazione e l'*ipocentro* o, rispettivamente, l'*epicentro*. In generale se tale distanza è di 60÷70 km si parla di *terremoto superficiale*; se tra

300÷500km di *terremoto intermedio*, se tra 500÷700km, *terremoto profondo*.

2. La propagazione del moto sismico

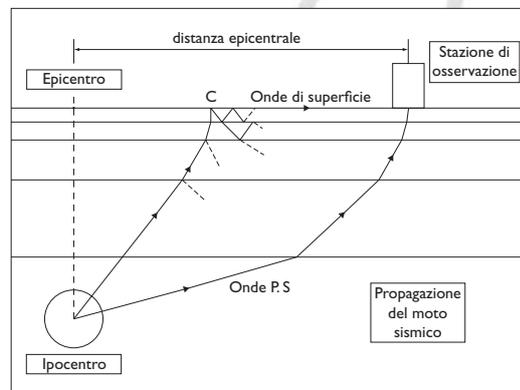
Il moto sismico si irradia per tutti i raggi che partono dal punto iniziale (**ipocentro**) dell'emissione dell'energia liberata. Infine si diffonde come onde sismiche in conseguenza di una non precisabile *attenuazione* che, legata alla natura dei terreni attraversati, incide in modo differente sulla propagazione del moto (fig. 1).

Purtuttavia un fenomeno diffusivo così complesso sotto il profilo ingegneristico, per essere affrontato sul piano operativo, richiede una necessaria schematizzazione.

Alla fondazione di un edificio (fig. 1a) giungono principalmente due onde sismiche: quelle irradiate dall'**ipocentro**, che corrono nel terreno come *onde longitudinali* (fig. 2) e danno un impulso che viene decomposto in una componente **verticale** (di compressione: moto *sussultorio*, onda P fig. 3) ed in una componente **orizzontale** (moto *ondulatorio*, onda S) (2) e quelle *superficiali* irradiate dall'**epicentro** (fig. 1b).

Le onde P (o *onde prime*) hanno la direzione di propagazione del loro fronte d'onda coincidente con quella del movimento delle

Figura 1a



* Libero professionista.

(1) Le *faglie* sono superfici della crosta terrestre che rappresentano una discontinuità della struttura geologica e testimoniano di ripetuti scorrimenti di rocce avvenuto lungo di esse. Le faglie possono essere sedi di fenomeni di compenetrazione o distacco, con conseguenti accumuli di materiali o fratture della crosta terrestre. La dimensione della faglia tipicamente è di 20÷30 km di lunghezza e di circa 10÷15 km di larghezza. Lo spostamento relativo dei blocchi rocciosi è dell'ordine di grandezza del moto.

(2) Sotto l'aspetto sismologico, invece, non ha alcun senso parlare di scosse *sussultorie* ed *ondulatorie* ma di *caratteristiche tipiche dei movimenti vibratorii* da considerarsi secondo le tre componenti spaziali.

Figura 1b

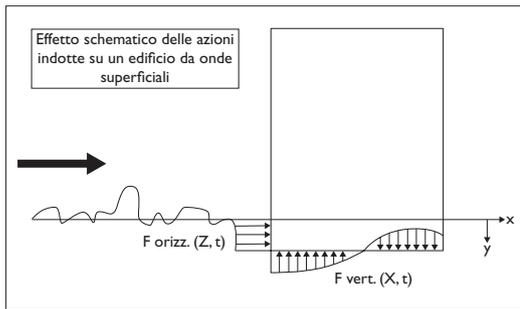


Figura 2 – Onde longitudinali

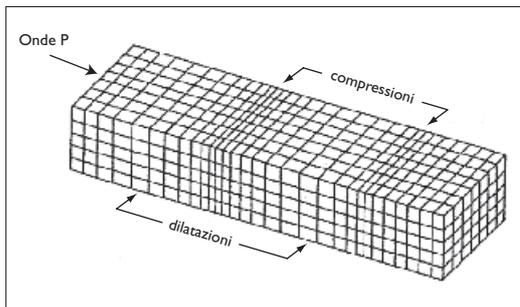
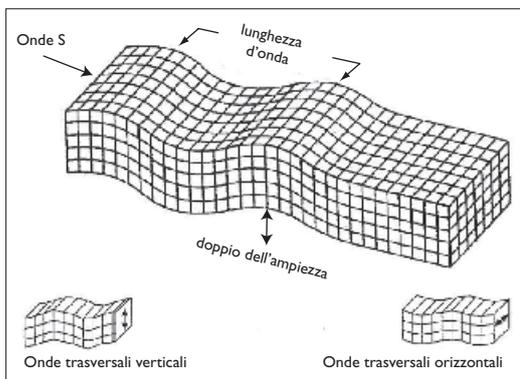


Figura 3 – Onde trasversali



particelle e tutti i punti appartenenti ai piani perpendicolari a tale direzione si muovono con la stessa ampiezza; le conseguenti vibrazioni producono spostamenti periodici nella stessa direzione della propagazione. Vengono chiamate *onde P* (dal latino “*primae*”) perché avendo la maggiore velocità di propagazione (V_p) giungono per prime. Le onde *S* (dal latino *secundae*) provocano deformazioni angolari e variazione di forma degli strati di terreno attraversati. Hanno velocità $V_s < V_p$ (si veda, *ex plurimis*, [2], §9, nota 1.4).

Il moto delle particelle avviene in un piano perpendicolare alla direzione di propagazione dell'onda e risulta formato da due componenti disaccoppiate: una in cui gli spostamenti avvengono nel piano contenente la

Figura 4 – Onde di Rayleigh

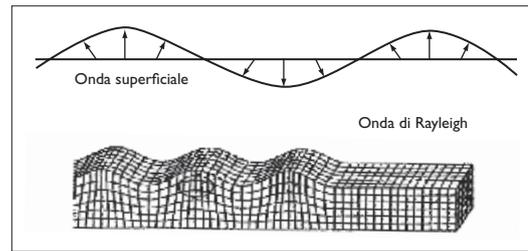
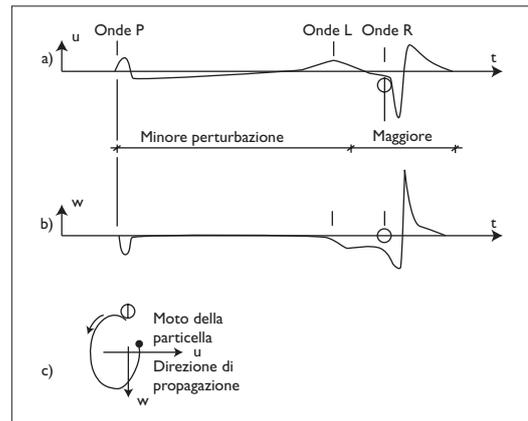


Figura 5 – Moto delle particelle



direzione di propagazione del fronte d'onda, ma perpendicolarmente ad essa, ed una in cui gli spostamenti avvengono perpendicolarmente a tale piano.

Le *onde superficiali* vengono identificate in:

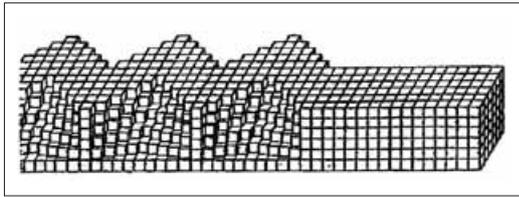
- **quelle R di Rayleigh** (*onde R*), legate a movimenti ellittici delle particelle della crosta (fig. 4), vibrano in un piano perpendicolare a quello della superficie terrestre ed inducono nelle particelle interessate un movimento ellittico (fig. 5);
- **quelle L di Love** (*onde L*, fig. 6), che si originano nelle formazioni stratificate e sviluppano deformazioni nelle quali le particelle si muovono in un piano parallelo alla superficie terrestre perpendicolarmente alla direzione di propagazione e secondo un piano orizzontale.

Queste onde producono oscillazioni orizzontali che danno scosse ondulatorie ed anche rotatorie.

Le *onde superficiali*, probabilmente generate nell'ipocentro dalle onde provenienti direttamente dal suolo, si propagano sulle superfici del terreno e sono quelle che determinano il massimo spostamento orizzontale del terreno stesso, causando la maggior parte del danneggiamento.

La fig. 1a mostra la posizione relativa di una *sorgente sismica*, di una *stazione di osservazione*,

Figura 6 – Onde di Love



nonché una tipica *traiettoria di propagazione* per onde P ed una *traiettoria* per le onde L. La velocità di propagazione delle onde sismiche sugli strati terrestri aumenta con la profondità, pertanto le *traiettorie* di dette onde vengono piegate verso l'alto ad ogni successiva rifrazione alla frontiera fra due formazioni geologiche diverse.

Dalla base del manufatto, l'impulso si trasmette poi alle membrature in elevazione, cui tende ad imprimere oscillazioni generalmente discordanti.

Propagandosi nella zona più superficiale della crosta terrestre, le onde sismiche subiscono fenomeni di *riflessione multipla*, *diffrazione* e *focalizzazione* causati dalla eterogeneità ivi presenti.

Sotto certe particolari condizioni, geologiche e topografiche, tali fenomeni generano *effetti di sito* capaci di modificare in misura significativa, in zone specifiche (per esempio, su una valle alluvionale o alla sommità di un'altura pronunciata), il moto vibratorio del suolo originato da un terremoto. In particolare possono venire esaltate l'*ampiezza* e la *durata* del moto, rispetto a quelle che si avrebbero su suolo rigido ed in assenza di irregolarità nel rilievo.

La severità degli effetti di amplificazione locale delle scosse sismiche su depositi alluvionali a stratificazione abbastanza regolare è governata dal contrasto di *impedenza* dei materiali presenti nel profilo del terreno in superficie ed a profondità maggiore (substrato più rigido), nonché dal contenuto di frequenza del moto sismico eccitante rispetto alla frequenza fondamentale di risonanza del deposito.

Le vibrazioni del terreno indotte da un terremoto sono definite da tre caratteristiche:

- a) l'intensità;
- b) il contenuto in frequenza;
- c) la durata.

Queste dipendono a loro volta da quattro fattori:

- 1) il meccanismo della *sorgente sismica* (fig. 1) e la quantità di energia da essa liberata;
- 2) la distanza della *sorgente* (fig. 1);
- 3) le proprietà meccaniche della porzione della crosta terrestre attraversata da vari tipi di onde;
- 4) le condizioni geologiche locali.

3. Manifestazioni del sisma sui manufatti

Nel corso dell'evento sismico un manufatto è investito dalla *scossa principale* (*main-shock*), quella cioè di maggior intensità; la parte di energia non sprigionata provoca uno stato di tensione nella nuova configurazione che può risultare superiore alla resistenza allo scorrimento o al distacco lungo le nuove superfici di contatto.

Il manufatto può allora essere ulteriormente investito da:

- piccole scosse che precedono quella principale (*preshocks* o *foreshocks*).

Questa manifestazione è probabilmente legata al raggiungimento dei livelli di tensione che generano distruzioni locali nei più deboli strati di roccia, mentre la frattura principale non può ancora formarsi;

- nuove scosse (*after-shocks*), generalmente meno intense di quella principale.

Poiché il processo di indebolimento delle masse non è uniforme nel tempo, le intensità dei singoli *after-shocks* approssimano talvolta l'intensità della scossa principale⁽³⁾.

Questi effetti, noti come *scosse di assestamento*, possono durare anche qualche anno dopo la scossa principale.

Sciame: non è identificabile una scossa principale poiché l'energia sprigionata è mediamente la stessa per ogni evento.

Si assiste ad un incremento della frequenza delle scosse e ad un successivo decremento.

È da chiarire che diversa origine hanno i cosiddetti "*tremori*" che sono da attribuire al traffico automobilistico, agli effetti di macchinari, ecc. In questi casi il suolo vibra costantemente con vibrazioni di ampiezza da 10^{-6} a 10^{-7} m e con periodi da alcuni decimi di secondo a parecchi secondi.

(3) Vengono indicati come microtremori quelli dovuti al traffico automobilistico, ai macchinari ecc. Il suolo in realtà vibra costantemente con vibrazioni di ampiezza 10^{-6} a 10^{-7} m e con periodi da alcuni decimi di secondo a parecchi secondi.

4. Elementi caratterizzanti di un sisma

Gli elementi che caratterizzano un *sisma* sono:

- il *meccanismo generatore*;
- l'*energia liberata*;
- la *formazione e propagazione* del treno d'onde prodotto;
- la *natura* dei terreni attraversati dalle onde;
- le *caratteristiche stratigrafiche e geotecniche* del sito;
- l'*intensità*, cioè la misura soggettiva degli effetti dello scuotimento sismico;
- la *durata*, elemento rilevante perché occorre un certo tempo, per il raggiungimento della *risonanza* ⁽⁴⁾ con la sovrastruttura.

5. Caratteristiche dei terremoti

I terremoti, per le loro caratteristiche, possono essere classificati, grosso modo, in:

a) terremoti caratterizzati da una lunga oscillazione (fig. 7).

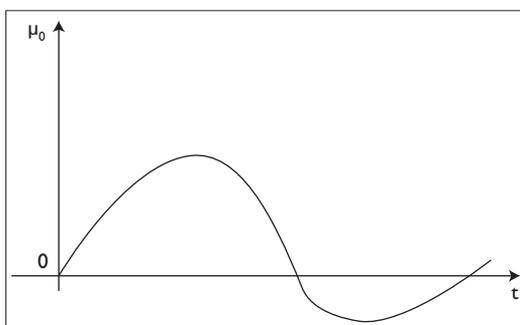
Si osservano in prossimità dell'epicentro e per ipocentri poco profondi (*shallow earthquakes*).

Quando non si sono verificate queste condizioni le onde riflesse rendono molto più complesso il fenomeno;

b) terremoti caratterizzati da un moto moderatamente lungo ed estremamente irregolare.

Si registrano a distanze non eccessive dall'epicentro ed in località poste su terreni fermi e stabili. Hanno intensità uniforme in tutte le direzioni;

Figura 7



(4) Ogni oggetto ha uno specifico periodo di vibrazione propria, intendendosi per "periodo" il tempo (misurato generalmente in secondi) impiegato dall'oggetto per ritornare nella sua posizione originaria dopo un'intensa oscillazione. Se una causa perturbante prodotta da un agente esterno arriva con un periodo eguale (o abbastanza prossimo) a quello proprio dell'oggetto ha luogo la "risonanza": l'oggetto cioè si muove con un'oscillazione che è quella che ha la più elevata ampiezza possibile. Se la frequenza di risonanza del suolo coincide con quella degli edifici si produce una amplificazione molto grande delle onde sismiche e vengono indotte sollecitazioni con forte potere distruttivo (*fenomeno della doppia risonanza*).

c) terremoti di lunga durata (da 150 a 300 sec.) con pronunciati, prevalenti periodi di vibrazione.

Si registrano su terreni piuttosto soffici con comportamento lineare (o quasi), prodotti anche da successive onde riflesse fra le superfici delimitanti lo strato;

d) terremoti che coinvolgono grandi movimenti, con deformazioni permanenti del terreno.

6. Velocità delle onde P e S

La velocità (V_p) con cui si propagano le *onde sussultorie* (onde P) e quella (V_s) delle *onde ondulatorie* (onde S) **non sono determinabili in modo certo e scientificamente provato**. Il rapporto V_p/V_s varia a seconda che il terremoto sia *superficiale* o *profondo* per la natura fortemente disomogenea dei terreni attraversati, specialmente se esse onde intercettano falde freatiche che finiscono con l'incidere sul percorso, conferendo comportamenti diversi nelle varie direzioni.

I dati disponibili nella letteratura di settore, infatti, derivano da una teoria che, prescindendo totalmente dalla natura e dagli effetti di smorzamento esercitati dal mezzo in cui l'onda sismica si propaga, assimila, in modo abbastanza grossolano, **il comportamento del terreno a quello** di un materiale *omogeneo* (=stesse proprietà per un arbitrario volume di esso, comunque piccolo), ed *isotropo* (=proprietà identiche in tutte le direzioni), che restituisce la deformazione subita al cessare del carico.

7. La misura degli eventi sismici

Il fenomeno sismico viene studiato:

- *dai sismologi* che hanno interesse alle caratteristiche intrinseche del fenomeno;
- *dagli ingegneri* che si occupano soprattutto degli effetti locali dovuti al sisma.

Ciò spiega il perché per la misura degli eventi sismici siano state sviluppate grandezze diverse quali:

La **MAGNITUDO**

La magnitudo (un **numero** e non una **scala**):

è una misura legata all'energia irradiata da un terremoto. Questa energia deve potersi calcolare sia per un terremoto piccolo che grande ⁽⁵⁾.

Più propriamente viene definita:

7.1 Magnitudo locale ⁽⁶⁾: M_L , introdotta in California negli anni '30 secondo C.F. Richter e modificata nel 1956, nasce dalla necessità di esprimere in forma quantitativa e non soggettiva la forza di un terremoto. È la misura più direttamente utile per le applicazioni ingegneristiche.

La M_L ha la tendenza di saturare. Saturazione vuol dire che arrivati ad un certo valore di M_L questa non cresce più al crescere dell'entità del terremoto (perché non avvertibile dalla strumentazione all'epoca disponibile).

La "saturazione" si deve in sostanza al fatto che l'assegnazione delle scale tradizionali di magnitudo (come la M_L) si esegue sulla base delle registrazioni effettuate da specifici tipi di *sismometri analogici* (in questo caso il sismometro *Wood Anderson* le cui caratteristiche sono: periodo $T=08/sec$, fattore di smorzamento=08; rapporto di amplificazione statica=2800), oggi non più in uso, caratterizzati da una curva di risposta di ampiezza in funzione della frequenza che si abbassa molto rapidamente alle basse frequenze (sempre nel caso specifico, sotto circa 1.2 Hz).

Ora, la legge di scala fondamentale delle sorgenti dei terremoti afferma che, al crescere della dimensione della sorgente stessa, e quindi della magnitudo, viene irradiata proporzionalmente molta più energia alle basse frequenze che non alle alte.

Pertanto al disotto della frequenza caratteristica della curva di risposta, lo strumento diventa sempre meno capace di registrare le onde sismiche che portano la maggior parte dell'energia e, se il terremoto è sufficientemente grande, queste onde lo strumento non le registra più del tutto. Per questo motivo, nella scala M_L , o della magnitudo Richter in senso stretto, le magnitudo non vanno oltre un valore che si colloca all'incirca tra 6.0 e 6.5. Ma se si usano strumenti con curve di risposta più estese alle basse frequenze, la saturazione avviene a valori nettamente più alti.

Con i moderni strumenti digitali, il problema della saturazione di M_L non sussiste quasi più, se non per terremoti grandissimi (tipo Sumatra, 2004).

La misura della M_L richiede quindi l'utilizzo di strumenti che reagiscono ai periodi corti e quindi alle oscillazioni veloci del terreno.

La M_L è una misura di ampiezza e di scuotimento di alta frequenza (un secondo circa) ed è molto sensibile alla geologia di superficie.

La M_L massima ad oggi osservata è stata di 9. A seconda della magnitudo locale M_L che gli si assegna un terremoto può essere *più grande o più piccolo*. Ad esempio, se lo strumento registratore sul quale si è calcolata la M_L giace su un *terreno soffice*, che amplifica il moto del terreno, all'evento viene assegnata una magnitudo più alta. Ed ancora se il terremoto si propaga poco ad alta frequenza, la M_L assume un basso valore anche se in effetti la grandezza di questo evento è più grande.

7.2 Magnitudo di onde superficiali: M_s

È la misura relativa al valore di picco di un certo tipo di onde ⁽⁷⁾ registrate a grande distanza dall'evento.

La M_s è una grandezza empirica che cresce meno al crescere dell'effetto tellurico.

Consente di superare il problema della "saturazione" avendo la tendenza a saturare per eventi molto grandi.

A3 – Magnitudo da onde di volume M_b (*body-waves*): è basata sulle onde di volume (S).

A4 – Magnitudo momento M_w (*Hans e Kanamori, 1979*): è una quantità strumentale che misura la **violenza** del terremoto all'origine. È basata su un modello fisico e non ha il problema della saturazione.

Venne introdotta per terremoti molto forti. La M_w è superiormente aperta e consente di registrare segnali sismici su una banda molto ampia di frequenze.

La *magnitudo momento* non è sensibile né agli effetti locali, né alla particolare strumentazione di misura utilizzata.

La *magnitudo momento* va comunque misurata con strumenti che possano apprezzare le oscillazioni del terremoto di *bassa o bassissima* frequenza.

(5) Grande, p. esempio, è il terremoto che provocò una frattura lunga 1500 km e larga 200 km.

(6) La dizione di "locale" dipende dal fatto che essa non può essere determinata per un terremoto di grande distanza epicentrale.

(7) Oscillazioni molto lente del terreno con un periodo di 20 secondi.

7.3 L'energia liberata dal sisma

Interessa i sismologi ed è correlata empiricamente alla magnitudo.

7.4 Il momento sismico

Grandezza significativa per misurare l'energia liberata durante un sisma.

7.5 Le scale di intensità sismica

Le scale di intensità sismica sono basate sulla descrizione di effetti visibili e di percezione umana e quindi non contengono alcuna relazione quantitativa con gli effetti da cui è interessato il suolo (p. es. dei "picchi" di accelerazione orizzontale)

Le scale di intensità sismica sono *scale fenomenologiche* (empiriche), non rappresentano grandezze fisiche, ma sintesi di descrizioni qualitative e come tali vanno adeguate.

Queste scale, sebbene non esenti da limiti, sono le sole che permettono di paragonare l'intensità dei terremoti recenti con quelle dei terremoti del passato quando, non disponendo delle attuali strumentazioni, il fenomeno sismico era descritto attraverso un'enunciazione dei danni arrecati.

La *scala Mercalli*, la scala modificata *Mercalli-Cancani-Sieberg*: M.C.S. (introdotta nel 1903 alla conferenza internazionale di Strasburgo e modificata nel 1930 da Sieberg) sono sostanzialmente scale di danneggiamento in una data località, indipendentemente dalla distanza dall'ipocentro e di tutte le caratteristiche intrinseche del terremoto (origine, profondità epicentrale, ecc.), che secondo una scala ordinale classifica in una zona limitata ed **in modo empirico** la severità di un sistema sulle strutture civili (danni alle costruzioni).

La scala M.C.S. è stata introdotta agli inizi del secolo scorso e riguarda pertanto strutture molto deboli (nelle zone rurali si

trovano abitazioni anche molto vetuste) e senz'altro preesistenti a quelle in conglomerato cementizio armato.

7.6 La scala macrosismica europea EMS-98

Per incoraggiare la cooperazione tra *ingegneri civili e sismologi* la *Commissione Sismologica Europea* (ESC) ha presentato nel 1998 una nuova scala macrosismica (**European Macroseismic Scale 1998: EMS-98** [4], [5]), che trova radice in quella proposta da **Medvedev, V. – Sponheuer, W. – Karmik, V.**, nota come scala **MSK**, presentata nel 1968 alla 13^{ma} assemblea generale della UGGI.

La EMS-98 ⁽⁸⁾ è significativa perché espressa in termini *probabilistici* dando così una quantificazione ai fenomeni che descrive.

Nota la classe di vulnerabilità ⁽⁹⁾ in funzione della tipologia costruttiva (Tab. I.1) per ogni

Figura 8a

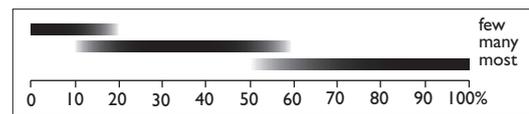
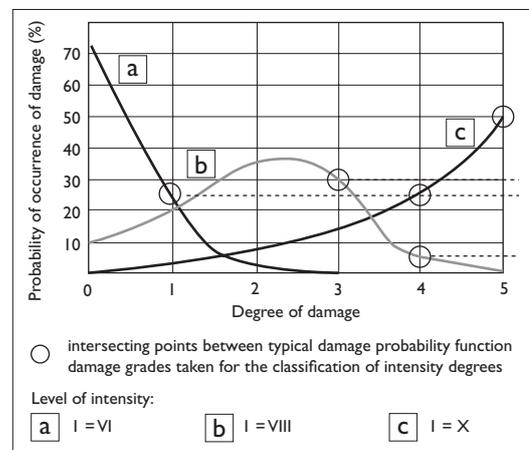


Figura 8b



(8) European Macroseismic Scale 1998 – EMS-98 editor: G. Grunthal, chairman of the European seismological European Working Group "Macroseismic Scales", Geo Forschungs Zentrum, Postdam, Germany.

A causa dell'aleatorietà delle grandezze che governano l'evento sismico e delle diverse cause d'incertezza legate alla definizione di esse, il modello da prendere in esame non può essere di tipo probabilistico. Così, ad esempio, l'azione sismica è una grandezza notevolmente aleatoria anche quando si disponga di una corretta *zonizzazione* del sito. Parimenti aleatoria è la previsione della resistenza del manufatto.

Di conseguenza la valutazione della sicurezza è sempre da intendersi in senso probabilistico.

(9) La classificazione riportata in tabella I.1 che mostra in una riga per ciascun tipo di costruzione la *classe di vulnerabilità* più probabile (A,B,C...) e anche l'intervallo di incertezza associato. Nel caso delle costruzioni in c.a. si presenta una distinzione in relazione al sistema sismo resistente (telaio o pareti di taglio) ed a livello di progetto antisismico adottato per realizzarle (ad alta e bassa duttilità). Tale livello, che denota la capacità alta o bassa di una struttura di dissipare energia in campo di comportamento inelastico senza deformarsi in misura incontrollata, è strettamente legato al grado di evoluzione delle norme sismiche adottate nella progettazione. Solo l'aderenza delle normative più recenti ed evolute è atta a garantire una risposta sismica e duttilità elevata di una costruzione in conglomerato cementizio armato.

La posizione effettiva di uno specifico edificio entro l'intervallo di vulnerabilità indicato in una data riga dev'essere determinata prendendo in conto lo stato di degrado, la qualità della costruzione, irregolarità in pianta ed in elevazione ed il livello di severità delle norme sismiche eventualmente impiegato nella progettazione. Le differenti classi di vulnerabilità sono indicate con lettere, dal caso peggiore (A) a quello migliore (F).

Tab. I.1

Tipologia	Classe di vulnerabilità					
	A	B	C	D	E	F
MURATA	○					
a sacco, o di pietra grezza	○					
adobe (terra disseccata)	○—					
pietre sbazzate	○—					
pietre squadrate	○—					
di mattoni, non armata	○—					
non armata, con solai in c.a.	○—					
armata o confinata	○—					

- Classe più probabile
- Intervallo probabile
- ... Intervallo poco probabile, casi eccezionali

Tab. I.2 – Definizione dei gradi di intensità EMS98

<p><i>Composizione della scala:</i></p> <p>a) Effetti sugli esseri umani. b) Effetti sugli oggetti e sul terreno. c) Danneggiamento delle costruzioni.</p>
<p>I. Non risentito</p> <p>a) Non risentito, anche nelle circostanze più favorevoli. b) Nessun effetto. c) Nessun danno.</p>
<p>II. Risentito a malapena</p> <p>a) Il terremoto è risentito soltanto in casi isolati (< 1%) da individui a riposo all'interno, in posizione particolarmente ricettiva. b) Nessun effetto. c) Nessun danno.</p>
<p>III. Debole</p> <p>a) Il terremoto è risentito all'interno da pochi. I dormienti registrano un ondeggiamento o un lieve tremito. b) Gli oggetti appesi oscillano leggermente. c) Nessun danno.</p>
<p>IV. Ampiamente osservato</p> <p>a) Il terremoto è risentito all'interno da molti e all'aperto soltanto da pochissimi. Qualcuno viene svegliato. Il livello di scuotimento non genera spavento. Lo scuotimento è moderato. Gli osservatori risentono un tremito o un'oscillazione leggera della costruzione, della stanza o del letto, della sedia, ecc. b) Le porcellane, i vetri, le finestre e le ante si scuotono rumorosamente. Gli oggetti appesi oscillano. I mobili leggeri sono scossi visibilmente in alcuni casi. Alcune strutture in legno scricchiolano. c) Nessun danno.</p>
<p>V. Forte</p> <p>a) Il terremoto è risentito all'interno da molti, all'aperto da pochi. Alcune persone si spaventano ed escono all'aperto. Molti dormienti si svegliano. Gli osservatori sentono un forte scuotimento e oscillazione dell'intera costruzione, della stanza o dei mobili. b) Gli oggetti appesi oscillano considerevolmente. Le porcellane ed i vetri tintinnano rumorosamente. I piccoli oggetti, i soprammobili e/o gli oggetti sostenuti precariamente possono essere spostati o cadere. Le ante e le finestre si aprono o si chiudono. In alcuni casi i vetri delle finestre si rompono. I liquidi oscillano e possono straripare dai contenitori colmi. Gli animali all'interno possono diventare nervosi. c) Danni di grado I ad alcune costruzioni della classe di vulnerabilità A e B.</p>
<p>VI. Che produce danni leggeri</p> <p>a) Risentito dai più all'interno e da molti all'aperto. Alcune persone perdono l'equilibrio. Molta gente si spaventa e fugge all'aperto. b) I piccoli oggetti stabili possono cadere e i mobili possono spostarsi. In alcuni casi i piatti e la cristalleria possono rompersi. Gli animali domestici (persino all'aperto) possono spaventarsi. c) Danni di grado I sono sofferti da molte costruzioni di classe A e B; alcuni edifici di classe A e B subiscono danni di grado 2; alcuni di classe C subiscono danni di grado I.</p>

VII. Che produce danni

- a) La maggior parte delle persone si spaventa e cerca di fuggire all'aperto. Molti hanno difficoltà a stare in piedi, specialmente ai piani superiori.
- b) I mobili si spostano e quelli pesanti in alto possono rovesciarsi. Molti oggetti cadono dalle mensole. L'acqua fuoriesce dai contenitori, dai serbatoi e dagli stagni.
- c) Molte costruzioni di classe A subiscono danni di grado 3; alcune di grado 4. Molte costruzioni di classe B subiscono danni di grado 2; alcune di grado 3. Alcune costruzioni di classe C subiscono danni di grado 2. Alcune costruzioni di classe D subiscono danni di grado 1.

VIII. Che produce danni ingenti

- a) Molte persone non riescono a stare in piedi, anche all'aperto.
- b) I mobili possono ribaltarsi. Gli oggetti come TV, macchine da scrivere, ecc. cadono a terra. Le tombe possono essere occasionalmente spostate, ruotate e capovolte. Si possono scorgere onde su terreni molto sciolti.
- c) Molte costruzioni di classe A subiscono danni di grado 4; alcune di grado 5. Molte costruzioni di classe B subiscono danni di grado 3; alcune di grado 4. Molte costruzioni di classe C subiscono danni di grado 2; alcune di grado 3. Alcune costruzioni di classe D subiscono danni di grado 2.

IX. Distruttivo

- a) Panico generale. Le persone possono venire gettate a terra con forza.
- b) Molti monumenti e colonne cadono o vengono rovesciati. Si scorgono onde su terreni sciolti.
- c) Molte costruzioni di classe A subiscono danni di grado 5. Molte costruzioni di classe B subiscono danni di grado 4; alcune di grado 5. Molte costruzioni di classe C subiscono danni di grado 3; alcune di grado 4. Molte costruzioni di classe D subiscono danni di grado 2; alcune di grado 3. Alcune costruzioni di classe E subiscono danni di grado 2.

X. Molto distruttivo

- c) La maggior parte delle costruzioni di classe A subisce danni di grado 5. Molte costruzioni di classe B subiscono danni di grado 5. Molte costruzioni di classe C subiscono danni di grado 4; alcune di grado 5. Molte costruzioni di classe D subiscono danni di grado 3; alcune di grado 4. Molte costruzioni di classe E subiscono danni di grado 2; alcune di grado 3. Alcune costruzioni di classe F subiscono danni di grado 2.

XI. Devastante

- c) La maggior parte delle costruzioni di classe B subisce danni di grado 5. La maggior parte delle costruzioni di classe C subisce danni di grado 4; molte di grado 5. Molte costruzioni di classe D subiscono danni di grado 4; alcune di grado 5. Molte costruzioni di classe E subiscono danni di grado 3; alcune di grado 4. Molte costruzioni di classe F subiscono danni di grado 2; alcune di grado 3.

XII. Completamente devastante

- c) Tutte le costruzioni di classe A, B e praticamente tutte quelle di classe C vengono distrutte. La maggior parte delle costruzioni di classe D, E e F viene distrutta. Gli effetti di terremoto hanno raggiunto i massimi effetti immaginabili.

livello d'intensità sismica il diagramma della fig. 8 consente di valutare il livello di danno in senso probabilistico (classe di vulnerabilità più probabile ed associato intervallo di incertezza).

Nella Tab. I.2 è riportata la definizione dei gradi d'intensità EMS98 e nella tabella I.3 la classificazione del danno per costruzioni

Tab. I.3 – Classificazione del danno alle costruzioni in muratura

<p>Grado 1: Danno da trascurabile a leggero (nessun danno strutturale, danni non strutturali leggeri) Fessure millimetriche in alcune pareti. Distacco di soltanto piccole parti di intonaco. Rari casi di caduta di pietre non legate dalle parti superiori delle costruzioni.</p>
<p>Grado 2: Danno moderato (danni strutturali leggeri, danni non strutturali moderati) Fessure in molte pareti. Distacco di porzioni piuttosto grandi di intonaco. Crollo parziale di camini.</p>
<p>Grado 3: Danno da sostanziale a grave (danni strutturali moderati, danni non strutturali gravi) Larghe ed estese crepe nella maggior parte delle pareti. Le tegole del tetto si staccano. I camini si spezzano alla linea del tetto; collasso di diversi elementi non strutturali (pareti divisorie, muri sormontati da timpano).</p>
<p>Grado 4: Danno molto grave (danni strutturali pesanti, danni non strutturali molto gravi) Collasso effettivo delle pareti; parziale collasso strutturale di tetti e solai.</p>
<p>Grado 5: Distruzione (danni strutturali gravissimi) Collasso totale o quasi totale.</p>

Tab. I.4 – Classificazione del danno alle costruzioni in C.A.

<p>Grado 1: Danno da trascurabile a leggero (nessun danno strutturale, leggeri danni non strutturali) Fessure capillari nell'intonaco sopra i membri strutturali o alla base delle pareti. Fessure capillari in pareti divisorie e tamponature.</p>
<p>Grado 2: Danno moderato (danni strutturali leggeri, moderati danni non strutturali) Fessure nei pilastri e nelle travi dei telai, e nelle pareti strutturali. Fessure nelle pareti e nelle tamponature; caduta di controsoffitti fragili e di intonaco. Caduta di malta dai giunti dei pannelli murari.</p>
<p>Grado 3: Danno da sostanziale a grave (danni strutturali moderati, danni non strutt. gravi) Fessure nei pilastri, nei giunti trave-pilastro dei telai alla base, e nei giunti delle pareti accoppiate. Espulsione del copriferro, inarcamento per instabilità delle barre di armatura. Grandi fessure in pareti e tamponature, collasso di singole tamponature.</p>
<p>Grado 4: Danno molto grave (danni strutturali gravi, danni non strutturali molto gravi) Grandi fessure nei membri strutturali con rottura a compressione del calcestruzzo e frattura delle barre di armatura; perdita di aderenza delle barre di armatura delle travi; rotazione dei pilastri. Crollo di alcuni pilastri o di singoli piani superiori.</p>
<p>Grado 5: Distruzione (danni strutturali gravissimi) Crollo del pianterreno o di parti (es. ali) degli edifici.</p>

Classificazione del danno alle strutture in CA nella scala EMS98. Da Grunthal (1998), modificato.

in muratura ed in conglomerato cementizio armato.

Si osserva, infine, come una applicazione letterale della scala MCS ad un nucleo abitato costruito recentemente porterebbe ad una sottostima della MCS di almeno due gradi rispetto al caso dello stesso evento avvenuto alcuni decenni prima.

8. Parametro caratterizzante la risposta sismica

Sulla scelta del parametro caratterizzante la risposta all'evento sismico (cioè il comportamento in termini di resistenza e di deformazione) di una struttura, la comunità scientifica del settore ancora oggi si interroga [6] se assumere:

- la P.G.A.: *massima accelerazione* (valore di picco) attesa al suolo (*Peak Ground Acceleration*), parametro che costituisce una misura fondamentale del potenziale sismico, ma non è completamente affidabile;
- la P.G.V.: *massima velocità* (valore di picco) attesa al suolo (*Peak Ground Velocity*). È una misura più cautelativa della P.G.A. e sembra maggiormente rappresentativa dell'intensità sismica direttamente connessa con la richiesta di energia;
- il P.G.D.: *massimo spostamento* (valore di picco) atteso al suolo (*Peak Ground Displacement*);
- il P.G.D./P.G.V. o P.G.V./P.G.A. (*Peak Motion Ratio*): massimo rapporto di moto: come misura dell'effetto distruttivo;
- il *coefficiente di fondazione*: numero che può amplificare le azioni sismiche a causa degli effetti stratigrafici e topografici.

Secondo alcuni cultori della materia, infatti, la descrizione di un terremoto in termini di *picco dell'accelerazione orizzontale* (P.G.A.) è inadeguata per esprimere il massimo valore delle forze orizzontali che il sisma esercita su una struttura in quanto è difficile correlare il valore dell'*accelerazione di picco* con l'intensità di sisma. Per esempio, il terremoto di Ancona del 1972, un evento di magnitudo locale $M_L=4.5$, ebbe un'accelerazione di 0.69g (g accelerazione di gravità) mentre il terremoto dell'Irpinia del 23. I I. 1980, di magnitudo locale $M_L=6.5$, ha avuto un'accelerazione di picco di 0.33g.

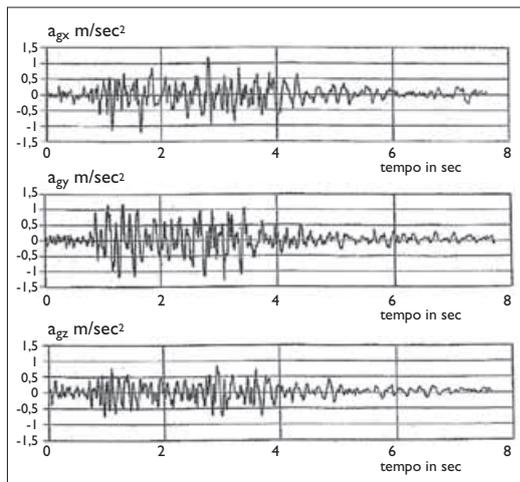
Più recentemente si è utilizzato, come parametro rappresentativo della pericolosità sismica, l'*intensità di Housner* (H), introdotto per una miglior rappresentazione delle condizioni di pericolosità e per una miglior correlazione al danno subito dagli edifici.

A queste quantità, infatti, sono legate le forze agenti sulla massa.

9. La registrazione dei terremoti

La grandezza ingegneristicamente più significativa di un terremoto (sotto il profilo

Figura 9



strutturale) è assunta nella NTC 08[7] dall'accelerazione assoluta del suolo e, in particolare, il suo valore massimo, giacché a questa sono proporzionali le forze di inerzia che si applicano sulle strutture.

Le registrazioni dirette, effettuate con apposite apparecchiature che entrano in funzione, di un terremoto forniscono l'andamento nel tempo delle accelerazioni (accelerogrammi, fig.9), rappresentabili in forme di diagrammi accelerometrici rispettivamente a due direzioni orizzontali ed a quella verticale.

In termini di "acustica" tali diagrammi vengono definiti come quelli di un "rumore".

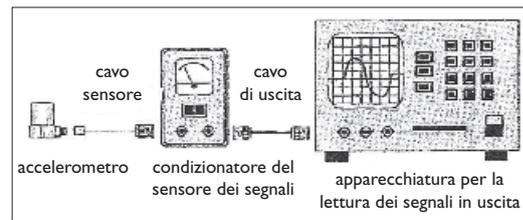
Come già accennato la durata di un terremoto gioca un ruolo molto importante sia perché per raggiungere la risonanza occorre un certo "tempo di avvio" sia perché dopo i primi impulsi (in un sisma se ne possono avere un centinaio) la struttura può progressivamente degradarsi e giungere al collasso senza che aumenti l'intensità delle forze eccitatrici.

A volte si registrano le componenti orizzontali dello spostamento:

- nord-sud → N-S;
- est-ovest → E-W;
- verticale → V.

La misura strumentale dell'accelerazione sismica al suolo si effettua con gli accelerometri sismici o accelerografici, tradizionalmente detti di tipo *strong-motion*, adatti cioè a misurare moti sismici violenti che forniscono una registrazione (analogica o digitale) del segnale captato.

Figura 10



Si utilizzano sia elementi *ceramici* (offrono una migliore risoluzione della risposta) che al *quarzo* (offrono una migliore risposta alle basse frequenze).

La fig. 10 mostra la tipica catena per misure accelerometriche.

Non vengono registrate le tre componenti rotatorie presenti poiché non si attribuisce ad esse molta importanza.

L'esame delle registrazioni disponibili permette di notare sensibili differenze non soltanto da un sito all'altro ma anche nello stesso sito da un terremoto all'altro (carattere *aleatorio* di un terremoto) ⁽¹⁰⁾, e ciò per:

- l'influenza della natura del terreno di fondazione e dei terreni circostanti;
- la presenza di un parametro che in qualche modo definisce l'intensità del terremoto;
- la durata del terremoto.

10. Informazioni sulla "sismicità" nazionale

Queste informazioni sono reperibili:

- **nei cataloghi** dei terremoti: documenti che costituiscono una distribuzione spazio-temporale degli eventi per ciascuna zona sismogenetica. Possono essere *descrittivi o parametrici* (C.P.T.I.) presentati per esigenze applicative o di protezione civile;
- **nei rapporti** di attività del:
 ING → Istituto Nazionale di Geofisica;
 GNDDT → Gruppo Nazionale per la difesa dai terremoti;
 SGA → Società Geofisica Ambientale;
 SSN → Servizio Sismico Nazionale;
 ICDDT → Istituto centrale per il catalogo e la documentazione (Ministero per i beni culturali)
- **nelle NTC 08.**

(10) I terremoti, com'è noto, non sono *processi deterministici* che seguono la statistica Gaussiana e quindi definibili attraverso medie aritmetiche, ma sono dei *processi di Poisson* e cioè dei processi che rappresentano la **causalità assoluta**.

Bibliografia essenziale

WAKABAYASHI MINORY, *Progettazione di strutture antisismiche*, Mc Graw-Hill ed., 1989.

MENDITTO G., MENDITTO S., *Indagini semi-distruttive e non distruttive nell'ingegneria civile: disciplina tecnica, applicativa e normativa*. Pitagora ed., Bologna, 2008.

FACCIOLI E., PAOLUCCI R., *Elementi di sismologia applicati all'ingegneria*, Pitagora ed., Bologna, 2005.

CONSOLE R., GASPARINI C., *Le scale macrosismiche – Monografia n. 7 – Istituto Nazionale di Geofisica*, 1977.

European Macroseismic Scale 1998 EMS-98, G. Grünthal, editor.

Prop. Struct. Engin. Mat., 2000, pp. 250-259

Norme tecniche per le costruzioni (N.T.C.08)

- *D.M. infrastrutture 14 gennaio 2008* (in s.o. n. 30 della G.U. 4 febbraio 2008, n. 29)
- *Circolare 2 febbraio 2009 n. 617/C.S. LL.PP.* (in s.o. n. 27 della G.U. 26 febbraio 2009, n. 47)