



**Task 3 – Contributo alla definizione di priorità di  
intervento per edifici non adeguati sismicamente**

**Deliverable D16  
Strumenti speditivi per la definizione di priorità  
di intervento per edifici non adeguati**

R. Pinho, G.M. Calvi, H. Crowley, M. Colombi  
*EUCENTRE, Pavia*

A. Goretti  
*DPC, Roma*

F. Meroni  
*INGV, Milano*

**Pavia, 27 novembre 2006**

## Preambolo

Questo documento sintetizza, approfondendo anche alcuni aspetti di carattere più operativo, il lavoro descritto nella seguente pubblicazione:

Grant D.N., Bommer J.J., Pinho R. and Calvi G.M. [2006] “Defining Priorities and Timescales for Seismic Intervention in School Buildings in Italy,” Research Report ROSE 2006/03, IUSS Press, Pavia, Italy.

Entrambi i documenti sono stati elaborati nell’ambito delle attività previste per il Task 3 del Progetto S1, essendo il presente manoscritto (Deliverable D16) caratterizzato da una impostazione più operativa e focalizzata, rispetto al volume sopraelencato, dove si è cercato invece di approfondire aspetti più teorici e concettuali, assieme ad una accurata ricerca bibliografica. Si prevede inoltre che questo rapporto tecnico venga prossimamente trasformato in una pubblicazione scientifica in un rivista internazionale (ad es. Earthquake Spectra), in modo da diffondere anche in ambito internazionale i risultati ottenuti nell’ambito di questo progetto.

Con la produzione del presente deliverable, si considera pertanto concluso il contributo della UR-7 (EUCENTRE) al Task 3 del progetto S1, visto che sono stati raggiunti i principali obiettivi proposti.

# METODOLOGIA PER LA DEFINIZIONE DELLE PRIORITA' E LE TEMPISTICHE NECESSARIE ALL'INTERVENTO SISMICO PER EDIFICI NON ADEGUATI – APPLICAZIONE CONCETTUALE AL CASO DELLE SCUOLE ITALIANE

## Introduzione

Lo sviluppo di una metodologia in grado di definire delle priorità di intervento, per quanto riguarda la sicurezza sismica degli edifici, è di particolare interesse in quanto permette di proporre e di stabilire delle linee guida per intervenire su quelle strutture che presentano una resistenza inadeguata rispetto a quella richiesta dalle norme sismiche.

Un notevole numero di edifici, in Italia, non rispetta un livello sufficiente di resistenza sismica e questo problema è stato tragicamente sottolineato durante l'evento sismico del Molise dell'ottobre 2002 in cui rimasero uccise, a causa del collasso di una scuola elementare, 30 persone, 27 delle quali erano bambini di sette e otto anni. Diventa evidentemente indispensabile intervenire sugli edifici non adeguati per fornirli di un livello di resistenza idoneo a garantire la sicurezza delle persone che risiedono all'interno della struttura.

Gli edifici scolastici rappresentano, certamente, l'oggetto primo di interesse perché l'attenzione nei confronti delle future generazioni dovrebbe essere tra le più alte priorità di qualsiasi società.

Scopo di questa relazione è quindi quello di creare una metodologia in grado di redigere un elenco di scuole disposte in ordine di priorità di intervento. Quest'ultimo permetterà alle autorità competenti di intervenire con delle tempistiche commisurate allo stato di rischio. La creazione di un ordine di importanza è assolutamente necessaria ai fini di una migliore gestione delle risorse – tempo, denaro, risorse tecniche – che non devono essere sprecate, ma ottimizzate nel miglior modo possibile.

Indispensabile, per equilibrare in modo ragionevole l'utilizzo di tutte le risorse a disposizione, è la scelta del livello di dettaglio che deve essere utilizzato per la valutazione del rischio delle strutture. Se il livello scelto è troppo approssimativo,

basato su stime qualitative e molto veloci, si rischia di ottenere delle informazioni troppo limitate che conducono a delle stime di capacità piuttosto imprecise. Viceversa, se il livello di studio stabilito è eccessivamente dettagliato risulta troppo complesso analizzare tutti gli edifici con la stessa precisione. Si è, infatti, condizionati dal fatto di non avere a disposizione alcun criterio che permetta di selezionare gli edifici più rischiosi. E' necessario trovare un compromesso tra le due misure ed utilizzare una procedura di analisi che abbia gradi di dettaglio differenti. In un primo momento, può essere sufficiente utilizzare una tipologia di indagine piuttosto semplice che permetta di compiere una prima selezione e ridurre il numero di edifici da analizzare, mentre, in un secondo momento, quando il numero delle strutture è stato ridotto, si potrebbero utilizzare analisi più specifiche.

Il risultato che si ottiene da questa procedura di stima viene poi paragonato al livello di rischio considerato tollerabile e vengono identificati gli edifici che necessitano di un intervento.

Le principali componenti da definire a questo scopo sono:

1. Una soglia minima, per gli edifici esistenti, di rapporto di capacità pre-intervento al di sotto della quale è necessaria un'attività di adeguamento e di miglioramento ( $CR_{pre}$ ). Il rapporto di capacità è definito come il rapporto tra la capacità di una struttura esistente e la capacità richiesta, per i nuovi edifici, dalla normativa vigente. La soglia  $CR_{pre}$  può avere valori compresi tra lo zero (non è richiesto alcun intervento) e l'uno (è richiesto l'intervento per tutti gli edifici che non soddisfano tale soglia);
2. Una soglia minima, per gli edifici esistenti, di rapporto di capacità post-intervento ( $CR_{post}$ ) come obiettivo da raggiungere per le strutture che richiedono miglioramenti. Questa soglia sarà evidentemente maggiore o, al massimo, uguale a  $CR_{pre}$ . Se  $CR_{post} > CR_{pre}$  si possono distinguere due casi. Nel primo rientrano tutti gli edifici con  $CR=CR_{post}$  per i quali si ha un rischio maggiore rispetto a strutture nuove (se  $CR_{post} < 1$ ). Nel secondo caso, invece, rientrano tutti quegli edifici che hanno un valore intermedio tra  $CR_{pre}$  e  $CR_{post}$  per i quali si ha un rischio maggiore sia rispetto a edifici nuovi (se  $CR_{post} < 1$ ) che rispetto a quelli che inizialmente avevano  $CR < CR_{pre}$

e che sono stati portati a  $CR=CR_{post}$ . Se  $CR_{post} = CR_{pre}$  allora gli edifici sono portati ad un livello minimo costante di capacità;

3. Specifiche tempistiche all'interno delle quali gli edifici devono essere portati ad un livello di  $CR_{post}$ . Se questo non accade l'edificio deve subire interventi come, ad esempio, la delocalizzazione delle funzioni previste per la struttura in esame, l'uso limitato, la demolizione, ecc. Il tempo entro cui intervenire potrebbe essere un valore costante per tutti gli edifici oppure funzione della capacità sismica e di altre caratteristiche come il numero di occupanti o le possibili conseguenze di un eventuale crollo.

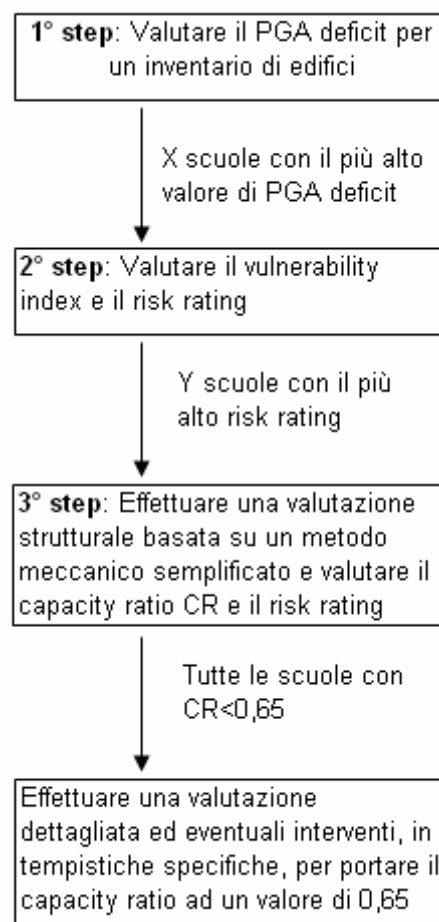
La metodologia che si vuole mettere in atto al fine di creare, come già detto, una scala di priorità e di tempi di intervento, deve essere assolutamente trasparente e tecnicamente valida. Per questo motivo la scelta di una procedura fatta di gradi di dettaglio differenti è molto efficace. L'ultima fase dello studio deve includere degli input che possono essere assegnati dalle autorità competenti. Questi permettono, ad esempio, di discriminare tra rischio individuale e rischio sociale. Attraverso l'utilizzo di questi input è possibile dirimere quelle che possono essere diverse soluzioni prospettate dal tecnico il quale ha una visione spesso limitata.

Riassumendo, gli obiettivi principali di questa gestione del rischio sono:

1. Identificazione di tutti gli edifici scolastici che sono definiti non sicuri e che non rispettano le norme previste dal nuovo codice sismico. Una decisione importante presente in questo primo obiettivo è quella di stabilire il range di tolleranza possibile e accettabile dalle varie tipologie di edificio;
2. Assegnazione di priorità di intervento per gli edifici scolastici in modo tale da massimizzare i benefici che si possono ricavare dalle risorse a disposizione e ridurre, in questo modo, il livello di rischio che coinvolge gli studenti;
3. Definire delle tempistiche di intervento appropriate per rendere gli edifici scolastici sicuri prima di un futuro eventuale sisma. La tempistica viene stabilita in base al livello di rischio sismico in cui si trova l'edificio studiato.

## Proposta di una metodologia basata su più livelli

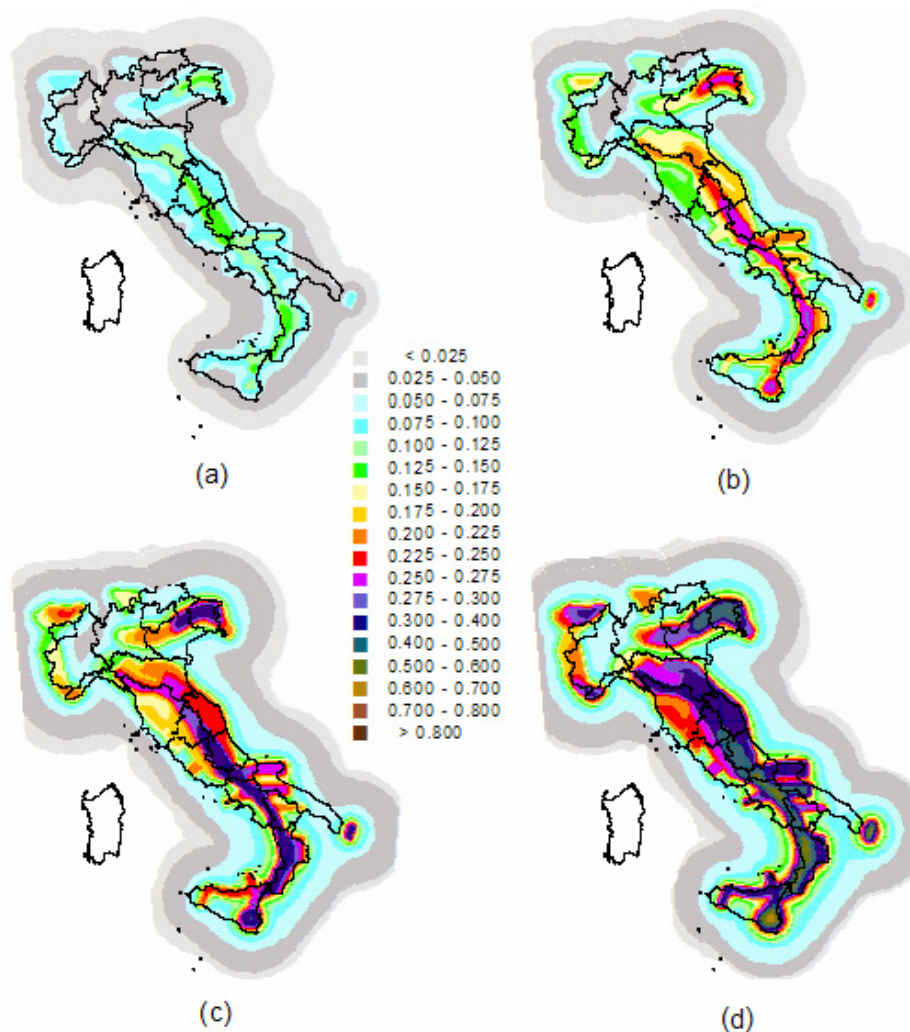
Il metodo è basato su più livelli che presentano un grado di dettaglio sempre maggiore. In ogni stadio viene valutato il livello di rischio a cui sono sottoposti gli edifici scolastici. Ogni step della metodologia, riportata in Figura 1, prevede lo studio e l'approfondimento unicamente per quelle strutture che sono state definite ad alto livello di rischio nella fase precedente. Il passaggio da uno step all'altro è di fondamentale importanza perché, oltre a permettere la selezione degli edifici che verranno sottoposti a controlli più dettagliati, evidenzia anche quelli che possono restare senza ulteriori analisi e quindi senza intervento. Lo scopo di selezionare una parte ridotta del numero degli edifici diventa quello di discriminare tra i due gruppi (edifici abbastanza sicuri ed edifici non abbastanza sicuri).



**Figura 1** Schema riassuntivo degli steps presenti nella metodologia proposta.

### 1° Fase: Stima basata su un “desk study”

Come è già stato discusso precedentemente, non è possibile svolgere, immediatamente, stime di rischio per tutti gli edifici scolastici presenti nel territorio italiano, circa 60.000, perché occorrerebbe troppo tempo. La prima fase della metodologia va quindi condotta nel modo più semplice e veloce possibile in maniera da poterla applicare ad un gran numero di edifici. Una prima stima approssimata del rischio sismico delle scuole, viene condotta ipotizzando che tutti gli edifici siano stati fabbricati secondo la normativa vigente nell'anno di progetto. Sotto questa ipotesi di coerenza con il codice in vigore nell'anno di interesse, è possibile assumere la capacità di un edificio pari alla domanda richiesta dalla specifica normativa. Una volta che si è convertito questo valore in termini di PGA si paragona questa prima stima di vulnerabilità (*Design PGA*) con la mappa di pericolosità, riportata in Figura 2.b, valutata attraverso recenti studi (Gruppo di



**Figura 2** Valori di PGA (espressi in g) per periodi di ritorno di (a) 100 anni, (b) 475 anni, (c) 1000 anni, (d) 2500 anni. Dati ottenuti da Gruppo di Lavoro, 2004.

Lavoro, 2004; OPCM, 2006; Montaldo *et al.*, 2005). Quest' ultima riporta i valori di PGA attesi (*Current* PGA), con un periodo di ritorno di 475 anni (e una frequenza di eccedenza annuale uguale a  $1/475=0,0021$ ), valutata dall'Istituto di Geofisica e Vulcanologia (Gruppo di Lavoro, 2004).

In questa maniera si ottiene una misura relativa del rischio sismico basata unicamente sull'età dell'edificio e sulla sua posizione geografica. In questo primo step le condizioni locali del terreno non sono prese in considerazione. E' possibile procedere nell'analisi seguendo due strategie diverse entrambe molto semplici e veloci. La prima calcola la differenza tra il *Current* PGA richiesto dalla normativa e il valore di *Design* PGA effettivo delle strutture. Il valore stimato rappresenta il *PGA Deficit*:

$$PGA\ Deficit = Current\ PGA - Design\ PGA \quad (1)$$

Il *Current* PGA è definito esplicitamente dalle normative presenti a partire dall'Ordinanza del 2003, mentre il *Design* PGA deve essere stimato dai codici in vigore nell'anno di progetto dell'edificio. Per ogni normativa passata occorre calcolare il valore di PGA, considerando anche la capacità di duttilità dell'edificio e il suo coefficiente di importanza, attraverso delle relazioni che lo legano alle forze sismiche.

Per gli edifici progettati prima dell'introduzione di codici sismici nel 1909 e per gli edifici che non sono stati classificati all'interno della zonazione sismica vigente nell'anno di progetto, il *Design* PGA è preso pari ad un valore molto piccolo tendente allo zero (ad es.  $10^{-4}$ ).

Per determinare il valore effettivo del *Design* PGA che sia utilizzabile per l'equazione (1) e che sia rappresentativo per un numero consistente di edifici è necessario tenere presente alcune ipotesi:

1. Le normative vengono applicate in tutto il territorio italiano allo stesso identico modo;
2. I sovraccarichi sono trascurabili rispetto ai carichi permanenti. Per quanto riguarda gli edifici in cemento armato e quelli in muratura ci si aspetta che



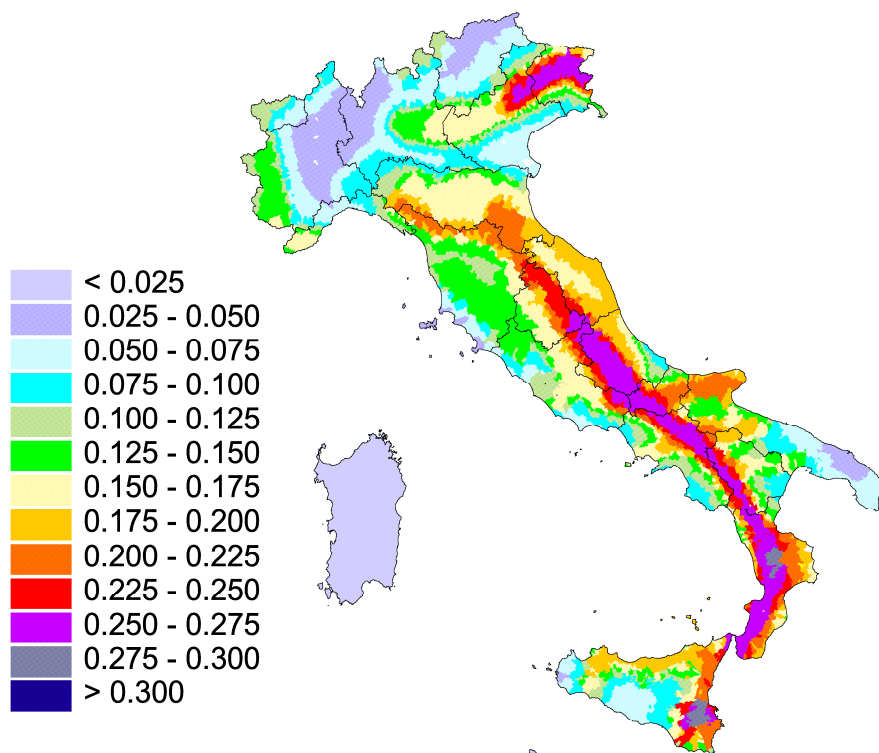
- i carichi permanenti siano dominanti nel calcolo del peso delle masse sismiche;
3. Il periodo fondamentale di un edificio è relativamente basso cosicché l'ordinata del suo spettro di risposta viene a trovarsi esattamente sul plateau dello spettro e assume il valore di 2.5 PGA;
  4. Per i primi codici, nel calcolo del coefficiente di taglio totale alla base, si assume un'altezza standard, per tutti gli edifici, di due piani;
  5. Quando le forze sismiche di progetto si differenziano per tipologie strutturali e di materiale si assume che l'edificio sia costruito in muratura non rinforzata.

**Tabella 1** Classi di date considerate per lo studio dei *PGA Deficit* e gli sviluppi introdotti dalle normative vigenti che ne motivano la scelta.

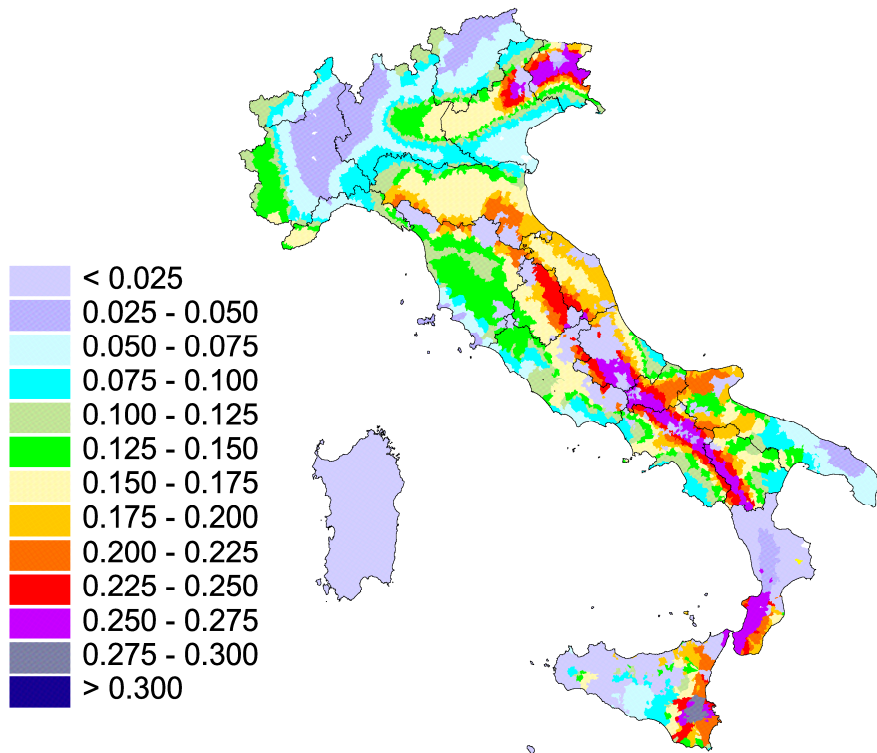
<b>Date</b>	<b>Sviluppi</b>
pre-1909-	Nessun piano sismico; Design PGA=0 per qualsiasi edificio.
18/04/1909-	Introduzione di condizioni di progetto per 367 comuni.
5/11/1916-	Cambio delle forze sismiche; cambio della classificazione sismica per 416 comuni a partire dal 1909.
13/03/1927-	Cambio delle forze sismiche; cambio della classificazione sismica per 951 comuni a partire dal 1916. Viene introdotta la Categoria II.
25/03/1935-	Cambio delle forze sismiche; cambio della classificazione sismica per 174 comuni a partire dal 1927.
10/03/1969-	Cambio della classificazione sismica per 267 comuni a partire dal 1935.
3/03/1975	Cambio della filosofia con cui vengono pianificate le condizioni di progetto per le forze sismiche; cambio della classificazione sismica per 153 comuni a partire dal 1969.
3/06/1981-	Cambio della classificazione sismica per 239 comuni a partire dal 1975. Viene introdotta la Categoria III.
19/06/1984-	Introduzione del fattore di importanza (=1,2 per le scuole); cambio della classificazione sismica per 1533 comuni a partire dal 1981.
Ordinanza 3274/2003	Cambio della filosofia con cui vengono pianificati I progetti sismici. Ci si basa su 4 Zone Sismiche con dei valori associati di PGA.

I parametri utilizzati nel metodo di valutazione del *PGA Deficit* variano in relazione alle modifiche che negli anni si sono fatte per quanto riguarda le forze sismiche di progetto o per quanto riguarda i cambi di zonazione sismica. Per questo progetto, si considerano le modifiche riportate negli intervalli di tempo citati in Tabella 1. Le date presenti nella tabella corrispondono al momento in cui la legge è stata approvata e non necessariamente la data in cui le norme sono state rese obbligatorie. La data di fabbricazione può essere usata come riferimento se quella di progetto non è disponibile all'interno dell'inventario degli edifici. In questo caso, però, sarebbe bene correggere leggermente la fascia di tempo utilizzata considerando un intervallo di circa tre o quattro anni tra anno di progettazione e anno di costruzione. In questo modo, sottraendo all'anno di costruzione l'intervallo fissato si potrebbe ricadere in una fascia inferiore.

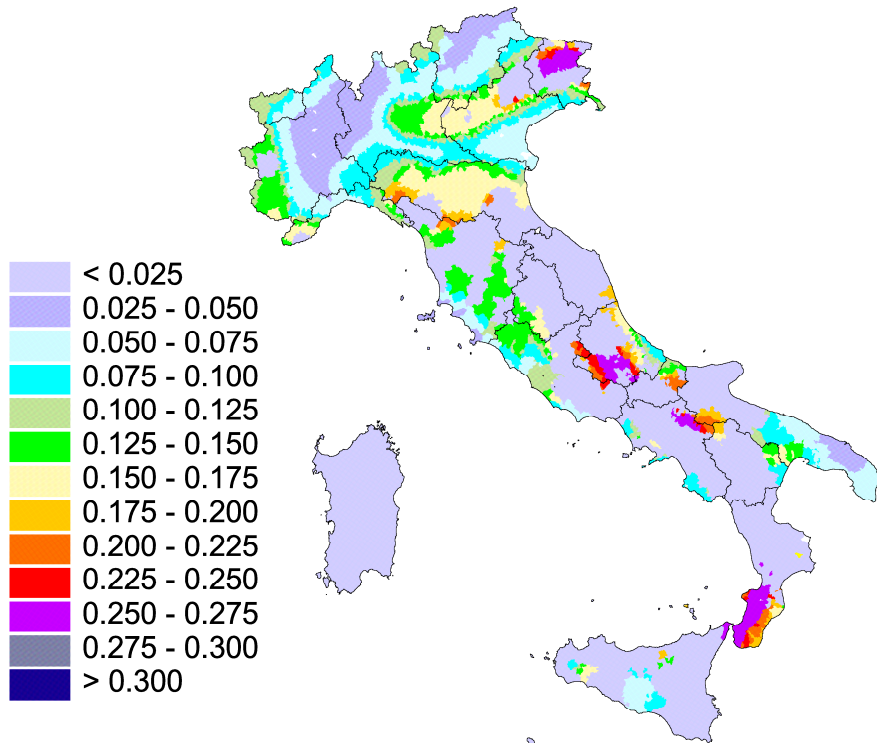
Come esempio, vengono riportate le Figure 3, 4, 5 che mostrano come il livello di rischio delle strutture, rappresentato dal *PGA Deficit*, diminuisca con il passare degli anni e del perfezionamento delle normative sismiche.



**Figura 3** Valori, per l'Italia, di *PGA Deficit* (espressi in g), per gli edifici costruiti prima del 18/04/1909. E' da notare che fino a quando il *Design PGA* è nullo, questa mappa risulta essere confrontabile alla Figura 2.b.



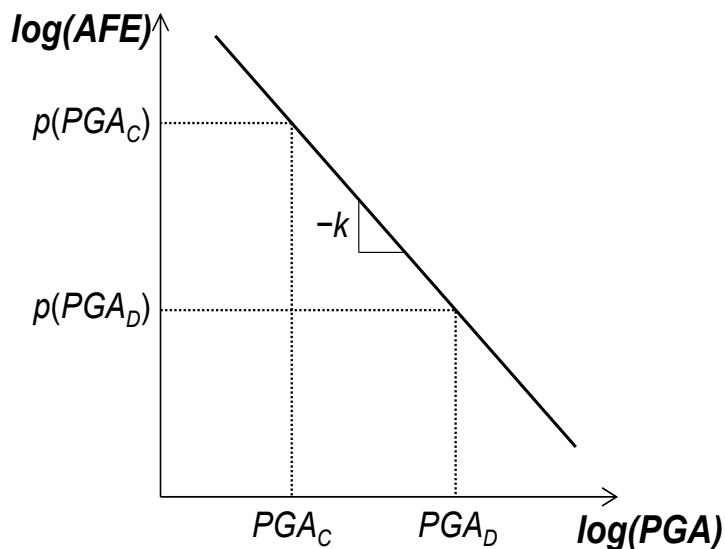
**Figura 4** Valori, per l'Italia, di *PGA Deficit* (espressi in g), per gli edifici costruiti tra il 3\03\1975 e il 3\06\1981.



**Figura 5** Valori, per l'Italia, di *PGA Deficit* (espressi in g), per gli edifici costruiti tra il 19\06\1984 e l'Ordinanza 3274/2003 (non ancora resa obbligatoria).

Dopo aver calcolato il *PGA Deficit* per tutti gli edifici scolastici italiani, quest'ultimi devono essere classificati in ordine decrescente di deficit. Da questo elenco un numero X di edifici viene scelto per passare allo step successivo. Si fissa un valore di deficit di soglia al di sopra del quale sono necessarie analisi più accurate per la stima della vulnerabilità.

La seconda, ed alternativa strategia prevede il calcolo della probabilità di collasso di ogni edificio utilizzando la curva di pericolosità che viene rappresentata con una pendenza negativa pari al valore  $-k$  nel grafico logaritmico  $\log(PGA)$ - $\log(AFE)$  (Figura 6).



**Figura 6** Relazione tra la frequenza di eccedenza di un sisma e differenti livelli di PGA data dalla curva di pericolosità, di gradiente  $k$ , linearizzata.

Noti i valori di *Design PGA* e di *Current PGA* (sopra descritti), la frequenza di eccedenza annuale del *Current PGA* (0,21%) e il valore di  $k$  dove è collocato l'edificio, è possibile conoscere, per ogni edificio scolastico, la frequenza di eccedenza annuale del *Design PGA*:

$$AFE(DesignPGA) = AFE(CurrentPGA) \left( \frac{CurrentPGA}{DesignPGA} \right)^k \quad (2)$$

Si può ipotizzare che la probabilità di eccedenza annuale sia uguale alla frequenza di eccedenza annuale e quindi ottenere un valore di  $p(Collapse)$ :

$$p(Collapse) = p(DesignPGA) \approx AFE(DesignPGA) \quad (3)$$

Se quest'ultima ipotesi non viene ritenuta idonea, è possibile utilizzare, per il calcolo di  $p(Collapse)$ , il modello di Poisson dato dalla seguente equazione:

$$p(Collapse) = p(DesignPGA) = 1 - [1 - p(CurrentPGA)]^{\frac{(CurrentPGA)}{DesignPGA} \cdot t} \quad (4)$$

I valori di  $p(Collapse)$  vengono in seguito classificati in ordine decrescente. I primi X edifici che presentano valori di  $p(Collapse)$  maggiori sono scelti per passare allo step successivo. Oppure, una volta calcolata la frequenza di eccedenza annuale di  $DesignPGA$ , è anche possibile valutare la probabilità di eccedenza  $q$ , utilizzando il modello di Poisson (Equazione 5), per un tempo di esposizione (L) pari a 50 anni. Questa probabilità di eccedenza sarà confrontabile con la probabilità di eccedenza di 10% (in 50 anni) che è attualmente accettata per la progettazione degli edifici nuovi. I primi X edifici che presentano valori di  $q$  maggiori sono scelti per passare allo step successivo.

$$q = 1 - e^{-AFE(PGA_{design})L} \quad (5)$$

Il valore di X deve essere stabilito dalle autorità competenti basandosi su dei fattori quali il tempo a disposizione, i fondi e la disponibilità di un personale ingegneristico in grado di condurre analisi di stima più dettagliate. Selezionare un valore di X molto piccolo può avere dei vantaggi e degli svantaggi. Se gli edifici da analizzare nelle fasi successive sono relativamente pochi, lo studio può essere condotto in maniera molto rapida, e questo può essere utile al fine di iniziare, il prima possibile, la fase di intervento strutturale sulle scuole. Al contrario, però, se X è molto ridotto si rischia di perdere, nella prima fase della metodologia, quegli edifici che hanno un rischio sismico elevato, ma che i metodi semplificati del  $PGA Deficit$  o del  $p(Collapse)/q$  non hanno rilevato.

In questo primo studio si dovrebbe ridurre il numero delle scuole da analizzare di approssimativamente un ordine di grandezza, passando da un valore di circa 60.000 a poche migliaia.

## 2° Fase: Valutazione di vulnerabilità tramite controllo visivo

Come è stato appena discusso, il primo step della metodologia non prevede lo studio delle caratteristiche specifiche dei singoli edifici e fa l'ipotesi forte di uniformità del codice sismico su tutto il territorio italiano. Da questa prima fase,

però, un numero importante di edifici X viene selezionato per analisi successive di maggior dettaglio. Questo secondo stadio prevede una valutazione di vulnerabilità basata su ispezioni visive delle X scuole identificate precedentemente e si pone, come obiettivo, l'ulteriore riduzione del numero di edifici a più alto rischio sismico.

L'indice scelto per questo step è il GNDT vulnerability index V. Questo indice, già ampiamente utilizzato in Italia, è un valore noto per molti ingegneri italiani ed è stato già valutato per un numero consistente di edifici, in modo particolare per quelli localizzati in zone ad alto rischio sismico (SERGISAI Working Group, 1997; AA.VV., 1999; AA.VV., 2000). Per questi motivi, questa seconda fase della metodologia, può essere condotta in tempi relativamente brevi. Occorre tenere presente che, sebbene questo indicatore non rappresenta un livello di accuratezza molto elevato, può, comunque, essere significativo ai fini di una seconda selezione del numero delle scuole italiane.

Il Vulnerability index viene stimato come somma pesata di parametri che considerano sia la configurazione e la tipologia della struttura che la qualità del materiale con cui questa viene edificata. La fascia dei valori caratteristici dell'indice V è diversa se si considera un edificio in muratura oppure uno in cemento armato. Per la prima categoria, V varia tra 0 e 100, mentre per la seconda assume valori tra 25 e 100. Un valore più elevato del Vulnerability index rappresenta un grado di vulnerabilità maggiore.

Questo indicatore viene correlato con il valore di PGA in grado di causare il collasso di una struttura attraverso la seguente relazione (Zonno *et al.*, 1999):

$$PGA_c = \frac{1}{(\alpha_c + \beta_c(V + 25)^\gamma)} \quad (6)$$

dove  $\alpha_c = 1.5371$ ,  $\beta_c = 0.000974$  e  $\gamma = 1.8087$ .

Mentre i valori di V,  $\alpha_c$ ,  $\beta_c$ , e  $\gamma$  sono valutati in modo deterministico, un sisma che presenta un  $PGA \geq PGA_c(V)$  provocherà il collasso di tutti gli edifici che presentano un vulnerability index  $\geq V$ . Per questo motivo, l'unica componente stocastica è la ricorrenza del sisma che viene rappresentata dalla curva di

pericolosità che presenta una pendenza negativa pari al valore  $-k$  nel grafico logaritmico  $\log(PGA)-\log(AFE)$  (Figura 6).

I diversi valori di  $k$  sono già stati determinati sulla base dei dati di pericolosità dell'INGV per diversi periodi di ritorno (Gruppo di Lavoro, 2004). Come già precedentemente sottolineato, se la probabilità annuale di eccedenza è considerata approssimativamente uguale alla frequenza annuale di eccedenza, allora è possibile valutare la probabilità di collasso come:

$$p(\text{Collapse}) = p(PGA_C) = p(PGA_D) \left( \frac{PGA_D}{PGA_C} \right)^k \quad (7)$$

Nel caso in cui si applica il modello Poisson per ottenere la probabilità annuale di eccedenza dalla frequenza annuale di eccedenza, la formula esatta risulta essere:

$$p(\text{Collapse}) = p(PGA_C) = 1 - [1 - p(PGA_D)]^{\left( \frac{PGA_D}{PGA_C} \right)^k} \quad (8)$$

dove  $PGA_D$  è il valore di accelerazione di picco del suolo della mappa di pericolosità con periodo di ritorno 475 anni (Figura 2.b) che ha una probabilità annuale di eccedenza pari a  $1/475 = 0.21\%$ .

Mentre il valore di  $p(PGA_D)$  è costante per tutte le tipologie di edificio il valore  $\left( \frac{PGA_D}{PGA_C} \right)^k$  è proporzionale al rischio a cui è sottoposto uno studente di una scuola

che ha un particolare valore  $V$  del vulnerability index. Questo rischio viene espresso, per esteso, dalla seguente espressione:

$$\text{Individual Risk} \cong \left( \frac{PGA_D}{PGA_C} \right)^k = (PGA_D \times (\alpha_C + \beta_C (V + 25)^\gamma))^k \quad (9)$$

Ai fini di creare una scala di priorità è più ragionevole parlare di *Social Risk*. Quest'ultimo rischio è correlato al numero di studenti ( $N_C$ ) presenti in ogni scuola ed è rappresentato dalla relazione:

$$\text{Social Risk} \cong (PGA_D \times (\alpha_C + \beta_C (V + 25)^\gamma))^k \times N_C \quad (10)$$

Occorre precisare che, se la scuola è costituita da più edifici, il numero  $N_C$  non si riferisce al numero di allievi di tutto il complesso scolastico, ma al numero di studenti presenti all'interno di ogni singola struttura. Questa osservazione sottolinea una difficoltà possibile nella determinazione di  $N_C$ . Infatti, non sempre si hanno a disposizione i valori di  $N_C$  quando si parla di scuole composte da più edifici. In questi ultimi casi, generalmente, si dispone del valore totale dei bambini presenti in tutto il complesso scolastico. Un altro impedimento nella valutazione corretta di  $N_C$  è quello di stabilire un numero di studenti che consideri anche la fluttuazione degli stessi in edifici con diverse destinazioni d'uso come, per esempio, le palestre e le mense.

Il valore di  $N_C$  potrebbe essere:

- il valore medio in tutta la giornata comprese le ore notturne (concetto di rischio);
- il valore massimo nel corso della giornata (peggior scenario);
- il valore medio nelle ore scolastiche, quelle mattutine (rischio condizionato a  $T_{evento}=\text{mattina}$ );
- altre possibilità.

Utilizzando l'equazione (10), per esempio, una scuola con 500 studenti con una probabilità di collasso dello 0,1% ha lo stesso identico indice di priorità di una scuola con 50 alunni, ma con una probabilità di collasso del 1%. Chiaramente, per non discriminare quelle scuole a rischio che hanno un numero di studenti minore rispetto ad altre, è utile utilizzare il *Risk Rating* che cerca di bilanciare in modo opportuno le due tipologie di rischio. Questo indice è espresso dall'equazione:

$$Risk\ Rating = (PGA_D \times (\alpha_C + \beta_C (V + 25)^\gamma))^k \times (N_C)^a \quad (11)$$

dove  $a$  rappresenta un valore compreso tra 0 e 1 e viene assegnato dalle autorità di governo. Quando  $a=0$  si ricade nel caso dell'*Individual Risk*, viceversa quando  $a=1$  ci si riferisce al *Social Risk*.

Dopo aver stimato i diversi *Risk Rating* di ogni scuola, si ordinano gli edifici in ordine decrescente di rischio e si selezionano i primi  $Y$  edifici scolastici da far



passare alla terza fase della metodologia. Come nel passo precedente, il numero Y va scelto in modo appropriato, in base alle risorse che si hanno a disposizione, prima di procedere con l'ultimo step della metodologia. Anche in questo caso la riduzione deve essere circa di un ordine di grandezza.

### 3° Fase: Valutazione di vulnerabilità basata su un metodo meccanico semplificato

Le prime due fasi, come si è potuto notare, sono basate su stime molto semplici e veloci in cui non vengono richieste ispezioni e studi specifici sui vari edifici scolastici. Il primo step, infatti, prevede solo la conoscenza dell'anno di progetto e di costruzione della struttura e la sua localizzazione geografica, mentre il secondo step necessita di informazioni già presenti nel database del GNDT. Sebbene questi primi due stadi hanno permesso di ridurre in modo significativo il numero di edifici da studiare, in questa ultima fase è necessario utilizzare un metodo di stima di maggior dettaglio per poter prendere delle decisioni finali. Per questo scopo si utilizzeranno i metodi DBELA (Crowley *et al.*, 2004) e MeBaSe (Restrepo-Vélez and Magenes, 2004) rispettivamente per edifici in cemento armato e per quelli in muratura. Questi due metodi forniscono un ottimo equilibrio tra semplicità di applicazione e accuratezza del risultato. La domanda sismica è rappresentata dallo spettro di spostamento calcolato per lo stesso periodo di ritorno e per lo stesso valore di smorzamento della struttura. La capacità, invece, è basata sulla geometria e sul materiale con cui è costruito l'edificio. I risultati che si ottengono da questi due metodi vengono rappresentati in termini di *Capacity Ratio* CR. Quest'ultimo è definito come il rapporto tra la capacità e la domanda:

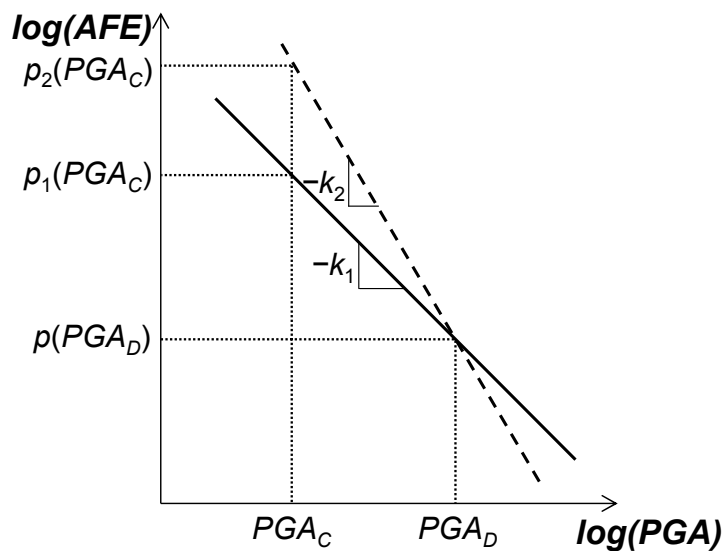
$$CR = \frac{S_C}{S_D} \quad (12)$$

dove  $S_C$  è il valore della capacità di un edificio e  $S_D$  è il valore della domanda. Un valore di CR pari ad uno implica il fatto che la struttura è conforme alla recente normativa sismica e che non ha bisogno di alcun tipo di intervento. Al contrario, un valore di CR inferiore all'unità implica il fatto che la struttura è inadeguata.

Il *Capacity Ratio* CR può essere visto anche come *Risk Rating*:

$$Risk\ Rating = \left(\frac{Demand}{Capacity}\right)^k = \left(\frac{1}{CR}\right)^k \quad (13)$$

dove  $k$  rappresenta il gradiente della curva di pericolosità. In Figura 7 sono riportate due curve di pericolosità con i gradienti  $k_2 > k_1$ . Per uno stesso valore di  $CR < 1$  la curva di pericolosità numero 2 con il gradiente maggiore presenta una probabilità di collasso maggiore. Questo è ben evidente anche dall'equazione (13) dove il *Risk Rating* è tanto maggiore dell'unità quanto è minore di uno il CR e cresce all'aumentare di  $k$ .



**Figura 7** Curve di pericolosità nel grafico logaritmico con i gradienti  $-k_1$  e  $-k_2$ .  $k_2 > k_1$ . La probabilità annua di collasso è maggiore per la curva di pericolosità 2.

Basandosi sul CR e sul Risk Rating è ora possibile determinare quali edifici possono essere ritenuti sicuri e compilare un'elenco di scuole a rischio stabilendo delle priorità di intervento. L'importanza della struttura viene considerata nel calcolo del *Capacity Ratio*. I fattori di importanza di un edificio sono assegnati in modo diverso in base alla funzione che la struttura deve sostenere. I codici sismici sono molto più rigidi quando si tratta di costruzioni finalizzate a contenere un numero ingente di persone (p.e. sale conferenze), per edifici che assumono ruoli importanti durante le emergenze (p.e. ospedali) e per le strutture il cui collasso risulta essere particolarmente grave (p.e. scuole). Per quanto riguarda le scuole il fattore di importanza è stabilito pari a 1,2. Questo valore comporta una soglia di  $CR_{pre}$  pari a 0,65. Le scuole che presentano un  $CR < 0,65$  devono subire inevitabilmente degli interventi strutturali, mentre quelle che

hanno  $CR \geq 0,65$  possono essere ritenute sicure a seguito di decisioni da parte delle autorità regionali.

## Assegnazione delle priorità e dei tempi di intervento

L'assegnazione delle priorità e dei tempi di intervento sono concetti indispensabili per distribuire in modo corretto le risorse a disposizione. Lo schema di Figura 8 illustra un modo possibile di elencare le priorità. In primo luogo le scuole sono raggruppate in bande di uno stesso valore di *Risk Rating*. All'interno dello stesso gruppo, gli edifici scolastici sono ordinati in ordine decrescente di numero di studenti  $N_c$  occupanti l'edificio. Infine, ognuna di queste sottoclassi viene ordinata secondo un valore decrescente di un fattore di rischio dipendente dal

Risk Rating	$N_c$	Final ranking according to time-dependent hazard factor
> 500	> 1000	↓
	500 – 1000	↓ ↓
	250 – 500	↓ ↓ ↓
	100 – 250	↓ ↓ ↓ ↓
	50 – 100	↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
100 – 500	> 1000	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	...	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
40 – 100	> 1000	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	...	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
20 – 40	> 1000	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	...	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
10 – 20	> 1000	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	...	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
5 – 10	> 1000	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	...	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
3 – 5	> 1000	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	...	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓
	< 50	↓ ↓
< 3	> 1000	↓ ↓
	...	↓ ↓
	< 50	↓ ↓

**Figura 8** Schema delle priorità basato sul *Risk Rating*, sul numero di studenti  $N_c$  e, se necessario, su un fattore di rischio dipendente dal tempo.

tempo. Riassumendo, all'interno della stessa classe di rischio, le scuole sono ordinate, prima, secondo il numero di occupanti l'edificio e, poi, secondo un fattore che indica il rischio possibile in funzione del tempo. La filosofia che sta alla base di questo schema è quella di massimizzare il numero di bambini sicuri nel più breve tempo possibile senza discriminare gli studenti che si trovano nelle scuole più piccole e che sono considerate a rischio.

Dopo aver stabilito una scala di priorità occorre valutare le tempistiche corrette che si hanno a disposizione per ristrutturare le scuole. Anche lo studio di queste tempistiche prende in considerazione il valore di  $k$ . Per ottenere una relazione lineare tra il tempo e il *Capacity Ratio*, si introduce una nuova grandezza. L'*Effective Capacity Ratio* è rappresentato dalla seguente relazione:

$$\text{Effective Capacity Ratio} = (\text{Risk Rating})^{1/3} = (\text{CR})^{k/3} \quad (14)$$

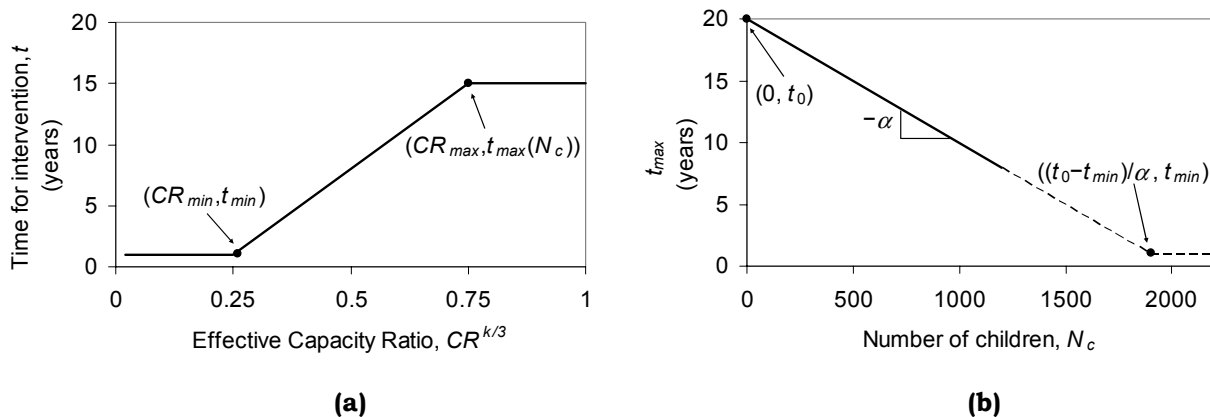
La relazione che intercorre tra il tempo di intervento, il *Risk Rating* (espresso come *Effective Capacity Ratio*) e il numero di alunni occupanti la scuola è completamente determinata da cinque parametri –  $CR_{\min}$ ,  $CR_{\max}$ ,  $t_{\min}$ ,  $t_0$  e  $\alpha$  – ed è riportata in Figura 9. In Figura 9.a, è chiaro vedere che per valori di *Effective capacity ratio* minori di un  $CR_{\min}$  il tempo necessario all'intervento è costante e pari ad un valore minimo di  $t_{\min}$ . Il valore di  $t_{\min}$  è totalmente indipendente dal numero  $N_c$  di occupanti la scuola. Per dei valori di *Effective capacity ratio* maggiori di un  $CR_{\max}$ , il valore del tempo è limitato da un  $t_{\max}$  che, invece, dipende dal numero  $N_c$  come mostrato in Figura 9.b. La relazione tra il  $t_{\max}$  e  $N_c$  è governata dagli altri due parametri  $t_0$  e  $\alpha$  ed è ulteriormente limitata da un  $t_{\min}$ . Infine, per i valori intermedi si assume una relazione lineare.

Le espressioni che legano le relazioni appena descritte sono riportate di seguito:

$$t = t_{\min} + \left( \frac{CR^{k/3} - CR_{\min}}{CR_{\max} - CR_{\min}} \right) \cdot t_{\max}(N_c) \quad t_{\min} \leq t \leq t_{\max}(N_c) \quad (15)$$

dove il valore  $t_{\max}(N_c)$  è dato da:

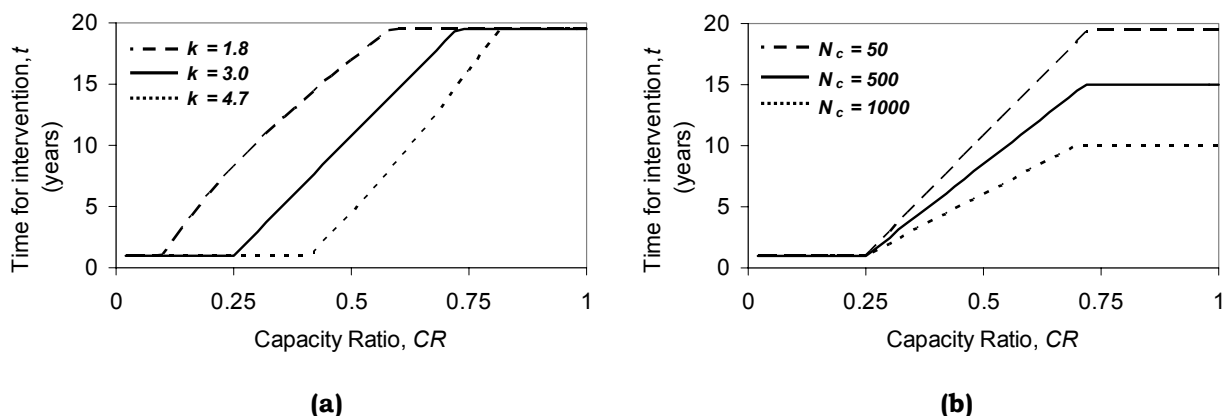
$$t_{\max}(N_c) = t_0 - \alpha N_c \quad t_{\max} \geq t_{\min} \quad (16)$$



**Figura 9 (a)** Relazione tra il tempo stimato per gli interventi,  $t$ , e il *Capacity Ratio*,  $CR$ . **(b)** Relazione tra il tempo massimo permesso per intervenire sugli edifici,  $t_{max}$ , e il numero di bambini delle scuole,  $N_c$ .

In Figura 10.a viene riportata la relazione tra il CR e il tempo per valori differenti di  $k$  e per un numero  $N_c=50$  bambini. Le curve, riportate a titolo di esempio, presentano un  $CR_{min} = 0,25$ ,  $CR_{max} = 0,75$ ,  $t_{min} = 1$  anno,  $t_0 = 20$  anni e un  $\alpha = 0,01$  anni/bambini. Questi valori possono essere modificati dalle autorità competenti. La figura mostra come, per una curva di pericolosità a pendenza maggiore, che corrisponde ad un valore di  $k$  più elevato, il tempo richiesto per l'intervento sia minore.

In Figura 10.b è, invece, riportata la relazione tra CR e il tempo per valori differenti di  $N_c$  e per un valore costante di  $k=3$ . In particolare si sono considerate scuole con 50, 500 e 1000 studenti. E' interessante notare che, per valori di CR molto bassi, ovvero per scuole ad alto rischio sismico, il valore  $N_c$  non influenza la stima del tempo di intervento. Al contrario, per scuole a più basso rischio sismico e, quindi, valori di CR maggiori, il tempo di intervento diminuisce all'aumentare di  $N_c$ . Quest'ultima osservazione sottolinea come questa metodologia tenta di non discriminare quelle scuole con un numero di occupanti minore. Per valori molto alti di  $N_c$  il valore di  $t_{max}$  si avvicina moltissimo a quello di  $t_{min}$ . Generalmente, questa condizione non si verrà mai a verificare in quanto non esistono edifici che contengano un numero tanto elevato di studenti.



**Figura 10** Tempo necessario agli interventi sugli edifici in funzione del CR per **(a)** tre diversi valori del parametro  $k$ , e **(b)** tre diversi valori del numero di occupanti  $N_c$ . Le figure riportate sono solo a scopo di esempio e si riferiscono ai valori dei parametri nel testo.

Dopo aver stabilito una scala di priorità e aver determinato le tempistiche corrette di intervento per gli edifici, occorre approfondire le analisi in modo puntuale. In questo modo si possono identificare le mancanze strutturali di ogni scuola. E' così possibile progettare, in modo efficace, gli interventi sismici più appropriati da compiere sui diversi edifici scolastici.

## Un esempio di applicazione della metodologia proposta

Per meglio illustrare la metodologia di studio presentata fino ad ora si fornisce un esempio di applicazione basato su un piccolo catalogo di cinque scuole dei comuni di Bonefro e Colletorto localizzati vicino a San Giuliano di Puglia.

Gli edifici scolastici utilizzati per questo caso sono brevemente descritti in Tabella 2 e le Tabelle che seguono sono ottenute dal database dei valori di vulnerabilità del GNDT e determinati da Fabrizio Meroni [Pers.Comm., 2005].

**Tabella 2** Inventario delle scuole, valori di PGA Deficit per la prima fase della metodologia

ID	Descrizione	Data di costruzione	PGA Deficit (g)
1	Scuola Media a Bonefro	post-1981	0.21
2	Scuola Media a Bonefro	post-1981	0.21
3	Scuola elementare a Bonefro	1961-1971	0.21
4	Scuola materna a Colletorto	1961-1971	0.21
5	Scuola elementare/media a Colletorto	1946-1960	0.21

Dalla Tabella 2 è possibile notare che si stanno studiando tre scuole del comune di Bonefro e due del comune di Colletorto. La data della costruzione degli edifici viene presa come approssimazione di quella di progetto che non è disponibile. Come è possibile notare, dall'ultima colonna della Tabella 2, il PGA Deficit corrisponde ad un valore di 0,21g per tutti e cinque gli edifici. Per questo motivo non è possibile classificare le scuole secondo un ordine decrescente di PGA e valutare il numero X di edifici, a più alto rischio, da far passare alla fase successiva. Chiaramente, questo accade perché l'inventario che si sta studiando, è molto limitato e comprende scuole di paesi vicini tra loro. Se l'elenco delle scuole da analizzare fosse stato maggiore, si sarebbe potuto procedere ad una prima scrematura.

In Tabella 3 sono mostrati tutti i valori degli indici necessari allo studio del secondo step della metodologia. Sono riportati i valori degli indici di vulnerabilità V, del numero di occupanti  $N_c$  che viene preso uguale al numero di bambini che frequentano le scuole, e il valore del gradiente k calcolato dall'INGV. Questi dati permettono di valutare l' *Individual Risk* e il *Risk Rating*. Il calcolo di quest'ultimo viene fatto sia per un valore di  $a$  pari a 0,25 che pari a 0,75.

Si può notare che la scuola numero 4, che ha un indice V maggiore, è quella che presenta anche un *Individual Risk* maggiore. Occorre, però, sottolineare che il grande numero di studenti che frequentano la scuola numero 5 incide in modo significativo sulla stima del rischio. Il *Risk Rating*, per questo ultimo edificio scolastico, è maggiore sia nel caso si consideri un valore di  $a$  pari a 0,25 che se si consideri un valore pari a 0,75. Se si mettono a confronto i valori di *Risk Rating* trovati per i due diversi  $a$ , si può constatare che, per questo esempio, la classifica degli edifici in ordine di importanza è relativamente insensibile al valore di  $a$ . Infatti con  $a=0,25$  si avrebbe un ordine di 5,4,2,1,3, mentre con  $a=0,75$  l'ordine sarebbe di 5,4,2,3,1. La leggera variazione del risultato dovuta ad  $a$  non è però generalizzabile a tutti i casi, in particolar modo quando l'inventario delle scuole comprende un numero consistente di edifici. Una volta che le autorità competenti hanno stabilito il valore di  $a$ , si può procedere alla scelta del numero Y di scuole da far passare allo step successivo. In questo caso tutte le cinque scuole verranno prese in considerazione.

**Tabella 3** Valori necessari alla stima del rischio per la seconda fase della metodologia.

ID	GNDT Vulnerability Index, $V$	Numero di occupanti $N_c$	Pendenza della curva di rischio logaritmica, $k$	Individual Risk	Risk rating, $\alpha = 0.25$	Risk rating, $\alpha = 0.75$
1	28.1	30	2.8	0.23	0.54	3.0
2	27.8	50	2.8	0.23	0.61	4.3
3	24.8	50	2.8	0.20	0.53	3.8
4	31.4	60	2.8	0.27	0.74	5.8
5	27.8	125	2.8	0.23	0.76	8.5

In Tabella 4 sono riportati i valori di *Capacity Ratio* e i corrispondenti valori di *Risk Rating*. Basandosi sulla soglia di rischio di 0,65 si nota come tutti e cinque gli edifici necessitano di intervento. In Tabella 4 viene riportato anche il fattore di rischio Time-dependent (Peruzza, 2005). Si osserva che il valore è uguale per tutte le scuole in quanto sono localizzate nella stessa zona geografica. Ordinando gli edifici in ordine decrescente di *Risk Rating* si nota che le prime due hanno lo stesso valore di rischio. La priorità viene assegnata alla scuola numero 2 a causa del maggiore numero di occupanti. Dopo aver fatto una graduatoria delle scuole, come mostrato nella quinta colonna della Tabella 4, è possibile procedere al calcolo delle tempistiche necessarie all'intervento. Queste vengono calcolate utilizzando i parametri mostrati nel paragrafo precedente. Gli edifici scolastici, per la sicurezza degli studenti, devono essere ristrutturati nei tempi previsti oppure le funzioni di queste strutture devono essere delocalizzate.

**Tabella 4** Valori necessari alla stima del rischio per la terza fase della metodologia. Graduatoria di priorità e tempistiche di intervento.

ID	Capacity ratio (supposta vera)	Risk rating	Fattore di rischio Time- dependent	Graduatoria di priorità	Tempo necessario all'intervento (anni)
1	0.4	13.0	1.0	4th	8
2	0.4	13.0	1.0	3rd	8
3	0.6	4.2	1.0	5th	15
4	0.2	90.6	1.0	1st	1
5	0.3	29.1	1.0	2nd	4



Si ricorda che questo esempio è riportato solo a scopo illustrativo come elemento chiarificatore della metodologia esposta. Quando si considera un inventario di scuole più ingente sono necessarie ulteriori stime dei parametri utilizzati.

## Bibliografia

- [1] AA.VV., 1999. *Censimento di Vulnerabilità degli Edifici Pubblici, Strategici e Speciali nelle Regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia e Sicilia*, Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- [2] AA.VV., 2000. *Censimento di Vulnerabilità a Campione dell'Edilizia Corrente dei Centri Abitati, nelle Regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia e Sicilia*, Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- [3] Crowley H., Pinho R. e Bommer J.J., 2004. A probabilistic displacement-based vulnerability assessment procedure for earthquake loss estimation, *Bullettin of Earthquake Engineering*, vol.2, pp.173-219.
- [4] Grant D., Bommer J.J., Pinho R. e Calvi G.M., 2006. Defining Priorities and Timescales for Seismic Intervention in School Buildings in Italy, *Research Report ROSE-2006/03*, IUSS Press, Italia.
- [5] Gruppo di lavoro, 2004. Redazione della mappa di pericolosità sismica prevista dall'Ordinanza PCM del 20 marzo 2003 n.3274, All.1. Rapporto conclusivo per il Dipartimento della Protezione Civile. INGV, Milano-Roma, aprile 2004, 65 pp.+5 appendici.
- [6] Montaldo V., Faccioli E., Zonno G., Akinci A., Malagnini L., 2005. Treatment of ground-motion predictive relationships for the reference seismic hazard map of Italy, *Journal of Seismology*, vol.9, pp.295-316.
- [7] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM), 2003. *Primi Elementi in Materia di Criteri Generali per la Classificazione Sismica del Territorio Nazionale e di Normative Tecniche per le Costruzioni in Zona Sismica*, OPCM n.3274/2005, 20 marzo 2003, Italia.
- [8] Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri (OPCM), 2006. *Criteri per l'individuazione delle zone sismiche e la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone*, OPCM n.3519\2006, 28 aprile 2006, Italia.

- [9] Peruzza L., 2005a. Mappe di pericolosità time-dependent, Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale (Trieste), Work in Progress, Personal Communication.
- [10] Restrepo-Vélez L.F. e Magenes G., 2004. Simplified procedure for the seismic risk assessment of unreinforced masonry buildings, *Proceedings of the Thirteenth World Conference on Earthquake Engineering*, Vancouver, Canada, paper 2561.
- [11] SERGISAI Working Group, 1997. *First Year Progress Report of the SERGISAI Project*, European Commission Directorate General XII for Science, Research and Development Environment and Climate 1994-1998, Climatology and Natural Hazards.
- [12] Zonno G., coord., 1999. *Rapporto Finale CNR-IRRS alla Commissione Europea*, Contratto ENV4-CT96-0279, pp.95-102.