

Valutazione della vulnerabilità sismica di edifici scolastici della Provincia di Potenza

M. Dolce, A. Masi, C. Moroni, D. Liberatore, M. Laterza, F. Ponzo, A. Cacosso, G. D'Alessandro, M. Faggella, R. Gigliotti, G. Perillo, L. Samela, G. Santarsiero, G. Spera, P. Suanno, M. Vona.

Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria, Università della Basilicata, Potenza, Italia

SOMMARIO: A seguito del tragico terremoto del 31.10.2002, l'Amministrazione provinciale di Potenza ha affidato al DiSGG dell'Università della Basilicata uno studio della vulnerabilità sismica delle scuole della Provincia. Lo studio, articolato in tre fasi, nelle quali si opera a livelli di dettaglio crescenti, è stato finora svolto limitatamente alla sola prima fase, il cui obiettivo è una prima valutazione di vulnerabilità degli edifici scolastici progettati senza criteri antisismici. Tale valutazione è basata essenzialmente sui dati tecnici disponibili presso uffici regionali, provinciali e comunali, su un rilievo delle principali caratteristiche strutturali, sull'esame della storia sismica e su di un modello la cui complessità è commisurata al livello di conoscenza della struttura reale. Nel presente lavoro viene descritta la metodologia messa a punto, evidenziandone vantaggi e limiti di applicabilità, e vengono presentati i principali risultati ottenuti sul ricco database raccolto, relativo a circa 80 edifici scolastici.

ABSTRACT: After the tragic event of 31.10.2002, the Administration of the Provincia of Potenza entrusted the Dept. of Structures of the University of Basilicata for an investigation on the seismic vulnerability of the schools in this area. The study is splitted in three phases, at increasing level of detail. Until now the first level has been completed, with the aim of providing a first vulnerability evaluation of all the school buildings designed without any seismic provision. It is essentially based on technical data available in the public administration offices, on a sight inspection of the main structural characteristics, on the seismic history of the constructions and on a model whose complexity is calibrated on the attained knowledge level. In the present work the set up method, with its advantages and limits, and the main results on the large data base, relevant to about 80 school buildings are described.

1 INTRODUZIONE

L'elevata pericolosità sismica del territorio italiano comporta la necessità di conoscere la vulnerabilità del patrimonio edilizio esistente ed in particolar modo di quello pubblico. Un'analisi approfondita, però, richiede un dispendio di risorse, e soprattutto di tempo, che spesso non è compatibile con l'impellenza dell'indagine e le disponibilità economiche. L'ampio patrimonio edilizio pubblico impone, quindi, l'adozione di metodi speditivi, che permettano la realizzazione di indagini conoscitive in grado di definire le priorità degli interventi, mediante i quali porre rimedio all'elevato rischio sismico.

Le metodologie oggi disponibili per la valutazione della vulnerabilità degli edifici sono legate all'evoluzione storica degli studi di vulnerabilità, a partire dal terremoto Irpino-Lucano del 1980 (Braga et al., 1981). L'attenzione è stata inizialmente rivolta all'edilizia residenziale, cercando di cogliere gli aspetti statistici del problema. Nell'allargare l'attenzione verso tipologie specialistiche, quali quelle monumentali, industriali nonché a quelle degli edifici pubblici e/o con la volontà di valutare con maggior precisione l'effettiva vulnerabilità degli edifici residenziali (Benedetti, Petrini 1984), si è sempre più cercato di cogliere le caratteristiche puntuali delle singole strutture che possono maggiormente condizionare la loro resistenza sismica. Le numerose pro-

poste in questa direzione non hanno ancora trovato un riscontro probante sulla loro efficacia, che solo una verifica a valle di un terremoto distruttivo può fornire. Ovviamente gli approfondimenti richiesti da modelli più sofisticati contrastano con l'esigenza di operare sui grandi numeri e comportano impegni temporali ed economici nettamente superiori. E' quindi giocoforza calibrare la metodologia di indagine con quella di valutazione, in maniera da contemperare il livello di conoscenza raggiungibile con il metodo di valutazione applicato, secondo una logica oramai riconosciuta anche dalla normativa internazionale e nazionale (CEN 2003, Ordinanza 3274 2003) per le verifiche della sicurezza degli edifici esistenti. Su questa linea si sono mossi numerosi ricercatori italiani, che hanno rivolto l'attenzione soprattutto verso gli edifici in muratura. Il clamore e l'allarme prodotti dal tragico evento del 31.10.2002 hanno maggiormente indirizzato l'attenzione, non solo a livello scientifico ma anche e soprattutto a livello operativo, verso gli edifici pubblici, ed in particolare verso quelli scolastici. L'esigenza di avere un quadro completo in tempi brevi della situazione del rischio sismico di tali edifici ha spinto numerose amministrazioni pubbliche a chiedere la collaborazione di istituti di ricerca ed università che da tempo si occupano delle problematiche della vulnerabilità sismica degli edifici. In tale ottica la Provincia di Potenza ha stipulato, con l'Università della Basilicata – Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria (DiSGG), una convenzione per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici scolastici di sua competenza, tutti di scuola media superiore. Peraltro, già precedentemente al citato evento, il GNDT aveva attivato nel 1996 il progetto LSU, insieme al Dipartimento della Protezione Civile e al Ministero del Lavoro, i cui risultati sono sintetizzati in (Cherubini et al. 1999), e nel 2001 il progetto SAVE (Strumenti Aggiornati per la Vulnerabilità sismica del patrimonio Edilizio e dei sistemi urbani), nell'ambito del quale il secondo dei quattro task è dedicato alla vulnerabilità sismica degli edifici pubblici e strategici, con particolare attenzione verso le scuole e gli ospedali.

Lo studio per la Provincia di Potenza, oggetto del presente lavoro (Dolce, 2003), è stato articolato in tre fasi, nelle quali si opera a livelli di dettaglio crescenti. Obiettivo della prima fase è la raccolta dei dati disponibili, in possesso della Regione e della Provincia, utili ad una prima valutazione di vulnerabilità degli edifici scolastici progettati senza criteri antisismici o non adeguati al sisma. Obiettivo della seconda fase, invece, è il completamento dell'indagine della prima fase, con estensione anche agli edifici scolastici progettati o adeguati con criteri antisismici, e, soprattutto, l'approfondimento delle valutazioni di vulnerabilità attraverso prove non distruttive e poco distruttive sui materiali strutturali (calcestruzzi, acciai, murature) atte a definire le loro caratteristiche meccaniche e l'applicazione di un modello più evoluto, oltre che le misurazioni delle vibrazioni ambientali ai fini dell'identificazione dinamica delle caratteristiche strutturali degli edifici e la raccolta di tutti i dati utili a definire un database di fascicoli di fabbricato. Nella terza fase, infine, si definiscono le tipologie di intervento adottabili, in relazione alle caratteristiche degli edifici esaminati, ai fini del loro adeguamento o miglioramento sismico, in una logica di ottimizzazione della spesa e dei risultati conseguibili in termini di riduzione del rischio.

I risultati esposti nel presente articolo sono relativi alla sola la fase 1, finalizzata ad una prima valutazione di vulnerabilità sismica degli edifici scolastici di competenza della Provincia di Potenza, progettati senza criteri antisismici. L'analisi dei risultati è volta ad evidenziare le caratteristiche generali di vulnerabilità e rischio sismico del campione preso in esame, cercando di evidenziare anche alcune peculiarità di comportamento, attraverso l'esame delle resistenze minime e massime ai vari piani e nelle due direzioni, per la struttura in c.a. e in muratura.

2 METODOLOGIA

La finalità dello studio è, come detto, la valutazione della reale vulnerabilità sismica dell'edificio, qui intesa come stima dell'intensità del terremoto per la quale l'edificio potrebbe subire danni gravissimi e/o collassi parziali o totali. Tale finalità viene raggiunta mediante una metodologia che utilizza, tra l'altro, un modello di calcolo semplificato per la valutazione della resistenza sismica dell'organismo strutturale. Attraverso un'analisi preliminare dei possibili meccanismi di collasso, viene individuato il meccanismo più probabile per la costruzione in esame, in relazione alle sue caratteristiche costruttive e sulla base di calcoli semplificati, dell'esperienza dei passati terremoti, dei risultati presenti nella letteratura tecnico-scientifica.

Viene, quindi, messo a punto un modello capace di cogliere il meccanismo di collasso individuato e vengono effettuati i calcoli per la valutazione della resistenza sismica.

Ovviamente il livello di complessità del modello è commisurato al livello di conoscenza della struttura reale, in termini di caratteristiche sia meccaniche dei materiali, che geometriche dei diversi elementi strutturali e dell'organismo strutturale nel suo insieme. È infatti ben noto che la conoscenza di una struttura esistente non è mai totale, ed il livello di dettaglio è, ovviamente, commisurato ai tempi e ai costi di esecuzione dei rilievi e delle indagini sperimentali sui materiali e sugli elementi strutturali, non eseguiti in questa prima fase. È stato, pertanto, necessario, stante la limitata disponibilità economica e temporale, limitare le indagini all'esecuzione di saggi per verificare che i materiali avessero caratteristiche in linea con quelle tipiche dell'epoca e che non vi fossero clamorose e anomale carenze, sia dal punto di vista della geometria della struttura, che della tipologia e presenza di armatura. Il modello adottato è, pertanto, un modello semplificato, che permette una valutazione relativamente affidabile in relazione alle incertezze sopra espresse e ad un'attribuzione delle resistenze dei materiali riferita a valori tipici delle tipologie e dell'epoca di costruzione.

Ai fini di una valutazione complessiva della vulnerabilità, si è ritenuto necessario esaminare, pur se solo in forma qualitativa, anche alcuni aspetti non presi direttamente in conto nel modello di calcolo semplificato, ma in grado di influenzare il comportamento sismico del singolo edificio, e formulare dei giudizi che possono modificare, almeno parzialmente, i risultati che scaturiscono dalle analisi semplificate. Sono state individuate quattro categorie di informazioni che, in vario modo, possono influenzare la vulnerabilità dell'opera e modificare la valutazione quantitativa fornita dal modello di calcolo.

In questa prima fase dello studio non si è ritenuto di effettuare indagini sui terreni. La scelta di privilegiare gli studi sulla struttura è legata essenzialmente alle condizioni economiche e temporali dello studio. Naturalmente, in caso di segni di dissesto attribuibili a cedimenti o, più in generale, ad inadeguatezza delle fondazioni, questi venivano segnalati al fine di avviare indagini più approfondite e l'esecuzione di adeguati provvedimenti.

La metodologia di analisi speditiva, messa a punto per lo studio, si compone, quindi, di cinque passi che possono essere schematicamente riassunti in:

- Ricerca degli elaborati progettuali di ogni edificio per individuare la geometria delle strutture portanti e i materiali utilizzati;
- Messa a punto un modello di calcolo semplificato per la valutazione della resistenza sismica (vulnerabilità) dell'organismo strutturale;
- Esecuzione dei calcoli per la determinazione della resistenza (vulnerabilità) sismica;
- Analisi di ulteriori fattori che possono influenzare la vulnerabilità della singola costruzione, non considerati nel modello semplificato;
- Sintesi dei risultati e valutazione del rischio che, incrociato con i parametri relativi all'adeguatezza del modello, al livello di conoscenza dell'immobile emerso dalla ricerca storica, alla vulnerabilità delle parti non strutturali riscontrata dai sopralluoghi eseguiti ed alla qualità strutturale globale, ha permesso di definire una gerarchia di urgenza con la quale proseguire nell'approfondimento dell'accertamento delle caratteristiche dei materiali da associare ad una analisi più particolareggiata.

Nel seguito vengono descritti in dettaglio i passi della procedura ed i risultati ottenuti.

L'elevato numero di attività necessarie al conseguimento degli obiettivi, inoltre, ha reso indispensabile sistematizzare le attività così come nel seguito verranno dettagliate.

3 RICERCA DI INFORMAZIONI TECNICHE

La metodologia di indagine per la conoscenza della struttura, nelle sue caratteristiche geometriche, e di resistenza dei materiali, si compone dei seguenti passi:

1. Reperimento della documentazione di progetto, esecuzione e collaudo o di diversa provenienza, utile alla definizione diretta o indiretta delle caratteristiche della costruzione;
2. Sopralluoghi e saggi;
3. Rilievo geometrico di massima (geometria esterna, presenza di armature).

Da un punto di vista organizzativo il lavoro è stato svolto da quattro gruppi per un numero complessivo di 16 operatori, di cui 4 fungevano da capigruppo ed uno da coordinatore generale.

Il tempo complessivo occorso è stato di circa 3 mesi per esaminare 78 edifici, di cui 60 in c.a., 13 in muratura e 5 in acciaio, questi ultimi adibiti a laboratori o palestre con tipologia a capannone industriale. Nel contempo e successivamente si è provveduto a riordinare le informazioni, ad eseguire le valutazioni numeriche, a preparare le relazioni di sintesi e gli elaborati, comprendenti, tra l'altro, l'archivio fotografico referenziato su mappa, di ciascuno degli edifici esaminati.

3.1 *Reperimento della documentazione*

È evidente come un rilievo geometrico, per quanto completo e accurato, non possa fornire notizie di dettaglio quali quelle ricavabili da elaborati di progetto, esecuzione e collaudo di un'opera edile, particolarmente per le strutture in c.a.. Il reperimento della documentazione, pertanto, era un passo fondamentale per il presente studio, ancor più per l'impossibilità, determinata dalle condizioni economiche e temporali, di effettuare rilievi dettagliati. Purtroppo si è dovuto riscontrare l'assoluta assenza di documentazione strutturale su supporto digitale e, sebbene si trattasse di edifici scolastici, troppo spesso il materiale cartaceo conservato negli archivi è risultato molto modesto ed in alcuni casi addirittura inesistente. Si è così proceduto al reperimento di informazioni storiche nel tentativo di individuare le imprese costruttrici e/o i progettisti, processo questo che ha funzionato discretamente, ma che comunque non ha portato a risultati decisivi, essendo pressochè inesistenti gli archivi sia degli esecutori che dei progettisti.

Ovviamente le difficoltà sono state crescenti con l'età dei fabbricati, ma non sono mancati i casi in cui anche per edifici relativamente recenti (anni 80) non è stato trovato nessun documento cartaceo. Inoltre, molto spesso, la documentazione era generalmente di carattere architettonico e non strutturale e relativa a situazioni di progetto e non esecutive.

Questa attività, nonostante l'impegno dei diversi gruppi di lavoro e dei funzionari della Provincia, purtroppo non ha avuto gli esiti sperati, e solo per un numero limitato di strutture in c.a. si è potuto ottenere la documentazione progettuale, spesso, come detto, non completa.

3.2 *Sopralluoghi e saggi*

Sono stati effettuati, in generale, più sopralluoghi sullo stesso plesso scolastico. Il primo era in normalmente finalizzato a prendere visione degli edifici nel loro insieme, valutare lo stato di conservazione e gli eventuali danneggiamenti preesistenti e individuare i punti della struttura in cui effettuare saggi. Il secondo ed eventuali successivi sopralluoghi erano finalizzati a riscontrare i risultati dei saggi effettuati e, quindi, verificare le dimensioni degli elementi strutturali, la tipologia e le dimensioni delle armature, la tipologia delle tamponature rispetto a quanto contenuto nella documentazione di progetto e di collaudo, o, in mancanza di questi, effettuare un rilievo sommario, indispensabile per i calcoli su modello semplificato.

3.3 *Rilievo geometrico di massima*

Il rilievo geometrico di massima è stato finalizzato alla determinazione, a campione, delle dimensioni degli elementi strutturali (travi e pilastri), della configurazione generale della struttura (presenza e disposizione dei telai con travi emergenti), della consistenza delle tamponature e delle tramezzature interne.

Il rilievo geometrico, effettuato a campione, ha permesso di verificare la corrispondenza tra le caratteristiche effettive della struttura e la documentazione tecnica disponibile o, in mancanza di quest'ultima, a determinare i dati essenziali necessari alle valutazioni numeriche della vulnerabilità sismica dell'opera.

4 MODELLO SEMPLIFICATO

Le strutture scolastiche italiane, generalmente, sono caratterizzate da due tipologie strutturali prevalenti: muratura e cemento armato. Avendo le due tipologie meccanismi di collasso radicalmente differenti è stato necessario mettere a punto due diversi modelli.

Le strutture in c.a. esistenti progettate per soli carichi verticali, come quelle in esame, sono generalmente caratterizzate da bassi quantitativi di armatura longitudinale nei pilastri e nelle

travi emergenti. Tutto ciò porta, salvo particolari situazioni geometriche, ad escludere un impegno elevato nei nodi, ma porta anche a supporre che il meccanismo di collasso più probabile sia quello che vede la plasticizzazione prevalente dei pilastri di un solo piano e, perciò, la formazione di un meccanismo a colonne deboli e travi forti. Il meccanismo di collasso cui si farà riferimento nella messa a punto del modello semplificato sarà perciò caratterizzato dalla formazione di cerniere plastiche ad almeno un'estremità di tutti i pilastri dei singoli piani. Sebbene nella progettazione degli edifici nuovi il contributo positivo alla resistenza sismica della struttura di tamponature e tramezzature consistenti debba essere trascurato, a causa della scarsa controllabilità delle loro caratteristiche e delle possibili variazioni nel tempo, nella realtà tale contributo è spesso decisivo nell'impedire il collasso della costruzione o ridurre sensibilmente i danni alla struttura. Si è, pertanto, ritenuto necessario inserire nel modello anche il contributo delle tamponature, secondo due ipotesi alternative, descritte nel seguito.

Le strutture murarie degli edifici sollecitate da azioni sismiche sono caratterizzate da comportamenti estremamente differenziati, dipendenti principalmente dalle caratteristiche dei collegamenti esistenti tra pareti ortogonali e tra le pareti portanti e le strutture orizzontali (solai di calpestio e coperture). Fondamentalmente, si possono individuare due importanti categorie di meccanismi di collasso. I meccanismi appartenenti alla prima categoria sono caratterizzati da rotture e ribaltamenti per azioni fuori del piano, ossia ortogonali al piano medio della parete. Quelli appartenenti alla seconda categoria sono invece caratterizzati da rotture, principalmente a taglio, per azioni nel piano della parete, ossia parallele al piano medio della parete. Gli edifici scolastici, in generale e particolarmente quelli esaminati, sono caratterizzati da buoni ammorsamenti tra pareti ortogonali, da buoni collegamenti tra pareti e solaio, realizzati attraverso cordoli in c.a., nonché da solai latero-cementizi adeguatamente rigidi. Pertanto, al fine di determinare la loro vulnerabilità sismica, sono stati considerati unicamente i meccanismi di collasso per azioni nel piano.

4.1 Edifici in c.a.

Si definisce con m_{yi} il momento resistente del pilastro i -esimo, ottenuto attraverso le usuali procedure di valutazione del dominio di resistenza di un pilastro soggetto a sollecitazione composta di presso-flessione, assumendo per il calcestruzzo una resistenza cilindrica ultima cautelativa pari a 15 MPa corrispondente ad un R_{ck} 20. Tale resistenza, pur se diversa da quella riportata negli elaborati di progetto, è stata adottata per tutti gli edifici. Questa scelta, apparentemente molto prudentiale, è giustificata dall'assenza di un riscontro sperimentale e da numerose esperienze su calcestruzzi dell'epoca in cui sono state realizzate le scuole in esame.

Definita con h_j l'altezza interpiano e con $\alpha_i \cdot h_j$ la quota in cui si localizza il punto di flesso (momento nullo) della deformata del pilastro, il taglio resistente complessivo V_{tot} valutato alla base dei pilastri del piano in esame j -esimo sarà pari, per ciascuna delle due direzioni ortogonali considerate, a:

$$V_{tot\ pil\ j} = \sum_i \frac{m_{yi}}{\alpha_i \cdot h_j}$$

Per α_i si sono assunti, al piano terra, i valori 0.55 e 0.8, rispettivamente nella direzione in cui è presente o assente una trave emergente, e ai piani superiori il valore 0.5.

Il contributo delle murature non strutturali viene messo in conto valutandone la resistenza mediante le formule contenute nella circolare ministeriale LL.PP. 10 aprile 1997. Indicando con v_i il taglio resistente dell'elemento murario i -esimo, nella direzione in esame, il taglio resistente complessivo delle murature non strutturali al piano j -esimo vale:

$$V_{tot\ mur\ j} = \sum_i v_i$$

La resistenza complessiva, che tiene conto contemporaneamente del contributo resistente dei pilastri e delle murature non strutturali, è pari alla combinazione dei due contributi. Data la scarsa duttilità delle murature, che per prime raggiungerebbero la condizione di collasso, la somma rappresenterebbe un limite superiore della effettiva resistenza della struttura. Pertanto, al contri-

buto delle murature non strutturali viene sommato un valore ridotto della resistenza dei pilastri, per cui il taglio resistente totale risulta pari a:

$$V_{tot} = MAX(V_{tot\ mur\ j} + \beta \cdot V_{tot\ pil\ j}, V_{tot\ pil\ j})$$

In cui β è preso pari a 0.8.

Quando le tamponature risultano avere ampie finestrate a nastro ed i tramezzi sono costituiti da murature di forati in foglio, il loro contributo alla resistenza al sisma non viene messo in conto direttamente, ma attraverso un generico incremento dello smorzamento, per la dissipazione di energia che il loro danneggiamento comunque comporta, e la corrispondente riduzione dell'ordinata spettrale, come meglio specificato nel seguito. La stessa valutazione viene effettuata, a scopo di confronto, anche per gli edifici nei quali viene calcolato e portato in conto il contributo diretto delle murature non strutturali. In quest'ultimo caso il maggiore tra i valori ottenuti nelle due ipotesi viene assunto come resistenza sismica del piano in esame.

4.2 Edifici in muratura

In base al meccanismo di collasso definito per gli edifici in muratura, il modello deve essere in grado di mettere in conto correttamente le modalità di plasticizzazione e rottura per taglio e/o flessione dei maschi murari sollecitati nel proprio piano e di determinare il taglio complessivo portato dalla struttura.

La resistenza all'azione orizzontale dei maschi murari sollecitati nel proprio piano viene valutata considerando la loro resistenza unitaria a taglio (Turnsek, Cacovic, 1970):

$$H_i = A_i \cdot \tau_{k,i} \cdot \sqrt{1 + \frac{\sigma_{0,i}}{1.5 \cdot \tau_{k,i}}}$$

In cui H_i è la resistenza a taglio del maschio murario i -esimo, σ_{0i} è la tensione di compressione, τ_{ki} è la resistenza a taglio unitaria, funzione della tipologia e qualità della muratura. Questa formula, ben collaudata sperimentalmente, esprime bene la resistenza di un maschio murario quando la rottura avviene per taglio, mentre ne fornisce una sovrastima quando il maschio murario è snello e/o soggetto ad una bassa tensione di compressione, a causa del sopraggiungere della crisi per flessione, prima che si determini la crisi per taglio. Per tener conto di questa eventualità, si applica un fattore riduttivo della resistenza specifica tangenziale (τ_k), (Dolce, 1991), funzione della snellezza e della tensione di compressione media.

La valutazione della resistenza complessiva dell'edificio richiede la determinazione delle aree di muratura resistente nelle due direzioni, escludendo naturalmente le aperture di porte e finestre, valutando per ciascun allineamento la snellezza media e la tensione media di compressione per determinare il fattore riduttivo da applicare alla resistenza unitaria a taglio. La resistenza complessiva in ciascuna direzione è ottenuta moltiplicando l'area di muratura per la resistenza unitaria a taglio corretta.

5 VULNERABILITA' SISMICA E RISCHIO DI COLLASSO

Per valutare la vulnerabilità in termini di accelerazione, occorre ancora determinare il taglio prodotto ai vari piani da un dato valore di accelerazione spettrale e confrontarlo con le resistenze di piano. A tale scopo si utilizza il metodo dell'analisi statica equivalente, nella formulazione prevista dall'Ordinanza 3274/2003, che definisce i coefficienti di piano da applicare alle accelerazioni, in relazione ad una prefissata forma semplificata (lineare) del primo modo della struttura. Definiti i coefficienti di piano e fissato un valore unitario dell'accelerazione spettrale, è immediato ottenere i tagli ai vari piani e confrontarli con i valori resistenti ottenuti ai piani corrispondenti. I diversi rapporti così ottenuti permettono di individuare il piano più debole e di definire la resistenza dell'edificio in termini di accelerazione spettrale.

Per definire l'intensità del sisma cui la struttura può resistere senza collassare si deve trasformare il valore spettrale dell'accelerazione in valore dell'accelerazione massima del terreno

(PGA). Tenendo conto che il valore di accelerazione spettrale calcolato è un valore di tipo statico lineare, la relazione che lega S_a e PGA è la seguente:

$$S_a = \text{PGA} * \alpha_{PM} * \alpha_{AD} * \alpha_{DT} * (1/\alpha_{DUT})$$

dove:

- α_{PM} è un coefficiente riduttivo funzione della partecipazione modale del modo fondamentale, che viene assunto pari a 0.8;
- α_{AD} è l'amplificazione spettrale che, per i periodi fondamentali tipici degli edifici in esame, è dell'ordine di 2.5;
- α_{DT} è il coefficiente che tiene conto delle capacità dissipative dell'edificio. Per gli edifici in c.a. esso viene posto pari a 1 oppure a 0.8, rispettivamente nel caso in cui il contributo degli elementi non strutturali venga o non venga direttamente messo in conto nella resistenza della struttura. Per gli edifici in muratura esso viene sempre posto pari a 0.8.
- α_{DUT} è del tutto equivalente al fattore di struttura che riduce l'entità dell'azione in funzione della duttilità strutturale. Per gli edifici in c.a. tale duttilità, seppur limitata, anche in considerazione delle frequenti irregolarità di forma, permette di assumere un valore prudenziale di α_{DUT} pari a 2. Per gli edifici in muratura si assume un valore unitario, anche in relazione all'aver comunque assunto nel modello il pieno sfruttamento di tutti gli elementi resistenti.

La valutazione della vulnerabilità in termini di accelerazione al suolo consente di definire il rischio di collasso, mediante il periodo di ritorno del terremoto corrispondente all'accelerazione di picco trovata, nel sito.

Con riferimento alle mappe della pericolosità sismica italiana riportate in (Lucantoni et al. 2001), si possono ottenere, per interpolazione o estrapolazione, i periodi di ritorno corrispondenti alle accelerazioni a terra ottenute, secondo le due ipotesi di curve di attenuazione assunte.

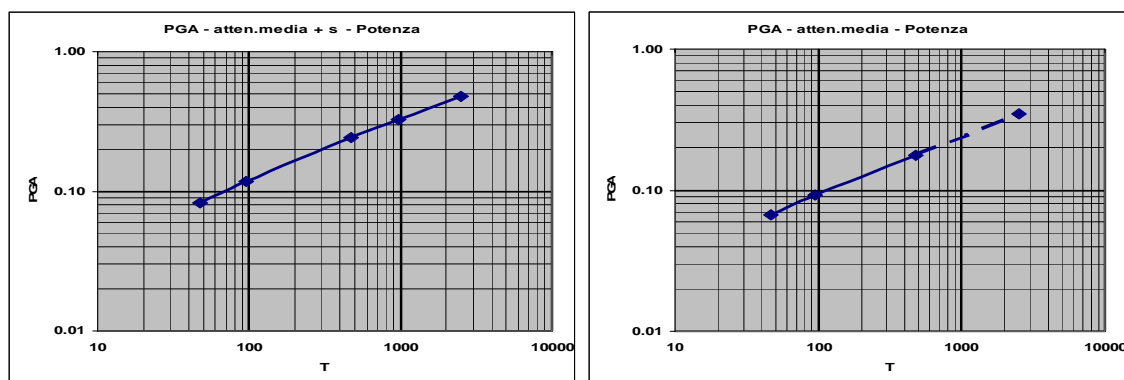


Fig. 1 – Periodo di ritorno delle intensità in PGA per le due relazioni di attenuazione per il territorio comunale di Potenza.

Nella figura 1 sono riportati, a titolo di esempio, i diagrammi che hanno in ascissa il periodo di ritorno e in ordinata l'accelerazione a terra per le due diverse relazioni di attenuazione adottate nello studio del SSN: attenuazione media e attenuazione media più una deviazione standard. Nel secondo diagramma, relativo all'attenuazione media, è riportata in tratteggio la curva estrapolata linearmente dalla relazione tra i logaritmi del periodo e della PGA, dall'intervallo in cui è disponibile il dato del SSN.

La determinazione del rischio è, ovviamente, condizionata dall'impossibilità di tener conto, in questa prima fase, di possibili effetti di amplificazione locale. Con i limiti detti, tuttavia, l'applicazione di una stessa procedura quantitativa di valutazione della vulnerabilità e del rischio permette di raffrontare in maniera diretta le condizioni dei diversi edifici e di evidenziare situazioni assolutamente precarie. Sulla base di tali indicazioni è stato possibile adottare i provvedimenti più urgenti e stabilire le priorità nella esecuzione delle indagini di seconda fase.

6 ALTRI ELEMENTI DI GIUDIZIO DELLA VULNERABILITÀ E DEL RISCHIO

I risultati scaturiti dalle analisi quantitative definite nel paragrafo precedente vanno riferiti al contesto generale dell'intera indagine ed ai relativi limiti, legati alla semplificazione del modello

matematico ed all'incompletezza delle informazioni sulla geometria della struttura e sulle resistenze dei materiali. È opportuno precisare, inoltre, che il modello matematico adottato non tiene conto di eventuali effetti torsionali, conseguenti ad una sfavorevole distribuzione in pianta degli elementi resistenti, e produce una valutazione della vulnerabilità al collasso strutturale d'insieme, ma non tratta la vulnerabilità delle parti non strutturali. In particolare non viene valutato il pericolo di crollo di elementi di tamponatura e tramezzatura, nonché di eventuali appendici a mensola (camini, cornicioni, etc.), spesso caratterizzate da fragilità e bassa resistenza, che possono determinare condizioni di pericolo per le persone.

A completamento delle valutazioni quantitative dette, si è ritenuto necessario effettuare un'analisi qualitativa di alcuni aspetti che possono incidere sia sulla vulnerabilità d'insieme, sia sulla vulnerabilità delle parti non strutturali, così da fornire un quadro di giudizio più completo. Essi riguardano la qualità strutturale globale, la rispondenza del modello all'effettivo comportamento sismico dell'edificio, la completezza delle informazioni utilizzate, l'eventuale pericolosità delle parti non strutturali. Si sono, pertanto, individuate quattro categorie di informazioni che, in vario modo, possono influenzare la vulnerabilità complessiva dell'opera e modificare la valutazione quantitativa fornita dal calcolo.

6.1 *Fattori che influiscono sulla qualità strutturale globale*

Comprendono alcune caratteristiche della costruzione ed indicatori più o meno diretti della qualità costruttiva, dello stato di conservazione, nonché altri elementi che possono influenzare negativamente il comportamento della costruzione, come ad esempio l'età di costruzione, lo stato di degrado, il danno preesistente (quadro fessurativo), l'eventuale diversa destinazione d'uso originaria, le tensioni nei pilastri degli edifici in c.a., i giunti strutturali insufficienti, i cedimenti fondazionali, i solai con caratteristiche inadeguate alla luce e all'utilizzo (aule, palestre, ecc.) e/o con evidenti inflessioni o lesioni, la scarsa qualità della muratura (di pietrame a sacco o in laterizio forato).

6.2 *Fattori che influiscono sull'adeguatezza del modello di calcolo*

Comprendono caratteristiche morfologiche della costruzione che possono influenzare negativamente il comportamento della costruzione, rispetto a quanto ipotizzato nel modello di calcolo, come ad esempio: l'irregolarità di forma in pianta (pianta non compatta, non simmetrica), l'irregolarità di rigidezza e/o resistenza in pianta (distribuzione disuniforme in pianta delle tamponature, presenza di nuclei ascensori o setti strutturali in c.a. in posizione eccentrica), l'irregolarità di forma in elevazione (rastremazioni in elevazione), l'irregolarità di rigidezza e/o resistenza in elevazione (distribuzione disuniforme in elevazione delle tamponature – piano soffice, brusca interruzione di elementi strutturali con riduzione verso il basso, rastremazione dei pilastri), la presenza di tamponature con finestrate a nastro o tali da determinare "pilastri corti" (solo per le strutture in c.a.), la disposizione irregolare delle aperture e la presenza di piccole aperture e nicchie nelle strutture murarie che possono influenzare il comportamento sismico (solo per le murature), la presenza di spinte statiche (tetti, volte, archi, terreno, ecc.), la presenza negli edifici in muratura di pareti intersecate da pareti trasversali ad interasse elevato, l'elevata snellezza dell'edificio e delle sue strutture verticali.

6.3 *Qualità delle informazioni e assunzioni fatte*

Comprende indicazioni sulla qualità delle informazioni e sul grado di conoscenza acquisito attraverso i sopralluoghi, saggi e documentazione disponibile, come ad esempio: la disponibilità del progetto o del rilievo architettonico, del progetto strutturale o di altri elaborati di carpenteria, il numero di saggi effettuati sugli elementi strutturali (per individuazione delle armature e verifica delle dimensioni o per determinazione delle caratteristiche delle murature e dell'apparecchio murario) e su quelli non strutturali.

6.4 *Vulnerabilità delle parti non strutturali*

Comprende informazioni sulle caratteristiche delle parti non strutturali maggiormente soggette a danni, anche per terremoti di bassa intensità e a cadute pericolose di elementi pesanti, come ad

esempio la presenza di: interpiani superiori ai 3.5 m senza cordoli rompitratta intermedi o altri provvedimenti atti a ridurre il rischio di ribaltamento di tamponature e tramezzi, tamponature esterne alla maglia strutturale e/o su sbalzi, rivestimenti pesanti in cattivo stato di manutenzione, controsoffittature pesanti, cornicioni in muratura, camini, sbalzi di grande luce.

7 SINTESI DEI RISULTATI

Nella tabella 1 sono riportati i dati statistici di sintesi relativi alle caratteristiche generali del campione ed alle valutazioni effettuate mediante il modello semplificato. Complessivamente si rileva come gli edifici in c.a., di gran lunga i più numerosi, hanno un volume medio ed un numero medio di piani maggiore degli edifici in muratura. La variabilità delle volumetrie e del numero di piani è notevole, come evidenziato sia dai valori estremi che dai coefficienti di variazione trovati, a conferma di un campione molto variegato, pur se relativo unicamente a scuole medie superiori. Per quanto riguarda la vulnerabilità, si riscontra la notevole variabilità della resistenza sismica degli edifici scolastici, più marcata per gli edifici in c.a., per i quali il rapporto tra il massimo e il minimo valore è di circa 6 e il coefficiente di variazione è superiore al 40%, mentre per la muratura il rapporto massimo/minimo è di poco più di 3 e il coefficiente di variazione inferiore al 40%. Complessivamente le resistenze medie, espresse in PGA, delle due tipologie strutturali sono molto vicine, con una media complessiva pari a 0.187g. A proposito di quest'ultimo valore, è opportuno ricordare che il valore della resistenza sismica fornito non equivale a quello calcolato a norma di regolamento sismico, che risulterà in generale più basso, a parità di ipotesi sui materiali. Infatti nella definizione delle resistenze dei materiali non si è adottato alcun coefficiente di sicurezza, ed anzi si sono assunti direttamente valori medi o nominali. Inoltre, nel caso delle strutture in c.a., si mettono in conto, direttamente o indirettamente, anche i contributi positivi che gli elementi non strutturali possono offrire, contributi che non possono essere portati in conto in una valutazione della sicurezza secondo normativa.

Tab. 1 – Dati statistici di sintesi del campione esaminato

Volume	N. edifici	Media	Massimo	Minimo	Scarto q.m.	Coeff.Var.%
c.a.	60	5342	23400	450	4235	79
Muratura	13	3871	7629	459	2394	62
N. Piani						
c.a.	60	3.1	8.0	1.0	1.7	57
Muratura	13	2.4	4.0	1.0	1.2	50
PGAmin						
c.a.	60	0.189	0.424	0.074	0.081	43
Muratura	13	0.180	0.313	0.096	0.067	37
Tutto	73	0.187	0.424	0.074	0.078	42

Nelle figure 2 e 4 sono diagrammati i valori minimo e massimo delle accelerazioni di collasso PGA di ciascun edificio, rispettivamente in c.a. e in muratura, valutati confrontando i valori ottenuti a tutti i piani e nelle due direzioni. Salvo che in pochi casi, si evidenzia l'elevata disomogeneità delle resistenze, fattore questo che implica la concentrazione del danneggiamento e che avvalorava l'ipotesi alla base del modello utilizzato, che il meccanismo di collasso coinvolge un solo piano. Tipicamente la resistenza minima è inferiore alla metà della massima, con situazioni estreme, nelle quali il rapporto massimo/minimo supera 5, sia nel c.a. che nella muratura.

Le figure 3 e 5 mostrano invece le resistenze minime riscontrate nelle direzioni X e Y, indipendentemente dai piani in cui sono state rilevate, rispettivamente per gli edifici in c.a. e in muratura. Le resistenze nelle due direzioni differiscono mediamente del 10% negli edifici in c.a. e di circa il 30% in quelli in muratura, con rapporti massimi dell'ordine di 2.5 per i primi e fino a quasi 5 per i secondi. Notevoli differenze sono attribuibili per il c.a., alla presenza di telai in una sola direzione, per la muratura, alla distribuzione irregolare delle finestre, presenti sistematicamente di più sulle facciate su cui prospettano le aule.

Nella figura 6 sono riportati i periodi di ritorno del terremoto di collasso, valutati sulla base della vulnerabilità sismica e della pericolosità, come illustrato in precedenza, ovviamente senza tener conto di possibili effetti di amplificazione locale. Si evince che ben 5 edifici hanno periodo di ritorno del terremoto di collasso inferiore ai 100 anni, 16 inferiore ai 200 anni, mentre 24

hanno periodo di ritorno del terremoto di collasso superiore ai 500 anni e 6, di cui quattro in muratura, hanno periodo di ritorno dell'ordine dei 2500 anni o superiore.

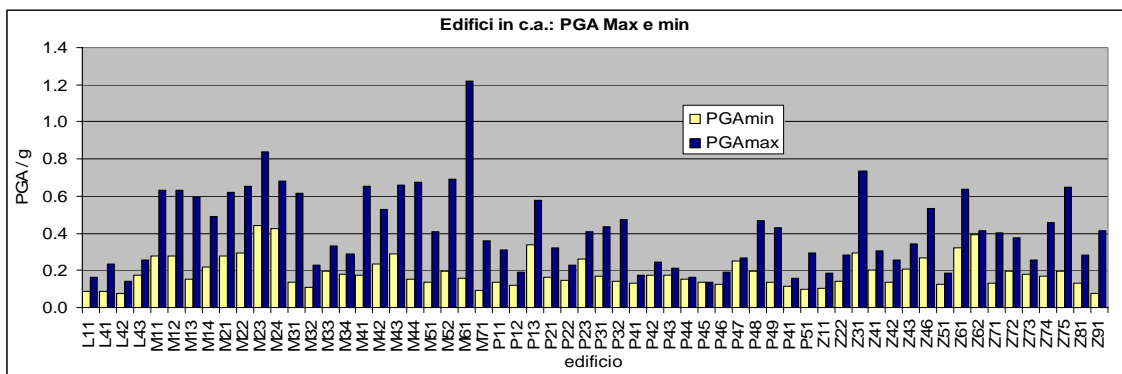


Figura 2 – Edifici in c.a.: Resistenze massime e minime tra i vari piani e in X e Y, in PGA.

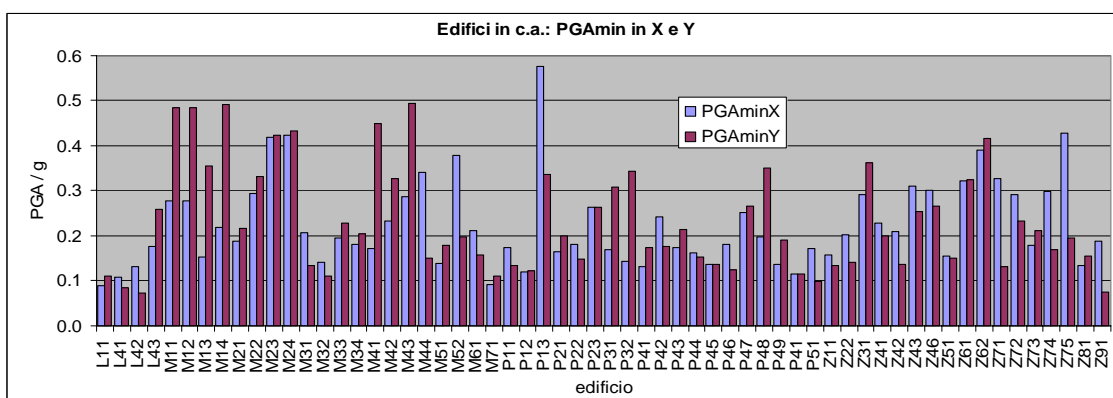


Figura 3 – Edifici in c.a.: Resistenze minime in PGA nelle direzioni X e Y.

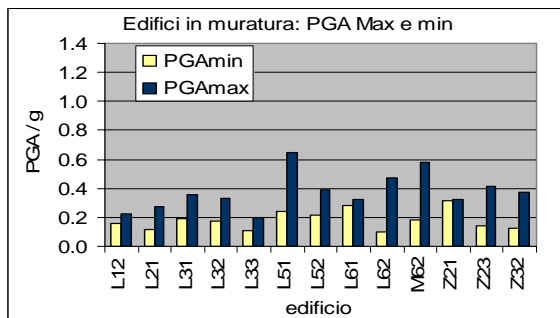


Figura 4 – Edifici in Muratura: Resistenze massime e minime tra i vari piani e in X e Y, in PGA.

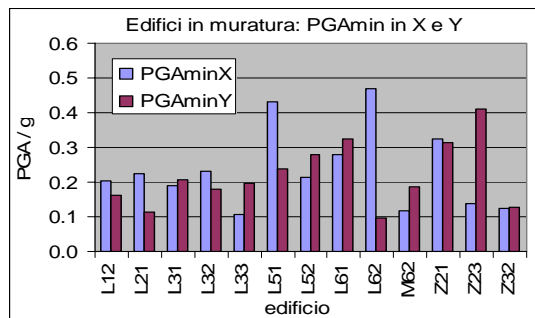


Figura 5 – Edifici in Muratura: Resistenze minime in PGA nelle direzioni X e Y.

Avendo ribadito più volte i limiti del presente studio, determinati, per quanto riguarda la vulnerabilità, dalla mancanza di dati sperimentali e dalle approssimazioni del modello, e, per quanto riguarda il rischio, dal trascurare possibili effetti di amplificazione locale, emergono comunque importanti indicazioni sullo stato del patrimonio edilizio scolastico della provincia e delle singole scuole, che possono correttamente indirizzare le prime azioni da intraprendere, fermo restando che allo stato attuale appare improponibile, per motivi economici, il conseguimento della sicurezza a norma di tutti gli edifici scolastici in tempi brevi.

Nelle tabelle consegnate alla Provincia, infatti, per ogni edificio sono stati riportati anche i giudizi sintetici qualitativi sugli altri fattori di vulnerabilità e rischio presi in esame in precedenza, completando così il quadro di giudizio che, entro i limiti della presente indagine, ha permesso di prendere le prime decisioni sulle azioni da intraprendere in tempi brevi (approfon-

dimento delle indagini, dismissione dell'immobile, adeguamento sismico, etc.).

Mediante i giudizi qualitativi sugli edifici che hanno resistenza sismica nominale più elevata sono migliori, anche se non poche sono le situazioni in cui la qualità strutturale globale e/o la qualità della modellazione e/o la vulnerabilità delle parti non strutturali appaiono inadeguate, necessitando approfondimenti e, successivamente, eventuali interventi.

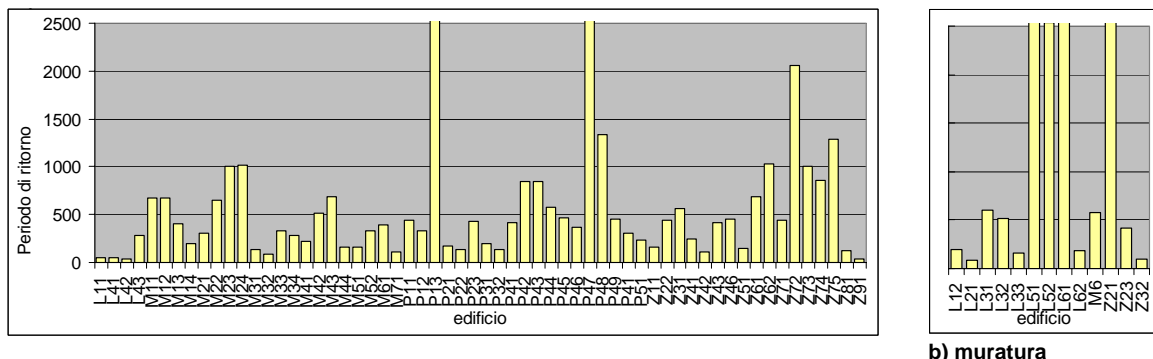


Figura 6 – Periodo di ritorno del terremoto di collasso degli edifici a) in c.a., b) in muratura.

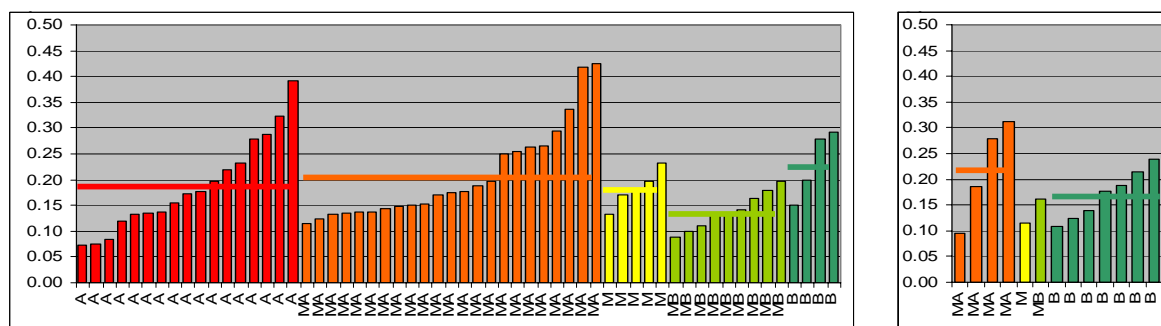


Figura 7 – Confronto con i giudizi di vulnerabilità LSU.

Infine, in figura 7 è riportato un confronto con l'indagine condotta in ambito LSU dalla Protezione Civile nel 1996. Gli edifici sono ordinati in ascissa per vulnerabilità LSU decrescente, a partire dalla vulnerabilità alta (A) alla vulnerabilità bassa (B), secondo le 5 fasce di vulnerabilità sismica individuate in (Cherubini et al., 1999). In ordinata sono riportate le intensità di collasso espresse in PGA. Per ogni fascia di vulnerabilità è riportato anche il valor medio di PGA. Si può notare la notevole discrepanza di risultati tra le due metodologie, in parte dovuta al miglior livello di definizione della struttura, in parte all'approccio totalmente diverso alla valutazione della vulnerabilità sismica, particolarmente per gli edifici in c.a.. Per questi ultimi, infatti, l'indagine LSU basava la sua valutazione su pochissimi parametri qualitativi, tratti dalla scheda GNDT di 1° livello, e sull'età dell'edificio.

8 CONCLUSIONI

Il quadro generale sullo stato di vulnerabilità e del rischio sismico del campione di scuole della provincia di Potenza, campione che comprendeva le scuole medie superiori costruite o progettate prima del 1980, e perciò senza criteri antisismici, è alquanto articolato, e richiede un'attenzione specifica per ciascun edificio scolastico esaminato. I dettagli delle indagini svolte su ciascun edificio sono stati raccolti negli elaborati relativi al singolo plesso scolastico (relazione, scheda rilievo, scheda progetto, archivio fotografico ipertestuale), che vanno a costituire ciò che è possibile definire "carta d'identità" dell'edificio, aggiornabile nel tempo.

Le valutazioni quantitative di vulnerabilità e rischio sismico, pur nei limiti legati alle approssimazioni del modello semplificato e dei parametri di calcolo adottati, in assenza di indagini sperimentali, forniscono un quadro molto variegato, risultando sia la resistenza sismica che il

periodo di ritorno del terremoto di collasso compresi in intervalli molto ampi. Ciò conferma, se necessario, l'esigenza di adottare procedure di valutazione della vulnerabilità accurate e che tengano conto delle caratteristiche peculiari della singola struttura. L'ampia variabilità dei risultati ha fatto emergere situazioni per le quali il solo dato numerico, unito alle valutazioni qualitative sui parametri non messi in conto dal modello, ha suggerito all'ente gestore azioni nel breve periodo, quali l'immediata dismissione di alcuni edifici scolastici, per lo più di proprietà privata, o l'immediato avvio degli approfondimenti, particolarmente per le situazioni per le quali le valutazioni numeriche hanno fornito risultati confortanti, ma in contrasto con quelle qualitative.

Per assumere decisioni definitive sulle azioni da intraprendere è, nella maggioranza dei casi, indispensabile un miglioramento della stima della vulnerabilità e del rischio, ottenibili, da un lato migliorando la conoscenza della geometria generale, dei dettagli e delle caratteristiche dei materiali, particolarmente del calcestruzzo, attraverso prove in situ e di laboratorio, dall'altro migliorando il modello di valutazione ed effettuando misurazioni di microtremiti in grado di fornire almeno una prima indicazione sui possibili effetti di amplificazione locale.

Nel frattempo, sono in corso di perfezionamento numerosi miglioramenti ed estensioni al modello di valutazione della vulnerabilità, finalizzati a mettere direttamente in conto quelle caratteristiche qualitative (regolarità, etc.) o anche quantitative che possono influenzare i meccanismi di collasso (ad esempio la rottura anticipata per taglio nei pilastri) e la duttilità globale della struttura, a valutare con maggior precisione la resistenza sismica, mettendo in conto la forma spettrale anche in relazione alle caratteristiche dei terreni, a ottenere un quadro più completo della vulnerabilità, con riferimento a condizioni di inizio danneggiamento.

Più ampio e complesso è l'insieme di questioni aperte di carattere etico e strategico che l'osservazione dei risultati di un campione significativo di edifici scolastici, quale quello della Provincia di Potenza pone. Ferma restando l'impossibilità di risolvere istantaneamente l'inadeguatezza della grandissima parte del patrimonio edilizio scolastico (ma più in generale di quello pubblico), quali sono i livelli di accettabilità di tale condizione e per quanto tempo?

9 RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato realizzato con il contributo finanziario della Provincia di Potenza nell'ambito della convenzione per lo "Studio della Vulnerabilità del patrimonio scolastico della Provincia di Potenza". Gli studi metodologici, le analisi statistiche e di confronto riportati in questo lavoro sono stati svolti nell'ambito delle attività del progetto SAVE del GNDT.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Dolce, M. (coordinatore), 2003. *Rapporto Finale della Convenzione "Studio della Vulnerabilità sismica delle scuole della Provincia di Potenza – I Fase"*, Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all'ingegneria, Università di Basilicata, Potenza.
- CEN, 2003. Eurocode 8: Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Strengthening and repair of buildings. Doc. CEN/TC250/SC8/N343, DRAFT No 4.
- Ordinanza del PCM N.3274, 2003. "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica".
- Cherubini A., Corazza L., Di Pasquale G., Dolce M., Martinelli A., Petrini V., 1999. *Censimento di vulnerabilità degli edifici pubblici, strategici e speciali nelle regioni Abruzzo, Basilicata, Calabria, Campania, Molise, Puglia e Sicilia – Cap. 4: Risultati del Progetto*. Dipartimento della Protezione Civile, Roma.
- Lucantoni A., Bosi V., Bramerini F., De Marco R., Lo Presti T., Naso G., Sabetta F., 2001. *Il Rischio Sismico in Italia*. Ingegneria Sismica 1/2001, Patron Editore, Bologna.
- Dolce M., Vulnerability Evaluation and Damage Scenarios. Atti del US-Italian Workshop on Seismic Evaluation and Retrofit, Dicembre 1996, New York City.
- Braga F., Dolce M., Liberatore D., 1982. Southern Italy November 23, 1980 Earthquake: A Statistical Study on Damaged Buildings and an Ensuing Review of the M.S.K.-76 Scale. Pubblicazione CNR-PFG n.503, Roma.
- Benedetti D., Petrini V., 1984. Sulla vulnerabilità sismica degli edifici in muratura: un metodo di valutazione, L'Industria delle Costruzioni, n. 149, Roma.

- Turnsek V., Cacovic F., 1970. Some Experimental Results on the Strength of Brick Masonry Walls. 2nd International Brick Masonry Conference, Stock on Trent.
- Dolce M., 1991. Schematizzazione e modellazione degli edifici in muratura soggetti ad azioni sismiche. L'Industria delle Costruzioni, Roma.