



# Valutazioni sismiche di edifici scolastici in c.a.: analisi tipologiche e di vulnerabilità

Andrea Digrisolo<sup>a</sup>, Angelo Masi<sup>a</sup>, Vincenzo Manfredi<sup>a</sup>, Giuseppe Santarsiero<sup>a</sup>, Giuseppe Ventura<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Scuola di Ingegneria, Università della Basilicata, Potenza, Italia

*Keywords: vulnerabilità edifici scolastici; rischio sismico; edifici in c.a.; valutazione sicurezza; tipologie strutturali*

## ABSTRACT

Come più volte dimostrato dagli eventi sismici avvenuti nel passato sul territorio italiano, gli edifici esistenti possono risultare particolarmente vulnerabili subendo danni anche molto gravi fino al collasso totale. Non rimangono esclusi neppure gli edifici strategici (come gli ospedali) e quelli a rischio rilevante (come le scuole) che spesso sono risultati inutilizzabili ed in qualche caso hanno causato la perdita di vite umane come accadde, ad esempio, per la scuola di S. Giuliano di Puglia durante il sisma del Molise 2002. La campagna di verifiche tecniche che, a livello nazionale, venne avviata a seguito di quell'evento ha fornito una base di conoscenza molto ampia ed accurata sugli edifici strategici e rilevanti. In particolare, a partire dal 2003, nella regione Basilicata sono stati attuati programmi di verifiche sugli edifici pubblici progettati prima della classificazione sismica, tra cui circa 600 edifici scolastici. In questo lavoro, oltre a descrivere brevemente il database di edifici in esame (DB-ES-BAS), verrà analizzato, con particolare riferimento agli edifici con struttura in c.a., il legame tra capacità sismica ed una serie di parametri tipologici e meccanici (es. proprietà dei materiali) al fine di individuare quelli maggiormente influenti. Inoltre, vengono individuate le tipologie strutturali maggiormente rappresentative del database, che potrebbero costituire utile riferimento nella messa a punto di curve di fragilità sia relative allo stato di fatto che a seguito della realizzazione di interventi di rafforzamento.

## 1 INTRODUZIONE

Il terremoto del 31 ottobre del 2002 che determinò il crollo della Scuola Jovine di San Giuliano di Puglia provocando la morte di 27 bambini e una maestra, portò tristemente in evidenza l'elevata vulnerabilità sismica di molte scuole italiane.

Anche in altre parti del mondo si sono registrati terremoti che hanno provocato gravi danni e crolli agli edifici scolastici, con conseguenze disastrose per gli studenti qualora l'evento si verificava durante le ore di attività scolastica. Questo ha fatto sì che nel 2004 l'organizzazione per la Cooperazione e lo Sviluppo Economico organizzò un "Ad Hoc Experts' Group Meeting on Earthquake Safety in Schools" a Parigi da cui scaturirono le Raccomandazioni adottate dal Consiglio della stessa organizzazione (OECD 2005). In tale documento si raccomanda agli stati membri di fare i passi necessari per stabilire e implementare programmi per la sicurezza delle scuole e a quelli

non membri di tenere conto di tali raccomandazioni.

In Italia, la drammatica esperienza di S. Giuliano di Puglia ha determinato un forte impulso all'aggiornamento e sviluppo della normativa per le costruzioni in zona sismica, avviando un processo di progressivo recupero del ritardo accumulato sia nei contenuti delle norme che dei criteri di classificazione sismica fino a quel momento adottati, rispetto al livello raggiunto di conoscenze tecnico-scientifiche.

A livello nazionale, il Dipartimento della Protezione Civile (DPC) ha stimato in circa 75000 gli edifici pubblici privi di protezione sismica, dei quali circa 35000 ubicati in zone ad alta e media pericolosità sismica. In Basilicata, considerando i soli edifici ospedalieri e scolastici, il numero di strutture non progettate con criteri antisismici è pari a circa 1000.

La prima rilevante novità nell'ambito delle norme per la prevenzione sismica fu rappresentata dall'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003, n. 3274

(OPCM 3274/2003), in cui, oltre all'introduzione di molteplici novità tecniche riguardanti la progettazione di nuovi edifici e la verifica di edifici esistenti in zona sismica, insieme a nuovi criteri di classificazione sismica, furono previsti nuovi impegni per i proprietari, pubblici o privati, di edifici di importanza strategica o rilevanti in relazione ad un loro eventuale collasso. In particolare, per tali edifici, fu introdotto l'obbligo di procedere alla valutazione della sicurezza sismica a meno dei casi in cui la progettazione fosse stata effettuata con le norme sismiche vigenti successivamente al 1984 e considerando azioni coerenti con la nuova classificazione sismica (ossia I, II e III categoria rispettivamente per le zone sismiche 1, 2 e 3 previste dalla OPCM 3274/2003). In questo modo si ammetteva il deficit di sicurezza sismica di molti edifici, tra cui quelli scolastici, costruiti senza criteri antisismici o con criteri non adeguati, a causa del lento progredire delle conoscenze della sismologia e dell'ingegneria sismica e dei ritardi di recepimento da parte degli strumenti normativi.

Oltre all'OPCM 3274/2003, altre iniziative furono intraprese a valle del terremoto del Molise al fine di aumentare il grado di sicurezza delle infrastrutture e delle strutture strategiche, tra cui l'attivazione del Piano di messa in sicurezza degli edifici scolastici, ai sensi dell'art. 80, comma 21, della legge n. 289 del 2002 (finanziaria 2003), incluso nel programma delle infrastrutture strategiche previsto dalla legge obiettivo n. 443/2001. In tale ambito furono stabilite misure di carattere generale finalizzate alla messa in sicurezza degli edifici scolastici, con particolare riguardo a quelli collocati in zona sismica.

Negli oltre dieci anni trascorsi dal tragico evento di San Giuliano di Puglia, le Regioni hanno messo in atto programmi per la verifica di edifici pubblici, in particolare delle scuole, che hanno reso disponibile una consistente base di dati, seppure in parte incompleta, essenziale per una efficace programmazione dei successivi interventi di messa in sicurezza. Tuttavia, in questi stessi anni altri eventi sismici, come quelli dell'Abruzzo nel 2009, dell'Emilia nel 2012 e del Centro Italia nel 2016 (Di Ludovico et al. 2012; Di Ludovico et al. 2018), hanno riconfermato il problema della vulnerabilità sismica del patrimonio edilizio scolastico. Fortunatamente, poiché le scosse principali di questi eventi si sono verificate durante le ore notturne (o come successe per la prima forte scossa del 2016 nel periodo di chiusura estiva), non si sono avute conseguenze tragiche sugli utenti, ma si sono determinate importanti ripercussioni sulla possibilità di garantire il normale utilizzo degli

edifici scolastici. Il Dipartimento della Protezione Civile, con i suoi centri di competenza, è stato fortemente impegnato per limitare le conseguenze sociali di tali eventi operando in modo tempestivo a seguito dei terremoti dell'Abruzzo del 2009, dell'Emilia del 2012 e del Centro Italia del 2016 (Di Ludovico et al. 2017; Di Ludovico et al. 2018).

La questione della sicurezza scolastica va vista nella sua complessità rispetto alle diverse fasi che caratterizzano il ciclo della gestione del rischio. Particolare attenzione va posta nella fase pre-evento, nella quale il massimo sforzo deve essere fatto per mettere in atto politiche di prevenzione strutturale, ottimizzate rispetto all'entità del rischio sismico dei singoli edifici scolastici e alle limitate risorse finanziarie disponibili. Nella fase post-evento, invece, è importante intraprendere tutte quelle azioni che possano portare ad un rapido ritorno alla normalità, che significa anche ripresa immediata o quantomeno tempestiva dell'attività scolastica. Proprio con queste finalità, nell'ambito del progetto ReLUIS 2019-21 (WP 4: MAPpe di Rischio e Scenari di danno sismico (MARS)), i dati a disposizione, derivanti da precedenti valutazioni della vulnerabilità sismica, possono costituire una significativa base di partenza per la calibrazione di modelli analitici di vulnerabilità da utilizzare per valutazioni di rischio su larga scala. Tali dati, inoltre, possono consentire di individuare le tipologie strutturali maggiormente rappresentative del patrimonio edilizio scolastico, almeno su base regionale, cui applicare i modelli analitici o definire opportuni casi studio.

## 2 L'ESPERIENZA DELLA REGIONE BASILICATA NELLA VERIFICA SISMICA DELLE SCUOLE

Gli effetti delle azioni normative di prevenzione sismica, conseguenti al terremoto del Molise del 2002, hanno determinato in Basilicata la messa a punto di tre programmi di verifiche svolti per valutare la sicurezza delle scuole della regione, ossia:

- Valutazioni di vulnerabilità sulle scuole della Provincia di Potenza, svolte essenzialmente nel 2003;
- 1° e 2° Programma Temporale delle Verifiche sulle scuole della regione Basilicata ai sensi delle OPCM 3274 e 3362, svolte tra il 2005 e il 2007.

## *2.1 Valutazioni di vulnerabilità sulle scuole della Provincia di Potenza: annualità 2003*

Nei giorni immediatamente successivi al crollo della scuola di San Giuliano di Puglia, l'Amministrazione Provinciale di Potenza fu tra le prime in Italia ad affrontare in modo diretto il problema della sicurezza strutturale delle scuole di propria competenza. Per avere un quadro completo e in tempi brevi del livello di rischio sismico di tali edifici, affidò al Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata (DiSGG) dell'Università della Basilicata uno studio sulla vulnerabilità sismica degli edifici scolastici di proprietà o in locazione.

Lo studio svolto dal DiSGG (Dolce et al. 2004) era articolato in tre fasi nelle quali si operava a livelli di dettaglio crescenti con l'obiettivo di effettuare valutazioni di vulnerabilità degli edifici scolastici progettati senza criteri antisismici. Nella prima fase la valutazione era basata sui dati tecnici disponibili presso uffici regionali, provinciali e comunali, su un rilievo delle principali caratteristiche strutturali, sull'esame della storia sismica e su un modello di calcolo la cui complessità era commisurata al livello di conoscenza della struttura reale. La seconda fase prevedeva un 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 accurato, oltre che 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, venivano definite 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. Vennero studiati complessivamente circa 80 edifici scolastici utilizzando una metodologia semplificata per la valutazione della vulnerabilità sismica appositamente messa a punto, denominata "VC" per le strutture in c.a., e "VM" per le strutture in muratura (Dolce e Moroni 2005).

I risultati della prima fase di questo studio permisero di intraprendere azioni di breve termine come la dismissione di edifici (perlopiù di proprietà privata) che mostravano evidenti carenze strutturali, oppure di indirizzare

approfondimenti attraverso successive fasi di studio previste nella stessa convenzione.

## *2.3 Valutazioni di vulnerabilità sulle scuole della regione Basilicata: annualità 2005-2007*

L'art. 2 dell'OPCM 3274/2003 poneva l'obbligo, ai rispettivi proprietari, di effettuare le verifiche tecniche del patrimonio edilizio strategico (es. ospedali) e rilevante (es. scuole) entro 5 anni dalla emanazione della stessa. Inoltre, l'Ordinanza imponeva alle Regioni ed allo Stato, nell'ambito delle specifiche competenze, di individuare gli edifici da sottoporre a verifica ed elaborare un programma temporale delle stesse.

In attuazione di tali disposizioni il DPC, con il D.P.C.M. 21/10/2003, indicò le modalità con cui effettuare le verifiche per diversi livelli di approfondimento.

Al livello più basso (livello 0) era prevista l'acquisizione di dati generali, quali la denominazione dell'opera, l'utilizzatore, i dati dimensionali, l'anno di progettazione e ultimazione, materiale e tipologia strutturale, dati di esposizione e dati geomorfologici, nonché accelerazioni al suolo attese con probabilità 10% e 50% in 50 anni. Ai livelli successivi (livelli 1 e 2) veniva richiesta una conoscenza più approfondita dell'edificio mediante sopralluoghi e rilievi della struttura, al fine di definire i tre livelli di accelerazione al suolo corrispondenti ai tre stati limite (SL) previsti dalle norme tecniche dell'epoca, ossia SL di danno limitato, SL di danno severo e SL di collasso.

Nell'ambito del quadro normativo nazionale, la Regione Basilicata emanò la Delibera di Giunta Regionale n. 622/2005 sul "1° Programma Temporale delle Verifiche del patrimonio edilizio strategico e rilevante, ai sensi della OPCM 3362/2004". Tale Programma era basato sull'elenco delle strutture strategiche e rilevanti (ospedali e scuole) site nella regione Basilicata. A corredo del 1° Programma furono redatte le "Linee guida per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici strategici e rilevanti" (Dolce et al. 2005) che fornivano ai tecnici impegnati nelle verifiche gli strumenti per poter operare in modo il più possibile uniforme, al fine di ottimizzare risorse a disposizione ed individuare una lista delle priorità per i successivi interventi di adeguamento/miglioramento sismico.

In prosecuzione del lavoro svolto nell'ambito del 1° Programma, la Regione Basilicata con DGR 697 del 14/05/2007 approvò il "2° Programma Temporale delle Verifiche del patrimonio edilizio strategico e rilevante", che

riguardava soltanto edifici scolastici. Nell'ambito del 2° Programma furono eseguite le verifiche di circa 400 corpi di fabbrica, prevalentemente di competenza delle amministrazioni comunali, trattandosi di scuole dell'infanzia, primarie e secondarie.

In definitiva, con il 1° e 2° Programma temporale, sono state effettuate verifiche su un totale di quasi 600 edifici scolastici progettati prevalentemente prima del 1981, che rappresentano la quasi totalità del patrimonio edilizio scolastico progettato e realizzato senza criteri antisismici presente in Basilicata.

### 3 DESCRIZIONE DEL DATABASE

In questa parte del lavoro vengono analizzate le caratteristiche degli edifici scolastici sottoposti a verifica sismica durante il 1° e 2° Programma temporale (descritto al paragrafo precedente), il quale include anche le scuole di competenza provinciale. I dati provengono dalle informazioni sintetizzate per ogni singolo edificio attraverso la "Scheda di sintesi per verifica sismica di livello 1 o di livello 2 per gli edifici strategici ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico", redatta dal DPC. Tale scheda contiene la sintesi di una serie di informazioni sia di carattere generale, come la geometria, il livello di conoscenza, le caratteristiche dei materiali, le informazioni sul terreno di fondazione, sia i risultati delle analisi numeriche effettuate. I dati raccolti per ogni edificio sono stati accuratamente archiviati in un importante database denominato: DataBase edifici ESistenti della regione BASilicata (DB-ES-BAS) che rappresenta una preziosa fonte di informazione sulle scuole della regione.

Il campione complessivo è formato da 549 edifici scolastici, di questi 357 presentano una struttura in c.a., 172 presentano una struttura in muratura o mista, i restanti 20 sono in c.a.p. o acciaio (Figura 1).

Focalizzando l'attenzione solo sugli edifici in c.a., essi sono divisi in scuole materne, elementari, medie, superiori ed istituti comprensivi, secondo la distribuzione riportata in Figura 2.

Parametro fortemente legato alla vulnerabilità è l'età di costruzione. Dai dati raccolti (Figura 3) emerge che circa i 3/4 delle strutture analizzate sono state costruite prima dell'80, periodo nel quale le norme non prevedevano particolari regole antisismiche sulla gran parte del territorio italiano, compreso quello della Basilicata.

Per quanto riguarda le altezze tipiche degli edifici scolastici, dal grafico di Figura 4, emerge come tali strutture siano tendenzialmente basse, infatti circa il 90% degli edifici ha un numero di piani compreso tra 1 e 3.

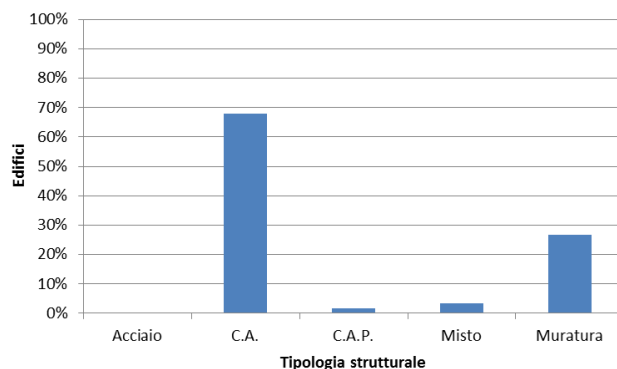


Figura 1. Tipologie strutturali delle scuole della Basilicata.

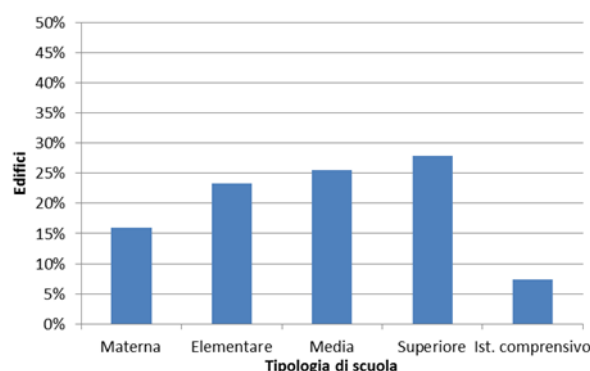


Figura 2. Tipologie di scuole presenti.

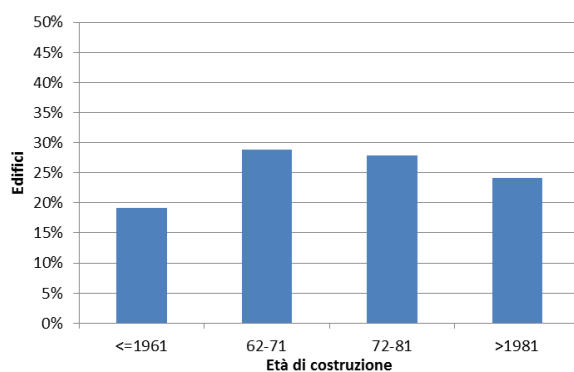


Figura 3. Età di costruzione delle scuole.

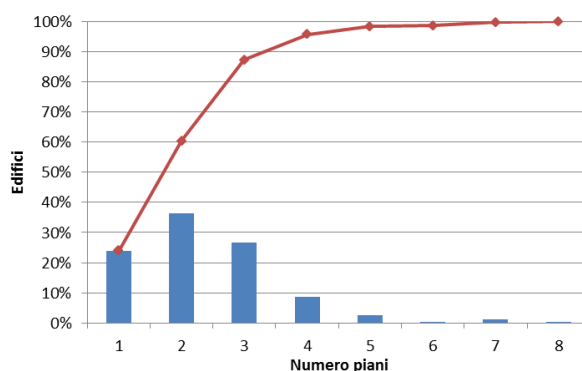


Figura 4. Distribuzione del numero di piani degli edifici scolastici.

### 3.1 Individuazione delle tipologie di strutture scolastiche più diffuse in ambito regionale

Al fine di individuare le tipologie strutturali più rappresentative dell'edilizia scolastica della regione Basilicata, qui di seguito vengono analizzati una serie di parametri che possono risultare utili per definire delle tipologie edilizie di riferimento.

Uno degli elementi fondamentali per la risposta sotto azioni sismiche di una struttura in cemento armato è sicuramente il suo sistema strutturale. Come si può osservare dalla Figura 5, la tipologia di struttura resistente più diffusa è sicuramente quella a telai, i quali possono essere presenti in una sola direzione o in entrambe le direzioni, con una percentuale molto simile. Quasi irrilevante è la presenza di strutture con presenza contemporanea di pareti e telai, così come irrilevante è la presenza di altri sistemi resistenti.

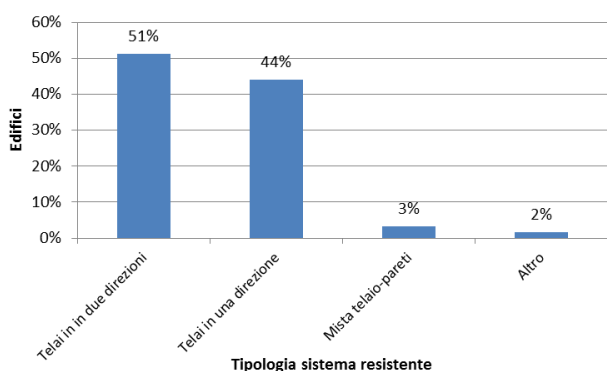


Figura 5. Sistema resistente degli edifici in c.a.

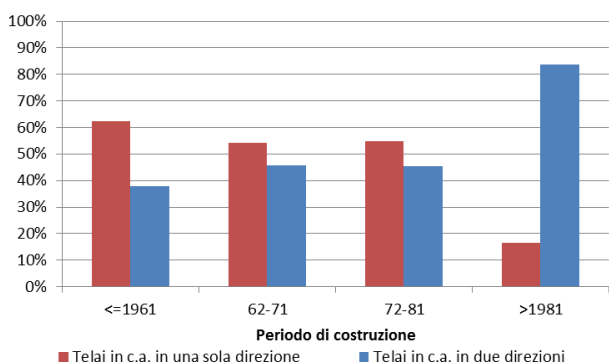


Figura 6. Diffusione delle tipologie intelaiate in funzione del periodo di costruzione.

Le strutture con telai in una o due direzioni identificano delle tipologie che sotto azione sismica possono comportarsi in maniera molto diversa. Pertanto, per capire meglio come tali tipologie siano diffuse, sono state messe in relazione con il periodo di costruzione (Figura 6).

Il risultato ottenuto risulta essere in linea con altri studi svolti in passato (Masi et al. 2015; Masi e Vona 2004; Vona e Masi 2004) e conferma come le strutture a telai orditi in una sola direzione siano presenti in maniera predominante

fino agli inizi degli anni '80. A partire da questo periodo le strutture ad uso scolastico presentano, in più dell'80% dei casi, telai orditi in entrambe le direzioni.

Per analizzare il numero di piani degli edifici scolastici si è preferito effettuare un'analisi in funzione del tipo di scuola (Tabella 1). I risultati mostrano che il numero di piani, tipico per ogni tipologia di istituto, risulta essere diverso. In particolare più dell'80% delle scuole materne rientrano nel range 1-2 piani, mentre per le elementari la tipologia più diffusa è quella a 2 piani, seguita da quella a 3 piani. Stesso risultato vale per le scuole superiori. Le scuole medie sono quelle che tipicamente presentano una altezza più elevata, infatti la tipologia più diffusa è quella a 3 piani seguita da quella a 2 piani. Per gli istituti comprensivi il numero di piani più frequente è tra 1 e 2, come le materne, anche se con percentuali più basse. Nel grafico di Figura 7 si osservano le differenze tra le diverse distribuzioni trovate.

Tabella 1. Analisi del numero di piani in funzione del tipo di scuola.

n. piani	Materna	Elementare	Media	Superiore	Ist. Compr.
1	42%	20%	18%	18%	35%
2	41%	48%	28%	34%	27%
3	15%	26%	38%	29%	15%
≥4	2%	6%	16%	19%	23%

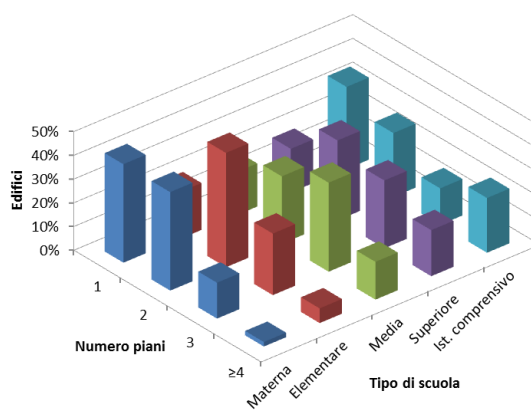


Figura 7. Distribuzione del numero di piani in funzione del tipo di scuola.

Dal punto di vista della dimensione in pianta, analizzando la superficie media di piano (Tabella 2, Figura 8), si rileva che le scuole con una pianta più piccola sono quelle elementari e gli istituti comprensivi, i quali presentano una superficie media di circa 300-350 m<sup>2</sup>. Poco maggiori risultano quelle materne e medie, mentre le scuole superiori risultano essere le più grandi con una superficie media di piano che si aggira intorno ai 600 m<sup>2</sup>.

Tabella 2. Superfici di piano degli edifici esaminati in base al tipo di scuola.

	Materna	Elementare	Media	Superiore	Ist. Compr.
Min	145	37	26	23	4
Q <sub>1</sub>	254	219	230	300	161
Mediana	450	324	400	555	248
Q <sub>3</sub>	575	454	625	714	419
Max	909	1795	1950	5000	1095
media	436	361	544	622	318
dev.st	197	255	493	593	256

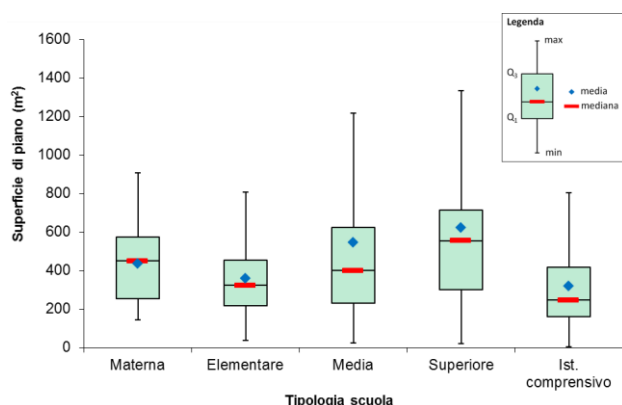


Figura 8. Analisi della superficie media di piano in funzione del tipo di scuola.

Tabella 3. Volume degli edifici esaminati in base al tipo di scuola.

	Materna	Elementare	Media	Superiore	Ist. Compr.
Min	479	363	172	284	40
Q <sub>1</sub>	1556	1073	1429	2274	612
Mediana	2089	2034	3267	3993	1926
Q <sub>3</sub>	2970	3272	5247	6600	3467
Max	5531	11847	24552	33000	14454
media	2310	2645	4651	5257	2598
dev.st	1069	2307	4948	4637	2995

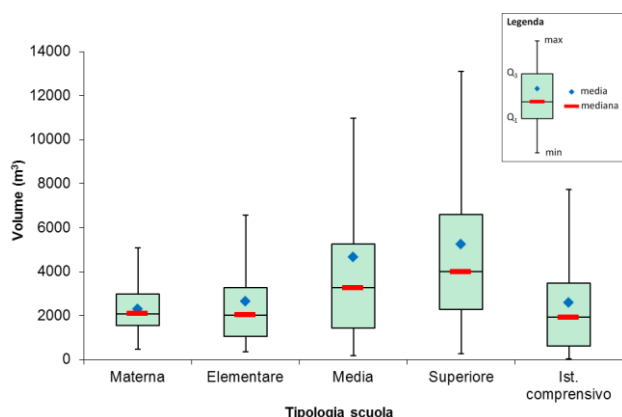


Figura 9. Volume degli edifici in funzione del tipo di scuola.

Il volume degli edifici risulta essere una diretta combinazione tra superficie media di piano e numero di piani (Tabella 3), prima analizzati. Dal grafico di Figura 9 si osserva come il valore medio tende a crescere con l'aumentare del grado

di istruzione scolastica ad eccezione degli istituti comprensivi che risultano più simili alle scuole materne ed elementari. Inoltre dal grafico si rileva come la dispersione dei valori delle scuole materne sia nettamente più bassa rispetto agli altri casi.

Dal punto di vista della regolarità in pianta, dal grafico di Figura 10, emerge che le scuole materne presentano quasi sempre una forma irregolare. L'irregolarità in pianta risulta essere prevalente anche per le scuole elementari e medie, mentre per quelle superiori risulta essere più diffusa una pianta di tipo regolare. Una notevole regolarità si registra per gli istituti comprensivi, dove in più del 70% dei casi analizzati si è rilevata una pianta regolare.

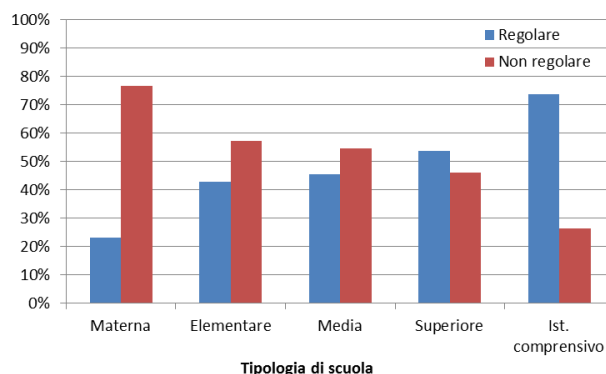


Figura 10. Analisi della regolarità in pianta in funzione del tipo di scuola.

#### 4 INFLUENZA DI ALCUNI FATTORI TIPOLOGICI SULLA CAPACITÀ SISMICA DELLE STRUTTURE

Analisi di varianza, effettuate per verificare l'influenza di alcuni parametri tipologici e dimensionali sulla capacità sismica degli edifici scolastici, hanno mostrato l'esistenza di correlazioni molto deboli e che possono essere definite semplicemente come tendenze.

Ad esempio, osservando la capacità sismica (espressa come valore dell'accelerazione che provoca il raggiungimento dello SLV) ottenuta come valore mediano, al variare del numero di piani si nota come questa tenda a diminuire con il crescere dell'altezza dell'edificio (Figura 11). Tale tendenza risulta confermata anche nel caso di edifici con un numero di piani >4, nonostante il loro numero risulti molto limitato (circa 15).

La scelta di considerare il valore mediano (e non il valor medio) è tesa ad evitare che limitati casi di edifici con capacità molto elevata, spostino la media verso valori elevati. Si andrebbe così a compensare, erroneamente, la presenza di molti edifici che presentano capacità basse e dunque elevata vulnerabilità.

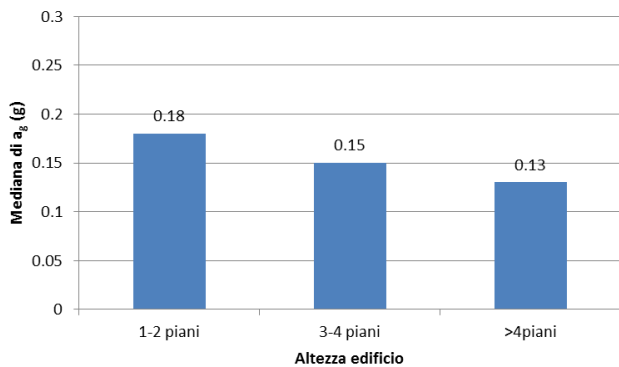


Figura 11. Valore mediano della capacità in funzione del numero di piani.

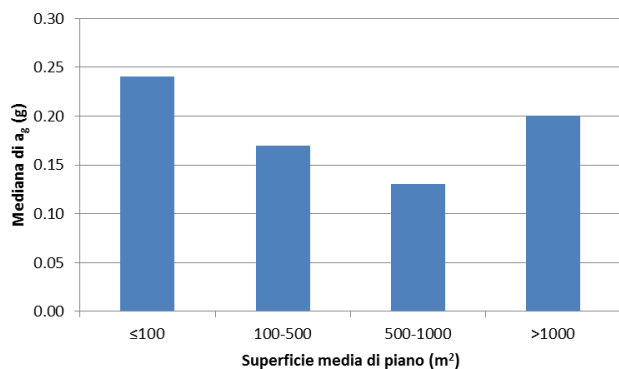


Figura 12. Valore mediano della capacità in funzione della superficie media di piano.

Considerando i valori medi della capacità degli edifici in funzione della superficie media di piano (Figura 12), si nota una riduzione dei valori all'aumentare della superficie. Unico valore in controtendenza è quello relativo a opere molto grandi, con superficie di piano maggiore di 1000 m<sup>2</sup>, che presumibilmente sono state progettate e realizzate con maggiore attenzione.

Altro dato fondamentale risulta essere quello relativo all'età di costruzione. Se per ogni periodo di costruzione si valuta la percentuale di edifici ricadenti in quattro diversi range di valori della capacità, il risultato che emerge è in linea con ciò che ci si potrebbe aspettare. Infatti, osservando la Figura 13 si nota che la percentuale di edifici ricadenti nell'intervallo  $a_g \leq 0.1g$  decresce in modo evidente passando dal periodo  $\leq 1961$  al periodo  $>1981$ . Viceversa, la percentuale di edifici con capacità  $a_g > 0.3g$  cresce sensibilmente e, in modo particolare, nel periodo  $>1981$ .

Altro fattore indagato è la regolarità in pianta. Come dimostrato dall'osservazione dei danni provocati dai passati terremoti, gli edifici irregolari presentano un comportamento sismico sfavorevole rispetto ad edifici regolari a causa di un elevato accoppiamento latero-torsionale (Magliulo et al. 2001). Diagrammando la distribuzione degli edifici regolari e non, in funzione di quattro classi di capacità (Figura 14) si rileva che la percentuale di edifici regolari che ricadono nelle ultime due classi sia maggiore

rispetto a quelli non regolari. Viceversa, per gli edifici più vulnerabili, con  $a_g$  tra 0.1 e 0.2g, si nota l'esatto contrario. Un risultato in controtendenza è stato ritrovato per la classe di capacità più bassa ( $a_g \leq 0.1g$ ), dove la percentuale di edifici regolari risulta superiore a quella degli edifici irregolari. Tale risultato, benché inaspettato, potrebbe essere spiegato col fatto che quando la capacità degli edifici è molto bassa la forma dell'edificio gioca un ruolo secondario.

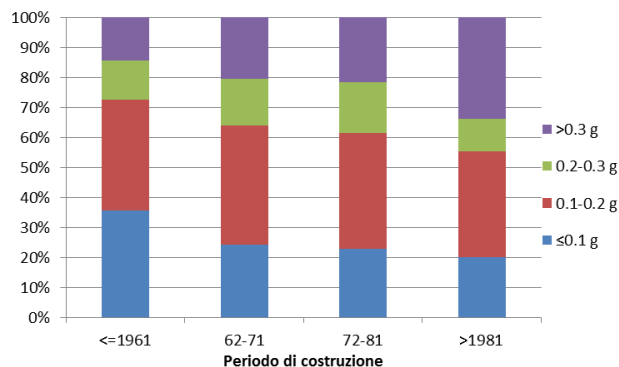


Figura 13. Capacità degli edifici in funzione del periodo di costruzione.

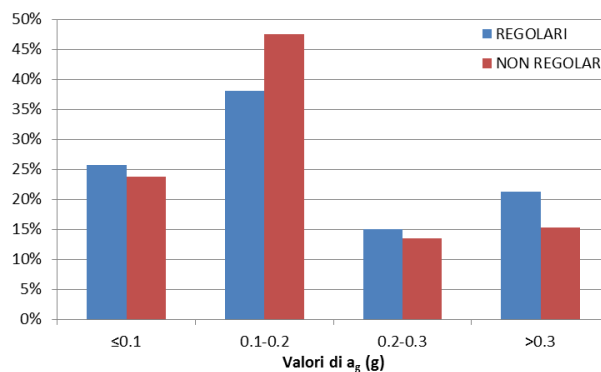


Figura 14. Capacità degli edifici regolari e non regolari in pianta in funzione del periodo di costruzione.

## 5 INDIVIDUAZIONE DI EDIFICI SCOLASTICI TIPO

Le analisi svolte nei paragrafi precedenti hanno permesso di ottenere un quadro abbastanza completo delle caratteristiche delle strutture scolastiche presenti nella regione Basilicata, nonché di verificare alcune tendenze dei valori di capacità sismica in funzione di alcune caratteristiche delle strutture esaminate.

In un'ottica di valutazioni di rischio sismico su larga scala è utile riassumere i dati mostrati in precedenza al fine di individuare delle tipologie di riferimento che siano rappresentative delle scuole in cemento armato ubicate nella regione Basilicata.

Per quanto concerne il tipo di sistema resistente si è visto che nel 95% dei casi questo è costituito da telai. Tuttavia, un'importante distinzione va fatta tra edifici con telai in una sola

direzione e telai in due direzioni che possono esibire comportamenti anche molto diversi. Come mostrato in precedenza, la maggiore diffusione della prima o della seconda tipologia è fortemente dipendente dal periodo di costruzione. In particolare fino al 1981 la tipologia più diffusa è quella a telai in una singola direzione, mentre a partire dal 1981 la prevalenza è quasi totalmente spostata verso edifici con telai in due direzioni. Di tale dato si è tenuto conto nella definizione di edifici scolastici “tipo”, riportati in Tabella 4.

Riguardo al numero di piani, sono emerse delle differenze tra i vari tipi di scuole. In particolare le scuole più basse risultano essere in primis quelle materne e poi gli istituti comprensivi, caratterizzati da edifici perlopiù a 1 o 2 piani. Il numero di piani più frequente per le scuole elementari e superiori oscilla tra 2 e 3, mentre per le scuole medie il numero di piani più frequente è 3.

Per quanto concerne la superficie media di piano si osservano i valori più alti (circa 600 m<sup>2</sup>) per le scuole superiori, mentre per gli istituti comprensivi la superficie media si aggira intorno a 300 m<sup>2</sup>.

Altro parametro che appare importante per l'identificazione di edifici scolastici tipo è la regolarità in pianta. Dai risultati è emersa una chiara prevalenza di forme irregolari per le scuole materne e una netta prevalenza di forme regolari per gli istituti comprensivi. Situazioni intermedie si rilevano negli altri casi con una piccola prevalenza di edifici regolari per le scuole superiori ed una leggera prevalenza di edifici non regolari per le elementari e le medie.

Le informazioni trovate, e sintetizzate in Tabella 4, possono essere un utile riferimento per l'identificazione di tipologie strutturali “tipo” da utilizzarsi nelle valutazioni di rischio su larga scala.

Tabella 4. Principali caratteristiche delle scuole della regione Basilicata.

	Tipologia di scuola				
	Materna	Elem.	Media	Super.	Compr.
Struttura	Telai in una direzione (per edifici pre '80)				
	Telai in due direzioni (per edifici post '80)				
N. piani*	1 (2)	2 (3)	3 (2)	2 (3)	1 (2)
Superficie media di piano (m <sup>2</sup> )	M:436	M:361	M:544	M:622	M:318
	DS:197	DS:255	DS:493	DS:593	DS:256
Volume (m <sup>3</sup> )	M:2310	M:2645	M:4651	M:5257	M:2598
	DS:1069	DS:2307	DS:4948	DS:4637	DS:2995
Regolarità in pianta	Irregolare	Perlopiù	Perlopiù	Perlopiù	Regolare
		Irreg.	Irreg.	Regolare	
M: Media, DS: deviazione standard					

\*in parentesi il secondo caso più frequente.

Per completare il processo di conoscenza degli edifici esistenti è importante reperire informazioni sulle caratteristiche meccaniche dei materiali. Tale tema è ampiamente trattato da numerosi lavori di letteratura. Ad esempio in Masi et al. 2014 vengono analizzati i dati ottenuti dalle prove di schiacciamento su carote estratte dalle stesse strutture sottoposte a verifica sismica nel 1° e 2° Programma Temporale delle Verifiche, descritto al paragrafo 2. Dai risultati è emersa una forte dipendenza della resistenza dei calcestruzzi dal periodo di costruzione, per ognuno dei quali viene proposto un range di valori tipici. Un upgrade di tale lavoro si trova in Masi et al. 2019 dove viene studiata la variabilità delle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi all'interno di una stessa struttura. Per quanto riguarda le caratteristiche degli acciai delle strutture esistenti, in Masi e Digrisolo 2013 si analizzano le principali proprietà meccaniche in funzione di diversi periodi di costruzione, distinguendo sempre gli acciai lisci da quelli nervati. Tali informazioni, associate alle tipologie di riferimento, possono essere considerate parti integranti per gli studi di vulnerabilità sismica a larga scala.

## CONCLUSIONI

I risultati delle valutazioni di vulnerabilità sismica eseguite sulle scuole della regione Basilicata tra il 2003 ed il 2007, a seguito dell'emanazione della OPCM3274, costituiscono una preziosa base di dati che consente di evidenziare le caratteristiche salienti degli edifici scolastici della regione. In questo lavoro si è svolta un'analisi generale del database con riferimento alle scuole con struttura in c.a. al fine di verificare l'influenza di alcune caratteristiche strutturali sul valore della capacità sismica, quindi sulla vulnerabilità. Tra le altre cose è emersa la debole correlazione tra alcuni parametri degli edifici, come il numero di piani, la superficie media di piano e il periodo di costruzione, con il valore della accelerazione che provoca il raggiungimento dello stato limite di salvaguardia della vita.

Sfruttando il lavoro di analisi del database si è cercato di definire le caratteristiche di edifici “tipo” per ognuno dei gradi scolastici presenti nell'ordinamento italiano: scuole materne, elementari, medie, superiori, istituti comprensivi. Tali edifici sono stati definiti in termini di tipologia del sistema sismo-resistente, numero di piani, superficie media di piano, volume totale e regolarità in pianta.



La classificazione ottenuta potrà essere utile per la definizione di edifici tipo in c.a. rappresentativi di ognuno dei gradi scolastici sopra menzionati, e/o per selezionare alcuni casi studio reali e conformi agli edifici tipo qui definiti che trovano riscontro nella realtà costruttiva della regione Basilicata. In tal senso, sarà utile sviluppare un confronto (ed eventuale integrazione) con analoghi database disponibili ed per altre regioni/aree italiane.

## RINGRAZIAMENTI

Il lavoro presentato in questo articolo è stato svolto nell'ambito del progetto ReLUI5 2019-21 (WP 4 Mappe di rischio e scenari di danno sismico (MARS)).

## BIBLIOGRAFIA

- Decreto del Presidente del Consiglio dei Ministri 21.10.2003. Disposizioni attuative dell'art. 2, commi 2, 3 e 4 dell'ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n3274 del 20 marzo 2003, recante. Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica. Dipartimento della Protezione Civile, GU 29.10.2003 n.252.
- Di Ludovico, M., Digrisolo, A., Moroni, C., Graziotti, F., Manfredi, V., Prota, A., Dolce, M., Manfredi, G., 2018. Remarks on damage and response of school buildings after the Central Italy earthquake sequence. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **1**(22).
- Di Ludovico, M., Digrisolo, A., Graziotti, F., Moroni, C., Belleri, A., Caprili, S., Carocci, C., Dall'Asta, A., De Martino, G., De Santis, S., Ferracuti, B., Ferretti, D., Fiorentino, G., Mannella, A., Marini, A., Mazzotti, C., Sandoli, A., Santoro, A., Silvestri, S., Sorrentino, L., Magenes, G., Masi, A., Prota, A., Dolce, M., Manfredi, G., 2017. The contribution of ReLUI5 to the usability assessment of school buildings following the 2016 central Italy earthquake. *Bollettino di Geofisica Teorica ed Applicata*, **58**(4), 353-376.
- Di Ludovico, M., Prota, A., Masi, A., Manfredi, G., 2012. Sisma in Emilia Romagna: l'attività di Reluis. *Progettazione Sismica*, **3**.
- Dolce, M., Masi, A., Moroni, C., Liberatore, D., Laterza, M., Ponzio, F., Cacosso, A., D'Alessandro, G., Faggella, M., Gigliotti, R., Perillo, G., Samela, L., Santarsiero, G., Spera, G., Suanno, P., Vona, M., 2004. Valutazione della vulnerabilità sismica di edifici scolastici della provincia di Potenza, *Atti del XI Convegno Nazionale ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia*, 25-29 gennaio, Genova, IT.
- Dolce, M., Moroni, C., 2005. La valutazione della vulnerabilità e del rischio sismico degli edifici pubblici mediante le procedure VC (vulnerabilità c.a.) e VM (vulnerabilità muratura), *Atti del DiSGG dell'Università della Basilicata*, N. 4/2005.
- Dolce, M., Masi, A., Vietro, N., Samela, C., Santarsiero, G., Vona, M., Cianciarulo, C. Ferrara, D., 2005. Linee guida per la valutazione della vulnerabilità sismica degli edifici strategici e rilevanti, *Centro di Competenza Regionale della Basilicata per lo Studio ed il Controllo del Rischio Sismico (CRIS)*.
- Legge n.289 del 27, dicembre 2002, Disposizioni per la formazione del bilancio annuale e pluriennale dello Stato (legge finanziaria 2003, G.U. n. 305 del 31 dicembre 2002, S.O. n.240).
- Legge n. 443 del 21 dicembre 2001, Delega al Governo in materia di infrastrutture ed insediamenti produttivi strategici ed altri interventi per il rilancio delle attività produttive, G.U. n. 299 del 27 dicembre 2001, S.O. n. 279.
- Magliulo, G., Ramasco, R., Realfonzo, R., 2001. Sul comportamento sismico di telai piani in ca caratterizzati da irregolarità in elevazione. *Atti del X Convegno ANIDIS L'Ingegneria sismica in Italia*, 9-13 settembre, Potenza, IT.
- Masi, A., Vona, M., 2004. Vulnerabilità sismica di edifici in ca realizzati negli anni'70. *Atti del XI Congresso ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*, 25-29 gennaio, Genova, IT.
- Masi, A., Digrisolo, A., 2013. Analisi delle caratteristiche meccaniche di acciai estratti da edifici esistenti in cemento armato. *Atti XV Convegno ANIDIS L'Ingegneria Sismica in Italia*, 30 giugno - 4 luglio, Padova, IT.
- Masi, A., Digrisolo, A., Santarsiero, G., 2014. Concrete Strength Variability in Italian RC Buildings: Analysis of a Large DataBase of Core Tests. *Applied Mechanics and Materials*. **597**, 283-290.
- Masi, A., Digrisolo, A., Manfredi, V., 2015. Fragility curves of gravity-load designed RC buildings with regularity in plan. *Earthquakes and Structures*, **9**(1) 1-27.
- Masi, A.; Digrisolo, A.; Santarsiero, G., 2019. Analysis of a Large Database of Concrete Core Tests with Emphasis on Within-Structure Variability. *Materials*, **12**(1985).
- OECD, 2005. Recommendation of the Council Concerning Guidelines on Earthquake Safety in Schools, 21 July 2005 - C(2005)24.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3274 del 20 marzo 2003, Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e normative tecniche per le costruzioni in zona sismica, G.U. n. 108 del 8 maggio 2003.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3362 dell'8 luglio 2004, Modalità di attivazione del Fondo per interventi straordinari della Presidenza del Consiglio dei Ministri, istituito ai sensi dell'art. 32-bis del decreto-legge 30 settembre 2003, n. 269, convertito, con modificazioni, dalla legge 24 novembre 2003, n. 326, G.U. n. 165 del 16 luglio 2004.
- Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri n. 3519 del 28/04/2006. Criteri generali per l'individuazione delle zone sismiche e per la formazione e l'aggiornamento degli elenchi delle medesime zone, G.U. n.108 del 11/05/2006.
- Vona, M., Masi, A., 2004. Resistenza sismica di telai in c.a. progettati con il RD 2229/39. *Atti del XI Congresso ANIDIS L'ingegneria Sismica in Italia*, 25-29 gennaio, Genova, IT.