



Analisi dei risultati del programma di valutazione della vulnerabilità sismica delle scuole in Abruzzo: stato di attuazione e criticità emerse.

Antonio Sabino^a, Maria Basi^b, Adriana Marra^a, Antonio Mannella^a

^a Istituto per le Tecnologie della Costruzione – Consiglio Nazionale delle Ricerche, ITC-CNR L'Aquila, Via Giosuè Carducci, 32, 67100, L'Aquila, Italia

^b Regione Abruzzo, Ufficio Rischio Sismico - Servizio Prevenzione dei Rischi di Protezione Civile, Via Salaria Antica Est, 67100, L'Aquila, Italia

Keywords: vulnerabilità sismica; scuole; edifici esistenti;

ABSTRACT

Le condizioni di sicurezza sismica dell'edilizia scolastica rappresentano una delle principali criticità nel panorama della sicurezza delle costruzioni esistenti in Italia, sia in ragione dell'epoca di costruzione di gran parte del patrimonio scolastico attualmente in uso, risalente sovente ad anni precedenti alla classificazione sismica del territorio, sia alla elevata esposizione connessa al numero di persone coinvolte in un eventuale collasso delle strutture. A ciò conseguono generalmente elevate condizioni di rischio che richiedono specifiche azioni di indirizzo da parte delle amministrazioni proprietarie, precedute da campagne di valutazione del livello di vulnerabilità, utili alla definizione di programmi di adeguamento/miglioramento sugli edifici, calibrandone la successione temporale e l'urgenza in virtù dei risultati ottenuti dalle stesse.

Nella Regione Abruzzo, nel corso del tempo, in attuazione dell'obbligo imposto dall'art. 2 della OPCM 3274/2003, sono state effettuate numerose verifiche sismiche di edifici scolastici pubblici, che hanno portato alla raccolta di una notevole mole di dati. Recentemente, nell'ambito di una collaborazione tra la Regione Abruzzo e la sede di L'Aquila del CNR-ITC, sono stati informatizzati i dati contenuti nella "Scheda di sintesi della verifica sismica di edifici strategici ai fini della protezione civile o rilevanti in caso di collasso a seguito di evento sismico" (Ordinanza n. 3274/2003 – Articolo 2, commi 3 e 4, DM 14/01/2008), relativi a circa 400 dei citati edifici scolastici. Nell'articolo sono presentati, in forma aggregata, i risultati più significativi emersi delle valutazioni di sicurezza effettuate, fornendo una fotografia delle condizioni del patrimonio scolastico abruzzese. Il processo che conduce alla definizione dell'indice di sicurezza della struttura, nel rispetto delle indicazioni di norma, è fortemente condizionato dalle scelte effettuate da chi produce la verifica, in merito alla definizione della campagna d'indagini, alle modalità di modellazione, all'utilizzo di specifici coefficienti di sicurezza, che possono portare ad una notevole dispersione dei risultati, pur partendo da presupposti simili.

L'analisi dei dati del campione analizzato può fornire una chiave di lettura degli aspetti sopra descritti utile alla definizione di indirizzi volti a favorire la comparabilità dei risultati.

1 IL PIANO REGIONALE DI VERIFICHE SISMICHE

A seguito dell'emanazione dell'OPCM 3274/2003, che all'art. 3 introduceva l'obbligo, per le amministrazioni proprietarie, entro 5 anni dall'entrata in vigore, di procedere alla valutazione della vulnerabilità delle infrastrutture e degli edifici strategici per le finalità di protezione civile e rilevanti in relazione alle conseguenze di un eventuale collasso, nei confronti delle azioni sismiche, la Regione Abruzzo, per il tramite della Direzione LLPP e Protezione Civile, in ossequio a quanto previsto dalla norma e disposto dalla

successiva OPCM 3362/2004, circa la ripartizione dei fondi statali stanziati e le modalità di esecuzione delle verifiche nel territorio di competenza, ha avviato il I Primo Programma Regionale per le Verifiche Tecniche, approvato con DGR n. 194 del 28/02/2005. Gli elenchi delle tipologie di infrastrutture e degli edifici a carattere "strategico" ai fini di protezione civile o "rilevanti" per le conseguenze di un eventuale collasso, da sottoporre a verifica sono stati approvati con DGR n. 438 del 2005 ed integrati con DGR n.1009/2008. Il termine per l'esecuzione delle stesse, è stato più volte prorogato fino al 31/12/2018. In considerazione delle conseguenze prodotte da un eventuale collasso, le scuole di ogni

ordine e grado, sono da considerarsi edifici rilevanti e soggette, pertanto, agli obblighi di legge relativamente alla verifica di vulnerabilità. Il piano regionale prevedeva originariamente l'esecuzione di verifiche su 254 edifici strategici e rilevanti e su 25 ponti. I risultati e lo stato di avanzamento del programma sono stati oggetto di grande attenzione in occasione degli eventi sismici che hanno interessato il territorio abruzzese nel 2009 e più recentemente nel 2016-17. Al fine di procedere con una ricognizione sullo stato di attuazione dello stesso, la Regione Abruzzo ha avviato una attività di monitoraggio presso gli enti proprietari, i quali, in attuazione del DGR n. 74/2017, sono stati invitati a comunicare attraverso una scheda ricognitiva, lo stato di avanzamento delle attività. Al 20 giugno 2017 risultavano pervenute schede ricognitive da circa il 50% dei Comuni abruzzesi, per un totale di 417 edifici scolastici sottoposti a verifica facenti parte di 1287 scuole censite sul territorio regionale. Le successive elaborazioni ed i risultati presentati, se non diversamente specificato, si riferiscono a tale campione di edifici.

2 IL PATRIMONIO EDILIZIO SCOLASTICO REGIONALE

Nel territorio della Regione Abruzzo, come più in generale nel contesto italiano, il patrimonio edilizio esistente presenta caratteristiche fortemente legate ai periodi di maggior espansione urbana e alle tecniche costruttive, alla qualità dei materiali, agli standards costruttivi e tecnici, nonché alla legislazione sulle costruzioni vigente in tali fasi storiche. Allo stesso modo l'edilizia scolastica presenta i caratteri propri dei periodi nei quali l'alfabetizzazione di massa e la crescita della scolarizzazione hanno reso necessario un consistente incremento del numero e della capienza delle scuole, attraverso la realizzazione di nuovi edifici o l'adattamento funzionale e l'ampliamento di strutture esistenti (spesso edifici storici). Come già specificato nel paragrafo precedente, sebbene nel territorio regionale siano state censite 1287 scuole di vario ordine e grado, costituite da uno o più edifici, la presente trattazione prende in considerazione un campione di 417 edifici dei quali si dispone della scheda di sintesi della verifica di vulnerabilità, compilata dal tecnico incaricato della verifica, utilizzando il modello predisposto dall'Ufficio valutazione, previsione e mitigazione del rischio sismico e attività ed opere post-emergenza del Dipartimento della Protezione Civile Nazionale (P.C. Regione

Abruzzo, 2008). Tale scheda consente di rilevare informazioni di carattere generale e tipologico, oltre che altri dati prettamente attinenti ai risultati della verifica stessa, che consentono di definire le caratteristiche geometriche, materiche e strutturali di ciascun edificio. Il campione analizzato, è relativo a plessi scolastici dislocati su tutte e quattro le province abruzzesi, secondo con la distribuzione indicata nella Tabella 1; in Figura 1 è riportata la localizzazione sulla nota mappa di pericolosità sismica della regione (DGR 438/2005), con l'indicazione del numero di edifici presenti nel campione per ciascun comune.

Tabella 1. Numero di Edifici censiti per provincia

AQ	TE	PE	CH
124	98	33	164

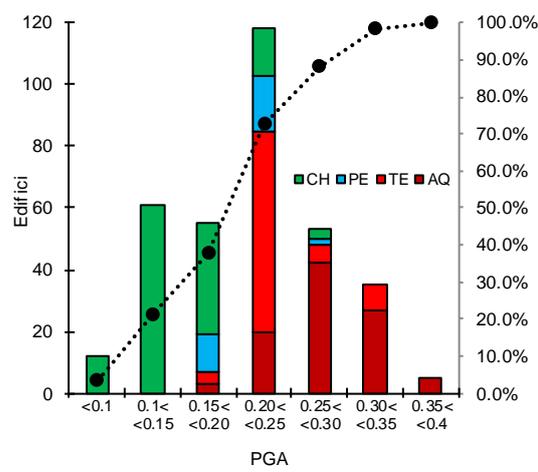
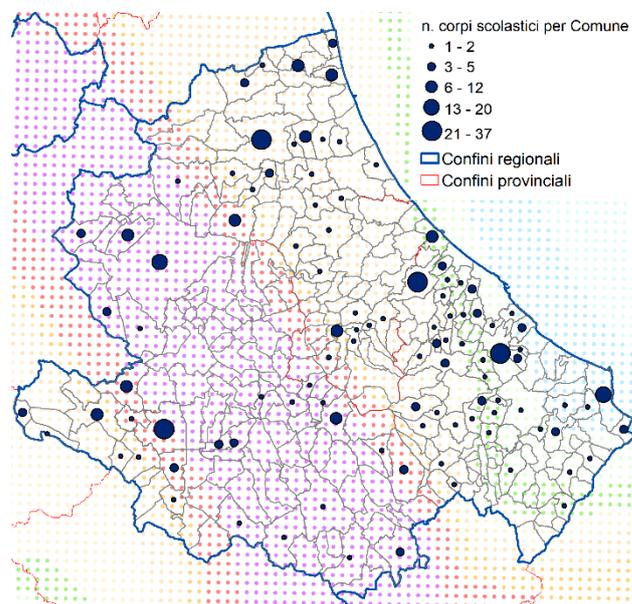


Figura 1. a) Distribuzione geografica degli edifici costituenti il campione analizzato e numerosità per ciascun comune. b) Distribuzione degli edifici in funzione della PGA del sito di costruzione, distinti per provincia.

La successiva Figura 2 mostra la distribuzione degli edifici in rapporto all'epoca di costruzione,

distinti per tipologia strutturale (CA=cemento armato; MUR=muratura; ACC= Acciaio). Come già accennato precedentemente, la maggior parte delle strutture è stata realizzata nell'intervallo temporale compreso tra la seconda guerra mondiale e i primi anni '90. Risulta inoltre evidente, come già rilevato in numerose altre pubblicazioni, ad esempio in (M. Dolce e A. Martinelli, 2006), che nel periodo '46-'61, la tipologia strutturale prevalente era la muratura portante, mentre nei decenni successivi è diventato preponderante l'impiego del c.a.. Le altre tipologie costruttive, che prevedono l'impiego strutturale di acciaio, legno ed elementi prefabbricati in c.a risultano marginali in termini numerici.

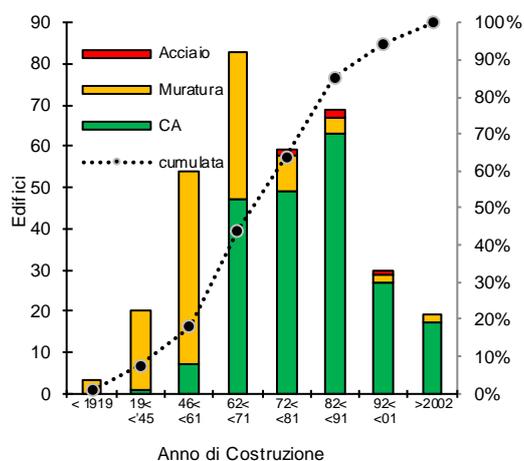


Figura 2. Distribuzione del campione in funzione dell'epoca di costruzione e della tipologia strutturale

Al di là dell'interesse storico e didascalico dell'informazione relativa all'età delle costruzioni, il dato risulta di fondamentale importanza in quanto strettamente correlato alle prestazioni attese dagli edifici in caso di sollecitazione sismica. In rapporto all'epoca di costruzione, infatti, gli edifici presentano peculiari caratteristiche costruttive, nonché carichi di progetto e concezione strutturale fortemente differenziate a seconda che all'epoca di progettazione il sito di costruzione rientrasse in un'area classificata sismica o meno. È importante rilevare, infatti che, se a partire dalle precedenti Norme Tecniche sulle Costruzioni (DM 14.01.2008) è stata completamente superata la suddivisione in zone sismiche del territorio nazionale, prediligendo un approccio alla pericolosità sito-dipendente, per molto tempo il legislatore ha individuato e classificato come sismiche alcune aree del paese (aggiornate ed ampliate in genere a seguito di ogni evento importante e distruttivo) imponendo l'applicazione di una legislazione antisismica, più o meno evoluta a seconda del periodo storico, solo

all'interno delle stesse. Il progressivo ampliamento delle aree ritenute a rischio sismico e l'estensione alla totalità del territorio nazionale a partire dal 2006 (OPCM 3519/2006), produce una condizione di particolare vulnerabilità per gli edifici progettati prima della classificazione del sito su cui insistono, e quindi senza alcuna concezione strutturale antisismica, e che oggi si trovano posti in aree nel frattempo ritenute suscettibili di risentire degli effetti di eventi sismici, anche rilevanti (zone 1 e 2).

Per quanto riguarda l'Abruzzo, a seguito del disastroso terremoto di Avezzano del 1915, una prima parte del territorio regionale, comprendente in particolare una vasta porzione della Marsica e in generale della Provincia dell'Aquila, venne classificata sismica; nel corso del tempo l'estensione dell'area classificata crebbe ulteriormente, fino all'entrata in vigore dell'OPCM 3274/2003 a seguito della quale, sul totale di 305 comuni presenti nella regione, 238 risultavano classificati sismici; i restanti 67 non classificati erano situati soprattutto nell'area costiera delle province di Teramo, Pescara e Chieti. Come si evince dalla Figura 3a), poco meno della metà degli edifici del campione analizzato è stato progettato facendo riferimento esclusivamente ai carichi gravitazionali essendo stati edificati prima della classificazione sismica del comune di ubicazione. Tali edifici sono posti soprattutto nelle province di Chieti, Teramo e Pescara, mentre nella provincia dell'Aquila, sostanzialmente la totalità degli edifici del campione è stato progettato successivamente alla classificazione sismica del comune. La figura 3b) mostra la distribuzione degli edifici rispetto alla classificazione sismica, distinguendoli per tipologia strutturale. Circa il 50% degli edifici progettati solo per azioni gravitazionali e situati in aree solo in seguito classificate sismiche, è realizzato con struttura in c.a.. A tal proposito, si evidenzia, come, [Kunnath et al., 1995; Masi, 2003; Masi et al., 2012] le strutture intelaiate in c.a., progettate per soli carichi gravitazionali, risultino particolarmente vulnerabili nei confronti delle sollecitazioni sismiche, anche in misura maggiore rispetto alle strutture in muratura, soprattutto quelle che, sebbene non progettate per carichi di natura sismica, risultano comunque ascrivibili alla 3a classe secondo la classificazione proposta da Pagano [Pagano, 1968] e possiedono una intrinseca capacità controventante, che consente di trasferire con maggior efficacia le azioni sismiche in fondazione.

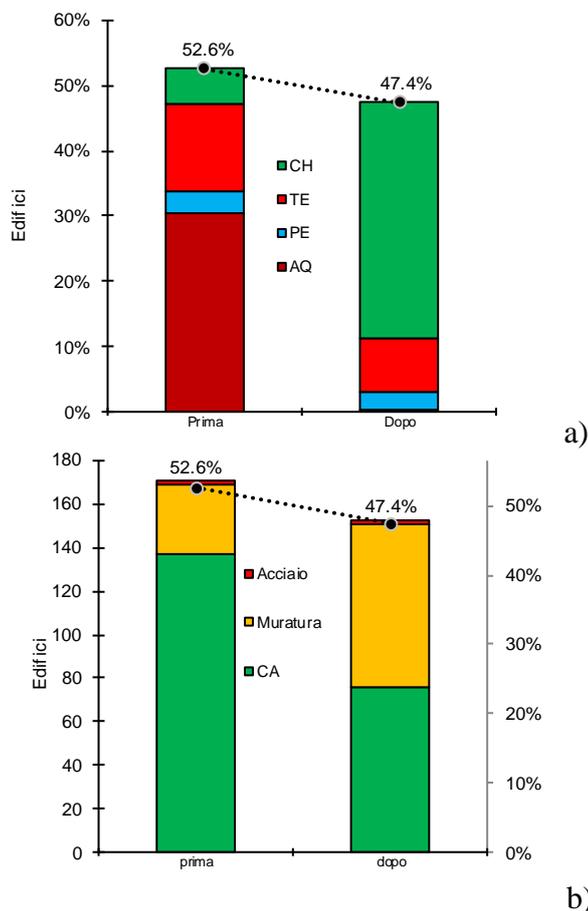


Figura 3. Distribuzione degli edifici del campione in rapporto all'epoca di classificazione rispetto alla progettazione, distinti per: a) provincia b) tipologia strutturale.

Risulta determinante, inoltre, per gli edifici in c.a. progettati per soli carichi gravitazionali, il contributo resistente delle tamponature e la disposizione delle stesse all'interno della maglia strutturale. Tale fattore, infatti, è in grado di incidere in maniera consistente sulla capacità sismica della struttura [Blasi et al., 2018; Eren et al., 2019].

Con riferimento alle caratteristiche tipologiche delle scuole esaminate, si rileva (Figura 4) come la maggior parte dei corpi strutturali presenti un numero di piani inferiore a 5, con una netta predominanza di edifici con 2 e 3 piani, sia per le strutture in muratura che in c.a. Inoltre, in considerazione delle dimensioni e della capienza, anche rilevante, delle scuole, risulta frequente la presenza di più corpi strutturali. Dall'esame della Figura 5, si evidenzia che in genere, circa l'80% delle scuole non supera i 3 corpi strutturali.

In ogni caso, se per le strutture in c.a. i corpi strutturalmente indipendenti, in genere, concorrono a costituire un organismo edilizio e funzionale unitario, per le strutture in muratura i corpi strutturali individuati possiedono una autonomia di funzioni e una riconoscibilità architettonica individuale.

Dall'esame dei grafici precedenti si rileva che la maggioranza degli edifici in muratura è realizzata in muratura di mattoni pieni e malta di calce, con impalcati rigidi e tetti pesanti non spingenti, soprattutto nelle province di Teramo e Chieti. La diffusione di tale tipologia strutturale produce importanti implicazioni ai fini della capacità sismica delle strutture in quanto, in genere, possiede buone doti di resistenza, se confrontata alle murature caotiche o in pietrame disordinato, ampiamente diffuse nelle costruzioni storiche dell'entroterra; inoltre la presenza di impalcati rigido nel proprio piano e coperture pesanti non spingenti è in genere accompagnata dalla presenza di cordoli di piano e in copertura, che, seppur realizzati per le sole esigenze di ripartizione dei carichi gravitazionali, svolgono comunque efficacemente l'azione di contenimento delle pareti nei confronti di meccanismi di primo modo e di ripartizione delle azioni sismiche tra le murature.

Al fine di illustrare nel dettaglio le principali caratteristiche degli edifici in muratura, in Figura 6 è rappresentata la distribuzione degli stessi, in funzione della tipologia muraria (a), delle caratteristiche degli impalcati (b) e delle coperture (c).

Allo stesso modo è possibile discriminare le strutture del campione realizzate con struttura portante in c.a. in funzione della tipologia di sistema resistente adottato. Come visibile dalla Figura 7, la tipologia a telai sismo-resistenti in entrambe le direzioni risulta essere quella maggiormente presente in tutte e 4 le province della regione, sebbene una consistente percentuale di edifici delle province di Teramo (37%) e Chieti (25%) presenti una struttura a telai in una sola direzione, con collegamenti trasversali costituiti dai soli solai di piano. Quest'ultima tipologia, tipica delle costruzioni progettate esclusivamente a carichi gravitazionali, con elevata vulnerabilità e scarsa capacità resistente e duttilità nei confronti delle azioni orizzontali, è invece scarsamente presente nelle province di L'Aquila e Pescara.

Nei grafici di Figura 8 è rappresentato invece l'andamento della resistenza media a compressione del calcestruzzo (a) e della resistenza media a trazione dell'acciaio (b) al variare dell'epoca di progettazione degli edifici.

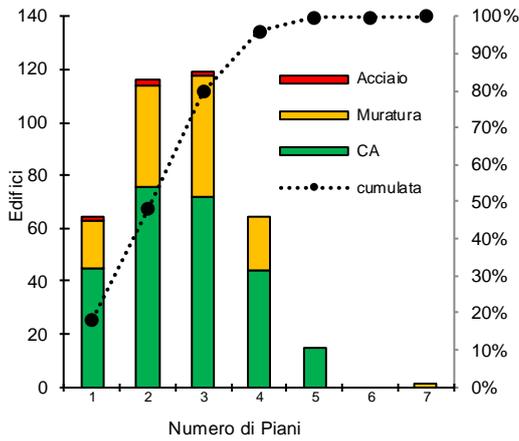


Figura 4. Distribuzione degli edifici in funzione del numero di piani e della tipologia strutturale

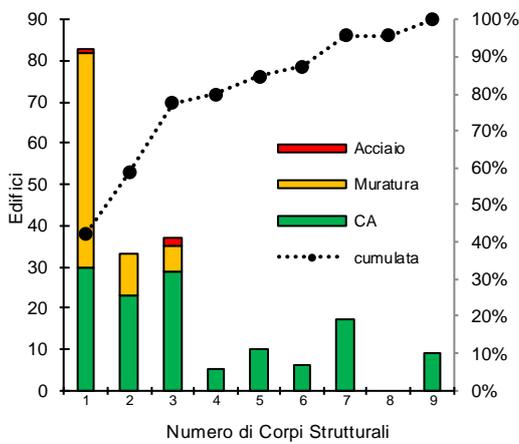


Figura 5. Distribuzione delle scuole in funzione del numero di corpi strutturali di cui sono costituite e della tipologia strutturale.

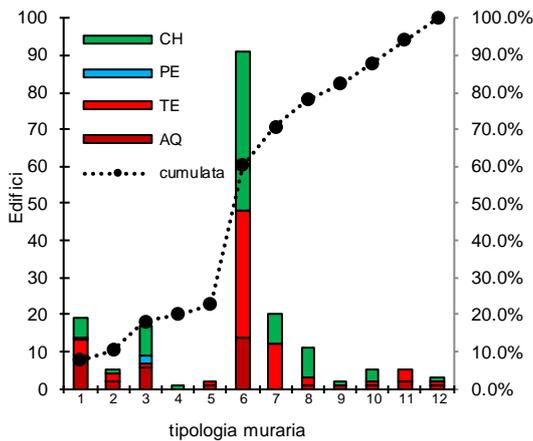


Figura 6a. Frequenza delle tipologie murarie nei corpi strutturali in muratura: 1. Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari); 2. Muratura a conci sbazzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno; 3. Muratura in pietre a spacco con buona tessitura; 4. Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.); 5. Muratura a blocchi lapidei squadrati; 6. Muratura in mattoni pieni e malta di calce; 7. Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia; 8.

Muratura in blocchi laterizi forati; 9. Muratura in blocchi laterizi forati, con giunti verticali a secco; 10. Muratura in blocchi di calcestruzzo; 11. Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni; 12 Altro.

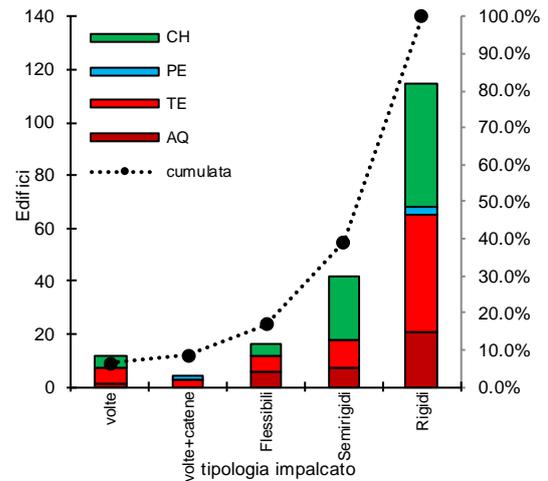


Figura 6b. Frequenza delle principali tipologie di impalcato in funzione della rigidità nel proprio piano, distinte per provincia.

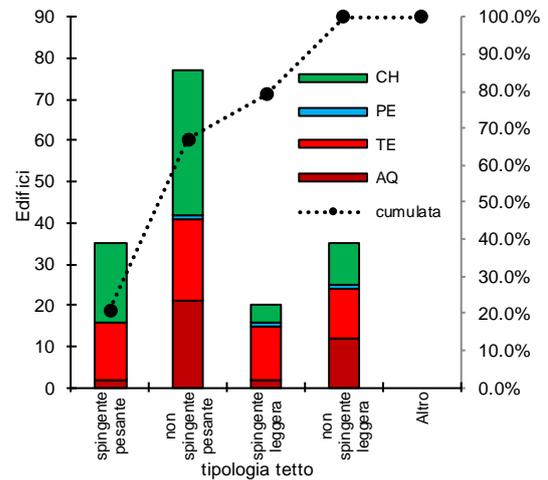


Figura 6c. Frequenza delle principali tipologie di tetto in funzione della massa e delle caratteristiche di spinta sulle murature d'ambito, distinti per provincia.

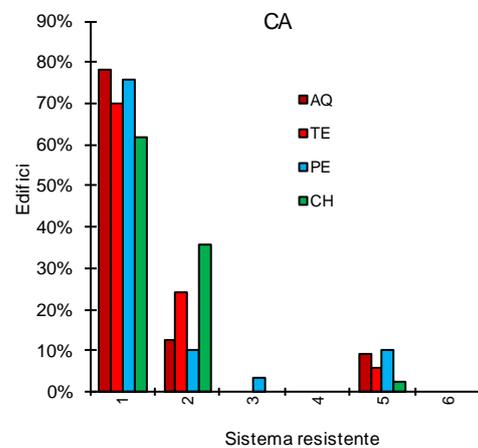


Figura 7. Frequenza dei principali sistemi resistenti per le strutture in c.a.: 1. Struttura a telai in c.a. in due direzioni; 2. Struttura a telai in c.a. in una sola direzione; 3. Struttura

a pareti in c.a. in due direzioni; 4. Struttura a pareti in c.a. in una sola direzione; 5. Struttura mista telaio-pareti; 6. Struttura a nucleo.

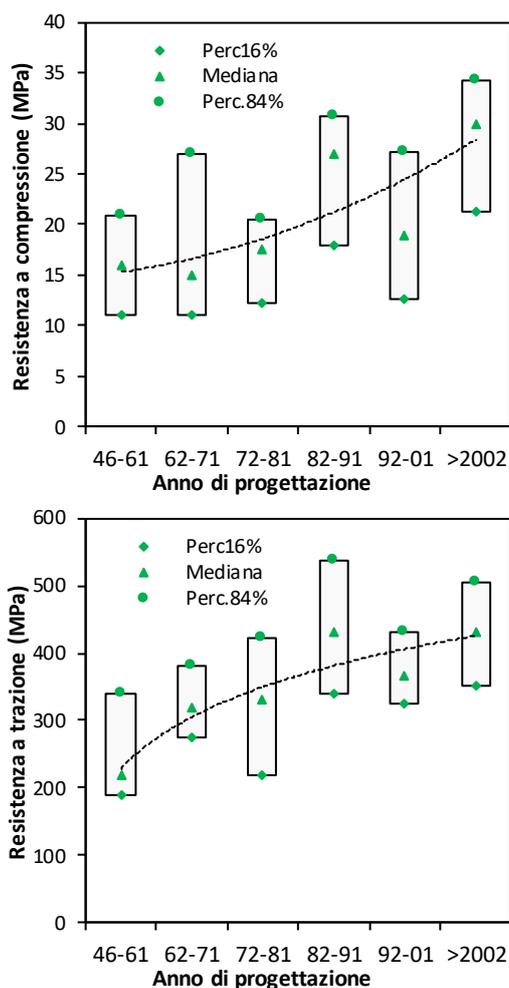


Figura 8. Resistenza media di calcestruzzo e acciaio (snervamento) al variare dell'epoca di costruzione

Mentre i valori medi ottenuti risultano in buon accordo con i valori attesi per gli standard correnti nei vari periodi di costruzione e con le indagini statistiche disponibili in letteratura (M.T. Cristofaro et al., 2011; G.M. Verderame et al., 2001), si conferma una forte dispersione dei valori di resistenza, anche all'interno dello stesso intervallo di periodi di costruzione. In generale si nota un incremento delle resistenze dei materiali al diminuire dell'età di costruzione; in particolar modo per il calcestruzzo ciò può essere attribuito sia al miglioramento della qualità dei getti, sia all'incremento della qualità del confezionamento, che a partire dagli anni '80 avviene tipicamente nelle centrali di betonaggio. In Figura 9 è rappresentata la variabilità della resistenza media a compressione del calcestruzzo nelle varie province della regione; non si notano particolari variazioni da provincia a provincia, se ne può dedurre pertanto che le condizioni di confezionamento e di getto siano state le stesse per

tutte le province, consentendo di sfatare almeno in parte il mito della resistenza più bassa dei calcestruzzi realizzati nelle zone costiere.

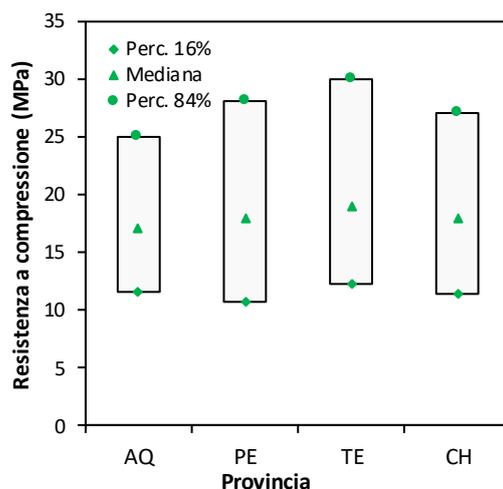


Figura 9. Variabilità della resistenza media a compressione del calcestruzzo tra le varie province della regione Abruzzo.

Grazie ai dati raccolti è stato possibile analizzare le principali vicissitudini che hanno interessato gli edifici in termini di azioni eccezionali subite o modifiche sostanziali alle strutture. In particolare, la Figura 10 mostra che una percentuale consistente degli edifici analizzati è situata in aree che hanno subito un apprezzabile risentimento a seguito degli ultimi eventi sismici che hanno interessato il territorio della Regione, a partire dal terremoto dell'Italia Centro-Meridionale del 1984, fino gli ultimi eventi della serie sismica del 2016-17.

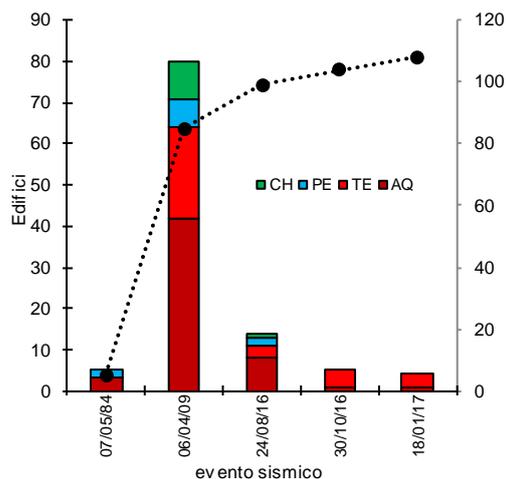


Figura 10. Edifici che hanno subito risentimenti per ciascun evento sismico rilevante nell'arco temporale (1984-2019).

L'evento che ha coinvolto il maggior numero di edifici risulta essere quello dell'Aquila del 2009, seguito dagli eventi del 24 agosto e 30 ottobre 2016. Nel grafico è evidenziato esclusivamente il primo evento sismico che ha prodotto un

risentimento sulla struttura, pertanto, in considerazione della vicinanza tra le aree epicentrali del 2009 e del 2016-17, molti degli edifici già interessati dagli eventi sismici della zona di L'Aquila hanno risentito anche degli effetti della serie sismica del Centro Italia, che ha interessato pesantemente soprattutto le aree interne delle province di L'Aquila e Teramo.

Con riferimento agli interventi di rilevanza strutturale che hanno interessato gli edifici, dalla Figura 11 si vede come circa il 15% degli stessi è stata già oggetto di interventi di miglioramento (67) e adeguamento sismico (2), mentre una consistente maggioranza (266 edifici) è stata interessata da interventi strutturali minori o da ampliamenti e ristrutturazioni che, però, non hanno sostanzialmente modificato le caratteristiche sismo-resistenti delle strutture.

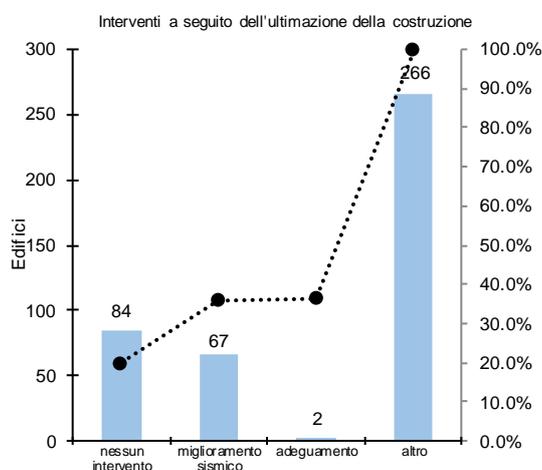


Figura 10. Edifici che hanno subito interventi a seguito del completamento della costruzione, distinti per tipologia di intervento.

3 VULNERABILITÀ SISMICA DELLE SCUOLE DEL CAMPIONE

Le verifiche delle scuole del campione sono state condotte con riferimento sia all'OPCM 3274, che alle Norme Tecniche per le Costruzioni contenute nel DM 16/01/2008 e alla relativa Circolare esplicativa C.S.LL.PP. n. 617 del 02/02/2009, in quanto il programma di verifica è stato avviato nel lontano 2005.

Preliminarmente all'esecuzione della verifica, come prescritto dalle normative di riferimento, sono state effettuate specifiche campagne di indagine strutturale e geotecnica, con il fine di caratterizzare i materiali costituenti la struttura, definire le caratteristiche meccaniche dei terreni di fondazione, la categoria di sottosuolo, la geometria della struttura e i relativi dettagli costruttivi. Per entrambe le normative di riferimento il livello di conoscenza raggiunto era suddiviso in tre classi da

LC1 a LC3. La Figura 11 mostra che per la maggior parte delle strutture è stato raggiunto un livello di conoscenza adeguato (LC2); per quasi un terzo delle strutture, circa il 27%, è invece stato raggiunto solo il livello di conoscenza limitato LC1. Il livello di conoscenza più elevato è stato raggiunto solo nel 3,8% dei casi.

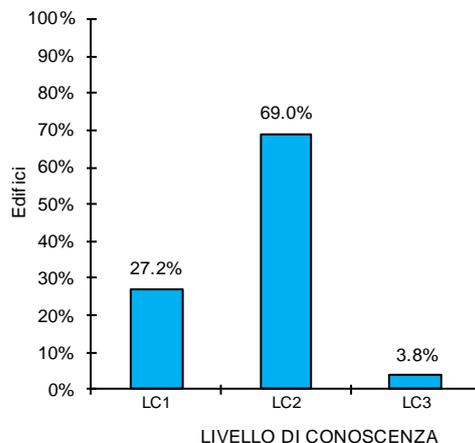


Figura 11. Distribuzione degli edifici in rapporto al Livello di conoscenza raggiunto nella campagna di indagine.

Le verifiche delle strutture sono state condotte, conformemente alle prescrizioni di norma, utilizzando una delle tipologie di analisi consentite in funzione del livello di conoscenza raggiunto e delle caratteristiche tipologiche e di regolarità delle strutture. In Figura 12 è mostrata la frequenza di utilizzo di ciascun tipo di analisi utilizzata. Dall'esame del grafico emerge una netta preferenza dell'analisi statica non lineare per gli edifici in muratura rispetto alla dinamica lineare con fattore di struttura q , condizione che non si ravvisa per le analisi condotte sugli edifici in c.a.. Con riferimento all'analisi statica lineare e all'analisi dinamica non lineare, le stesse sono state scarsamente utilizzate con ogni probabilità a causa delle limitazioni normative all'impiego sulla base delle caratteristiche geometriche delle strutture oggetto di analisi per la prima e della maggiore complessità, onere computazionale e difficoltà di interpretazione dei risultati per la seconda.

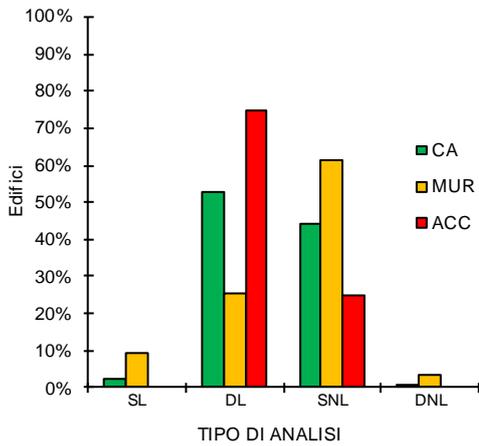
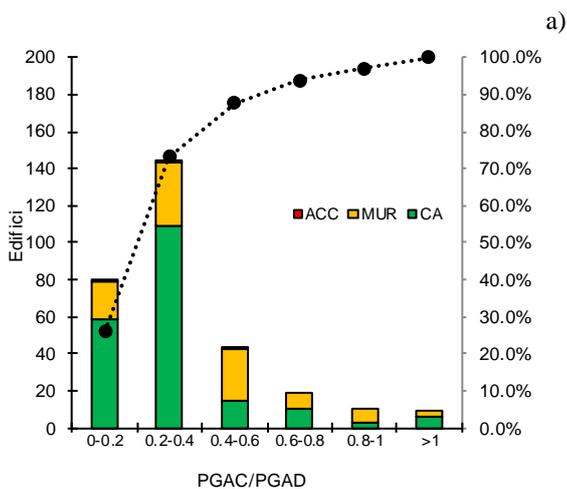
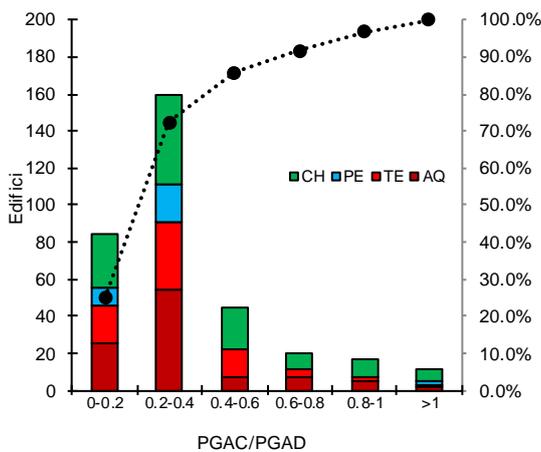


Figura 12. Frequenza di utilizzo di ciascun tipo di analisi distinto per tipologia strutturale: SL – statica lineare; DL– dinamica lineare; SNL – statica non lineare; DNL – dinamica non lineare.

Nella Figura 13 sono mostrati, in forma aggregata, i risultati della analisi di vulnerabilità in termini di indice di sicurezza allo SLV dato dal rapporto tra PGA_C di capacità e PGA_D di domanda. I risultati sono raggruppati per intervalli dell'indice di sicurezza di ampiezza pari al 20% e distinti in a) per provincia e in b) per tipologia strutturale.

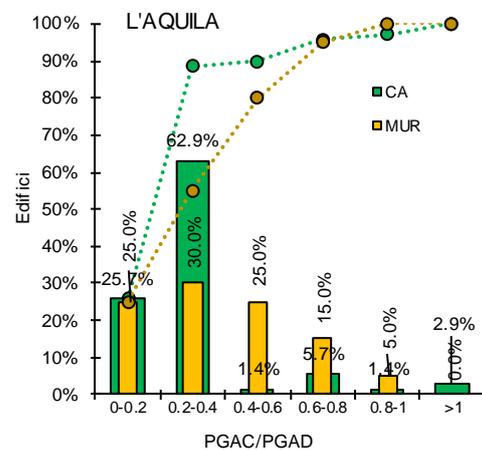


a)

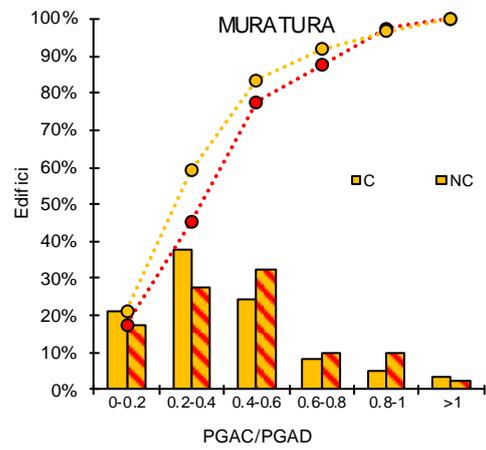
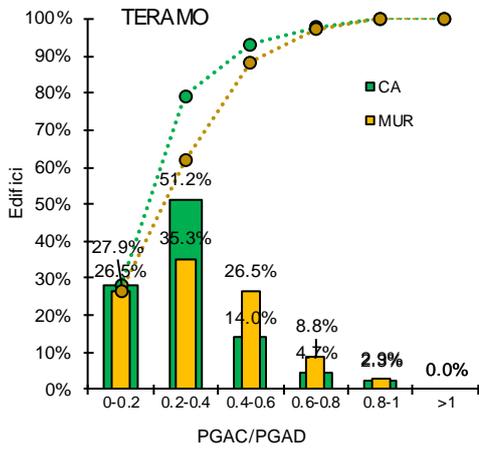
b)

Figura 13. Indice di sicurezza PGA_C/PGA_D in funzione a) della provincia in cui è sito l'edificio e b) della tipologia strutturale.

Si nota che circa il 90% degli edifici presenta un indice di sicurezza inferiore al 60% e ben il 28% raggiunge l'SLV con azioni sismiche non più alte del 20% di quelle attese nel sito in esame; meno del 5% delle scuole risulta adeguato nei confronti delle azioni sismiche imposte dalle NTC 2008. Inoltre, non appaiono sostanziali differenze, in termini di vulnerabilità, tra le diverse province che vengono rappresentate in modo sostanzialmente uniforme in tutti gli intervalli utilizzati per l'indice di sicurezza. In Figura 14 è dettagliato ulteriormente, in termini statistici, il rapporto tra tipologia strutturale e il livello di sicurezza raggiunto in media per ciascuna provincia abruzzese. È evidente la maggiore vulnerabilità degli edifici in cemento armato, con percentuali vicine all'80% degli edifici del campione che presenta un livello di sicurezza inferiore al 40%, per tutte le province della regione. Per le murature, invece, si riscontrano livelli di vulnerabilità mediamente inferiori, con una percentuale più elevata, superiore al 25%, di edifici con livelli di sicurezza compresi tra il 40% e il 60%. Il dato relativo alla provincia di Pescara non risulta significativo a causa della scarsa numerosità del campione di edifici e pertanto non è stato riportato.



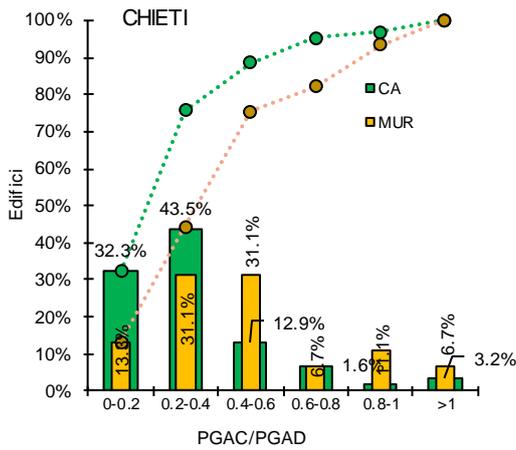
a)



b)

b)

Figura 15. Indice di sicurezza PGA_C/PGA_D in funzione del periodo di classificazione rispetto alla progettazione dell'edificio: C edifici progettati su aree già classificate; NC edifici progettati su aree classificate successivamente alla progettazione. Le linee tratteggiate rappresentano le percentuali cumulative per ognuna delle due categorie.

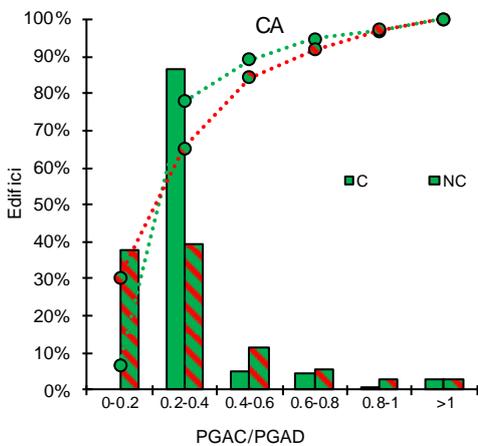


c)

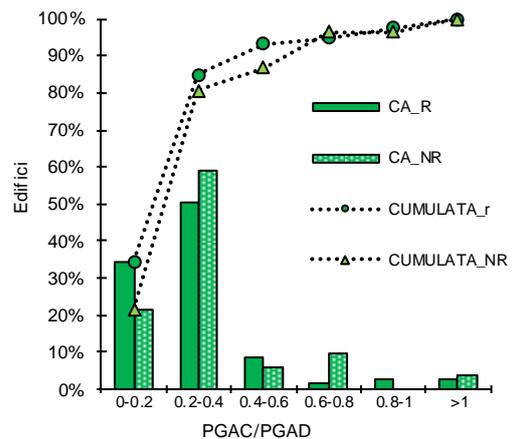
Figura 14. Indice di sicurezza PGA_C/PGA_D in funzione della tipologia strutturale per a) Provincia dell'Aquila; b) Provincia di Teramo; c) Provincia di Chieti. Le linee tratteggiate rappresentano le percentuali cumulative per ognuna delle due tipologie costruttive.

L'andamento del livello medio di sicurezza in rapporto alla data di classificazione sismica del comune in cui sono situati gli edifici, rispetto all'epoca di progettazione, diagrammato in Figura 15, presenta delle particolarità degne di nota.

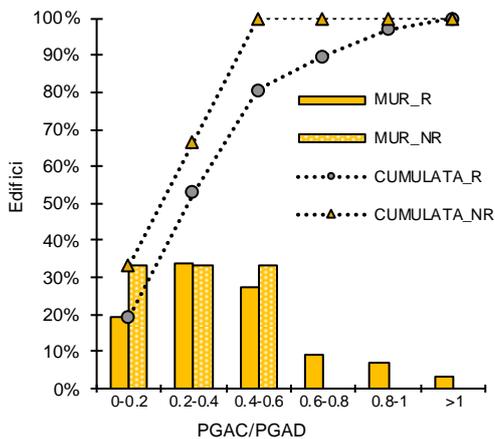
Come ci si aspetterebbe, gli edifici in c.a. progettati per i soli carichi gravitazionali hanno un livello maggiore di vulnerabilità rispetto a quelli progettati dopo la classificazione sismica dell'area su cui sorgono. Circa il 38% degli edifici del primo gruppo (NC), infatti, presenta un livello di sicurezza inferiore al 20%, a fronte di nessun edificio appartenente al secondo gruppo (C). Per gli edifici in muratura, invece, non si riscontra uno scostamento rilevante tra i due gruppi; è rilevabile, invece, un livello di vulnerabilità minore proprio per il gruppo degli edifici NC, attribuibile ai livelli inferiori dell'intensità sismica attesa nelle aree classificate più recentemente.



a)



a)



b)

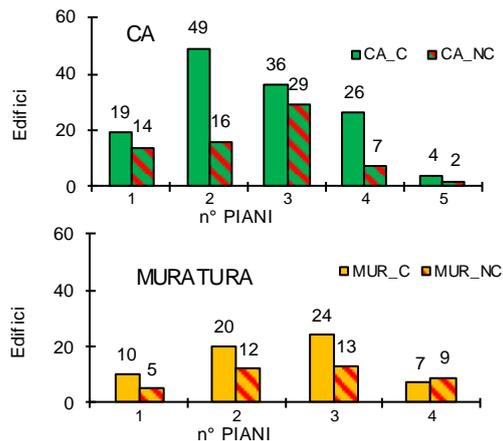
Figura 16. Indice di sicurezza $PGAC/PGAD$ in funzione della regolarità strutturale (R regolare, NR non regolare) per a) edifici in c.a. e b) edifici in muratura.

La Figura 16 illustra l'andamento del livello medio di sicurezza delle strutture in funzione della regolarità strutturale, per le due principali tipologie strutturali. Il confronto, non evidenzia incrementi significativi della vulnerabilità associata alle strutture non regolari.

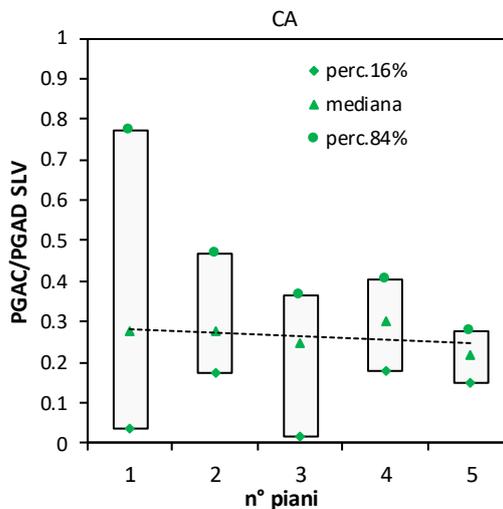
Con riferimento all'andamento del livello medio di sicurezza con il numero di piani, mostrato in Figura 17, si segnala una notevole dispersione dell'indice di sicurezza per gli edifici di un solo piano; per gli edifici in c.a. (Figura 17 b) tale dispersione decresce significativamente all'aumentare con il numero di piani, evidenziando come tale fattore, per gli edifici di 4 e 5 piani, sia predominante rispetto agli altri fattori illustrati precedentemente nel presente lavoro. Anche per gli edifici in muratura (Figura 17 d) si riscontra una diminuzione della dispersione dell'indice di sicurezza passando dagli edifici con un piano a quelli con più piani, ma la dispersione non si modifica sostanzialmente all'aumentare del numero di piani, come per gli edifici in c.a.

I grafici in Figura 17c e in Figura 17e dettagliano l'andamento medio degli indici di sicurezza per gli edifici siti in comuni classificati e non classificati. Sono evidenti alcune differenze tra gli indici di sicurezza degli edifici costruiti in assenza di classificazione e quelli degli edifici realizzati in comuni già classificati: in particolare, per gli edifici in c.a. progettati dopo la classificazione del comune si nota un trend leggermente decrescente all'aumentare del numero di piani; per quelli progettati prima della classificazione invece il trend è meno definito. In ogni caso la dispersione dei valori è molto alta. Per gli edifici in muratura, sebbene la riduzione del livello di sicurezza con l'aumentare del numero dei piani sia più evidente, è possibile notare un diverso andamento tra gli indici degli edifici

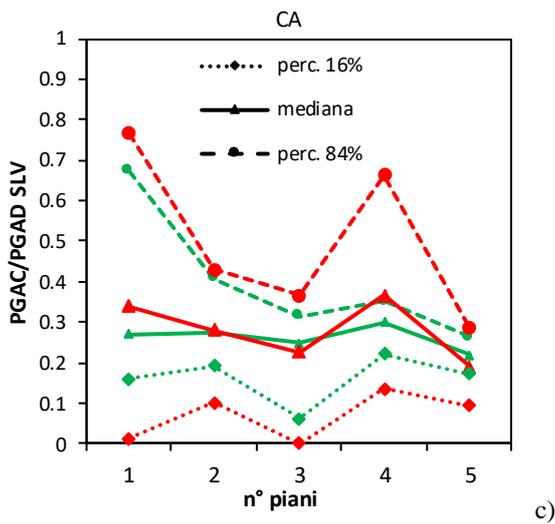
progettati prima della classificazione, che presentano un massimo in corrispondenza di un numero di piani pari a 2, e quelli degli edifici progettati successivamente alla classificazione, che invece presentano una netta riduzione della sicurezza al passaggio tra 1 e 2 piani. La dispersione dei dati si riduce in entrambi i casi all'aumentare del numero dei piani, mantenendosi in ogni caso molto elevata. A meno delle combinazioni comprendenti un numero di edifici particolarmente basso, la dispersione del campione non sembra avere correlazioni evidenti con la numerosità dello stesso.



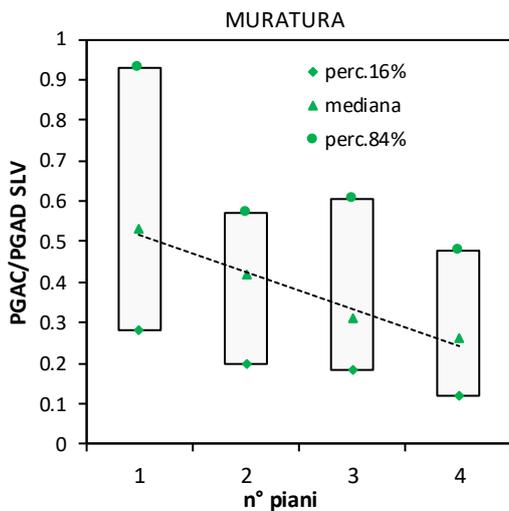
a)



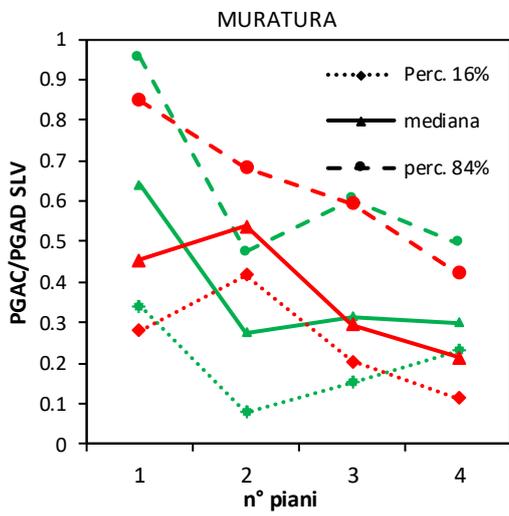
b)



c)



d)



e)

Figura 17. a) Numerosità del campione di edifici in c.a. e muratura distinti in funzione dell'epoca di progettazione rispetto alla data di classificazione sismica del comune in cui sono localizzate, utilizzato per le successive valutazioni riportate in figura; b) Andamento dell'Indice di sicurezza $PGAC/PGA_D$ in funzione del numero di piani per a) edifici in c.a., c) edifici in c.a. distinti a seconda della data di progettazione rispetto alla classificazione del comune (rosso ,antecedente; verde, successiva); d) edifici in muratura; e) edifici in muratura distinti a seconda della data di progettazione rispetto alla classificazione del comune (rosso ,antecedente; verde, successiva).

In Figura 18 è rappresentata la distribuzione statistica dell'indice di sicurezza in funzione del livello di conoscenza raggiunto. Ad una maggiore conoscenza della struttura corrispondono valori mediamente superiori dell'indice di sicurezza, con valori superiori in media del 20%, passando da LC1 a LC3. Il numero di edifici in LC3 è però molto contenuto.

È stata infine valutata l'influenza della metodologia di analisi sul valore del fattore di sicurezza delle strutture. Dall'esame della Figura 19 emerge, anche in questo caso, una sostanziale differenza tra edifici in c.a. e muratura. Gli edifici in c.a. verificati con il metodo dell'analisi statica lineare presentano valori mediamente più bassi di quelli verificati con l'analisi dinamica lineare e di quelli oggetto di verifica con l'analisi statica non lineare.

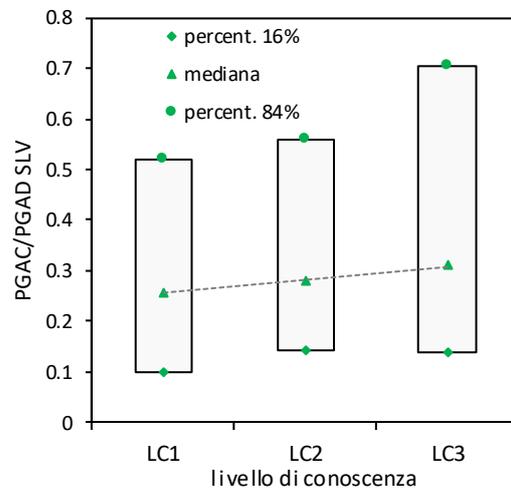


Figura 18. Andamento dell'indice di rischio al variare del livello di conoscenza della struttura.

Naturalmente i fattori che determinano ciò possono essere molti ma, considerando anche le restrizioni normative, si potrebbe ipotizzare che l'utilizzo di analisi più sofisticate possa essere associato ad edifici meglio organizzati dal punto di vista strutturale; ciò è particolarmente vero per gli edifici analizzati con analisi statica non lineare, per i quali la dispersione dell'indice di sicurezza è relativamente contenuta rispetto alla dispersione dell'indice di sicurezza degli edifici analizzati con analisi dinamica lineare. Con riferimento ai risultati ottenuti differenziando gli edifici in rapporto all'epoca di progettazione, per gli edifici in c.a. si nota come, sebbene il trend sia il medesimo (con incremento del livello di sicurezza al ridursi dell'età dell'edificio e con l'impiego di analisi maggiormente sofisticate) la dispersione dei risultati tenda ad aumentare per gli edifici più recenti. Non si riportano i dati relativi all'analisi statica lineare, per la ridotta significatività del risultato dovuta alla scarsa numerosità del campione.

Per quanto riguarda gli edifici in muratura, si segnala il basso valor medio dell'indice di sicurezza degli edifici analizzati con analisi dinamica lineare, rispetto all'indice di sicurezza medio associato alle analisi statiche non lineari. Tale differenza si attesta sul 40% circa e, considerate le caratteristiche geometriche degli edifici analizzati, si ritiene che possa essere associata essenzialmente a due fattori: le caratteristiche dinamiche degli edifici analizzati e la penalizzazione dei risultati delle analisi dinamiche lineari imposte dalla normativa, particolarmente evidenti per questa tipologia di edifici, rispetto al c.a. Dettagliando l'analisi in rapporto all'epoca di progettazione, viene confermata la maggior severità delle analisi dinamiche lineari, sebbene la tendenza per gli edifici più recenti sia meno evidente. In tutti i casi analizzati non sono riportati i valori relativi alle analisi dinamiche non lineari, per i quali, considerata l'esiguità del campione, non è stato possibile procedere ad un'analisi statistica significativa.

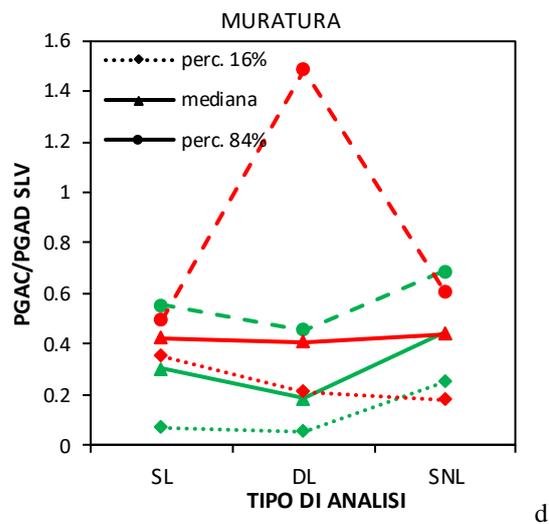
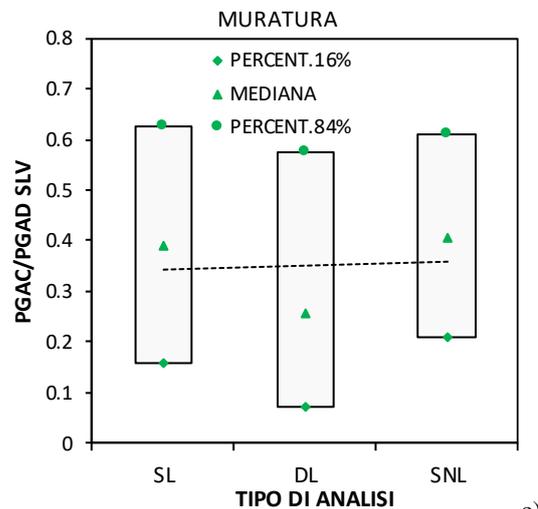
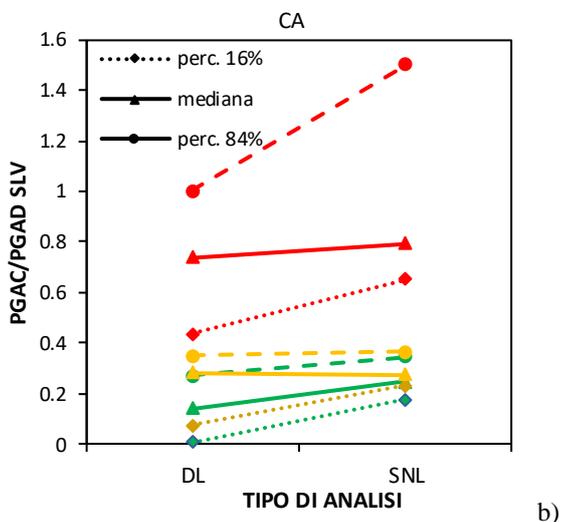
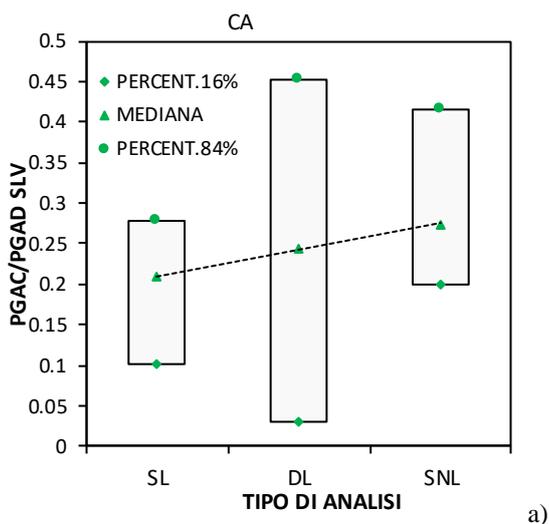


Figura 19. Andamento dell'Indice di sicurezza $PGAC/PGAD$ in funzione del tipo di analisi (SL statica lineare – DL dinamica lineare – SNL statica non lineare) condotta ai fini della verifica per: a) edifici in c.a.; b) edifici in c.a. progettati prima del 1972 (verde), tra il '72 e il 1996 (giallo), dopo il 1996 (rosso); c) edifici in muratura; d) edifici in muratura progettati prima del 1960 (verde) e dopo il 1960 (rosso).

4 CONCLUSIONI

La campagna di valutazione della vulnerabilità sismica delle scuole nella Regione Abruzzo, ancora in corso di completamento, rappresenta un indispensabile strumento programmatico per le istituzioni ai fini della predisposizione dei programmi di riduzione del rischio sismico del patrimonio costruito e nel contempo fornisce un quadro dettagliato sulle caratteristiche del patrimonio edilizio pubblico, di cui quello scolastico rappresenta una componente fondamentale. In generale emerge una elevata vulnerabilità sismica delle costruzioni adibite ad uso scolastico, che presentano un indice di sicurezza medio prossimo al 40%; circa il 90%

degli edifici inoltre presenta un indice di sicurezza inferiore al 60%, e ben al 30% circa del campione è associato un valore dell'indice inferiore al 20%. Meno dell'8% del campione possiede un indice di sicurezza superiore all'80%, che nell'aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018, viene indicato quale il livello minimo per considerare un edificio scolastico esistente adeguato. Emerge, inoltre, una minore vulnerabilità media delle scuole in muratura rispetto a quelle in c.a., soprattutto per quanto riguarda gli edifici progettati per soli carichi gravitazionali. Per gli edifici in c.a. assume rilevanza, nei confronti del livello di sicurezza sismica, il numero di piani dell'edificio, con un peggioramento delle condizioni di sicurezza all'aumentare del numero di livelli, a prescindere da altri fattori. Una non trascurabile influenza sui risultati della verifica, infine, è attribuibile alla tipologia di analisi condotta, soprattutto per gli edifici in muratura. Anche solo in termini statistici è possibile riscontrare la forte sensibilità dei risultati alle assunzioni effettuate sia in sede di progettazione della campagna di indagine, che delle scelte di modellazione, delle caratteristiche dell'analisi condotta e delle modalità di verifica. Tali valutazioni, di carattere discrezionale, pur nell'ambito delle prescrizioni ed in conformità alle disposizioni normative, risultando fortemente dipendenti dalla sensibilità, esperienza e competenza del professionista incaricato della verifica sismica dell'edificio e possono inficiare l'attività di comparazione dei risultati, indispensabile ai fini della definizione dell'attività programmatica a livello di area vasta, mostrando altresì una certa tendenza, da parte dei verificatori, a procedere con assunzioni particolarmente cautelative che, in alcuni casi, portano a risultati scarsamente rappresentativi delle reali capacità resistenti della struttura anche in termini di capacità statica.

Risulta pertanto, certamente auspicabile, in occasione di vasti programmi di valutazione della vulnerabilità sismica, come è il caso delle scuole di un'intera Regione, la predisposizione, da parte delle Amministrazioni che coordinano la campagna, di documenti specifici che possano definire determinati requisiti prestazionali legati alle attività di verifica, anche riducendo le possibilità di scelta consentite dalle Norme Tecniche delle Costruzioni per alcuni aspetti fondamentali, in modo da limitare il più possibile i margini di discrezionalità in merito alla tipologia della campagna di indagine e alla relativa interpretazione dei risultati, alla tipologia e alla accuratezza dell'analisi e della modellazione numerica, oltre che alle modalità di verifica e

rappresentazione dei risultati finali. Ciò, a fronte di una possibile minore rappresentatività dei risultati per pochi edifici con caratteristiche particolari, consentirebbe di predisporre graduatorie d'intervento più aderenti alle reali condizioni di sicurezza degli edifici, con maggiori possibilità di comparazione dei risultati.

Le analisi proposte acquisiscono particolare rilevanza in riferimento ai recenti eventi sismici che hanno interessato il patrimonio scolastico regionale, con il succedersi di eventi di forte intensità che hanno colpito l'area nord-occidentale della regione (L'Aquila, 2009; Centro Italia 2016-17), con risentimenti significativi su tutto il territorio regionale. In tale ambito, gli eventi occorsi costituiscono anche un'occasione di riscontro, con i dovuti limiti, dell'efficacia delle analisi di vulnerabilità condotte e saranno oggetto in futuro di trattazioni specifiche.

5 BIBLIOGRAFIA

- P.C. Regione Abruzzo 2008: "Scheda di sintesi della 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 di competenza della Regione Abruzzo"
<https://protezionecivile.regione.abruzzo.it/index.php/verifiche-sismiche-e-interventi-antisismici>"
- Decreto della Giunta regionale della Regione Abruzzo n. 438 del 29/03/2005.
- O.P.C.M. 3274 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" del 20/03/2003. G.U. 08/05/2003 Serie Generale n. 105
- DM 16/01/2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni.
- Circolare esplicativa C.S.LL.PP. n. 612 del 02/02/2019 alle Norme tecniche per le Costruzioni.
- D.M. 17/01/2018 "Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni.
- Pagano, M., 1968. Teoria degli Edifici: Edifici In muratura, Liguori Editore – Napoli
- Masi A. 2003. Seismic vulnerability assessment of gravity load designed RC frames. Bull Earthq Eng 2003;1(3):371–95.
- Masi, A., Vona M. 2012. Vulnerability assessment of gravity-load designed RC buildings: Evaluation of seismic capacity through non-linear dynamic analyses, Engineering Structures, **45**, 257–269
- M. Dolce e A. Martinelli (a cura di:) "Inventario e Vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia Centro-Meridionale", INGV-GNDT "Progetto SAVE", CNR-ITC (su CD-ROM), L'Aquila 2006
- Kunnath K.S., Hoffmann G., Reinhorn A.M., Mander J.B., 1995. Gravity load designed RC buildings – Part I: Seismic evaluation of existing construction. Aci Struct J; **92**(3):343–54
- Verderame, G.M., Manfredi, G., Frunzio, G., 2001. Le proprietà meccaniche dei calcestruzzi impiegati nelle strutture in cemento armato realizzate negli anni '60. X

- Convegno nazionale “L’Ingegneria Sismica in Italia”,
Potenza-Matera, 9-13 settembre 2001.
- Cristofaro, M.T., D’Ambrisi, A., De Stefano, M. Pucinotti,
R., Tanganelli, M. 2011. Analisi statistica sulla
dispersione dei valori della resistenza a compressione del
calcestruzzo prelevato da edifici esistenti. AIPnD – PnD
Congresso 26-28 Ottobre 2011 Firenze
- Blasi, G., De Luca, F., Aiello, M.A. 2018. Brittle failure in
RC masonry infilled frames: The role of infill
overstrength. *Engineering Structures*, **177**, 506–518.
- Eren, N., Brunesi, E., Nascimbene, R. 2019. Influence of
masonry infills on the progressive collapse resistance of
reinforced concrete framed buildings. *Engineering
Structures*, **178**, 375–394.