



Il ruolo delle prove dinamiche nella valutazione speditiva di vulnerabilità sismica di edifici strategici in cemento armato

Nicola Varriano^a, Carlo Rainieri^b, Danilo Gargaro^a, Giovanni Fabbrocino^b, Antonio Cardillo^c

^a S2X s.r.l., Piazzale Marcello Scarano 6, 86100 Campobasso, Italy

^b Università del Molise, Via F. De Sanctis, 86100 Campobasso, Italy

^c Dipartimento Protezione Civile Regione Molise, Contrada Selva del Campo, 86020 Campochiaro, Italy

Keywords: rilievo speditivo; prove dinamiche; edifici strategici; vulnerabilità sismica

ABSTRACT

Una larga parte del patrimonio costruito italiano consiste in edifici in cemento armato costruiti nel secolo scorso. Molti di questi edifici sono stati progettati sulla base di norme sismiche obsolete o addirittura senza portare in conto le azioni sismiche, anche per via dell'evoluzione nel tempo delle conoscenze sulla pericolosità sismica del territorio italiano e la conseguente evoluzione dei documenti normativi. Molte di quelle strutture, pertanto, risultano vulnerabili sismicamente. Il presente articolo descrive una procedura speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica in grado di ridurre la soggettività della valutazione attraverso l'integrazione nel processo dei risultati di prove dinamiche in condizioni operative. L'approccio proposto è stato applicato ad un campione di strutture strategiche in cemento armato costruite nel corso di varie decadi nel territorio della regione Molise. Particolare attenzione è stata dedicata alle strutture progettate in assenza di azioni sismiche ma che sono state assoggettate ad azioni sismiche nel corso della loro vita. I risultati ottenuti sono discussi evidenziando come la procedura proposta possa trarre vantaggio dai risultati delle prove dinamiche per migliorare l'accuratezza della valutazione speditiva di vulnerabilità sismica.

1 INTRODUZIONE

La valutazione speditiva della vulnerabilità sismica, cioè della propensione di una data struttura a subire un certo danno per effetto di un evento sismico di fissata intensità, è tradizionalmente argomento di grande interesse per la possibilità di effettuare analisi su larga scala. Nel presente articolo particolare attenzione viene prestata alla valutazione di vulnerabilità sismica a scala regionale di edifici strategici in cemento armato con finalità di protezione civile. Nel secolo scorso la maggior parte di questi edifici è stata realizzata in assenza di un'adeguata considerazione delle azioni sismiche e con dettagli costruttivi spesso carenti. Molto spesso, infatti, tali strutture sono state progettate e realizzate in assenza di una normativa sismica a causa della tardiva classificazione sismica del sito di appartenenza.

Le tecniche e i dettagli costruttivi di questi fabbricati, seppur adeguati e conformi alle normative vigenti all'epoca della realizzazione, risultano essere insufficienti alla luce delle attuali norme e tali da poter condizionare la capacità della struttura nei confronti dell'azione sismica.

Prima di procedere ad una impegnativa valutazione della sicurezza secondo il capitolo 8 delle NTC 2018, può essere opportuno effettuare uno screening speditivo per individuare, tra diverse strutture, quelle che presentano le maggiori criticità. Identificare le carenze strutturali consente di pianificare gli interventi di rafforzamento locale, miglioramento o adeguamento sismico, magari associandoli ad interventi di recupero già programmati o, al limite, modificando la destinazione d'uso della struttura al fine di renderla compatibile con le risorse di resistenza e duttilità che essa può esplicare in caso di evento sismico.

Nel corso dell'ultimo cinquantennio si è assistito allo sviluppo di diverse metodologie speditive per stimare la vulnerabilità del costruito. Alcuni Autori hanno evidenziato come queste metodologie possano essere classificate in funzione della scala (dal singolo edificio al territoriale), dei risultati (metodi diretti, indiretti, convenzionali, ibridi), del metodo con cui viene valutato l'edificio (meccanico, empirico, o basato sul giudizio degli esperti) o della misura (metodi quantitativi o qualitativi) (Dolce et al., 2005). Tra i metodi più diffusi vi è sicuramente la nota

procedura di analisi (Benedetti e Petrini, 1984) dalla quale sono derivate le schede di vulnerabilità del Gruppo Nazionale per la Difesa dai Terremoti (GNDT), mutate nelle attuali schede AeDES di valutazione dell'agibilità di un fabbricato (DPCM 8/7/2014, 2014). Altre metodologie sono quelle basate sulle matrici di probabilità del danno per tipologia costruttiva (Bernardini et al., 2007), sulla scala macrosismica europea EMS98 (Grünthal, 1998) o su analisi più dettagliate tramite modellazioni semplificate e simulazioni del comportamento dell'edificio (Lagomarsino e Giovinazzi, 2006). All'interno di questo variegato panorama si colloca il seguente lavoro.

L'approccio semplificato e speditivo realizzato opera in maniera essenzialmente qualitativa, sulla base di informazioni raccolte a vista e/o fornite dai proprietari/gestori dell'immobile, senza indagini sui materiali, sullo schema strutturale e sui dettagli costruttivi. Non si basa, quindi, sulla costruzione di un modello di calcolo e relative verifiche di sicurezza, ma su punteggi di vulnerabilità assegnati su base tipologica, in cui è molto importante il giudizio «esperto» del tecnico che esegue la visita. Tuttavia, l'integrazione nella metodologia dei risultati delle prove dinamiche consente di caratterizzare la risposta dell'edificio in maniera più oggettiva attraverso i modi di vibrare fondamentali e le relative frequenze naturali.

Obiettivo finale della procedura è rilevare palesi lacune di impostazione della struttura in termini di comportamento sismico in base all'età di progettazione e a fattori di vulnerabilità aggiuntivi che determinano l'opportunità - più o meno urgente - di eseguire una valutazione della sicurezza secondo norma. Questa metodologia, rapida e di facile applicazione, risulta scalabile e trasferibile in differenti contesti, salvo adattamenti all'evoluzione del quadro normativo nazionale e/o locale, e consente di fornire, su base speditiva, informazioni rilevanti ai fini della gestione e manutenzione del patrimonio costruttivo strategico.

2 METODOLOGIA E RUOLO DELLE PROVE DINAMICHE

2.1 Scheda di Rilievo Base (RB)

La definizione del protocollo speditivo di rilievo è stata eseguita facendo riferimento alla

letteratura scientifica riguardante le metodologie speditive di identificazione delle maggiori criticità del costruito. Nell'ambito del presente studio, sono state elaborate e validate delle schede di rilievo speditivo, definite di Livello Base (LB), riferite alle sole costruzioni in cemento armato, essendo questa la tipologia costruttiva ricorrente per gli edifici strategici della Regione Molise. E' stato in particolare impostato uno screening basato su indagini visive della compagine strutturale.

La scheda LB consta di dieci sezioni finalizzate alla raccolta di dati relativi all'esposizione e alla vulnerabilità sismica di edifici in calcestruzzo armato con funzioni strategiche ai fini della protezione civile. Le prime due sezioni riportano i dati identificativi della squadra dei rilevatori e dell'edificio, in termini di localizzazione e disponibilità di accessi/vie di fuga. Le sezioni 3 e 4 raccolgono i principali dati metrici e d'uso, utili anche a una quantificazione dell'esposizione in caso di evento sismico. La sezione 5 consente di definire la classe di età della costruzione e, dunque, la normativa vigente all'epoca della costruzione o, comunque, dell'ultimo intervento significativo. Questa informazione assume rilevanza fondamentale ai fini della valutazione dell'indice di prestazione, come meglio chiarito nel prosieguo. La sezione 6 consente una valutazione sommaria dello stato di conservazione di finiture e impianti. La sezione 7 è finalizzata alla raccolta delle principali informazioni di carattere strutturale con riferimento all'edificio in esame: tipo di struttura verticale (a telaio, a pareti, mista...), tipo di orizzontamenti, tipologia di scale (soletta rampante, trave a ginocchio...), distribuzione delle tamponature, presenza o meno di giunti efficaci dal punto di vista sismico, etc. La sezione 8 mira a raccogliere informazioni di base sul sottosuolo e sulle fondazioni.

Tali informazioni sono tipicamente reperibili da documenti progettuali o da studi di microzonazione sismica condotti sul territorio regionale. La sezione 9 consente di rilevare eventuali danni già presenti sulla struttura al momento del rilievo. Essi potrebbero essere indice di sofferenze strutturali sia in campo statico, sia a seguito di eventi sismici che potrebbero aver interessato la struttura nel corso della sua vita. La sezione 10 raccoglie informazioni rilevanti ai fini della valutazione della risposta sismica quali quelle relative alla

regolarità in pianta e in elevazione, alla forma della struttura e, quindi, indirettamente alle distribuzioni di massa e rigidità, alla presenza di piani pilotis ed elementi tozzi. La sezione 11, infine, riporta i risultati della caratterizzazione dinamica della struttura in termini di frequenza di vibrazione, rapporto di smorzamento e tipologia della forma modale, desunte da prove sperimentali condotte sulla struttura. I dati raccolti attraverso la scheda di rilievo vengono poi elaborati in uno alle principali risultanze dell'identificazione dei parametri modali.

2.2 Identificazione parametri modali

Dopo aver condotto una ricognizione dell'edificio oggetto di analisi ed aver identificato i caratteri strutturali che lo contraddistinguono si procede alla stima sperimentale dei parametri modali rilevanti per mezzo della registrazione ed elaborazione delle misure di vibrazione ambientale. L'architettura del sistema di misura è schematizzata in Figura 1. Esso si compone di una serie di sensori accelerometrici installati sulla struttura che ne registrano la risposta alle vibrazioni ambientali. Questi sono collegati ad una centralina di acquisizione ed un PC si occupa della gestione del sistema.

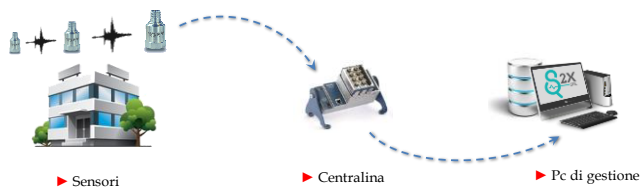


Figura 1. Architettura del sistema di misura.

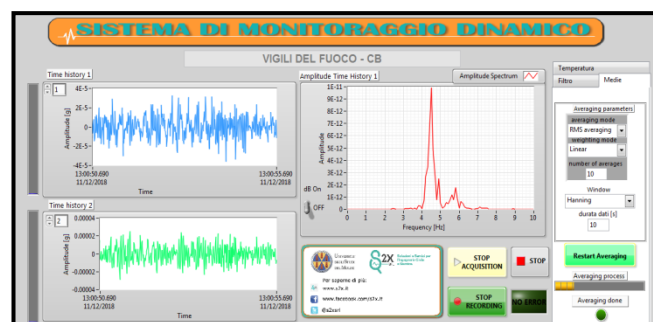


Figura 2. Schermata principale del software di acquisizione.

Per la misura della risposta strutturale, nell'ambito del presente studio sono stati impiegati sensori accelerometrici di tipo IEPE ad alte prestazioni con le seguenti caratteristiche: range di frequenza da 0,15 a 1000 Hz, risoluzione 0,000008 g rms, fondoscala ± 0.5 g pk e

sensibilità 10 V/g. Il sistema di acquisizione è caratterizzato da ADC sigma-delta a 24 bit di risoluzione, con campionamento simultaneo e filtro anti-aliasing integrato, con range dinamico superiore a 100 dB. La catena di misura così implementata ha consentito la misura accurata di vibrazioni anche di ampiezza molto piccola.

I dati provenienti dai sensori sono immagazzinati automaticamente ed in maniera continua per tutta la durata della prova su un PC dotato di software per l'acquisizione e lo stoccaggio dei dati. La schermata principale di tale software è visibile in Figura 2. Il numero e la posizione dei sensori variano in funzione della configurazione strutturale. Per ciascuna tipologia di struttura investigata, sono stati installati da un minimo di 4 sensori ad un massimo di 12 sensori, opportunamente disposti in modo da consentire l'osservabilità dei modi di vibrazione fondamentali.

Al fine di garantire l'accuratezza dei risultati sperimentali e valutarne la variabilità in condizioni operative, per ciascuna struttura è stata registrata la risposta alle vibrazioni ambientali per una durata di 7 giorni. I dati acquisiti sono stati successivamente elaborati al fine di identificare i parametri modali fondamentali della struttura monitorata attraverso software proprietario sviluppato in ambiente LabView.

Per quanto riguarda il pretrattamento, si è proceduto ad una preliminare classificazione e validazione dei dati (riconoscimento di anomalie quali clipping, spikes, drop-out; riconoscimento della presenza di armoniche spurie). Inoltre, sono stati rimossi eventuali offset e trend spuri. Le serie temporali, acquisite a una frequenza di campionamento di 100 Hz, sono state infine filtrate mediante un filtro passabanda di tipo Butterworth con ordine 6. Il range di filtraggio ed il fattore di decimazione della frequenza di campionamento utilizzati sono differenti per ciascuna struttura investigata. Per quanto riguarda l'elaborazione dei dati mediante metodi parametrici nel dominio del tempo, il numero di block-righe è stato impostato a valle di un'analisi di sensibilità finalizzata ad ottimizzare la qualità del risultante diagramma di stabilizzazione.

Per quanto riguarda la stima dei parametri modali, tra le numerose procedure di analisi implementate in applicativi proprietari da parte di S2X s.r.l. sono state selezionate come metodologie di analisi la Frequency Domain Decomposition e la Covariance Driven Stochastic

Subspace Identification. Una descrizione completa ed esaustiva delle tecniche di analisi citate è reperibile in letteratura (Rainieri e Fabbrocino, 2014). L'impiego di diverse metodologie alternative di analisi modale output-only rappresenta uno degli elementi chiave per il successo del processo di identificazione, insieme a un'elevata qualità delle misure e a un opportuno pretrattamento dei dati. Si riporta a titolo di esempio il grafico dei Valori Singolari in Figura 3 per una delle strutture oggetto di indagine.

In output alla fase di monitoraggio e analisi sperimentale della risposta strutturale sono state identificate frequenze, rapporti di smorzamento e forme modali dei modi fondamentali. Tali parametri condizionano da un lato l'entità dell'azione sismica sulla costruzione, dall'altro consentono un'immediata caratterizzazione del livello di regolarità strutturale.

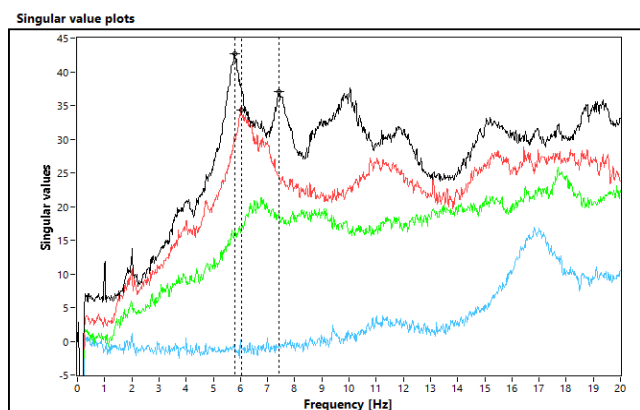


Figura 3. Diagramma dei valori singolari per una delle strutture oggetto di indagine.

2.3 Indice di Prestazione

Conclusa la fase di rilievo sul campo, basata sulla compilazione della scheda LB e l'esecuzione delle prove dinamiche, i dati e le informazioni raccolti sono impiegati per alimentare una procedura speditiva di valutazione della vulnerabilità sismica, ottenendo in output un "indice di prestazione" valutato per ogni edificio analizzato. La procedura è stata derivata in analogia con quanto riportato nelle Linee Guida della normativa neozelandese NZSEE2017 – The Seismic Assessment of Existing Buildings, in cui viene presentata una procedura semplificata per la valutazione della vulnerabilità sismica di un edificio - Initial Seismic Assessment (ISA). Essa consente di avere un'indicazione preliminare dei livelli di prestazione attesi di un edificio. Questa metodologia si basa su una procedura di valutazione speditiva implementata nella forma di fogli di calcolo, e fornisce una stima dell'indice

di sicurezza %NBS (livello percentuale di prestazione riferito agli edifici di nuova progettazione). La stima tiene conto, tra l'altro, in maniera qualitativa di tutti gli aspetti che influenzano la risposta e la prestazione sismica della struttura, aumentandone così il livello di rischio nei confronti della salvaguardia della vita (Pampanin S., 2017).

Nel presente studio l'indice di prestazione è quantificabile come rapporto tra la capacità della struttura e l'azione sismica che si utilizzerebbe nel progetto di una nuova costruzione secondo le NTC 2018. Come indicato nel vigente testo normativo "la costruzione riflette lo stato delle conoscenze al tempo della sua realizzazione": quindi, per valutare la capacità è stata considerata l'azione orizzontale prevista dalla normativa vigente all'epoca di realizzazione dell'opera con la quale, presumibilmente, è stata verificata la struttura. La capacità viene quindi considerata come equivalente a tale azione orizzontale che rappresenta la soglia minima di capacità che deve possedere la struttura per rispettare i dettami delle normative vigenti all'epoca di realizzazione. Quest'azione può essere rappresentativa del sisma, se il comune in cui ricade l'opera risultava classificato sismicamente all'epoca costruttiva, o del vento, se tale classificazione sismica non era ancora avvenuta.

In questo modo, attraverso la localizzazione del sito e dell'epoca costruttiva riferiti alla singola struttura, è possibile ricavare un valore nominale di tale "indice di prestazione" che viene successivamente modificato attraverso una serie di fattori raccolti attraverso la scheda di rilievo LB e attraverso le risultanze delle prove dinamiche. In particolare, la presenza di elementi tipologici associati a un incremento della vulnerabilità sismica (irregolarità strutturale, presenza di elementi tozzi, etc.) viene portato in conto attraverso una riduzione convenzionale della capacità portante.

In aggiunta agli elementi di vulnerabilità individuati attraverso la scheda di rilievo LB, la principale innovazione dell'approccio proposto rispetto alla procedura descritta in NZSEE 2017 consiste nell'integrazione nel processo di valutazione della vulnerabilità sismica dei risultati delle prove dinamiche. In particolare, il periodo fondamentale della struttura valutato su base sperimentale è stato impiegato per calcolare l'azione sismica di progetto secondo la normativa sismica vigente per la singola struttura; le forme

modali associate, inoltre, forniscono una valutazione semiquantitativa della regolarità strutturale, associata alla presenza di componenti torsionali più o meno significative.

La procedura è stata implementata in un programma di calcolo, che, partendo dai dati rilevati per un singolo edificio, consente di stimare un Indice di Prestazione della struttura riferito al Nuovo (secondo quanto riportato in NTC 2018) rispetto allo stato limite di salvaguardia della Vita (IP-NV).

Come già accennato, la capacità della struttura è posta equivalente alle azioni orizzontali utilizzate in fase di progetto dell'opera secondo i dettami della normativa vigente all'epoca di realizzazione. Per individuare l'anno e la normativa di riferimento per la classificazione sismica si è impiegato il software ECSit (Del Gaudio et al., 2015).

Le normative di riferimento a livello nazionale così individuate definiscono le classi costruttive indicate all'interno della scheda di rilievo LB. La domanda sismica è valutata secondo quanto previsto nelle NTC 2018 attraverso l'analisi statica lineare che schematizza l'azione sismica attraverso forze statiche equivalenti applicate ai vari livelli dell'edificio secondo una distribuzione triangolare. Dal confronto con le diverse norme selezionate risulta evidente come la procedura di calcolo dell'azione sismica ha subito continue modifiche nel corso dell'ultimo secolo. Risulta, quindi, necessario introdurre dei coefficienti di conversione da applicare al calcolo delle azioni sismiche, valutate con le precedenti normative, al fine di renderle confrontabili con quelle valutate secondo la normativa attualmente vigente.

La prima grande differenza tra le normative è rappresentata dall'approccio alla misura della sicurezza (tensioni ammissibili o metodo semiprobabilistico agli stati limite). Il metodo semiprobabilistico viene introdotto col D.M. 16 Gennaio 1996 dando la possibilità al tecnico di eseguire le verifiche sia in termini di tensioni ammissibili che agli stati limite. Nel passaggio dalla prima alla seconda metodologia vengono introdotti i cosiddetti coefficienti parziali di sicurezza per le azioni e le resistenze. Ne consegue che le azioni da utilizzare per la verifica nei confronti degli stati limite risultano essere circa $\gamma=1.5$ volte maggiori rispetto quelle valutate alle tensioni ammissibili. Allo scopo di renderli confrontabili con le indicazioni delle normative attuali, i parametri di intensità sismica forniti

dalle normative storiche basate sul metodo delle tensioni ammissibili sono stati amplificati attraverso il fattore sopra indicato.

Per il calcolo dell'azione sismica, la normativa vigente, in riferimento all'analisi statica lineare, fa riferimento ad una distribuzione triangolare delle forze statiche equivalenti, associate alle masse di piano. Questa distribuzione rispecchia in maniera semplificata l'andamento del primo modo di vibrare di una struttura regolare. Il passaggio da una distribuzione costante ad una triangolare è avvenuto nel corso degli anni, rendendo quindi necessaria l'introduzione di un fattore α che tenesse conto di questa differente distribuzione delle forze orizzontali. A parità di tagliante alla base, la distribuzione triangolare fornisce un momento ribaltante al piede maggiore rispetto a quello offerto dalla distribuzione costante. Il rapporto tra i momenti ribaltanti così generati aumenta all'aumentare del numero di piani fino ad un valore limite circa pari a $\alpha=1.33$. Questa valutazione può essere facilmente desumibile scrivendo il momento ribaltante in funzione del numero di piani, considerando l'altezza d'interpiano costante. Questo coefficiente è stato applicato a tutte le sollecitazioni sismiche calcolate con distribuzione costante per renderle confrontabili con la distribuzione triangolare definita dalla normativa vigente.

Nel corso dell'evoluzione normativa, il calcolo delle azioni sismiche ha subito una modifica anche per quanto riguarda le masse della struttura da considerare nell'analisi. La combinazione dei carichi prevista dalla normativa vigente per valutare gli effetti dell'azione sismica prevede la presenza dei pesi propri, strutturali e non, combinati con coefficiente unitario ai carichi variabili. A questi ultimi si applica invece un coefficiente legato alla tipologia d'uso dell'ambiente. Data l'ampia variabilità di questi coefficienti sia nell'ambito della vigente normativa che per effetto dell'evoluzione stessa della normativa sismica, per valutare il coefficiente β dato dal rapporto della massa sismica della normativa di riferimento all'epoca costruttiva rispetto quella calcolata con le NTC 2018 si è fatto riferimento ad un'unica tipologia di uso per il sovraccarico, valutando di volta in volta in che percentuale il carico da normativa storica si modificasse rispetto alla vigente normativa. L'applicazione di questo coefficiente consente di uniformare i carichi gravitazionali presenti nelle

normative storiche con quelli valutati secondo le NTC 2018.

Considerando, quindi, l'epoca costruttiva ed il comune di appartenenza della struttura, viene eseguito il calcolo dell'azione sismica, prevista all'epoca di realizzazione. Ove necessario, questa viene successivamente modificata attraverso i coefficienti γ , α e β per ottenere un'azione confrontabile con quella indicata nelle NTC2018.

Nel caso di un comune non classificato sismicamente, come azioni orizzontali di progetto sono state considerate quelle associate all'azione del vento, valutate attraverso manuali storici e normative tecniche dell'epoca costruttiva del fabbricato. Così come presentato per le azioni sismiche, anche le azioni del vento vedono la necessaria presenza di fattori correttivi per rendere tali azioni confrontabili con le azioni sismiche dettate dalla norma attuale. Valutato il tagliante complessivo dovuto all'azione del vento, per renderlo confrontabile con la domanda sismica, valutata con la normativa vigente, esso deve essere modificato tenendo in considerazione la massa e la distribuzione dell'azione lungo l'altezza dell'edificio.

In riferimento all'analisi statica lineare, l'azione sismica risulta essere dipendente dalla massa e distribuita in maniera triangolare lungo l'altezza dell'edificio. La modifica dell'azione del vento avviene, quindi, dividendo il tagliante per la massa della struttura, valutata ipotizzando un carico distribuito di 10 kN/m² per impalcato, e per il coefficiente α , che consente di ripartire l'azione in maniera triangolare. Da questa analisi si ricava l'azione di progetto che viene posta pari alla capacità della struttura, condizione necessaria per rispettare le indicazioni della normativa dell'epoca di costruzione dell'opera.

Il calcolo della domanda sismica avviene seguendo quanto previsto dalle NTC2018, valutando l'azione sismica dallo spettro elastico costruito attraverso le caratteristiche di sito. L'accelerazione spettrale è valutata entrando nello spettro con i periodi sperimentali ricavati dal monitoraggio della struttura. La fase di monitoraggio consente di ottenere dati relativi ai modi di vibrare della struttura con le frequenze ad essi associate. Queste frequenze portano in conto anche l'effetto irrigidente della tamponatura sulla risposta strutturale; la quantificazione di tale effetto è stata portata in conto in maniera semplificata attraverso l'impiego di un fattore correttivo, con l'applicazione di uno shift (in

aumento) del periodo sperimentale nella misura del 40% (Ricci et al., 2011). In tal modo si è soddisfatta l'esigenza di quantificazione del periodo della struttura nuda, in analogia con i metodi semplificati per il calcolo del periodo assunti a riferimento nelle normative storiche. In altri termini, il periodo misurato sperimentalmente viene amplificato per un fattore pari a 1,40.

Ottenuta la capacità della struttura, richiesta dall'azione orizzontale adottata in fase di progetto, e la domanda elastica derivata dall'applicazione delle metodiche fornite dalle NTC2018 si ricava l'Indice di Prestazione nominale (IP_n) della struttura, dato dal minimo rapporto tra capacità e domanda, calcolato per entrambe le direzioni principali del fabbricato.

La presenza di criticità strutturali può provocare una modifica della risposta e della prestazione sismica dell'edificio, aumentandone così il livello di rischio nei confronti della salvaguardia della vita. L'introduzione di un indice di penalizzazione, che va a ridurre l'indice di prestazione della struttura, consente di portare in conto tale problematica.

Tabella 1. Sintesi delle criticità valutate con effetto severo, significativo e non significativo.

Criticità struttura	
Irregolarità pianta	Rapporto dimensioni
	Effetti torsionali
	Forma pianta
Irregolarità verticali	Variazione massa
	Discontinuità verticali
Pilastri tozzi	
Martellamento	Piani sfalsati
	Differenze di altezza
Effetti di sito	Presenza frana
	Terreno liquefacibile

Le criticità valutate sono l'irregolarità in pianta, l'irregolarità in elevazione, presenza di pilastri tozzi, martellamento di edifici adiacenti e caratteristiche di sito quali presenza di frane e terreni liquefacibili. I relativi effetti sono portati in conto attraverso l'attribuzione di un punteggio che può assumere valore 0.6 nel caso in cui la criticità individuata abbia conseguenze severe sulla prestazione sismica complessiva del fabbricato, 0.8 se la prestazione è significativamente ridotta dalla criticità identificata, ed infine 1 in assenza di significativi effetti sulla risposta sismica della struttura. Sulla scorta di quanto riportato nell'Appendice

BA delle Linee Guida della normativa neozelandese NZSEE2017 – The Seismic Assessment of Existing Buildings – Part B, è stata formulata la Tabella 1 che, a partire dai dati raccolti nella scheda di rilievo LB e attraverso l'analisi della risposta dinamica della struttura in condizioni operative, consente di valutare per ogni criticità il possibile effetto sulla prestazione dell'edificio. Assegnato il grado di criticità per ogni voce e ottenuto, quindi, il punteggio di riferimento, l'indice di penalizzazione è dato dalla produttoria dei vari punteggi assegnati. Quest'indice di penalizzazione, unitamente all'assenza del principio di gerarchie delle resistenze (0,75) e alla presenza di dettagli costruttivi carenti rispetto la normativa vigente (0,75), ove applicabili, riduce la prestazione potenziale della struttura.

Moltiplicando i suddetti elementi per l'Indice

di Prestazione nominale si ottiene l'Indice di Prestazione rispetto al Nuovo riferito allo stato limite per la salvaguardia della Vita (IP-NV), che sarà dato sempre dal minore dei due indici valutati per le due direzioni principali della struttura. Per le strutture realizzate in assenza di normativa sismica, poiché l'azione del vento risulta spesso esigua, sono stati portati in conto nell'analisi anche gli effetti di terremoti, verificatisi in aree limitrofe, nel corso della loro vita. L'intensità dell'azione sismica ricevuta dipende dalle caratteristiche dell'evento sismico. Uno dei parametri descrittivi degli effetti dell'azione sismica è dato dalla PGA che può essere stimata attraverso leggi di attenuazione a partire dalla magnitudo dell'evento sismico e dalla distanza rispetto al sito. La base razionale di tale approccio è la medesima adottata per la definizione delle aree di esclusione degli

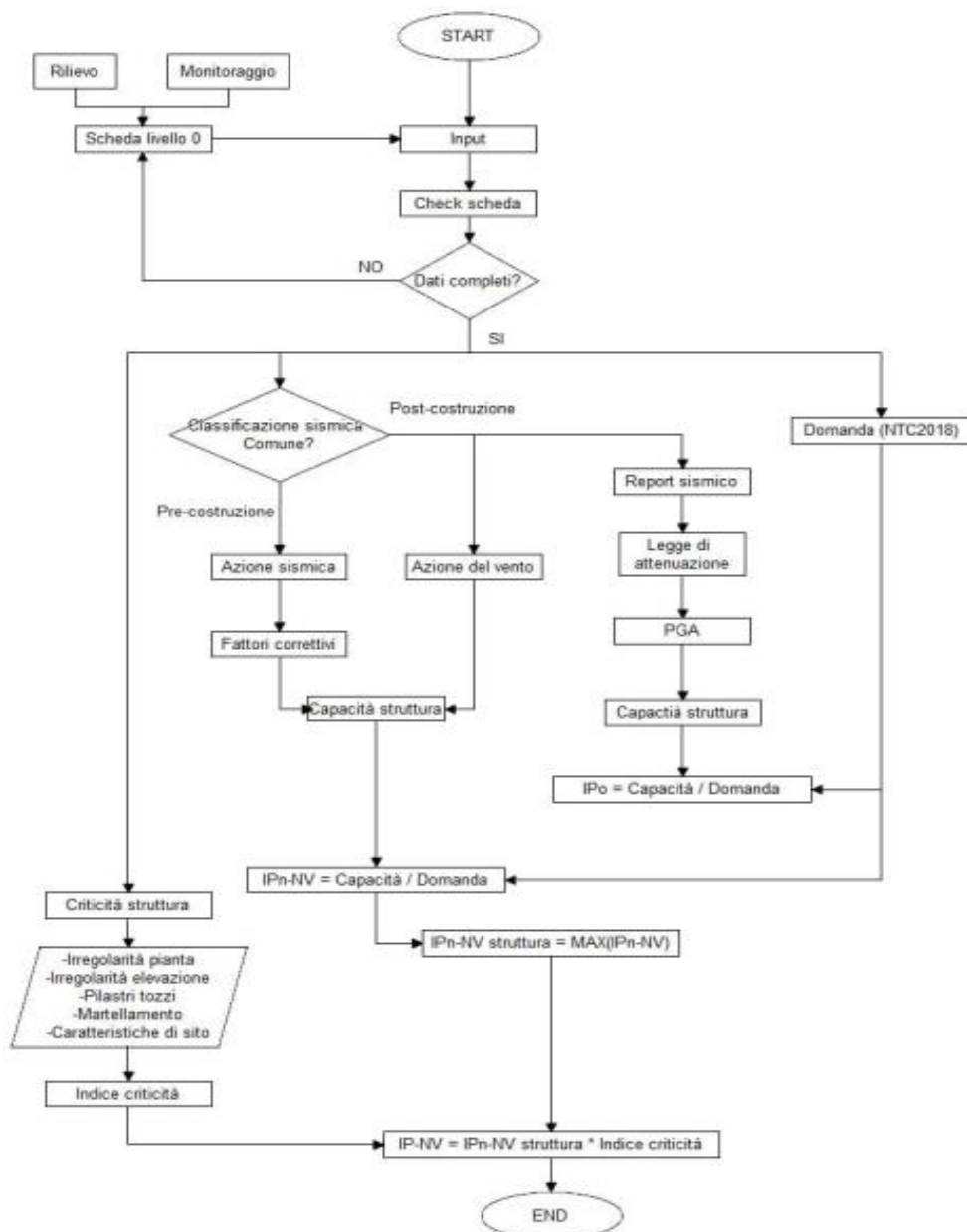


Figura 4. Flowchart della metodologia realizzata.

interventi di mitigazione del rischio sismico indicate in Emilia nella gestione dell'emergenza generata dalla sequenza sismica del 2012 (Braga et al., 2015). Nel dettaglio, partendo dalla localizzazione degli edifici oggetto di questo studio, tramite i database sismici disponibili come Emidius, si è ricavato un report sugli eventi sismici verificatisi dall'anno di costruzione del fabbricato ad oggi in un intorno di 100 km dal sito. Tramite leggi di attenuazione è possibile stimare la massima PGA giunta al piede dell'edificio esaminato. Quest'accelerazione viene utilizzata come ancoraggio dello spettro di normativa con il quale è stata valutata l'azione sismica subita dall'edificio, per effetto di quel sisma, così da riportare il tutto alla metodologia presentata. Tale azione è stata posta pari alla capacità osservata della struttura. Il rapporto tra capacità, così valutata, e domanda consente di definire un Indice di Prestazione osservato della struttura dipendente dalla massima azione sismica subita nel corso della sua vita.

Nella Figura 4 è presentato il flowchart che sintetizza la procedura realizzata per la valutazione dell'indice di prestazione della struttura.

La metodologia descritta è così sintetizzabile:

1. Rilievo speditivo e caratterizzazione criticità;
2. Definizione della capacità convenzionale della struttura da normativa di progetto;
3. Quantificazione degli effetti delle criticità osservate;
4. Definizione della capacità della struttura osservata per effetto di eventi sismici effettivamente occorsi;
5. Quantificazione della domanda convenzionale da NTC2018;
6. Valutazione dell'indice di prestazione riferito al Nuovo (IP-NV).

3 RISULTATI

Nell'ambito del progetto READINESS, Programma Interreg Italia – Croazia, è stata realizzata una campagna di monitoraggio strumentale, seguita da una stima speditiva della vulnerabilità e valutazione delle soluzioni di miglioramento sismico di edifici pubblici strategici sia dal punto di vista logistico che funzionale della Regione Molise. La valutazione dell'Indice di Prestazione rispetto ad un Nuovo edificio riferito allo stato limite della salvaguardia

della Vita (IP-NV) ha permesso di ottenere in maniera speditiva un'indicazione sulle prestazioni di tali edifici. Per consentire un rapido confronto tra le diverse strutture sono stati definiti tre livelli di prestazione associati ai seguenti intervalli dell'IP-NV:

- Prestazione bassa: $IP-NV \leq 33\%$, edificio altamente vulnerabile;
- Prestazione media: $33\% < IP-NV \leq 66\%$, edificio vulnerabile;
- Prestazione alta: $IP-NV > 66\%$, edificio a bassa vulnerabilità.

Nella Tabella 2 sono sintetizzati i risultati ottenuti per le diverse strutture analizzate in termini di indice di prestazione nominale (IPn) e di Indice di Prestazione rispetto ad un Nuovo edificio riferito allo stato limite di salvaguardia della Vita (IP-NV). Le criticità presenti sulle strutture nonché le carenze nei dettagli costruttivi, rispetto alla normativa vigente, e la mancata applicazione del principio di gerarchia delle resistenze nella progettazione degli edifici meno recenti, modificano la prestazione tra l'indice nominale e l'IP-NV.

Il quadro che si delinea evidenzia una prevalenza di edifici con prestazione ridotta dovuta principalmente alla vetustà delle strutture, molte delle quali realizzate in epoche in cui i Comuni di pertinenza non erano classificati sismici e, quindi, non vi era obbligo di progettazione sismica.

Tabella 2. Sintesi dei risultati ottenuti per le strutture analizzate.

Edificio	Comune	Anno	IP _n [%]	IP-NV [%]	Prestazione
01 - Questura	Isernia	2003	121.5	86.8	ALTA
02 - Caserma Guardia di Finanza	Isernia	1937	18.5	9.2	BASSA
03 - Caserma dei Carabinieri - Corpo A	Isernia	1975	84.5	14.1	BASSA
04 - Caserma Carabinieri Forestali - Corpo B	Isernia	1986	130.6	58.8	MEDIA
05 - Caserma Vigili del Fuoco - Corpo B	Isernia	1996	104.8	78.6	ALTA
06 - Caserma Guardia di Finanza - Corpo B	Venafro	2005	115.6	84.4	ALTA
07 - Caserma dei Carabinieri	Termoli	2008	100.0	100.0	ALTA
08 - Ex Inapli - Corpo A	Campobasso	1937	4.7	4.7	BASSA
09 - Caserma Guardia di Finanza	Termoli	1962	4.9	4.9	BASSA
10 - Commissariato di Polizia	Termoli	1986	5.5	5.5	BASSA
11 - Caserma Guardia di Finanza	Larino	2005	94.4	67.4	ALTA
12 - Centro Operativo Comunale - Corpo C	Isernia	1975	71.7	16.1	BASSA
13 - Sala Operativa Regionale di Protezione Civile	Campochiaro	1996	82.0	61.5	MEDIA
14 - Palazzo della Giunta Regionale	Campobasso	1975	1.2	1.2	BASSA
15 - Questura - Corpo A	Campobasso	1975	0.9	0.9	BASSA
16 - Caserma Guardia di Finanza	Campobasso	1996	108.8	49.0	MEDIA
17 - Caserma Vigili del Fuoco - Corpo A	Campobasso	1981	130.2	58.6	MEDIA

Risulta doveroso precisare che tale indice discende dal solo confronto tra normativa vigente all'epoca della costruzione rispetto a quella attuale. Questo si traduce in una prestazione potenziale dell'edificio probabilmente superiore a quella così valutata. Infatti, stimando le azioni sismiche a cui storicamente è stato assoggettato un dato edificio nel corso della propria vita, si

ottiene un indice di prestazione associato all'evento sismico effettivamente verificatosi rispetto a quello previsto dalla normativa attualmente vigente. La Tabella 3, in particolare, mostra come tale indice di prestazione osservato (IPo) risulti superiore all'IP-NV per quelle strutture progettate per le sole azioni del vento e in assenza di normativa sismica, essendo esso legato all'effettiva capacità della struttura.

Tabella 3. Indice di prestazione osservato per gli edifici non progettati sismicamente.

Edificio	Comune	Anno	IPo [%]	Prestazione
08 - Ex Inapli - Corpo A	Campobasso	1937	24.3	BASSA
09 - Caserma Guardia di Finanza	Termoli	1962	33.9	MEDIA
10 - Commissariato di Polizia	Termoli	1986	34.6	MEDIA
14 - Palazzo della Giunta Regionale	Campobasso	1975	22.2	BASSA
15 - Questura - Corpo A	Campobasso	1975	22.8	BASSA

4 CONCLUSIONI

Nel presente articolo è stata descritta una procedura speditiva per la valutazione di vulnerabilità sismica di edifici strategici in cemento armato. La procedura proposta opera in maniera essenzialmente qualitativa, sulla base di informazioni, di affidabilità non nota, raccolte a vista e/o fornite dai proprietari/gestori dell'immobile, senza indagini sui materiali, sullo schema strutturale e sui dettagli costruttivi. Non si basa quindi sulla costruzione di un modello di calcolo e relative verifiche di sicurezza, ma su punteggi di vulnerabilità assegnati su base tipologica, in cui è molto importante il giudizio esperto del tecnico che esegue la visita. Tuttavia, l'integrazione nella metodologia dei risultati delle prove dinamiche consente di caratterizzare la risposta dell'edificio in maniera più oggettiva attraverso i modi di vibrare fondamentali e le relative frequenze naturali.

Obiettivo finale della procedura è l'identificazione di palesi lacune di impostazione della struttura in termini di comportamento sismico in base all'età di progettazione e a fattori di vulnerabilità aggiuntivi che determinano l'opportunità - più o meno urgente - di eseguire una valutazione della sicurezza secondo norma. Questa metodologia, impiegata su un numero consistente di edifici strategici ricadenti nel territorio della regione Molise, può fornire supporto alla pianificazione e gestione degli interventi su scala regionale definendo diversi gradi di priorità. L'approccio risulta, inoltre, scalabile e trasferibile in differenti contesti, salvo adattamenti all'evoluzione del quadro normativo nazionale e/o locale.

RINGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato condotto nell'ambito del progetto Resilience Enhancement of Adriatic basin from fire and Seismic hazards, READINESS, Programma INTERREG Italia-Croazia.

BIBLIOGRAFIA

- Benedetti D., Petrini V., 1984. Sulla vulnerabilità sismica di edifici in muratura: proposte di un metodo di valutazione, *L'Industria delle Costruzioni*, **149**, 66-74.
- Bernardini A., Giovinazzi S., Lagomarsino S., Parodi S., 2007. Matrici di probabilità di danno implicite nella scala EMS-98. *XII Convegno ANIDIS "L'ingegneria sismica in Italia"*, 10-14 giugno, Pisa.
- Braga F., Gigliotti R., Monti G., Morelli F., Nuti C., Salvatore W., Vanzi I., 2015. Post-seismic assessment of existing constructions: Evaluation of the shakemaps for identifying exclusion zones in Emilia. *Earthquake and Structures*, Volume 8, Issue 1, pag. 37-56.
- DPCM 8/7/2014, 2014. Manuale per la compilazione delle schede di 1° livello di rilevamento danno, pronto intervento e agibilità per edifici ordinari nell'emergenza post-sismica (AeDES). Seconda Edizione a cura di M. Dolce, F. Papa, Angelo G. Pizza, Roma.
- Del Gaudio C., Ricci P., Verderame G. M., 2015. Evoluzione della Classificazione Sismica Italia (ECSit). http://www.reluis.it/index.php?option=com_content&view=article&id=399&Itemid=185&lang=it.
- Dolce M., Martinelli A., 2005. Progetto SAVE – Task 2 – Inventario e vulnerabilità degli edifici pubblici e strategici dell'Italia centro-meridionale. *Vol. II - Analisi di vulnerabilità e rischio sismico*, L'Aquila.
- Grünthal G., 1998. European Macroseismic Scale 1998. *ESC European Seismological Commission, Subcommission on Engineering Seismology, Working Group Macroseismic Scales*, Lussemburgo.
- Lagomarsino S., Giovinazzi S., 2006. Macroseismic and mechanical models for the vulnerability and damage assessment of current buildings. *Bulletin of Earthquake Engineering*, **4**, 415-443.
- NTC 2018. DM 17 gennaio 2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni. G.U. n. 42 del 20 febbraio 2018.
- NZSEE, 2017. The Seismic Assessment of Existing Buildings – Technical Guidelines for Engineering Assessments – Part B – Ministry of Business Innovation and Employment, The New Zealand Government.
- Pampanin S., 2017. Valutazione della vulnerabilità, classificazione sismica, strategie di rinforzo e riduzione del rischio sismico di edifici esistenti in calcestruzzo armato - metodologie di valutazione della vulnerabilità e classificazione sismica. *Structural*, **211**, maggio/giugno 2017.
- Rainieri C., Fabbrocino G., 2014. Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: An Introduction and Guide for Applications. Springer, New York.
- Ricci P., Verderame G.M., Manfredi G., 2011. Analytical investigation of elastic period of infilled RC MRF buildings. *Engineering Structures*, **33**, 308-319.