



NORMATIVA, MODELLAZIONE, REALTA' **Riflessioni sulle prestazioni degli edifici in muratura, la normativa cogente ed i costi di adeguamento sismico**

Marco Cagelli

Ingegnere, libero professionista
marco.cagelli@arinstudio.it

Maurizio Colombo

Ingegnere, libero professionista
maurizio.colombo@mcingegneria.com

Enrico Devoto

Ingegnere, libero professionista
enricodevoto94@gmail.com

SOMMARIO

L'articolo è il seguito del contributo "Normativa, modellazione, realtà. Studio su quattro edifici in muratura interessati dal sisma del centro Italia del 2016" (Structural 231). In questo lavoro sono stati sviluppati alcuni casi che non trovano piena rispondenza nelle attuali Norme Tecniche; sulla base delle banche dati della Protezione Civile (schede AeDES), sono trattate considerazioni sulla rilevanza della "disgregazione muraria" in relazione alla sicurezza sismica e agli interventi di consolidamento proposti dalle NTC. Vengono altresì proposte riflessioni sugli attuali parametri di analisi adottati dalla Normativa vigente riguardanti gli edifici esistenti in muratura, sia per quanto riguarda le azioni sismiche che per il comportamento statico. Si evidenzia in particolare che il comportamento di tali edifici è spesso in entrambi i casi migliore rispetto a quello atteso applicando alcune delle regole inserite nelle NTC. L'attenzione è in particolare rivolta ai professionisti che hanno il compito, nonché il dovere, di impiegare e ottimizzare in modo consapevole le risorse economiche stanziare per l'attività di *prevenzione*.

ABSTRACT

REGULATION, MODELLING, REALITY

Considerations on the performance of masonry buildings, binding legislation and the costs of seismic adjustment

This article is the following of the contribution "Regulation, modelling, reality. Study on four masonry buildings involved by the earthquake of central Italy of 2016" (Structural 231). In this work some cases which do not match with the current regulation have been developed; relying on the Protezione Civile databases (AeDES forms), considerations have been carried out on "masonry disaggregation" related to seismic safety and on consolidation interventions proposed by NTC. Furthermore, they are proposed considerations on the current analysis parameters related to existent masonry buildings prescribed by the regulations, both for seismic and static behavior. It should be noticed that the behavior of such structures, in both cases, is often better with respect to the one foreseen applying the code prescriptions. Focus is on professionals, whose have the assignment and the duty to employ and optimize in a conscious way the economic resources allocated for prevention activity.

PAROLE CHIAVE | KEYWORDS

Muratura, Edifici esistenti, Terremoto Centro Italia 2016, Scheda AeDES, Modellazione EF muratura, Next Generation EU

Masonry, Existent buildings, Central Italy earthquake 2016, Scheda AeDES, FE masonry modelling, Next Generation EU

RINGRAZIAMENTI | ACKNOWLEDGMENT

Si ringrazia il Prof. Claudio Chesi del Politecnico di Milano per il supporto e l'Ing. Ylenia Anzilotti per il contributo alla stesura del presente lavoro.

PREMESSA

Il presente contributo si pone a continuazione dell'articolo pubblicato sul numero 231 di Structural "Normativa, Modellazione, Realtà, Studio su quattro edifici in muratura interessati dall'evento sismico del Centro Italia del 2016", nel quale è stato introdotto il problema della trattazione degli edifici esistenti in muratura in zona sismica.

Gli argomenti trattati in questo articolo affrontano:

- il tema delle evidenze raccolte durante l'attività professionale e nella letteratura storica in merito al comportamento globale degli edifici in muratura;
- alcune considerazioni per migliorare la valutazione del comportamento degli edifici con struttura in muratura;
- le responsabilità generali di ricercatori, professionisti ed Enti Normativi nei confronti degli oneri di ricostruzione e/o adeguamento del patrimonio edilizio.

Gli eventi sismici in Italia hanno comportato gravi perdite di vite umane e pesanti riflessi sociali, economici e culturali. Dopo un lungo dibattito scientifico, che ha prodotto una notevole quantità di studi ed analisi, è finalmente risultata condivisa da tutti la necessità di un'azione legislativa di *prevenzione* il cui riflesso normativo è stato l'introduzione del "Sismabonus" e, più recentemente, il cosiddetto "Superbonus 110%" (DL 19 Maggio 2020 - "Decreto Rilancio"). Questi strumenti finanziari, finalizzati al patrimonio edilizio, vanno contestualizzati e considerati nell'ambito delle risorse generali necessarie al riassetto del Paese, che implicano altre voci di spesa dello Stato in ricerca, cultura, scuola. Ne deriva una necessità di ottimizzazione degli stanziamenti previsti, per impiegarli al meglio in ciascun settore.

A tal fine servono dati, metodi e procedure con scarsa aleatorietà. Tuttavia l'analisi delle schede Aedes post sisma del centro Italia, oltre alle situazioni che ogni tecnico incontra nella sua vita professionale, dimostra con evidenza che nella maggior parte dei casi il comportamento delle murature non è compiutamente rappresentato e previsto dalle attuali normative di riferimento.

La quantità di studi relativi a questo argomento è considerevole nonché autorevole, ma non ha ancora trovato un riscontro nell'attuale disciplina tecnica ed una sua successiva applicazione pratica. In buona sostanza la ricerca da sola non è sufficiente e deve essere tradotta in normativa o in linee guida nazionali, che autorizzino ed indirizzino i professionisti nell'uso delle tecniche più recenti ed accurate, per impedire ulteriori catastrofi come quelle avvenute nel recente passato (L'Aquila 2009, Emilia 2012 e Centro Italia 2016), pur nel mantenimento di un adeguato equilibrio tra i livelli di sicurezza prefissati e gli stanziamenti necessari.

In questo studio emerge come le attuali Normative spesso non mettano in condizione il professionista di cogliere le reali capacità delle strutture in muratura, né in positivo (muratura a tessitura regolare realizzata a regola d'arte) né in negativo (murature di cattiva qualità con tendenza alla disgregazione), con una conseguente "omogeneizzazione" degli interventi anche dal punto di vista dell'invasività, sia nel caso di edifici di scarsa qualità, sia per edifici di ottima esecuzione. Questo conduce a un conseguente impiego di risorse, pubbliche e private, senza adottare un criterio preciso e con un evidente squilibrio nelle spese.

STUDI ED ESPERIENZE

La comunità scientifica che si occupa dell'analisi delle murature esistenti, ha prodotto nel corso di questi ultimi anni molti documenti, fondamentali per la comprensione dei fenomeni che regolano il loro comportamento. Se infatti trattati sulle murature e descrizioni empiriche del loro comportamento e delle prestazioni dei materiali sono numerosissimi nella storia delle costruzioni [1][5], le ricerche scientifiche sui manufatti¹ sono molto più recenti e limitate agli ultimi 40 anni.

Gli studi hanno preso spunto dall'osservazione empirica dei fenomeni causati dagli eventi sismici, ciclicamente interessanti il nostro territorio, che forniscono un supporto statistico di assoluto rilievo ed oggettività.

Molte delle risultanze più significative degli studi effettuati fanno ormai parte del bagaglio culturale diffuso dei professionisti impegnati nel settore, tra le quali:

- l'importanza del comportamento scatolare dell'edificio;
- gli effetti negativi delle irregolarità planimetriche e in elevazione sulla stabilità degli edifici;
- la rilevanza dei dettagli costruttivi di accoppiamento tra i componenti strutturali;
- l'influenza della tipologia muraria e delle tipologie d'impalcato;
- l'importanza di definire con esattezza la tipologia delle murature e di comprendere il comportamento globale atteso dell'unità strutturale.

Tutti questi aspetti sono generalmente definibili come macrosismici ed identificano il comportamento dell'edificio sottoposto ad azioni cicliche, indirizzando anche l'implementazione delle modellazioni numeriche più adatte ad interpretarlo sia dal punto di vista globale (FEM [6][7][8]) che locale (Cinematismi).

Altri studi e valutazioni sono invece di minore diffusione e non ancora entrati a far parte di un patrimonio culturale diffuso; a questa sfera appartengono le considerazioni sul fenomeno della disgregazione muraria [9][17] e le valutazioni circa la corrispondenza tra le previsioni di modellazione e la verifica degli edifici, con il reale comportamento esibito in occasione dei fenomeni sismici. [10].

LA DISGREGAZIONE MURARIA NELLE RISULTANZE DELLE SCHEDE AeDES

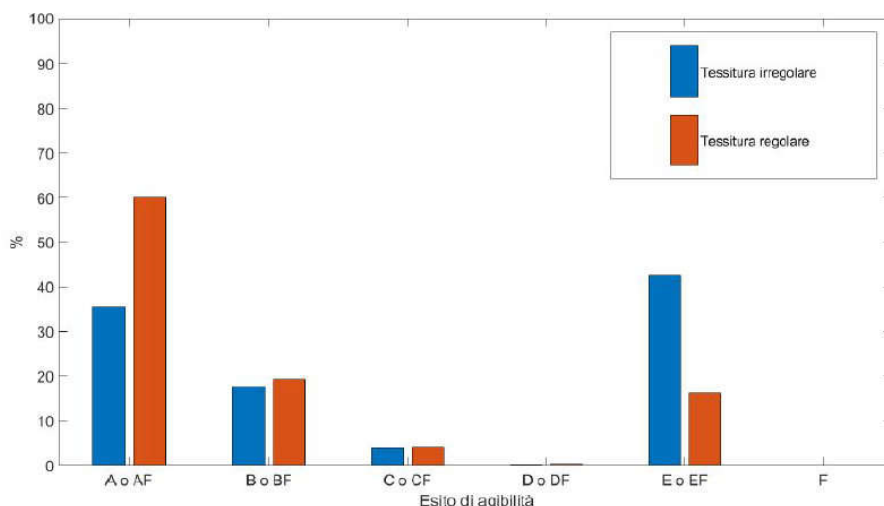
La rilevanza dell'effetto disgregativo in relazione alla sicurezza delle unità strutturali, descritto in molte trattazioni del Prof. Borri [9] riferite ad esempio agli edifici situati a Norcia a seguito dell'evento del 2016, è confermata dall'analisi statistica condotta sulle schede AeDES, compilate in occasione del sisma del Centro Italia del 2016 [10]; nel campione analizzato di oltre 80000 schede, si è rilevata una prevalenza di edifici in muratura (oltre 60000): quelli a tessitura irregolare, che si può presumere abbiano la tendenza alla disgregazione muraria, risultano il 47% del totale degli edifici in muratura sottoposti a giudizio di agibilità (tabella 1).

Tabella 1. Tipologia degli edifici in muratura campionati attraverso le schede AeDES.

Muratura	n° edifici	%
Tessitura irregolare e di cattiva qualità	28751	47.04
Tessitura regolare e di buona qualità	24665	40.36
Mista o non identificata	7698	12.60

Di questi il 42.5% è risultato totalmente inagibile (esito E o EF), e in molti casi ha esibito fenomeni di disgregazione.

Al contrario, come si evince dal grafico (figura 1), gli edifici a tessitura regolare e di buona qualità non hanno in genere comportamenti disgregativi, ma tendono a mostrare una buona risposta (esito A) ed un buon comportamento globale (scatolare). Gli edifici che hanno subito crolli sono quasi esclusivamente della tipologia muraria a tessitura irregolare, a ulteriore riprova della sensibilità di tale tecnica costruttiva alle azioni sismiche.



1. Esiti di agibilità degli edifici in muratura a tessitura irregolare e regolare

Dal punto di vista fisico la disgregazione muraria è un fenomeno per il quale l'elemento di muratura perde la sua monoliticità a causa dell'espulsione dei blocchi portanti dalla propria posizione; in buona sostanza, l'elemento perde la propria forma e di conseguenza non è in grado di sviluppare alcun tipo di meccanismo resistente.

Questo fenomeno è stato oggetto di molti articoli tecnici, tra i quali il contributo del prof. Borri in numerose pubblicazioni nel corso degli ultimi 15/20 anni [9][16][17] ed è anche descritto nelle evidenze dell'ultimo sisma riscontrate dai tecnici IPE comparso sul Giornale dell'Ingegnere del settembre 2017 [11].

A tale proposito si riportano due immagini che si ritengono assolutamente esplicative del fenomeno:

- la figura 2 ritrae la facciata di un edificio dove sono stati espulsi i blocchi murari senza che si siano rotti i vetri delle finestre, mettendo in discussione la nostra scala di giudizio sulla fragilità dei materiali.
- la figura 3 mostra invece un'immagine presa dall'alto delle macerie a seguito del sisma, e del loro aspetto dove non si distinguono componenti strutturali organici (pilastri/travi/solai), ma solo un ammasso informe di blocchi lapidei e malte completamente disarticolate.



2. I telai delle finestre sono integri ed anche i loro vetri; attorno la muratura si è disarticolata e crollata. Risultano completamente ribaltate le scale di fragilità che abbiamo in mente (Montegallo, AP).
3. Aspetto delle macerie viste dall'alto (Pescara del Tronto, AP).

Le sensazioni empiriche ricavate dagli "agibilitatori" nel corso della stesura delle schede AeDES e scientificamente sostanziate dagli studi condotti dal prof. Borri, portano ad identificare per le strutture murarie la possibilità di esibire ben tre comportamenti in risposta alle azioni sismiche, elencate nell'ordine gerarchico proposto dall'autore, in quanto ciascuno di questi impedisce lo sviluppo dei successivi:

- Tipo 0: Disgregazione muraria
- Tipo 1: Comportamento locale
- Tipo 2: Comportamento globale



4a,b,c. Tipologie di risposta sismica degli edifici in muratura.

Il comportamento disgregativo è proprio delle murature a tessitura irregolare, mentre gli altri due tendono a svilupparsi in apparati murari di maggiore qualità, tra cui le murature in mattoni pieni e quelle in blocchi squadrati.

Le modalità di attuazione del fenomeno, unitamente agli effetti del degrado, possono essere rappresentate nei due schemi limite descritti nelle tabelle 2 e 3, riportati per le murature di mattoni pieni e per quelle di tipo irregolare con blocchi tondeggianti, tipici di molte delle zone colpite dal terremoto del 2016 [10].

Tabella 2. Comportamento al degrado di murature in mattoni pieni.

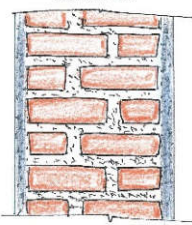
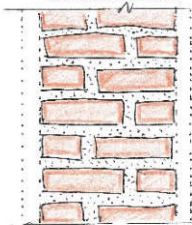
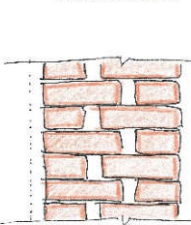
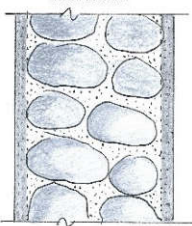
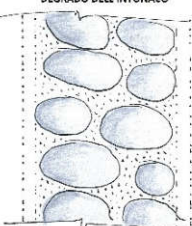
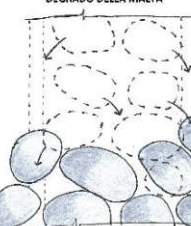
STATO DI FATTO	DEGRADO DELL'INTONACO	DEGRADO DELLA MALTA
		
Composizione Iniziale:	Mattoni / Malta / Intonaco	
Degrado dell'intonaco:	Mattoni e malta stanno in posizione per la loro forma	
Asportazione malta:	I mattoni si compattano mantenendo la forma	
In buona sostanza le murature di mattoni possiedono una stabilità intrinseca che è data dalla forma orizzontale dei contatti. Il crollo o il danneggiamento avviene se le azioni di compressione o di taglio sono superiori alle relative resistenze.		
Possono quindi applicarsi metodi di analisi locale o globale.		

Tabella 3. Comportamento al degrado di murature irregolari.

STATO DI FATTO	DEGRADO DELL'INTONACO	DEGRADO DELLA MALTA
		
Composizione Iniziale:	Pietre / Malta / Intonaco	
Degrado dell'intonaco:	Le pietre esercitano sulla malta forze radiali che non hanno contrasto all'esterno; vi è una prima possibilità di perdita di stabilità della parete anche per le sole forze statiche.	
Asportazione malta:	Le pietre rotolano una sull'altra e crollano; il sisma accelera questa evenienza	

Questo **effetto disgregativo** è assolutamente paragonabile, per importanza ed effetti catastrofici, alla **liquefazione dei terreni**, laddove la sospensione dei granuli del terreno priva lo stesso dei suoi parametri geotecnici primari (ϕ e coesione) che ne regolano la resistenza.

Riflessi normativi

Come evidenziato nei paragrafi precedenti e, soprattutto, nella realtà effettiva dei comportamenti murari riscontrati nel corso degli ultimi terremoti che hanno investito l'Italia Centrale, gli aspetti legati alla disgregazione della muratura meritano un'attenzione primaria essendo alla base di ogni altra possibile valutazione numerica in ordine alla resistenza degli edifici esistenti.

Occorre però rilevare che le attuali normative dedicano uno spazio ed un'attenzione che sembra invece inversamente proporzionale alla loro pericolosità; grande risalto

viene infatti riservato allo studio del comportamento globale, in maniera più ridotta viene trattato quello locale (pur attribuendogli il giusto peso), mentre quasi nessun cenno viene riservato al comportamento disgregativo.

Il fenomeno disgregativo, infatti, non viene mai citato nel DM 17/01/2018, mentre si trovano solo due cenni nella Circolare n° 7 del 2019 (capp. 8.5.3.1 e 8.7.1.2.1), peraltro senza alcun approfondimento in merito.

*"Infine, si segnala la necessità di una preventiva verifica che il paramento non evidenzii un'eccessiva **disgregazione** o presenza di vuoti, tale da rendere inefficace l'accoppiamento con l'intonaco armato..." (cap. 8.5.3.1 nei riguardi degli interventi con intonaco armato)*

*"La rappresentazione della struttura come catena cinematica di corpi rigidi è attendibile solo se la parete non è vulnerabile nei riguardi di fenomeni di **disgregazione**" (cap 8.7.1.2.1 nei riguardi del comportamento locale)*

In sostanza la normativa mette a conoscenza i tecnici del fenomeno della disgregazione muraria, ma non propone soluzioni per la trattazione del problema, né fornisce metodi per definire quando gli edifici possano presentare questa grave problematica. La Circolare al C8.5.2.1 sottolinea l'importanza della conoscenza della composizione degli elementi costruttivi e delle caratteristiche dei collegamenti, ma poi ammette la possibilità di fermarsi ad indagini limitate, dimenticando in sostanza la disgregazione.

Viceversa, i comportamenti globali e locali sono ampiamente trattati in Normativa (cap. 8.7.1 Circolare n° 7 2019), perciò il tecnico progettista di un intervento propenderà ad assumere questi due aspetti alla base della comprensione del comportamento dell'edificio, in quanto la normativa stessa ne suggerisce implicitamente l'uso per via della trattazione che gli riserva.

Si segnala quindi la necessità di un aggiornamento della normativa tale da sottolineare in modo più esplicito la necessità del fondamentale riconoscimento dei fenomeni disgregativi, adottando tra gli altri, ad esempio, l'indice di qualità muraria proposto dal Prof. Borri [17].

Occorre inoltre che al fenomeno disgregativo venga data una valenza di assoluta pericolosità essendo lo stesso paragonabile alla liquefazione dei terreni [11], che, giustamente, viene evidenziato come aspetto preminente nelle relazioni geotecniche.

Al riguardo appare anche fuorviante la tabella C8.5.I della Circolare n° 7 del 2019 dove vengono attribuiti dei parametri meccanici alle murature irregolari, senza alcuna specifica o nota che ne richiami il possibile comportamento disgregativo.

Ancora in merito alla stessa tabella, che peraltro è di fondamentale importanza ed alla base di ogni progettazione sull'esistente, appaiono fortemente squilibrati i valori delle caratteristiche meccaniche attribuite alle murature irregolari (dove ad esempio il valore della resistenza a compressione varia tra 1.0 e 2.0 N/mm²), nei confronti di quelli attribuiti alle murature di mattoni pieni (dove lo stesso valore varia tra 2.6 e 4.3 N/mm²). Il rapporto tra i parametri è infatti pari a circa 2.3, che non si riscontra però nel dato statistico relativo al numero di edifici crollati nel corso del Sisma del 2016, che sono stati per la quasi totalità ascritti alla tipologia muraria disordinata.

Un'altra considerazione riguarda gli interventi da porre in essere sugli edifici a tessitura irregolare, che a nostro avviso devono essere diffusi su tutta la parete ed essere contenitivi senza introdurre eccessivi sforzi localizzati, che altrimenti la parete non sarebbe in grado di diffondere; in tal senso, prima ancora di perseguire l'ormai conosciuto effetto scatolare, occorre introdurre rinforzi di facciata quali la stilatura dei giunti o gli intonaci armati, in modo da eliminare la possibilità di disgregazione. Visto l'elevato costo unitario che tali tipologie di interventi richiedono e la qualità del bene da trattare/preservare (molto spesso privi di carattere storico), ci si può a questo punto interrogare circa la convenienza tecnico-economico di procedere ad un loro consolidamento piuttosto che alla loro demolizione e successiva ricostruzione.


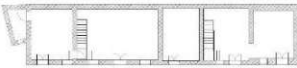

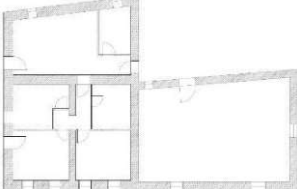

STUDIO CONDOTTO ED EVIDENZE EMERSE

A valle del quadro appena esposto, che evidenzia l'importanza delle caratteristiche costruttive delle murature rispetto alla loro capacità di sviluppare adeguati meccanismi di resistenza, ci si è posti il problema di analizzare quelle strutture in muratura regolare che hanno superato senza danni il sisma. Appariva quindi rilevante avviare un percorso conoscitivo teso a comprendere se le disposizioni normative cogenti potessero cogliere con esattezza il comportamento delle unità strutturali in muratura di buona esecuzione (tipicamente in mattoni).

Lo studio condotto dall' Ing. Enrico Devoto nella sua tesi di laurea è stato effettuato analizzando il comportamento di quattro edifici (tabella 4) considerati rappresentativi all'interno del vasto campione statistico fornito dalle schede AeDes della Protezione Civile, redatte in occasione del sisma del Centro Italia del 2016; gli edifici presi a campione erano caratterizzati essenzialmente da questi aspetti:

- composizione muraria di buona qualità (mattoni o blocchi squadri)
- non aver subito danneggiamenti (esito A/F delle schede) pur essendo collocati in aree in cui il sisma ha provocato gravi effetti anche nelle immediate vicinanze (poche decine di metri)
- configurazione planimetrica semplice, in modo da poterne effettuare la modellazione senza eccessive imprecisioni

Tabella 4. Piante e fotografie degli edifici oggetto di studio

Caso	Pianta edificio	Foto
I		
II		
III		
IV		

Con riferimento alla scelta dei casi di studio preme sottolineare il fatto che si tratta di edifici con spessori murari generosi rispetto allo sviluppo verticale e, specialmente per i casi di studio I e IV, conformati secondo la migliore regola dell'arte; di fronte a questi aspetti estremamente favorevoli, ci si aspettava pertanto una piena rispondenza ai disposti normativi.

Contrariamente alle attese, le modellazioni e le analisi, eseguite con riferimento ai capp. 7.3.3 e 7.3.4 delle NTC2018 [18] (analisi dinamica lineare e analisi statica

non lineare), hanno evidenziato che pur riducendosi il numero delle criticità delle unità strutturali, nessuno degli edifici in oggetto avrebbe dovuto superare indenne il sisma, in netto contrasto rispetto a quanto accaduto nella realtà.

Le modellazioni con software specialistico sono state compiute adottando i parametri indicati dalla tabella C8.5.I della Circolare n° 7 del 2019 [19], declinandoli su tre livelli di parametrizzazione coerenti con i livelli di conoscenza previsti dalle NTC2018:

- LC1: Parametri minimi
- LC3: Parametri massimi
- LC3plus: Parametri massimi amplificati con i coefficienti presenti nella tabella C8.5.II

Significativo è il fatto che le analisi condotte, anche impiegando i valori massimi amplificati riportati nelle tabelle indicate dalla NTC2018 (parametri LC3plus), hanno evidenziato che tutti gli edifici analizzati avrebbero dovuto mostrare significative patologie a seguito del sisma.

Livello di conoscenza e tipologia di analisi

Altri due aspetti sostanziali emersi dallo studio effettuato, riguardano l'influenza del livello di conoscenza LC e la tipologia di analisi che interpreta in maniera più vicina alla realtà il comportamento degli edifici.

Premialità del livello di conoscenza

In fase di progettazione, la prima attività da svolgere consiste nell'analisi dello stato di fatto e nella realizzazione di prove e rilievi che si riflettono poi sul livello di conoscenza impiegabile nelle successive verifiche.

Questa è la prima voce di spesa che si propone al Committente e, poiché il raggiungimento di un livello di confidenza elevato (LC3) richiede indagini di natura storico-critica, sui materiali, sopralluoghi e svariate considerazioni, con un elevato costo temporale ed economico, ci si attende che questa scelta venga poi valorizzata nelle analisi numeriche.

I benefici dell'aumento del LC si dovrebbero tradurre in ultima battuta, nell'incremento degli indici di resistenza o di vulnerabilità; i risultati dello studio di tesi svolto mostrano che, con l'aumento del LC, si hanno più benefici nell'analisi di pushover², mentre al contrario sono meno rilevanti, e quasi ininfluenti, nel caso di analisi dinamica lineare.

Infatti per quanto riguarda l'analisi di pushover e perciò l'indice di vulnerabilità, nei 4 casi di studio si è riscontrato un incremento medio dell'indice di vulnerabilità, del 15% per i blocchi lapidei squadri e del 27% per i mattoni pieni (tabella 5). Questi numeri giustificano appieno l'impegno di tempo e risorse economiche per raggiungere un livello di confidenza più elevato.

Tabella 5. Incremento medio indice di vulnerabilità sismica allo SLV a seguito del passaggio da LC1 a LC3plus (analisi di pushover).

Tipologia muratura	Incremento medio α_{SLV} [%]
Blocchi lapidei squadri	15.1
Mattoni pieni e malta di calce	27.1

Nel caso dell'analisi dinamica lineare, invece, solamente le verifiche a taglio beneficiano dell'incremento del LC.

Per quanto riguarda le verifiche a taglio nel piano si ha infatti un marcato incremento dell'indice di resistenza, rispettivamente del 35% e del 57%, mentre il beneficio per le verifiche flessionali nel piano o fuori piano si riduce al 2-4% (tabella 6).

Tabella 6. Incremento medio dell'indice di resistenza (IR) allo SLV a seguito del passaggio da LC1 a LC3plus (analisi dinamica lineare).

Materiale	Taglio [%]	Flessione nel piano [%]	Flessione fuori piano [%]
Blocchi lapidei	35.2	3.1	2.0
Mattoni pieni	57.6	3.8	1.6

Questo fenomeno è dovuto al fatto che le verifiche a flessione sono fortemente dipendenti dal livello di sforzo normale agente sul maschio murario; pertanto un incremento di resistenza meccanica non produce incrementi significativi dell'indice di resistenza.

Questo aspetto si rileva immediatamente analizzando il peso dei parametri impiegati nelle formulazioni relative al taglio ed alla flessione.

Si noti come nella formula 1, che esprime la resistenza a taglio di un maschio murario in caso di tessitura regolare ([C8.7.17] Circolare n°7 2019), l'attore principale sia la resistenza a taglio della muratura f_{v0d} ; è perciò naturale che incrementando tale valore si hanno benefici in termini di resistenza.

$$V_t = \frac{lt}{b} (\widetilde{f}_{v0d} + \bar{\mu}\sigma_0) \quad (1)$$

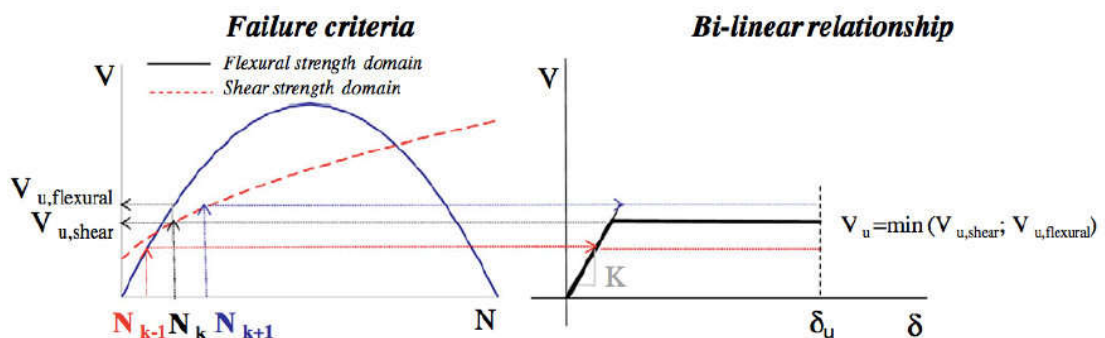
Al contrario per la verifica a flessione, sia nel piano che fuori piano, descritta nella formula 2 ([7.8.2] NTC2018), l'attore principale è lo sforzo normale agente nel maschio murario σ_0 ; se questa risulta bassa o nulla porta al non superamento della verifica.

$$M_u = \left(l^2 t \frac{\sigma_0}{2} \right) \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85f_d} \right) \quad (2)$$

Quest'ultima formulazione incicia il beneficio che si potrebbe avere, assumendo il valore più elevato dei parametri dei materiali proposti dalla tabella C8.5.1 della Circolare, e quindi, indirettamente gli sforzi profusi per raggiungere un elevato livello di conoscenza.

Modello non lineare vs fattore di struttura

Mentre la modellazione delle proprietà dissipative nelle strutture intelaiate in calcestruzzo e in acciaio è ben rappresentata attraverso la teoria del fattore di struttura, altrettanto non sembra si possa dire per le strutture in muratura. Risulta più preciso il modello non lineare delle cerniere plastiche, implementato sia a taglio che a flessione, ed impiegato in molti software commerciali di facile utilizzo.



5. Modello non lineare delle cerniere plastiche implementato in 3Muri.

Verifiche in termini di capacità vs resistenza

Il sisma richiede alla struttura di assecondare un certo spostamento, non di resistere a una forza predeterminata, perciò coerentemente nell'analisi di pushover si eseguono due verifiche:

- Si stima l'accelerazione che la struttura è in grado di sopportare e la si confronta con quella di riferimento per il sito in cui sorge l'edificio.
- Si valuta la capacità di spostamento della struttura e la si confronta con la domanda di spostamento richiesta dal sisma.

Al contrario nell'analisi dinamica lineare si procede a modellare una certa azione sismica per poi verificare se la struttura, in ogni suo elemento resistente, è capace di resistergli, ma non vi è la possibilità di stimare la capacità globale della struttura. Pertanto, se ha senso fare un'analisi globale (ossia è possibile escludere fenomeni di disgregazione o meccanismi locali), risulta di gran lunga più significativa l'analisi di pushover in quanto è capace di dare una visione di come potrebbe rispondere l'intera struttura sotto azione sismica.

Al contrario le verifiche a seguito dell'analisi dinamica lineare sono di tipo locale, su ogni elemento resistente, e non considerano la cooperazione strutturale derivante dal comportamento scatolare. Il caso più frequente di mancata verifica positiva riguarda infatti tutti gli elementi con poco carico assiale per i quali la verifica secondo le NTC2018 è molto penalizzante.

Riflessi normativi

Come si è visto nelle valutazioni degli edifici campione, le vigenti normative sembrano eccessivamente penalizzanti nei confronti degli edifici in muratura di buona qualità, che peraltro hanno dimostrato un efficace comportamento in tutte le ultime emergenze sismiche, come rilevato dagli studiosi che si sono occupati della materia [9].

Alcune tra le motivazioni che possono elencarsi al riguardo vanno ricercate a nostro avviso non tanto nei valori dei parametri riportati in tabella, peraltro risultanti da una serie notevole di studi sperimentali di assoluta rappresentatività, quanto nella metodologia di approccio ed applicazione dei coefficienti di sicurezza parziali per i materiali γ_M , che sembra essere completamente mutuata dalla metodologia di verifiche per nuove costruzioni.

Infatti, per le nuove costruzioni i coefficienti riduttivi dei materiali trovano la loro motivazione anche nelle incertezze che possono verificarsi tra la fase progettuale e la fase realizzativa; in questo modo si conferisce alla struttura la capacità di superare il collaudo del tempo con la dovuta sicurezza.

Nel caso di edifici esistenti di buona qualità, invece, il tempo ne ha già saggiato le risorse, sia in relazione alle sollecitazioni gravitazionali che ad una parte di azioni orizzontali, dovute ad esempio al vento o ad azioni sismiche secondarie. Nel corso dei secoli si è infatti pervenuti ad una corretta standardizzazione del metodo costruttivo corrente in modo tale che semplici norme o consuetudini costruttive sono state padroneggiate dall'intera filiera di costruzione. Tale semplificazione deve leggersi come una importante opera di sintesi, non figlia di ignoranza costruttiva ma anzi frutto della consapevolezza empirica di poche regole chiare che potevano essere comprese dall'insieme di soggetti che oggi definiamo "filiera" delle costruzioni. La scelta applicata per lunghi secoli era quella di prediligere una norma semplice ed efficace lasciando l'eccezionalità, gli interventi geniali, a pochi soggetti capaci di eseguire opere che ancora oggi ci lasciano stupefatti.

Sarebbe pertanto auspicabile che, nella definizione dei coefficienti riduttivi dei materiali per gli edifici esistenti, assumesse un peso maggiore l'effettiva storia che l'edificio ha attraversato, durante la quale si sono appunto sviluppate la quasi totalità delle azioni (ad eccezione eventualmente di quelle sismiche) e si sono nel contempo sviluppati gli effetti di degrado fisico non tanto dei blocchi portanti dei materiali stessi (mattoni/pietre) ma quanto dei loro componenti leganti.

In buona sostanza, appare eccessiva l'applicazione del coefficiente $\gamma_M=2$ (che ad esempio potrebbe essere ridotto nel caso in cui si raggiunga un LC3) per le verifiche sismiche condotte con l'analisi dinamica lineare che, unitamente alle criticità espresse sulle formulazioni di verifica flessionali, porta infine a ritenere non rispondenti edifici che invece esibiscono comportamenti corretti.

LE VERIFICHE STATICHE

L'approccio progettuale agli edifici esistenti in muratura è regolato in prima istanza dalla tabella C8.5.I della Circolare del 2019 collegata alle NTC2018, nonché dai metodi di calcolo e dalle verifiche che sono richieste per certificare la rispondenza di tutte le componenti dell'edificio al quadro normativo cogente.

Occorre a questo punto condurre alcune riflessioni per comprendere quanto le prestazioni dei materiali e degli apparati murari previsti dalla normativa siano coerenti con la letteratura storica sulle murature e con lo stato di conservazione e di servizio di questi edifici.

Infatti, accanto a quanto esposto in precedenza rispetto alle azioni indotte dal sisma, alcune importanti osservazioni vanno condotte anche per gli aspetti statici, ossia nei confronti della capacità di tali edifici di resistere efficacemente alle azioni gravitazionali, alle quali hanno peraltro già resistito dall'epoca della loro costruzione fino ai giorni nostri, in molti casi per più di cento anni.

Il dato essenziale su cui si vuole porre l'attenzione è il carico unitario ammissibile in condizioni statiche (anche detto carico di sicurezza), rapportandolo alle verifiche statiche imposte dalla normativa vigente, in quanto questo valore può (ed a parere degli scriventi **deve**) rappresentare l'anello di congruenza tra le due.

È noto a tutti i professionisti che si occupano da tempo di edifici in muratura che il carico di sicurezza per le murature di mattoni pieni è pari a circa 15 kg/cm²; tale valore si ritrova in molta letteratura tecnica, tra cui in Sisto Mastrodicasa [1], dove veniva addirittura indicato pari a 18.0kg/cm² (figura 6).

TABELLA 2.
Carichi di sicurezza alla compressione.

Numero d'ordine	Materiale	kg/cm ²
1	Legname di abete	50
2	» di quercia	80
3	» di faggio	80
4	» di pino comune	60
5	Ferro omogeneo	1 200
6	Calcestruzzo di cemento	40
7	Muratura di mattoni pieni e malta di cemento .	18

6. Carico limite dei mattoni pieni e malta di calce riportato da S. Mastrodicasa in "Dissesti statici delle strutture edilizie" (1983).

Altrettanto noto è anche il fatto che in moltissimi edifici in muratura sono state apportate col tempo importanti modifiche, quali ad esempio formazione di aperture in pareti portanti, sopraelevazioni o formazione di incassi di elementi d'arredo o funzionali nelle pareti. Tutte queste operazioni conducono in ultima analisi a stati di sforzo locali effettivi ben più elevati rispetto a quelli appena citati, normalmente senza che gli elementi portanti evidenzino problematiche legate alle variazioni introdotte nello stato di sforzo assiale; risulta quindi evidente che il materiale "muratura di mattoni" possiede ampi margini di resistenza in questo ambito. Nel caso di un edificio esistente, la Norma prescrive la verifica della resistenza assiale attraverso la formulazione: $N_{Rd} > N_{Ed}$ (3)

Il primo termine N_{Rd} è dato da: $N_{Rd} = f_m * A * \frac{\phi}{\gamma_{M*FC}} = f_m * A * CR$ (4), dove:

- f_m è la resistenza media a compressione della muratura;
- A è l'area del setto murario;
- $CR = \frac{\phi}{\gamma_{M*FC}}$ (5) (coefficiente riduttivo globale).

Con il coefficiente CR si intende la sintesi di tutti i coefficienti di sicurezza da applicare in fase di verifica alla resistenza dell'elemento murario.

Un esempio di come varia il valore di CR è riportato a seguire; assumendo di aver raggiunto un livello di conoscenza LC2, e considerando un muro di spina di piano terra per il quale si abbia:

- Spessore 50 cm
- Altezza interpiano 3.5 m
- Fattore di vincolo laterale $\rho = 1.0$
- Eccentricità del muro superiore $e_1 = 0$ cm
- Eccentricità del solaio $e_2 = 0$ cm
- Eccentricità accidentale $\frac{h}{200} = 1.8$ cm
- Snellezza $\lambda = \frac{\rho * h}{t} = 7$
- Coefficiente di eccentricità $m = 6 \frac{e}{s} = 0.216$

Applicando la formulazione: $CR = \frac{\phi}{\gamma_{M*FC}}$ ed interpolando i valori secondo la tabella 4.5.III (per $\gamma_M=3$)

Tab. 4.5.III -Valori del coefficiente Φ con l'ipotesi della articolazione (a cerniera)

Snellezza λ	Coefficiente di eccentricità $m = 6 e/t$				
	0	0,5	1,0	1,5	2,0
0	1,00	0,74	0,59	0,44	0,33
5	0,97	0,71	0,55	0,39	0,27
10	0,86	0,61	0,45	0,27	0,16
15	0,69	0,48	0,32	0,17	
20	0,53	0,36	0,23		

7. Tab. 4.5.III NTC2018.

Il CR totale derivante da questo semplice esempio sarebbe:

$$CR = \frac{0.82}{3.0 * 1.2} = 0.23$$

Il che vuol dire che quando si eseguono le verifiche statiche, si può avere una riduzione del valore caratteristico di resistenza del 77%.

Di seguito si effettua invece un esempio numerico volto a paragonare il precedente sistema di calcolo (basato sulle TA e sul DM 20/11/87) con le risultanze desumibili dai nuovi metodi di calcolo inseriti nelle NTC2018.

Mantenendo fisso il valore di $\gamma_M=3$, risulta d'interesse valutare il coefficiente di riduzione CR in funzione del livello di conoscenza; per semplicità si assume un unico valore di $\Phi=0.8$ (ad esempio per un muro di spina di congruo spessore); i valori che si ottengono sono riportati in tabella 7.

Tabella 7. CR per i tre livelli di conoscenza.

Coefficiente riduttivo per $\gamma_M = 3$ e $\Phi=0.8$			
Livello di conoscenza	LC1	LC2	LC3
Fattore di confidenza FC	1.35	1.2	1.0
Coefficiente riduttivo CR	0.20	0.23	0.27

Ci si domanda ora quale sia il valore di partenza della resistenza media a compressione f_m affinché ci possa essere corrispondenza tra un maschio murario dimensionato sulla base del valore ammissibile di 15 kg/cm² e che stia svolgendo il proprio compito senza denotare sofferenza.

Introducendo il fattore medio 1.4 di ragguglio tra i vecchi sistemi di calcolo (Tensioni Ammissibili) ed i nuovi (Stati limite), la resistenza a compressione equivalente verrebbe espressa dalla formulazione:

$$f_m = \sigma_{amm} * \frac{1.4}{CR} \quad (6) \quad \text{e pertanto:}$$

Tabella 8. Valori di resistenza che dovrebbero caratterizzare la muratura in mattoni pieni per soddisfare le verifiche statiche.

f_m congruente con $\sigma_{amm} = 15\text{kg/cm}^2$ (per $\gamma_M = 3$ e $\Phi=0.8$)			
Livello di conoscenza	LC1	LC2	LC3
Coefficiente riduttivo CR	0.20	0.22	0.27
f_m^* (kg/cm ²)	106.3	94.5	78.8

Questi valori sono assolutamente distanti da quelli espressi nella tab. C8.5.1. (figura 8), che evidenzia valori di f_m variabili da 26.0 kg/cm² per LC1 a 43.0 kg/cm² per LC3.

Tabella C8.5.1 - Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

8. Tab C8.5.1 Circolare n° 7 2019.

Poiché, come già accennato, i valori dei parametri riportati in tabella sono desunti da prove ed esperienze di assoluto rilievo e quindi non confutabili, appare ovvio che l'unico parametro su cui si potrebbe operare è il γ_M .

Ipotizzando un suo dimezzamento (ossia $\gamma_M = 1.5$ invece che $\gamma_M = 3$), i valori diventerebbero quelli della tabella 9, che, almeno per quanto riguarda i livelli di conoscenza più elevati, risultano congruenti e paragonabili con quelli della già citata tabella delle NTC.2018.

Tabella 9. Valori di resistenza che dovrebbero caratterizzare la muratura in mattoni pieni per soddisfare le verifiche statiche con $\gamma_M=1.5$

f_m congruente con $\sigma_{amm} = 15\text{kg/cmq}$ (per $\gamma_M = 1.5$ e $\Phi=0.8$)			
Livello di conoscenza	LC1	LC2	LC3
Coefficiente riduttivo CR	0.40	0.44	0.53
f_m^{**} (kg/cmq)	53.2	47.3	39.4

Come si vede, l'influenza del livello di conoscenza sul valore da assumere per f_m è notevole; in quest'ottica, risulterebbe di grande importanza inserire, premiare e forse anche rendere obbligatoria la valutazione dell'indice di qualità muraria (IQM), tra le attività necessarie al raggiungimento del livello di conoscenza massimo LC3, in quanto tale parametro rappresenta senza dubbio un termometro istantaneo del comportamento atteso dall'edificio nei confronti delle azioni sismiche.³

In buona sostanza, occorre a nostro avviso rimodulare le modalità di verifica nei riguardi delle sollecitazioni statiche, in quanto, per le zone a bassa sismicità, si arriverebbe a dover prescrivere per le murature importanti rinforzi solo per effetto delle azioni statiche, anche per edifici che non presentano segnali di affaticamento a loro carico.

Ciò non deve intendersi come l'affermazione che qualunque edificio che "sta in piedi" non necessiti comunque di un controllo o una verifica esperta del suo stato di conservazione, assolutamente doverosa; questa operazione andrebbe però effettuata utilizzando criteri di analisi più speditivi e volti ad individuare effettive criticità che possono avere rilevanza sulla capacità di resistere in sicurezza alle azioni gravitazionali con l'assetto strutturale che ha consolidato nel tempo.

In tal senso appare molto più efficace un approccio di diagnostica speditiva, mutuando e magari estendo le modalità di analisi introdotte con il certificato di idoneità statica (CIS di 1° livello) che si sta sperimentando nel comune di Milano.

Con l'attuale impianto normativo e nell'ottica delle attuali agevolazioni volte a migliorare la capacità sismica del patrimonio italiano, si avrebbe invece una pesante distrazione di fondi economici a detrimento di quelle costruzioni che sono collocate in aree a maggior rischio.

CONCLUSIONI

Nel lavoro svolto si sono approfondite quelle casistiche che non trovano piena rispondenza nelle attuali Normative Tecniche e che sono spesso fonte di imbarazzo per i professionisti che si trovano ad affrontare interventi sull'esistente; si riassumono i principali aspetti trattati:

- La disgregazione muraria rappresenta un aspetto fondamentale nel comportamento degli edifici sottoposti a sisma e si ritiene auspicabile che l'indice di qualità muraria -IQM - proposto dal prof. Borri trovi maggior riscontro nell'impianto normativo (anche nella forma di linee guida nazionali), ponendosi alla base per il raggiungimento di un elevato livello di conoscenza.

Per i suoi effetti catastrofici essa è infatti paragonabile alla liquefazione dei terreni, aspetto che in ambito geotecnico ha giustamente assunto un ruolo primario.

- L'analisi di quattro edifici campione in muratura di mattoni pieni colpiti da grandi azioni sismiche senza mostrare danneggiamenti ha mostrato che il comportamento esibito è di gran lunga migliore rispetto a quello atteso applicando le normali tecniche di modellazione secondo le NTC.
- Altrettanto si è constatato in ambito puramente gravitazionale: non vi è corrispondenza tra i dimensionamenti degli edifici storici e le verifiche cui essi devono sottostare applicando le attuali regole di verifica.
- Risulta importante approfondire il ruolo dei coefficienti di sicurezza dei materiali, in quanto i valori espressi in Normativa sembrano mutuati dall'approccio per nuove costruzioni, ma penalizzano eccessivamente gli edifici esistenti, senza tener conto dell'effettivo collaudo che hanno subito grazie alla loro storia pluridecennale.

Riteniamo si sia illustrato quanto ancora vi sia da approfondire nell'ambito delle strutture in muratura per poter giungere a risultati:

- affidabili dal punto di vista della previsione di prestazione;
- efficaci dal punto di vista della sicurezza strutturale e del costo di realizzazione;
- idonei dal punto di vista conoscitivo.

Il tutto partendo da quelle evidenze che si mostrano nella quotidianità della professione, nell'eccezionalità dei terremoti nonché nell'ampio lavoro di ricerca compiuto da molti ricercatori, il cui lavoro deve poter confluire in una **sintesi** condivisa ed applicabile da parte dei professionisti che operano sulla materia.

Dal punto di vista tecnico auspichiamo quindi una rapida sintesi normativa delle esperienze e sperimentazioni documentate, per poter addivenire ad una "normale prevenzione", efficace e capace di fornire risposte concrete all'esigenza di sicurezza della popolazione italiana, senza dimenticare le esperienze e le tecniche di dimensionamento basate sui criteri empirici che hanno costruito il nostro tessuto urbano.

Tutto ciò è indispensabile ed urgente in modo da poter utilizzare in maniera equilibrata le risorse economiche messe a disposizione dagli incentivi statali volti al miglioramento sismico del patrimonio edilizio.

Con uno strumento normativo in grado di fornire chiaramente tale finalità, sarà più semplice avviare l'opera di prevenzione che ancora manca in ambito sismico [15].

Già G. Alfani nel suo testo "I terremoti e le case" del 1905 si domandava "A cosa gioverebbe la previsione del terremoto quando tutte le nostre case e tutti i nostri beni, dovessero andare ogni volta in malora? Non è forse meglio trovare il modo sicuro di prevenire gli effetti piuttosto che prevederli soltanto?"

Dopo 115 anni sarebbe ora di dare concretezza a tale giusta considerazione.

NOTE

IN COPERTINA. Diverso comportamento sismico di edifici in muratura attigui, siti in Montegalfo (AP), interessati dal sisma del 2016.

1. Per ricerche scientifiche sui manufatti, intendiamo quelle condotte secondo i criteri moderni, senza dare meno importanza a quanto già studiato e prodotto nel tempo con metodi più empirici.
2. Dallo studio emerge comunque che l'analisi di pushover condotta utilizzando il software 3Muri porta a risultati di gran lunga migliori in termini pratici, laddove si eseguono interventi di miglioramento per i quali le Normative non richiedono di raggiungere fattori di vulnerabilità pari ad 1, ma leggermente inferiori.
3. Vista l'esiguità dello sforzo economico e temporale per la determinazione dell'IQM e data la sua grande valenza, potrebbe essere richiesto anche per il raggiungimento di livelli di conoscenza inferiori.

BIBLIOGRAFIA | REFERENCES

- [1] S. Mastrodicasa, "Dissesti statici delle strutture edilizie", Ulrico Hoepli editore, Milano, 1983.
- [2] A. Giuffrè, "Caratteristiche meccaniche delle murature storiche", 1999
- [3] C. Perrow, "Normal Accident: living with high-risk technologies", New York Basic Books, 1984.
- [4] E. Boschi, F. Bordieri, "Terremoti d'Italia", Hoepli, 2009.
- [5] E. Severino, "Tecnica e Architettura", Raffaello Cortina editore, 2003.
- [6] S. Arangio, F. Bucchi, and F. Bontempi, "Pushover seismic analysis of masonry buildings with different commercial codes", *Built Herit. 2013 Monit. Conserv. Manag. Pushover*, no. 2, pp. 773-780, 2013.
- [7] A. Galasco, S. Lagomarsino, A. Penna, "Analisi sismica non lineare a macroelementi di edifici in muratura", *Univ. degli Stud. di Brescia*, 2007.
- [8] A. Galasco, S. Lagomarsino, and A. Penna, "On the use of pushover analysis for existing masonry buildings" *First Eur. Conf. Earthq. Eng. Seismol.*, no. September pp. 3-8, 2006.
- [9] A. Borri and A. De Maria, "L'INDICE DI QUALITÀ MURARIA (IQM) e la disgregazione delle murature per effetto del sisma" *Structural 229*, vol. maggio/giugno, 2020.
- [10] E. Devoto, "Normativa, Modellazione, Realtà. Studio su quattro edifici in muratura interessati dall'evento sismico del Centro Italia del 2016," *Structural 231*, vol. settembre/ottobre, 2020.
- [11] C. Ambrosio, M. Cagelli, M. Colombo, "Le cause di crolli insospettabili", *Giornale dell'Ingegnere*, n°9 - settembre, 2017.
- [12] A. Sproccati, "Una nuova stagione normativa. Riflessioni su D.P.R 380 e Norme Tecniche per le Costruzioni", *Structural 230*, vol. luglio/agosto, 2020.
- [13] C. Malacrino, "Ingegneria dei Greci e dei Romani", Arsenal Editrice vol. luglio/agosto 2020 paper 18, 2020.
- [14] DISEG - Centro di Ricerca sui Ponti in muratura, "Caratteristiche meccaniche delle murature storiche", Arsenal Editrice vol. luglio/agosto 2020 paper 18, 2020.
- [15] R. De Marco, E. Guidoboni et al., "Manifesto per una strategia nazionale di riduzione dell'impatto dei terremoti sulle popolazioni esposte a maggior rischio, dopo cent'anni di fallimenti", 2020
- [16] A. Borri, A. De Maria, "Indice di Qualità Muraria (IQM) e correlazione con le caratteristiche meccaniche", ReLuis - Linea costruzioni in muratura, 2015.
- [17] A. Borri, A. De Maria, "Qualità muraria secondo il metodo IQM: aggiornamento alla Circolare esplicativa n. 7 del 2019", *Structural 222*, vol. marzo/aprile, 2019.
- [18] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. 7 C.S.LL.PP.", 2019.
- [19] Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti, "Norme Tecniche per le Costruzioni. DM 17/1/2018," *Gazz. Uff. della Repubb. Ital.*, 2018.