

Miglioramento sismico con l'impiego di muratura armata di un fabbricato produttivo-residenziale sito a San Possidonio (MO), danneggiato dagli eventi sismici dell'Emilia 2012

Nicola Pongiluppi¹, Luca Barbieri², Federico Botti³, Flavio Mosele⁴ ■



Nome dell'opera/progetto:

Miglioramento sismico in muratura armata Poroton®

Ubicazione:

San Possidonio (MO)

Committente:

Sig. Daniele Bianchi

Progettazione/Direzione Lavori:

Ing. Nicola Pongiluppi

Supporto alla Progettazione:

Ing. Luca Barbieri, Ing. Federico Botti

Anno completamento lavori:

2013

Il fabbricato oggetto del presente contributo è situato a San Possidonio, uno dei comuni più fortemente colpiti dagli eventi sismici del 20-29 Maggio 2012. La costruzione, realizzata in muratura di blocchi in calcestruzzo alleggerito, è ad uso misto con un'attività produttiva al piano terra e residenziale al piano primo ed ha riportato danneggiamento intenso, concentrato al piano terreno, tale da rendere inagibile la costruzione, classificata "E1" in termini di livello operativo.

Gli interventi apportati per rimuovere lo stato di inagibilità dovuto agli eventi sismici sono stati differenziati a seconda del livello di danno e del tipo di elemento strutturale, è stata dunque eseguita la demolizione ricostruzione delle pareti del piano terra mettendo in opera nuove pareti in muratura armata Poroton®, il consolidamento delle pareti portanti perimetrali del piano primo con intonaco armato con fibre di vetro e il ripristino delle lesioni riportate su divisori e finiture. L'analisi dei livelli di sicurezza raggiunti dall'edificio prima e dopo gli interventi sono stati valutati a livello globale con lo svolgimento di analisi statiche non lineari e a livello locale con lo studio dei possibili cinematismi di collasso.

Il caso studio presentato permette di comprendere ed approfondire le esigenze di intervento

¹ Ingegnere di Europrogetti Soc. Coop.

✉ n.pongiluppi@europrogetti.org

² Ingegnere Responsabile Area Tecnica Cis Edil S.r.l.

✉ luca@cisedil.it

³ Ingegnere Area Tecnica Cis Edil S.r.l.

✉ federico@cisedil.it

⁴ Ingegnere Strutturista Consorzio Poroton® Italia

✉ tecnico@poroton.it

nella "fase di ricostruzione" in seguito ad un evento sismico e mostra come la muratura armata possa trovare applicazione anche in questa fase integrandosi all'interno di edifici esistenti, in combinazione anche con altri interventi di consolidamento.

1. Introduzione

Le zone colpite dagli eventi sismici del 20-29 Maggio 2012 sono caratterizzate da un'ampia diffusione di piccole attività produttive, spesso a conduzione familiare, che determinano una particolare tipologia edilizia composta da due unità abitative, una ad uso produttivo posizionata al piano terra e la seconda ad uso residenziale generalmente posizionata al piano primo. Tale tipologia edilizia mista, ad uso produttivo-residenziale, è stata colpita dai terremoti del 2012 registrando un livello di danneggiamento medio-alto, molto spesso legato al fatto che queste costruzioni sono state progettate e realizzate tra gli anni '70 e '90, quando cioè le zone interessate dal sisma non erano in pratica ancora classificate come sismiche, perciò spesso ci si trova di fronte a costruzioni progettate per le sole forze verticali, tutt'al più per l'azione orizzontale del vento, e a volte di fronte a fabbricati realizzati solamente seguendo la "regola dell'arte", in quanto per esempio, nel caso delle costruzioni in muratura portante, le prime norme complete in materia, da applicarsi indipendentemente dalle zone sismiche, sono riportate nel DM'87.

Il presente contributo tratta un caso studio rap-

presentativo della tipologia edilizia sopra definita, nello specifico riguarda il progetto di miglioramento sismico di un fabbricato situato a San Possidonio in provincia di Modena, fortemente colpito e danneggiato dalla sequenza sismica del Maggio 2012. Il ripristino con miglioramento sismico è stato realizzato con un intervento congiunto di demolizione e ricostruzione con muratura armata Poroton® al piano terreno e un intervento di rinforzo con fibre di vetro al piano primo, per una spesa totale di circa € 135000, che ha permesso di rimuovere completamente lo stato di inagibilità della costruzione.

2. Descrizione del fabbricato, dei danni riportati e delle lacune strutturali

Il fabbricato, situato nel mezzo del cratere sismico a pochi chilometri dalle scosse più violente (Figura 1), si articola in due piani fuori terra con sottotetto non praticabile (Figura 2) ed ospita due unità immobiliari: l'unità con destinazione d'uso produttiva al piano terra, con altezza interpiano di 3.55 m e l'unità con destinazione d'uso residenziale al piano primo, con interpiano 3.00 m. La costruzione è isolata dagli altri fabbricati, di forma regolare e compatta ed ingombro in pianta di circa 12x17 m; è stata costruita negli anni '70 e successivamente sopraelevata negli anni '90 al fine di ricavare l'unità abitativa pertinenziale all'esercizio dell'officina. Il comune di San Possidonio, nel periodo di costruzione del fabbricato in oggetto, non era classificato come sismico e questo ha condotto alla realizzazioni

Figura 1
Localizzazione del fabbricato rispetto alla sequenza sismica rilevata da INGV.

SEQUENZA SISMICA 19 maggio 2012 - 19 maggio 2013

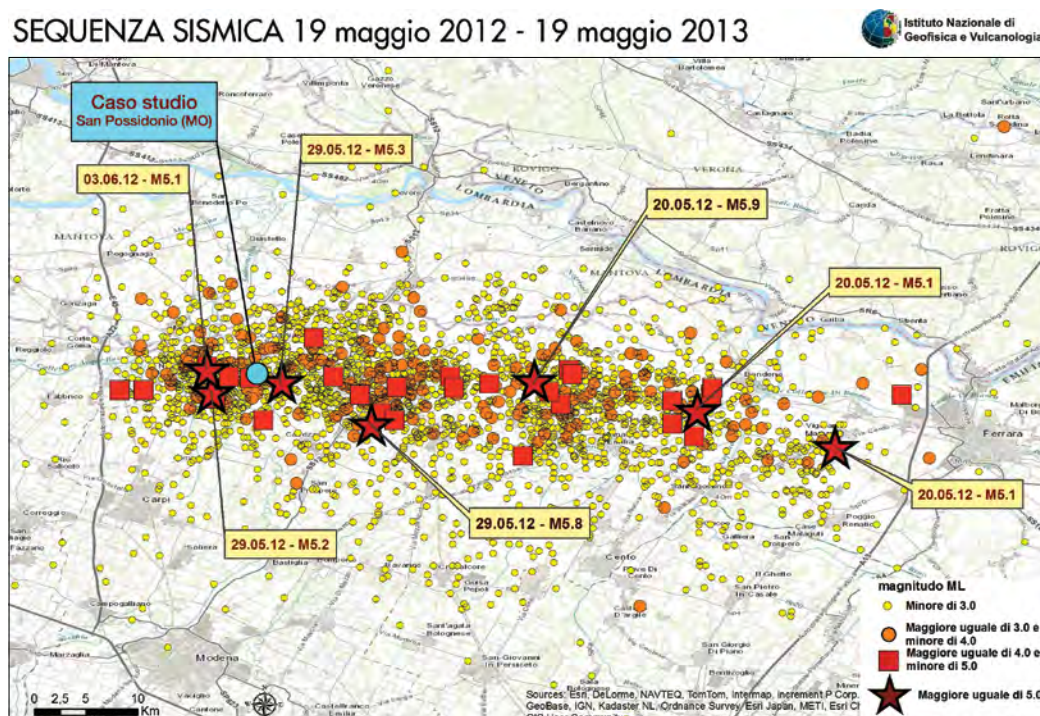




Figura 2
Facciata principale (nord)
del fabbricato, con danni e
crolli parziali in seguito alle
azioni sismiche.

di costruzioni impiegando materiali, tecniche e dettagli costruttivi non adeguati per sopportare le azioni telluriche. Nel caso specifico, la struttura portante del fabbricato è costituita al piano terra da murature in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato di spessore 25 cm (Figura 3) e al piano primo da murature in laterizio di spessore 25 cm con tessitura in parte disomogenea, come si apprezza in Figura 4 (sono distinguibili due diverse tipologie di murature in laterizio e parti di muratura realizzata con blocchi in cal-

cestruzzo aerato autoclavato). Il solaio del piano primo è stato realizzato con prefabbricati in laterocemento tipo predalles (Figura 5) collegati alle murature tramite cordolo in calcestruzzo armato, mentre la copertura è realizzata con orditura primaria e secondaria in profili di acciaio e pannelli sandwich di chiusura.

Gli eventi sismici del hanno pesantemente danneggiato il fabbricato, al punto da essere classificato "E" nella scheda AeDES in seguito alle verifiche di agibilità, con conseguente ordinanza

Figura 3
Parete est: maschi murari del
piano terra danneggiati dal
sisma.





Figura 4
Danneggiamento delle murature al piano primo (a sinistra) e tessitura delle stesse dopo la scalpellatura dell'intonaco (a destra).

di inagibilità totale. I danni si sono concentrati al piano terra (Figura 2, Figura 3 e Figura 6), costituito come detto da una muratura debole e non adatta all'uso strutturale in presenza di azioni sismiche anche basse: infatti la totalità delle pareti è risultata gravemente lesionata, tanto da rendere imminente il rischio di collasso dell'intero edificio. Si possono riconoscere le tipiche fessurazioni a taglio ad andamento diagonale sui maschi murari, accompagnate da danneggiamenti per schiacciamento dei blocchi dovute alla scarsa resistenza della muratura presente e porzioni murarie crollate. Il piano superiore ha subito invece un danneggiamento contenuto, le fessurazioni si sono manifestate infatti solo nelle pareti di separazione interne e nei punti di discontinuità geometriche o di materiale delle pareti portanti perimetrali, come ad esempio le estremità dell'apertura delle finestre (Figura 4). Infine sono stati rilevati danni anche agli impianti (idraulico, elettrico, aria, etc...) in particolare dell'unità ad uso produttivo del piano terra.

Figura 5
Interno del piano terra, fasi di realizzazione delle opere provvisorie.

Vista la situazione del piano terra, si è reso ne-

cessario un intervento preliminare di messa in sicurezza con opere provvisorie costituite da puntelli metallici e da un reticolo di putrelle in acciaio, per garantire la stabilità dell'edificio ai carichi gravitazionali (Figura 5).

L'analisi dello stato di danno combinato con il valore di vulnerabilità ha permesso di classificare la costruzione con livello operativo "E1" per il quale le vigenti normative (Ordinanza n. 86 del 06/12/2012 della Regione Emilia-Romagna) prevedono di intervenire mediante riparazione e miglioramento sismico con il raggiungimento di un livello di sicurezza almeno pari al 60% di quello previsto per le nuove costruzioni dalle NTC 2008.

Le principali lacune strutturali del fabbricato sono innanzitutto una non adeguata qualità e quantità di muratura sismoresistente, considerando anche l'elevato rapporto tra la distanza delle pareti portanti successive e lo spessore della muratura; erano inoltre presenti grandi aperture al piano terra che hanno determinato la formazione del fenomeno del "pilastro tozzo" (Figura 3); infine





la presenza di un solaio non infinitamente rigido in copertura.

In particolare, analizzando la costruzione in pianta, emerge evidente la peculiarità della struttura: gli elementi verticali che reggono i carichi gravitazionali sono le pareti perimetrali in muratura e il pilastro in acciaio centrale (Figura 7), mentre le azioni orizzontali sono sopportate dalle sole murature perimetrali di sp. 25 cm realizzate in blocchi in calcestruzzo aerato autoclavato e posizionate ad una distanza reciproca di circa 12 e 17 m, rispettivamente nelle due direzioni principali. La quantità di murature resistenti all'azione sismica espressa come percentuale dell'area di impalcato risulta di circa 2.0% e 2.6%, rispettivamente in direzione est-ovest ed in direzione nord-sud, mentre per zone sismiche come quella nel caso allo studio con $\alpha_g \cdot S \approx 0.20$ g sarebbero necessari per murature ordinarie portanti a due piani, quantità di murature intorno al 5.0%, con riferimento ai valori riportati in Tabella 7.8.III delle NTC 2008 (tabella utile solo come riferimento poiché applicabile agli edifici classificati come semplici secondo i requisiti di cui al §4.5.6.4 e §7.8.1.9 delle NTC 2008, entro cui la costruzione in oggetto non rientra).

A questo si aggiunge il disallineamento di alcune aperture tra piano primo e secondo, in particolare sulle pareti di facciata nord e sud (Figura 8), che peggiora ulteriormente la risposta della

struttura in presenza di azioni orizzontali come quelle sismiche.

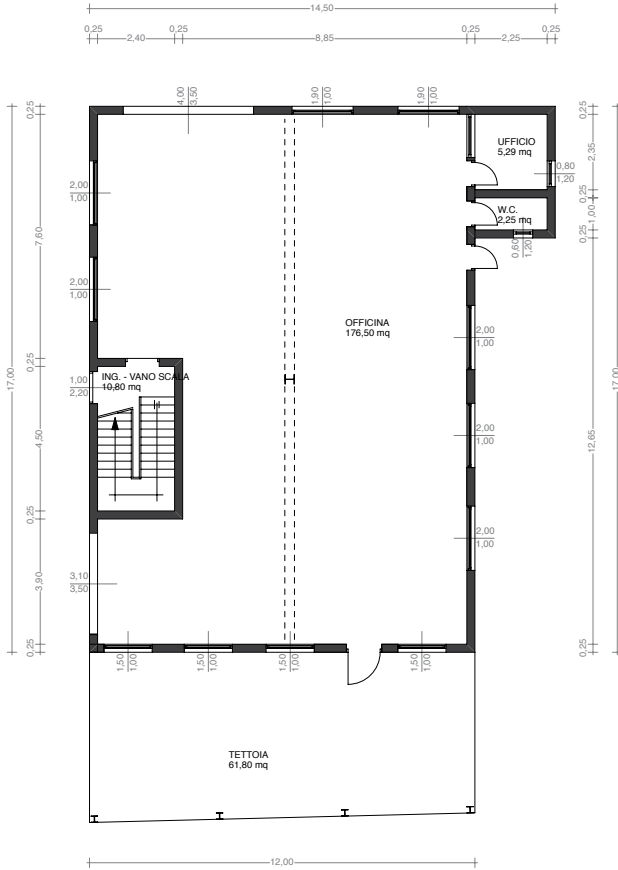
3. Descrizione degli interventi di miglioramento sismico

Gli interventi messi in atto per rimuovere lo stato di inagibilità dovuto all'evento sismico e migliorare il livello di sicurezza della costruzione (Figura 9) sono stati pensati con l'obiettivo primario di conferire alla struttura un corretto comportamento globale e scatolare lavorando su due aspetti fondamentali risultati lacunosi nello stato di fatto, ossia la qualità delle murature e la concezione strutturale della costruzione.

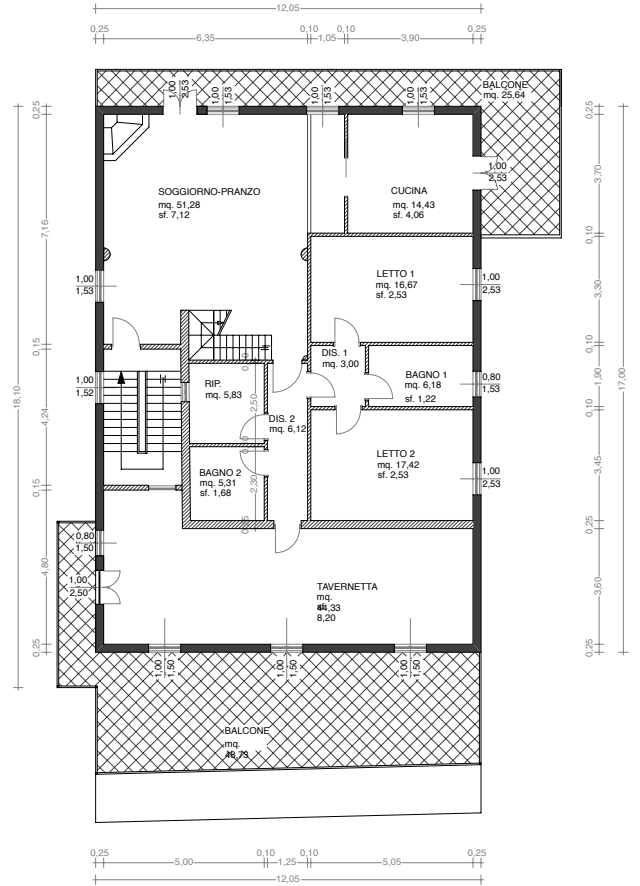
Si è previsto innanzitutto di realizzare delle murature al piano terra più resistenti e adatte ai carichi da sopportare, anche statici, e di migliorare al tempo stesso la loro distribuzione rispetto al piano primo (cercando di allineare cioè le aperture tra piano primo e piano terra, per quanto possibile). Inoltre è stata predisposta la messa in opera dell'intonaco armato all'esterno delle murature del piano primo (costituito da materiali compositi a basso modulo elastico) sia per conferire monoliticità ed attenuare dunque le problematiche della tessitura sopraesposte che potevano condurre a disgregazioni locali, sia per migliorare il grado di connessione tra le murature ortogonali e per ottimizzare il collegamento

Figura 6
Danneggiamento a taglio e compressione delle murature del piano terra (a sinistra) ed ampiezza delle fessure a schiacciamento dei blocchi (a destra).

Figura 7
Stato di fatto: piano terra
(a sinistra) e piano primo
(a destra).



Pianta Piano Terra

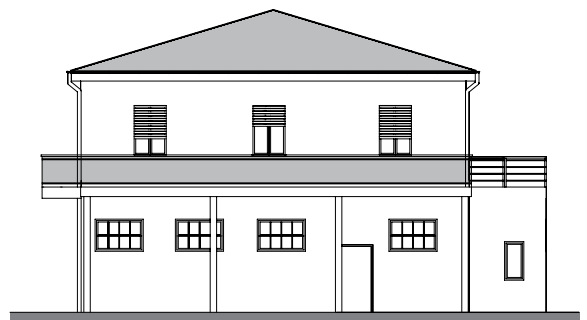


Pianta Piano Primo

Figura 8
Stato di Fatto: prospetto nord
(a sinistra) e prospetto sud
(a destra).



Prospetto Nord



Prospetto Sud

tra elementi esistenti e la nuova muratura armata del piano terra (infatti l'intonaco armato con materiali compositi è stato realizzato fino alla parte alta di quest'ultima). Infine è stato posizionato in sommità delle murature del piano primo un "collare" in fibra di carbonio con lo scopo di sopperire alla deformabilità della copertura, di contenere la tendenza al ribaltamento fuori piano delle pareti del piano primo, oltre che di migliorare il comportamento nel piano di pareti forate, in quanto consente la formazione di fasce murarie soprafinestra alla stregua di un tirante. Le murature in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato, risultate inadeguate e fortemente danneggiate dal sisma, sono state totalmente sostituite con pareti in muratura armata Poroton®. Gli elementi resistenti adottati sono blocchi in laterizio Poroton® P800 MA prodotti da Cis Edil

(RE) di dimensioni 25 x 38 x 19 cm (lunghezza x spessore x altezza) idonei alla realizzazione di pareti in muratura armata (Figura 10).

Questi blocchi sono caratterizzati da:

- configurazione geometrica idonea alla realizzazione dei vani verticali ospitanti le barre di armatura verticale;
- percentuale di foratura pari al 45% (blocco semipieno);
- i setti disposti parallelamente al piano del muro, sono continui e rettilinei, con interruzioni solo in corrispondenza di fori di presa o per l'alloggiamento delle armature;
- resistenza a compressione media nella direzione portante pari a 12 N/mm²;
- resistenza a compressione media nella direzione perpendicolare a quella portante pari a 2.5 N/mm².

Figura 9
Stato di Progetto: prospetto nord (a sinistra) e prospetto sud (a destra).

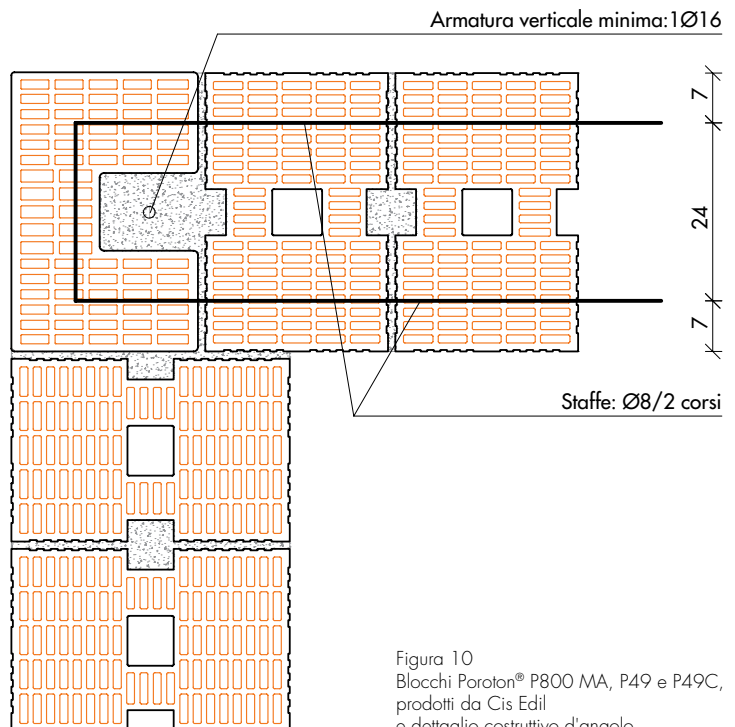
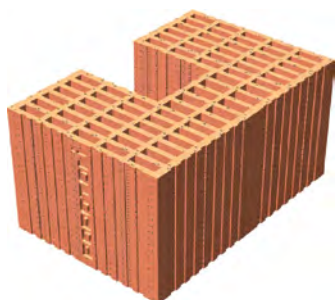
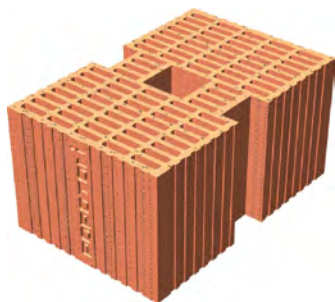
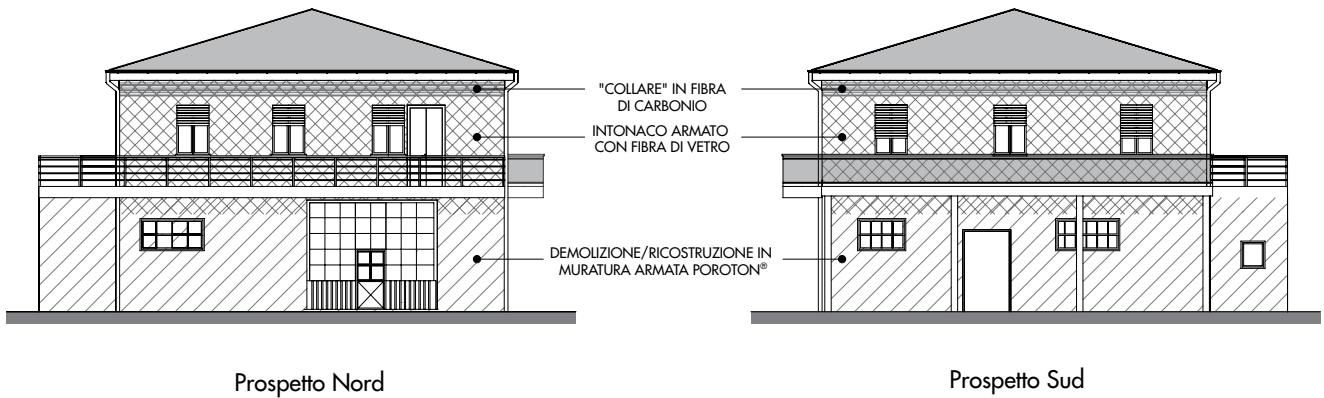


Figura 10
Blocchi Poroton® P800 MA, P49 e P49C, prodotti da Cis Edil e dettaglio costruttivo d'angolo.

Caratteristiche che li rendono conformi all'impiego per realizzare il sistema di muratura armata, secondo il §4.5.7 delle NTC 2008, in qualunque zona sismica, dato che rispettano i requisiti di cui al §7.8.1.2 delle NTC 2008. Inoltre, in osservanza di quanto detto dalla stessa norma al §4.5.7 e §7.8.1.2, è stata impiegata una malta a prestazione garantita M10 disposta nei giunti orizzontali e verticali ed utilizzata anche per il riempimento dei vani verticali in cui trovano alloggio le barre di armatura verticale.

Le barre di armatura ad aderenza migliorata impiegate, sono ad alta duttilità tipo B450 C controllate in stabilimento e sono di diametro 16 mm per le armature verticali e 8 mm per le armature orizzontali. La distribuzione delle armature verticali, riportata in Figura 11, rispetta la richiesta di armatura minima indicata al §4.5.7 delle NTC 2008: collocare almeno 1Ø16 a ciascuna estremità di ogni parete portante, ad ogni intersezione tra pareti portanti, in corrispondenza di ogni apertura e comunque ad interasse non superiore a 4 m. In questa sede è stato mantenuto

un passo di circa 1.2 m. Si è verificato inoltre che la percentuale di armatura verticale non fosse inferiore allo 0.05% né superiore all'1.0% dell'area lorda della muratura. L'armatura orizzontale è realizzata con 2Ø8 annegati nei giunti di malta e disposti ogni altro corso di blocchi, ad interasse dunque di 40 cm, verificando che la percentuale di armatura orizzontale, calcolata rispetto all'area lorda della muratura, non fosse inferiore allo 0.04% né superiore allo 0.5%.

La Figura 11 mostra anche la disposizione delle murature armate resistenti nelle due direzioni principali, che ora raggiungono percentuali del 3.0% e 3.7%, rispettivamente in direzione est-ovest ed in direzione nord-sud, che si discostano di poco (leggermente a sfavore l'una ed a favore l'altra) dal 3.5% minimo richiesto per edifici semplici realizzati in muratura armata in zone con $a_g \cdot S \approx 0.20 g$ (come da Tabella 7.8.III delle NTC 2008 già citata).

Confrontando le pareti portanti preesistenti con quelle ricostruite (Figura 7, Figura 8, Figura 9 e Figura 11), è possibile osservare che si è mi-

Figura 11
Stato di progetto: piano terra (a sinistra) e relativa distribuzione delle barre di armatura verticale per la muratura armata Poroton® (a destra).



Pianta Piano Terra



gliorato anche il posizionamento delle stesse in particolare sui lati corti, quelli cioè in direzione est-ovest, che erano quelli più vulnerabili e danneggiati. L'incremento di area resistente di muratura è avvenuto quindi attraverso l'aumento dello spessore e con l'ottimizzazione della disposizione delle pareti, utile quest'ultima anche per ribilanciare la rigidezza delle pareti in direzione est-ovest rispetto alle masse. La scelta inoltre del sistema costruttivo della muratura armata consente di raggiungere i livelli di sicurezza necessari con minori quantità di pareti resistenti rispetto alla muratura ordinaria.

L'intonaco armato è stato realizzato con una rete in fibra di vetro A.R. di maglia 25x25 mm e grammatura 225 g/m², caratterizzata da una resistenza a trazione di 45 kN/m e allungamento a rottura inferiore al 3%. La rete è stata messa in opera su matrice costituita da specifica malta minerale polimero-modificata ad elevata duttilità. La cerchiatura in sommità è stata realizzata con rete bidirezionale in fibra di carbonio ed è stata posizionata all'altezza della quota di imposta della copertura su matrice inorganica stabilizzata. La rete ha un peso della fibra di carbonio di 168 g/m², con uno spessore per il calcolo

della sezione di carbonio nelle due direzioni principali di 0.047 mm, mentre la fibra raggiunge carichi di rottura a trazione di 4800 MPa con un allungamento a rottura inferiore al 2%.

Sono state inoltre riparate le lievi fessurazioni alle tramezzature interne del piano primo ancora posizionando la rete in fibra di vetro all'interno degli intonaci ed infine sono stati ripristinati gli impianti del piano terra.

4. Il progetto di miglioramento: analisi e verifiche

La costruzione, in virtù della destinazione d'uso, deve avere una vita nominale di almeno 50 anni e rientra nella classe d'uso II (§2.4 NTC 2008), questo comporta una probabilità di superamento nel periodo di riferimento $V_R = 50$ anni, del 10% per lo SLV. Il comune di San Possidonio è attualmente ricadente in ex-zona sismica 3 e la costruzione sorge su suolo di categoria C su una superficie topografica orizzontale, ossia di categoria T1. I parametri dello spettro di risposta elastico che definiscono l'azione sismica sono stati definiti in riferimento alla "Tabella 1" dell'allegato B alle NTC 2008 e sono riportati in

Tabella 1 - Parametri spettrali

Stati Limite	a_g (g/10)	F_0 (-)	T_c^* (s)
SLO ($T_R = 30$ anni)	0.37	2.58	0.24
SLD ($T_R = 50$ anni)	0.46	2.52	0.27
SLV ($T_R = 475$ anni)	1.37	2.59	0.27

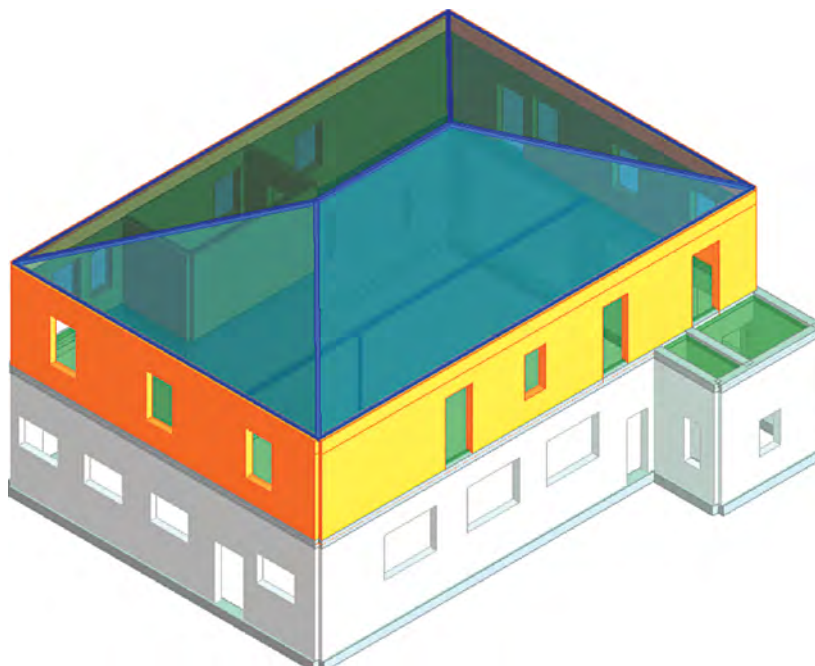


Figura 12
Modello tridimensionale a macroelementi impiegato per le analisi.

Tabella 1. Il fattore di struttura q_0 non è stato impiegato in quanto trattasi di analisi non lineare (§7.8.1.3 NTC 2008). La progettazione è stata svolta considerando tutte le combinazioni delle azioni sismiche e non sismiche.

La costruzione è stata analizzata tramite un modello tridimensionale a macroelementi, rappresentativi dei maschi murari e delle fasce di piano, collegate tra di loro attraverso bracci rigidi, nel quale gli orizzontamenti sono modellati con elementi finiti superficiali con comportamento membranale e anisotropo, per tenere conto dell'eventuale diversa rigidezza nelle due direzioni principali. Il modello e le relative analisi sono stati svolti con il codice di calcolo *3Muri* di S.T.A. DATA (Figura 12).

Sono stati perciò costruiti due modelli il primo rappresentativo dello stato di fatto, assumendo per le murature portanti le proprietà dei materiali esistenti ed il secondo rappresentativo dello stato di progetto in cui sono state assunte le proprietà meccaniche delle nuove murature armate Poroton® al piano terra e delle murature rinforzate al piano primo. Per quanto riguarda gli orizzontamenti sono rimasti sostanzialmente invariati nei due modelli, il primo solaio è stato modellato come monodirezionale ed infinitamente rigido, mentre la copertura è stata modellata fedelmente alla condizione reale disponendo cioè i profili metallici collegati dai soli pannelli sandwich di chiusura per cogliere la deformabilità della stessa. In particolare, per quanto riguarda le murature del modello dello stato di fatto, sono stati assunti i parametri fisico meccanici dei materiali preesistenti riportati in Tabella 2, per la muratura in blocchi di calcestruzzo aerato autoclavato del piano terra sono stati desunti da schede tecniche conformi con i materiali impiegati all'epoca; mentre per la muratura in laterizio del piano primo si è assunto come riferimento la muratura in laterizio realizzata con blocchi di foratura 45%, riportata in Tabella C8A.2.1 della Circolare n° 617 del 02/07/2009, riducendone i valori del 30% in considerazione di quanto la stessa Circolare indica di fare nel caso ci si trovi di fronte a tessiture murarie lacunose, come è il caso in questione.

Non essendo state condotte indagini specialistiche il livello di conoscenza dei materiali preesistenti del fabbricato è di tipo LC1 (conoscenza limitata) a cui corrisponde un fattore di confiden-

za FC pari a 1.35, da applicare ai parametri di capacità ottenuti ed indicati in Tabella 2. Inoltre è possibile per gli edifici in muratura in presenza di un livello di conoscenza LC1 applicare qualunque metodo di analisi per la verifica della costruzione (Tabella C8A.1.1 della Circolare n°617 del 02/07/2009).

Gli altri materiali presenti nella costruzione sono calcestruzzo C20/25 e acciaio B450 per gli elementi in calcestruzzo armato e profili in acciaio S 275 per le carpenterie metalliche della copertura. Non ci si dilunga oltre su tali materiali, in quanto non rappresentano l'argomento di interesse della presente memoria, focalizzata sul ripristino e sostituzione con miglioramento degli elementi danneggiati, ossia le murature.

La Tabella 3 riporta i valori assunti per le murature realizzate nello stato di progetto: la muratura del piano terra, come si è detto, è stata completamente sostituita con una più resistente muratura armata Poroton® costituita da blocchi prodotti da Cis Edil s.r.l. e malta M10 utilizzata sia per l'allettamento che per il riempimento dei vani verticali ospitanti le armature verticali; e la muratura del piano primo che è stata consolidata con intonaco armato sulla superficie esterna. La valutazione delle proprietà di quest'ultima muratura si è basata sul fatto che la realizzazione dell'intonaco armato attenua l'effetto di tessitura scorretta, restituendo così alla muratura esistente una quota parte della capacità originaria. Tale quota parte è stata stimata come incremento del 10% delle proprietà meccaniche, che risulta inferiore e dunque a favore di sicurezza rispetto anche al minore dei coefficienti correttivi riportati in Tabella C8A.2.2 della Circolare n°617. Per quanto riguarda la muratura consolidata con intonaco armato i valori riportati in Tabella 3 sono stati poi corretti applicando il fattore di confidenza FC pari a 1.35, poiché in ogni caso si parte da una stima delle proprietà della muratura esistente con livello di conoscenza LC1, come precedentemente argomentato.

Le analisi condotte su entrambi i modelli (stato di fatto e stato di progetto) hanno riguardato lo studio del comportamento globale tramite analisi statiche non lineari e del comportamento locale tramite la verifica dei cinematici.

Le analisi condotte sullo stato di fatto hanno sostanzialmente confermato il quadro di danno rile-

Tabella 2 - Proprietà fisico meccaniche delle murature preesistenti

Materiale	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/cm ²)	W (kN/m ³)	Spessore (cm)
Muratura AAC Piano Terra	220	19	2200	880	8	25
Muratura laterizio Piano Primo	280	21	3150	945	12	25

Tabella 3 - Proprietà fisico meccaniche delle murature nuove e rinforzate

Materiale	f_m (N/cm ²)	τ_0 (N/cm ²)	E (N/mm ²)	G (N/cm ²)	W (kN/m ³)	Spessore (cm)
Muratura Armata Poroton® di Cis Edil Piano Terra	590	29	4788	1915	11	38
Muratura laterizio + intonaco armato Piano Primo	308	23	3465	1039	12.5	25 +2

vato in seguito agli eventi sismici ed hanno messo in evidenza anche il pericolo di ribaltamenti locali. I risultati delle analisi statiche non lineari mostrano allo SLV una sostanziale concentrazione del danno al piano terra, in particolare per l'azione sismica in direzione est-ovest che colpisce i lati corti più vulnerabili alle azioni sismiche. La maggior parte delle analisi in direzione Y (nord-sud) risulta non soddisfatta, così come tutte le analisi in direzione X (est-ovest). Analizzando il quadro di danno della parete nord e sud con riferimento all'analisi 2 (Sisma +X, ecc. = 0, Distribuzione proporzionale al 1° modo), che è risultata essere una delle più gravose, è possibile osservare come sopraggiunga la rottura per taglio e pressoflessione nei maschi murari del piano terra per una

capacità di spostamento ultimo di 0.68 cm, molto inferiore allo spostamento richiesto allo SLV pari a 1.85 cm (Figura 13 e Figura 14). Il fattore di accelerazione espresso come rapporto dell'accelerazione del suolo che porta al raggiungimento dello SLV e quella corrispondente al periodo di ritorno di riferimento (nel nostro caso $T_r = 475$ anni ossia il 10% di probabilità di superamento in $V_r=50$ anni, come definito dalle NTC 2008 per lo SLV), entrambe riferite alla categoria di sottosuolo A (come definito nell'Ordinanza n.86 del 06/12/2012 della Regione Emilia-Romagna e precedenti documenti normativi dedicati allo studio della vulnerabilità dell'esistente come il D.P.C.M. 9/2/2011), risulta pari a 0.4 che è tra i minimi valori ottenuti per le analisi statiche non

Figura 13 Stato di Fatto: quadro di danno sulla parete nord (a sinistra) e sud (a destra) allo spostamento ultimo dell'analisi 2 (Sisma +X, ecc. = 0, Distribuzione proporzionale al 1° modo).

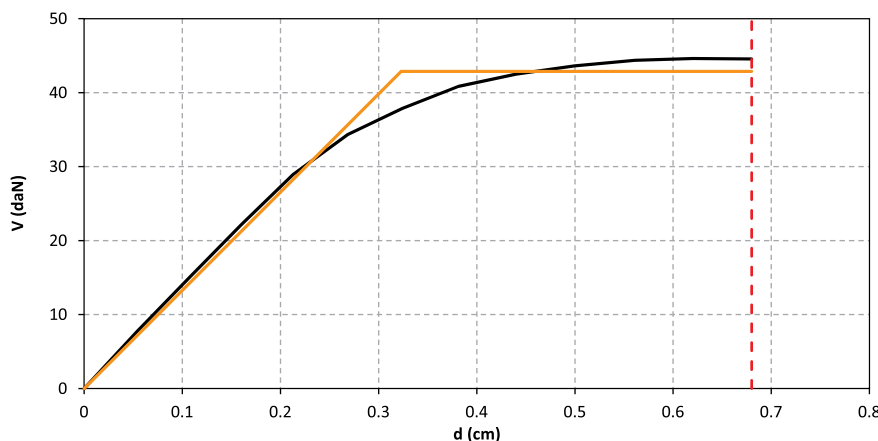
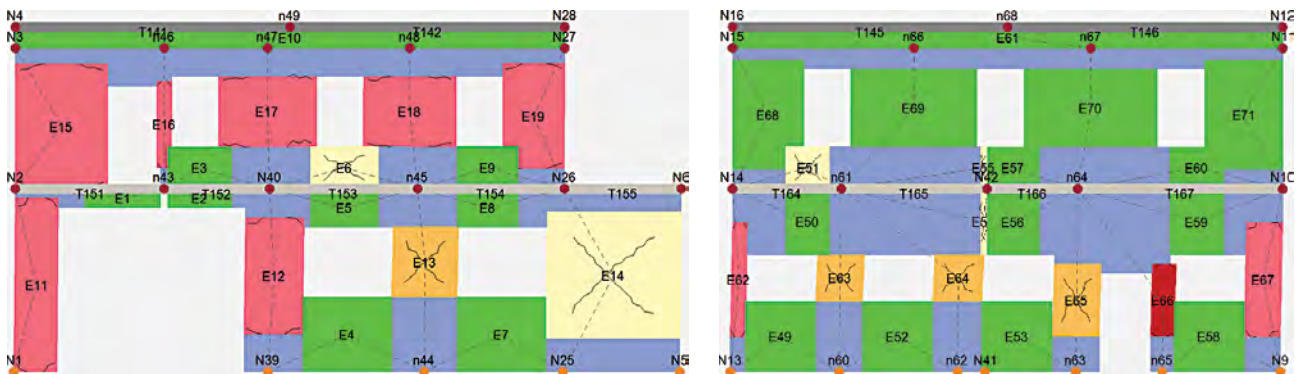
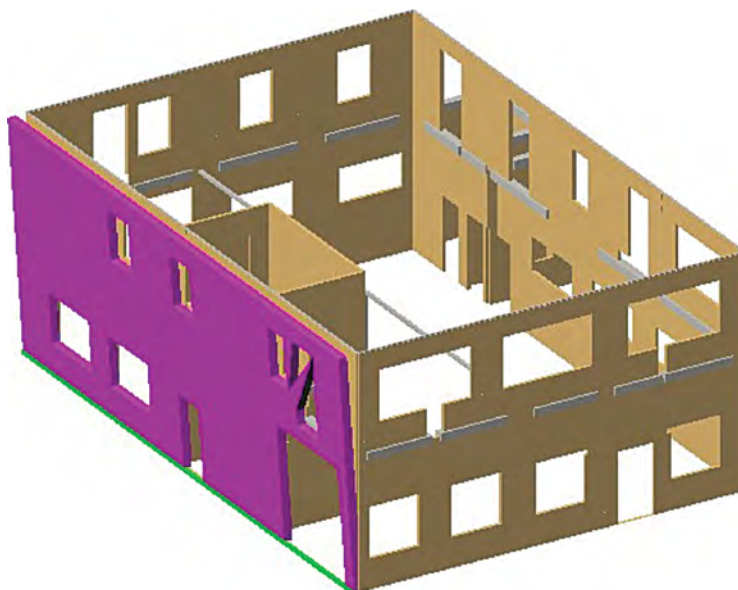


Figura 14 Stato di Fatto: curva di capacità dell'analisi 2 (Sisma +X, ecc. = 0, Distribuzione proporzionale al 1° modo).

Figura 15
Stato di Fatto: cinematismo di ribaltamento della parete ovest.



lineari. I risultati dell'analisi dei possibili meccanismi locali confermano il fattore di accelerazione pari a 0.4 con la verifica del cinematismo di ribaltamento della parete ovest (Figura 15).

Sulla base di queste considerazioni, oltre che dei danni rilevati con le ricognizioni post-sismiche, sono stati predisposti gli interventi di miglioramento descritti nel precedente paragrafo, i quali per arrivare alla completa definizione sono stati innanzitutto analizzati, come si è detto, creando un modello per lo stato di progetto. Anche in questo caso sono state condotte analisi statiche non lineari e verifiche dei cinematismi in modo da tenere sotto controllo sia il comportamento globale che quello locale.

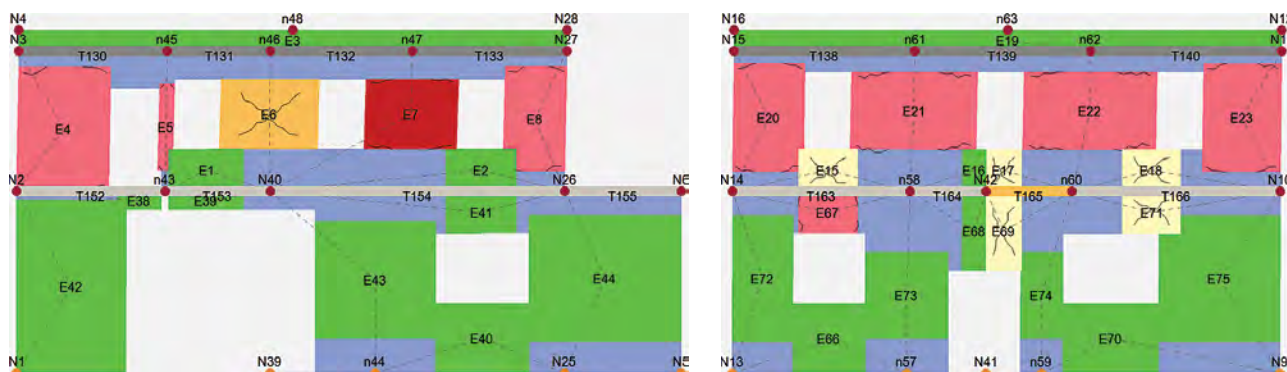
Considerando i risultati delle analisi statiche non lineari, emerge come gli interventi messi in opera modifichino la risposta della costruzione, in particolare in direzione X (est-ovest), in cui se analizziamo di nuovo l'analisi 2 emerge come si riescano ad evitare le rotture fragili a taglio e limitare il danno al piano terreno. Rimangono in pratica danneggiamenti a taglio e pressoflessione al piano superiore che non permettono di verifi-

care la costruzione, ma consentono di raggiungere un valore del fattore di accelerazione di circa 0.7, con capacità di spostamento di 0.69 cm per una richiesta di spostamento di 0.98 cm, nel caso dell'analisi considerata (Figura 16 e Figura 17). Per quanto riguarda invece i cinematismi di ribaltamento, la predisposizione dell'intonaco armato che ha reso monolitica la muratura del piano primo (condizione questa che rappresenta un'ipotesi essenziale per lo studio dei cinematismi), insieme al "collare" in fibra di carbonio inserito nella modellazione come tirante, ha consentito di eliminare completamente il rischio di ribaltamento totale o parziale delle pareti.

5. Messa in opera degli interventi a livello di cantiere

La messa in opera degli interventi è avvenuta per fasi, stabilizzando innanzitutto il piano terra per poi procedere con gli interventi al piano primo contestualmente alla riparazione degli impianti del piano terra e concludere con gli interventi sulle partizioni interne e ripristino delle finiture.

Figura 16
Stato di Progetto: quadro di danno sulla parete nord e sud allo spostamento ultimo dell'analisi 2 (Sisma +X, ecc. = 0, Distribuzione proporzionale al 1° modo).



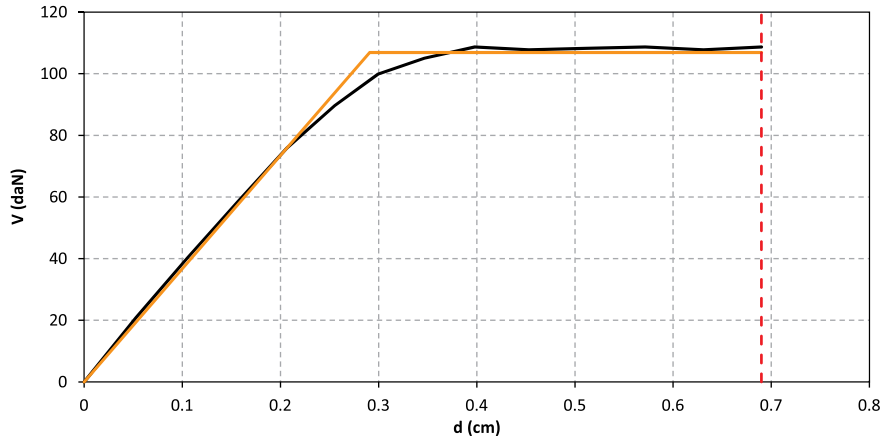


Figura 17
Stato di Progetto: curva di capacità dell'analisi 2 (Sisma +X, ecc. = 0, Distribuzione proporzionale al 1° modo).

La muratura armata Poroton® del piano terra è stata costruita per parti, demolendo porzioni successive della murature in calcestruzzo aerato autoclavato esistente, in presenza dei puntelli provvisori, eliminati una volta conclusa la nuova muratura (Figura 18 e Figura 19). Stabilizzato il piano inferiore è stato possibile accedere in sicurezza al piano superiore e procedere con la scalpellatura completa dell'intonaco esterno preparando adeguatamente la super-

ficie per la successiva posa in opera dell'intonaco armato in fibra di vetro su specifica malta minerale polimero-modificata ad elevata duttilità e del "collare" in fibra di carbonio in sommità su apposita matrice inorganica stabilizzata (Figura 20). Alla fine degli interventi strutturali la costruzione appariva come mostra la Figura 21. La costruzione dopo il ripristino delle finiture, a lavori completamente conclusi, è ritratta nella foto di apertura del presente contributo.



Figura 18
Fasi di demolizione/ricostruzione delle murature del piano terra con muratura armata Poroton®.



Figura 19
Parete est in muratura armata Poroton® completata.

Figura 20
Fasi di applicazione
dell'intonaco armato in
fibra di vetro (sopra) e del
"collare" in fibra di carbonio
(sotto).



Figura 21
Fine degli interventi di
riparazione e miglioramento
strutturale.

