



## Telai controventanti in acciaio per l'adeguamento sismico della Scuola Primaria di Conselice (RA)

Marco Peroni<sup>a</sup>, Irene Fabbi<sup>a</sup>, Elisa Gentilini<sup>a</sup>, Nicolò Minguzzi<sup>a</sup>  
<sup>a</sup> Marco Peroni Ingegneria, Via S. Antonino 1, 48018 Faenza (RA), Italy

*Keywords: adeguamento sismico, muratura, ristrutturazione edilizia, telai controventanti, analisi pushover*

### ABSTRACT

Come professionisti nel campo dell'edilizia, riteniamo che il recupero degli edifici esistenti, finalizzato da un lato alla conservazione e dall'altro all'attualizzazione funzionale e all'adeguamento alle vigenti normative sismiche ed energetiche, rappresenti un dovere civile caratteristico della nostra cultura: è nella nostra storia millenaria che trovano infatti posto i nostri valori più solidi, tra i quali la salvaguardia del patrimonio architettonico rappresenta certamente un segno distintivo rispetto a molti altri paesi del mondo. Tale premessa risulta doverosa nella presentazione del progetto per l'adeguamento della Scuola Primaria Felice Foresti di Conselice (RA), a maggior ragione trattandosi di un edificio pubblico e vista la natura potenzialmente devastante di un evento come il terremoto che, a causa della sua relativa imprevedibilità, mette in difficoltà anche noi tecnici. Gli insegnamenti tratti nel corso del tempo, in particolare riguardo alle strutture in muratura, ci hanno permesso di comprendere come la collaborazione tra gli elementi strutturali orizzontali e verticali (comportamento scatolare) costituisca la caratteristica principale di resistenza nei confronti dell'azione sismica di tali tipologie edilizie.

### 1 INTRODUZIONE

Al fine di garantire un'adeguata risposta sismica, i fabbricati in muratura devono avere un comportamento scatolare, caratterizzato da compattezza strutturale lungo le due direzioni ortogonali, pertanto nel caso in esame è stato necessario riorganizzare la configurazione geometrica dell'edificio in un insieme di volumi-scatolette l'uno affiancato all'altro con pareti posizionate a una distanza non eccessiva.

La Scuola Primaria "Felice Foresti" di Conselice (Figura 1) è un edificio storico in muratura portante risalente ai primi anni del '900 ed è stato rilevato che la principale vulnerabilità riscontrata nei confronti delle sollecitazioni sismiche è data dalla configurazione strutturale a pareti longitudinali, collegate tra loro da un numero limitato di pareti trasversali portanti e strutturalmente efficaci.

Il progetto, finalizzato all'adeguamento agli standard di sicurezza prescritti dalla vigente normativa per gli edifici di nuova realizzazione, ha previsto quindi l'inserimento di nuove pareti ortogonali rispetto alle pareti esterne, la maggior

parte delle quali realizzate mediante telai metallici in acciaio con controventature al fine di ridurre la deformazione (telai controventanti) e di ottenere la "scatolarità" dell'edificio. La particolare conformazione delle controventature consente di sfruttare in maniera dinamica e flessibile gli ambienti interni separati dai telai, potendo all'occorrenza unificarne i volumi in singoli spazi più ampi.

L'utilizzo estensivo nell'adeguamento sismico dell'acciaio rappresenta uno degli insegnamenti che gli ingegneri hanno acquisito a seguito dei terremoti passati, dove spesso si è osservato come le ristrutturazioni con tetti pesanti e cordoli in cemento armato su strutture in muratura risultassero penalizzanti nei confronti dell'azione sismica, che amplifica i movimenti delle masse più grandi.

L'obiettivo è stato quindi quello di alleggerire e limitare l'uso del cemento ai piani più bassi, come per esempio in fondazione.

Nel comune di Faenza (RA) stiamo realizzando interventi analoghi per il miglioramento sismico della Scuola Secondaria di primo grado "Europa" e per l'adeguamento sismico di un edificio privato destinato ad ospitare una Scuola di Musica.



Figura 1. Scuola Primaria "Felice Foresti", Conselice (RA).

## 2 DESCRIZIONE GENERALE

L'edificio principale è stato realizzato nel 1930 ed è composto da due piani fuori terra e un piano sottotetto, con altezza di gronda di 10,9m. Ha conformazione in pianta ad elle e dimensioni massime pari 34,0x46,0m.

In corrispondenza dell'ala ovest è stato realizzato in epoca successiva, nel 1970, un ampliamento composto anch'esso da due piani fuori terra, con altezza di gronda di 10,0m e conformazione in pianta rettangolare di dimensioni in pianta 6,7x17,9m (Figure 2-3).

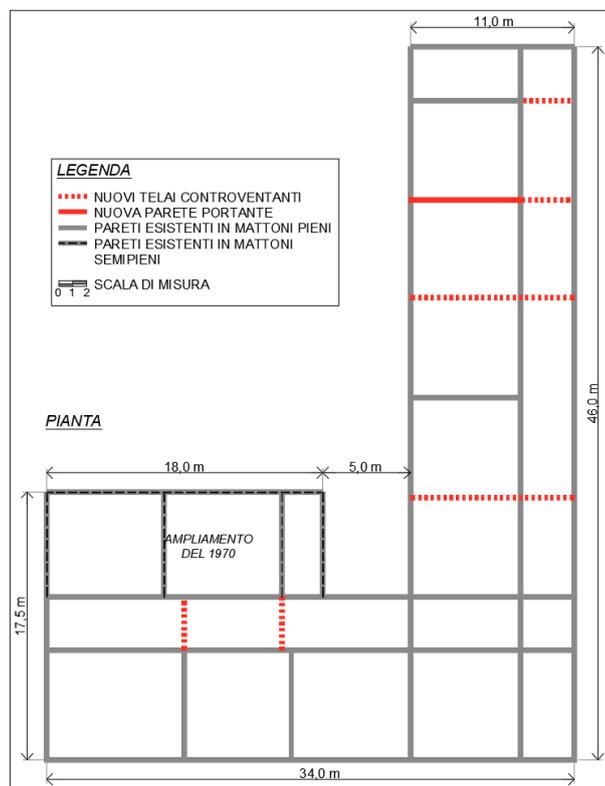


Figura 2. Inquadramento planimetrico Scuola "Foresti".

### 2.1 Interventi strutturali

Il progetto, finalizzato all'adeguamento agli standard di sicurezza prescritti dalla vigente normativa per gli edifici di nuova realizzazione

(NTC 2008), ha previsto quindi l'inserimento di nuove pareti ortogonali rispetto alle pareti esterne, la maggior parte delle quali realizzate mediante telai metallici in acciaio con controventature a K al fine di ridurre la deformazione (telai controventanti costituiti da montanti e traversi in profili HeB240) e di ottenere la "scatolarità" dell'edificio (Figure 2-3).

La particolare conformazione delle controventature consente di sfruttare in maniera dinamica e flessibile gli ambienti interni separati dai telai, potendo all'occorrenza unificarne i volumi in singoli spazi più ampi. In corrispondenza dei telai in acciaio viene poi applicato sul lato esterno delle pareti perimetrali in muratura un profilo metallico Upn240 ancorato al montante interno. Le nuove pareti saranno appoggiate su nuove travi di fondazione rovesce con piano di posa a livello delle fondazioni esistenti (Figura 4).

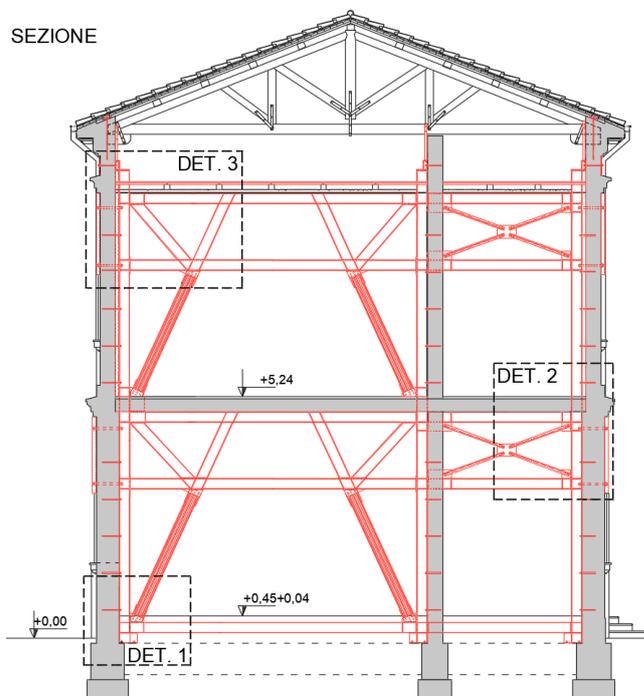


Figura 3. Sezione tipica Scuola "Foresti".

Anche i solai svolgono un ruolo fondamentale una volta resi sufficientemente rigidi nel loro piano. I solai di piano sono in laterocemento con soletta in c.a. collaborante, mentre i solai di sottotetto e di copertura sono in legno e non sufficientemente rigidi. Al fine di migliorare le mutue connessioni tra i setti sismo-resistenti anche alla quota sommitale, è stata realizzata l'operazione di cerchiatura del livello di copertura con il sistema del cordolo-tirante in acciaio sulle pareti portanti perimetrali ed interne (Figura 5-6). Infine, le capriate in legno sono state collegate tra loro nel piano delle falde mediante il posizionamento di croci in acciaio, creando così per ciascuna di esse un piano rigido

opportunamente connesso al cordolo-tirante metallico previsto lungo il cornicione perimetrale.

Inoltre è stato creato un doppio tavolato incrociato in legno di irrigidimento del solaio di sottotetto (attualmente non praticabile), consentendo di rendere l'ambiente accessibile per future manutenzioni.

Parallelamente sono state eliminate situazioni incongrue come pilastri e pareti in falso (presenti nel sottotetto) sui quali poggiavano alcune porzioni di falde di copertura, ricostruite in modo da risultare adeguatamente ammortate al resto della struttura e collaboranti in caso di sisma.

Per l'adeguamento del fabbricato sono stati previsti interventi di rinforzo delle murature esistenti quali la realizzazione delle ammortature mediante barre innestate con resine epossidiche, per migliorare il collegamento tra le murature ortogonali.

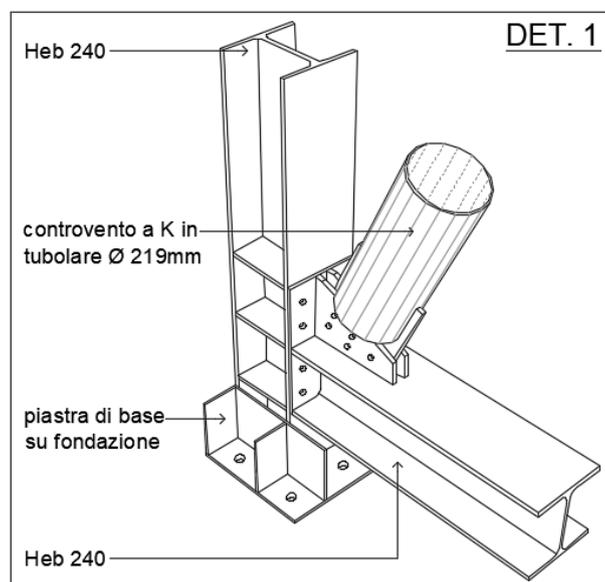


Figura 4. Assonometria nodo di collegamento dei pilastri HeB240 alla fondazione con controvento in tubolare.

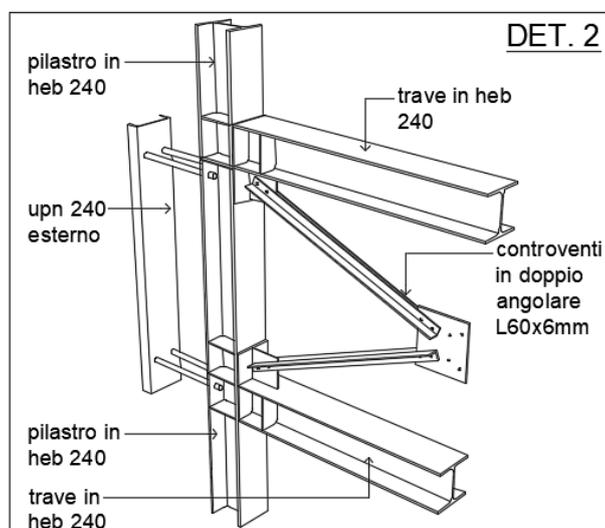


Figura 5. Assonometria nodo di collegamento del telaio controventante a livello del primo solaio.

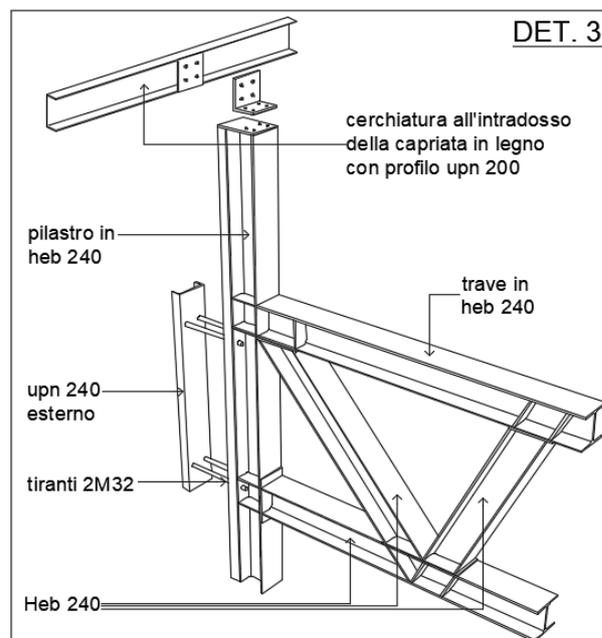


Figura 6. Assonometria nodo di collegamento del telaio controventante a livello del secondo solaio.

## 2.2 Organizzazione dei lavori

Data la necessità di mantenere la scuola sempre in uso (il Comune non aveva un posto alternativo per trasferire tutto il plesso scolastico durante i lavori), le lavorazioni sono state divise in due anni, concentrandole nei 3 mesi di vacanze estive: durante l'estate del 2018 (da inizio Giugno a inizio Settembre), sono stati realizzati i lavori all'interno dell'edificio storico sia al piano terra che al piano primo inserendo i telai controventanti e prendendo l'occasione di rifare pavimenti e parte degli infissi. Nell'estate del 2019 si procederà al completamento delle operazioni descritte per il sottotetto e per la copertura, sostituendo e consolidando parte delle orditure lignee e realizzando il cordolo tirante in acciaio previsto al contorno della sommità dell'edificio.

## 3 CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI

Nell'ambito dell'adeguamento sismico, si è ritenuto opportuno eseguire indagini diagnostiche sull'edificio in muratura, in particolare sono state svolte prove con martinetti piatti doppi (Figura 7) per stimare le caratteristiche di deformabilità delle murature portanti e prelievi di frammenti di malta dai giunti orizzontali delle murature per l'esecuzione di test di laboratorio (doppio punzonamento).

Sulla base delle verifiche e indagini realizzate in sito, è stato considerato un livello di conoscenza LC3, assumendo quindi un fattore di confidenza FC pari a 1,00.



Figura 7. Esecuzione di prove con martinetto piatto.

I parametri meccanici di progetto riportati in Tabella 1 sono stati ricavati dalle prove sperimentali svolte e dalla Tabella C8.A.2.1 della Circolare n.617/2009, in riferimento alle indicazioni fornite in Tabella C8.A.1.1, distinguendo le due tipologie murarie, in mattoni pieni e malta cementizia nella struttura originale degli anni '30, e in mattoni semipieni e malta cementizia nell'ampliamento degli anni '70.

Tabella 1. Tabella caratteristiche meccaniche di calcolo della muratura.

Muratura	$f_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	$\tau_m$ (N/cm <sup>2</sup> )	E (N/mm <sup>2</sup> )
Mattoni pieni	197	6	1644
Mattoni semipieni	650	28	6657

#### 4 ANALISI NUMERICHE

Dal punto di vista delle analisi numeriche abbiamo eseguito un'analisi statica non lineare (pushover) dell'intera struttura muraria con il programma di calcolo AEDES.PCM (Figura 8) che lavora schematizzando in modo automatico la struttura con "telai equivalenti a nodi rigidi".

La scatola muraria viene schematizzata da elementi verticali (maschi murari non armati, pilastri in acciaio), elementi orizzontali (fasce murarie non armate, travi in acciaio) e incroci di nodi infinitamente rigidi. Si assume che gli elementi ad asse verticale del piano più basso siano vincolati a terra mediante condizioni di incastro perfetto.

La validazione dell'affidabilità dei codici utilizzati e verificare l'attendibilità dei risultati ottenuti è stata ottenuta dal confronto con un'analisi parallelamente eseguita con il programma MIDAS GEN (Figura 9), dove il modello a telaio equivalente della struttura viene costruito manualmente dall'utente, verificando la compatibilità tra i modi di vibrare e le curve pushover tra i due software.

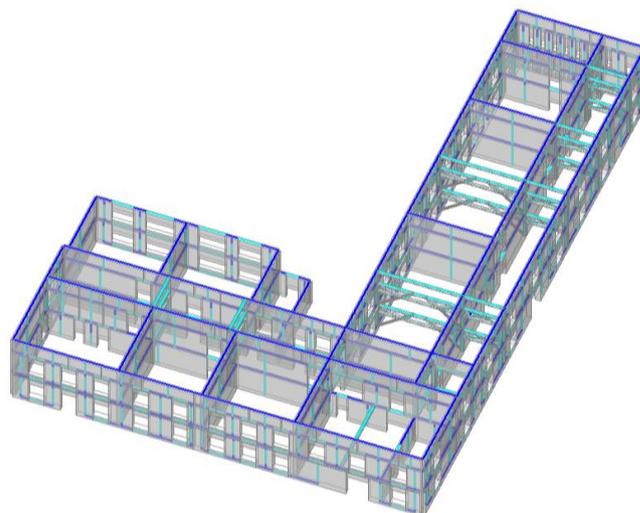


Figura 8. Modello a telaio equivalente (Aedes.PCM)

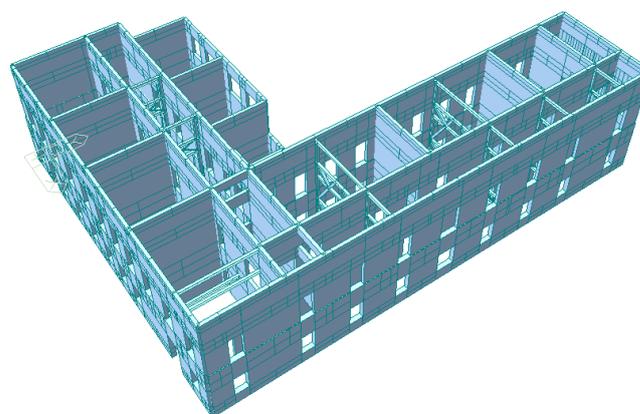


Figura 9. Modello a telaio equivalente (Midas Gen)

##### 4.1 Validazione dei risultati

I risultati risultano confrontabili con un'incertezza massima del 15%, che risulta accettabile se si tiene conto del fatto che il programma di calcolo MidasGen permette di assegnare cerniere plastiche concentrate anche agli elementi di rinforzo in acciaio (a flessione e a taglio per travi e pilastri, e a sforzo normale per i controventi), mentre il programma di calcolo Aedes.Pcm considera il comportamento dell'acciaio nella sola fase elastica. Pertanto la maggiore capacità ottenuta, in particolare in direzione y (direzione in cui sono presenti i nuovi telai in acciaio), dipende da questo aspetto. In Figura 10-11 si riportano esempi di curve pushover di capacità a confronto.

Oltre alle verifiche agli stati limite, dall'analisi non lineare è possibile ricavare informazioni sulla tipologia di rottura degli elementi al crescere della forza orizzontale. Risulta così possibile controllare anche la sequenza di attivazione delle cerniere plastiche a flessione e taglio (Figura 12) al fine di determinare le labilità strutturali e le accelerazioni per le quali esse avvengono.

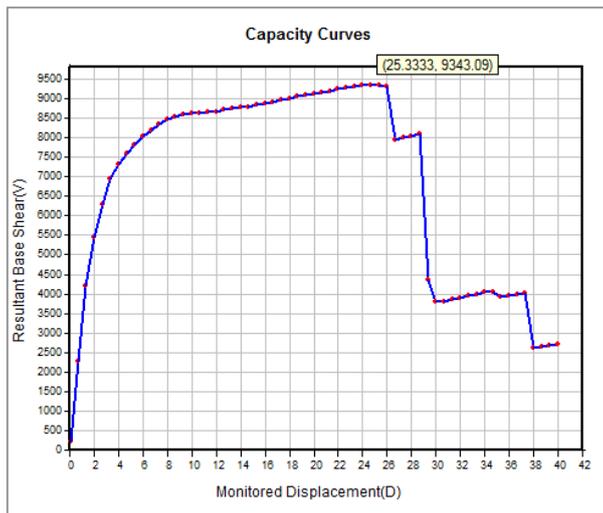


Figura 10. Esempio di curva di capacità V-D (Distr. Forze (A), Direzione +Y) ottenuta da Midas Gen.

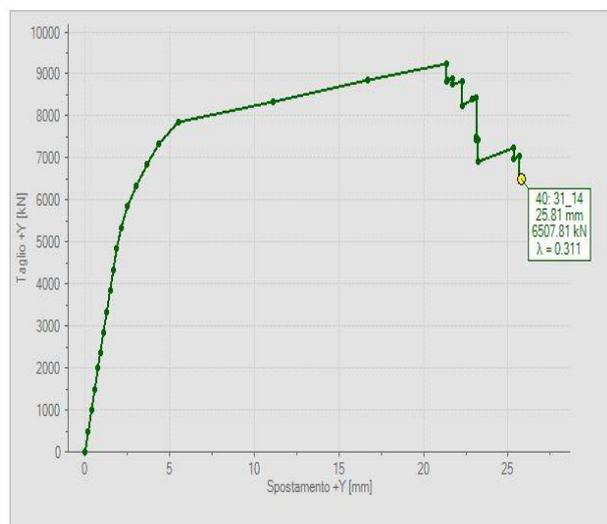


Figura 11. Esempio di curva di capacità V-D (Distr. Forze (A), Direzione +Y) ottenuta da Aedes.PCM.



Figura 12. Rappresentazione stato di plasticizzazione per verifica a pressoflessione complanare al collasso (Distr. Forze (A), Direzione +Y) ottenuta da Aedes.PCM.

Le aste parzialmente plasticizzate sono aste che subiscono un degrado vincolare a cerniera (dovuto al superamento della resistenza a pressoflessione complanare) solo in una sezione di estremità, mentre l'altra sezione estrema è ancora in fase elastica. Un'asta è collassata quando, dopo la fase plastica, ha raggiunto la deformazione ultima.

Analizzando i risultati ottenuti dall'analisi PushOver è possibile dichiarare che l'edificio ha raggiunto un livello di sicurezza sismica tale per cui il fabbricato risulta adeguato sismicamente, in seguito all'inserimento dei nuovi telai di acciaio in quanto per ogni curva di capacità risulta:

- la capacità in termini di spostamento superiore alla domanda,
- gli indicatori di rischio in termini di PGA e Tempo di Ritorno superiori a 1 (Tab. 2),
- il  $q^*$  inferiore a 3.

Tabella 2. Indicatore di rischio in termini di PGA ai fini dell'adeguamento sismico.

Indicatori di rischio	
$\alpha_0$ (PGA <sub>CLO</sub> / PGA <sub>DLO</sub> )	2.19
$\alpha_D$ (PGA <sub>CLD</sub> / PGA <sub>DLD</sub> )	2.01
$\alpha_V$ (PGA <sub>CLV</sub> / PGA <sub>DLV</sub> )	1.24

#### 4.2 Compatibilità degli spostamenti tra acciaio e muratura

Un aspetto importante nell'ambito delle verifiche numeriche correlate alla realizzazione di un simile intervento di consolidamento sismico riguarda la compatibilità in termini di spostamenti tra la muratura esistente ed i nuovi telai in acciaio. Come è noto, l'acciaio risulta tra i materiali di uso comune nel consolidamento strutturale degli edifici esistenti in muratura una delle migliori soluzioni in termini di compatibilità meccanica e chimica e di reversibilità.

Tuttavia, occorre puntualmente verificare che i dispositivi progettati siano effettivamente in grado di assecondare i movimenti della struttura alla quale risultano collegati senza generare accumuli di sollecitazioni indesiderate, distacchi o fenomeni di martellamento.

Pertanto, è stata condotta una apposita analisi finalizzata a verificare l'effettiva compatibilità in termini di spostamenti massimi in esercizio tra i due sistemi strutturali che assieme concorrono, nello stato di progetto, ad assorbire l'azione sismica, ovvero l'insieme dei paramenti murari sismo-resistenti ed i telai metallici controventati.

Si è elaborato un ulteriore modello di calcolo nel quale sono stati inseriti tutti gli interventi previsti a progetto (piani rigidi, cordolo tirante in copertura e parete trasversale in muratura) tranne i telai in acciaio; di conseguenza, il ruolo di controventamento nei confronti dell'azione sismica in tale modellazione è stato affidato interamente ai setti murari.

Confrontando quindi il massimo spostamento all'SLD relativo ai nuovi telai di acciaio nel modello complessivo, con quello relativo ai setti murari nel modello privato dei telai, si può notare

che questi sono del tutto compatibili, con differenze non significative nell'ordine di qualche decimo di millimetro. Pertanto, la verifica della compatibilità delle deformazioni in fase elastica può ritenersi soddisfatta.

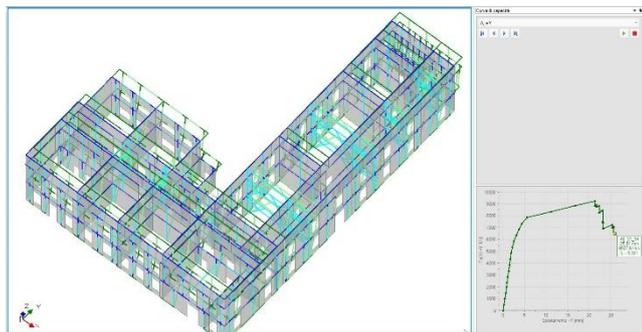


Figura 13. Rappresentazione della deformata al collasso (Distr. Forze (A), Direzione +Y) ottenuta da Aedes.PCM.

Inoltre lo spostamento massimo orizzontale (drift) derivante dall'analisi numerica per i pilastri in acciaio risulta pari a circa 2mm: tale valore rientra nei limiti stabiliti dalle NTC in termini di spostamenti laterali per le strutture metalliche ( $\delta < h/300 - \Delta < H/500$ ).



Figura 14. Telai controventanti montanti in cantiere.



Figura 15. Telai controventanti montanti in cantiere.

## 5 SINTESI DEI RISULTATI

Come detto, il fabbricato in oggetto presentava prima dell'intervento una diffusa serie di vulnerabilità locali e globali tanto nei confronti delle azioni statiche quanto rispetto all'azione dinamica orizzontale indotta dal sisma. L'assenza del piano rigido in copertura e di cordolature perimetrali rendeva difficoltoso e incerto lo svolgimento di una corretta analisi (lineare o non lineare) ad elementi finiti volta ad indagare il comportamento globale della costruzione: una serie di cinematismi di primo modo infatti, caratterizzati da PGA di attivazione molto bassa rispetto all'azione sismica attesa, avrebbero impedito alla struttura di rispondere in modo coeso ed unitario alla sollecitazione esterna. Nell'ambito di una valutazione di vulnerabilità sismica commissionata negli anni passati dalla Stazione Appaltante, si era infatti delineata una struttura fortemente vulnerabile nei confronti dell'azione sismica, con PGA di attivazione dei cinematismi locali di primo modo pari a 0,03g, corrispondente un tempo di ritorno  $T_R$  inferiore ai 20 anni. Per questa ragione, e poiché l'intervento richiesto dalla committenza era finalizzato non ad un semplice miglioramento delle condizioni di sicurezza del fabbricato (che avrebbe richiesto un confronto tra stato di fatto e stato di progetto) ma ad un vero e proprio adeguamento sismico, non è stato elaborato il modello globale ad elementi finiti dello stato di fatto.

Tuttavia, confrontando i risultati ottenuti dai due modelli ad elementi finiti elaborati e descritti nel paragrafo precedente, si è potuto appurare che senza l'inserimento dei telai in acciaio il fabbricato non sarebbe risultato adeguato sismicamente poiché caratterizzato da un indicatore di rischio pari a 0,85 e quindi inferiore ad 1 (Tabella 3).

Tabella 3. Indicatore di rischio in termini di PGA ( $PGA_{CLV} / PGA_{DLV}$ ) ottenuto dai modelli con e senza telai in acciaio.

Modello senza telai	Modello con telai
$\alpha_v = 0.85$	$\alpha_v = 1.24$

In termini di rigidità, si è inoltre riscontrato (sulla base del calcolo della rigidità complessiva, in ciascuna delle direzioni convenzionalmente assunte per l'azione dinamica, dei soli telai metallici da un lato e dei setti dall'altro) che il taglio sismico complessivo potrà essere ora redistribuito tra i due sistemi sismo resistenti secondo le seguenti proporzioni:

- aliquota assorbita dai setti murari: 68,5%.
- aliquota assorbita dai nuovi telai: 31,5%.

## 6 CONCLUSIONI

La ristrutturazione di un edificio esistente ad uso scolastico, attualmente perfettamente operativo e funzionante, finalizzato principalmente al suo adeguamento sismico rappresenta una sfida non solo dal punto di vista della progettazione e della successiva realizzazione: la Direzione Lavori va infatti intesa anche e soprattutto come delicata ed attenta gestione dei rapporti tra gli attori del processo (stazione appaltante, impresa aggiudicataria, maestranze e subappaltatori, direzione scolastica) coinvolgendo interessi comuni e, specie in un contesto di piccola dimensione come quello del Comune di Conselice, assumendo una forte connotazione pubblica, esponendo tanto le scelte progettuali quanto i risultati operativi al giudizio di tutta la cittadinanza.

## 7 RINGRAZIAMENTI

Ringraziamo il Comune di Conselice in particolare il Sindaco Paola Pula, l'assessore ai Lavori Pubblici Ing. Roberto Zamboni ed il RUP Geom. Luca Emiliani per l'appoggio incondizionato verso tutte le scelte progettuali adottate e lo spirito collaborativo che ha animato l'amministrazione anche nei momenti più concitati delle ultime fasi di cantiere. Ringraziamo inoltre l'impresa Edilimpianti (Geom. Belfanti e Geom. Nappi) che ha mostrato una grande professionalità nell'eseguire i lavori nei tempi previsti non trascurandone la cura e la precisione.

## BIBLIOGRAFIA

- Peroni M., Fabbi I., 2011. La valutazione di vulnerabilità sismica mediante analisi pushover della scuola media D. Strocchi a Faenza, *Structural modeling*, **4**, 4-6.
- Barocci A., 2015. Rischio sismico, *Grafill*.
- Jurina L., 2018. Numerical model and consolidation interventions of Palazzo della Ragione in Milan, *XIV International Conference on Building Pathology and Constructions Repair – CINPAR 2018*.
- Jurina L., 2013. Cerchiatura di strutture murarie: tecniche tradizionali ed innovative, *Ingenio n. 16, Ottobre 2013*.
- Jurina L., 2003. La possibilità dell'approccio reversibile negli interventi di consolidamento strutturale, *Atti del XIX Convegno Scienza e Beni Culturali "La reversibilità nel restauro. Riflessioni, Esperienze, percorsi di ricerche"*, Bressanone, 1-4 luglio 2003
- Mariani M., 2014. Particolari costruttivi nel consolidamento e restauro, *Roma, Dei, Tipografia del Genio Civile*.
- Mariani M., 2012. Trattato sul consolidamento e restauro degli edifici in muratura, *Roma, Dei, Tipografia del Genio Civile*.
- Nuove norme tecniche per le costruzioni e circolare esplicativa, DM Infrastrutture 14 gennaio 2008, Circolare