

## Progettazione dell'adeguamento sismico di un edificio scolastico comunale in cemento armato in Alessandria

### Abstract

L'adeguamento sismico è il livello di sicurezza raggiunto per la struttura comunale esistente in c.a. Il livello di conoscenza LC2 ha fornito i valori delle caratteristiche meccaniche degli elementi portanti. La modellazione dello stato di fatto dell'edificio, eseguita con il software agli elementi finiti AxisVM, ha permesso di definire il progetto di intervento in considerazione di tutte le problematiche emerse dalle indagini diagnostiche e dalle analisi strutturali, condotte nel rispetto della Normativa italiana.

### Introduzione

Il progetto di adeguamento sismico riguarda una scuola comunale in Alessandria. La riqualificazione della struttura pubblica è stata affidata dall'Amministrazione Comunale allo Studio Tecnico Sacchi Laganà, che ora lo illustra cortesemente per S.T.A. DATA.



*Fig. 1 Scuola comunale nel Comune di Alessandria*

Il caso studio si riferisce ad una struttura in c.a. che si eleva fino al primo livello e collaudata nel 1985 in Alessandria.

Durante il primo sopralluogo tecnico, eseguito dai professionisti incaricati, è emerso che la scuola presentava delle problematiche strutturali in alcune aree. Lo studio dell'edificio si è concentrato sull'analisi di tali punti critici della struttura e, poi, sulla verifica globale della vulnerabilità sismica della stessa.

Le analisi di adeguamento sismico e antincendio sono state condotte con il software di calcolo strutturale agli elementi finiti AxisVM.

## 1 Le indagini eseguite sulla struttura

La scuola è una struttura costruita negli anni '80 secondo una Normativa differente da quella attuale e, per uno studio esaustivo dell'edificio, sono state raccolte tutte le tavole progettuali e i documenti di collaudo statico depositati presso il Genio Civile.

Il professionista ha eseguito il rilievo architettonico dello stato di fatto della struttura per realizzare le tavole tecniche aggiornate della planimetria e del prospetto.

Inoltre, per la valutazione della sicurezza e per le verifiche di vulnerabilità sismica, secondo la Normativa vigente, è stata condotta una campagna di indagini in situ finalizzata ad acquisire tutti gli elementi necessari per conseguire il livello di conoscenza LC2. Sono stati, quindi, prelevati dei campioni di materiale dagli elementi portanti in c.a. per sottoporli a prove meccaniche eseguite in un laboratorio di prove accreditato.

Infine, sono state effettuate le indagini geologiche e geotecniche per conoscere il sottosuolo.

### 1.1. Rilievo architettonico della struttura

Il rilievo architettonico della struttura ha introdotto i tecnici alla conoscenza e allo studio della struttura. La sua pianta ha una geometria abbastanza regolare, come si osserva anche nella foto della vista dall'alto della figura seguente.

L'edificio si compone di 5 ambienti a forma quadrata, con lato 14 m, per la didattica e, poi, di altri 2 ambienti quadrati più grandi, di lato 18 m, che ospitano la palestra.

Le indagini visive hanno evidenziato che le dimensioni degli elementi portanti del telaio in c.a. non rispettano le indicazioni della Normativa attuale.

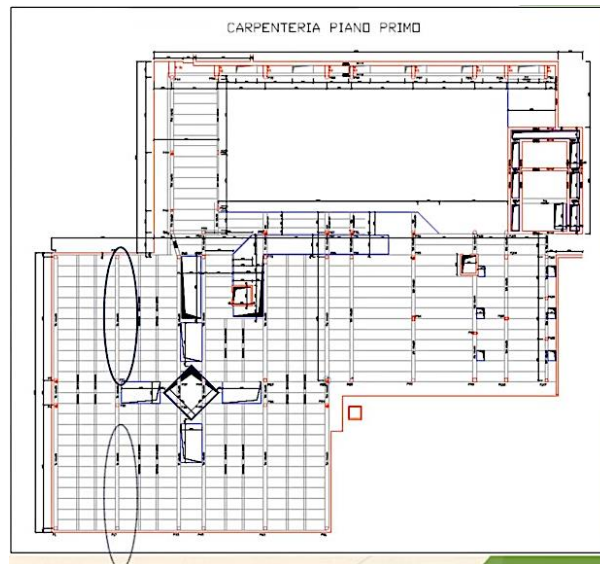


Fig. 2 Vista dall'alto della scuola comunale

Si osserva, infatti, che gli elementi strutturali non sono adeguati a fornire i requisiti prestazionali antisismici richiesti dalla Normativa italiana, perché le dimensioni delle travi sono molto più grandi rispetto a quelle dei pilastri. Le travi, infatti, sono alte 1 m e lunghe 14 m e poggiano su esili pilastri a sezione circolare di diametro 40 cm.

Nella figura successiva si mostra la planimetria del primo livello e si nota che solo i pilastri con sezione circolare sono presenti a questo livello.

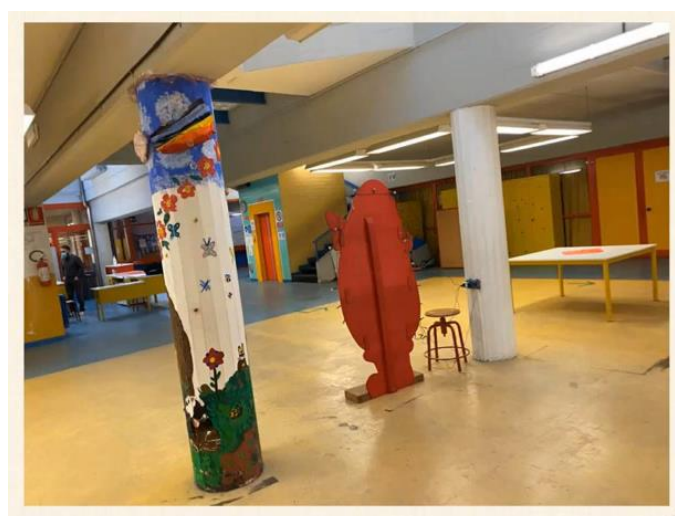
Nella figura è stata evidenziata una delle travi lunghe 14 m.



*Fig. 3 Carpenteria piano primo*

Nella figura 3, si può osservare la carpenteria del solaio del primo livello. Il solaio monodirezionale è ordito in direzione ortogonale rispetto alla direzione delle travi della pilastrata principale. Il solaio è composto da lastre di tipo predalles e ha un'altezza di 30 cm.

La figura successiva mostra una foto dell'interno della scuola e si notano le dimensioni degli elementi portanti verticali del primo piano rispetto alle travi.



*Fig. 4 Vista dell'interno della scuola*

La particolarità di queste dimensioni della struttura portante in c.a. ha suscitato l'interesse tecnico del professionista.

Si osserva, nella figura seguente, che la pianta delle fondazioni presenta una distribuzione di travi monodirezionali posate alla quota di - 4,10 m s.l.m.

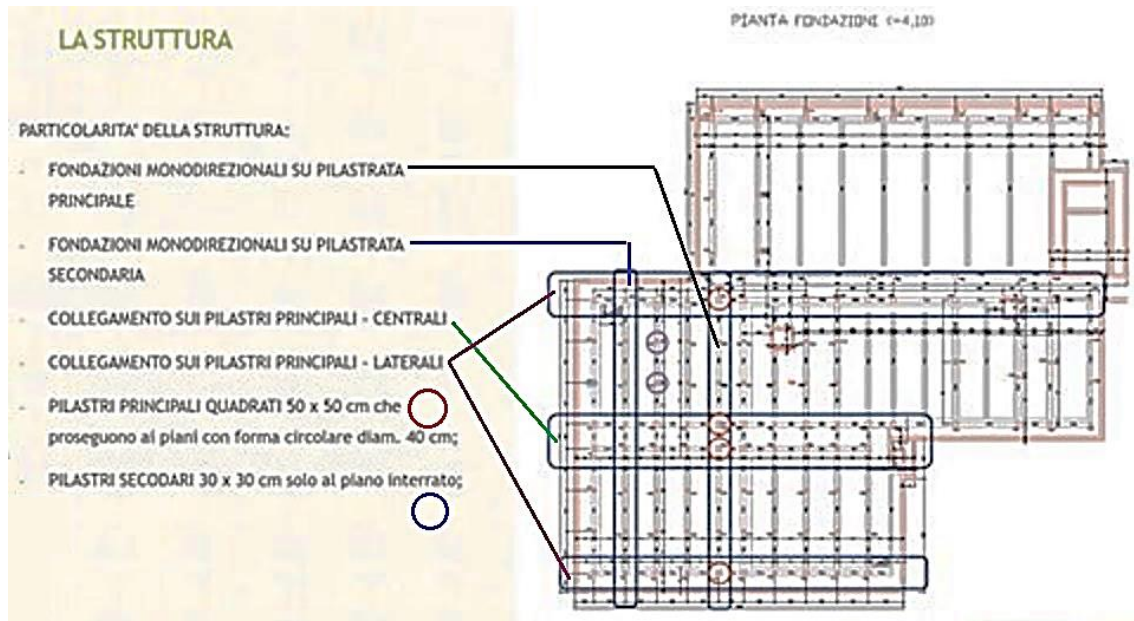


Fig. 5 Pianta fondazioni della scuola

I pilastri principali hanno inizialmente alla base una sezione quadrata di lato 50 cm e proseguono ai piani superiori con sezione circolare e diametro 40 cm.

I pilastri secondari, con sezione quadrata di lato 30 cm, si fermano al piano interrato.

Al piano interrato, quindi ci sono due tipologie di pilastri: la pilastrata principale (cerchiati in rosso in figura), che prosegue ai piani superiori con sezione circolare, e la pilastrata secondaria che si ferma al livello interrato.

Le fondazioni monodirezionali delle pilastrate principali e secondarie sono collegate a travi di fondazione ortogonali ai loro estremi e al centro.

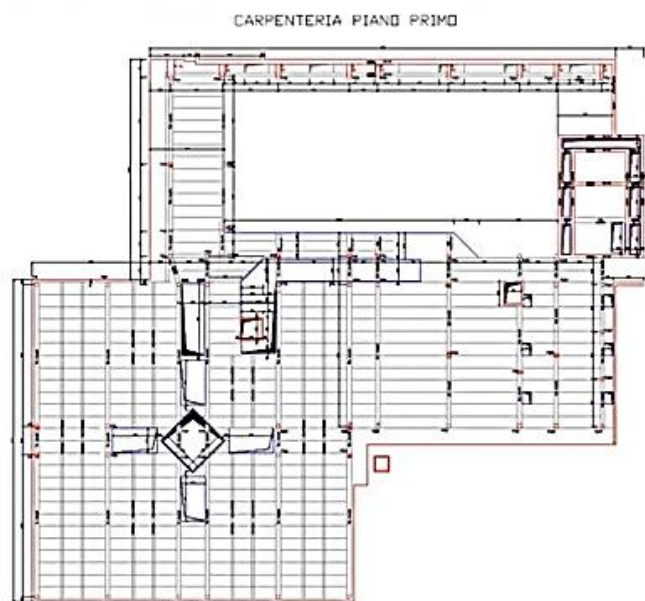


Fig. 6 Pianta carpenteria piano primo

## 1.2. Campagna di indagini conoscitive in situ

La campagna di indagini conoscitive in situ è stata condotta per acquisire la quantità di informazioni richieste per il livello di conoscenza LC2 previsto dalla Normativa. L'indagine è stata documentata in 4 schede, come si mostra nelle seguenti immagini.

Nella scheda seguente si mostra l'ubicazione in planimetria delle prove eseguite sugli elementi portanti al piano terra.

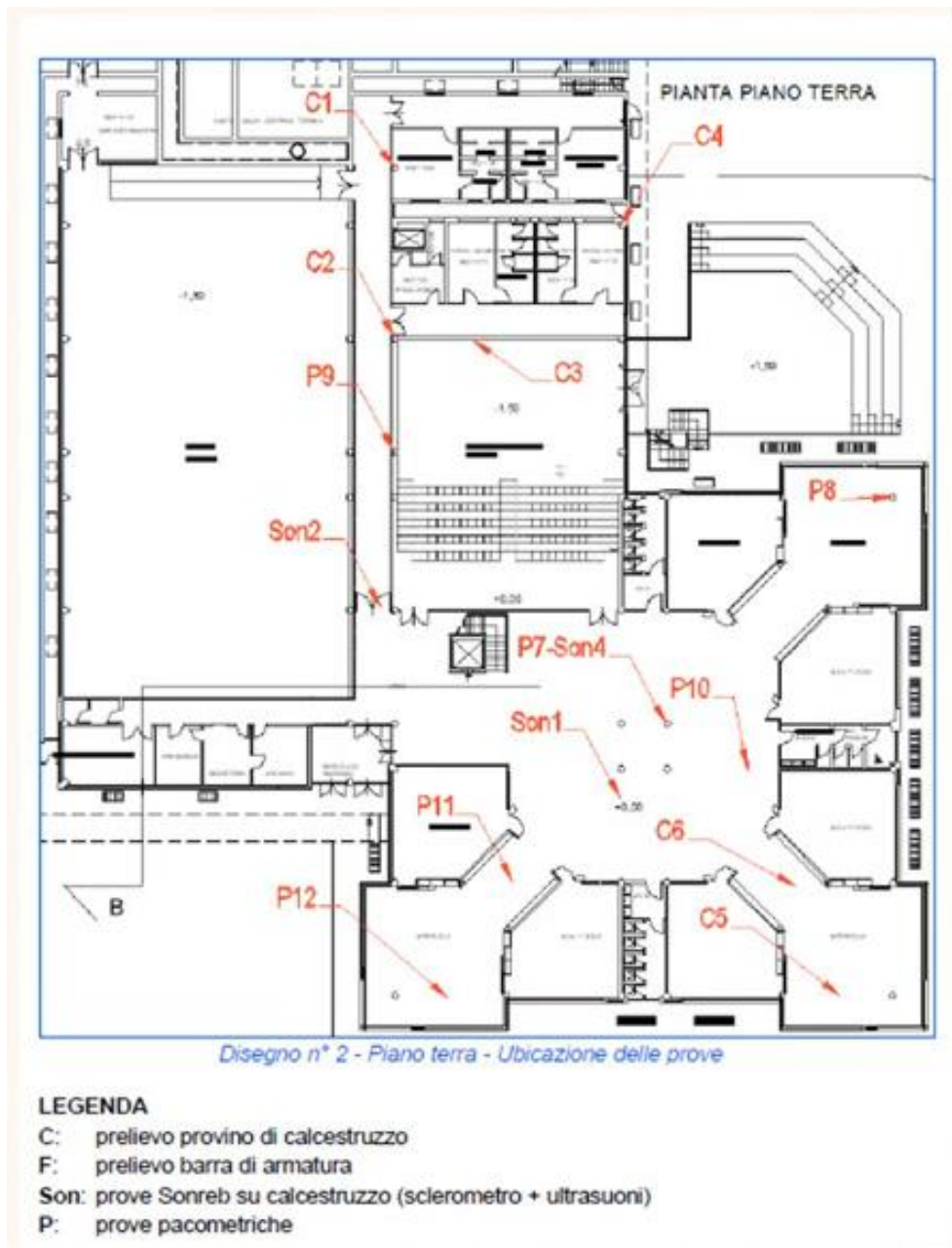


Fig. 7 Scheda 1: Planimetria del piano terra con l'ubicazione dei punti di indagine in situ

Nella scheda seguente si mostrano i cilindri di calcestruzzo estratti e successivamente sottoposti a prova di compressione in laboratorio.



*Fig. 8 Scheda 2: Immagini dei provini cilindrici in calcestruzzo prelevati dalle travi e dai pilastri e immagini dei relativi punti di estrazione dalla struttura*

I cilindri prelevati sono stati numerati e catalogati in riferimento ai punti di presa definiti nella Scheda 1.

I fori dei punti di prelievo, poi, sono stati opportunamente richiusi con un idoneo materiale avente caratteristiche di resistenza meccanica tipiche degli elementi portanti.

Congiuntamente all'estrazione delle carote di calcestruzzo, sono state eseguite le prove SONREB, ossia le indagini non invasive sclerometriche e ultrasoniche, e anche delle indagini pacometriche per individuare lo spessore del copriferro e l'armatura in acciaio presente negli elementi portanti del telaio in c.a.

Sono stati estratti alcuni campioni di barre in acciaio dalle pareti in cemento armato, dei vani ascensore e scala, per sottoporli alle prove di trazione in laboratorio.

Unitamente alle prove sui materiali sono state eseguite le prove geotecniche per la caratterizzazione meccanica del sottosuolo, che risulta essere di tipo C.

Nelle figure successive si mostrano i punti di indagine delle prove Sonreb, eseguite su pilastri e travi. La scheda 3 è relativa alle prove magnetoscopiche eseguite sui pilastri e la scheda 4 è riferita alle zone di estrazione delle barre di acciaio dalle pareti in c.a. dei vani scala e ascensore.



Fig. 9 Immagini dei punti di indagine con le prove Sonreb



Fig. 10 Scheda 3: Indagini magnetoscopiche eseguite sui pilastri P7 e P8



Fig. 11 Scheda 4: Immagini delle zone di estrazione dei campioni delle barre di armatura per c.a.

### 1.3. Le prove meccaniche

Le prove di caratterizzazione meccanica dei materiali sono state eseguite da un laboratorio accreditato che ha emesso un certificato con i risultati delle prove sui materiali. I test sono stati condotti sia sui campioni cilindrici in calcestruzzo, prelevati dagli elementi portanti in c.a. (pilastri, travi e pareti), sia sui campioni delle barre di armatura per calcestruzzo, del tipo ad aderenza migliorata, estratti dalle pareti dei vani scale e ascensore.

In particolare, 14 campioni cilindrici di calcestruzzo sono stati sottoposti a prove di compressione; mentre 3 barre di acciaio sono state sottoposte a prove di trazione.

I risultati delle prove, indicati nel certificato, mostrano che il calcestruzzo risulta idoneo nella maggior parte dei casi ma per alcuni pilastri i valori delle resistenze a compressione risultano inferiori a quelli dichiarati sia negli atti progettuali depositati che nel collaudo.

In alcuni casi, quindi, i valori ricavati sono compatibili con quelli dichiarati nel progetto e in altri casi i valori di resistenza risultano significativamente più bassi. I valori bassi, purtroppo, erano associati ai campioni estratti da elementi strutturali importanti, quali i pilastri principali con sezione rettangolare alla base (50 cm x 50 cm) e sezione circolare (con diametro 40 cm) ai piani superiori.

Certamente, anche questa problematica, legata ai valori di resistenza bassi, ha influenzato la scelta della tipologia di intervento da realizzare per conseguire il livello di sicurezza dell'adeguamento sismico dell'edificio.





## 4 EMME Service S.p.A.

### Laboratorio Prove Materiali

Via Scarsellini 13 – 20161 Milano Tel. 0240092545 – Fax 40092743  
laboratorio.mi@4emme.it – www.4emme.it

Sede legale: Via L. Zuegg 20 – 39100 Bolzano  
Sistema Qualità ISO 9001:2015 certificato RINA nr. 6441/01/S  
Pagina 1 di 2

**CERTIFICATO** NR. 5266 del 22/03/2021

Intestatario certificato: Città di Alessandria – [redacted] Alessandria  
Verbale di accettazione: Nr. 4121 del 24/02/2021  
Descrizione della prova: **PROVA DI COMPRESIONE SU PROVINI CILINDRICI IN CALCESTRUZZO**  
Norme di riferimento: UNI EN 12300-3:2019; UNI EN 12504-1:2019  
Descrizione del materiale: 18 provini cilindrici in calcestruzzo  
Cantiere - Luogo del Prelievo: [redacted] Alessandria  
Committente delle opere: Città di Alessandria – [redacted] Alessandria  
Impresa: NO  
Prelievo eseguito da: 4 Emme Service Spa  
Richiesta sottoscritta dal Direttore Lavori: no

| Dati dichiarati |                 |                           | Risultati di prova |     |                |                                     |  |              |                   |                        |            |
|-----------------|-----------------|---------------------------|--------------------|-----|----------------|-------------------------------------|--|--------------|-------------------|------------------------|------------|
| Sigla           | Data estrazione | Posizione in opera        | Dimensioni [mm]    |     | N <sub>d</sub> | Massa volumica [kg/m <sup>3</sup> ] | Resistenza a compressione f <sub>cd</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | Tipo rottura | Max lacer. Ø [mm] | Armatura rilevata [mm] | Data prova |
|                 |                 |                           | Ø                  | h   |                |                                     |  |              |                   |                        |            |
| C1              | 16/02/2021      | Piastra - Piano terra     | 104                | 104 | 1              | 2206                                | 32,5   | S            | 24                | -                      | 05/03/2021 |
| C2              | 16/02/2021      | Piastra - Piano terra     | 74                 | 74  | 1              | 2096                                | 21,5   | S            | 30                | -                      | 05/03/2021 |
| C3              | 16/02/2021      | Trave - Piano terra       | 104                | 104 | 1              | 2203                                | 24,6   | S            | 30                | -                      | 05/03/2021 |
| C4              | 16/02/2021      | Piastra - Piano terra     | 104                | 104 | 1              | 2258                                | 34,8   | S            | 34                | -                      | 05/03/2021 |
| C5              | 16/02/2021      | Trave - Piano terra       | 104                | 104 | 1              | 2177                                | 23,1   | S            | 21                | -                      | 05/03/2021 |
| C6              | 16/02/2021      | Trave - Piano terra       | 104                | 104 | 1              | 2238                                | 27,7   | S            | 24                | -                      | 05/03/2021 |
| C7              | 16/02/2021      | Piastra - Piano primo     | 74                 | 74  | 1              | 2200                                | 27,7   | S            | 22                | -                      | 05/03/2021 |
| C8              | 16/02/2021      | Trave - Piano primo       | 104                | 104 | 1              | 2322                                | 34,2   | S            | 28                | -                      | 05/03/2021 |
| C9              | 16/02/2021      | Piastra - Piano primo     | 74                 | 74  | 1              | 2096                                | 26,2   | S            | 21                | -                      | 05/03/2021 |
| C10             | 16/02/2021      | Piastra - Piano primo     | 74                 | 74  | 1              | 2102                                | 17,7   | S            | 25                | -                      | 05/03/2021 |
| C11             | 16/02/2021      | Trave - Piano primo       | 104                | 104 | 1              | 2268                                | 45,4   | S            | 24                | -                      | 05/03/2021 |
| C12             | 16/02/2021      | Trave - Piano primo       | 104                | 104 | 1              | 2199                                | 27,1   | S            | 18                | -                      | 05/03/2021 |
| C13             | 16/02/2021      | Piastra - Piano interrato | 104                | 104 | 1              | 2406                                | 18,4   | S            | 18                | 10/16                  | 05/03/2021 |
| C14             | 16/02/2021      | Piastra - Piano interrato | 104                | 104 | 1              | 2179                                | 17,7   | S            | 18                | -                      | 05/03/2021 |

Legenda:  
S = rottura soddisfacente NS = rottura non soddisfacente ND = non dichiarato L = resistenza a compressione del provino NE=non eseguita

Note: nessuna.

Fig. 12 Certificato delle prove di compressione eseguite su 14 provini cilindrici in calcestruzzo

Il certificato di prova per le barre in acciaio, a differenza di quello per il calcestruzzo, ha dato risposta positiva sempre, perché i valori di resistenza a snervamento e a rottura risultano compatibili con i valori dichiarati in fase di costruzione e di collaudo. L'armatura degli elementi portanti, quindi, non ha nessun problema.



## 4 EMME Service S.p.A.

### Laboratorio Prove Materiali

Via Scarsellini 13 – 20161 Milano Tel. 0240092545 – Fax 40092743  
laboratorio.mi@4emme.it – www.4emme.it

Sede legale: Via L. Zuegg 20 – 39100 Bolzano  
Sistema Qualità ISO 9001:2015 certificato RINA nr. 6441/01/S  
Pagina 1 di 1

| CERTIFICATO   |   | NR. 5265    |                         | del 22/03/2021               |                                 |   |   |       |
|---|---|-------------|-------------------------|------------------------------|---------------------------------|---|---|-------|
| Intestatario rapporto:  | Città di Alessandria – [ ]                        |             | Alessandria             |                              |                                 |   |   |       |
| Verbale di accettazione:  | Nr. 4121 del 24/02/2021                           |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Descrizione della prova:  | PROVA DI TRAZIONE SU CAMPIONI DI ACCIAIO PER C.A. |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Norme di riferimento:   | UNI EN ISO 15630-1:2019                           |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Descrizione del materiale:  | 3 barre d'acciaio per c.a.                        |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Cantiere - Luogo del Prelievo:  | [ ]   |             | Alessandria             |                              |                                 |   |   |       |
| Committente delle opere:  | Città di Alessandria – [ ]                        |             | Alessandria             |                              |                                 |   |   |       |
| Impresa:  | NO  |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Richiesta sottoscritta dal Direttore Lavori:  | no  |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Data della prova:   | 10/03/2021  |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Contrassegno  | Data prelievo                                     | Ø Eff. [mm] | Area [mm <sup>2</sup> ] | Tipo di acciaio              | Riferimento struttura           | Tensione di snervamento f <sub>y</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | Tensione di rottura f <sub>t</sub> [N/mm <sup>2</sup> ] | Agt % |
| F1  | 17/02/2021  | 9,82        | 75,76                   | Barra ad aderenza migliorata | Setto ascensore Piano interrato | 512,8   | 775,9   | 9,4   |
| F2  | 17/02/2021  | 15,36       | 183,29                  | Barra ad aderenza migliorata | Muro - Piano interrato          | 445,8   | 642,8   | 10,3  |
| F3  | 17/02/2021  | 8,54        | 57,29                   | Barra ad aderenza migliorata | Muro - Piano interrato          | 422,2   | 638,9   | 13,3  |
| Legenda:<br>NE = non eseguito      NO = non dichiarato      NR = non richiesto                      |   |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Nota: I valori di snervamento e rottura sono riferiti al diametro e all'area effettiva dei provini. |   |             |                         |                              |                                 |   |   |       |
| Attrezzatura utilizzata   |   |             |                         |                              | Certificato di taratura         |   |   |       |
| Nr.   | Tipologia   | Matricola   | Marca                   | Portata                      | Nr.                             | Data  | Emitte  |       |
| 04  | C 807   | 03074442    | Controlis               | 600 kN                       | LAT 104<br>0248/2021            | 15/02/2021  | Politecnico di Milano                                   |       |

Fig. 13 Certificato delle prove di trazione sui campioni di barre in acciaio ad aderenza migliorata per calcestruzzo

## 2 Modellazione dello stato di fatto dell'edificio esistente in AxisVM

Il modello strutturale dell'edificio esistente è stato realizzato con il software di calcolo strutturale agli elementi finiti AxisVM 6.

Nel progetto virtuale dello stato di fatto dell'edificio sono stati impiegati gli elementi beam, per le travi e i pilastri, e gli elementi bidimensionali, per le pareti in c.a. dei vani ascensore e scala. Gli elementi bidimensionali sono stati inseriti per cogliere meglio gli effetti torsionali e per conoscere le reali forze resistenti al taglio mobilitate durante un sisma.

Il modello è completato con l'inserimento della copertura esistente in legno al fine di poter studiare le criticità di natura statica del tetto.

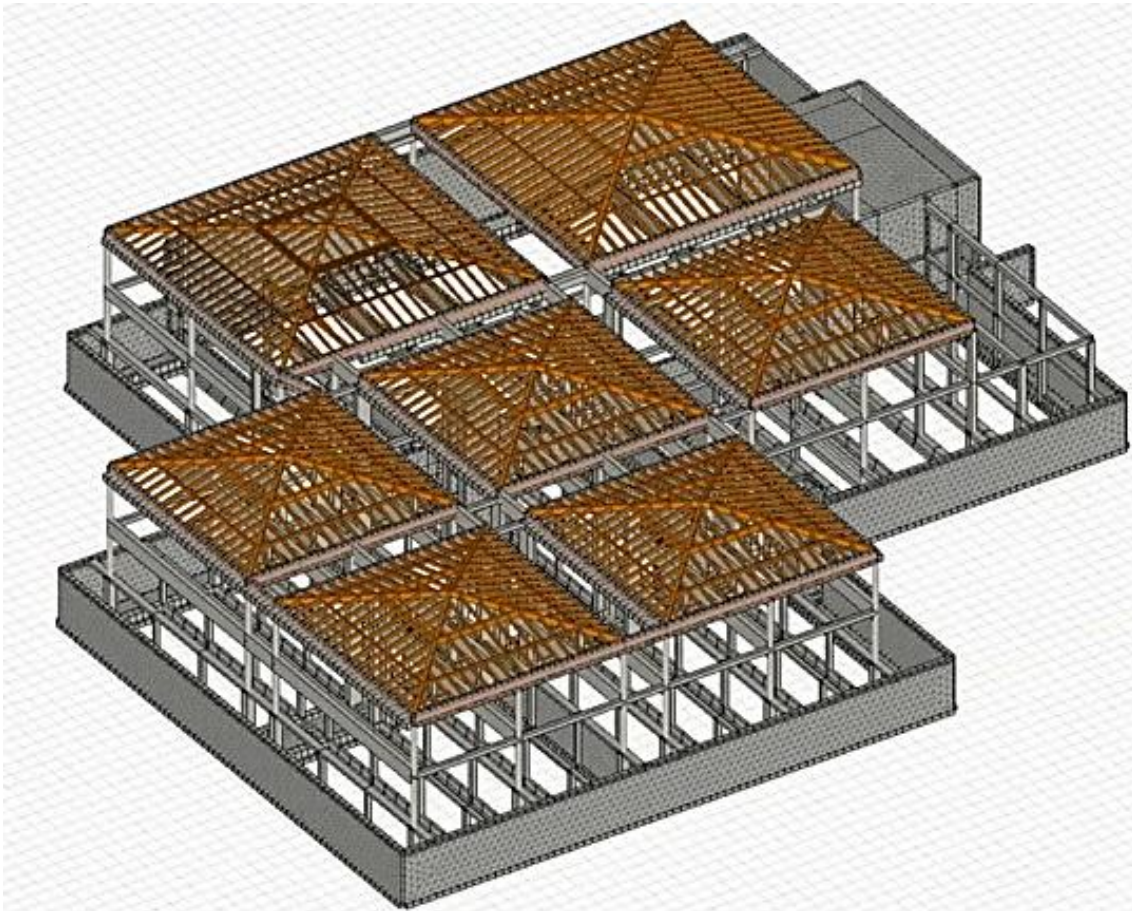
Come si osserva nella figura seguente, ognuno degli ambienti quadrati della scuola ha un tetto composto da 4 falde di pari dimensioni.

La struttura portante delle falde è un telaio in legno formato da:

- 4 travi principali, disposte lungo le diagonali del quadrato;
- altre 2 travi principali, parallele al lato del quadrato e reciprocamente equidistanziate;
- una serie di travi secondarie equidistanziate ed ortogonali alle 2 travi principali succitate.

Le 2 travi equidistanziate hanno il fine di poter sorreggere la nervatura di travi secondarie che poggiano su di esse.

Si osserva che la copertura non presenta problemi sismici perché non è pesante.



*Fig. 14 AxisVM - Modello tridimensionale della struttura portante in c.a. dello stato di fatto della scuola*

In particolare, la struttura della copertura è costituita da travi perimetrali in legno aventi grandi luci di 14 m e poste su puntoni in legno.

La realizzazione della copertura ha imposto, durante la posa eseguita negli anni '80, l'installazione di pilastri in legno per il sostegno delle travi di grandi luci di 14 m.

I pilastri in legno poggiano direttamente sui solai del primo livello e, quindi, questa struttura importante, con travi molto lunghe, scarica i carichi del tetto direttamente sui solai del primo livello.

La struttura del tetto in legno è stata modellata in AxisVM come appena descritto ed è stata inserita come copertura dell'edificio nel modello globale, perché essa è estremamente importante nello studio delle prestazioni dell'edificio.

Ricavate le caratteristiche meccaniche dei materiali costituenti gli elementi del telaio in c.a., il professionista ha creato una libreria dei materiali personalizzata in AxisVM, per inserire i valori delle proprietà meccaniche attuali dei materiali degli elementi portanti della struttura nello stato di fatto.

Tutti i dati dei materiali esistenti sono stati associati ai relativi elementi portanti del modello virtuale dell'edificio.

Sono stati inseriti i carichi indicati dalla Normativa attuale vigente ed è stata eseguita l'analisi statica e sismica della struttura.

Si mostrano, nelle figure seguenti, le fasi di inserimento dati nelle schede parametri della struttura e sismici in AxisVM:

Fig. 15 AxisVM – Scheda dei parametri della struttura

Scheda Parametri struttura:

- Comune di appartenenza dell'immobile, quindi Alessandria;
- coordinate geografiche di latitudine e longitudine;
- tipo di costruzione, quindi opera ordinaria;
- vita nominale, quindi 50 anni;
- classe d'uso, quindi 3 per edifici con grandi affollamenti e infrastrutture importanti.

Segue, quindi, l'inserimento dei Parametri sismici:

|                           | SLC   | SLV   | SLD   | SLO   |
|---------------------------|-------|-------|-------|-------|
| $a_g$ [m/s <sup>2</sup> ] | 1,020 | 0,841 | 0,375 | 0,310 |
| $F_0$ [-]                 | 2,54  | 2,55  | 2,54  | 2,53  |
| $T_C$ [s]                 | 0,29  | 0,29  | 0,24  | 0,22  |
| $T_R$ [anni]              | 2475  | 1424  | 151   | 90    |

- categoria di suolo, quindi tipo C;
- categoria topografica, quindi T1.

Come si può osservare, il fattore di struttura  $q$  “a taglio” fissato dalla normativa è pari a 1.5 e gli ingegneri hanno confermato tale valore, in AxisVM, per il fattore di struttura  $q$  “a flessione” rinunciando ad un valore più grande per la particolare snellezza dei pilastri rispetto alle travi.

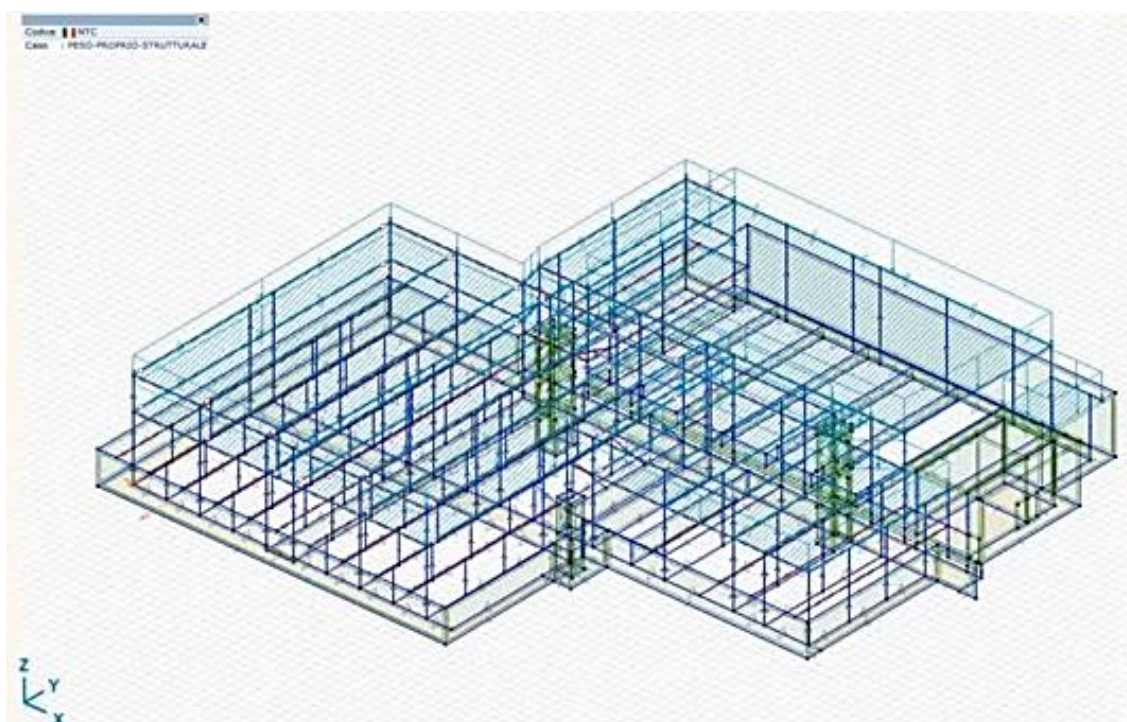
Il comportamento dissipativo della struttura è stato scelto di tipo “B”.

Fig. 16 AxisVM – Scheda dei parametri sismici

Contestualmente, come descritto in precedenza, è stata creata la libreria dei materiali con i valori delle caratteristiche meccaniche attuali e tali materiali sono stati associati agli elementi portanti del modello.

Nella fase successiva, si mostra il modello virtuale tridimensionale con i carichi agenti inseriti, come indicato nella Normativa, ossia:

- peso proprio strutturale;
- sovraccarico non strutturale;
- sovraccarico accidentale;
- vento e neve;
- carico termico per le verifiche di adeguamento antincendio;
- carico sismico per le verifiche di adeguamento sismico.



*Fig. 17 AxisVM – Visualizzazione 3D dei carichi inseriti sulla struttura*

## **2.1 Analisi statica lineare e sismica del modello della struttura esistente in AxisVM**

Il progettista ha esaminato il modello dello stato di fatto della struttura con le analisi lineari statiche e sismiche al fine di poter valutare al meglio il ventaglio delle ipotesi d'intervento di adeguamento sismico.

Dalle analisi, condotte in AxisVM, è emerso che non si riusciva a rendere compatibili i pilastri in legno della copertura con la struttura sottostante e, dunque, il progettista ha deciso di sostituirla con un tetto piano opportunamente isolato, giuntato, coibentato e rifinito.

La struttura è stata verificata anche in presenza di carichi antropici agenti nella scuola, come indicato nell'attuale Normativa italiana.

L'analisi sismica ha mostrato che il baricentro delle masse e quello delle rigidezze risultavano significativamente distanziati e, quindi, l'edificio subiva anche un moto torsionale di piano indotto dalle forze attive e reattive agenti durante il sisma.

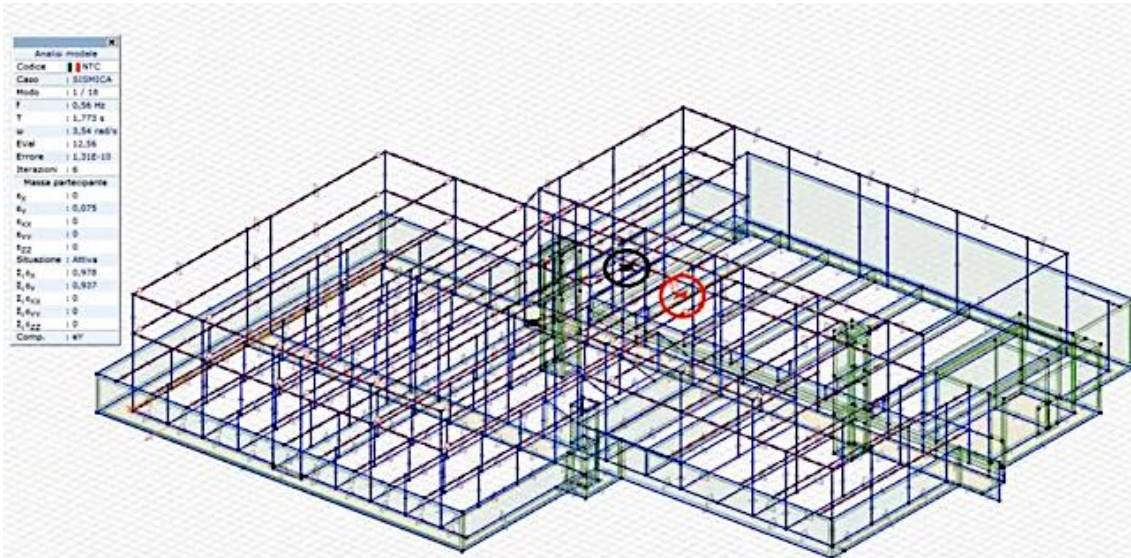


Fig. 18 AxisVM – Visualizzazione 3D della posizione del baricentro delle masse e del baricentro delle rigidzze dello stato di fatto della struttura

I risultati ottenuti dalle analisi e dalle indagini hanno fornito dei criteri di base fondamentali per valutare le scelte progettuali dell'adeguamento sismico. Infatti, l'ingegnere ha progettato un intervento strutturale finalizzato all'avvicinamento dei due baricentri per ridurre gli effetti del moto torsionale di piano.

Nelle analisi sismiche si osserva che quasi tutte le colonne perimetrali e centrali hanno mostrato problematiche serie e non superavano le verificate al carico sismico.

Si mostrano, nelle figure seguenti, le immagini dei domini di resistenza di tali colonne.

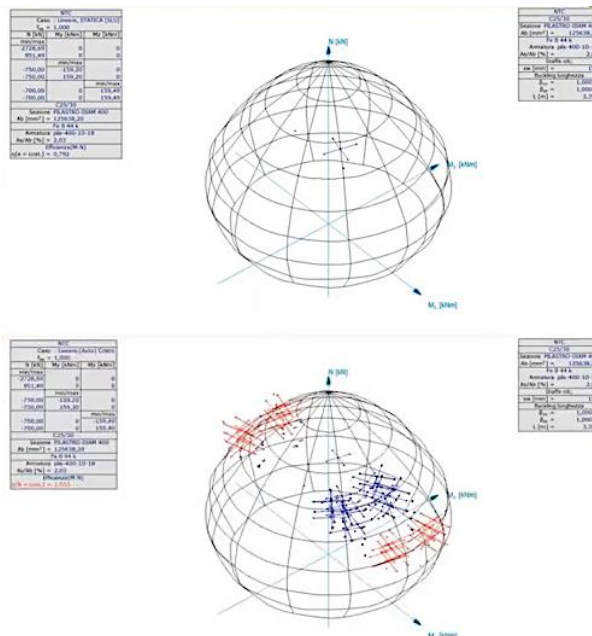


Fig. 19 AxisVM – Visualizzazione del dominio di resistenza N-Mz-My dei pilastri dello stato di fatto della struttura per l'analisi statica lineare e sismica. Alcuni pilastri non hanno un dominio di resistenza sufficiente a verificare le analisi sismiche.

Il progettista, quindi, ha deciso di avviare la progettazione dell'intervento di adeguamento sismico, finalizzato innanzitutto a conseguire un miglioramento della capacità resistenti dei pilastri, aumentando la loro sezione nel rispetto dei criteri di dimensionamento degli elementi portanti indicati in Normativa.

Il passaggio successivo, dunque, è stato quello di determinare il grado di vulnerabilità sismica dell'edificio esistente. Si è determinato il moltiplicatore sismico che porta la struttura a superare la verifica a carico sismico.

Come si può vedere, nella figura successiva, il moltiplicatore si ferma a  $\alpha_{PGA} = 0.25$  e, quindi, l'edificio certamente non esibiva una risposta sismica adeguata in caso di sisma.

Contestualmente, quindi, anche le analisi di vulnerabilità hanno mostrato che le dimensioni inadeguate delle sezioni dei pilastri, rispetto alla elevata luce delle travi, rendevano tutta la struttura vulnerabile alle azioni sismiche, come supposto inizialmente. La presenza di pilastri estremamente esili confermava la necessità di indirizzare la progettazione verso tale intervento.

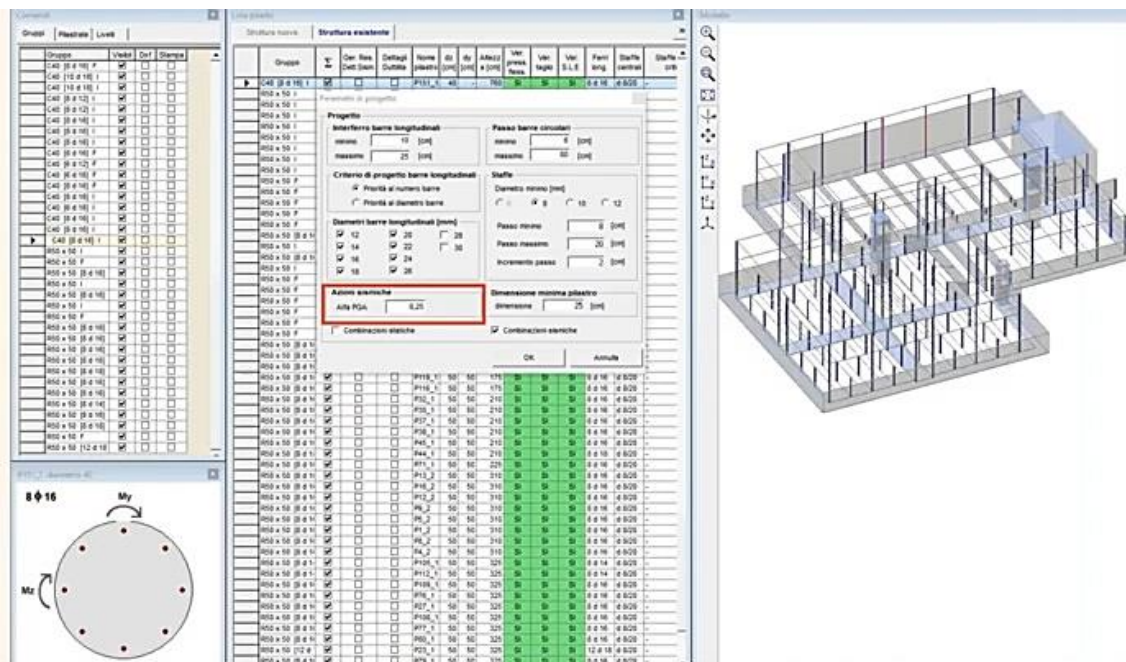


Fig. 20 AxisVM – Scheda parametri di progetto. Coefficiente  $\alpha_{PGA}$  dello stato di fatto della struttura esistente

Tutti i pilastri dell'orditura principale non superavano le verifiche in caso di sisma, come si può osservare nella tabella della figura successiva.

Gli unici pilastri che superavano le verifiche, in presenza dell'azione del sisma da Normativa, erano i pilastri dell'orditura secondaria. Tali pilastri, però, sono limitati al piano interrato e, quindi, forniscono solo un'aliquota della forza resistente alla forzante sismica.

La porzione superiore della struttura risultava estremamente vulnerabile da un punto di vista sismico.

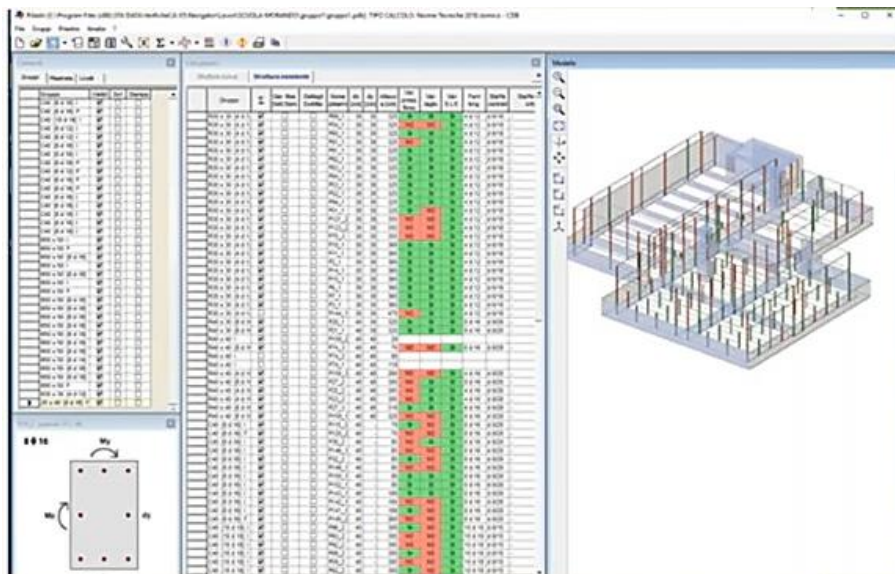


Fig. 21 AxisVM – Tabella delle verifiche eseguite sui pilastri dello stato di fatto della struttura.  
Alcuni elementi non risultano verificati

### 3 Modellazione dell'edificio nello stato di progetto di adeguamento sismico

L'idea progettuale di intervento di adeguamento sismico è stata guidata da quanto è emerso durante il rilievo architettonico, dai risultati delle indagini del livello di conoscenza LC2 e dai risultati ottenuti dell'analisi statiche e sismiche svolte in AxisVM sul modello dello stato di fatto. È stata scartata l'ipotesi di realizzare dei setti di taglio perché questa tipologia di struttura presenta travi di grandi luci.

Si è progettato, dunque, l'incremento della sezione dei pilastri dell'orditura principale per fornire ad essi la rigidezza necessaria nella direzione ortogonale a quella principale.

Le sezioni dei pilastri, che non superavano le verifiche, sono state rimodellate estendendo la loro sezione fino a formare la sagoma di una "L", come si mostra nella figura seguente.

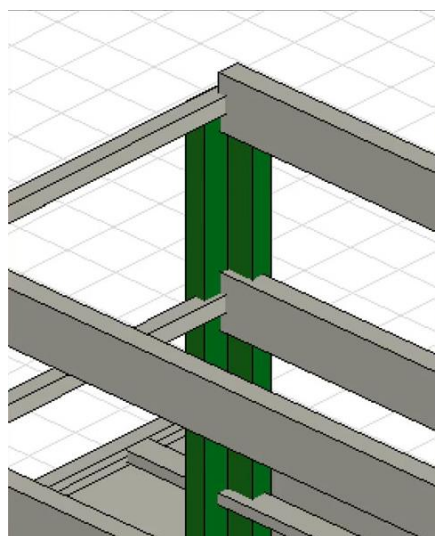


Fig. 22 AxisVM – Incremento della sezione originale del pilastro con una sezione a forma di L



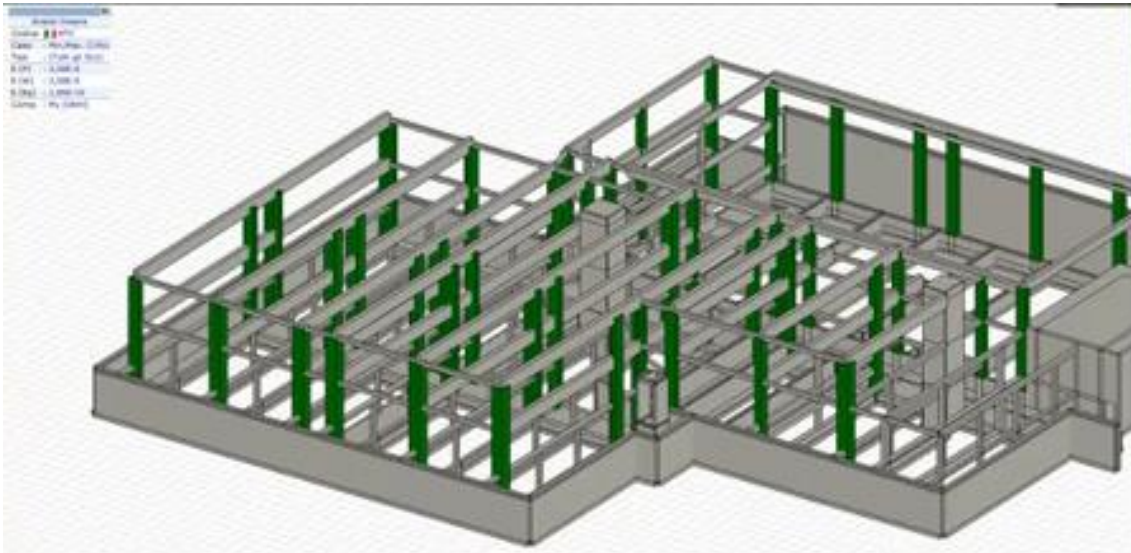


Fig. 23 AxisVM – Visualizzazione 3D del modello dello stato di progetto con i pilastri dell’orditura principale interessati dall’intervento di ampliamento della sezione

### 3.1 Analisi statica lineare e sismica del modello dello stato di progetto

La nuova sezione del pilastro fornisce una migliore condizione di vincolo del pilastro rispetto al lato ortogonale alla trave ribassata e avvicina il baricentro delle rigidezze a quello delle masse. Questo intervento, quindi, ha reso la risposta della struttura più prestazionale in caso di moto sismico.

Nella verifica della nuova posizione dei baricentri, ora, si osserva che la loro reciproca distanza si è ridotta e, dunque, si è ridimensionato l’ordine di grandezza delle forze movimentate dal moto torsionale di piano durante il sisma.

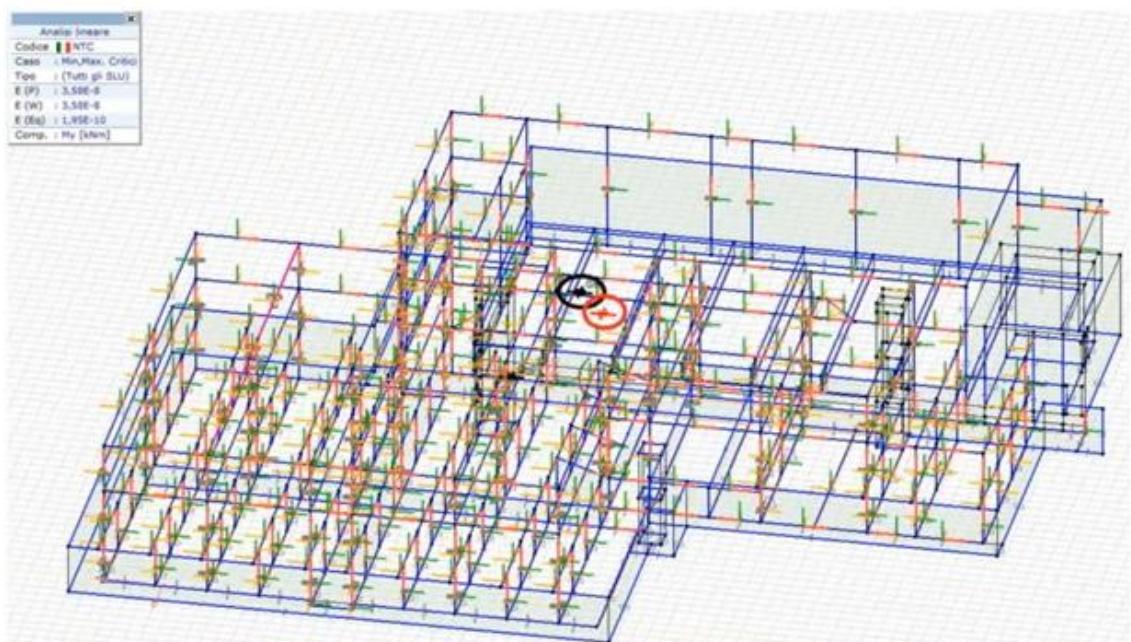


Fig. 24 AxisVM - Visualizzazione 3D della posizione del baricentro delle masse e del baricentro delle rigidezze dello stato di progetto della struttura

È stata condotta la verifica di resistenza alle azioni statiche e sismiche di tutte le nuove sezioni dei pilastri rimodellati, al fine di individuare i valori minimi e massimi critici.

L'efficienza di tali pilastri rimodellati risulta ora in media pari a 0,5 – 0,8.

Come si mostra nella figura successiva, ora tutti i pilastri superano tutte le verifiche richieste dalla Normativa.

Essi, adesso, esibiscono una risposta prestazionale del dominio di resistenza come richiesto dalla Normativa.

Nella seguente immagine si mostra il dominio di resistenza alle azioni sismiche di una pilastrata laterale con sezione ampliata a forma di "L":

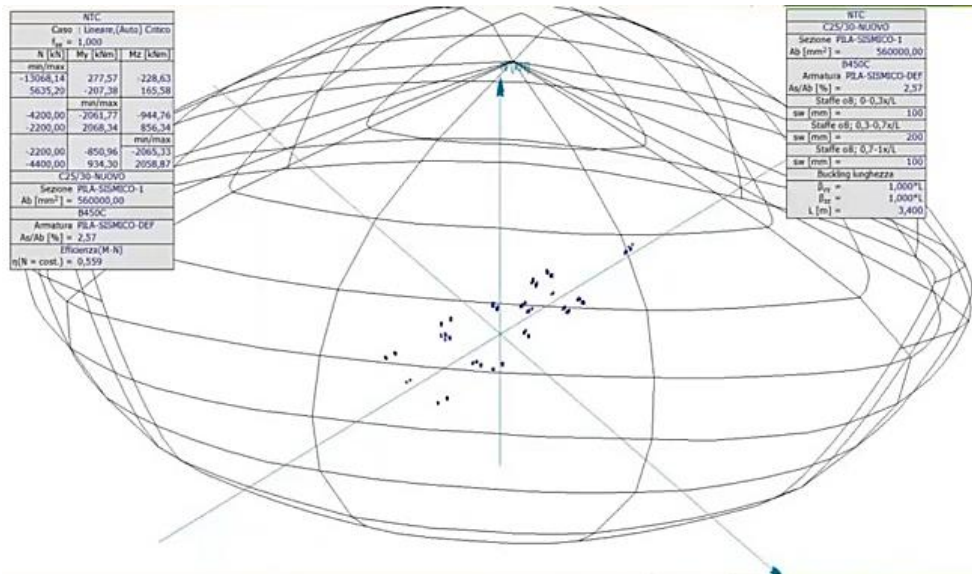


Fig. 25 AxisVM – Visualizzazione del dominio di resistenza N-Mz-My di una pilastrata laterale dello stato di progetto della struttura soggetta alle sollecitazioni derivanti dall'analisi sismica. Tutti i pilastri hanno un dominio di resistenza sufficiente a resistere alle sollecitazioni sismiche.

Si mostra nella figura seguente il dominio di resistenza di una pilastrata centrale:

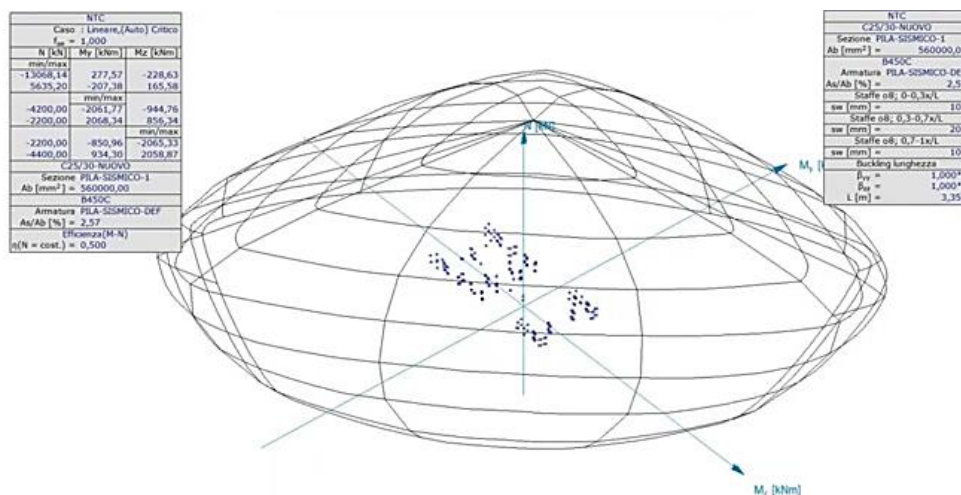


Fig. 26 AxisVM – Visualizzazione del dominio di resistenza N-Mz-My di una pilastrata centrale dello stato di progetto della struttura soggetta alle sollecitazioni derivanti dall'analisi sismica. Tutti i pilastri hanno un dominio di resistenza sufficiente a resistere alle sollecitazioni sismiche.

A questo punto, si è condotta l'ultima analisi, cioè la verifica globale della vulnerabilità della struttura.

La tabella successiva mostra che ora tutti i pilastri superano le verifiche e il coefficiente  $\alpha_{PGA} = 1$ . Tale risultato permette di raggiungere il livello di sicurezza dell'adeguamento sismico per l'edificio esistente.

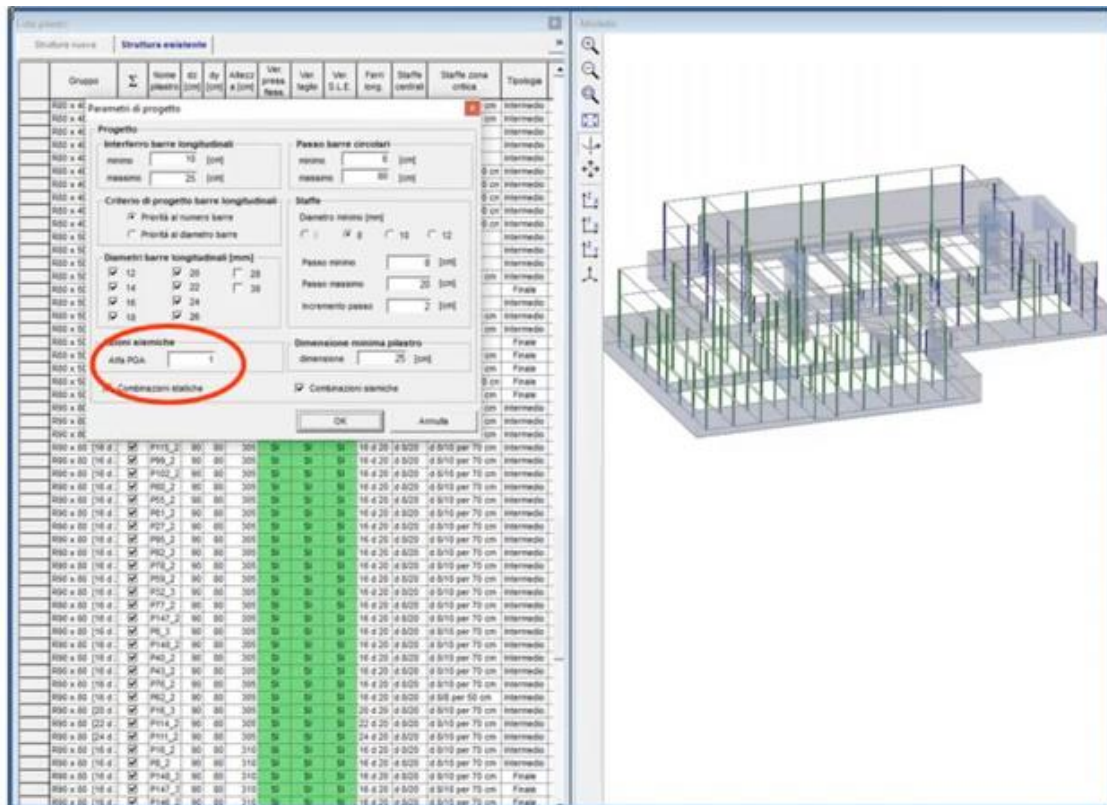


Fig. 27 AxisVM – Tabella delle verifiche eseguite sui pilastri dello stato di progetto della struttura. Tutti gli elementi risultano verificati.

## 4 Conclusioni

L'intervento di adeguamento sismico ha reso sicuro la struttura esistente pubblica alle azioni sismiche secondo l'attuale Normativa.

Il progetto è stato definito dal progettista dopo la valutazione del comportamento strutturale dell'edificio nello stato di fatto.

Le indagini visive, condotte con il rilievo architettonico, e gli studi della diagnostica strutturale, eseguita con le indagini in situ e in laboratorio, hanno permesso di acquisire una conoscenza estesa della struttura.

Le indagini meccaniche, eseguite sui materiali dei campioni estratti dalla struttura, sono state scelte con la Committenza al fine di determinare quantitativamente la risposta meccanica dei materiali degli elementi portanti di tutta la struttura e conseguire il Livello di Conoscenza LC2 indicato in Normativa.

Il professionista ha affrontato tutte le problematiche di questo edificio con agilità e snellezza di tempo grazie alle capacità avanzate del programma di calcolo strutturale agli elementi finiti AxisVM.

L'intervento è stato progettato in AxisVM garantendo il soddisfacimento dei requisiti antisismici e antiincendio nel rispetto della Normativa e delle esigenze della Committenza.

Per maggiori informazioni il nostro Team è sempre a vostra disposizione al n. verde 800 236 245 oppure all'indirizzo [comm@stadata.com](mailto:comm@stadata.com).

La versione **X7** di **AXISVM** è ricca di molte novità, come le nuove funzionalità del programma, l'aggiornamento di molti moduli esistenti e l'uscita di due nuovi moduli esclusivi della versione X7. Il software **AxisVM** è completamente modulare ed è possibile, quindi, costruire una personale configurazione interamente realizzata sulle reali esigenze del singolo progettista, senza includere onerosi moduli che non si utilizzeranno. E' sempre possibile modificare e integrare la propria configurazione sulla base di nuove esigenze e necessità.

**AxisVM** supporta la metodologia BIM attraverso le funzioni di costruzione del modello (uso degli oggetti parametrici), realizzando l'interoperabilità con gli altri software (strutturali ed architettonici), ed elaborando tavole grafiche ricavate automaticamente dal modello 3D.

Il BIM è una realtà che si sta diffondendo tra i progettisti ed è previsto esplicitamente dal nuovo Codice Appalti (DLgs 50/2016).

Per maggiori informazioni e una guida pratica sulla versione **X7** di **AXISVM**, sono disponibili sul nostro canale YouTube tre interessanti video realizzati dall'ingegnere Danilo Ricci (AXISVM Expert presso S.T.A. DATA) e dall'ingegnere Adriano Castagnone, Direttore scientifico di S.T.A. DATA.