

# MASTERSAP

SOFTWARE PER L'INGEGNERIA

## LA SCUOLA DI MONTEPULCIANO

Indagini, rilievi, modellazione e analisi per il miglioramento e l'adeguamento sismico della struttura.

Ing. Rachele Petrin (AMV S.r.l.)  
Geom. Luca Protasi (tesista)

## Sommario

1	Analisi storico – critica dell’organismo strutturale .....	5
2	Descrizione e definizione dell’organismo strutturale .....	6
2.1	Modello di riferimento per le analisi .....	9
3	Fasi di progetto.....	12
3.1	Valutazione dello Stato di Fatto .....	12
3.1.1	Analisi a elementi finiti.....	12
3.1.2	Verifica degli elementi strutturali.....	13
3.1.3	Definizione del livello di sicurezza sismico .....	14
3.1.4	Studio delle ipotesi di intervento .....	16
3.1.4.1	Irrigidimento solai di piano.....	17
3.1.4.2	Opera di contenimento del terreno.....	19
3.1.4.3	Sostituzione solaio di copertura e impalcati di sottotetto .....	19
3.1.4.4	Telai di controvento .....	19
3.1.4.5	Posa in opera di sistemi compositi FRCM .....	21
3.2	Stato di Progetto - Miglioramento .....	22
3.3	Stato di Progetto - Adeguamento .....	22
3.3.1	Esempio di verifica di un maschio murario .....	23
3.3.2	Dimensionamento dell’intervento di rinforzo con sistema FRCM .....	26
4	Indice delle figure.....	29

# La scuola di Montepulciano

Indagini, rilievi, modellazione e analisi per il miglioramento e l'adeguamento sismico della struttura.

*Tema sviluppato e analizzato dal laureando Luca Protasi (geometra di professione) con l'utilizzo dell'applicativo MasterSap 4U e di altri software della Suite 4U, che AMV concede in comodato d'uso gratuito agli studenti per lo studio e la redazione della tesi di laurea insieme al supporto tecnico qualificato del reparto di Assistenza Tecnica e Consulenza Professionale in cui operano ingegneri strutturisti.*

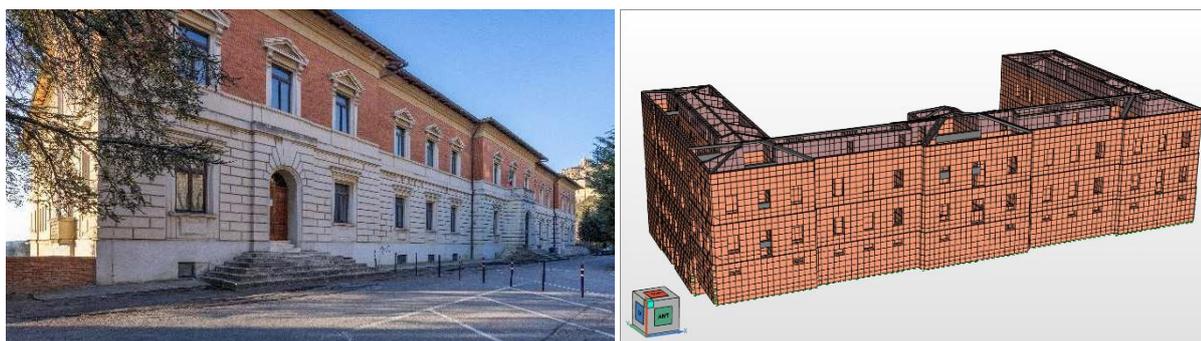


Figura 1 Foto prospetto principale (livello strada) e modello dello stato di fatto.

La struttura oggetto di studio è l'edificio che ospita l'Istituto Comprensivo "I. Origo" di **Montepulciano** in provincia di Siena. L'iter per la sua costruzione ebbe inizio negli anni '30 del secolo scorso, del progetto si trova documentazione nell'Archivio storico del Comune, della data di completamento dei lavori, che risale al 1940, testimonia un articolo del giornale locale *Araldo Poliziano*.

L'edificio è in muratura con pianta a ferro di cavallo e si sviluppa a mezza costa su cinque livelli, di cui due seminterrati e tre fuori terra (Figura 5, in cui si vede l'istituto scolastico posto fuori le mura del centro storico di Montepulciano). La superficie complessiva lorda è di 6600 metri quadrati, quella calpestabile è di 4970 metri quadrati.



Figura 2 Foto aerea realizzata con drone (alto).

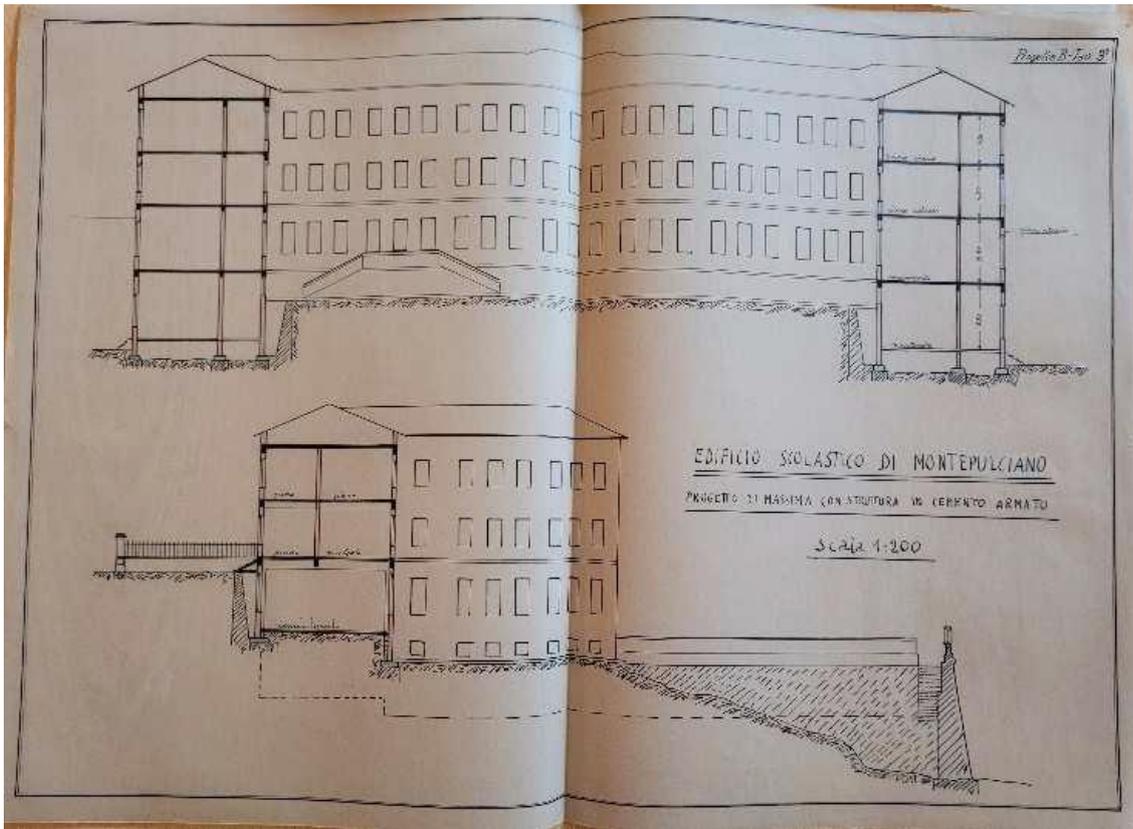


Figura 3 Studio di fattibilità a cura dell'Ing. Idro Batignani.

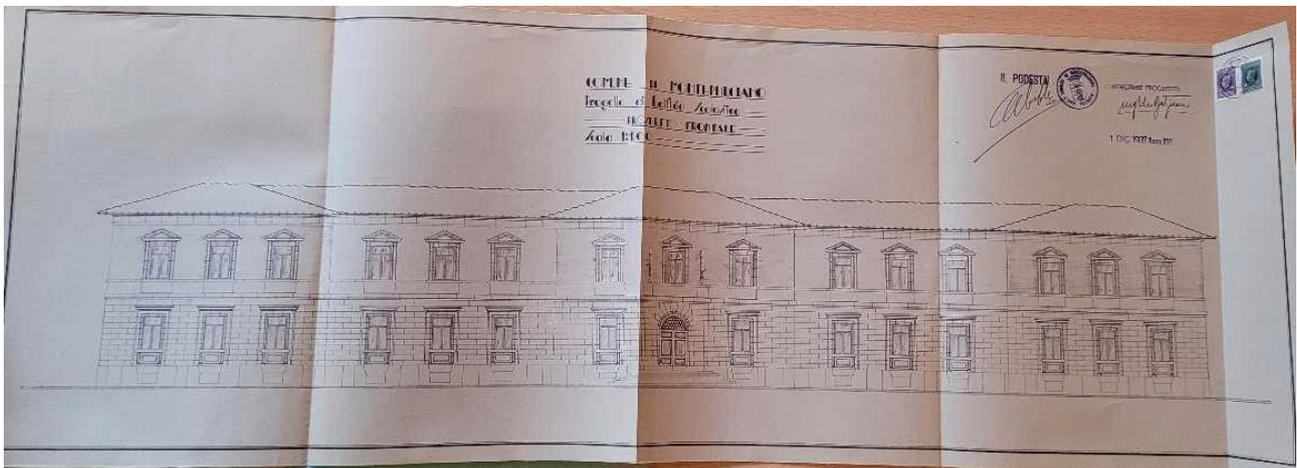


Figura 4 Prospetto del progetto definitivo a cura dell'Ing. Idro Batignani.



## 1 Analisi storico – critica dell’organismo strutturale

Da un’attenta analisi dei documenti rinvenuti e grazie ai meticolosi rilievi geometrici della struttura e alle attente indagini in situ, unitamente alle testimonianze raccolte, si può ipotizzare quanto di seguito illustrato in sintesi.

L’edificio è stato costruito in conformità all’ultima versione progettuale presente nell’archivio storico del Comune di Montepulciano. L’elenco delle lavorazioni, parte integrante del progetto del 1937-1938, prevedeva la realizzazione di un tetto con struttura portante in legno di tipologia analoga agli altri solai. A tal proposito è utile segnalare che le indagini eseguite nelle murature di sottotetto hanno permesso di rilevare delle nicchie a intervalli regolari e la presenza di monconi di travi in legno tagliate e lasciate entro la muratura, ciò è prova del fatto che la struttura di copertura originaria fosse in legno, inoltre, sembrerebbe plausibile pensare che fosse realizzata a capriate, quindi non spingente.

La copertura attuale è stata quindi realizzata a sostituzione della copertura originaria; tuttavia, di questo intervento non sono state rinvenute prove documentali, se ne ha l’evidenza solo dalle indagini visive. Inoltre, essendo state utilizzate travi prefabbricate della *Prefabbricati Peruzzi*, impresa locale molto nota all’epoca, non più attiva ma che ancora oggi annovera ex dipendenti in zona, si può supporre che la realizzazione della nuova copertura, giunta fino a noi, sia riconducibile al periodo tra il 1955 e il 1965.

Il corpo di fabbrica principale, a eccezione della suddetta copertura, non risulta aver subito modifiche.



Figura 7 Intradosso del solaio di copertura in travi in c.a. e tavelloni.



Figura 8 Intradosso solaio di copertura (tiranti in acciaio).

A un attento controllo visivo, il fabbricato risulta in buone condizioni, non si ravvisano deformazioni o dissesti significativi. Si segnala solo la presenza di fessurazioni riscontrate nella parte centrale del prospetto frontale del fabbricato, fessure che sono state oggetto di interventi di stuccatura e ritinteggiatura. Con ogni probabilità tali fenomeni sono riconducibili

in parte all'**effetto spingente** del tetto (le piccole lesioni riscontrate al piano primo sono state rilevate in corrispondenza di alcune delle travi di copertura di maggior sezione), in parte alla **mancanza di un efficace comportamento scatolare** dell'organismo strutturale sismo resistente. Quest'ultimo aspetto è dovuto alla presenza di pannelli murari che non sono collegati ai pannelli ortogonali e a solai di piano con scarsa o pressoché nulla rigidità nel proprio piano.

## 2 Descrizione e definizione dell'organismo strutturale

La **struttura portante** dell'edificio è realizzata in **muratura** in un periodo storico in cui, per la tipologia di adottata, non esistevano normative tecniche di riferimento. Grazie a un'attenta analisi visiva dello stato di fatto dei luoghi e dell'opera si può dire che l'edificio è stato realizzato a regola d'arte.

I paramenti murari del complesso scolastico sono in **pietra a spacco** con tessitura e connessione trasversale di buona qualità. Solo l'elevato di sottotetto è realizzato in **mattoni pieni** (Figura 9). Gli spessori sono degradanti: si parte dal piano più basso con muri di spessore 95 cm, fino ad arrivare a muri di spessore 30 cm (Figura 12). Nel modello di calcolo stati considerati tutti i muri di spessore maggiore uguale a 30 cm, si segnala che sono pochissimi i muri con spessori inferiori.



Figura 9 Muri di sottotetto.

Il prospetto principale presenta un **rivestimento facciavista** in mattoni di cotto al piano primo e calcestruzzo posato simil pietra al piano terra (Figura 1). Questo rivestimento non è stato considerato parte della muratura portante; è stato quindi modellato uno spessore pari a quello rilevato e decurtato del rivestimento; il rivestimento è stato considerato nel modello come carico (Figura 13).

I **solai di piano** (Figura 10) sono realizzati con struttura portante primaria e secondaria in legno: le travi principali hanno sezione di circa 20x30 cm, luce media di 6,50 m (non superiore a 7 m) e interasse di 1,60m; i travetti secondari hanno sezione 8x8 cm e interasse di 40 cm. Al di sopra della struttura lignea poggiano tavelle in laterizio, su esse inerti di riempimento e a finitura vi è una pavimentazione in mattonelle di graniglia.

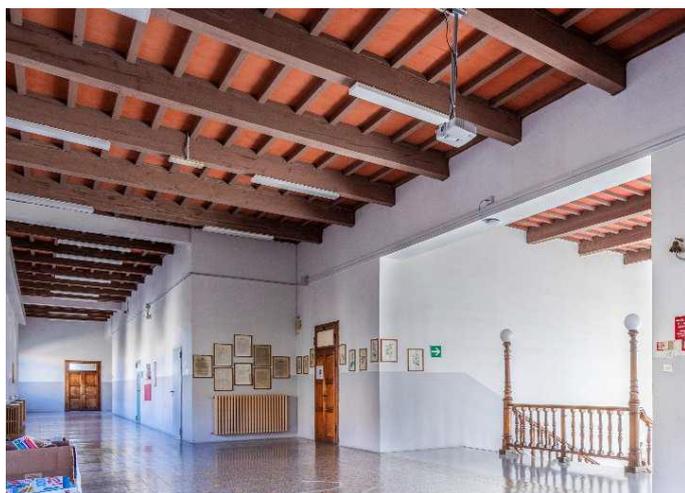


Figura 10 Atrio piano primo, visibile l'intradosso del solaio di sottotetto.

Il **solaio di copertura** (Figura 7) è realizzato con **travi in c.a.** di spessore variabile, in parte gettate in opera, in parte prefabbricate tipo "Varese", e tavelloni in laterizio, il manto di copertura è in tegole tipo marsigliese.

Non si riscontra la presenza di cordoli nelle murature perimetrali, né di solette armate. In alcune zone della copertura si rileva la presenza di tiranti in acciaio (Figura 8) finalizzati all'eliminazione della spinta della struttura di copertura, probabilmente di realizzazione "postuma" alla costruzione della nuova copertura in c.a. la quale risulta quindi prevalentemente spingente.

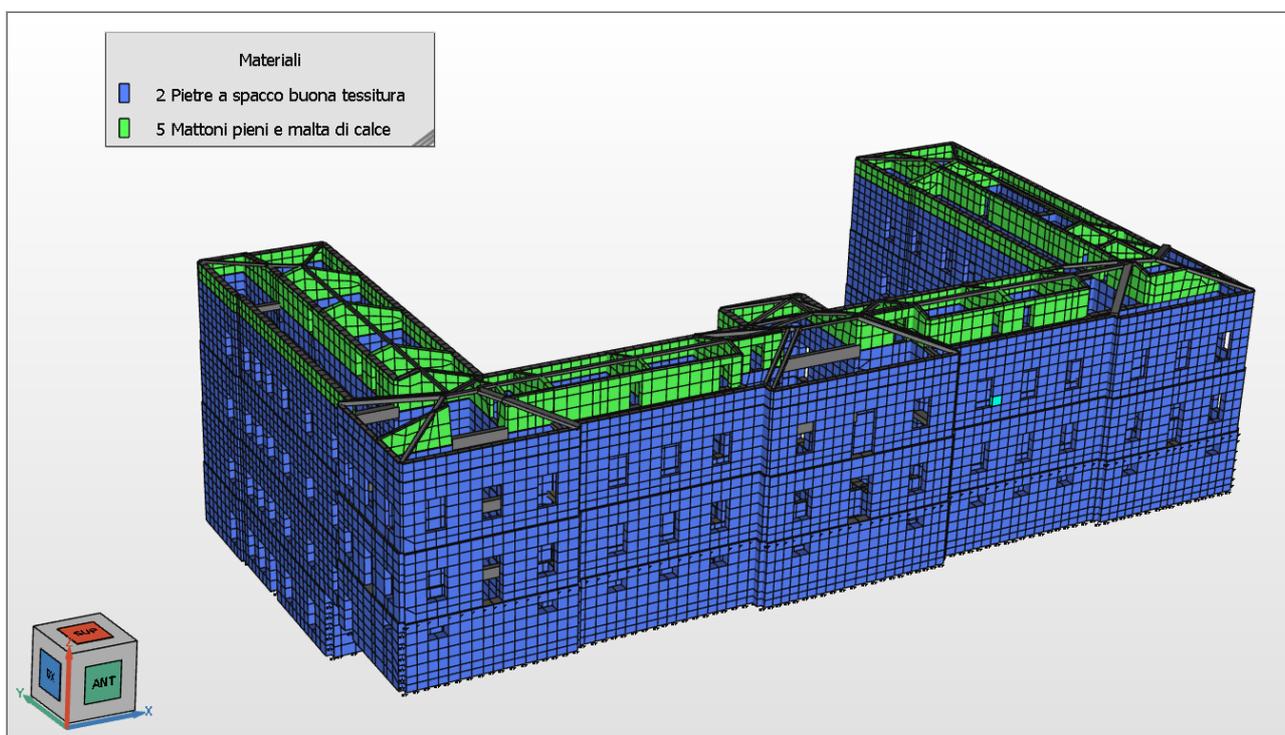


Figura 11 Materiali rappresentati nel modello strutturale di riferimento per lo studio dello Stato di Fatto.

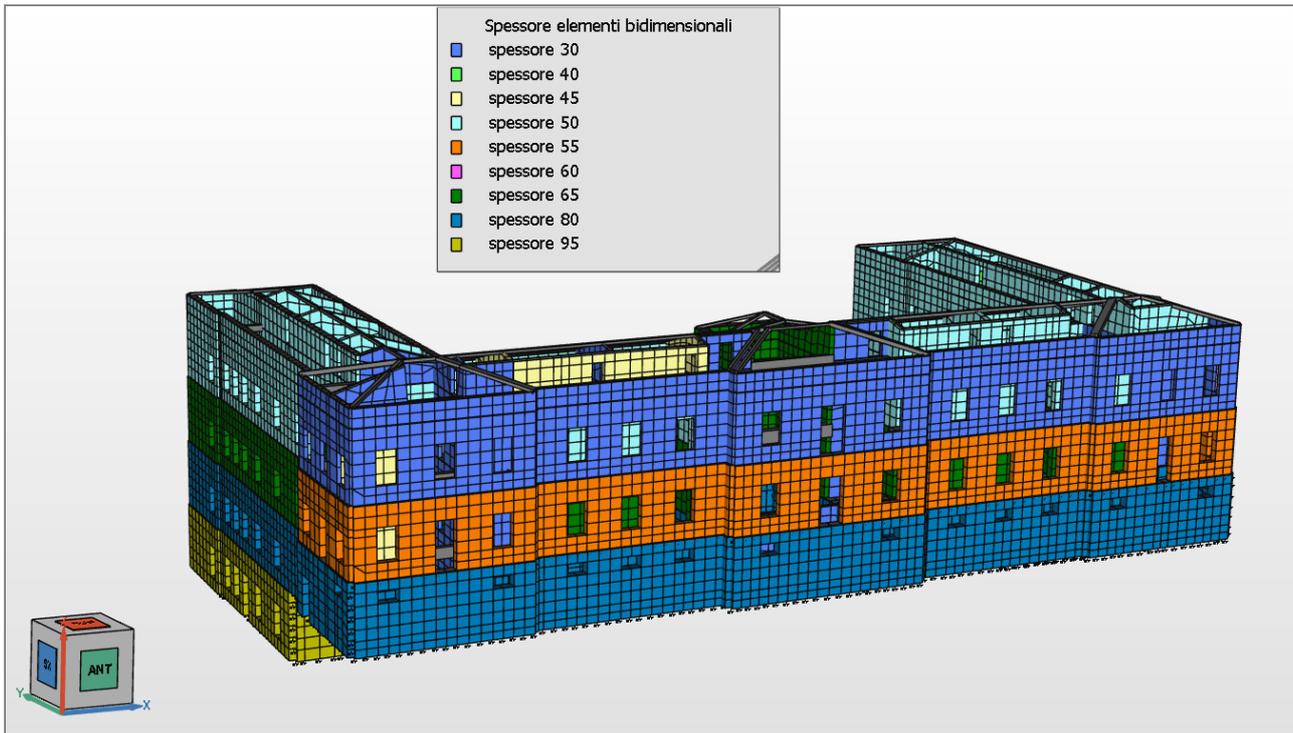


Figura 12 Spessore elementi guscio nel modello strutturale di riferimento per lo studio dello Stato di Fatto.

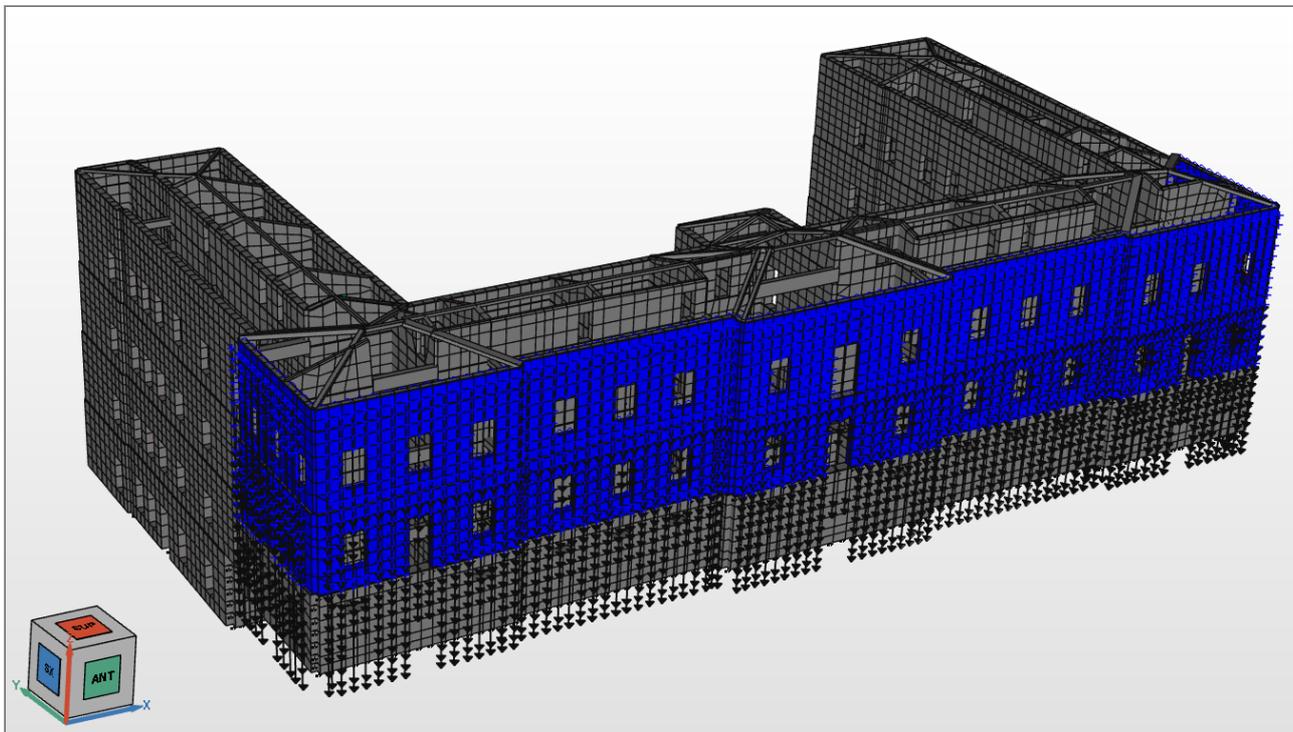


Figura 13 Carico che modella la presenza di un rivestimento della facciata.

## 2.1 Modello di riferimento per le analisi

L'analisi storico-critica, il rilievo, le indagini in situ, la conseguente caratterizzazione meccanica dei materiali e definizione del Livello di Conoscenza (Fattori di Confidenza) e delle azioni presenti nella struttura (carichi permanenti, sovraccarichi accidentali, spinte del terreno) hanno permesso la **definizione del modello di riferimento per le analisi** nel software di calcolo strutturale MasterSap, in cui sono state poi eseguite tutte le verifiche previste dalla normativa italiana vigente (Norme Tecniche per le Costruzioni del 2018 e relativa Circolare esplicativa del 2019).



Figura 14 Fasi di definizione del modello di calcolo

La struttura è stata valutata con un'analisi **lineare statica**. L'organismo strutturale costituito dalla muratura è stato rappresentato nel modello con **elementi finiti bidimensionali tipo guscio**, mentre la struttura di copertura e alcuni architravi di piano sono stati rappresentati con elementi monodimensionali tipo *beam*. **Non vi sono relazioni di piano rigido** poiché, come detto, i solai non possono essere considerati tali.

Nel modello a elementi finiti non è stata rappresentata la struttura di **fondazione**, l'edificio è "vincolato a terra" attraverso vincoli esterni di tipo **incastro**. Questo tipo di modellazione ci pone in favore di sicurezza per quel che riguarda la verifica della sovrastruttura.

È stata inoltre rappresentata la presenza dei muri di contenimento addossati all'edificio (Figura 15), poiché svolgono anche funzione di contrafforte nei confronti della struttura esaminata. Sono stati quindi introdotti nel modello **elementi tipo "trave" resistenti a sola compressione**. In modo analogo per il piano stradale. La procedura implementata nel solutore LiFE di MasterSap 4U prevede che, quando nelle analisi delle combinazioni di carico questi elementi risultano tesi, essi vengono rimossi dal modello. Questo aspetto inserito nel modello si coglie perfettamente nella rappresentazione della deformata della struttura, che in quei punti offre un "vincolo" solo quando tali elementi risultano compressi. La rappresentazione è schematizzata nella Figura 18.



*Figura 15 Muro controterra primo livello sotto strada (in giallo).*



*Figura 16 Muro controterra secondo livello sotto strada (in giallo).*

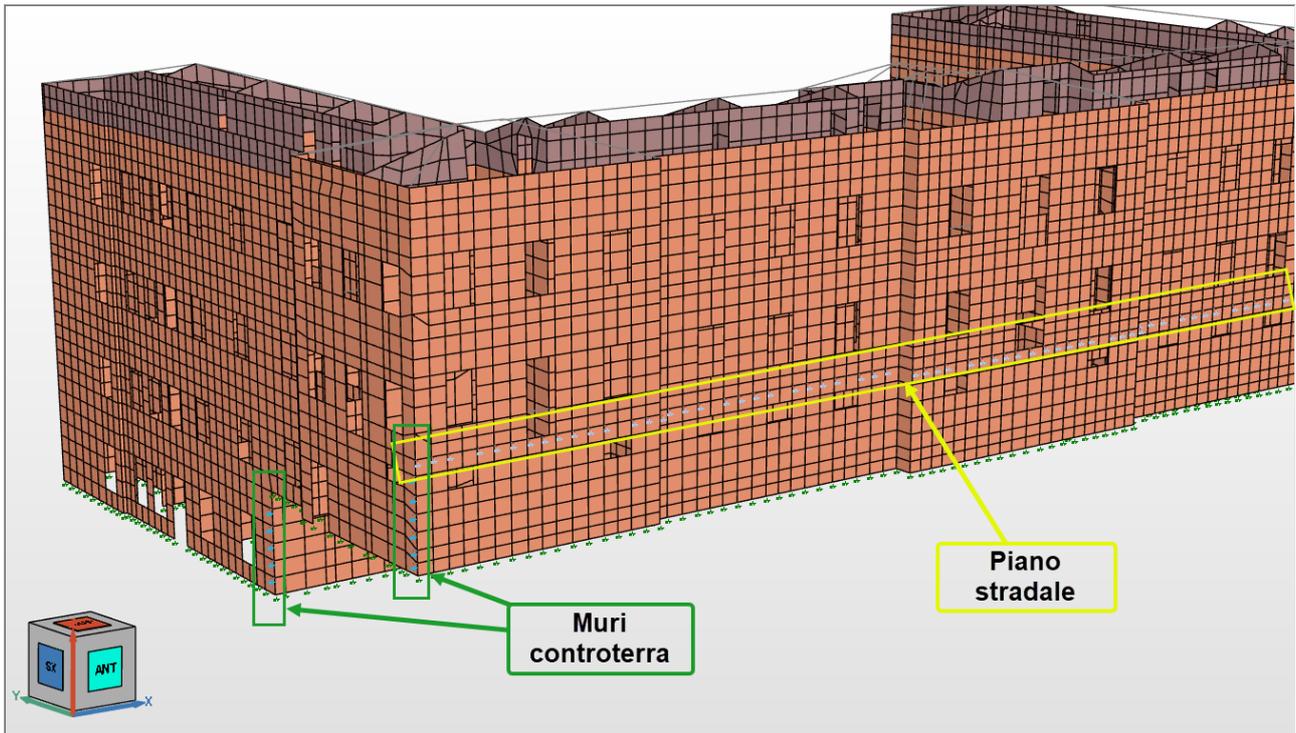


Figura 17 Nel modello: elementi resistenti a sola compressione (lato sinistro e strada).

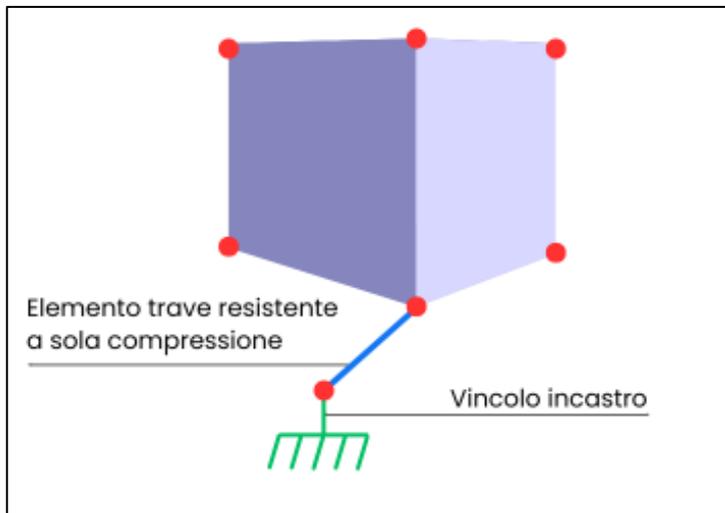


Figura 18 Dettaglio vincolo con elemento resistente a sola compressione.

### 3 Fasi di progetto

Il lavoro di studio, analisi e verifica è stato sviluppato in tre fasi:

- 1) **valutazione della sicurezza sismica dello stato di fatto** della struttura, da cui sono state evidenziate le criticità globali e locali dell'organismo strutturale sismo resistente;
- 2) definizione e modellazione degli **interventi** nello stato di progetto finalizzati al **miglioramento** sismico della struttura;
- 3) definizione e modellazione degli **interventi** nello stato di progetto finalizzati all'**adeguamento** sismico della struttura.

#### 3.1 Valutazione dello Stato di Fatto

La valutazione del livello di sicurezza sismico dello stato di fatto analizzato con MasterSap 4U ha utilizzato il modello di riferimento fin qui descritto in cui è rappresentato l'intero organismo strutturale, comprensivo delle travi principali in c.a. della copertura e dei muri di sottotetto.

È stato assunto un **livello di conoscenza LC1**, come previsto dalla normativa (Circolare alle NTC 2018), pertanto nelle verifiche il **Fattore di Confidenza** è stato posto pari a 1,35.

##### 3.1.1 Analisi a elementi finiti

Il coefficiente di comportamento strutturale, definito nelle NTC 2018 al paragrafo 7.3.1, è definito come segue

$$q_{lim} = q_0 K_R$$

$$K_R = 0,8 \text{ (struttura non regolare in altezza)}$$

$$q_0 = 1,75 \alpha_u / \alpha_1 \text{ (costruzioni di muratura ordinaria)}$$

Le norme al paragrafo 7.8.1.3 indicano che quanto non si procede a un'analisi non lineare, nel caso di costruzioni di muratura ordinaria  $\alpha_u / \alpha_1 = 1,7$

$$q_{lim} = 1,75 * 1,7 * 0,8 = 2,38$$

Per poter quantificare la **capacità sismica della struttura** secondo normativa è necessario calcolare lo  $\zeta_E$ , ossia il **rapporto tra PGA di capacità e PGA di domanda**. La procedura prevede quindi che si indaghi quale sia la massima azione sismica che la struttura è in grado di sopportare, quindi, si dovrà individuare il massimo tempo di ritorno  $T_R$  (a partire da un minimo di 30 anni) per cui la struttura supera le verifiche richieste dalla normativa.

In questo articolo non analizzeremo i meccanismi di primo modo, sottolineiamo tuttavia che il progettista deve sempre partire dal loro studio, prevedendo poi nel progetto l'eliminazione degli stessi. Risulta comunque utile a questo scopo un'analisi globale della struttura, perché può fornire ottimi riferimenti su quali siano le vulnerabilità "di primo modo" della struttura e dove si localizzano.

### 3.1.2 Verifica degli elementi strutturali

I risultati dell'analisi a elementi finiti forniti dal solutore per ciascun guscio, a valle della definizione dei maschi murari, vengono integrati sulle sezioni previste dalla normativa vigente (testa, mezzeria e piede) ai fini della verifica.

Per quel che riguarda la definizione dei maschi murari, vista la geometria delle pareti che costituiscono il fabbricato (forometria e spessori in gioco), si è proceduto considerando le fasce di piano infinitamente rigide, come mostra lo schema qui sotto riportato (in rosso i maschi murari, in giallo le fasce di piano).

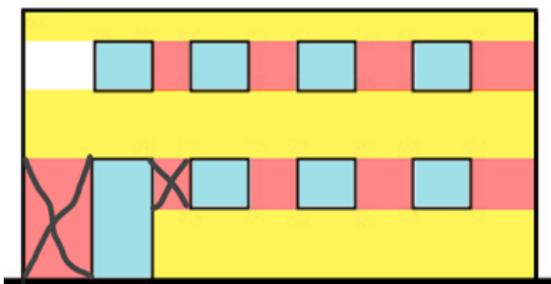


Figura 19 Schema riferimento per la definizione dei maschi murari con fasce di piano rigide.

Ad esempio, facendo riferimento al modello di calcolo, i maschi murari della facciata del prospetto principale sono stati definiti come si può osservare in questa immagine: appaiono color arancione i maschi non ancora sottoposti a verifica.

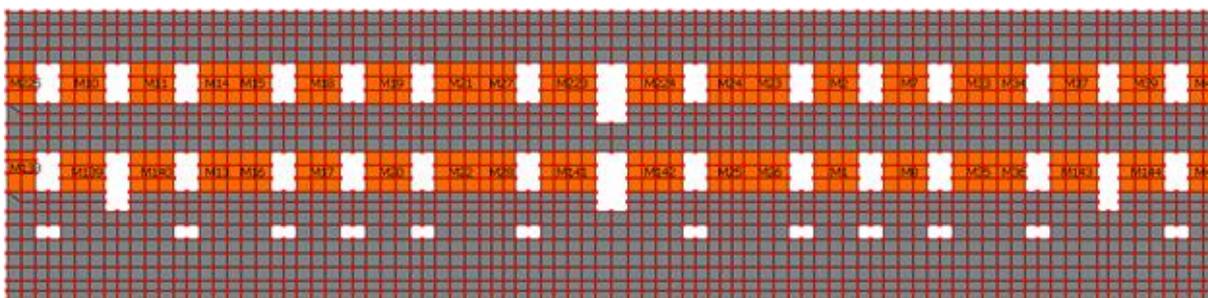


Figura 20 Maschi murari definiti nel prospetto principale.

Per procedere alle verifiche a pressoflessione e taglio previste per i maschi murari, in MasterSap 4U è necessario definire le tabelle di verifica da assegnare agli elementi strutturali. Nel nostro caso di studio il materiale definito nella tabella è stato caratterizzato facendo riferimento alla Circolare 2019:

- **Fattore di Confidenza 1,35** come previsto nel caso di Livello di Conoscenza LC1;
- **Resistenza media a compressione  $f_m$**  nel caso LC1 è quella minima indicata nella Tab. C8.5.I per la tipologia “muratura in pietre a spacco di buona tessitura”  
 **$f_m = 2,6 \text{ N/mm}^2$**
- **Resistenza media a taglio-fessurazione diagonale  $\tau_0$**  nel caso LC1 è quella minima indicata nella Tab. C8.5.I per la tipologia “muratura in pietre a spacco di buona tessitura”  
 **$\tau_0 = 0,056 \text{ N/mm}^2$**
- **Resistenze di progetto**, utilizzate nelle verifiche, si ottengono dividendo le resistenze medie per FC e  $\gamma_m$  (pari a 2 nelle verifiche sismiche, a 3 in quelle statiche)
- **Coefficiente migliorativo** (moltiplica le resistenze medie), nella Tab. C8.5.II. è previsto un coefficiente migliorativo dello stato di fatto che è stato qui considerato avendo rilevato la presenza di connessione trasversale **coeff = 1,3**

Facciamo notare che per questa tipologia di muratura non è prevista la verifica a taglio-scorrimento ( $f_{v0}$ , non è definito in tabella), questo meccanismo di rottura, infatti, non è tipico della “muratura in pietre a spacco di buona tessitura” che non presenta corsi orizzontali di malta.

**Tabella C8.5.I** -Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a:  $f$  = resistenza media a compressione,  $\tau_0$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3),  $f_{v0}$  = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3),  $E$  = valore medio del modulo di elasticità normale,  $G$  = valore medio del modulo di elasticità tangenziale,  $w$  = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	$f$ (N/mm <sup>2</sup> )	$\tau_0$ (N/mm <sup>2</sup> )	$f_{v0}$ (N/mm <sup>2</sup> )	$E$ (N/mm <sup>2</sup> )	$G$ (N/mm <sup>2</sup> )	$w$ (kN/m <sup>3</sup> )
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	- -	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	- -	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	- -	1500-1980	500-660	21

Figura 21 Circolare 2019 Tab. C8.5.I

**Tabella C8.5.II** -Coefficients correttivi massimi da applicarsi in presenza di: malta di caratteristiche buone; ricorsi o listature; sistematiche connessioni trasversali; consolidamento con iniezioni di malta; consolidamento con intonaco armato; ristilatura armata con connessione dei paramenti.

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscele leganti (*)	Intonaco armato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4

Figura 22 Circolare 2019 Tab. C8.5.II

### 3.1.3 Definizione del livello di sicurezza sismico

A valle dell'analisi del modello, impostato un Tempo di Ritorno di 30 anni per il sisma di riferimento, sono state eseguite le verifiche previste dalla normativa per i pannelli murari, molti dei quali non le superano.  $\zeta_E$  nel caso in esame risulta quindi pari a **0,314**.

#### PARAMETRI SISMICI (domanda)

$T_R$	$a_g/g$	$F_0$	$T_C^*$	$C_c$	$S_s$	PGA ( $a_g \cdot S$ ) [m/s <sup>2</sup> ]
712	0.1648	2.4590	0.29	1.59	1.46	2.355

#### PARAMETRI SISMICI EDIFICIO ESISTENTE allo stato di fatto (capacità)

$T_R$	$a_g/g$	$F_0$	$T_C^*$	$C_c$	$S_s$	PGA ( $a_g \cdot S$ ) [m/s <sup>2</sup> ]	$\zeta_E$ (IS-V)
30	0.0503	2.5220	0.25	1.65	1.50	0.740	0.314

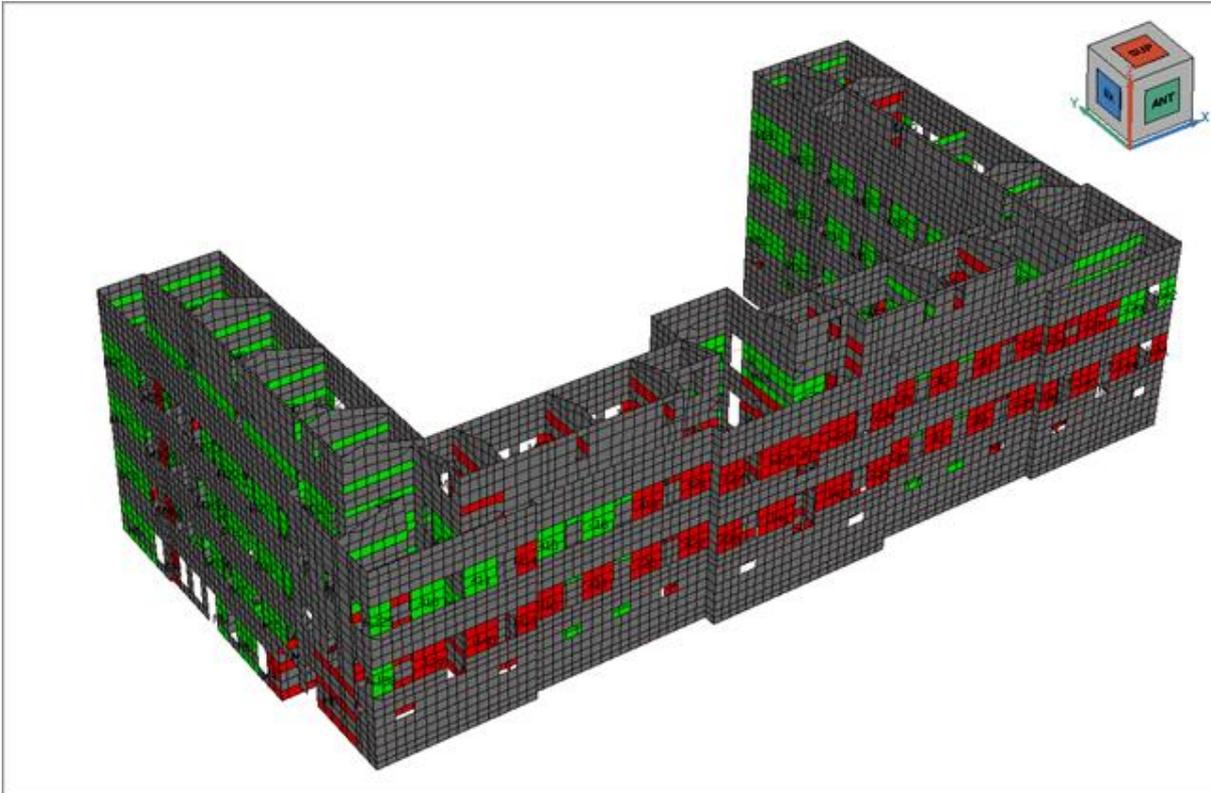


Figura 23 In verde i maschi murari verificati, in rosso non verificati (vista fronte).

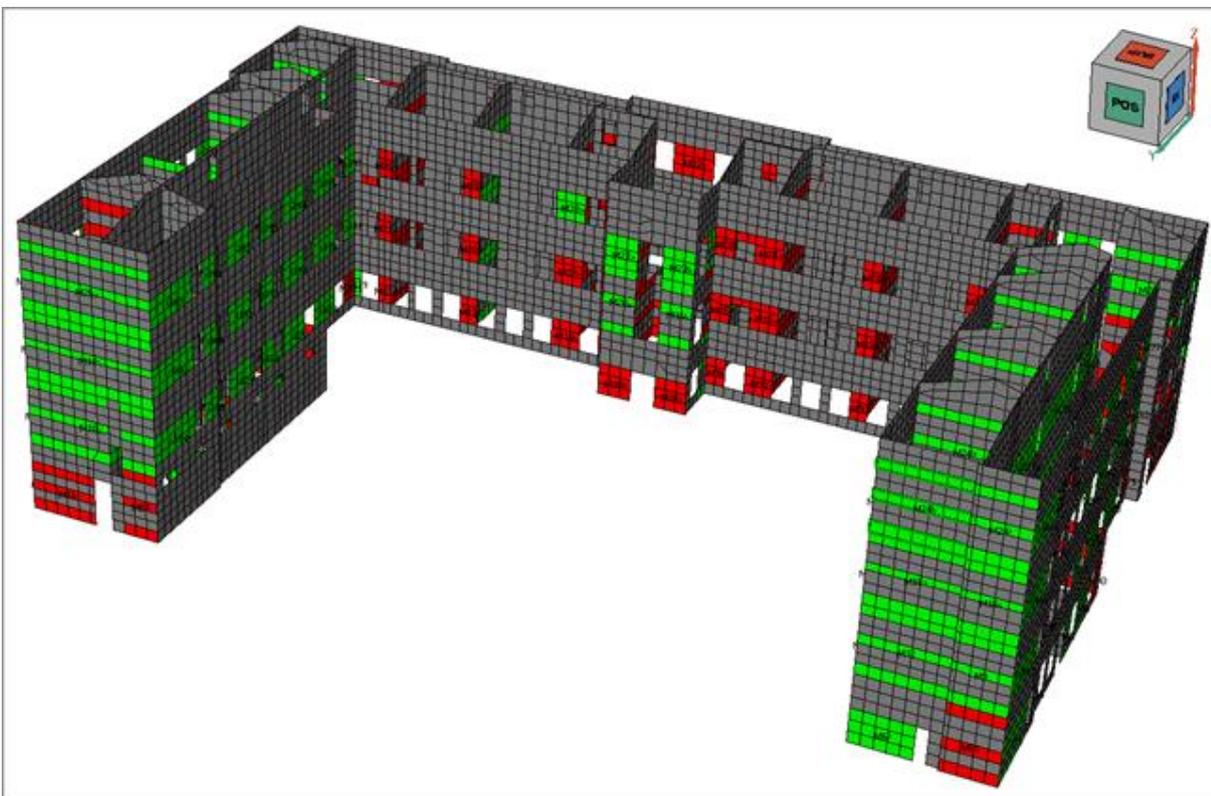


Figura 24 In verde i maschi murari verificati, in rosso non verificati (vista retro).

### 3.1.4 Studio delle ipotesi di intervento

L'analisi a elementi finiti, eseguita con  $T_R$  di 30 anni, ha evidenziato le seguenti principali criticità dello stato di fatto dell'opera:

- presenza di meccanismi di ribaltamento delle facciate che si attestano lungo i corridoi, sia del prospetto principale sia delle ali sul retro, evidenziati dalle rappresentazioni della deformata della struttura nelle varie configurazioni di carico (in Figura 25 quella della combinazione 2);
- spinte del terreno che aggravano la criticità della parete del prospetto principale;
- copertura spingente;
- maschi murari non verificati a presso-flessione e taglio con fessurazione diagonale.

Il primo aspetto critico rilevato, ossia la presenza di meccanismi di ribaltamento delle facciate, come già detto, è dovuto sostanzialmente alla mancanza di collegamento dei pannelli murari ai pannelli ortogonali e a una scarsa o pressoché nulla rigidezza nel piano dei solai.

Preso atto di questi risultati per lo stato di fatto, è stata studiata e implementata nel modello strutturale una composizione di interventi che mira al miglioramento sismico della struttura ai sensi delle NTC2018 e che traccia gli indirizzi anche di un possibile adeguamento.

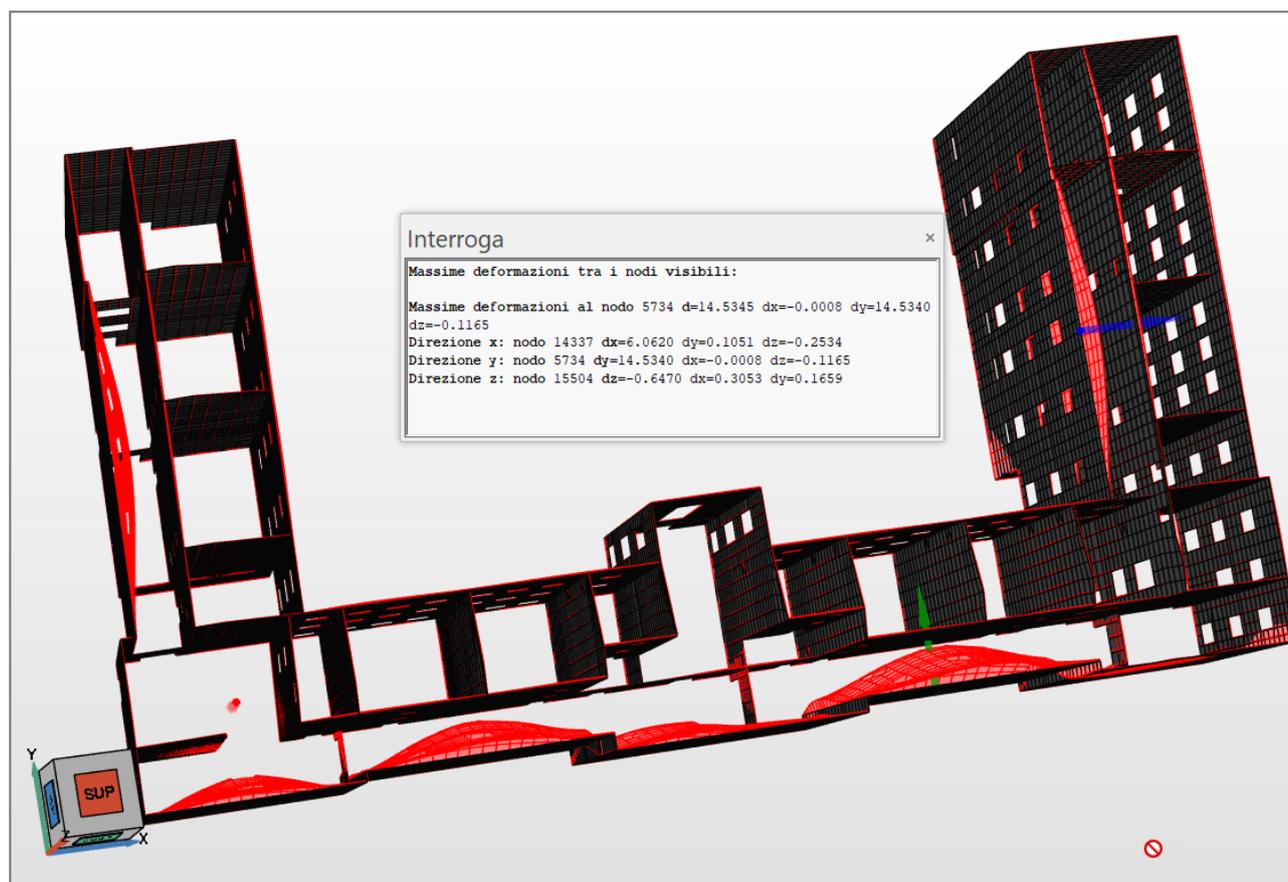


Figura 25 Deformata relativa alla combinazione di carico 2: Sisma 100%+X 30%+Y Torsione: Antioraria.

I principali interventi studiati, modellati e analizzati per migliorare le criticità evidenziate sono:

1. la realizzazione di irrigidimento dei solai di piano (nel modello rappresentati dalle relazioni di piano rigido, come illustreremo qui di seguito);
2. la realizzazione di una trincea frontale al fabbricato, che sgrava la struttura della spinta del terreno;

3. la sostituzione dell'impalcato di copertura e dei muri di sottotetto;
4. l'introduzione di telai in acciaio con funzione controventante in corrispondenza dei tre corridoi laddove, mancando i muri di spina presenti nelle aule, sono state rilevate le massime deformazioni fuori dal piano delle pareti, in facciata e nelle ali del retro lungo i corridoi: i risultati dell'analisi del modello FEM, rappresentati dalle deformate illustrate nel paragrafo 0, evidenziano uno dei maggiori punti deboli dell'organismo strutturale che consiste nei meccanismi di primo modo, ovvero di ribaltamento semplice delle pareti.

Questi sono gli interventi individuati per migliorare il comportamento globale della struttura dal punto di vista della sua capacità sismo-resistente.

Come vedremo in seguito, questi non sono interventi sufficienti a raggiungere il miglioramento della struttura secondo le NTC 2018, è stato perciò previsto un ulteriore intervento di tipo locale:

5. laddove la muratura risultasse non verificata alle azioni sollecitanti di pressoflessione e taglio, si realizzerà la posa di sistemi compositi FRCM (Fiber Reinforced Cementitious Matrix) e di iniezioni di miscele leganti; sono sistemi di rinforzo a "basso spessore" per strutture esistenti in muratura, si compongono di una matrice inorganica rinforzata mediante una rete o tessuto in fibra.

Quest'ultimo intervento, a seconda che l'obiettivo del progetto sia di miglioramento o di adeguamento, si articolerà su un diverso numero di maschi murari non verificati, al fine di recuperare il deficit di resistenza a pressoflessione o taglio-fessurazione diagonale.

Il modello FEM dell'edificio scolastico di Montepulciano implementa la composizione di questi interventi adottati nel progetto e dimostra la possibilità di raggiungere una capacità sismica dell'edificio migliorata o adeguata ai sensi delle NTC 2018.

#### 3.1.4.1 Irrigidimento solai di piano

L'intervento prevede la rimozione dei pavimenti e del massetto di riempimento, la costituzione di soletta armata con calcestruzzo strutturale alleggerito opportunamente collegata attraverso connettori all'orditura lignea principale e secondaria e ancorata attraverso code di rondine alle murature portanti delimitanti ciascuna specchiatura di solaio; le code di rondine potranno essere alternate con inserimenti di barre in tondo di acciaio ad aderenza migliorata annegate nel getto costitutivo della soletta e inserite con resine nelle murature perimetrali delle specchiature di solaio.

La modellazione di questo intervento è stata rappresentata attraverso la definizione di relazioni di piano rigido. È stato valutato opportuno definire per ciascun impalcato delle relazioni di piano rigido che non coinvolgessero tutti i nodi presenti alla medesima quota; le relazioni sono state suddivise nei tre corpi principali che costituiscono la pianta a U dell'edificio: ala sinistra, fronte, ala destra. Si ritiene che questa sia una modellazione più rappresentativa della realtà fisica della struttura, che non trova tutti i nodi alla stessa quota in perfetta relazione di piano rigido seppur realizzando un dettaglio costruttivo di irrigidimento.

Illustriamo le **relazioni di piano** rigido modellate con le figure qui di seguito riportate in cui i nodi evidenziati con dei triangoli blu sono i nodi slave della relazione, mentre il nodo master è indicato con la freccia rossa, i nodi color ciano sono nodi della stessa quota non coinvolti nella relazione illustrata.

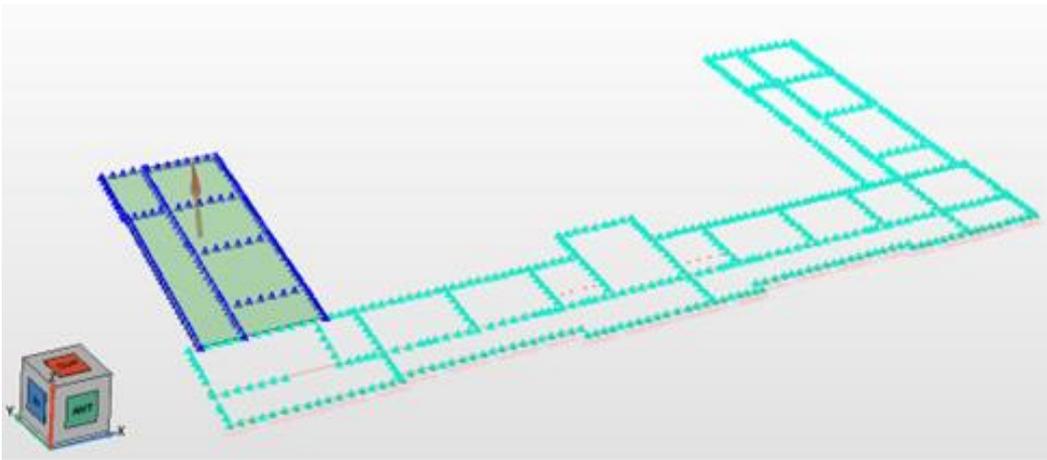


Figura 26 Piano rigido ala sinistra.

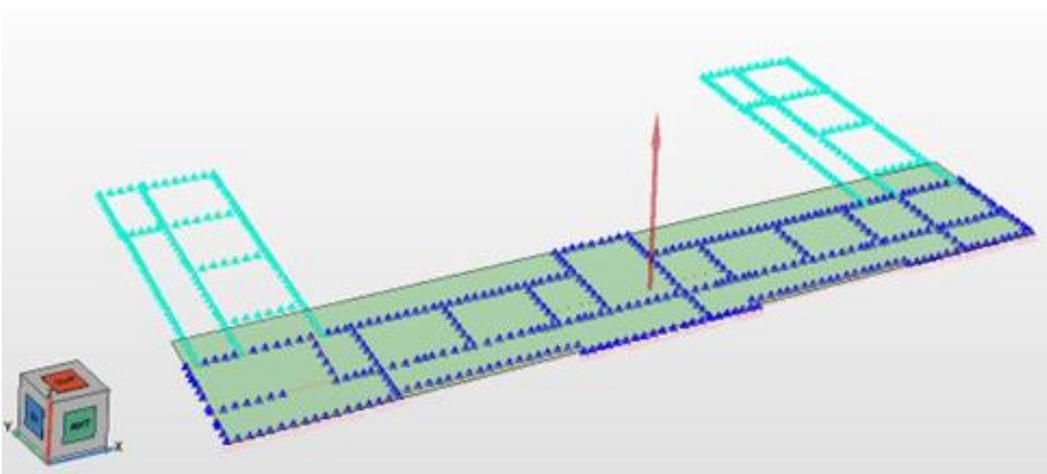


Figura 27 Piano rigido corpo frontale.

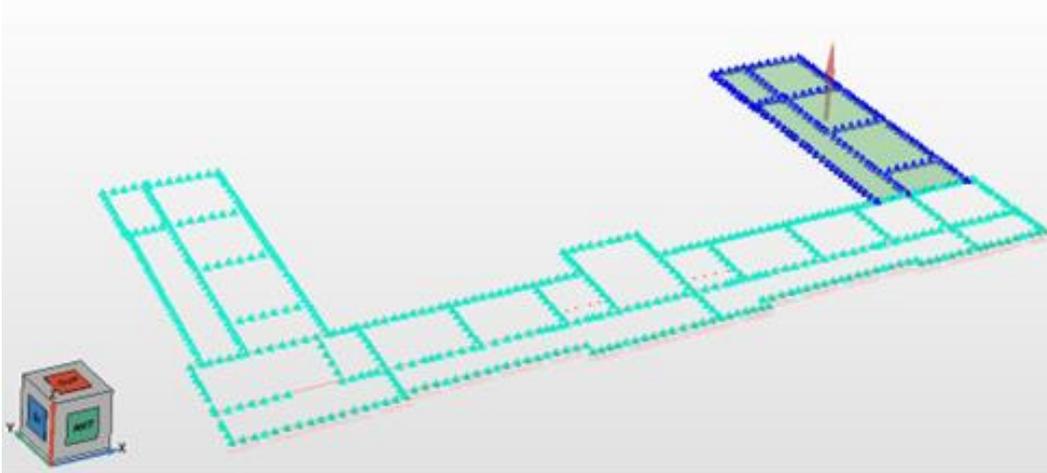


Figura 28 Piano rigido ala destra.

### 3.1.4.2 Opera di contenimento del terreno

Le murature perimetrali dei livelli -1 e -2 lato monte svolgono una funzione di opera per il contenimento del terreno circostante il fabbricato. Le murature sottostanti il piano di ingresso della costruzione sono anche soggette a carichi indotti dal traffico veicolare degli utenti dell'edificio. In esito alla valutazione delle spinte statiche e sismiche a cui il fabbricato può essere soggetto, si è prevista la realizzazione di una palificata utile ad assorbire la spinta del terreno a monte del fabbricato. In particolare, si è ipotizzato la realizzazione di una linea di pali a ridotta distanza dal fabbricato costituenti un diaframma in grado di contenere la spinta del terreno a monte della struttura. Tale opera potrà consentire l'eliminazione della spinta orizzontale del terreno attualmente contenuta dalle murature di sotterraneo -1 e -2 del fabbricato che rimarrà quindi soggetto solo ai carichi propri.

Dal punto di vista del **modello** di calcolo, questo aspetto è stato tradotto in un **azzeramento dei carichi** che rappresentavano le spinte statiche e sismiche equivalenti del terreno nel modello dello stato di fatto, così come da rilievi e indagini.

### 3.1.4.3 Sostituzione solaio di copertura e impalcati di sottotetto

L'intervento prevede la rimozione integrale del solaio di copertura e la realizzazione di una nuova struttura non spingente da appoggiare sul solaio di sottotetto o alternativamente sulle murature portanti. In entrambe le ipotesi dovranno essere adottati carichi caratteristici riconducibili a materiali leggeri. In maniera esemplificata nel primo caso dovrà essere realizzata un'infrastruttura di muretti di sottotetto sostenenti un manto di copertura leggero in legno o lamiera con sovrastante coibentazione, impermeabilizzazione e manto di tegole; alternativamente potrà essere definita una struttura in profili di acciaio anche con travi reticolari con sovrastante pannello di lamiera sandwich (tipo deck) impermeabilizzazione e manto di tegole. Entrambe le soluzioni, come da descrizione, determineranno sulle strutture sottostanti solo carichi verticali distribuiti sui solai nel primo caso, concentrati sulle murature portanti sul secondo, in ogni modo l'attuale spinta orizzontale derivante dalla copertura sarà eliminata.

Nel modello è stato considerato il primo tipo di intervento qui ipotizzato, la nuova copertura è stata quindi rappresentata solo come **carico distribuito sui solai di sottotetto**, con eliminazione di tutti i muri di sottotetto e tutte le travature del solaio di copertura rilevato nello stato di fatto.

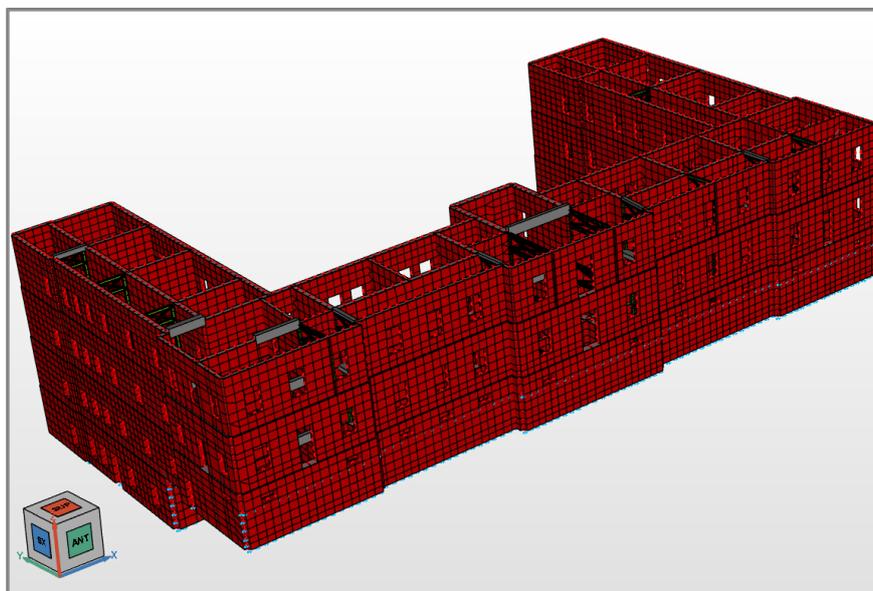


Figura 29 Vista generale del modello dello stato di progetto.

### 3.1.4.4 Telai di controvento

Le murature perimetrali del fabbricato, delimitanti i corridoi di distribuzione, sono pressoché prive, per lunghi tratti, di elementi murari di collegamento ortogonali alle murature stesse. Tale condizione determina criticità che si evidenziano in modo particolare nelle combinazioni di carico sismiche. Si prevede pertanto di costituire un nuovo collegamento tra le murature perimetrali esterne lungo i corridoi e le murature portanti interne ortogonali alle stesse, che attualmente si

interrompono in corrispondenza dei corridoi. Tali controventature potranno essere realizzate con profili in acciaio posti in corrispondenza delle murature interne ortogonali a quelle perimetrali da irrigidire, sia verticalmente che orizzontalmente a quota solai o immediatamente sotto, in modo da costituire un controvento rigido equivalente alla realizzazione di una continuità muraria utile all'irrigidimento delle murature perimetrali esterne lungo i corridoi. Tale ipotesi di intervento determina un irrigidimento sia delle murature perimetrali esterne lato corridoio sia delle murature interne ortogonali alle stesse attualmente limitate al corridoio. Tali manufatti di acciaio non limiteranno l'uso del corridoio.

Nel modello sono stati inseriti e rappresentati i controventi come da descrizione, riportiamo alcune immagini illustrative.

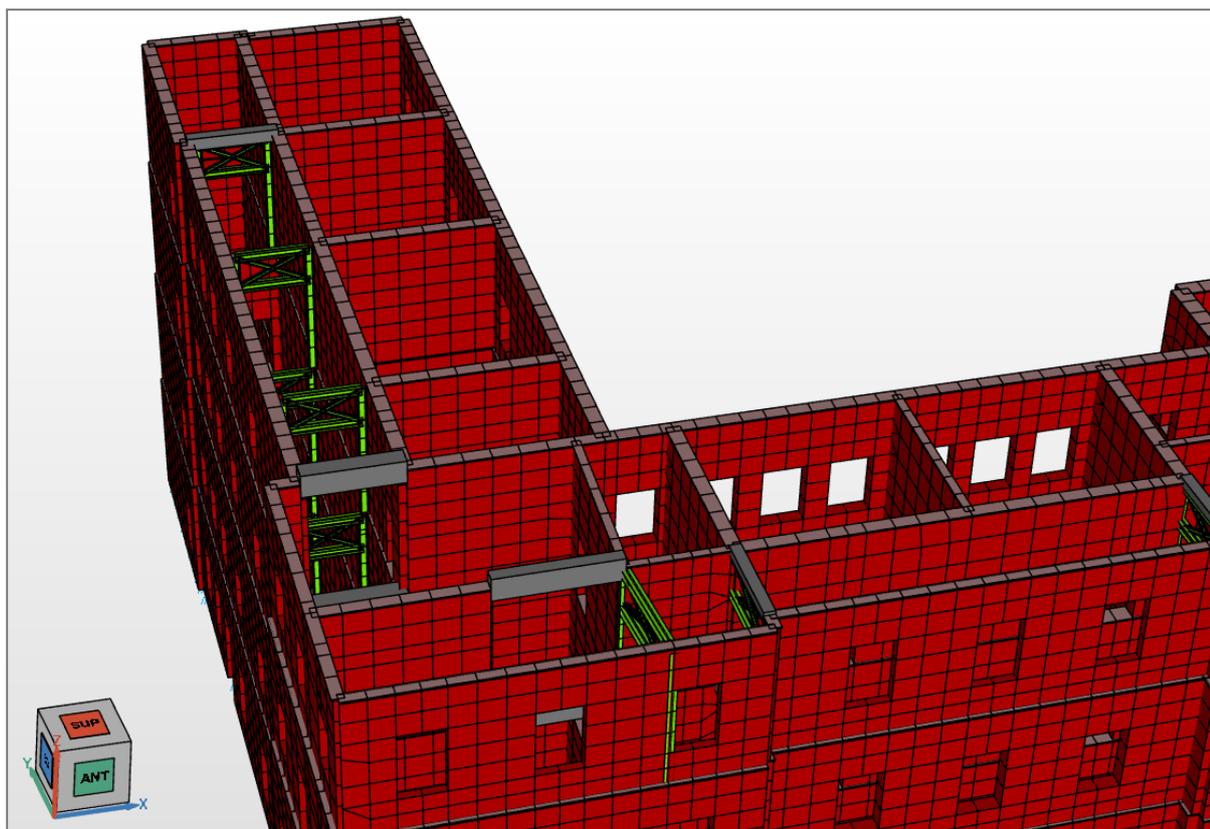


Figura 30 Vista del modello con zoom sul corridoio dell'ala sinistra ove sono modellati i controventi.

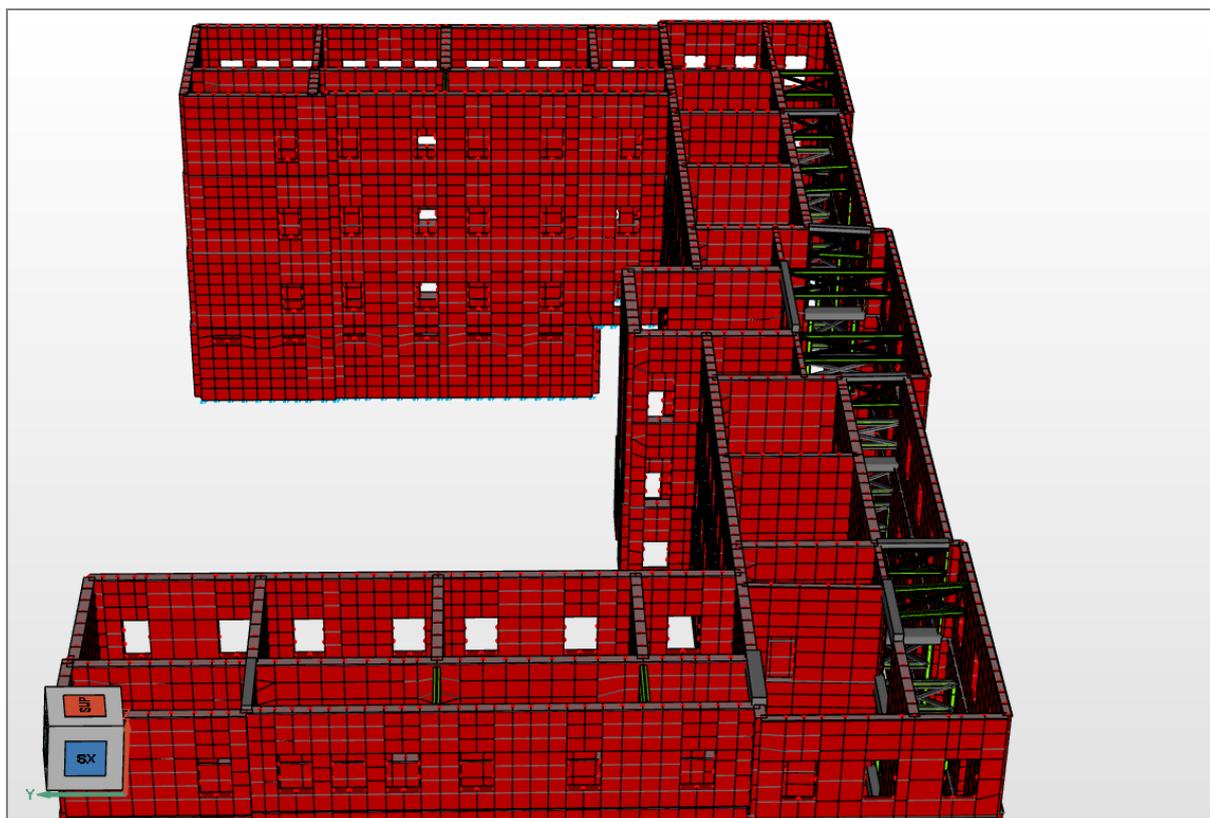


Figura 31 Vista del modello con zoom sul corridoio del corpo frontale ove sono modellati i controventi.

#### 3.1.4.5 Posa in opera di sistemi compositi FRCM

Per colmare il deficit di resistenza dei maschi murari che lo evidenziano con il mancato superamento delle verifiche, si prevede il rinforzo a pressoflessione e taglio mediante l'utilizzo di un **sistema composito a matrice inorganica FRCM** (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), provvisto idonea certificazione, realizzato con tessuto biassiale bilanciato in fibra di basalto e acciaio Inox, le cui caratteristiche meccaniche considerate nella verifica sono:

<b>Numero di strati di tessuto</b>	1
<b>Spessore della rete [mm]</b>	0,169
<b>Supporto</b>	Pietrame
<b>Tensione ultima [MPa]</b>	3000
<b>Deformazione ultima [%]</b>	1,50
<b>Tensione limite convenzionale [MPa]</b>	745,0
<b>Deformazione limite convenzionale [%]</b>	0,38

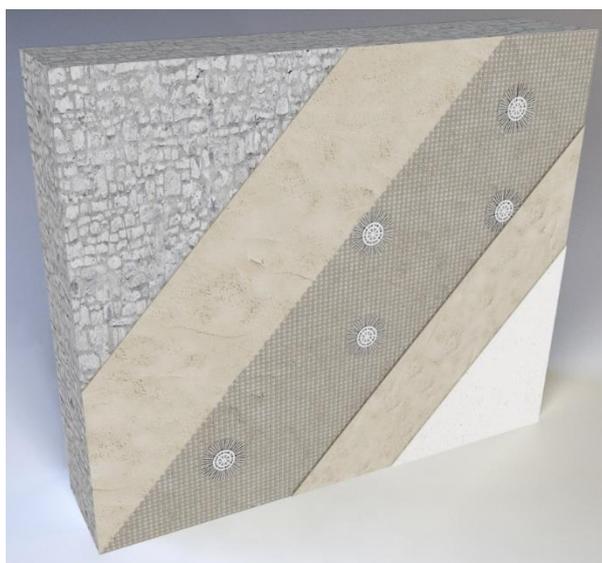


Figura 32 Strati che compongono il sistema FRCM - fonte Kerakoll

L'intervento di posa in opera segue queste fasi:

Edifici esistenti in muratura - La scuola di Montepulciano

- a) eventuale preparazione delle superfici da rinforzare, mediante demolizione e rimozione dell'intonaco esistente, ripristino di eventuali lesioni mediante cucitura e/o consolidamento con iniezione di malta fluida (da contabilizzare a parte) e depolverizzazione finale mediante lavaggio con acqua a bassa pressione;
- b) stesura di un primo strato di malta, di spessore di circa 3 – 5 mm;
- c) con malta ancora fresca, si procede alla posa della rete, avendo cura di garantire una completa impregnazione del tessuto;
- d) esecuzione del secondo strato di malta, di spessore di circa 2 – 5 mm al fine di inglobare totalmente il tessuto di rinforzo e chiudere gli eventuali vuoti sottostanti;
- e) **inserimento di diatoni** realizzati con tessuto unidirezionale in fibra di acciaio galvanizzato ad altissima resistenza, previa: realizzazione del foro d'ingresso, avente dimensioni idonee alla natura del successivo connettore, confezionamento del connettore metallico mediante taglio, "sfocchettatura", e arrotolamento finale del tessuto in fibra di acciaio, con bloccaggio dello stesso mediante fascetta plastica, inserimento del connettore preformato all'interno del foro con **iniezione a bassa pressione di malta** con caratteristiche tecniche idonee a questo utilizzo.

Quest'ultimo dettaglio, spesso fornito con i sistemi in commercio, ci permette di considerare - nel calcolo delle verifiche dei maschi da rinforzare - un ulteriore **coefficiente migliorativo**, previsto nella Circolare 2019 alla Tabella C8.5.II (Figura 22), pari a **1,50** in riferimento all'iniezione di miscele leganti.

### 3.2 Stato di Progetto- Miglioramento

Questa ipotesi progettuale si pone l'obiettivo di dimensionare gli interventi per ottenere il **miglioramento sismico della struttura** ossia sarà necessario raggiungere uno  $\zeta_E = 0,600$ .

Le NTC2018 al paragrafo 8.4.2 INTERVENTO DI MIGLIORAMENTO ci dicono, infatti:

*"Per la combinazione sismica delle azioni, il valore di  $\zeta_E$  può essere minore dell'unità. A meno di specifiche situazioni relative ai beni culturali, per le costruzioni di classe III ad uso scolastico (...)  $\zeta_E$ , a seguito degli interventi di miglioramento, deve essere comunque non minore di 0,6".*

Per avere uno  $\zeta_E = 0,60$  l'azione sismica dovrà essere quella relativa al tempo di ritorno  $T_R$  di 170 anni.

#### PARAMETRI SISMICI EDIFICIO ESISTENTE allo stato di progetto (capacità) – MIGLIORAMENTO

$T_R$	$a_g/g$	$F_0$	$T_c^*$	$C_c$	$S_s$	PGA ( $a_g * S$ ) [m/s <sup>2</sup> ]	$\zeta_E$ (IS-V)
170	0.0986	2.5070	0.28	1.60	1.50	1.451	0,616

In questa fase è stato ipotizzato di operare con il livello di conoscenza minimo previsto dalle normative vigenti, ossia LC1, che imporrà di considerare per le resistenze della muratura i valori minimi degli intervalli riportati in Tabella C8.5.I (Figura 21) e per il fattore di confidenza FC il valore di 1,35.

In queste ipotesi sono **149 i maschi murari non verificati** su cui è necessario intervenire con l'intervento di rinforzo con **sistemi FRCM** per raggiungere l'obiettivo progettuale.

### 3.3 Stato di Progetto- Adeguamento

Se l'obiettivo scelto dalla committenza sarà quello di un **Adeguamento sismico della struttura**, dovremo calibrare gli interventi per raggiungere uno  $\zeta_E = 1,00$ .

In questo caso, dovendo raggiungere una PGA di capacità pari a quella di domanda, avremo che la domanda di resistenza sui maschi murari, a parità delle altre condizioni, aumenterà considerevolmente.

**PARAMETRI SISMICI allo stato di progetto (domanda=capacità) - ADEGUAMENTO**

$T_R$	$a_g/g$	$F_0$	$T_c^*$	$C_c$	$S_s$	PGA ( $a_g \cdot S$ ) [m/s <sup>2</sup> ]
712	0.1648	2.4590	0.29	1.59	1.46	2.355

Si è quindi pensato opportuno introdurre una fase di progetto che prevede una campagna prove e rilievi in situ tale da raggiungere un livello di conoscenza LC2.

Il livello di conoscenza LC2 permette di ridurre il numero e l'estensione della posa in opera di un sistema FRCM, rispetto a un LC1, sia rendendo più affidabile il modello di riferimento per le analisi, sia potendo considerare per la muratura caratteristiche migliori in termini di resistenza.

3.3.1 Esempio di verifica di un maschio murario

Riportiamo, a titolo esemplificativo, il tabulato di verifica del Maschio murario n.121 (Figura 33) il quale non supera le verifiche a taglio fessurazione diagonale.

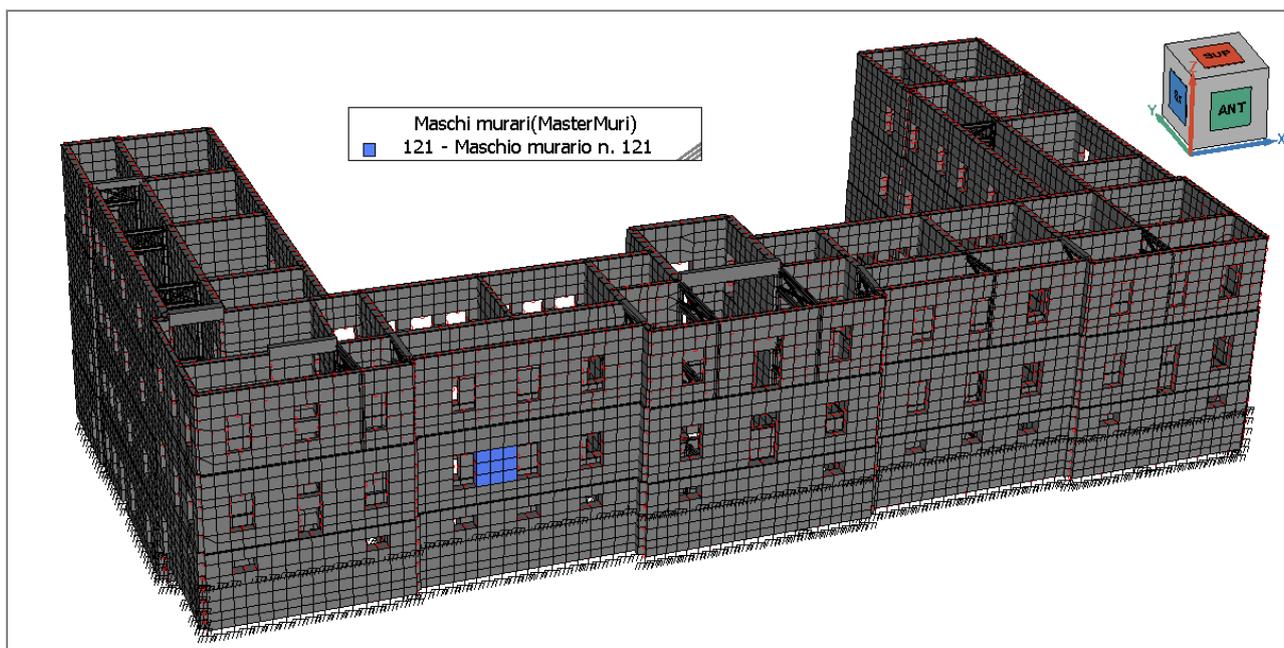


Figura 33 Maschio murario n. 121 definito nella parete del prospetto principale (in blu).

Nel tabulato i risultati vengono presentati in colonne che riportano i seguenti dati e risultati:

- **Pos.** indica le posizioni delle sezioni in cui le NTC2018 contemplano le verifiche, sono quelle di testa (indicata con I), di piede (0) e quelle intermedie (½);
- **c.c.** indica il numero della combinazione di carico analizzata, si faccia attenzione che le verifiche contemplate dalla norma sono diverse a seconda che le combinazioni di carico siano o no sismiche;
- **Fx** sforzo normale, negativo se di compressione;
- **V** taglio nel piano del pilastro;
- **My, Mz**: momenti flettenti con azione fuori dal piano e nel piano del maschio murario;
- **es1/eV; es2/eb**: sono le eccentricità calcolate in ottemperanza a quanto definito al paragrafo 4.5.6.2 delle NTC2018 per le combinazioni “non sismiche”; qui, per ragioni di compattezza, considerato che **es1** viene calcolato in testa, **eV** in posizione intermedia, **es2** ancora in testa ed **eb** alla base, i quattro dati sono stati compattati in due colonne e vanno letti alla riga (sezione) corrispondente.
- **Fx/A** tensione media nell'elemento, negativa se di compressione.
- **IRN** indice di resistenza inteso come rapporto fra la tensione media di compressione e la tensione limite indicata in precedenza. Al piede del pilastro, come già commentato, rappresenta l'indice peggiore (più elevato) derivante dalla verifica a compressione e da quella a presso flessione nel piano dell'elemento.
- **β** coefficiente di parzializzazione della sezione, calcolato in base all'eccentricità eb.
- **τ** rappresenta la tensione media a taglio (V/A).
- **fvk** resistenza caratteristica a taglio scorrimento; viene riportato nel tabulato perché a differenza della resistenza caratteristica a compressione  $f_k$  il suo valore varia in funzione della compressione media.
- In questo caso di studio, come illustrato al paragrafo 0, il dato  $fvk$  non è rilevante, non viene infatti valutata la resistenza a taglio scorrimento del maschio murario e il relativo indice **IrVs** non viene calcolato. Tuttavia, si segnala, che, nonostante  $fvk_0$  sia nullo, il valore di  $fvk$  non risulterà anch'esso nullo poiché la procedura considera il contributo dell'azione di compressione sul maschio murario:  $fvk = fvk_0 + 0,4 \sigma_n = 0,4 \sigma_n$
- **td** tensione limite a taglio con fessurazione diagonale, calcolata secondo quanto indicato nella Circolare alle NTC 2018 al paragrafo C8.7.1.3.1.1, ove, nel caso di “Tessitura irregolare”, si fa quindi riferimento all'equazione [C8.7.1.16];
- **IRVf** indice di resistenza a taglio con fessurazione diagonale, calcolato come rapporto fra la tensione media  $\tau$  e la tensione limite a taglio  $td$ ;
- **IrMz (IrM)**, calcolato in testa e al piede del maschio, rappresenta l'indice di resistenza a momento flettente per pressoflessione nel piano, ottenuto come rapporto fra il momento flettente agente e il momento ultimo  $M_{ult}$  calcolato;
- **IrMy (IrMfp)**, calcolato in testa e al piede del maschio, rappresenta l'indice di resistenza a momento flettente per pressoflessione fuori piano, ottenuto come rapporto fra il momento flettente agente e il momento ultimo  $M_{ult}$  calcolato.
- **Note**: in questa colonna si evidenziano le segnalazioni di mancata verifica

Lavoro: ScuolaMontepulciano SdP Intestazione lavoro: progetto strutturale scuole  
 Elem.: MASCHIO (piastra) Gruppo: 24 Tabella: Pietra spacco buona tessitura LC2 RINF  
 Descrizione: P0 MASCHI 05  
 Tipo di verifica: NTC 2018 - Circolare 21/1/2019 n.7  
 Edificio Esistente Fatt. conf.: 1.20  
 fmd: 53.01 kg/cmq Modello  $\sigma$ - $\epsilon$ : Stress-Block  
 fv0d: 0.00 kg/cmq Coeff. contributo  $\sigma_n$ : 0.40 fb: 48.93 kg/cmq  
 Tessitura irregolare r0: 1.07 kg/cmq  $\beta$ , coeff. parz. sez.: 1.00  
 d1: 0.00 cm d2 / t: 0.1660 Effetti di d1 e d2: concorde Calcolo di ev: NON abilitato  
 ea / h: 1 / 200.00 fatt. laterale di vincolo  $\rho$ : 1.00  
 Non viene effettuata la verifica a taglio-scorrimento perché il valore di fv0 non è definito

Maschio num. 121 Descrizione: Maschio murario n. 121  
 altezza calcolata: 250.00 cm

P o s	c. c.	Fx	V	My	Mz	es <sub>1</sub> /e <sub>s</sub>	es <sub>2</sub> /e <sub>s</sub>	$\phi/\phi_b$	Fx/A	I <sub>RA</sub>	$\beta$	$\tau$	f <sub>1R</sub>	$\tau_d$	I <sub>RA</sub>	I <sub>RV</sub>	I <sub>SH</sub>	I <sub>SHp</sub>	Note
s		kg		kg * m		cm			kg/cm <sup>2</sup>				kg/cm <sup>2</sup>						
I	1	-41166	468	40	95	0.0	2.6	0.75	-2.81	0.21	1.00	0.03	1.12	1.34	--	0.02	--	--	
I	2	-29633	24940	205	-18558	--	--	--	-2.02	0.08	1.00	1.70	0.81	1.51	--	1.13	0.52	0.03	N.V.
I	3	-30401	24979	-199	-18670	--	--	--	-2.07	0.08	1.00	1.70	0.83	1.52	--	1.12	0.51	0.03	N.V.
I	4	-28812	24286	193	18797	--	--	--	-1.97	0.07	1.00	1.66	0.79	1.50	--	1.11	0.54	0.03	N.V.
I	5	-29732	24144	-308	18592	--	--	--	-2.03	0.08	1.00	1.65	0.81	1.51	--	1.09	0.52	0.04	N.V.
I	6	-28428	7668	609	-5353	--	--	--	-1.94	0.07	1.00	0.52	0.78	1.49	--	0.35	0.15	0.09	
I	7	-31344	7915	-1013	-5817	--	--	--	-2.14	0.08	1.00	0.54	0.86	1.54	--	0.35	0.15	0.13	
I	8	-28193	7117	604	5860	--	--	--	-1.92	0.07	1.00	0.49	0.77	1.48	--	0.33	0.17	0.09	
I	9	-31158	6841	-1046	5370	--	--	--	-2.13	0.08	1.00	0.47	0.85	1.54	--	0.30	0.14	0.13	
I	10	-29633	24940	205	-18558	--	--	--	-2.02	0.08	1.00	1.70	0.81	1.51	--	1.13	0.52	0.03	N.V.
I	11	-30401	24979	-199	-18670	--	--	--	-2.07	0.08	1.00	1.70	0.83	1.52	--	1.12	0.51	0.03	N.V.
I	12	-28812	24286	193	18797	--	--	--	-1.97	0.07	1.00	1.66	0.79	1.50	--	1.11	0.54	0.03	N.V.
I	13	-29732	24144	-308	18592	--	--	--	-2.03	0.08	1.00	1.65	0.81	1.51	--	1.09	0.52	0.04	N.V.
I	14	-28428	7668	609	-5353	--	--	--	-1.94	0.07	1.00	0.52	0.78	1.49	--	0.35	0.15	0.09	
I	15	-31344	7915	-1013	-5817	--	--	--	-2.14	0.08	1.00	0.54	0.86	1.54	--	0.35	0.15	0.13	
I	16	-28193	7117	604	5860	--	--	--	-1.92	0.07	1.00	0.49	0.77	1.48	--	0.33	0.17	0.09	
I	17	-31158	6841	-1046	5370	--	--	--	-2.13	0.08	1.00	0.47	0.85	1.54	--	0.30	0.14	0.13	
II	1	-45093	467	37	425	0.0	--	0.86	-3.08	0.20	1.00	0.03	1.23	1.39	--	0.02	--	--	
II	2	-32658	25683	242	-959	--	--	--	-2.23	0.08	1.00	1.75	0.89	1.56	--	1.12	--	--	N.V.
II	3	-33424	25717	-295	-1050	--	--	--	-2.28	0.09	1.00	1.76	0.91	1.58	--	1.11	--	--	N.V.
II	4	-31837	25028	246	1661	--	--	--	-2.17	0.08	1.00	1.71	0.87	1.55	--	1.10	--	--	N.V.
II	5	-32760	24886	-458	1557	--	--	--	-2.24	0.08	1.00	1.70	0.89	1.57	--	1.08	--	--	N.V.
II	6	-31451	7890	762	61	--	--	--	-2.15	0.08	1.00	0.54	0.86	1.54	--	0.35	--	--	
II	7	-34362	8137	-1483	-239	--	--	--	-2.35	0.09	1.00	0.56	0.94	1.59	--	0.35	--	--	
II	8	-31217	7339	762	846	--	--	--	-2.13	0.08	1.00	0.50	0.85	1.54	--	0.33	--	--	
II	9	-34177	7063	-1532	538	--	--	--	-2.33	0.09	1.00	0.48	0.93	1.59	--	0.30	--	--	
II	10	-32658	25683	242	-959	--	--	--	-2.23	0.08	1.00	1.75	0.89	1.56	--	1.12	--	--	N.V.
II	11	-33424	25717	-295	-1050	--	--	--	-2.28	0.09	1.00	1.76	0.91	1.58	--	1.11	--	--	N.V.
II	12	-31837	25028	246	1661	--	--	--	-2.17	0.08	1.00	1.71	0.87	1.55	--	1.10	--	--	N.V.
II	13	-32760	24886	-458	1557	--	--	--	-2.24	0.08	1.00	1.70	0.89	1.57	--	1.08	--	--	N.V.
II	14	-31451	7890	762	61	--	--	--	-2.15	0.08	1.00	0.54	0.86	1.54	--	0.35	--	--	
II	15	-34362	8137	-1483	-239	--	--	--	-2.35	0.09	1.00	0.56	0.94	1.59	--	0.35	--	--	
II	16	-31217	7339	762	846	--	--	--	-2.13	0.08	1.00	0.50	0.85	1.54	--	0.33	--	--	
II	17	-34177	7063	-1532	538	--	--	--	-2.33	0.09	1.00	0.48	0.93	1.59	--	0.30	--	--	
O	1	-49021	467	33	746	--	1.5	0.98	-3.35	0.25	1.00	0.03	1.34	1.44	--	0.02	--	--	
O	2	-35675	26420	125	17148	--	--	--	-2.43	0.09	0.96	1.80	1.02	1.62	--	1.12	0.40	0.01	N.V.
O	3	-36445	26459	-239	17085	--	--	--	-2.49	0.09	0.97	1.81	1.02	1.63	--	1.11	0.40	0.03	N.V.
O	4	-34853	25766	145	-16001	--	--	--	-2.38	0.09	0.98	1.76	0.97	1.60	--	1.10	0.39	0.02	N.V.
O	5	-35778	25624	-455	-16003	--	--	--	-2.44	0.09	1.00	1.75	0.98	1.62	--	1.08	0.38	0.05	N.V.
O	6	-34470	8112	405	5617	--	--	--	-2.35	0.09	1.00	0.55	0.94	1.60	--	0.35	0.14	0.05	
O	7	-37391	8359	-1443	5496	--	--	--	-2.55	0.10	1.00	0.57	1.02	1.65	--	0.35	0.12	0.16	
O	8	-34245	7562	410	-4342	--	--	--	-2.34	0.09	1.00	0.52	0.93	1.59	--	0.32	0.11	0.05	
O	9	-37200	7285	-1509	-4451	--	--	--	-2.54	0.10	1.00	0.50	1.02	1.64	--	0.30	0.10	0.17	
O	10	-35675	26420	125	17148	--	--	--	-2.43	0.09	0.96	1.80	1.02	1.62	--	1.12	0.40	0.01	N.V.
O	11	-36445	26459	-239	17085	--	--	--	-2.49	0.09	0.97	1.81	1.02	1.63	--	1.11	0.40	0.03	N.V.
O	12	-34853	25766	145	-16001	--	--	--	-2.38	0.09	0.98	1.76	0.97	1.60	--	1.10	0.39	0.02	N.V.
O	13	-35778	25624	-455	-16003	--	--	--	-2.44	0.09	1.00	1.75	0.98	1.62	--	1.08	0.38	0.05	N.V.
O	14	-34470	8112	405	5617	--	--	--	-2.35	0.09	1.00	0.55	0.94	1.60	--	0.35	0.14	0.05	
O	15	-37391	8359	-1443	5496	--	--	--	-2.55	0.10	1.00	0.57	1.02	1.65	--	0.35	0.12	0.16	
O	16	-34245	7562	410	-4342	--	--	--	-2.34	0.09	1.00	0.52	0.93	1.59	--	0.32	0.11	0.05	
O	17	-37200	7285	-1509	-4451	--	--	--	-2.54	0.10	1.00	0.50	1.02	1.64	--	0.30	0.10	0.17	

N.V. sta per NON VERIFICATO

### 3.3.2 Dimensionamento dell'intervento di rinforzo con sistema FRCM

Con la posa in opera del sistema FRCM, illustrato al paragrafo 3.1.4.5, si colma il deficit di resistenza rilevato sul maschio murario 121 e così si procede per tutti i maschi non verificati, giungendo al risultato di seguito riportato. Il calcolo è effettuato attraverso l'applicativo Verifiche Rinforzi della Suite 4U di AMV. Questo applicativo si interfaccia con il modello strutturale analizzato e verificato in MasterSap4U, legge da esso tutti i dati geometrici e i parametri meccanici dei materiali e procede alla verifica del sistema di rinforzo scelto dall'utente. Nel caso di maschi murari l'applicativo mette a disposizione diversi sistemi di rinforzo (FRP, FRCM, Sistema CAM®) che l'utente può scegliere, in questo caso si è optato per il sistema FRCM.

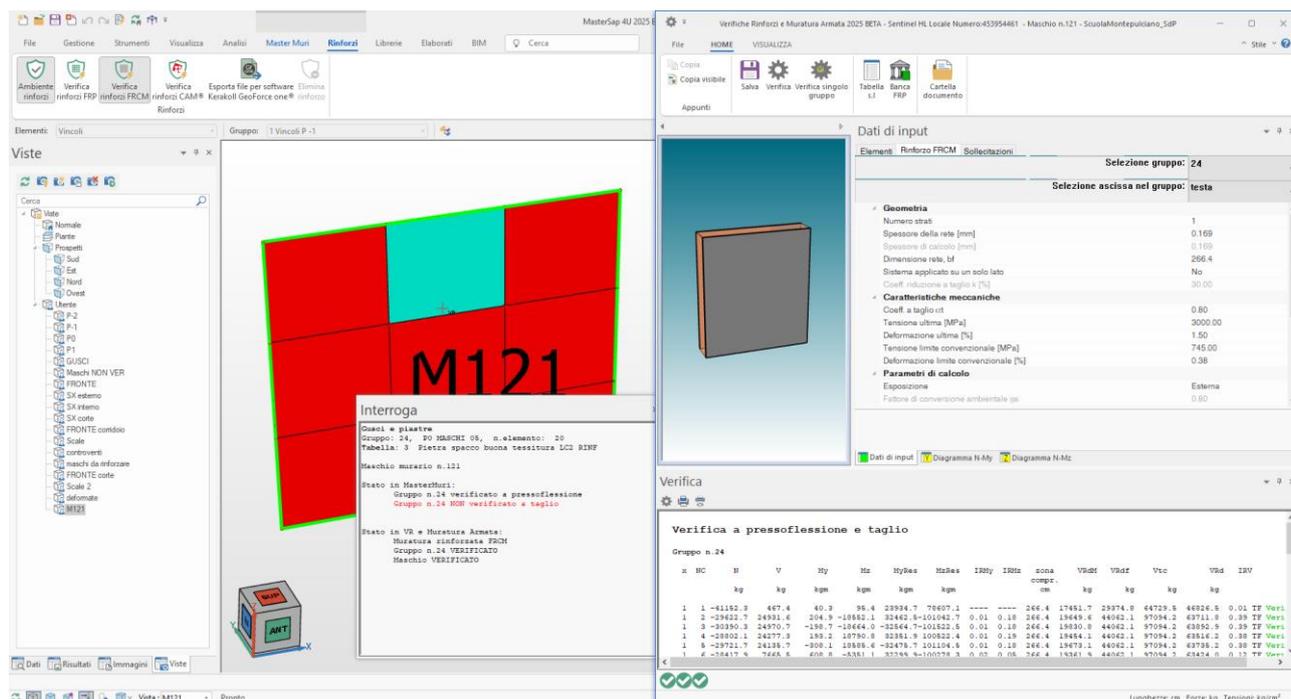


Figura 34 Maschio murario: dimensionamento del sistema di rinforzo FRCM.

In Verifiche Rinforzi si può così agevolmente procedere al dimensionamento e alla verifica del sistema FRCM secondo quanto previsto e indicato nel CNR-DT 215/2018.

Riportiamo qui di seguito il tabulato di verifica relativo al Maschio 121, in cui sono riportati i dati e i risultati nelle varie colonne:

- **x** ascissa di verifica
- **NC** numero della combinazione di carico
- **N, V** sollecitazioni agenti: assiale e tagliante;
- **My, Mz** sollecitazioni flettenti (fuori piano e nel piano)
- **MyRes, MzRes** momento ultimo (fuori piano e nel piano)
- **IRMy, IRMz** indice di resistenza a presso-flessione
- **zona compr.** dimensione della zona compressa della sezione
- **VRdM** resistenza a taglio della muratura esistente
- **VRdf** resistenza a taglio del sistema FRCM
- **Vtc** valore di schiacciamento diagonale della muratura calcolato secondo il CNT-DT 215
- **VRd** resistenza a taglio del maschio murario rinforzato, calcolata come  $VRd = VRdM + VRdf \leq Vtc$
- **IRV** indice di resistenza a taglio pari al taglio sollecitante V diviso il taglio resistente VRd.

#### Dati

Maschio n.121, ipotesi di verifica 1  
Gruppo n.24

Base: 266.4 cm  
 Spessore: 55.0 cm  
 Altezza: 250.0 cm

#### Caratteristiche muratura

Fattore di Confidenza: 1.20  
 Coeff. di sicurezza materiale,  $\gamma_M$ : 3.00  
 Coeff. di sicurezza materiale,  $\gamma_{M,sismico}$ : 2.00  
 Coeff. a taglio,  $\gamma_{Rd}$ : 1.00  
 Resistenza a compressione,  $f_m$ : 63.6 kg/cm<sup>2</sup>  
 Modalità di verifica a taglio: Metodo 3: Circolare 2019  
 Tessitura: Irregolare  
 Resistenza caratteristica a taglio,  $f_{v0}$ : 0.000 kg/cm<sup>2</sup>  
 Tensione di taglio,  $\tau_0$ : 1.290 kg/cm<sup>2</sup>  
 Resistenza media a compressione,  $f_{bm}$ : 4.890 kg/cm<sup>2</sup>  
 Resistenza media a trazione,  $f_{btm}$ : 4.890 kg/cm<sup>2</sup>

#### Rinforzo FRMC

##### Geometria

Numero strati: 1  
 Spessore della rete: 0.169 mm  
 Spessore di calcolo: 0.169 mm  
 Dimensione della rete, bf: 2664.3 mm  
 Sistema applicato su un solo lato: No  
 Coeff. riduzione a taglio, k: 30.0 %

##### Caratteristiche meccaniche

Coeff. a taglio,  $\alpha_t$ : 0.80  
 Tensione ultima: 3000.00 MPa  
 Deformazione ultima: 1.5 %  
 Tensione limite convenzionale: 745.00 MPa  
 Deformazione limite convenzionale: 0.4 %

##### Parametri di calcolo

Esposizione: Esterna  
 Fattore di conversione ambientale: 0.80  
 Coeff. amplificazione,  $\alpha$ : 1.00  
 Coeff. parziale materiale,  $\gamma_m$ : 1.50  
 Coeff. parziale a taglio,  $\gamma_{Rd}$ : 2.00

## Verifica a pressoflessione e taglio

### Gruppo n.24

x	NC	N	V	My	Mz	MyRes	MzRes	IRMy	IRMz	zona compr.	VRdM	VRdf	Vtc	VRd	IRV
		kg	kg	kgm	kgm	kgm	kgm			cm	kg	kg	kg	kg	
1	1	-41152.3	467.4	40.3	95.4	23934.7	78607.1	----	----	266.4	17451.7	29374.8	64729.5	46826.5	0.01 TF Ver.
1	2	-29622.7	24931.6	204.9	-18552.1	32462.5	-101042.7	0.01	0.18	266.4	19649.6	44062.1	97094.2	63711.8	0.39 TF Ver.
1	3	-30390.3	24970.7	-198.7	-18664.0	-32564.7	-101522.5	0.01	0.18	266.4	19830.8	44062.1	97094.2	63892.9	0.39 TF Ver.
1	4	-28802.1	24277.3	193.2	18790.8	32351.9	100522.4	0.01	0.19	266.4	19454.1	44062.1	97094.2	63516.2	0.38 TF Ver.
1	5	-29721.7	24135.7	-308.1	18585.6	-32475.7	101104.5	0.01	0.18	266.4	19673.1	44062.1	97094.2	63735.2	0.38 TF Ver.
1	6	-28417.9	7665.5	608.8	-5351.1	32299.9	-100278.3	0.02	0.05	266.4	19361.9	44062.1	97094.2	63424.0	0.12 TF Ver.
1	7	-31333.0	7912.6	-1012.6	-5815.1	-32688.9	-102109.4	0.03	0.06	266.4	20051.0	44062.1	97094.2	64113.2	0.12 TF Ver.
1	8	-28183.6	7114.7	604.1	5858.4	32268.2	100129.4	0.02	0.06	266.4	19305.4	44062.1	97094.2	63367.5	0.11 TF Ver.
1	9	-31147.4	6838.4	-1046.1	5368.4	-32664.6	101995.3	0.03	0.05	266.4	20007.9	44062.1	97094.2	64070.0	0.11 TF Ver.
1	10	-29622.7	24931.6	204.9	-18552.1	32462.5	-101042.7	0.01	0.18	266.4	19649.6	44062.1	97094.2	63711.8	0.39 TF Ver.
1	11	-30390.3	24970.7	-198.7	-18664.0	-32564.7	-101522.5	0.01	0.18	266.4	19830.8	44062.1	97094.2	63892.9	0.39 TF Ver.
1	12	-28802.1	24277.3	193.2	18790.8	32351.9	100522.4	0.01	0.19	266.4	19454.1	44062.1	97094.2	63516.2	0.38 TF Ver.
1	13	-29721.7	24135.7	-308.1	18585.6	-32475.7	101104.5	0.01	0.18	266.4	19673.1	44062.1	97094.2	63735.2	0.38 TF Ver.
1	14	-28417.9	7665.5	608.8	-5351.1	32299.9	-100278.3	0.02	0.05	266.4	19361.9	44062.1	97094.2	63424.0	0.12 TF Ver.
1	15	-31333.0	7912.6	-1012.6	-5815.1	-32688.9	-102109.4	0.03	0.06	266.4	20051.0	44062.1	97094.2	64113.2	0.12 TF Ver.
1	16	-28183.6	7114.7	604.1	5858.4	32268.2	100129.4	0.02	0.06	266.4	19305.4	44062.1	97094.2	63367.5	0.11 TF Ver.
1	17	-31147.4	6838.4	-1046.1	5368.4	-32664.6	101995.3	0.03	0.05	266.4	20007.9	44062.1	97094.2	64070.0	0.11 TF Ver.

x	NC	N	V	My	Mz	MyRes	MzRes	IRMy	IRMz	zona compr.	VRdM	VRdf	Vtc	VRd	IRV
		kg	kg	kgm	kgm	kgm	kgm			cm	kg	kg	kg	kg	
1/2	1	-45078.1	467.2	36.5	424.9	24231.3	80186.3	----	----	266.4	18137.0	29374.8	64729.5	47511.7	0.01 TF Ver.
1/2	2	-32646.5	25673.8	241.4	-958.4	32859.5	-102916.9	----	----	266.4	20353.9	44062.1	97094.2	64416.1	0.40 TF Ver.
1/2	3	-33413.1	25708.0	-295.1	-1049.4	-32958.2	-103380.7	----	----	266.4	20528.7	44062.1	97094.2	64590.8	0.40 TF Ver.
1/2	4	-31826.1	25019.5	245.5	1660.8	32753.4	102412.6	----	----	266.4	20165.3	44062.1	97094.2	64227.4	0.39 TF Ver.
1/2	5	-32749.0	24877.9	-457.7	1556.7	-32872.7	102979.3	----	----	266.4	20377.4	44062.1	97094.2	64439.5	0.39 TF Ver.
1/2	6	-31440.4	7887.7	761.4	60.7	32702.9	102175.4	----	----	266.4	20076.0	44062.1	97094.2	64138.1	0.12 TF Ver.
1/2	7	-34350.6	8133.8	-1482.5	-238.5	-33076.8	-103946.8	----	----	266.4	20740.3	44062.1	97094.2	64802.5	0.13 TF Ver.
1/2	8	-31206.0	7336.9	761.8	845.6	32672.2	102031.3	----	----	266.4	20021.5	44062.1	97094.2	64083.6	0.11 TF Ver.
1/2	9	-34165.0	7060.5	-1532.0	537.7	-33053.3	103835.2	----	----	266.4	20698.6	44062.1	97094.2	64760.8	0.11 TF Ver.
1/2	10	-32646.5	25673.8	241.4	-958.4	32859.5	-102916.9	----	----	266.4	20353.9	44062.1	97094.2	64416.1	0.40 TF Ver.
1/2	11	-33413.1	25708.0	-295.1	-1049.4	-32958.2	-103380.7	----	----	266.4	20528.7	44062.1	97094.2	64590.8	0.40 TF Ver.
1/2	12	-31826.1	25019.5	245.5	1660.8	32753.4	102412.6	----	----	266.4	20165.3	44062.1	97094.2	64227.4	0.39 TF Ver.
1/2	13	-32749.0	24877.9	-457.7	1556.7	-32872.7	102979.3	----	----	266.4	20377.4	44062.1	97094.2	64439.5	0.39 TF Ver.
1/2	14	-31440.4	7887.7	761.4	60.7	32702.9	102175.4	----	----	266.4	20076.0	44062.1	97094.2	64138.1	0.12 TF Ver.
1/2	15	-34350.6	8133.8	-1482.5	-238.5	-33076.8	-103946.8	----	----	266.4	20740.3	44062.1	97094.2	64802.5	0.13 TF Ver.
1/2	16	-31206.0	7336.9	761.8	845.6	32672.2	102031.3	----	----	266.4	20021.5	44062.1	97094.2	64083.6	0.11 TF Ver.
1/2	17	-34165.0	7060.5	-1532.0	537.7	-33053.3	103835.2	----	----	266.4	20698.6	44062.1	97094.2	64760.8	0.11 TF Ver.
x	NC	N	V	My	Mz	MyRes	MzRes	IRMy	IRMz	zona compr.	VRdM	VRdf	Vtc	VRd	IRV
		kg	kg	kgm	kgm	kgm	kgm			cm	kg	kg	kg	kg	
0	1	-49003.9	467.1	32.7	745.8	23948.2	81614.6	----	----	266.4	18797.3	29374.8	64729.5	48172.0	0.01 TF Ver.
0	2	-35663.1	26411.1	125.1	17142.5	33240.7	104726.5	0.00	0.16	255.4	21033.1	44062.1	97094.2	65095.2	0.41 TF Ver.
0	3	-36432.6	26450.2	-238.8	17079.1	-33335.5	105178.0	0.01	0.16	259.0	21202.9	44062.1	97094.2	65265.0	0.41 TF Ver.
0	4	-34840.8	25756.8	144.9	-15995.1	33138.5	-104238.0	0.00	0.15	261.9	20850.2	44062.1	97094.2	64912.3	0.40 TF Ver.
0	5	-35766.1	25615.2	-454.4	-15997.3	-33253.5	-104787.7	0.01	0.15	265.5	21055.9	44062.1	97094.2	65118.0	0.39 TF Ver.
0	6	-34458.0	8109.4	404.5	5615.5	33090.3	104010.6	0.01	0.05	266.4	20764.5	44062.1	97094.2	64826.6	0.13 TF Ver.
0	7	-37377.9	8356.4	-1443.0	5494.1	-33450.9	105729.8	0.04	0.05	266.4	21409.6	44062.1	97094.2	65471.7	0.13 TF Ver.
0	8	-34233.4	7559.1	409.8	-4340.7	33061.9	-103876.5	0.01	0.04	266.4	20714.0	44062.1	97094.2	64776.1	0.12 TF Ver.
0	9	-37187.5	7282.7	-1508.4	-4449.1	-33427.7	-105618.6	0.05	0.04	266.4	21368.1	44062.1	97094.2	65430.2	0.11 TF Ver.
0	10	-35663.1	26411.1	125.1	17142.5	33240.7	104726.5	0.00	0.16	255.4	21033.1	44062.1	97094.2	65095.2	0.41 TF Ver.
0	11	-36432.6	26450.2	-238.8	17079.1	-33335.5	105178.0	0.01	0.16	259.0	21202.9	44062.1	97094.2	65265.0	0.41 TF Ver.
0	12	-34840.8	25756.8	144.9	-15995.1	33138.5	-104238.0	0.00	0.15	261.9	20850.2	44062.1	97094.2	64912.3	0.40 TF Ver.
0	13	-35766.1	25615.2	-454.4	-15997.3	-33253.5	-104787.7	0.01	0.15	265.5	21055.9	44062.1	97094.2	65118.0	0.39 TF Ver.
0	14	-34458.0	8109.4	404.5	5615.5	33090.3	104010.6	0.01	0.05	266.4	20764.5	44062.1	97094.2	64826.6	0.13 TF Ver.
0	15	-37377.9	8356.4	-1443.0	5494.1	-33450.9	105729.8	0.04	0.05	266.4	21409.6	44062.1	97094.2	65471.7	0.13 TF Ver.
0	16	-34233.4	7559.1	409.8	-4340.7	33061.9	-103876.5	0.01	0.04	266.4	20714.0	44062.1	97094.2	64776.1	0.12 TF Ver.
0	17	-37187.5	7282.7	-1508.4	-4449.1	-33427.7	-105618.6	0.05	0.04	266.4	21368.1	44062.1	97094.2	65430.2	0.11 TF Ver.

## 4 Indice delle figure

Figura 1 Foto prospetto principale (livello strada) e modello dello stato di fatto.....	2
Figura 2 Foto aerea realizzata con drone (alto). .....	2
Figura 3 Studio di fattibilità a cura dell'Ing. Idro Batignani. ....	3
Figura 4 Prospetto del progetto definitivo a cura dell'Ing. Idro Batignani. ....	3
Figura 5 Foto aerea realizzata con drone.....	4
Figura 6 Pianta piano terra (livello stradale). .....	4
Figura 7 Intradosso del solaio di copertura in travi in c.a. e tavelloni.....	5
Figura 8 Intradosso solaio di copertura (tiranti in acciaio).....	5
Figura 9 Muri di sottotetto.....	6
Figura 10 Atrio piano primo, visibile l'intradosso del solaio di sottotetto. ....	7
Figura 11 Materiali rappresentati nel modello strutturale di riferimento per lo studio dello Stato di Fatto. ....	7
Figura 12 Spessore elementi guscio nel modello strutturale di riferimento per lo studio dello Stato di Fatto.....	8
Figura 13 Carico che modella la presenza di un rivestimento della facciata.....	8
Figura 14 Fasi di definizione del modello di calcolo.....	9
Figura 15 Muro controterra primo livello sotto strada (in giallo). ....	10
Figura 16 Muro controterra secondo livello sotto strada (in giallo).....	10
Figura 17 Nel modello: elementi resistenti a sola compressione (lato sinistro e strada). ....	11
Figura 18 Dettaglio vincolo con elemento resistente a sola compressione. ....	11
Figura 19 Schema riferimento per la definizione dei maschi murari con fasce di piano rigide. ....	13
Figura 20 Maschi murari definiti nel prospetto principale.....	13
Figura 21 Circolare 2019 Tab. C8.5.I.....	14
Figura 22 Circolare 2019 Tab. C8.5.II.....	14
Figura 23 In verde i maschi murari verificati, in rosso non verificati (vista fronte). ....	15
Figura 24 In verde i maschi murari verificati, in rosso non verificati (vista retro). ....	15
Figura 25 Deformata relativa alla combinazione di carico 2: Sisma 100%+X 30%+Y Torsione: Antioraria. ....	16
Figura 26 Piano rigido ala sinistra. ....	18
Figura 27 Piano rigido corpo frontale. ....	18
Figura 28 Piano rigido ala destra.....	18
Figura 29 Vista generale del modello dello stato di progetto. ....	19
Figura 30 Vista del modello con zoom sul corridoio dell'ala sinistra ove sono modellati i controventi.....	20
Figura 31 Vista del modello con zoom sul corridoio del corpo frontale ove sono modellati i controventi.....	21
Figura 32 Strati che compongono il sistema FRCCM - fonte Kerakoll.....	21
Figura 33 Maschio murario n. 121 definito nella parete del prospetto principale (in blu). ....	23
Figura 34 Maschio murario: dimensionamento del sistema di rinforzo FRCCM. ....	26