



Ricerca di Sistema elettrico

Tamponature con accumulo elettrico integrato: studio prototipale

M. Artioli, S. Beozzo, A. Marzo, C. Tripepi

Report RdS/PTR2020/134

TAMPONATURE CON ACCUMULO ELETTRICO INTEGRATO: STUDIO PROTOTIPALE

M. Artioli, S. Beozzo, A. Marzo, C. Tripepi (ENEA)

Aprile 2021

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico (oggi Ministero della Transizione Ecologica) - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2019-2021 - II annualità

Obiettivo: *N. 1 - Tecnologie*

Progetto: *1.5 - Tecnologie, tecniche e materiali per l'efficienza energetica ed il risparmio di energia negli usi finali elettrici degli edifici nuovi ed esistenti*

Work package: *3 - Componenti e impianti innovativi per incrementare l'efficienza energetica e l'uso delle fonti rinnovabili negli edifici*

Linea di attività: *LA3.17 - Tamponature con accumulo elettrico integrato: costruzione di un prototipo*

Responsabile del Progetto: Giovanni Puglisi

Responsabile del Work package: Biagio Di Pietra

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E DEI RISULTATI	5
2.1 SIMULAZIONI STRUTTURALI	6
2.1.1 <i>Geometria del sistema e materiali</i>	6
2.1.2 <i>Fasi di assemblaggio del modulo-mattone</i>	9
2.1.3 <i>Analisi FEM della parete di tamponatura</i>	14
2.1.4 <i>Progetto concettuale di posa in opera della parete di tamponatura</i>	32
2.2 SIMULAZIONE TERMO-IGROMETRICA	37
2.2.1 <i>Definizione delle condizioni al contorno</i>	39
2.2.2 <i>Modelli analizzati</i>	40
2.2.3 <i>Confronto tra i risultati</i>	41
2.3 COSTRUZIONE (PRE-)PROTOTIPO	43
2.3.1 <i>Modello in scala ridotta da stampa 3D</i>	43
2.3.2 <i>Modello in scala reale</i>	46
3 CONCLUSIONI.....	49
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	49

Sommario

L'utilizzo di energia elettrica da fonte rinnovabile presenta spesso il problema che tale fonte sia disponibile quando non c'è necessità di utilizzo, e viceversa. Partendo da questa esigenza, l'ENEA ha sviluppato, e brevettato, l'idea di un modulo-mattone, con cui realizzare una parete di tamponatura, che includa al suo interno un elemento di accumulo per l'energia elettrica a film sottile.

Nel seguito si riferisce delle attività orientate a creare un modulo-mattone, con cui realizzare una parete di tamponatura, che includa al suo interno tale elemento di accumulo.

Sono state svolte approfondite attività di simulazione numerica con l'obiettivo di studiare il comportamento meccanico e termo-igrometrico di una parete di tamponatura interamente realizzata in moduli di mattone a condensatore. Le configurazioni analizzate sotto l'effetto di carichi sismici, mediante software agli elementi finiti, sono state quattro al fine di indagare la fattibilità strutturale del sistema al variare di due parametri: lo spessore e il tipo di materiale utilizzato per i pannelli di rivestimento.

Sono stati realizzati anche un pre-prototipo in scala ridotta mediante stampa 3D e un modello in scala reale in materiale ligneo. Sebbene questi prototipi non siano funzionanti (perché non realizzati con i materiali di progetto) risultano estremamente utili per delle valutazioni iniziali in merito alla geometria e alla costruibilità del singolo mattone e della componibilità a formare una parete.

1 Introduzione

L'utilizzo di energia elettrica da fonte rinnovabile presenta spesso il problema che tale fonte sia disponibile quando non c'è necessità di utilizzo, e viceversa. Una soluzione parziale, ma impossibile nel caso di funzionamento ad isola, può essere riversare in rete tale energia. Un'altra soluzione consiste nello stoccaggio del surplus di energia tramite riconversione o dispositivi di accumulo.

Partendo da questa esigenza, l'ENEA ha sviluppato, e brevettato, l'idea di un modulo-mattone, con cui realizzare una parete di tamponatura, che includa al suo interno un elemento di accumulo per l'energia elettrica a film sottile [1]. Le tamponature assolvono principalmente le funzioni di tenuta agli agenti atmosferici (vento, neve e pioggia) e di isolamento termico e acustico e devono risultare impermeabili ad aria ed acqua, rimanendo nel contempo traspiranti e garantendo una adeguata resistenza al fuoco. Benché non si tratti di elementi strutturali, esse devono comunque garantire funzione autoportante, rispetto ai carichi statici, e non essere espulse o causare danneggiamenti in caso di eventi sismici.

Dando seguito all'idea brevettuale, nel corso della Prima Annualità del presente progetto [2], si era verificato numericamente che, rispetto ai carichi verticali, i profili metallici del modulo-mattone presentassero un livello di sollecitazione lontano dalla crisi del materiale in entrambi i casi esaminati (pannelli esterni in fibra di Legno e pannelli esterni in fibra di Canapa. Per quanto riguarda il comportamento termo-igrometrico, alla luce delle simulazioni eseguite, si era constatato come le tipologie di parete analizzate avessero prestazioni equivalenti rinviando la scelta dei materiali ad altre esigenze prestazionali (per esempio la resistenza meccanica, la leggerezza, la facilità realizzativa e di messa in opera). Nel corso della Seconda Annualità, come dettagliato al paragrafo 2, si è passati dallo studio numerico del modulo-mattone, soggetto a carichi verticali, allo studio numerico di un'intera parete di tamponatura soggetta a carichi sismici ed è stato realizzato un pre-prototipo in legno in scala 1:1 del modulo-mattone.

L'aspetto normativo non ha evidenziato alcuna criticità che possa ostacolare in principio la progettazione di un prototipo. Qualora il manufatto voglia essere impiegato in applicazioni reali, dovrà essere tale da consentire al progettista di rispettare la normativa vigente nel suo complesso.

2 Descrizione delle attività svolte e dei risultati

Le attività dettagliate nel presente rapporto sono state orientate a creare un modulo-mattone, con cui realizzare una parete di tamponatura, che includa al suo interno un elemento di accumulo per l'energia elettrica a film sottile.

Sono state svolte approfondite attività di simulazione numerica con l'obiettivo di studiare il comportamento meccanico e termo-igrometrico di una parete di tamponatura interamente realizzata in moduli di mattone condensatore. Le configurazioni analizzate sotto l'effetto di carichi sismici, mediante software agli elementi finiti, sono state quattro al fine di indagare la fattibilità strutturale del sistema al variare di due parametri: lo spessore e il tipo di materiale utilizzato per i pannelli di rivestimento.

Sebbene il sistema di connessione della tamponatura al telaio dell'edificio non sia oggetto di questa attività di ricerca, in questa fase di studio è stata anche formulata una prima ipotesi concettuale delle fasi di posa in opera e di collegamento della parete agli elementi strutturali (travi e pilastri).

La realizzazione prototipale è avvenuta con un modello in scala 1:2 mediante stampa 3D e un modello in scala reale in materiale ligneo. Sebbene questi prototipi non siano funzionanti (perché non realizzati con i materiali di progetto) risultano estremamente utili per delle valutazioni iniziali in merito alla geometria e alla costruibilità del singolo mattone e della componibilità a formare una parete.

2.1 Simulazioni strutturali

2.1.1 Geometria del sistema e materiali

Il mattone oggetto di sviluppo, come già evidenziato nel rapporto delle attività per il 2019, è costituito da 3 tipologie di elementi:

- 1 condensatore;
- 2 maglie in materiale metallico;
- 6 pannelli di rivestimento in materiale termoisolante.

In base alle indagini di mercato sulla tipologia di condensatore da utilizzare, allo studio della connessione tra le parti e con l'obiettivo di ottimizzare il consumo dei materiali, il modello è stato ulteriormente affinato e sono state svolte simulazioni numeriche più approfondite.

In Figura 1 è descritto il nuovo schema del sistema completo e le sue singole parti. Si evidenzia la modifica apportata alle maglie rispetto alla configurazione 2019. In particolare le sezioni in materiale metallico sono state sensibilmente ridotte, preferendo una sezione mista in materiale metallico e materiale di riempimento e/o alloggiamento a ridotto peso specifico (per esempio in plastica) e di facile connessione al rivestimento esterno.

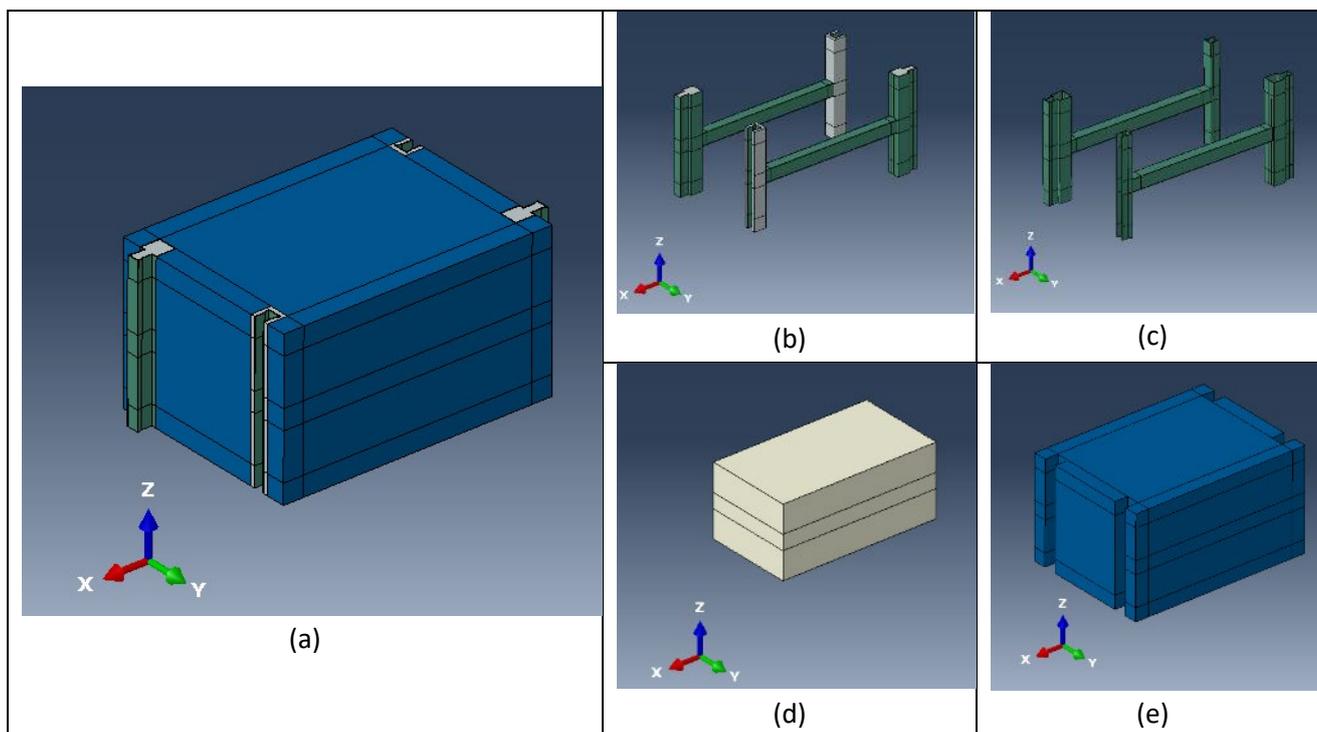


Figura 1: (a) mattone completo; (b) maglie in materiale misto metallico e plastico; (c) dettaglio delle sole parti metalliche costituenti le maglie; (d) condensatore; (e) rivestimento.

Per la connessione tra le parti è stata fatta l'ipotesi di vincolo fisso e continuo, che intende modellare una saldatura tra gli elementi metallici e un incollaggio tra: (i) condensatore e elementi metallici orizzontali; (ii) tra materiale di riempimento/alloggiamento e elementi metallici (iii); tra le componenti dell'involucro esterno; (iv) tra componenti involucro esterno e elementi metallici.

Lo schema di funzionamento meccanico prevede che gli elementi metallici siano preposti al trasferimento dei carichi al telaio strutturale. In particolare, il condensatore scarica il suo peso sui due correnti orizzontali, realizzati con una sezione metallica cava, i quali a loro volta trasferiscono il carico ai correnti verticali. I pannelli di rivestimento (perimetrali, inferiore e superiore) trasferiscono il loro carico agli elementi resistenti verticali.

In Figura 2 sono riportate alcune sezioni rappresentative del mattone condensatore.

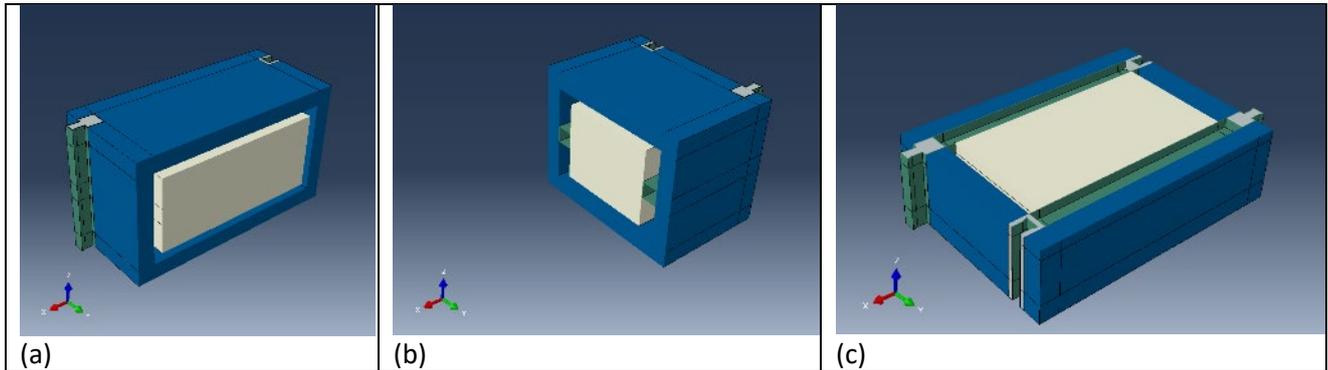


Figura 2: (a) Sezione longitudinale 1; (b) Sezione trasversale 2; (c) Sezione orizzontale.

Come premesso, al fine di studiare il funzionamento del sistema al variare della tipologia di rivestimento, sono stati indagati due spessori (20mm e 30mm) e due tipologie di materiale (legno e canapa). Al variare degli spessori: (i) l'ingombro del singolo mattone e le dimensioni dei singoli pannelli (denotati come Tipo F, Tipo G e Tipo H) del rivestimento cambieranno come mostrato in Tabella 1; (ii) le sezioni trasversali dei profili metallici e degli elementi di riempimento/alloggiamento rimarranno inalterate mentre le lunghezze longitudinali dovranno essere modificate come riportato in Tabella 2; (iii) il condensatore rimarrà sempre quello descritto in Tabella 3. Al variare della tipologia di materiale cambieranno le caratteristiche meccaniche. Si precisa che tali scelte non sono vincolanti. Altri spessori e altri materiali (più idonei a specifiche applicazioni, più facilmente reperibili/lavorabili ecc.) potranno cioè essere indagati e utilizzati purché rimanga inalterato il principio di funzionamento del sistema.

Tabella 1: Geometria e caratteristiche meccaniche del rivestimento al variare dello spessore.

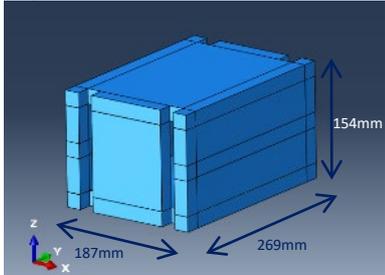
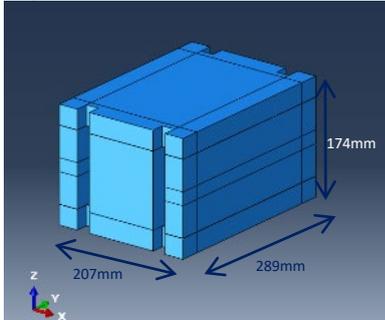
Ingombro complessivo	Pannelli necessari per il rivestimento del singolo mattoncino		
Spessore di rivestimento 20 mm 	2 Pannelli di Tipo F (269mmx114mmx20mm)	2 Pannelli di Tipo G (114mmx107mmx20mm)	2 Pannelli di Tipo H (269mmx187mmx20mm) Fori da 20mmx20mm a 20mm di distanza dal bordo
Spessore di rivestimento 30 mm 	2 Pannelli di Tipo F (289mmx114mmx30mm)	2 Pannelli di Tipo G (114mmx107mmx30mm)	2 Pannelli di Tipo H (289mmx207mmx30mm) Fori da 20mmx20mm a 30mm di distanza dal bordo
Materiale Ligneo: Densità $d=565\text{kg/m}^3$; Modulo di Young $E=1600\text{MPa}$; Resistenza caratteristica $f_t=7.2\text{MPa}$		Fibra Di Canapa: Densità $d=700\text{kg/m}^3$; Modulo di Young $E=442\text{MPa}$; Resistenza caratteristica $f_r=1.5\text{MPa}$	

Tabella 2: Geometria e caratteristiche meccaniche degli elementi a sezione mista costituenti le maglie metalliche.

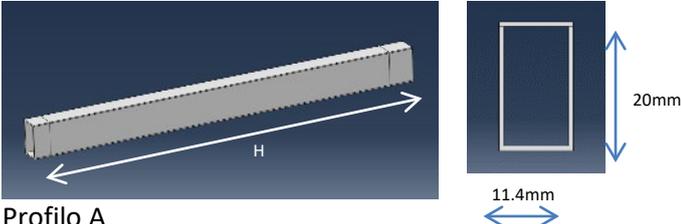
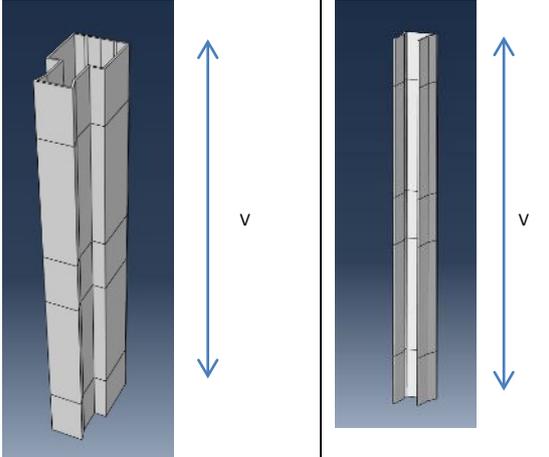
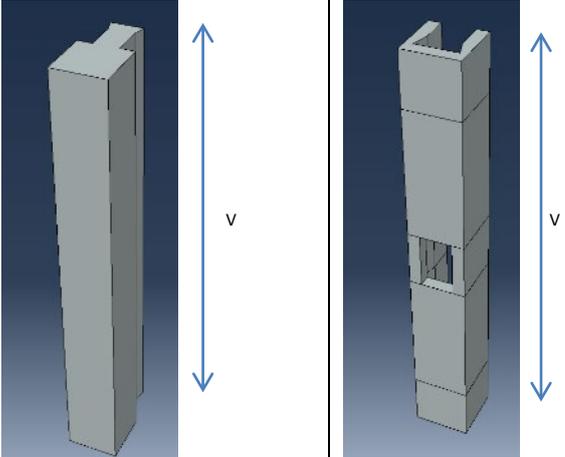
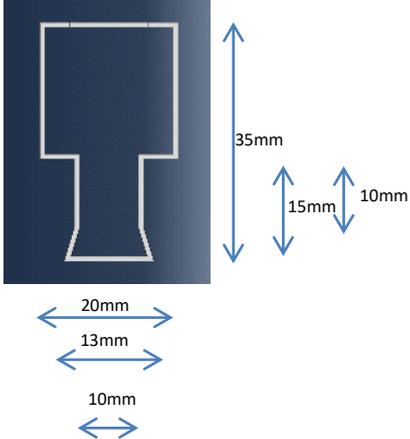
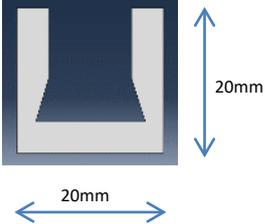
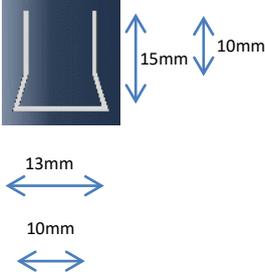
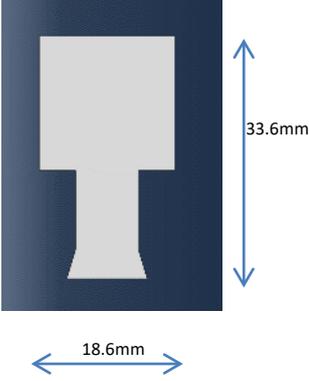
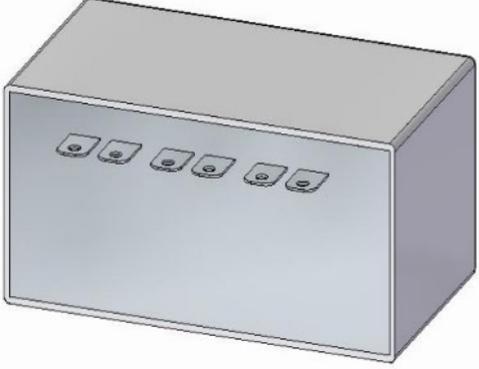
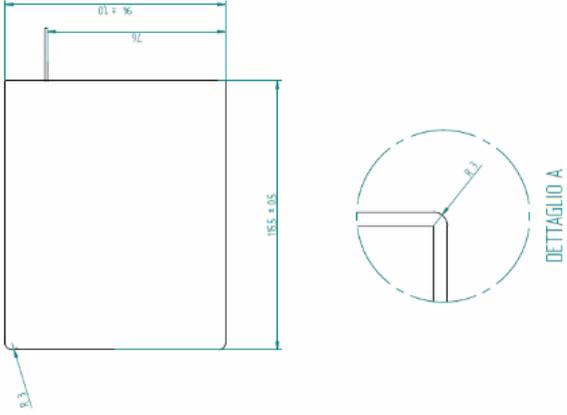
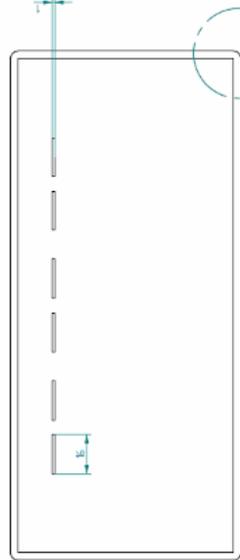
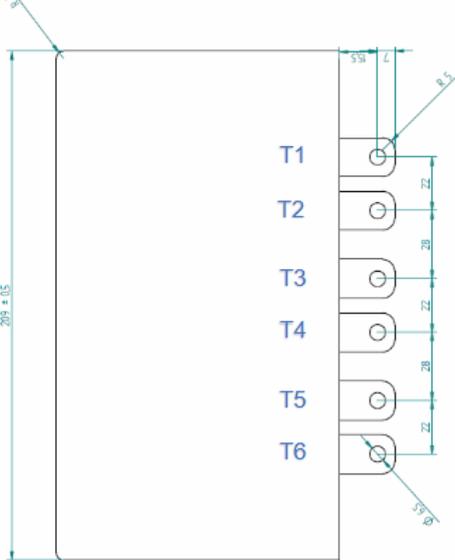
Profili metallici		Elementi di riempimento/alloggiamento	
 <p>Profilo A</p>			
			
 <p>Profilo D</p>		 <p>Elemento C</p>	
 <p>Profilo B</p>		 <p>Elemento E</p>	
<p>Spessore di rivestimento 20mm: H=233mm, V=154mm</p>			
<p>Spessore di rivestimento 30mm: H=253mm, V=174mm</p>			
<p>Profili Metallici in acciaio a spessore sottile da 0.7mm Densità $d=8000\text{kg/m}^3$ Modulo di Young $E=210000\text{MPa}$ Resistenza caratteristica $f_t=275\text{MPa}$</p>		<p>Elementi di riempimento/alloggiamento in plastica Densità $d=1280\text{kg/m}^3$ Modulo di Young $E=3200\text{MPa}$ Resistenza caratteristica $f_t=127\text{MPa}$</p>	

Tabella 3: Geometria e caratteristiche meccaniche del condensatore.

Elemento Condensatore	
	
	
<p>Condensatore modello C4EEOMX7100AASK201116 capacità 1F Densità $d=1322\text{kg/m}^3$ Modulo di Young $E=3000\text{MPa}$ Resistenza caratteristica $f_t=80\text{MPa}$</p>	

2.1.2 Fasi di assemblaggio del modulo-mattone

Si descrivono di seguito (Figura 3 - Figura 10) le fasi di assemblaggio del mattone, con riferimento a due facce opposte e parallele, denotando con apice per una e senza apice per l'altra gli elementi costituenti descritti in Tabella 1 - Tabella 3. Si noti che, in caso di maggior facilità realizzativa, l'ordine cronologico delle fasi può essere modificato.

Fase 1

Si inseriscono i profili metallici verticali B e B' facendoli scorrere da una delle due estremità (superiore o inferiore) sugli elementi di alloggiamento C e C', rispettivamente, per arrivare a incollarli a essi. C (C') avvolge e contiene B (B'). Gli elementi C e C' sono dotati di un foro necessario alla fase di montaggio successiva (Figura 3).

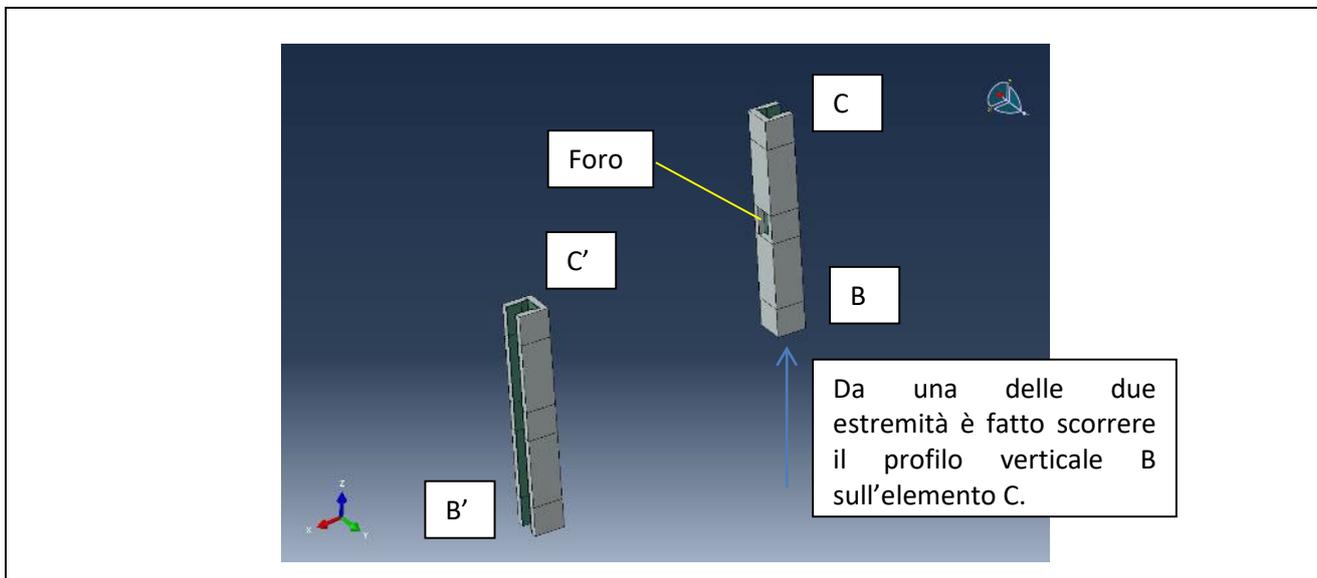


Figura 3: Fase 1, collegamento tra B e C e tra B' e C' (C elemento plastico che avvolge e contiene il corrente metallico verticale femmina B).

Fase 2

Si procede con la saldatura dei profili metallici orizzontali A e A' ai profili metallici verticali B e B', rispettivamente, sfruttando il foro presente in C e C', e si realizzano due strutture a T ruotata di 90° (Figura 4).

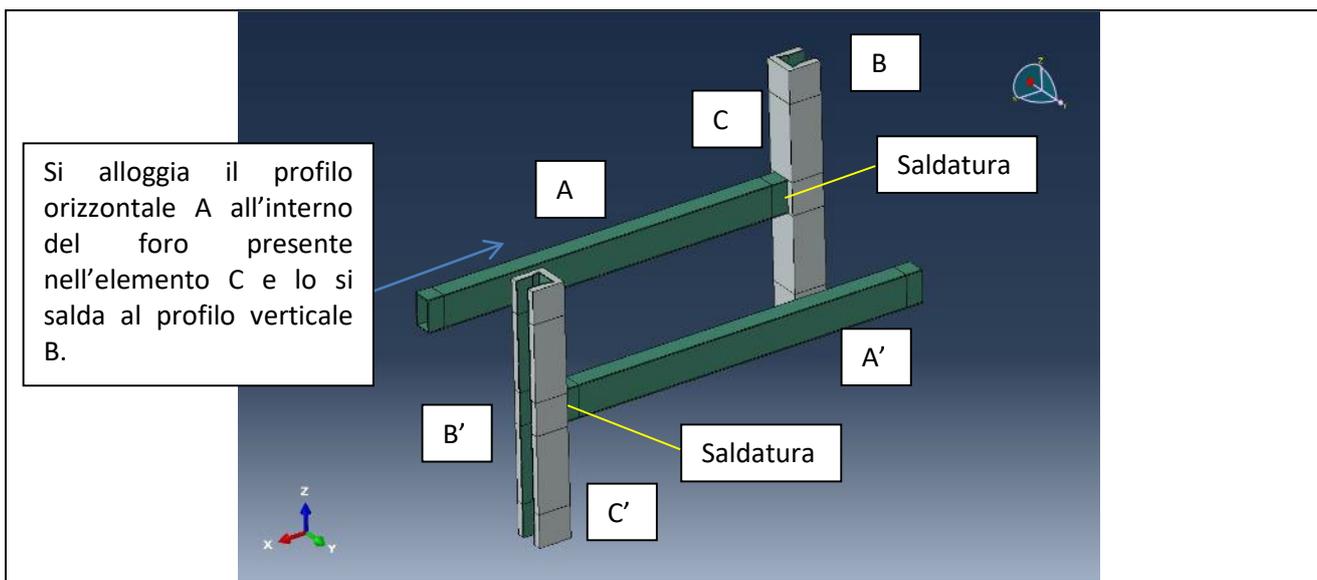


Figura 4: Fase 2, saldatura tra A e B e tra A' e B' (A corrente metallico orizzontale cavo, B corrente metallico verticale femmina).

Fase 3

Si esegue la saldatura tra il profilo metallico verticale D (D') e il profilo metallico orizzontale A (A'), in corrispondenza dell'estremità di ciascuna delle due strutture a T realizzate in Fase 2 (Figura 5).

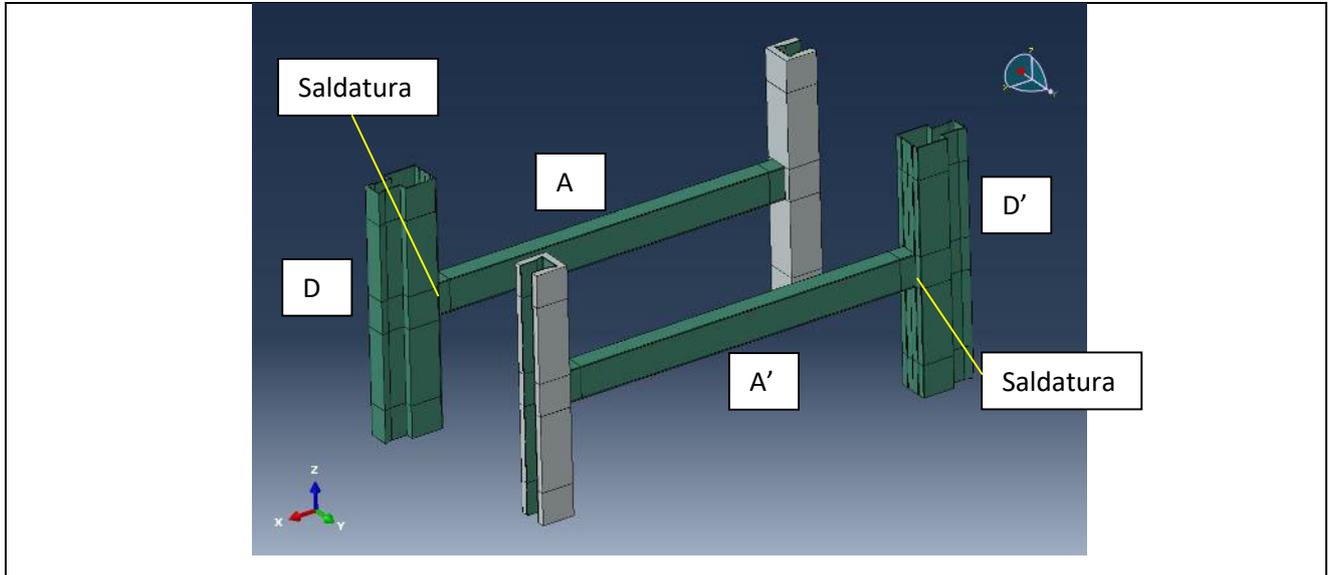


Figura 5: Fase 3, Saldatura tra D e A e tra D' e A' (A corrente metallico orizzontale cavo, D corrente metallico verticale maschio).

Fase 4

Si inseriscono gli elementi di riempimento E ed E', da una delle due estremità (superiore o inferiore), all'interno dei profili metallici D e D' rispettivamente (Figura 6).

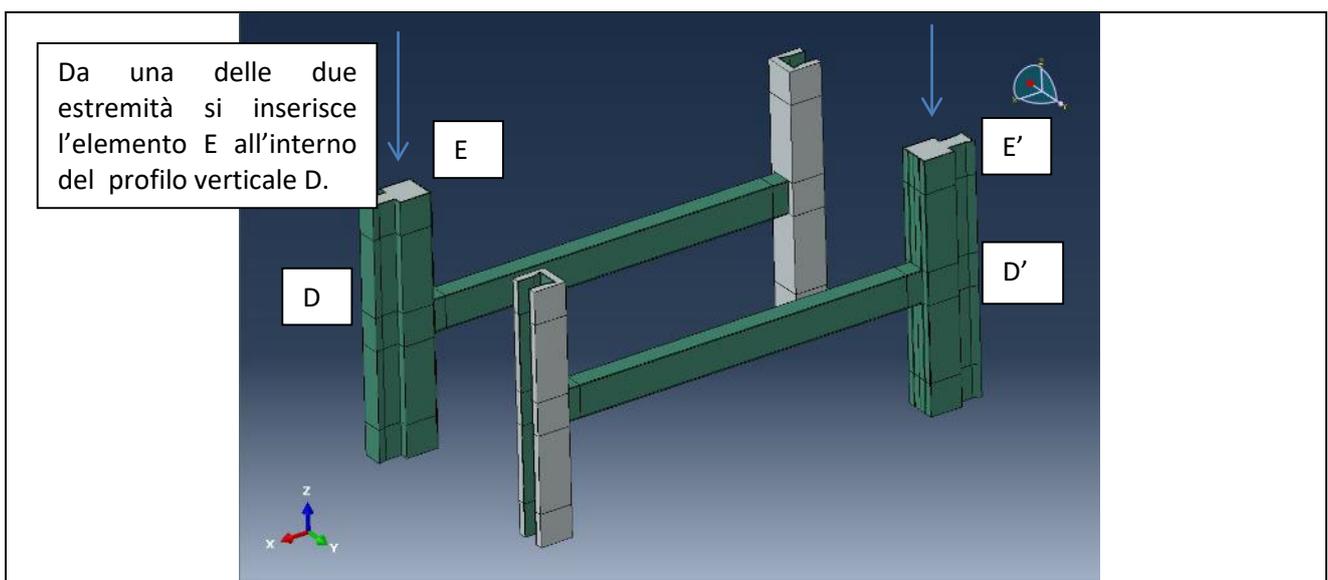


Figura 6: Fase 4, Inserimento di E all'interno di D e di E' all'interno D' (E elemento plastico di riempimento del corrente metallico verticale maschio D).

Fase 5

Si realizza l'incollaggio del condensatore lungo i suoi due lati longitudinali ai profili metallici orizzontali A e A' (Figura 7).

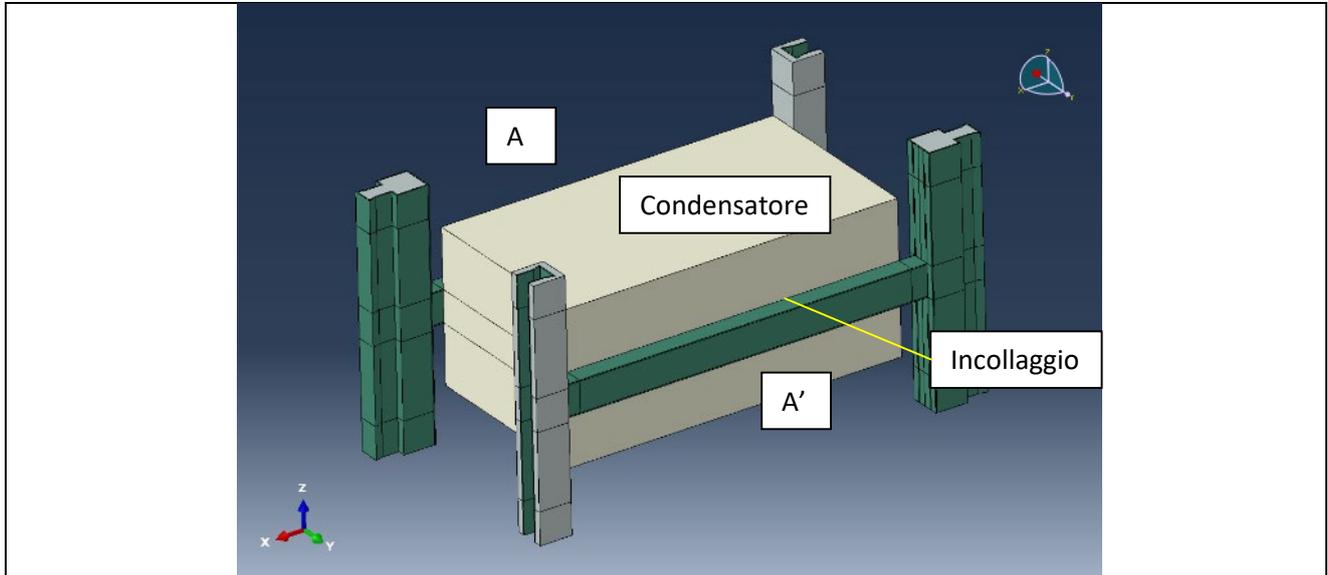


Figura 7: Fase 5, Incollaggio del condensatore ad A e A' (A corrente metallico orizzontale cavo).

Fase 6

Si avvia la realizzazione del rivestimento esterno incollando il pannello di Tipo F (F') da una parte all'elemento di alloggiamento C (C') e dall'altra al profilo metallico verticale D (D') (Figura 8).

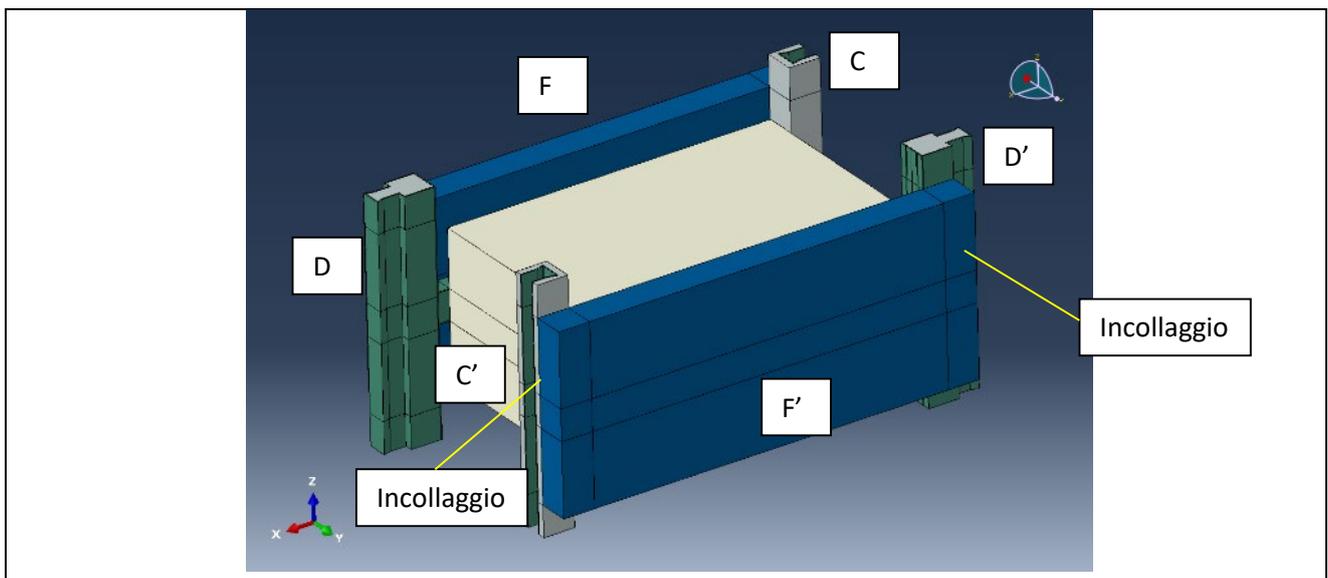


Figura 8: Fase 6, Incollaggio di F con C e D e di F' con C' e D' (C elemento plastico di alloggiamento, D corrente metallico verticale maschio, F pannello costituente il rivestimento esterno).

Fase 7

La realizzazione del rivestimento esterno procede con l'incollaggio del pannello di Tipo G (G') da una parte all'elemento di alloggiamento C (C') e dall'altra al profilo metallico verticale D (D') (Figura 9).

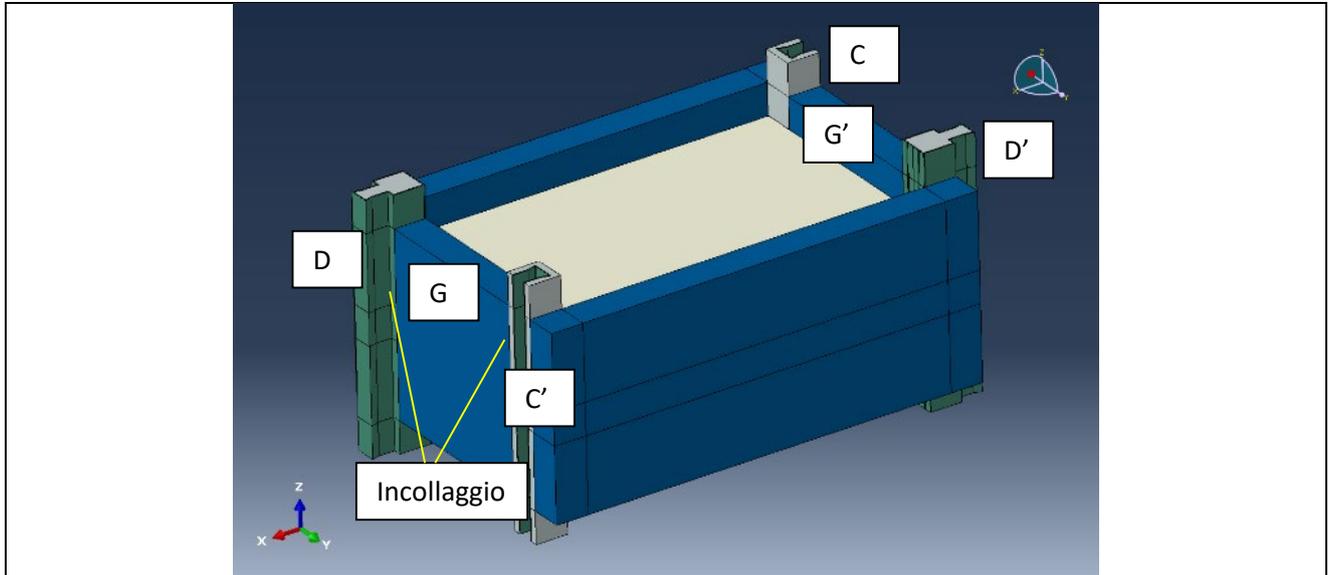


Figura 9: Fase 7, Incollaggio di G con C e D e di G' con C' e D' (C elemento plastico di alloggiamento, D corrente metallico verticale maschio, G pannello costituente il rivestimento esterno).

Fase 8

Il rivestimento esterno, e dunque il mattone condensatore, è completato incollando il pannello di Tipo H e, in maniera analoga il pannello di Tipo H', ai pannelli di Tipo F, F', G e G', agli elementi di alloggiamento C e C' e ai profili metallici verticali D e D' (Figura 10).

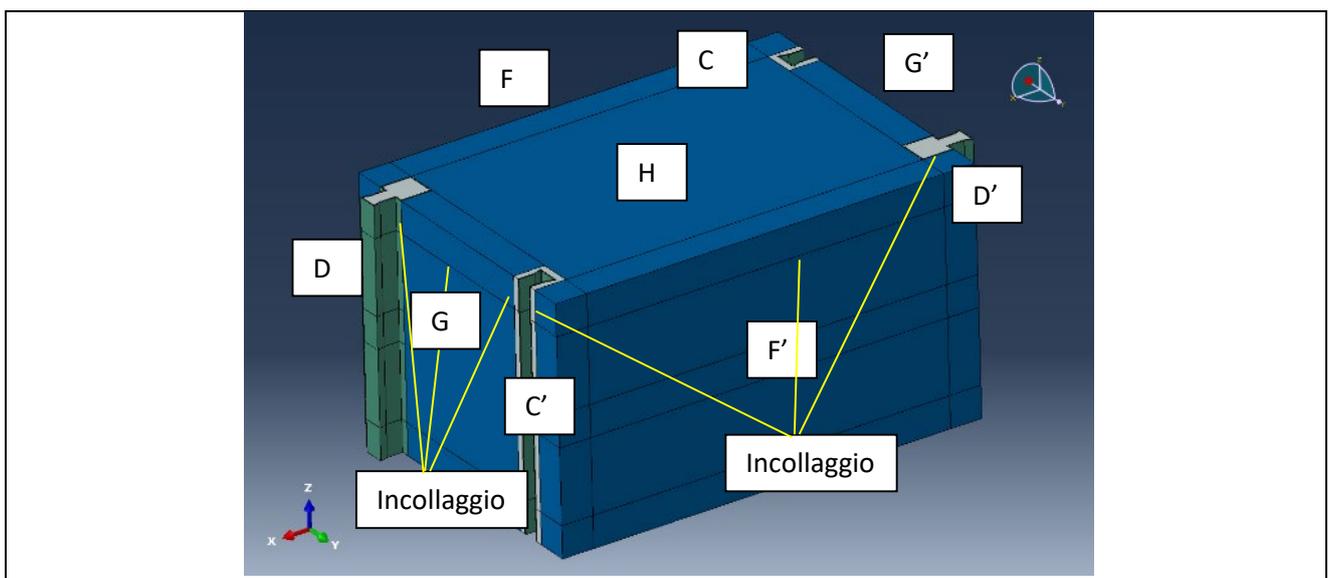


Figura 10: Fase 8, Incollaggio di H e H' con C, C', D, D', F, F', G e G' (C elemento plastico di alloggiamento, D corrente metallico verticale maschio, F G e H pannelli costituenti il rivestimento esterno).

2.1.3 Analisi FEM della parete di tamponatura

E' stato studiato, mediante analisi FEM, il comportamento meccanico di una parete realizzata per assemblaggio dei singoli mattone condensatore, ipotizzando di inserirla all'interno di un campo di telaio (di dimensioni HxL=2.6mx3.0m) e di collegarla agli elementi strutturali (travi e pilastri) lungo la sua cornice. Poiché lo studio del sistema di connessione al telaio strutturale non è oggetto di questa attività di ricerca, si ritiene opportuno e plausibile in questa fase assumere che i vincoli di collegamento al telaio siano fissi e collocati in corrispondenza delle estremità delle maglie di armatura (Figura 11). Il comportamento tendente ai vincoli fissi costituirà, infatti, l'obiettivo di progetto del sistema di connessione che sarà oggetto di approfondimenti successivi.

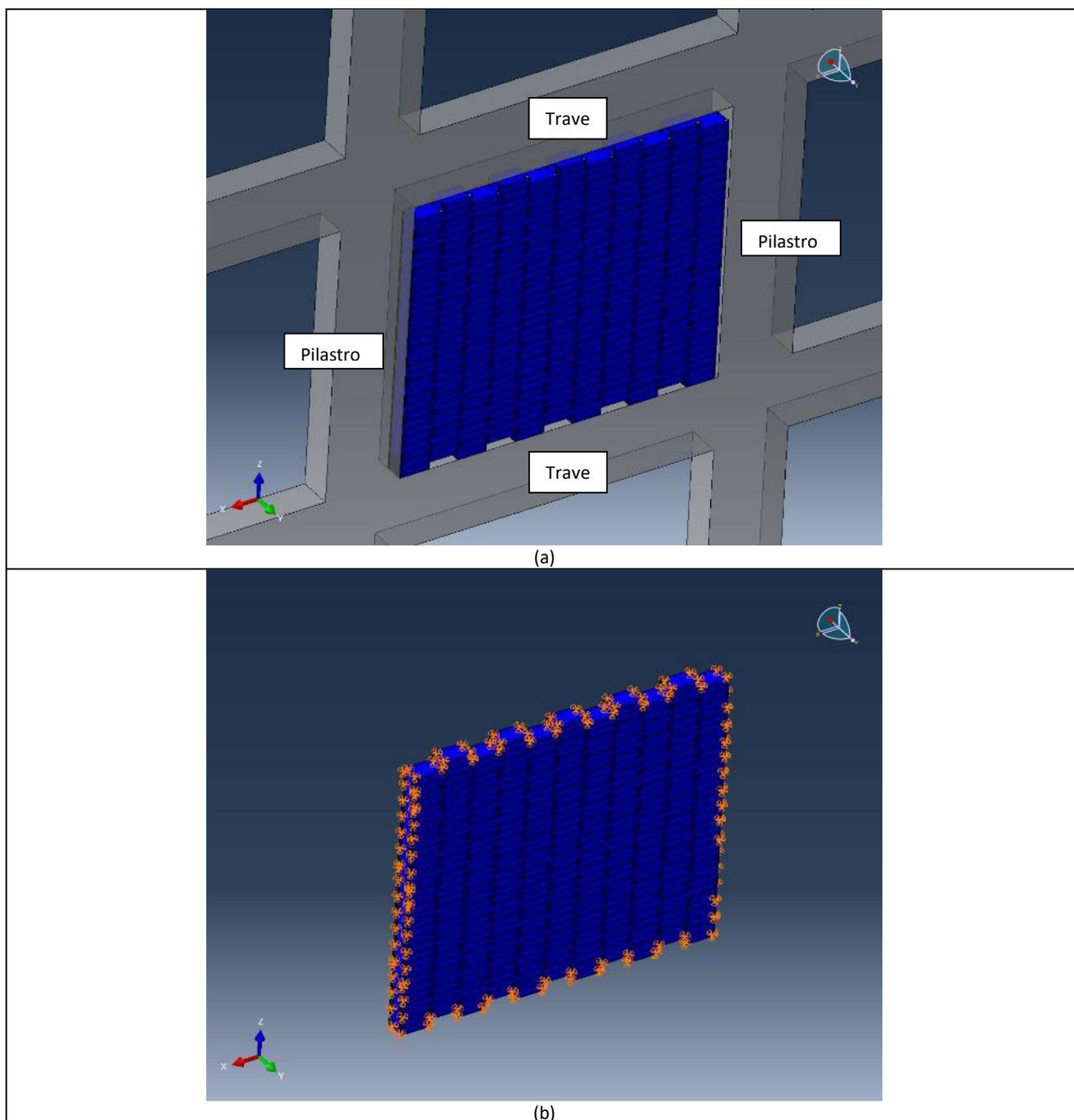


Figura 11: (a) Parete di tamponatura inserita all'interno del campo di telaio; (b) Schema di vincolo.

In Figura 12 è riportato il dettaglio di come si intende eseguire il collegamento tra mattoni adiacenti. Ogni mattone è inserito dall'alto facendo scorrere i suoi profili metallici lungo le guide rappresentate dai profili metallici dei mattoni già posizionati. Si realizza così un collegamento, a colonne sfalsate in altezza, che consente di incastrare ciascun mattone con quelli adiacenti inferiori e superiori. Per consentire di visualizzare meglio tale collegamento, in figura è stato rimosso il rivestimento esterno dei mattoni dell'ultima fila. E' inteso però che la posa in opera della parete avverrà con ciascun mattone già completo (montato come descritto in Figura 3 - Figura 10) e quindi già inclusivo del rivestimento.

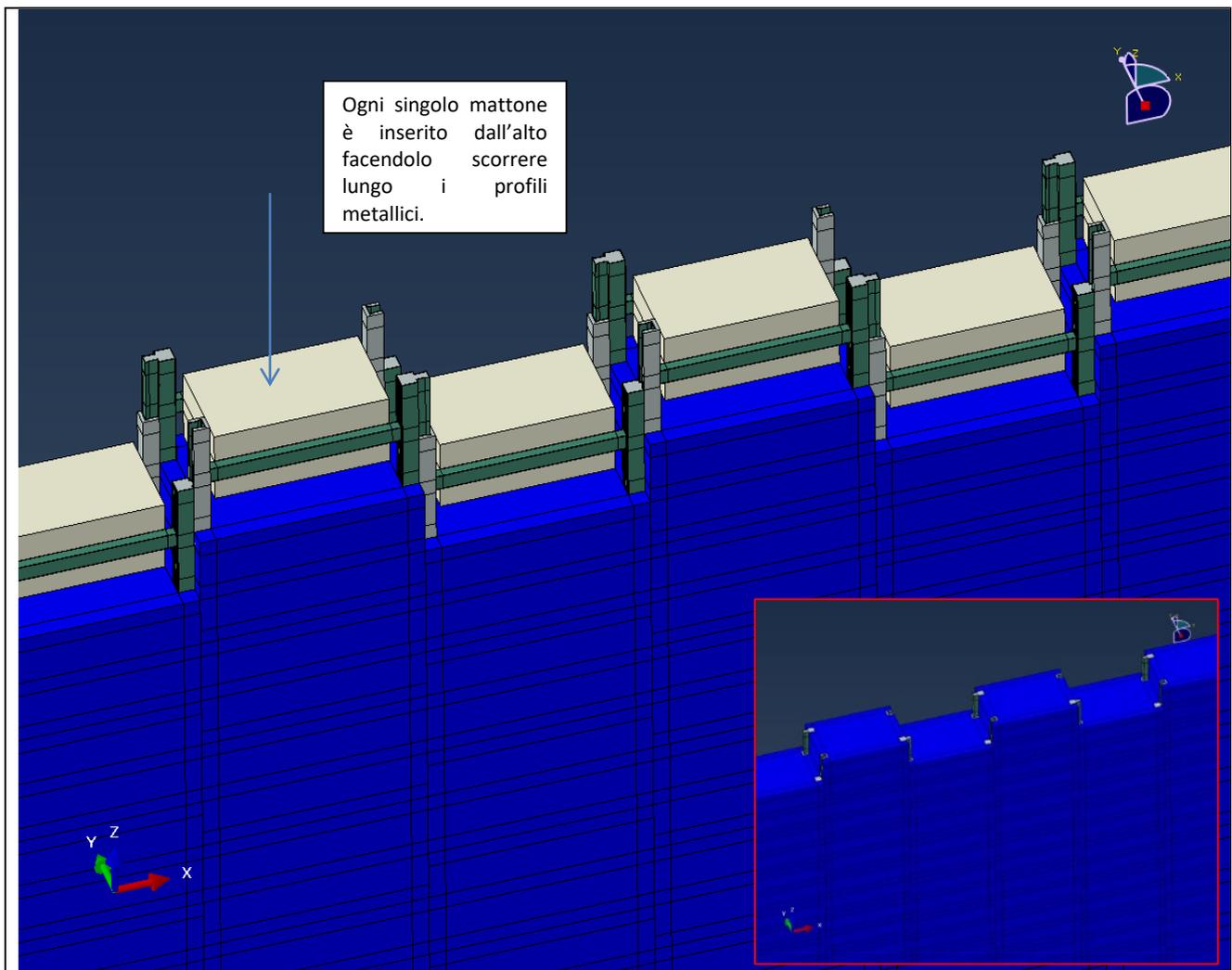


Figura 12: Modalità di collegamento tra mattoni condensatore: vista di dettaglio, rimuovendo il rivestimento esterno, e rappresentazione della posa in opera reale.

Considerati gli ingombri dei mattoni e lo spazio superiore necessario per le manovre di montaggio all'interno campo di telaio da riempire, nelle simulazioni si ipotizzano le seguenti geometrie di parete di tamponatura:

- con rivestimento esterno di spessore 2cm si realizzano 11 colonne sfalsate (6 da 16 e 5 da 15 mattoni).
- con rivestimento esterno di spessore 3cm si realizzano 10 colonne sfalsate (5 da 14 e 5 da 13 mattoni).

Tali assunzioni non sono limitanti o vincolanti rispetto al mattone oggetto di studio. Secondo le necessità specifiche, anche altre geometrie potranno essere indagate e realizzate mantenendo inalterata la logica di realizzazione, assemblaggio e funzionamento del sistema che è quanto si intende studiare in questa fase.

Analisi Modale

E' stata svolta l'analisi modale della parete considerando i due diversi spessori e le due diverse tipologie di materiale di rivestimento indicati in Tabella 1. La prima forma modale e il relativo periodo fondamentale T_a per le due configurazioni con spessore da 2cm sono riportati in Tabella 4 mentre la Tabella 5 si riferisce alle due configurazioni con spessore da 3cm.

Tabella 4: Primo modo di vibrare delle due configurazioni con spessore del rivestimento da 2cm.

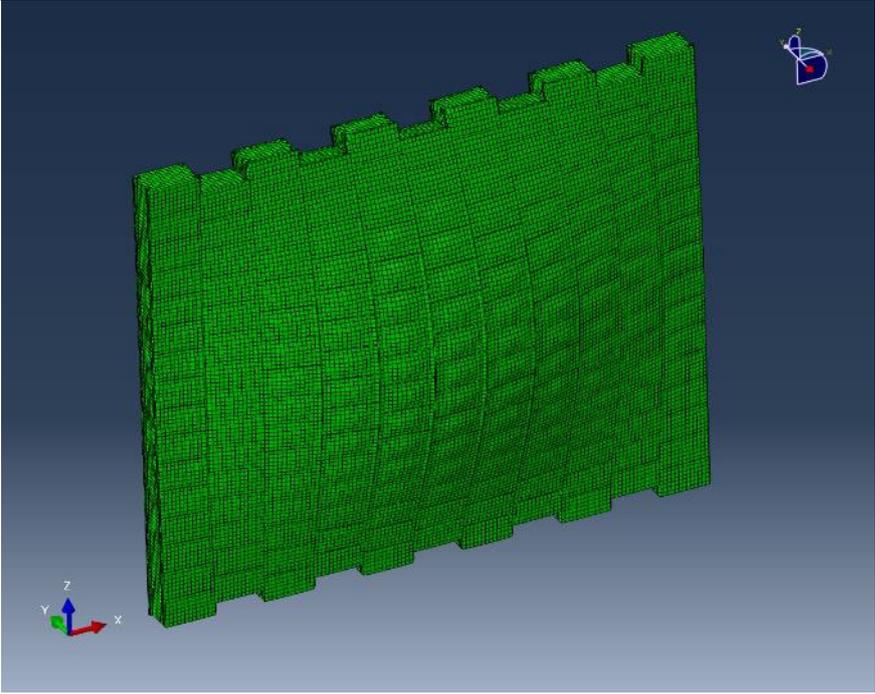
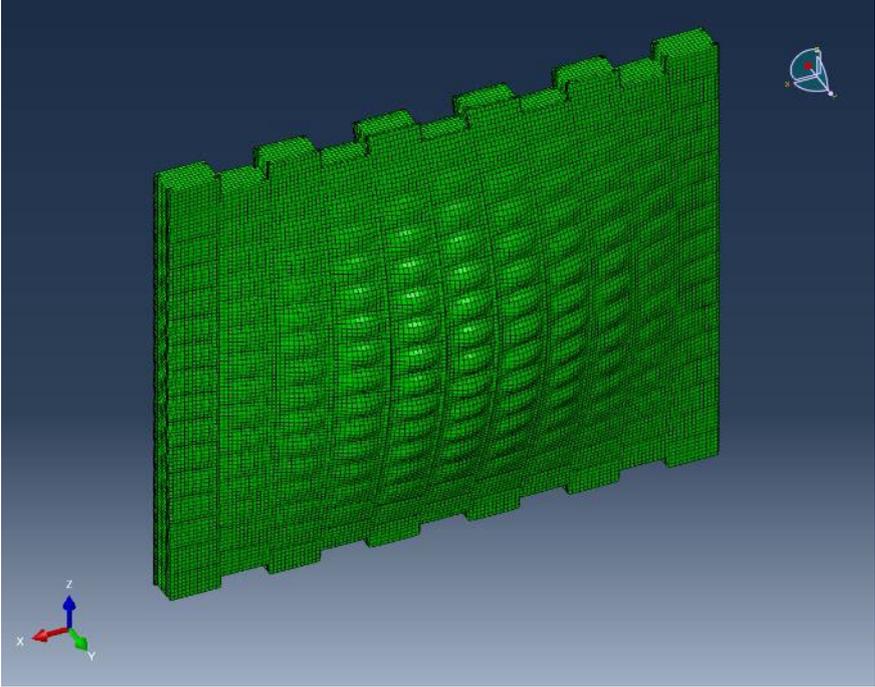
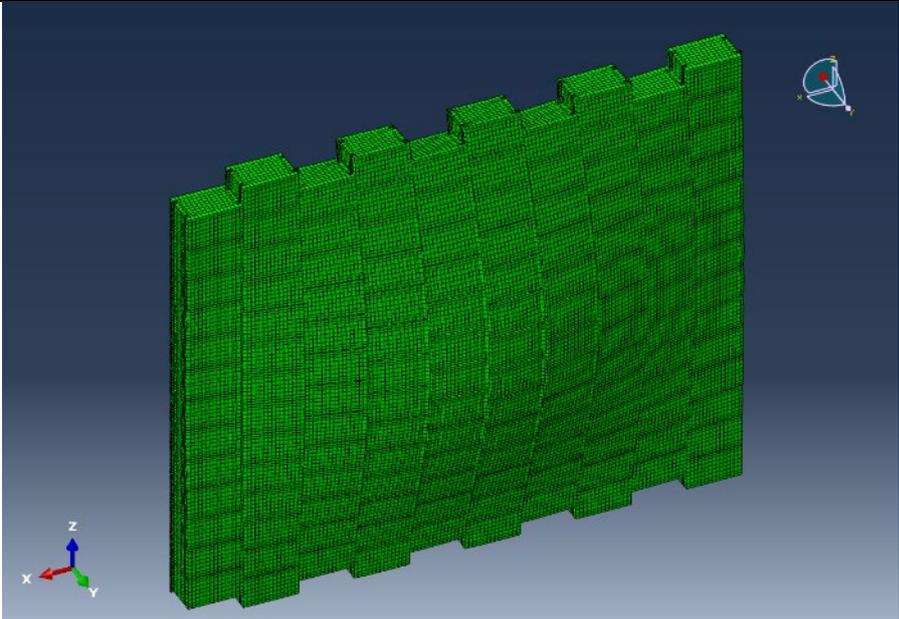
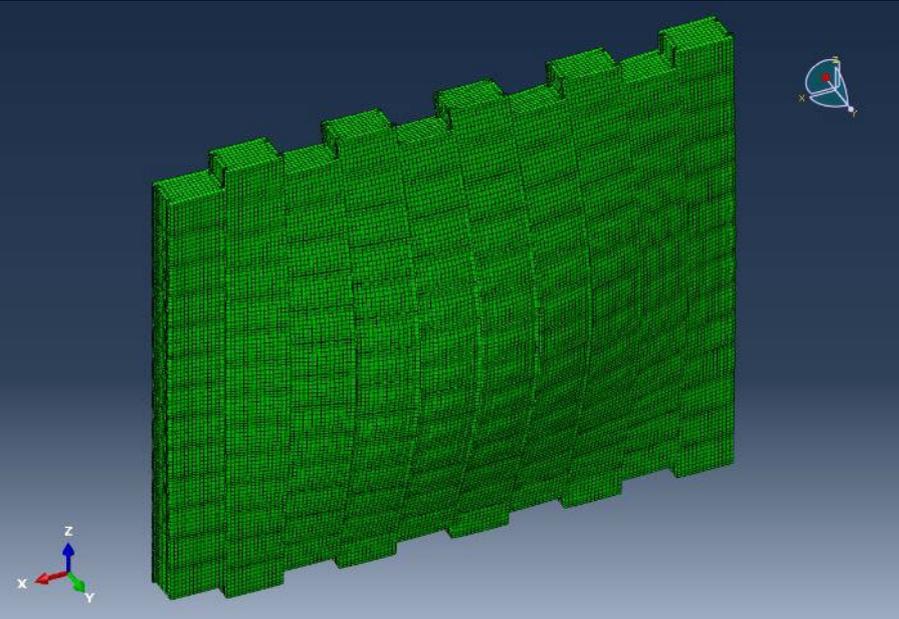
		Spessore Rivestimento 2cm	
Rivestimento in Legno			CONFIGURAZIONE 1: $T_a=0.023s$
Rivestimento in Canapa			CONFIGURAZIONE 2: $T_a=0.032s$

Tabella 5: Primo modo di vibrare delle due configurazioni con spessore del rivestimento da 3cm.

Spessore Rivestimento 3cm	
Rivestimento in Legno	 <p style="text-align: center;">CONFIGURAZIONE 3: $T_a=0.021s$</p>
Rivestimento in Canapa	 <p style="text-align: center;">CONFIGURAZIONE 4: $T_a=0.031s$</p>

Come evidente dalle figure, nelle quattro configurazioni le forme modali sono analoghe con le attese piccole differenze. Nel caso di rivestimento in canapa, avendo il materiale minor rigidità rispetto al legno, si nota infatti una maggiore deformabilità dei singoli mattoni e un periodo di vibrare più elevato rispetto alle configurazioni con rivestimento di pari spessore ma in legno. Confrontando invece il comportamento a parità di materiale si evidenzia che le configurazioni con spessore del rivestimento da 3cm sono più rigide e presentano periodi di vibrare leggermente inferiori rispetto alle configurazioni di uguale materiale ma con rivestimento da 2cm.

Analisi Sismica

La domanda sismica sugli elementi non strutturali può essere determinata applicando loro una forza orizzontale F_a definita come segue:

$$F_a = (S_a \cdot W_a) / q_a$$

Dove:

F_a è la forza sismica orizzontale distribuita o agente nel centro di massa dell'elemento non strutturale, nella direzione più sfavorevole, risultante delle forze distribuite proporzionali alla massa;

S_a è l'accelerazione massima, adimensionalizzata rispetto a quella di gravità, che l'elemento non strutturale subisce durante il sisma e corrisponde allo stato limite in esame;

W_a è il peso dell'elemento;

q_a è il fattore di comportamento dell'elemento.

Visto il carattere innovativo della parete, a scopo conservativo, non si ritiene di assumere un valore di q_a maggiore di 1 poiché non sarebbe supportato da studi di letteratura.

Ipotizzando che la parete sia realizzata in un edificio con struttura intelaiata e nell'ipotesi di andamento delle accelerazioni linearmente crescente con l'altezza, l'accelerazione massima $S_a(T_a)$ può essere determinata attraverso l'espressione.

$$S_a(T_a) = \begin{cases} \alpha S \left(1 + \frac{z}{H}\right) \left[\frac{a_p}{1 + (a_p - 1) \left(1 - \frac{T_a}{aT_1}\right)^2} \right] \geq \alpha S & \text{per } T_a < aT_1 \\ \alpha S \left(1 + \frac{z}{H}\right) a_p & \text{per } aT_1 \leq T_a < bT_1 \\ \alpha S \left(1 + \frac{z}{H}\right) \left[\frac{a_p}{1 + (a_p - 1) \left(1 - \frac{T_a}{bT_1}\right)^2} \right] \geq \alpha S & \text{per } T_a \geq bT_1 \end{cases}$$

Dove:

α è il rapporto tra accelerazione massima del terreno a_g su sottosuolo tipo A da considerare nello stato limite in esame e l'accelerazione di gravità g ;

S è il coefficiente che tiene conto della categoria di sottosuolo e delle condizioni topografiche $S=S_s \cdot S_T$;

T_a è il periodo fondamentale di vibrazione dell'elemento non strutturale;

T_1 è il periodo fondamentale di vibrazione della costruzione nella direzione considerata;

z è la quota del baricentro dell'elemento non strutturale misurata a partire dal piano di fondazione;

H è l'altezza della costruzione misurata a partire dal piano di fondazione;

a , b , a_p sono parametri definiti in accordo con il periodo fondamentale di vibrazione della costruzione come riportato nella Tabella 6 estratta dalla Circolare 7/2019 C.S.LL.PP [3].

Tabella 6: Parametri a, b, a_p in accordo con il periodo di vibrazione della costruzione T_1 (Tabella C7.2.II Circolare 7/2019 C.S.LL.PP).

	a	b	a_p
$T_1 < 0,5$ s	0.8	1,4	5,0
$0,5$ s $< T_1 < 1,0$ s	0.3	1,2	4,0
$T_1 > 1,0$ s	0.3	1,0	2,5

Si assume che l'edificio in cui sarà installata la parete sia una costruzione destinata a civile abitazione e dunque con livelli di prestazioni ordinari, $V_N=50$ anni e *Classe d'Uso II* ($CU=1$), corrispondente a costruzioni il cui uso preveda normali affollamenti senza contenuti pericolosi per l'ambiente e senza funzioni pubbliche e sociali essenziali. Il Periodo di Riferimento per l'azione sismica è dunque $V_R=50$ anni. Come riportato nella Tabella 7.3.III delle NTC2018 [4], per gli elementi non strutturali (NS) di edifici in *Classe d'Uso II* le verifiche si eseguono in termini di Stabilità allo Stato Limite di Salvaguardia della Vita (SLV). In particolare al paragrafo 7.3.6.2 è precisato che per gli elementi non strutturali devono essere adottati magisteri atti ad evitare la possibile espulsione sotto l'azione della F_a corrispondente allo SL e alla CU considerati. La Circolare 7 del 2019 chiarisce che "la prestazione, consistente nell'evitare la possibile espulsione delle tamponature sotto l'azione della F_a , si può ritenere conseguita con l'inserimento di leggere reti da intonaco sui due lati della muratura, collegate tra loro ed alle strutture circostanti a distanza non superiore a 500mm sia in direzione orizzontale sia in direzione verticale, ovvero con l'inserimento di elementi di armatura orizzontale nei letti di malta, a distanza non superiore a 500mm".

Il sistema in oggetto presenta maglie di armatura a distanza inferiore a 500mm, per cui il requisito indicato dalla Circolare 7/2019 potrebbe ritenersi già soddisfatto. Tuttavia, trattandosi di una tipologia di tamponatura innovativa, sono state comunque svolte le analisi allo SLV sotto l'effetto della forza F_a per verificare il livello di sollecitazione delle singole parti costituenti la parete.

La probabilità di superamento nel Periodo di Riferimento allo SLV è pari al 10%, cui corrisponde un periodo di ritorno T_R del sisma:

$$T_R = -\frac{V_R}{\ln(1 - P_{VR})} = -\frac{50}{\ln(1 - 0.1)} = 475 \text{ anni}$$

Per calcolare αS (Tabella 7), ipotizziamo di considerare l'edificio situato in una zona ad elevata sismicità (ID=45211; LON=15.646; LAT=38.114) ed estraiamo dall'allegato B delle NTC2018 i corrispondenti valori di α e F_0 . Per essere conservativi, assumiamo inoltre:

- Terreno di tipo D, cui corrisponde un coefficiente di amplificazione stratigrafica $S_5=1.425$.
- Edificio situato in corrispondenza della cresta di un rilievo con pendenza media maggiore di 30° , cui corrisponde un coefficiente di amplificazione topografica $S_7=1.4$.

Tabella 7: Calcolo di αS .

STATO LIMITE	P_{VR}	T_R (anni)	α (g)	F_0	S	αS (g)
SLV	10%	475	0.2697	2.41	2	0.538

Inoltre per edifici di altezza non superiore a 40m, T_1 può essere stimato con la formula seguente:

$$T_1 = C_1 H^{3/4}$$

H è l'altezza dell'edificio dal piano di fondazione

$$C_1 \begin{cases} 0.085 \text{ edifici con struttura a telaio in acciaio} \\ 0.075 \text{ edifici con struttura a telaio in calcestruzzo} \end{cases}$$

Il periodo più basso che dunque ci si aspetta per un edificio a telaio (con altezza di interpiano $h=3.3m$) è di circa:

$$T_1 = 0.075 \cdot 3.3^{3/4} = 0.184 \text{ sec}$$

cui corrisponde un valore $a \cdot T_1 = 0.8 \cdot 0.184 \text{ sec} = 0.147 \text{ sec} \gg T_a$ (confronta con Tabella 4 e Tabella 5)

E' quindi plausibile ritenere che nei casi applicativi, per il sistema in oggetto, con molta probabilità per il calcolo di $S_a(T_a)$ si utilizzerà l'espressione prevista per $T_a < aT_1$.

Partendo da queste ipotesi, e sempre con l'obiettivo di verificare la condizione più sfavorevole, consideriamo che la parete sia collocata nel piano più alto dell'edificio (dove l'amplificazione sismica sarà maggiore) e studiamo l'andamento della S_a al variare dell'altezza H dell'edificio. Esprimendo $H = nh$ e $T_1 = C_1(nh)^{3/4}$ e assumendo un'altezza di interpiano $h = 3.3m$, è possibile plottare S_a in funzione del numero n di piani dell'edificio ricavando il valore di n^* che massimizza la funzione per ciascuna delle 4 configurazioni oggetto di studio. In Figura 13 e in Figura 14 sono riportati gli andamenti $S_a(n)$ nel caso di edificio con struttura a telaio in acciaio e in cemento armato rispettivamente.

$$S_a(n) = \alpha S \left[1 + \frac{(n - 1/2)}{n} \right] \left\{ \frac{a_p}{1 + (a_p - 1) \left[1 - \frac{T_a}{aC_1(nh)^{3/4}} \right]^2} \right\}$$

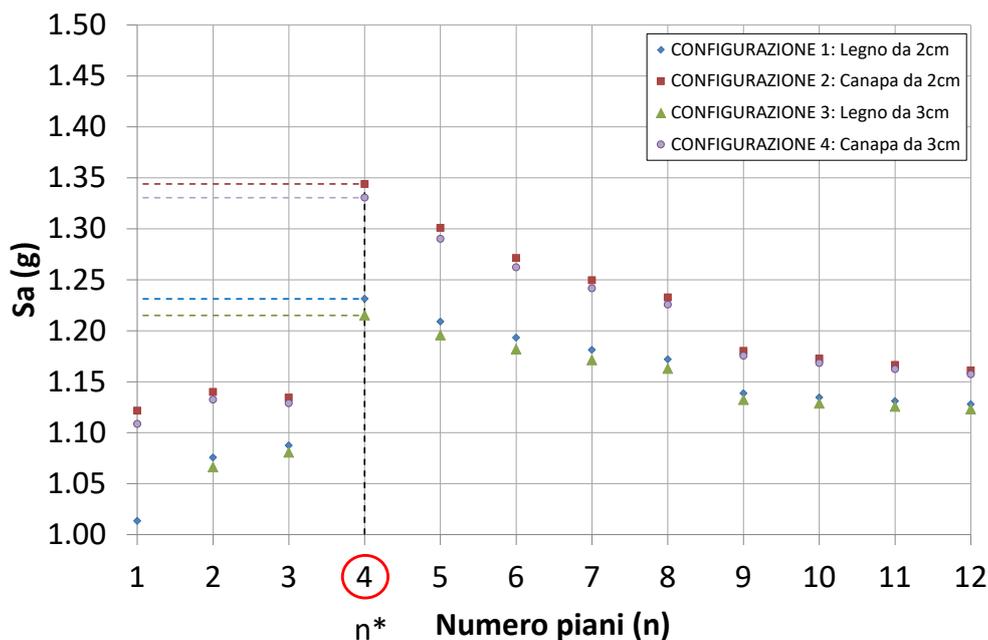


Figura 13: Accelerazione orizzontale S_a , in funzione di n , da applicare sulla parete dell'ultimo piano di un edificio con struttura a telaio in ACCIAIO per le ciascuna delle 4 configurazioni analizzate (ipotesi: $\alpha S=0.538g$, $h=3.3m$, $T_1=C_1(nh)^{3/4}$).

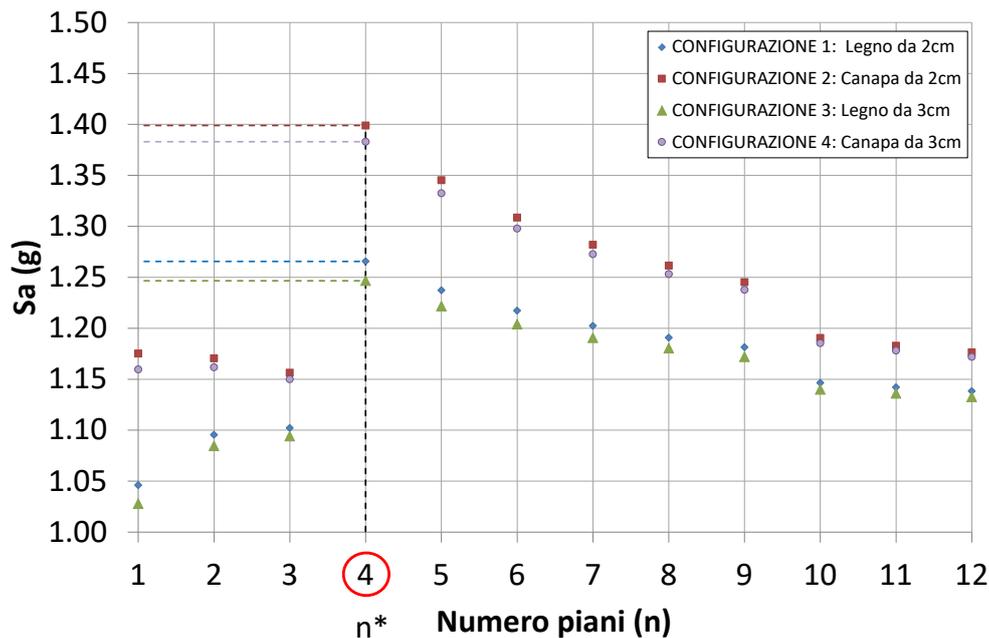


Figura 14: Accelerazione orizzontale S_a , in funzione di n , da applicare sulla parete dell'ultimo piano di un edificio con struttura a telaio in CEMENTO ARMATO per le ciascuna delle 4 configurazioni analizzate (ipotesi: $\alpha S=0.538g$, $h=3.3m$, $T_1=C_1(nh)^{3/4}$).

Per ciascuna delle 4 configurazioni analizzate, la parete viene testata applicando un'accelerazione orizzontale ribaltante uniformemente distribuita pari ai valori ottenuti nel caso di edificio a 4 piani con struttura a telaio in cemento armato e sintetizzati in Tabella 8.

Tabella 8: Accelerazione orizzontale applicata alla parete per simulare il carico sismico.

CONFIGURAZIONE		Accelerazione orizzontale applicata
1	Legno 2 cm	$S_a=1.27g$
2	Canapa 2 cm	$S_a=1.40g$
3	Legno 3 cm	$S_a=1.25g$
4	Canapa 3 cm	$S_a=1.38g$

In Figura 15 - Figura 34 si riportano i risultati in termini di spostamenti (in metri [m]) e di tensioni di Mises (in Pascal [Pa]) nelle singole parti costituenti la parete e per ciascuna delle quattro configurazioni analizzate. Si osservi che la configurazione deformata è in scala amplificata per consentirne la visualizzazione degli spostamenti, altrimenti non percettibili, i cui valori sono riportati in legenda. I risultati ottenuti evidenziano un buon comportamento della parete, con tutte le sue componenti sollecitate al di sotto delle resistenze caratteristiche dei materiali, confermando la fattibilità strutturale del sistema e lasciando margine per ulteriori modifiche o affinamenti che potranno nascere in fase di costruzione.

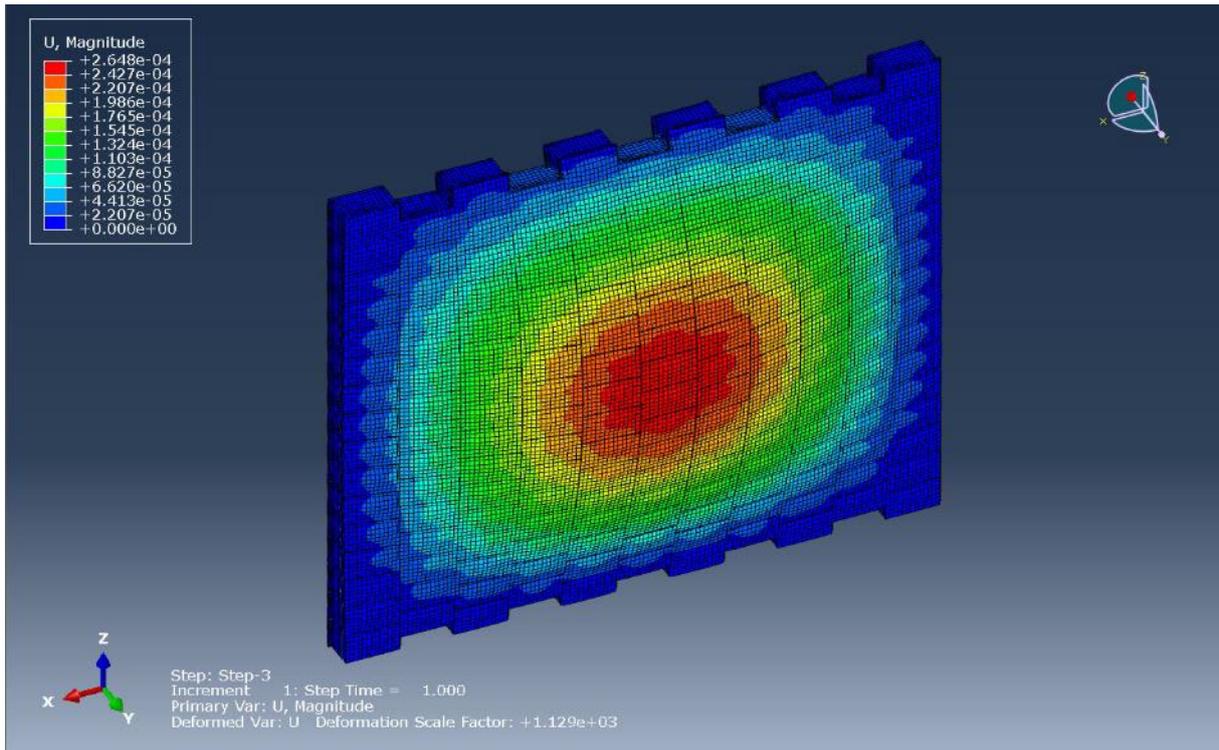


Figura 15: Spostamenti (CONFIGURAZIONE 1 Legno 2cm).

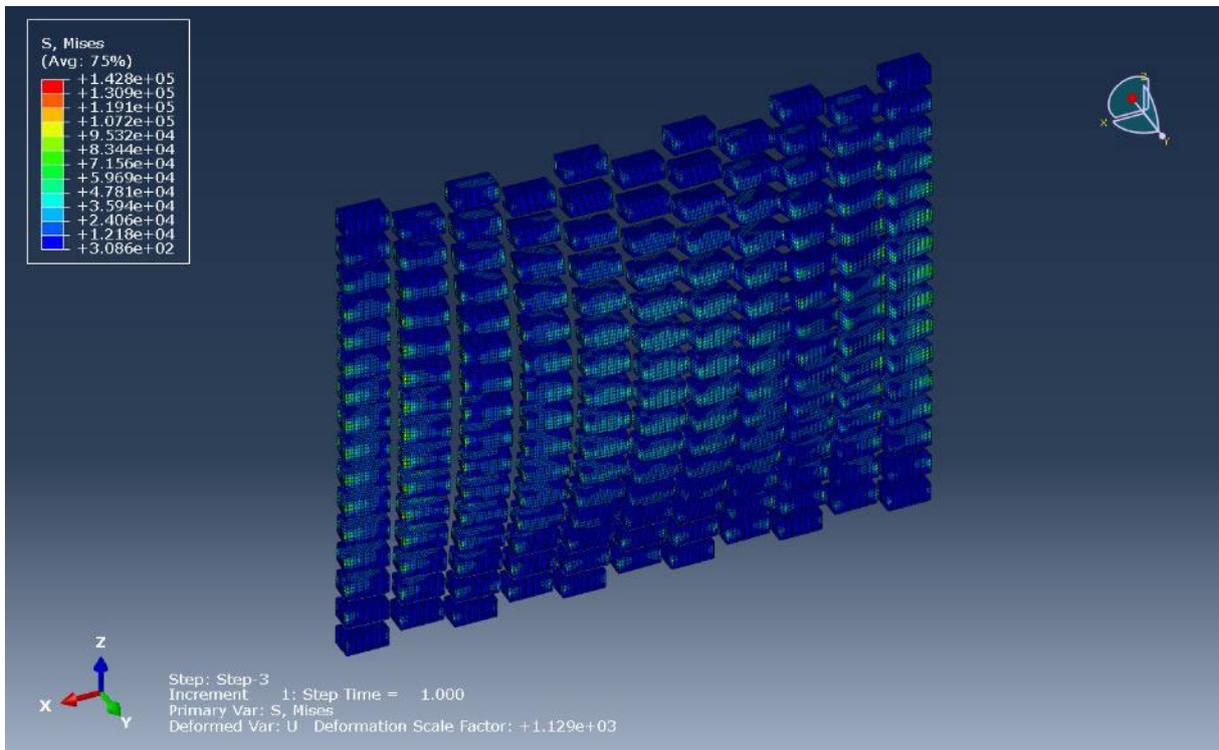


Figura 16: Tensioni di Mises nei condensatori (CONFIGURAZIONE 1 Legno 2cm).

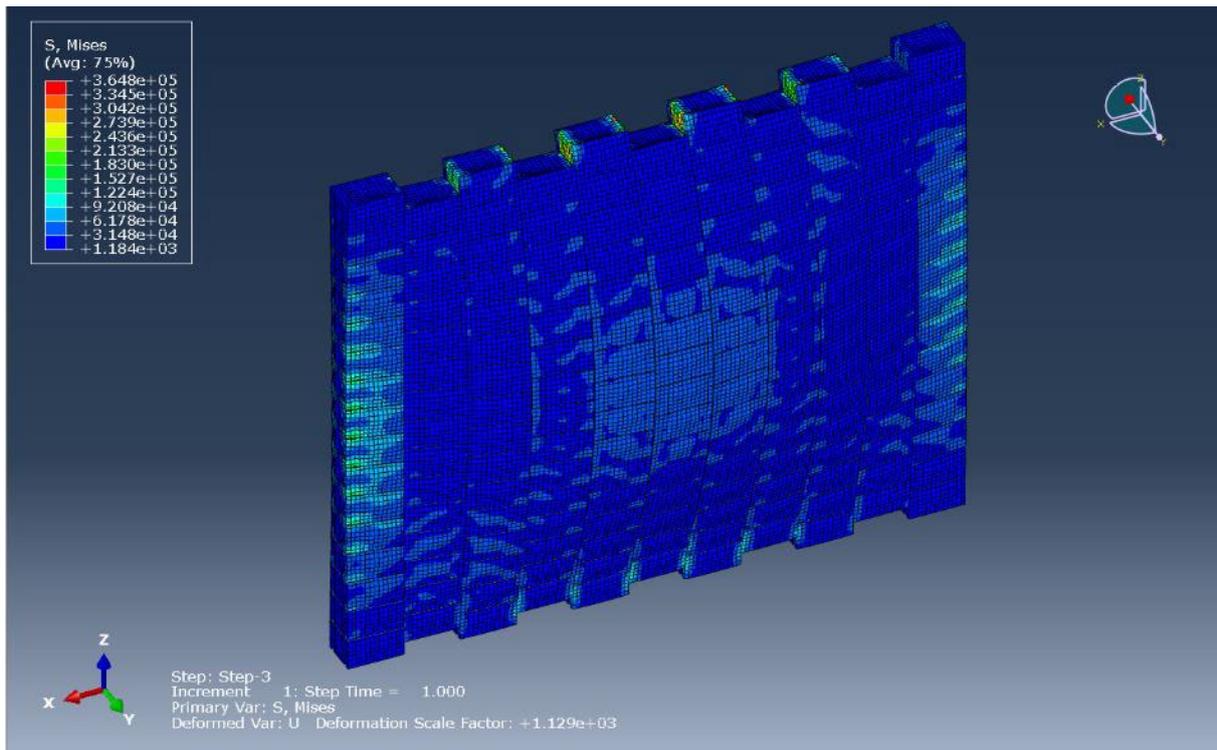


Figura 17: Tensioni di Mises nei rivestimenti (CONFIGURAZIONE 1 Legno 2cm).

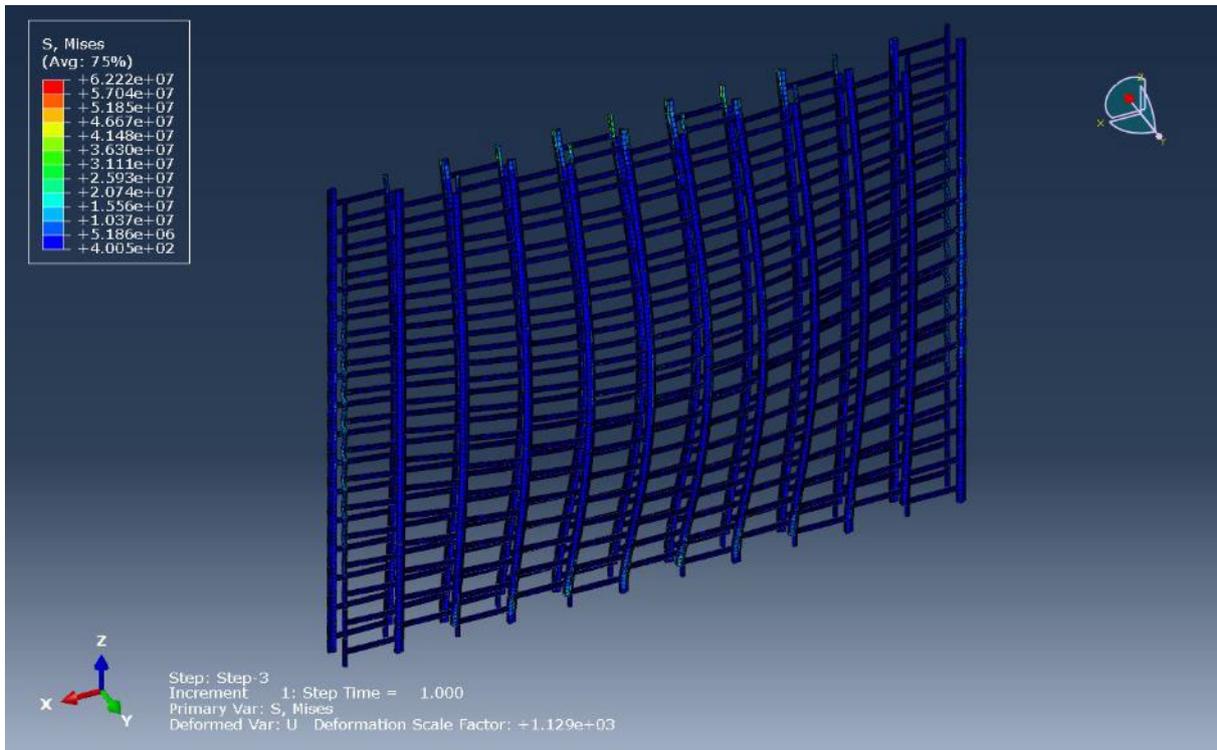


Figura 18: Tensioni di Mises nei profili metallici (CONFIGURAZIONE 1 Legno 2cm).

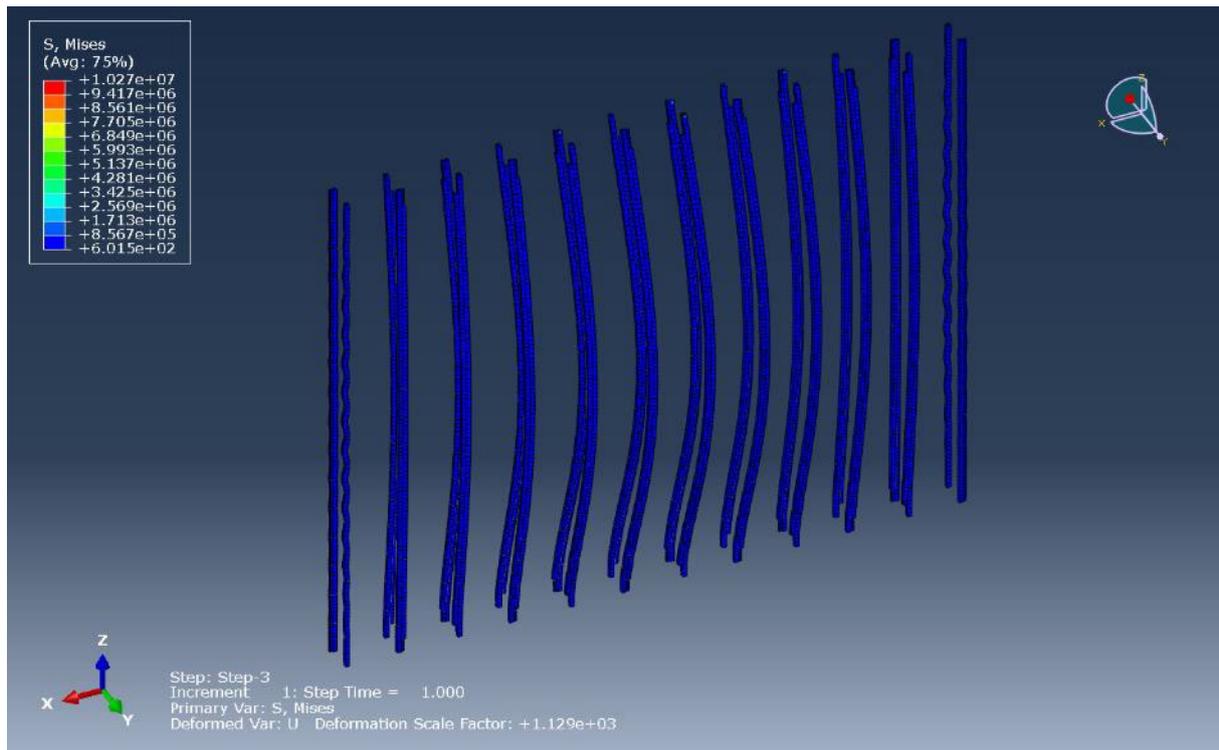


Figura 19: Tensioni di Mises negli elementi di riempimento/alloggiamento (CONFIGURAZIONE 1 Legno 2cm).

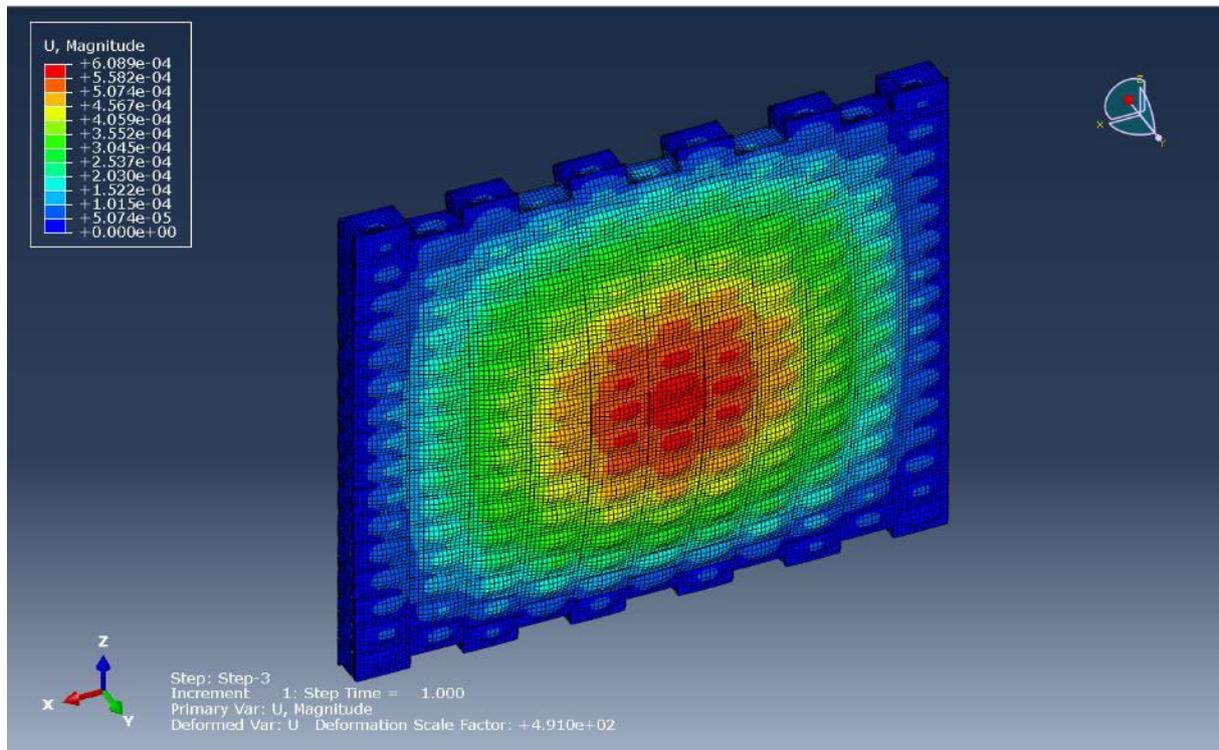


Figura 20: Spostamenti (CONFIGURAZIONE 2 Canapa 2cm).

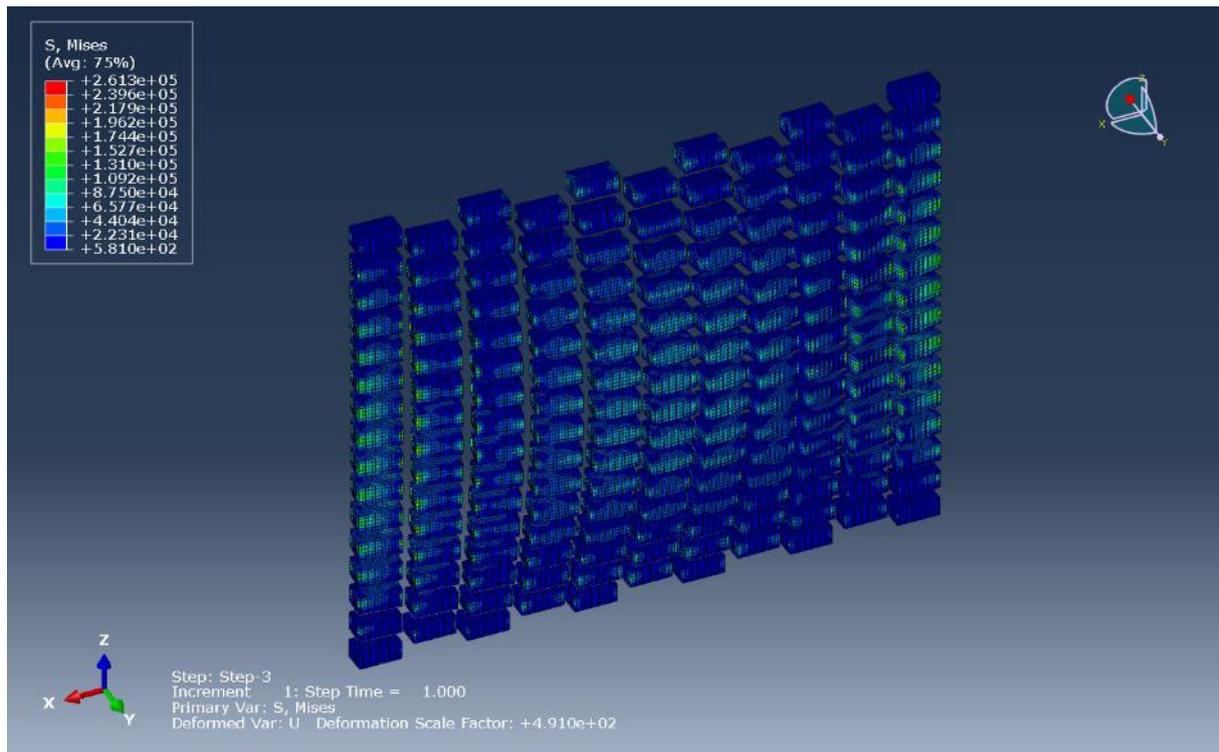


Figura 21: Tensioni di Mises nei condensatori (CONFIGURAZIONE 2 Canapa 2cm).

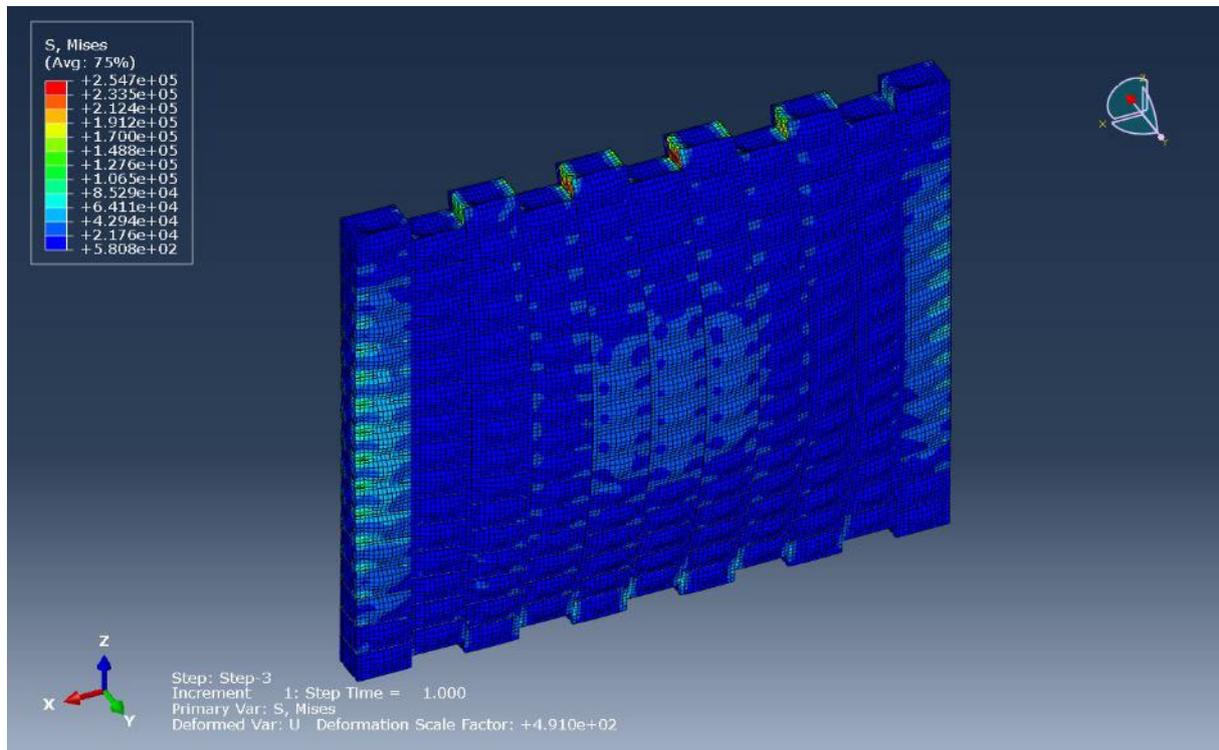


Figura 22: Tensioni di Mises nei rivestimenti (CONFIGURAZIONE 2 Canapa 2cm).

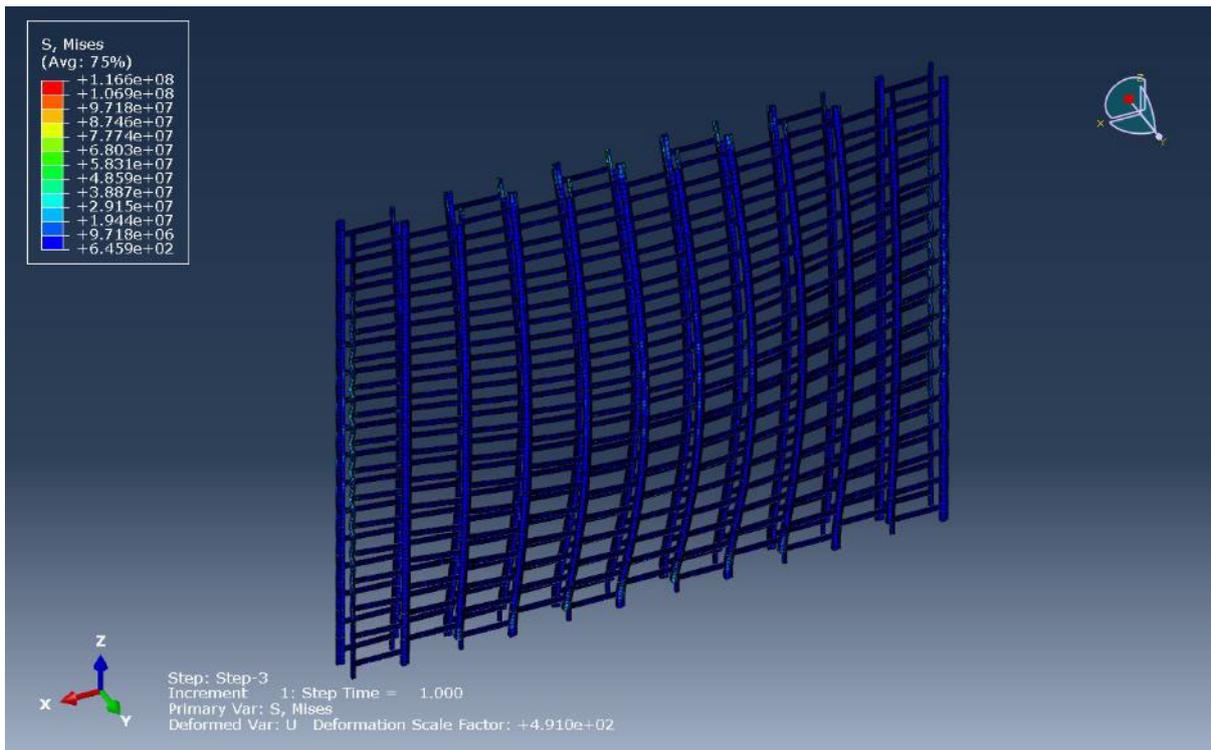


Figura 23:Tensioni di Mises nei profili metallici (CONFIGURAZIONE 2 Canapa 2cm).

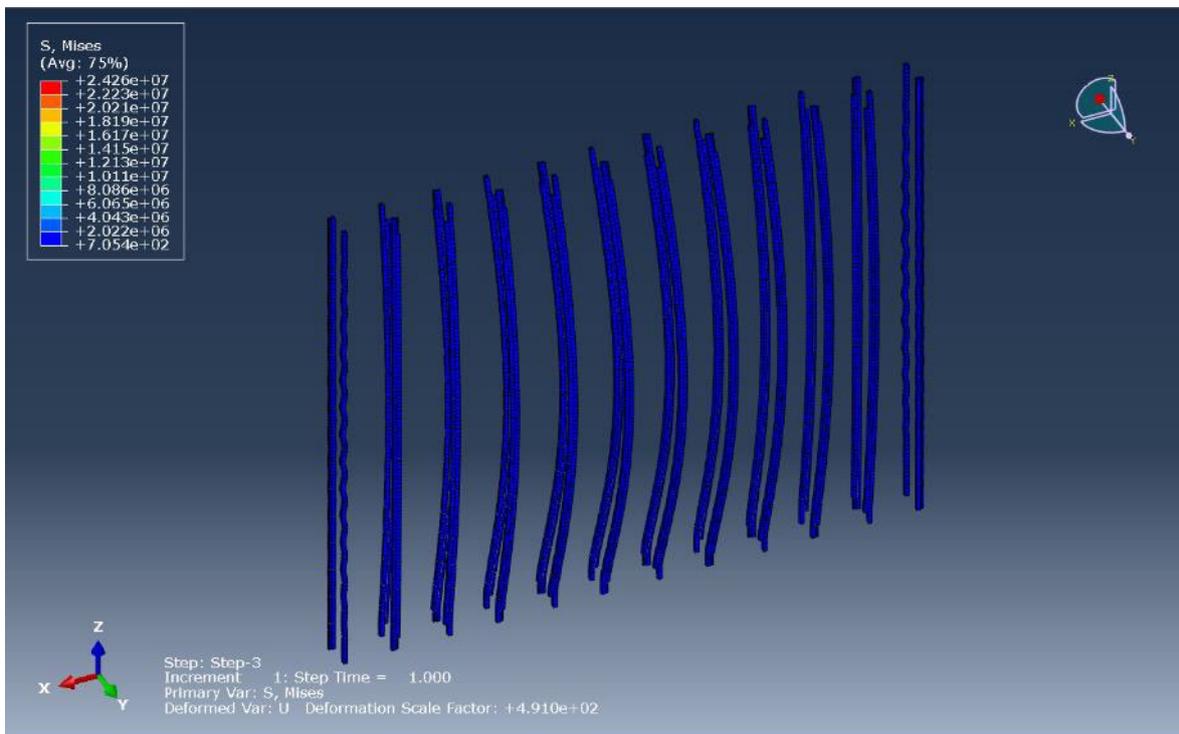


Figura 24:Tensioni di Mises negli elementi di riempimento/alloggiamento (CONFIGURAZIONE 2 Canapa 2cm).

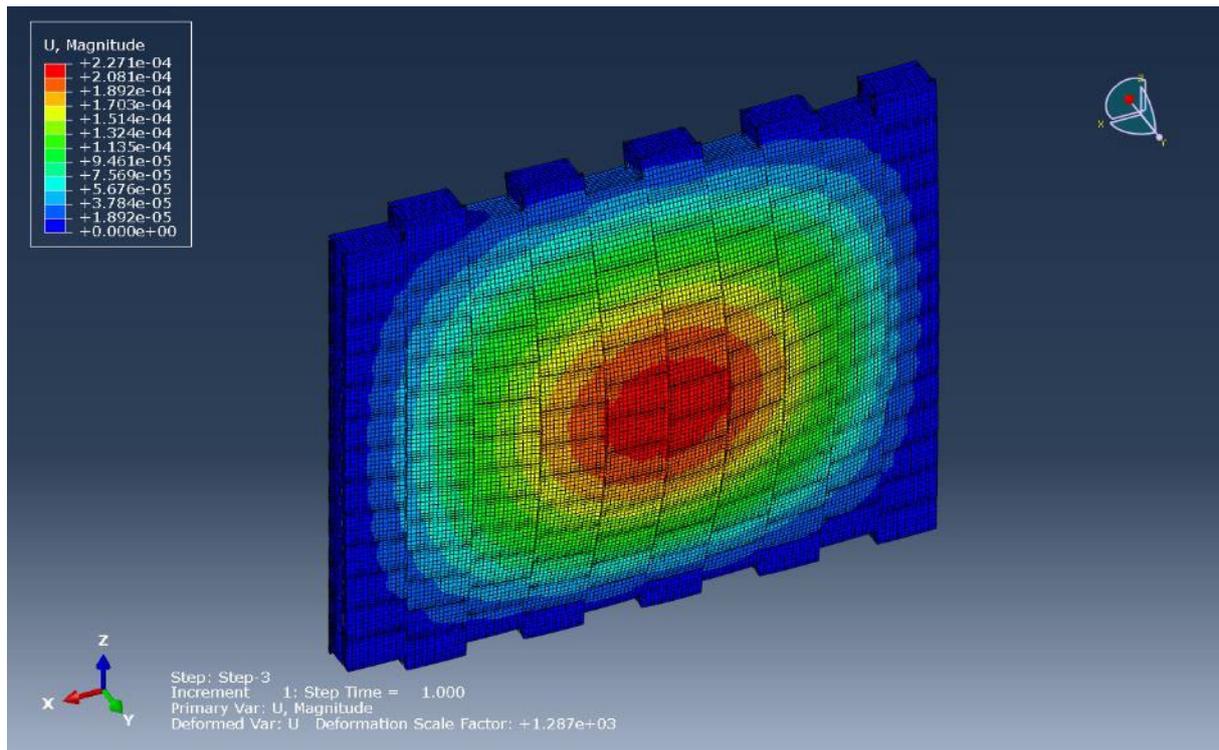


Figura 25: Spostamenti (CONFIGURAZIONE 3 Legno 3cm).

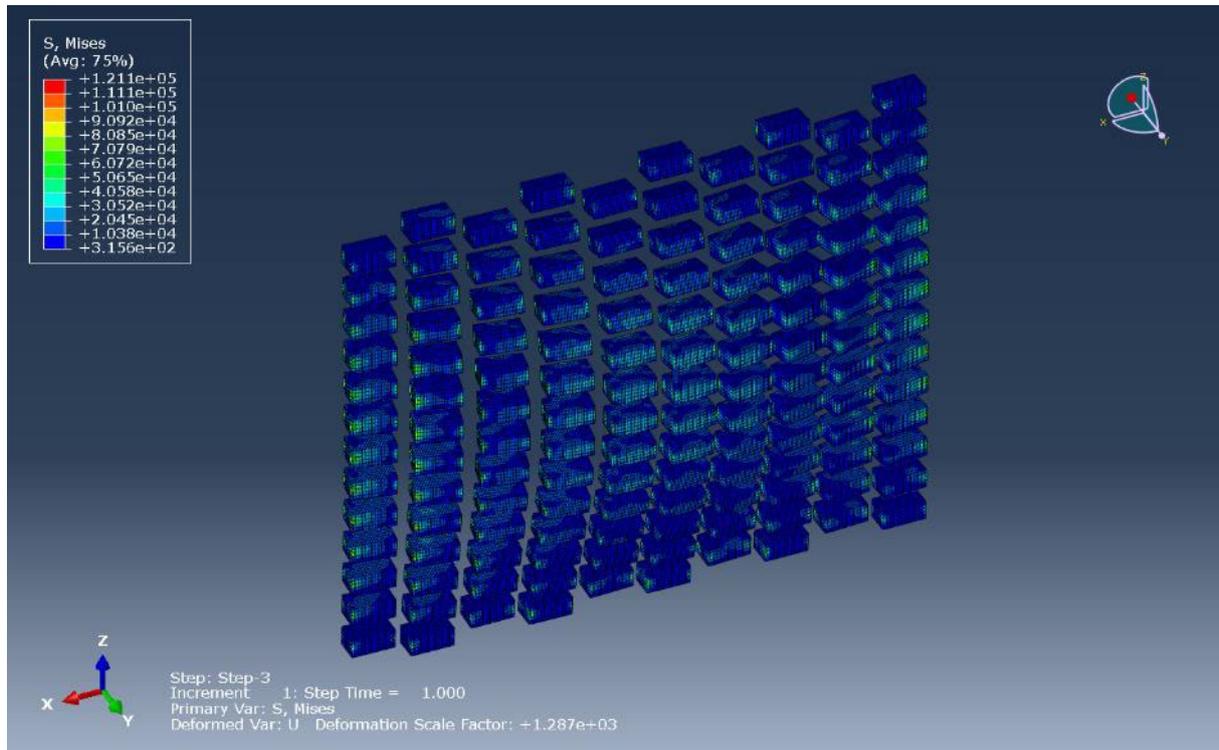


Figura 26: Tensioni di Mises nei condensatori (CONFIGURAZIONE 3 Legno 3cm).

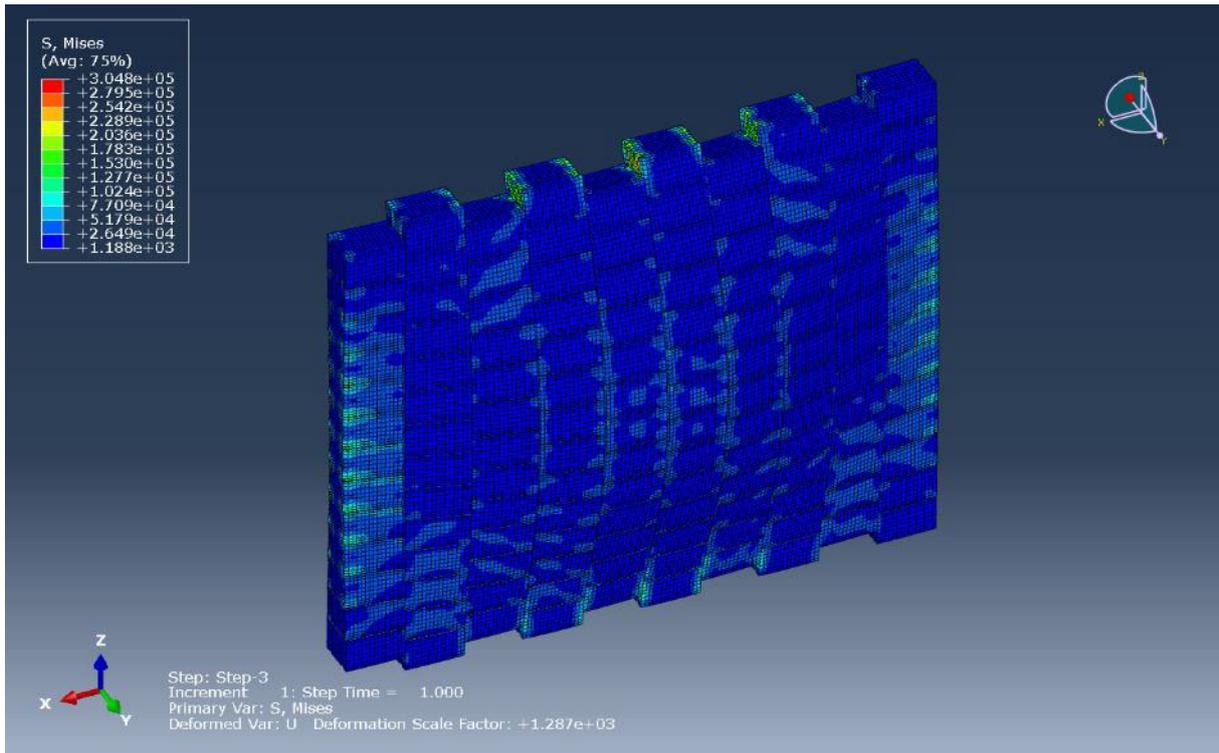


Figura 27: Tensioni di Mises nei rivestimenti (CONFIGURAZIONE 3 Legno 3cm).

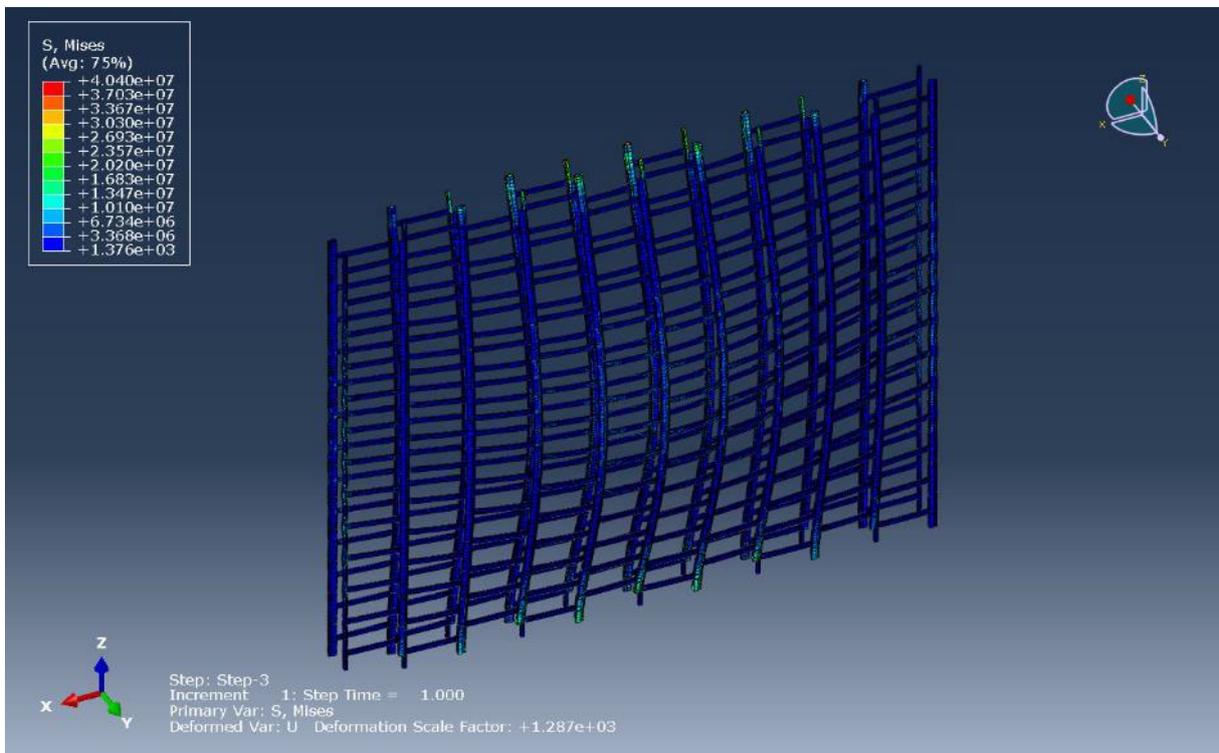


Figura 28: Tensioni di Mises nei profili metallici (CONFIGURAZIONE 3 Legno 3cm).

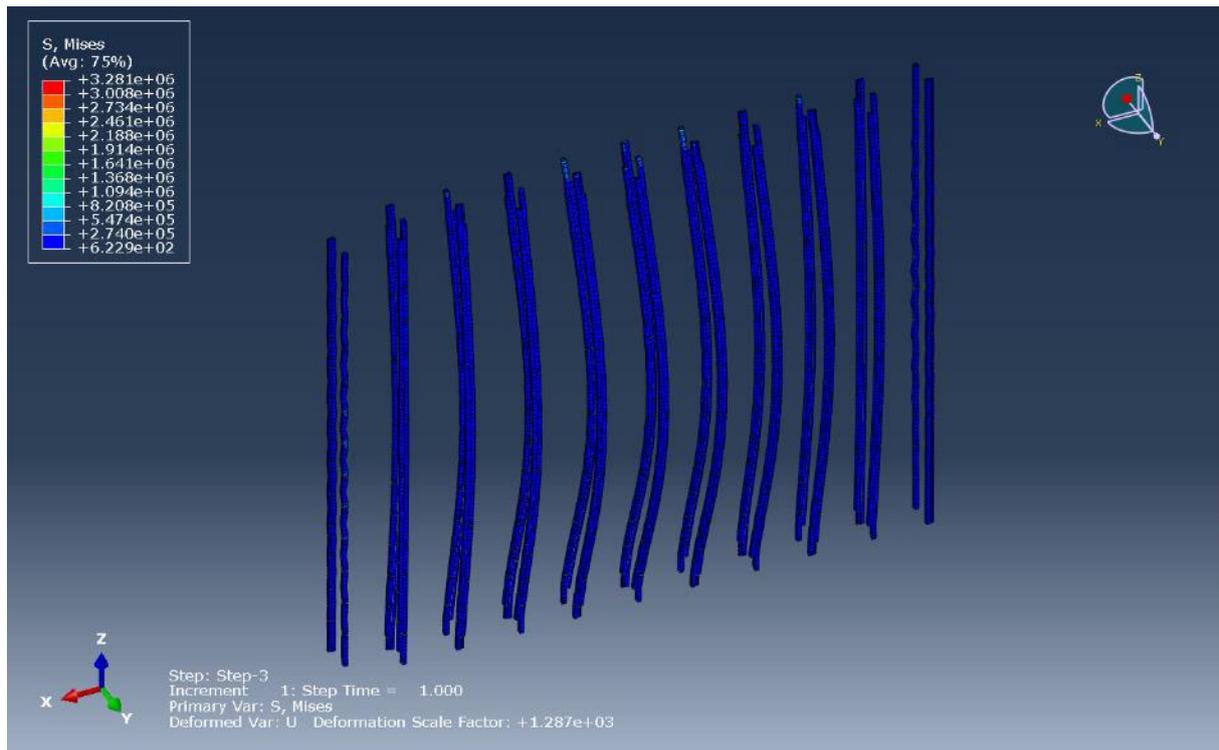


Figura 29: Tensioni di Mises negli elementi di riempimento/alloggiamento (CONFIGURAZIONE 3 Legno 3cm).

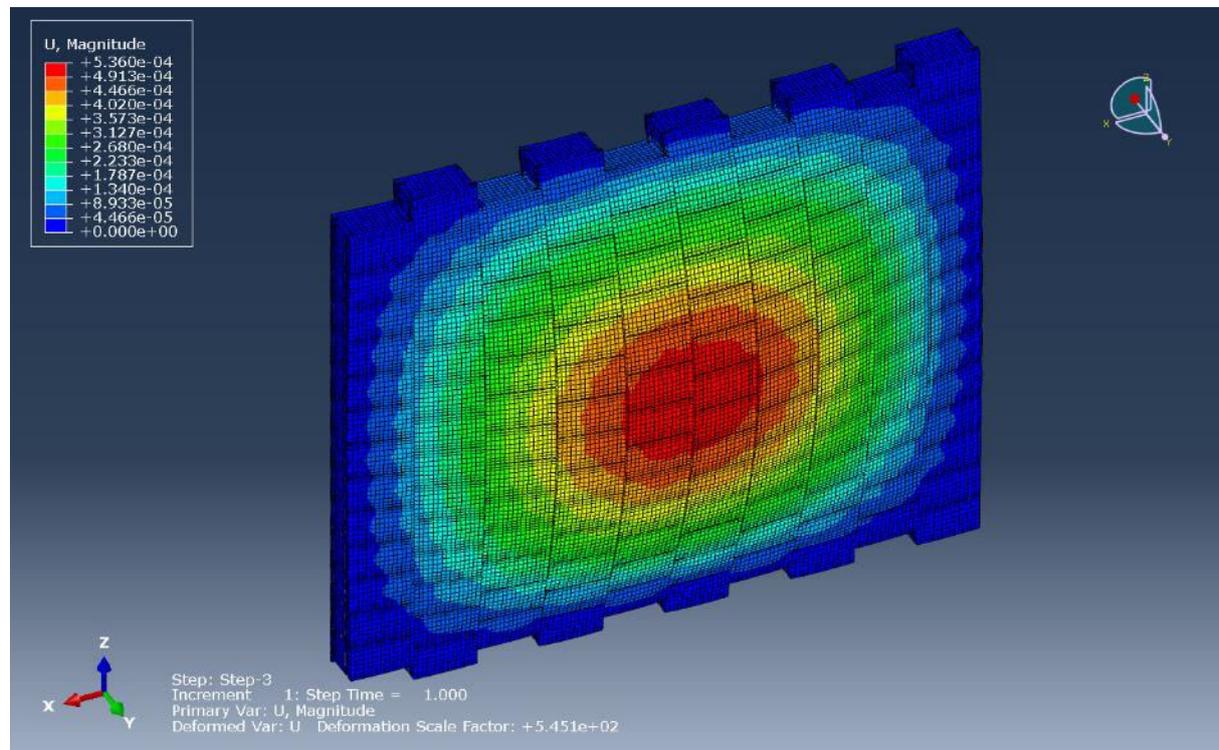


Figura 30: Spostamenti (CONFIGURAZIONE 4 Canapa 3cm).

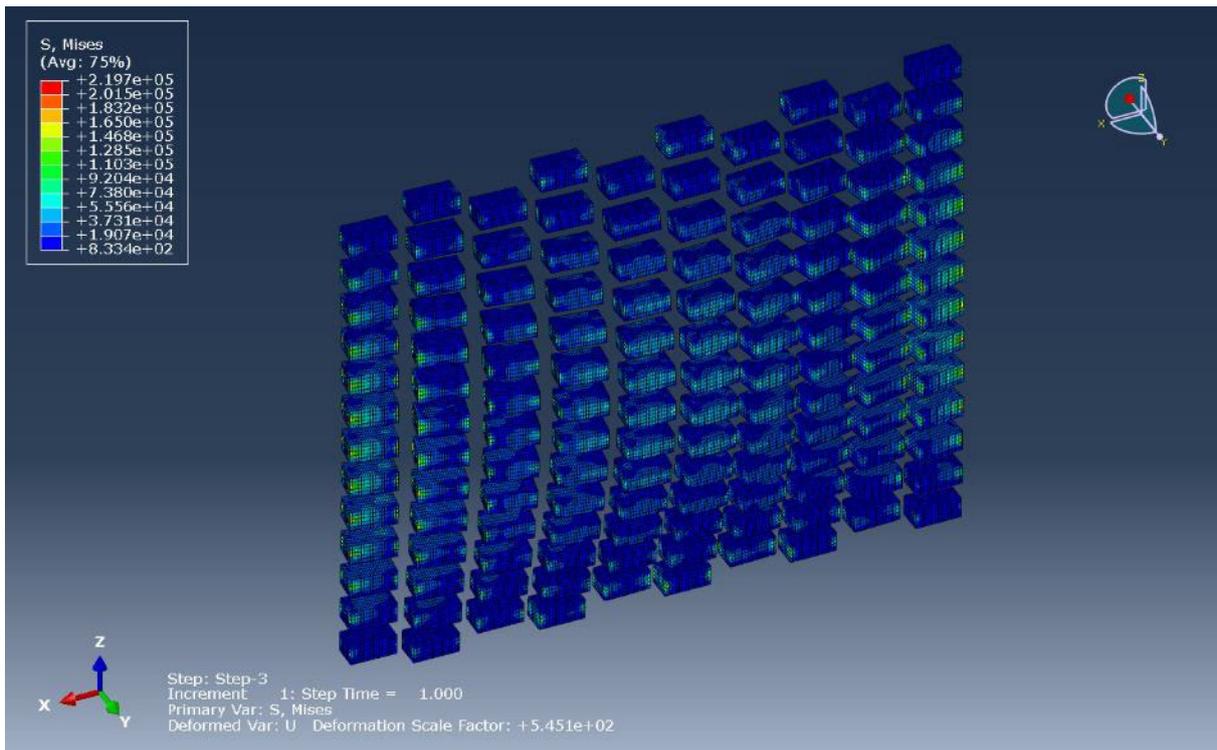


Figura 31: Tensioni di Mises nei condensatori (CONFIGURAZIONE 4 Canapa 3cm).

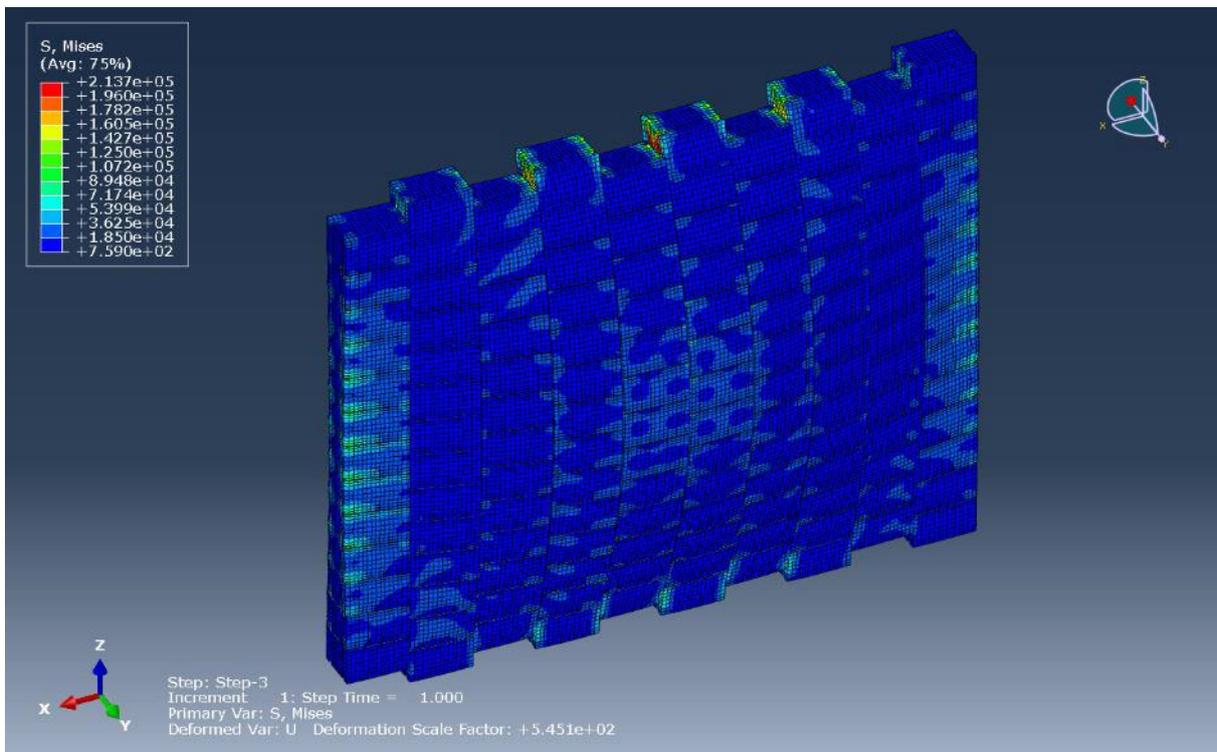


Figura 32: Tensioni di Mises nei rivestimenti (CONFIGURAZIONE 4 Canapa 3cm).

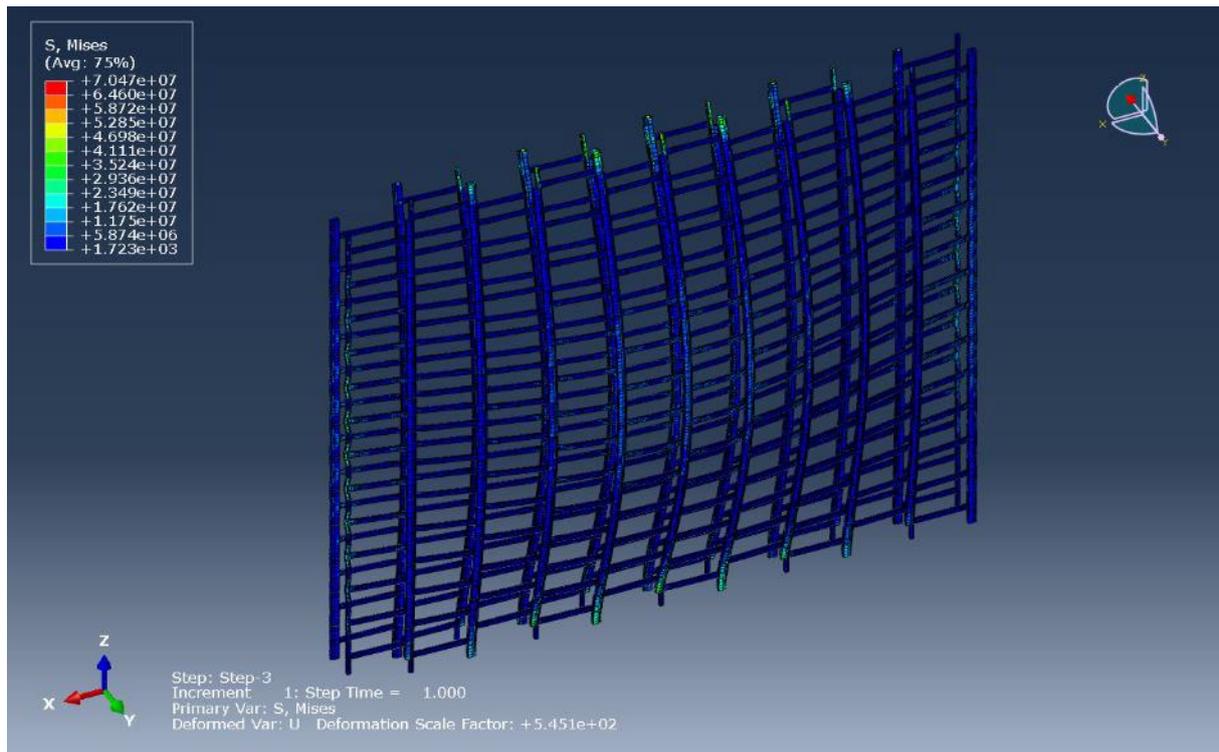


Figura 33: Tensioni di Mises nei profili metallici (CONFIGURAZIONE 4 Canapa 3cm).

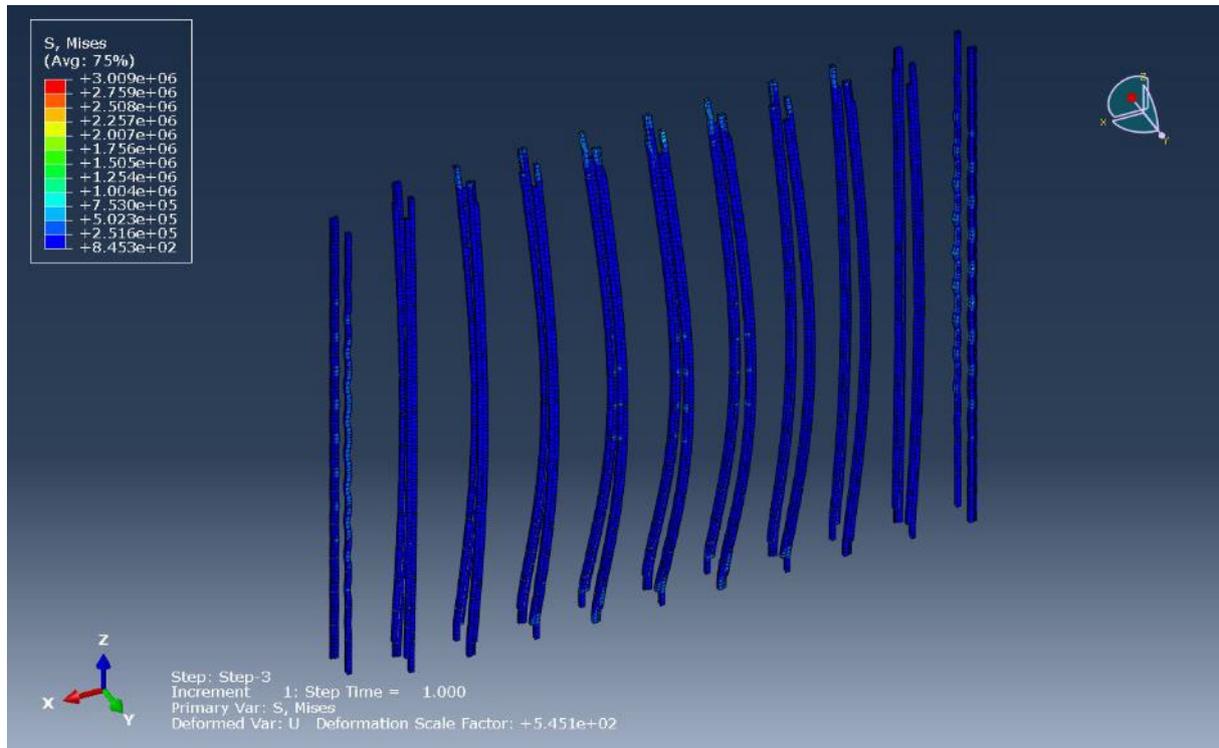


Figura 34: Tensioni di Mises negli elementi di riempimento/alloggiamento (CONFIGURAZIONE 4 Canapa 3cm).

2.1.4 Progetto concettuale di posa in opera della parete di tamponatura

E' stato indagato anche il sistema di connessione della parete di tamponatura al telaio dell'edificio ed è stata comunque formulata una prima ipotesi concettuale delle fasi di posa in opera e di collegamento della parete agli elementi strutturali (travi e pilastri).

In Figura 35 è riportata una rappresentazione schematica di un generico campo di telaio entro cui si intende realizzare la parete di tamponatura.

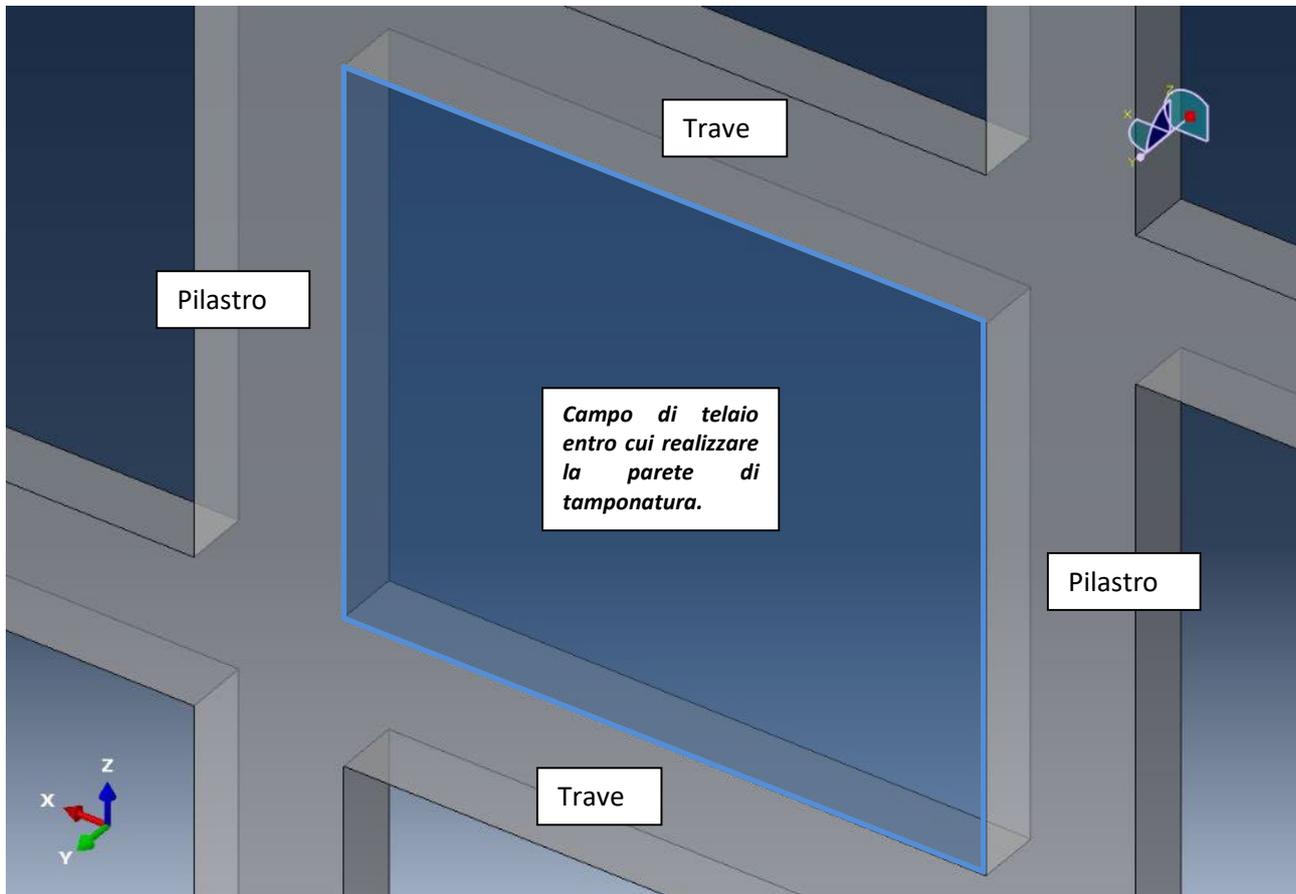
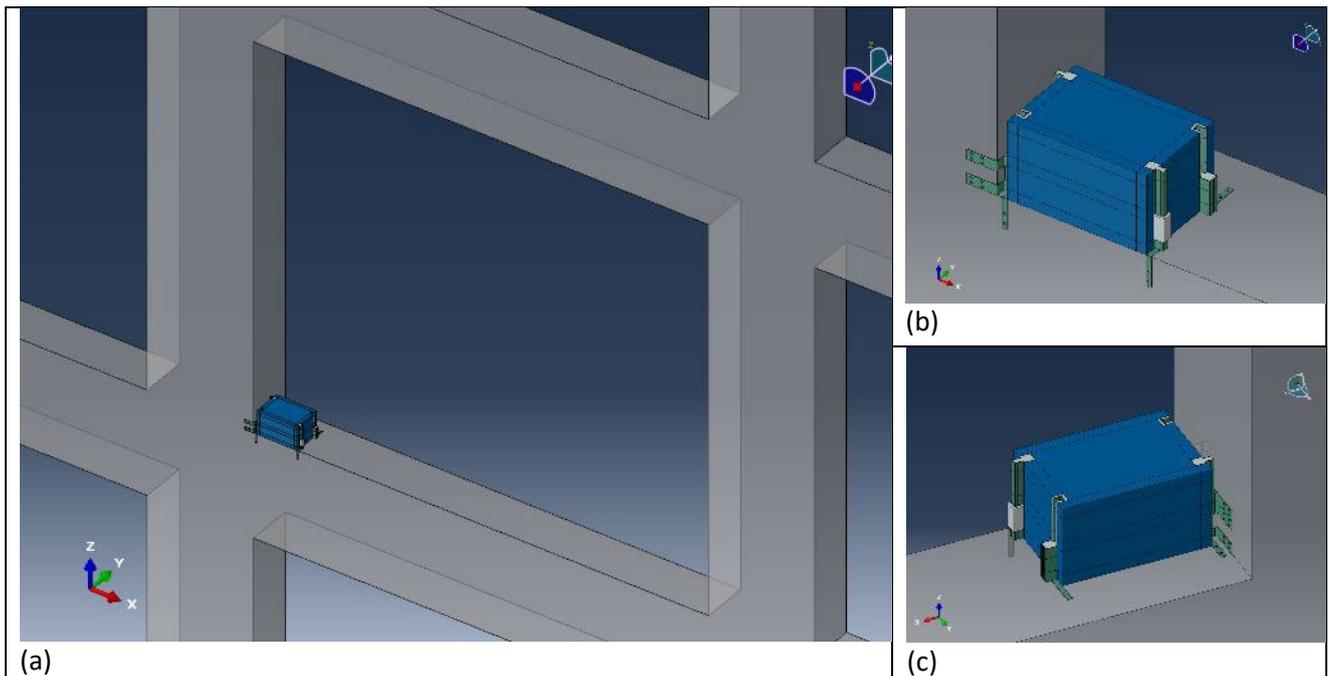


Figura 35: Rappresentazione schematica di un generico campo di telaio entro cui realizzare la tamponatura.

Le fasi di posa in opera sono sinteticamente elencate di seguito e più dettagliatamente descritte in Figura 36 - Figura 42.

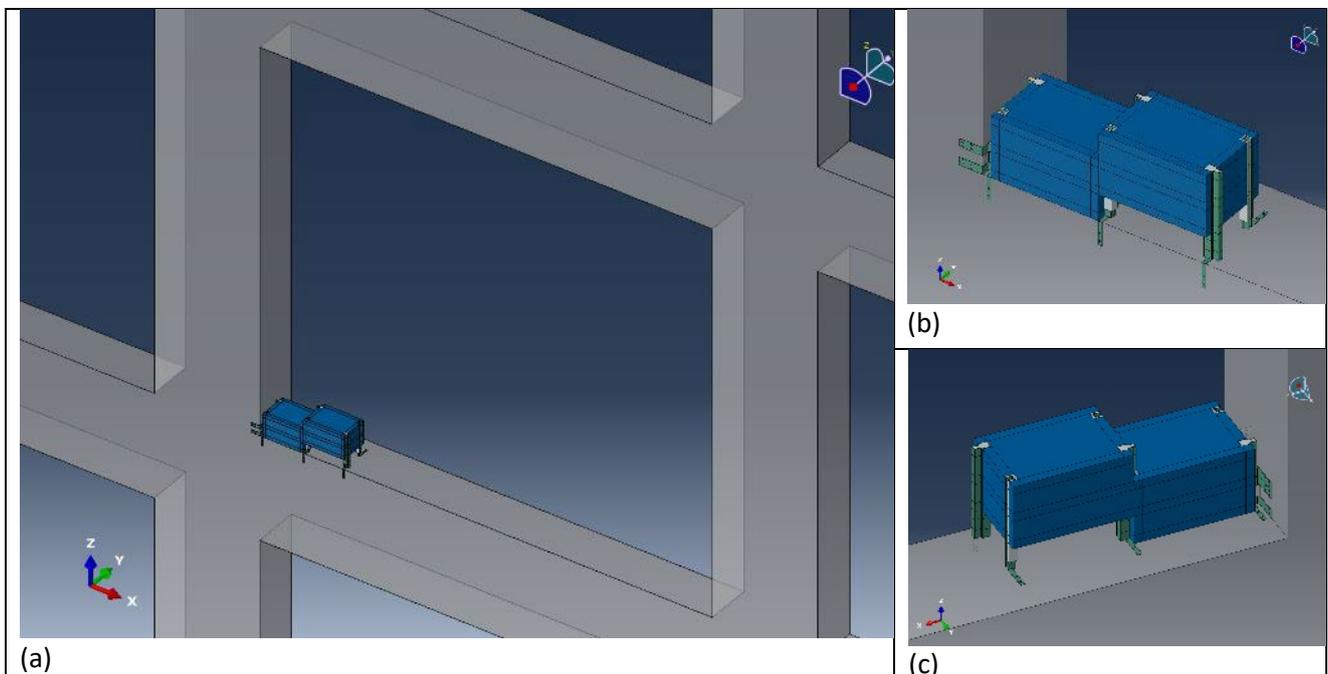
- FASE 1: Posa in opera del *primo mattone* e sua connessione al telaio strutturale (Figura 36).
- FASE 2: Posa in opera del *secondo mattone* e sua connessione al *primo* e al telaio strutturale (Figura 37).
- FASE 3: Posa in opera del *mattone i-esimo* e sua connessione al *mattone (i-1)-esimo* e al telaio strutturale fino al completamento della prima fila (Figura 38).
- FASE 4: Posa in opera dei *mattoni della seconda fila* e loro connessione ai *mattoni della prima fila* e, in corrispondenza delle due estremità, anche al telaio strutturale (Figura 39).
- FASE 5: Posa in opera dei *mattoni della fila i-esima* e loro connessione ai *mattoni della fila (i-1)-esima* e al telaio strutturale fino al completamento della parete (Figura 40).
- FASE 6: Inserimento di *profili metallici verticali* aventi funzione irrigidente e di vincolo intermedio tra la parete di tamponatura e la trave superiore (Figura 41).
- FASE 7: Chiusura completa della parete con inserimento di *pannelli di finitura* negli spazi vuoti generati dallo sfalsamento verticale tra le colonne (Figura 42).



FASE 1 - Posa in opera del *primo mattone* e sua connessione al telaio strutturale.

Il collegamento del primo mattone al telaio avviene tramite angolari saldati ai profili metallici del mattone e collegati alla trave inferiore e al pilastro laterale. Sul lato esterno dell'edificio essi saranno tali da consentire l'allineamento della parete di tamponatura alla facciata. Sul lato interno invece, poiché lo spessore della parete di tamponatura sarà inferiore rispetto a quello di travi e pilastri, gli angolari saranno contenuti entro lo spessore della struttura.

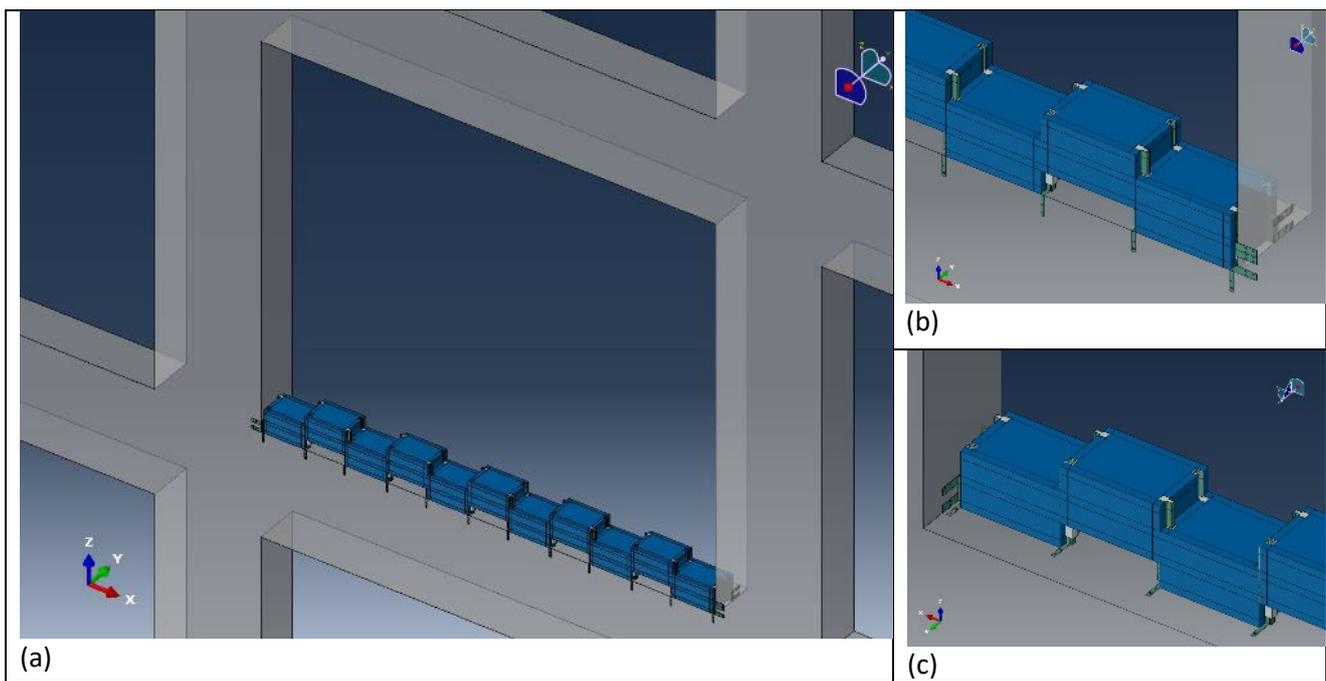
Figura 36: FASE 1: (a) Vista lato esterno edificio; (b) Dettaglio lato esterno edificio; (c) Dettaglio lato interno edificio.



FASE 2 - Posa in opera del *secondo mattone* e sua connessione al *primo* e al telaio strutturale.

Il secondo mattone è posto in opera facendolo scorrere, dall'alto, lungo le guide rappresentate dai profili metallici del mattone già posizionato. Si realizza così un collegamento, a colonne sfalsate in altezza, che consente di incastrare ciascun mattone con quelli adiacenti. La connessione al telaio è realizzata mediante angolari saldati ai profili metallici del mattone e collegati alla trave inferiore.

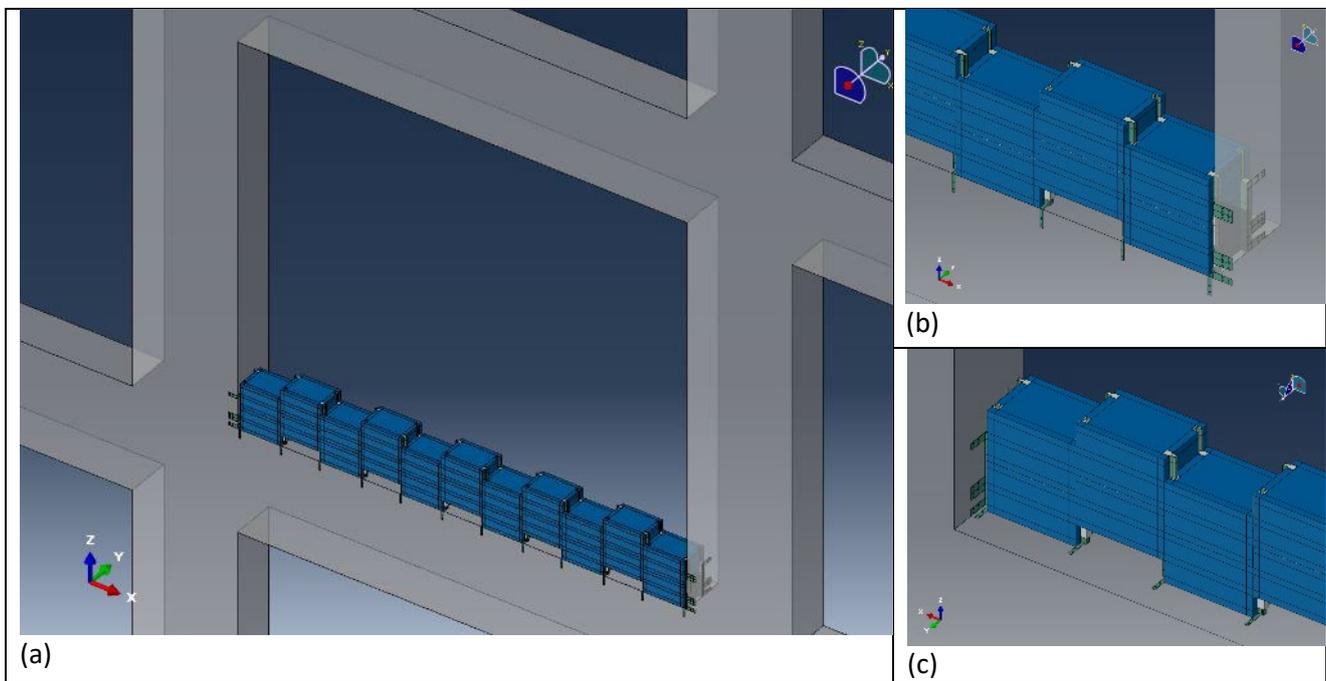
Figura 37: FASE 2: (a) Vista lato esterno edificio; (b) Dettaglio lato esterno edificio; (c) Dettaglio lato interno edificio.



FASE 3 – Posa in opera del mattone *i-esimo* e sua connessione al mattone (*i-1*)-esimo e al telaio strutturale fino al completamento della prima fila.

Il mattone *i-esimo* è posto in opera facendolo scorrere, dall’alto, lungo le guide rappresentate dai profili metallici del mattone precedentemente posto in opera. Si realizza così un collegamento, a colonne sfalsate in altezza, che consente di incastrare ciascun mattone con quelli adiacenti. Ciascun mattone intermedio è collegato alla trave mediante angolari inferiori mentre l’ultimo mattone della fila è anche collegato al pilastro mediante angolari laterali.

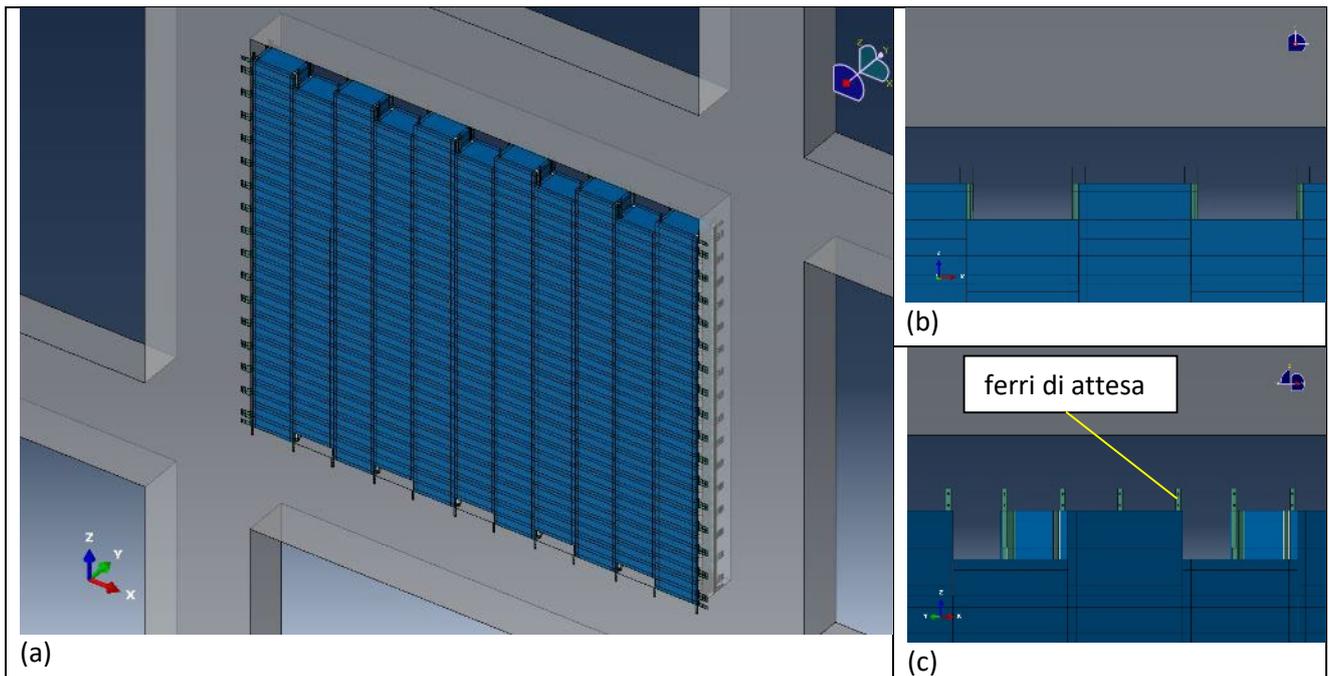
Figura 38: FASE 3: (a) Vista lato esterno edificio; (b) Dettaglio lato esterno edificio; (c) Dettaglio lato interno edificio.



FASE 4 – Posa in opera dei mattoni della seconda fila e loro connessione ai mattoni della prima fila e, in corrispondenza delle due estremità, anche al telaio strutturale.

La seconda fila è realizzata facendo scorrere ciascun mattone, dall’alto, lungo le guide rappresentate dai profili metallici dei mattoni della prima fila ad esso adiacenti. Ciò è consentito grazie allo sfalsamento verticale tra le colonne. Il primo e l’ultimo mattone della fila saranno gli unici collegati anche ai pilastri mediante angolari laterali.

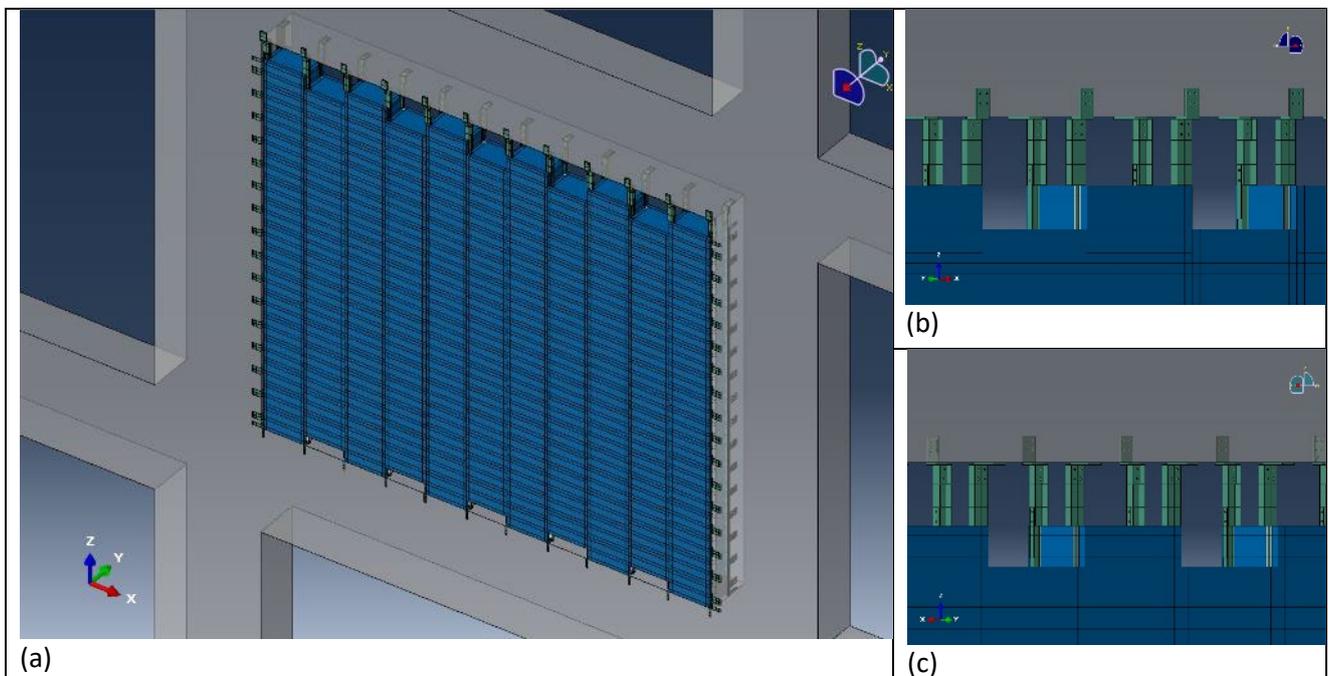
Figura 39: FASE 4: (a) Vista lato esterno edificio; (b) Dettaglio lato esterno edificio; (c) Dettaglio lato interno edificio.



FASE 5 - Posa in opera dei mattoni della fila i -esima e loro connessione ai mattoni della fila $(i-1)$ -esima e al telaio strutturale fino al completamento della parete.

La fila i -esima è realizzata facendo scorrere i mattoni, dall'alto, lungo le guide rappresentate dai profili metallici dei mattoni adiacenti della fila inferiore. Il primo e l'ultimo mattone di ciascuna fila saranno gli unici collegati anche ai pilastri mediante angolari laterali. L'ultima fila realizzabile è quella che consente l'inserimento dei mattoni dall'alto con un adeguato spazio di manovra. Tale spazio di manovra dovrà essere superiore all'altezza del mattone inclusa l'altezza di *ferri di attesa* saldati ai profili metallici dei mattoni dell'ultima fila e funzionali alle fasi successive.

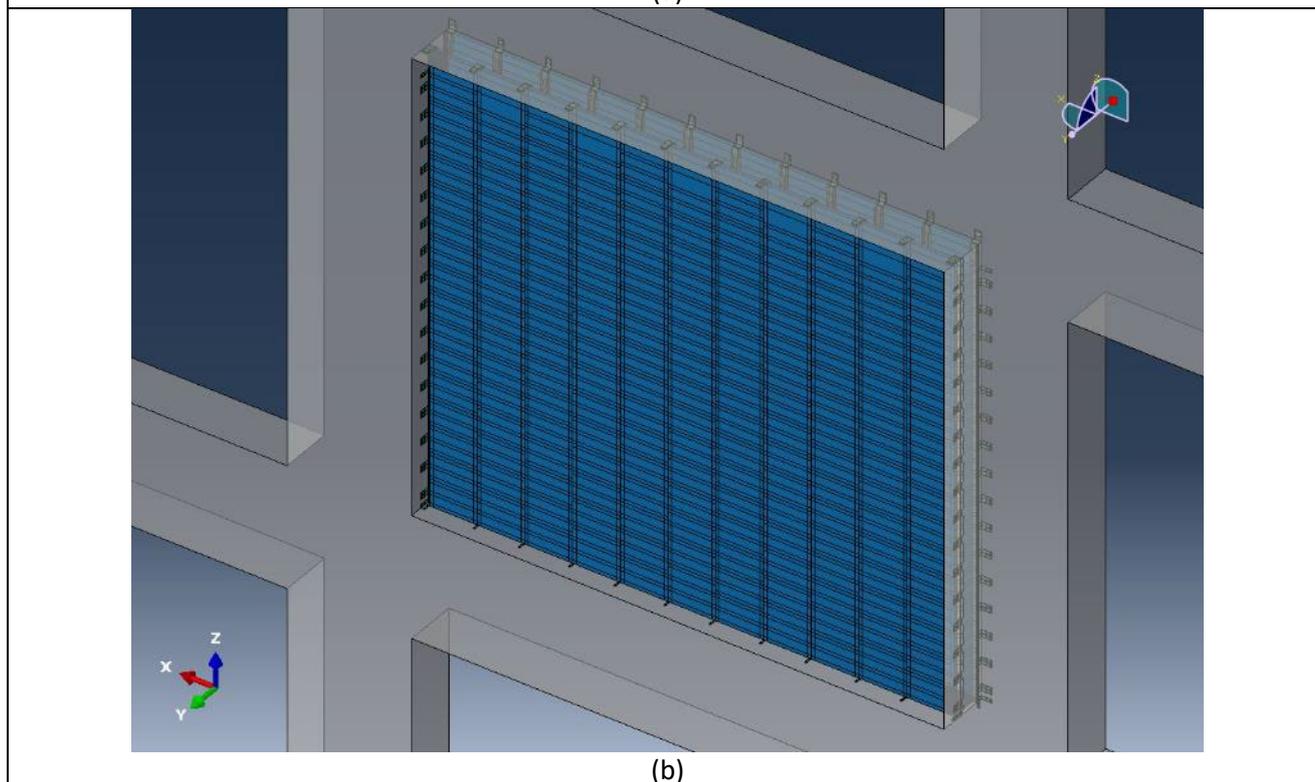
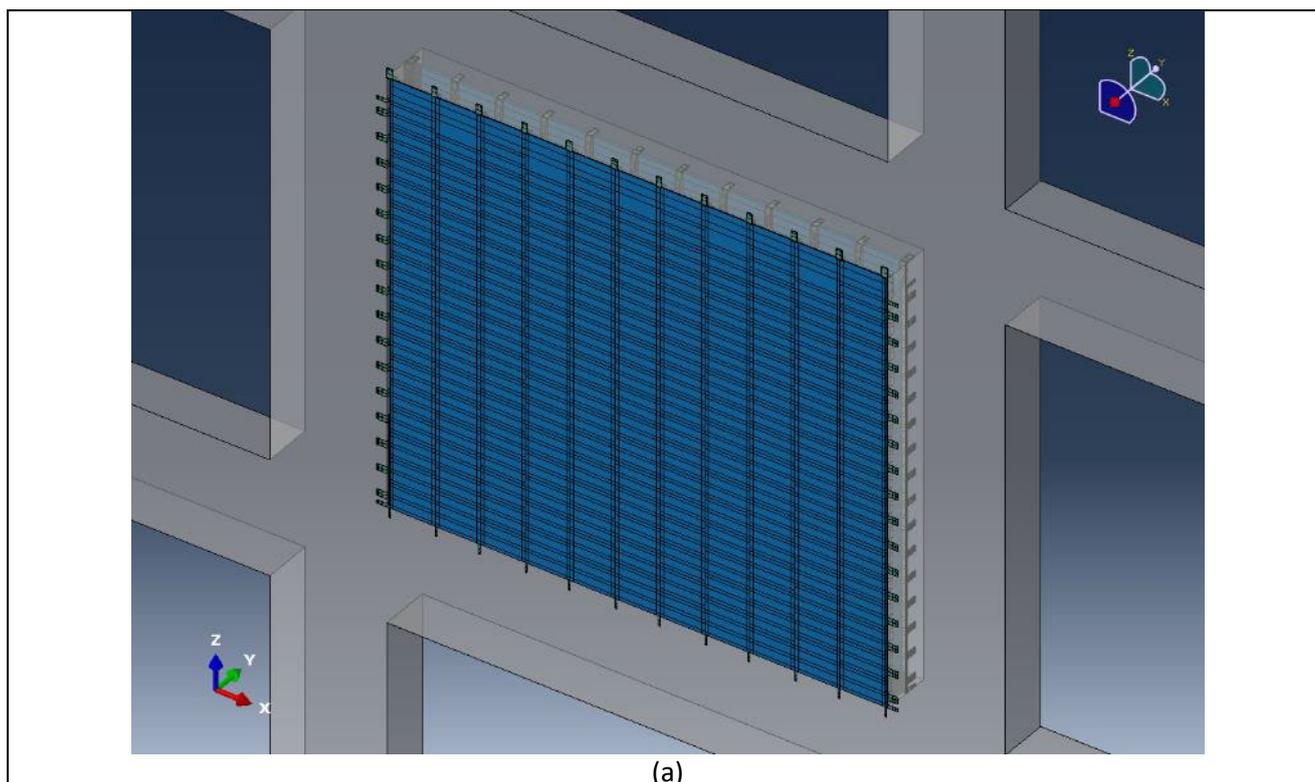
Figura 40: FASE 5: (a) Vista lato esterno edificio; (b) Vista lato esterno frontale; (c) Vista lato esterno ruotata.



FASE 6: Inserimento di *profili metallici verticali* aventi funzione irrigidente e di vincolo intermedio tra la parete di tamponatura e la trave superiore.

Al di sopra dell'ultima fila di mattoni si inseriscono dei profili metallici verticali che, collegati alla parete di tamponatura mediante i ferri di attesa e alla trave superiore mediante angolari, consentono di completare la connessione al telaio.

Figura 41: FASE 6: (a) Vista lato esterno edificio; (b) Vista lato esterno ruotata; (c) Vista lato interno ruotata.



FASE 7: Chiusura completa della parete con inserimento di pannelli di finitura negli spazi vuoti generati dallo sfalsamento verticale tra le colonne.

La disposizione dei mattoni a colonne sfalsate in altezza, necessaria per consentire la connessione tra mattoni adiacenti di una fila e tra file contigue, comporta la presenza di spazi vuoti alla base e nella parte sommitale della parete. Tali spazi vuoti sono chiusi mediante pannelli di finitura posti in opera, sul lato interno e sul lato esterno della parete, incollandoli ai profili metallici verticali introdotti in FASE 6 e agli elementi delle maglie metalliche dei mattoni della prima fila.

Figura 42: FASE 7: Parete completa (a) Vista lato esterno edificio; (b) Vista lato interno edificio.

2.2 Simulazione termo-igrometrica

Le simulazioni termoigrometriche sono state eseguite sulle stesse 4 tipologie di parete analizzate nei paragrafi precedenti.

Ciascuna parete oggetto della simulazione ha le caratteristiche geometriche e fisiche elencate di seguito. In particolare, la parete è costituita da un “pacchetto” di tre differenti componenti (vedi Figura 43): strato perimetrale esterno coibente in pannelli di legno o di canapa; secondo strato perimetrale occupato dalla struttura metallica; pacchetto condensatore intercluso centrale.

Gli spessori del condensatore centrale e della struttura metallica sono uguali per le 4 pareti, ma cambiano spessore e materiale del rivestimento esterno. Le caratteristiche delle pareti per le quali è stata eseguita una modellazione numerica con il programma WUFI® sono sanitzate in **Tabella 9**.

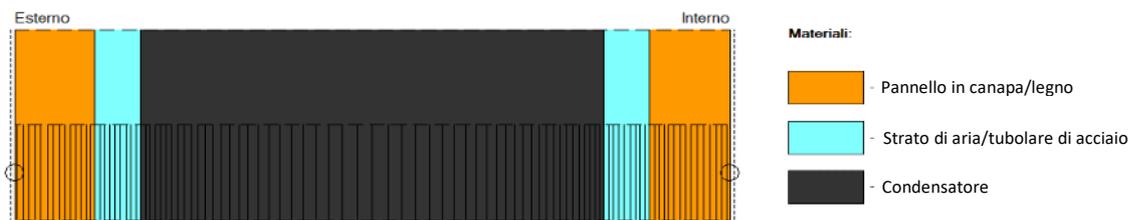


Figura 43: Stratigrafia parete.

Tabella 9: Configurazione delle pareti analizzate

CONFIGURAZIONE	Materiale rivestimento	Spessore rivestimento	Dimensione profilo acciaio	Spessore condensatore
1	Legno	20 mm	11,4 mm	115,5 mm
2	Canapa	20 mm	11,4 mm	115,5 mm
3	Legno	30 mm	11,4 mm	115,5 mm
4	Canapa	30 mm	11,4 mm	115,5 mm

Le caratteristiche dei materiali dei pannelli coibenti esterni sono state ricavate dalle schede tecniche degli stessi reperite on line, mentre per lo strato interno occupato dal condensatore sono state ricavate da un sito specializzato¹.

Si riportano di seguito le tabelle di sintesi delle caratteristiche dei materiali inserite in WUFI ed esportate direttamente dal programma stesso.

Materiale: Pannello a base di legno (densità 565 kg/m³)

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m ³]	565
Porosità	[m ³ /m ³]	0.64
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	1400
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.12
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	134
Supplemento alla conducibilità termica, dip. umidità	[%/M.-%]	1.5
Supplemento conducibilità termica, temp.	[W/(m K ²)]	0.0002

¹<http://www.matweb.com/search/DataSheet.aspx?MatGUID=a696bdcdf6f41dd98f8eec3599eaa20&ck=1>

Materiale: Pannello in canapa

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m³]	700
Porosità	[m³/m³]	0.4
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	1870
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.129
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	12.3
Contenuto d'umidità di riferimento	[kg/m³]	65.09
Acqua di libera saturazione	[kg/m³]	95.92
Coefficiente di assorbimento d'umidità	[kg/(m² s⁰.5)]	0.047
Supplemento alla conduttività termica, dip. umidità	[%/M.-%]	10
Supplemento conduttività termica, temp.	[W/(m K²)]	0.0002

Materiale: Strato d'aria 20 mm

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m³]	1.3
Porosità	[m³/m³]	0.999
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	1000
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.13
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	0.56

Materiale: Acciaio

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m³]	7800
Porosità	[m³/m³]	0
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	450
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	60
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	100000
Conduttività termica di progetto	[W/(m K)]	60

Il valore del fattore di resistenza alla diffusione di vapore si ottiene dal rapporto tra la permeabilità dell'aria e quella del prodotto. L'acciaio, che ha un valore di permeabilità nullo, quindi darebbe una forma indeterminata che porterebbe ad un valore infinito del prodotto. Il valore 10000 scelto è rappresentativo di questo e rappresenta l'elevata resistenza del materiale, paragonabile a quella delle barriere al vapore.

Materiale: *Pacchetto condensatore

Proprietà	Unità	Valore
Densità apparente	[kg/m³]	1322
Porosità	[m³/m³]	0
Capacità termica a secco	[J/(kg K)]	1140
Conducibilità termica a secco, 10°C	[W/(m K)]	0.2
Fattore di resistenza alla diffusione di vapore	[-]	100000

Per il pacchetto condensatore in film sottile il valore di porosità non è fornito dalle tabelle del sito specializzato citato sopra. E' stato impostato un valore limite pari a zero, onde simulare la sua elevata compattezza, confrontabile con quella dell'acciaio.

2.2.1 Definizione delle condizioni al contorno

L'edificio oggetto di analisi si ipotizza ubicato a Modena, con volume pari a 500 metri cubi e con 4 camere da letto. La parete si considera rifinita esternamente con intonaco acrilico di colore chiaro e internamente con intonaco di gesso.

L'arco temporale dell'analisi va dal 01/10/2020 al 01/10/2023.

Il clima esterno, quindi, sarà quello di Modena, ricavato dai dati contenuti nei database del programma WUFI®.

Il clima interno sarà condizionato dal solo riscaldamento d'inverno, con una temperatura di 21°C e uno scostamento di 2.8°C, una produzione di umidità standard legata alla Classe 3 (civili abitazioni).

Le variazioni di temperatura ed umidità dell'aria, interna ed esterna, nei tre anni di analisi, sono riportate in Figura 44.

La parete si considera esposta a Nord-Ovest.

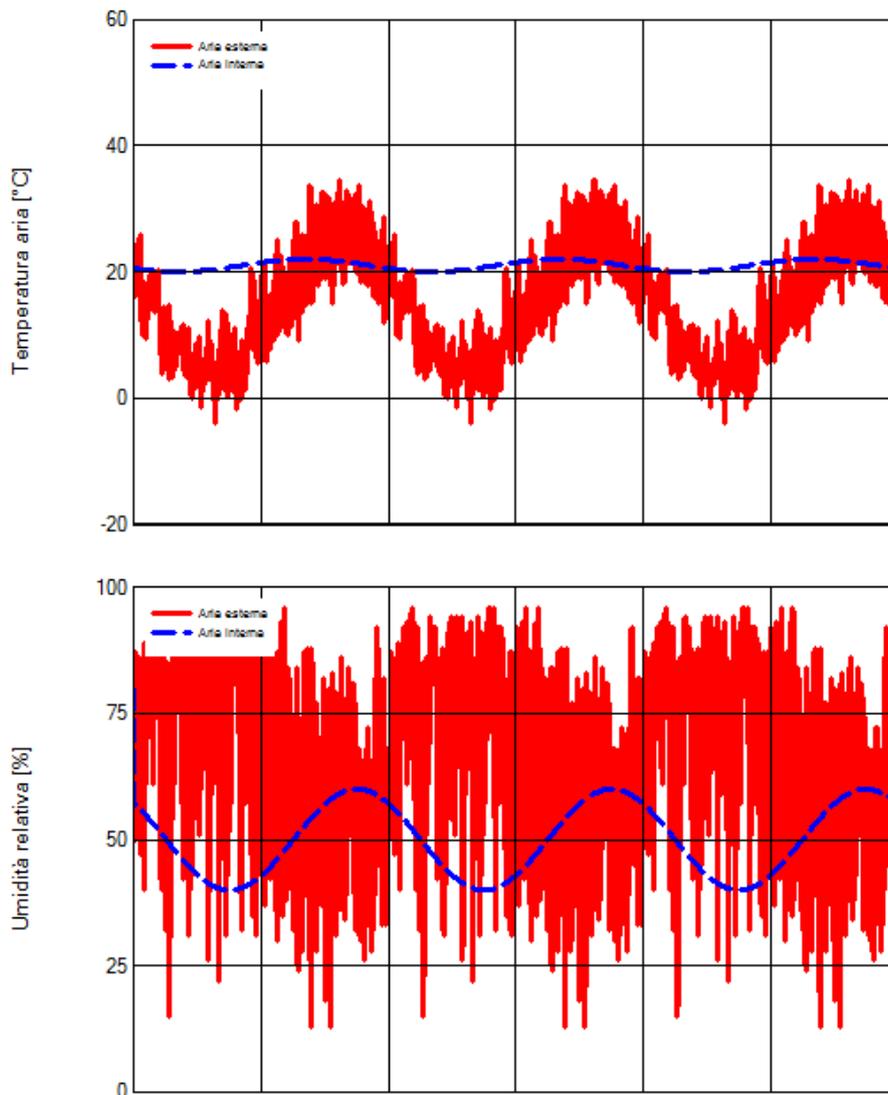


Figura 44: Clima interno ed esterno (Temperatura e Umidità)

2.2.2 Modelli analizzati

I modelli di parete analizzati con WUFI® sono stati confrontati per valutare le performance termigrometriche e selezionare il pacchetto parete più performante da poter utilizzare per la fase di prototipazione.

In particolare, i modelli analizzati hanno le seguenti stratigrafiche:

- Modello 1.1: la parete è costituita da uno strato coibente esterno realizzato da un pannello in fibre di legno di spessore 20mm, un'intercapedine parzialmente occupata dal profilo metallico, il pacchetto condensatore e poi simmetricamente intercapedine e strato coibente di pannello di fibre di legno interno;
- Modello 1.2: la parete è costituita da uno strato coibente esterno realizzato da un pannello in fibre di legno di spessore 30mm, un'intercapedine parzialmente occupata dal profilo metallico, il pacchetto condensatore e poi simmetricamente l'intercapedine e lo strato coibente di pannello di fibre di legno interno;
- Modello 2.1: la parete è costituita da uno strato coibente esterno realizzato da un di canapa di spessore 20mm, un'intercapedine parzialmente occupata dal profilo metallico, il pacchetto condensatore e poi simmetricamente intercapedine e strato coibente di pannello di fibre di legno interno;
- Modello 2.2: la parete è costituita da uno strato coibente esterno realizzato da un pannello di canapa di spessore 30mm, un'intercapedine parzialmente occupata dal profilo metallico, il pacchetto condensatore e poi simmetricamente l'intercapedine e lo strato coibente di pannello di fibre di legno interno;

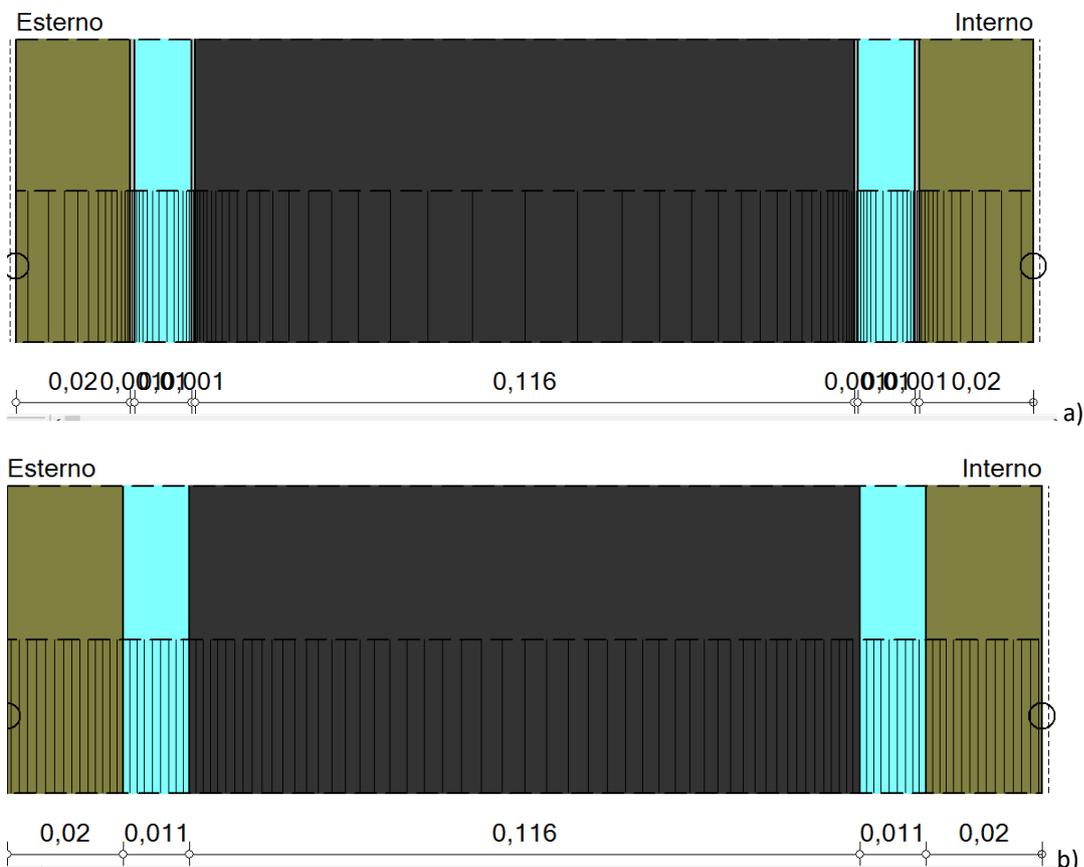


Figura 45: Modelli 1.1a e 1.1b preliminari : a) presenza elemento scatolare in acciaio; b) strato di sola aria.

Preliminarmente, considerando che lo strato occupato dalla struttura metallica non è pieno, ma quest'ultima è costituita da profili metallici sottili di piccole dimensioni composti a formare una H, e quindi si alternano spazi vuoti con spazi occupati dal profilo, sono state analizzate le due condizioni limite: strato di sola aria e strato di elemento scatolare (comunque contenente aria) come riportato in Figura 53. In tal modo è stato possibile valutare se ci fossero differenze significative di performance. Il profilo metallico cavo, quadrato di lato 11.4 mm, ha spessore 0.7mm.

2.2.3 Confronto tra i risultati

I confronti sono stati fatti in termini di Temperatura e Umidità relativa, lette sulle pareti esterna ed interna. Inoltre, sono stati confrontati i valori del Contenuto di Umidità dell'intero pacchetto parete.

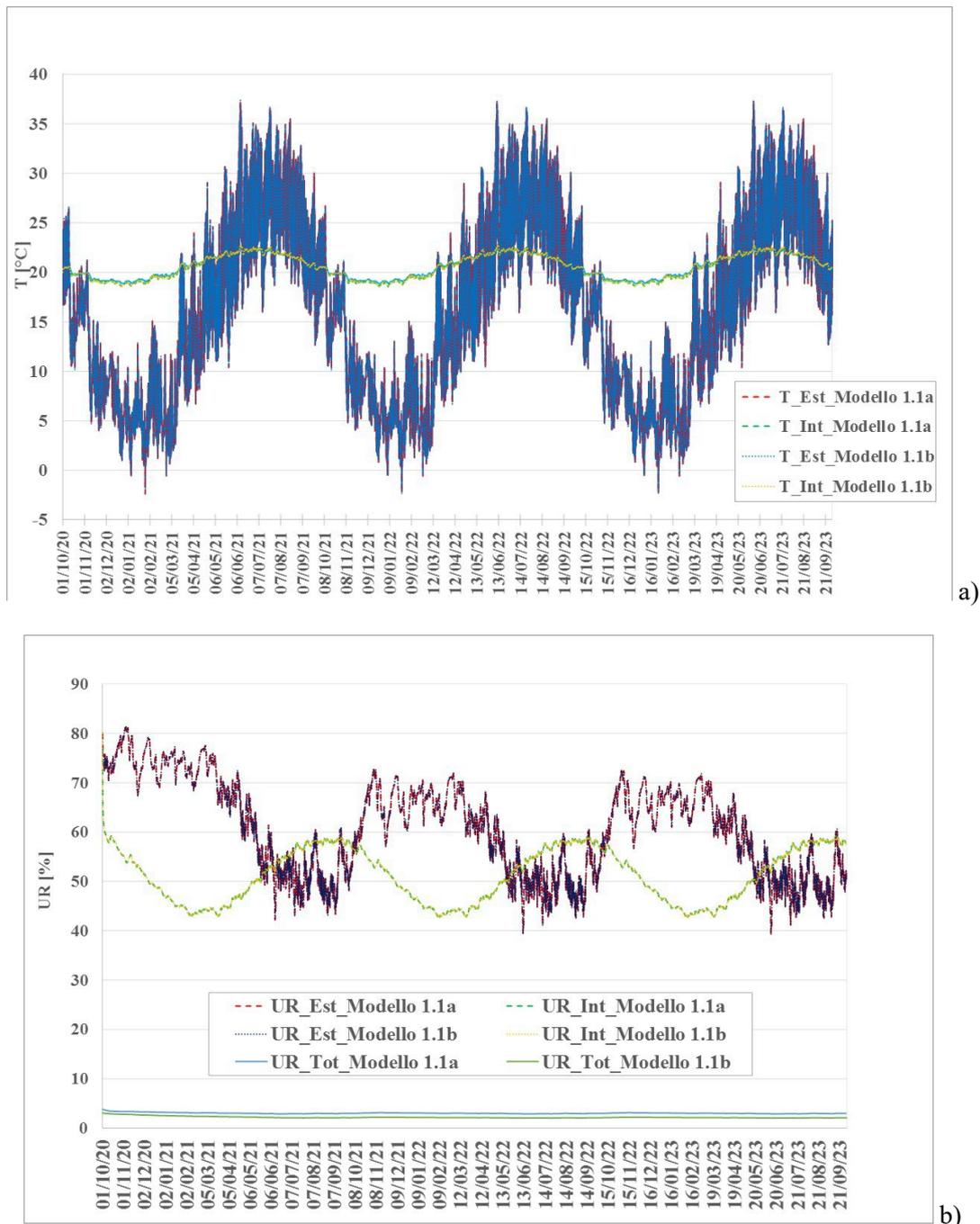


Figura 46: Confronto tra i modelli 1.1a e 1.1b: a) andamento della temperatura; b) andamento dell'umidità.

Il primo confronto ha riguardato il comportamento tra i due modelli 1.1a e 1.1b, dai quali si evince che non ci sono differenze significative di comportamento (vedi Figura 46), pertanto si analizzeranno i modelli con la sola intercapedine d'aria, elencati nel paragrafo precedente.

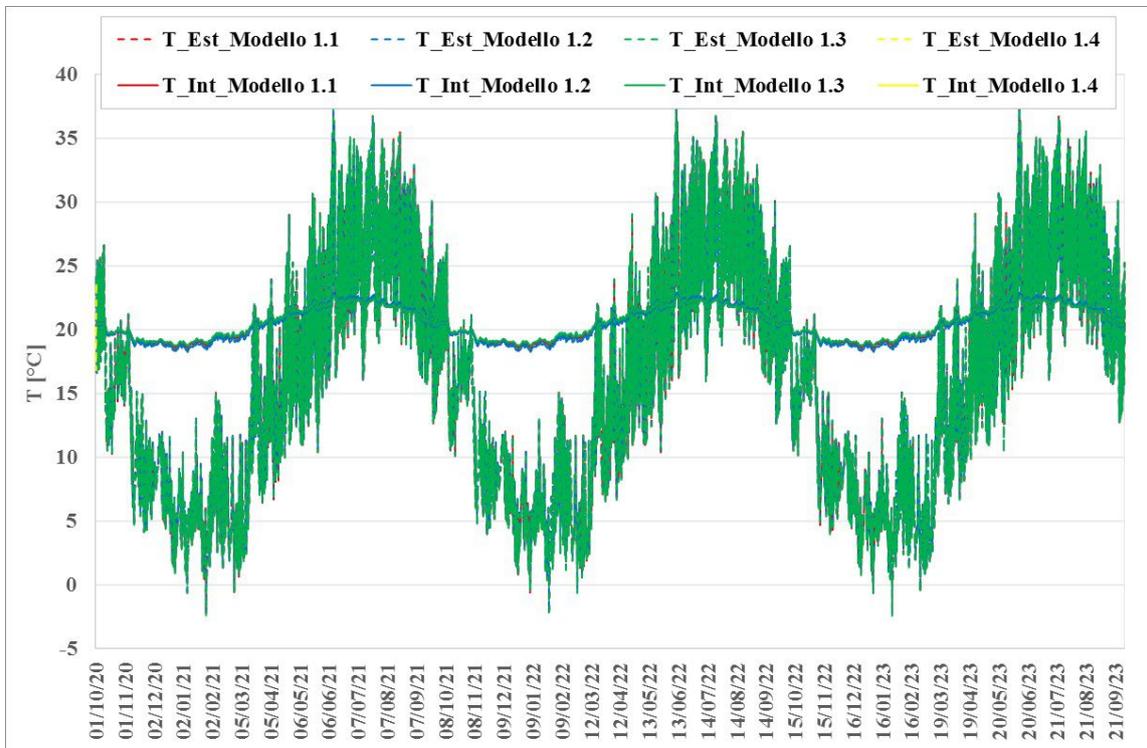


Figura 47: Confronto in termini di temperatura sulle due facce della parete

Dai grafici di confronto (vedi Figura 47 e Figura 48) si evince che:

- Tutti i modelli analizzati mostrano valori con differenze trascurabili, sia in termini di temperatura (Figura 46) che di contenuto di umidità relativa e totale (Figura 47), misurate sulle pareti;
- I modelli con pannello esterno in canapa o legno hanno la stessa performance, quindi la scelta della tipologia di rivestimento esterno del modulo-mattone in esame, che sia con pannelli in canapa o con pannelli in legno è del tutto equivalenti;
- I modelli con rivestimento di spessore 2cm o 3cm presentano la stessa performance sia in termini di temperatura che di contenuto di umidità relativa e totale;
- Le temperature misurate sulle pareti esterna e interna poco si discostano dalle temperature ambiente esterno ed ambiente interno, rispettivamente;
- La parte interna della parete non è influenzata dalla temperatura esterna, quindi il pacchetto parete realizzato col modulo-mattone analizzato presenta una buona capacità coibente;
- Il basso contenuto di umidità totale dalla parete (inferiore al 5% per tutti i casi analizzati) è la dimostrazione della capacità della parete di “respirare”, esprimendo quindi ancora una buona performance.



Figura 48: Confronto in termini di umidità relativa sulle due facce della parete e umidità totale nell'elemento.

2.3 Costruzione (pre-)prototipo

2.3.1 Modello in scala ridotta da stampa 3D

La stampa 3D consente la realizzazione automatica di oggetti o parti di oggetti sulla base di un disegno tridimensionale digitale. Per geometrie semplici tale metodo di produzione non può competere in termini di tempo e costi rispetto ad altri metodi per produzione massiva, ma risulta utile e vantaggioso per la realizzazione prototipale. Poiché avviene tramite materiali plastici, in questo caso non c'è potuta essere corrispondenza con i materiali elettivi (metallici, lignei o fibre naturali) ma soltanto con le geometrie dei componenti e le loro relazioni di assemblabilità meccanica.

L'esperimento di stampa 3D in scala ridotta 1:2 è stato inteso anche per sondare tecniche di fabbricazione totale o parziale del modulo mattone. In questo senso, si sono rivelate immediatamente delle difficoltà legate alla resa del materiale plastico di stampa in relazione allo sviluppo verticale o orizzontale e al raffreddamento dell'estruso durante la deposizione. Figura 49 mostra, ad esempio, distacchi dal piano di stampa, errori di deposizione e imbarcamenti. Si ipotizzano per il futuro esperimenti con filamenti di materiale di tipo diverso, in particolare quelli addizionati con fibre lignee e elementi metallici per avvicinarsi ai materiali elettivi. Stante le difficoltà di resa, per le parti planari si è optato quindi per il ritaglio di una lastra di plastica alleggerita (Figura 50). Pur essendo di fattura grezza, sono stati agevolmente assemblati per realizzare l'involucro, secondo le fasi dettagliate al Paragrafo 2.1.2 (Tabella 10).

Dopo numerosi tentativi, si è scelto di realizzare i modelli dei profilati in ABS con orientamento orizzontale (Tabella 11) e minore temperatura di deposizione per evitare riduzioni ed imbarcamenti al raffreddamento. La resa è stata soddisfacente e ha consentito l'incastro meccanico tra i profili (Figura 51) e la realizzazione del prototipo completo in scala ridotta (Figura 52).

La costruzione di due prototipi (Figura 53) ha consentito di verificare anche la accettabilità meccanica della posa in opera descritta al paragrafo 2.1.

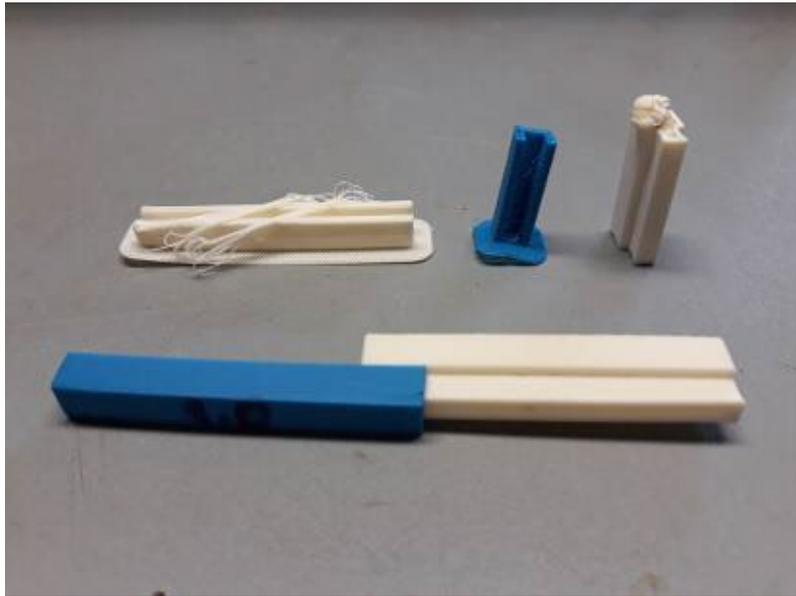


Figura 49: Dettaglio difetti iniziali nella stampa 3D in materiale plastico.

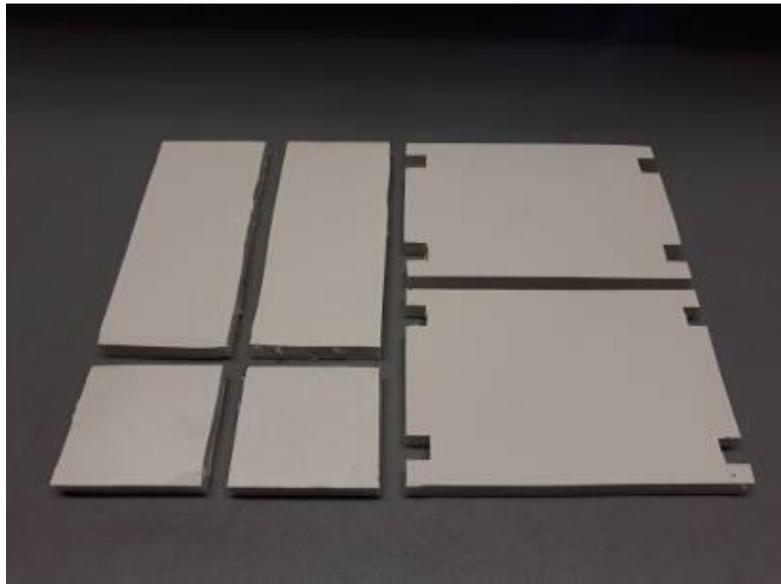
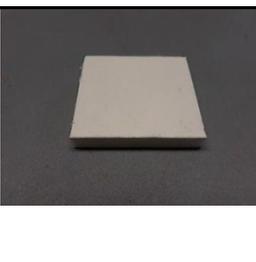
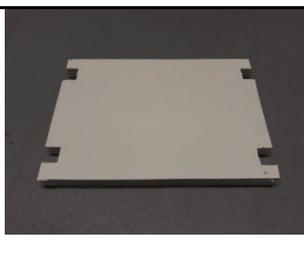
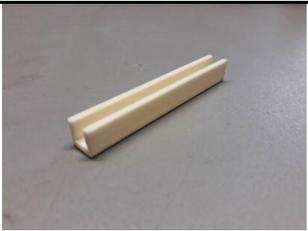


Figura 50: Componenti di ritaglio per la realizzazione del rivestimento in materiale plastico.

Tabella 10: Geometria del rivestimento del prototipo in scala ridotta 1:2 in materiale plastico. (corrispondente a Tabella 1).

Ingombro complessivo	Pannelli necessari per il rivestimento del singolo mattoncino		
Spessore di rivestimento 10 mm	2 Pannelli di Tipo F	2 Pannelli di Tipo G	2 Pannelli di Tipo H
			

**Tabella 11: Modelli dei profili metallici realizzati in ABS.
(corrispondenti a Tabella 2).**

Profili a coda di rondine	
2 Maschi	2 Femmine
	

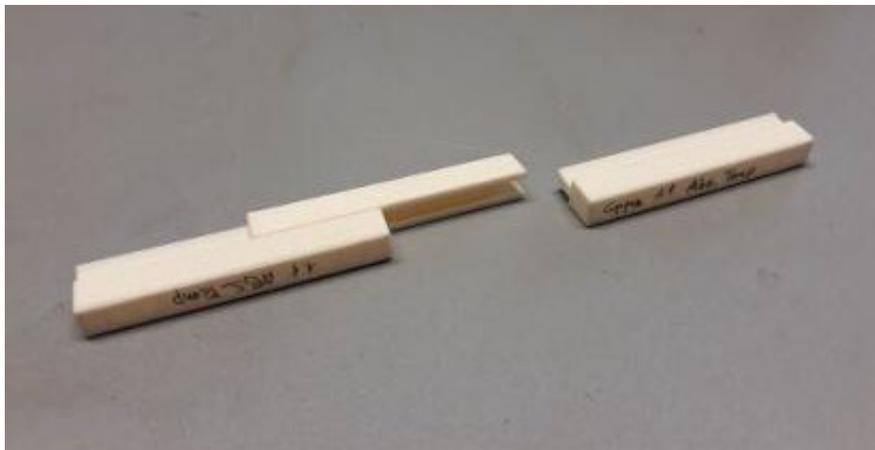


Figura 51: Incastro tra i profili.



Figura 52: Prototipo di plastica in scala ridotta.

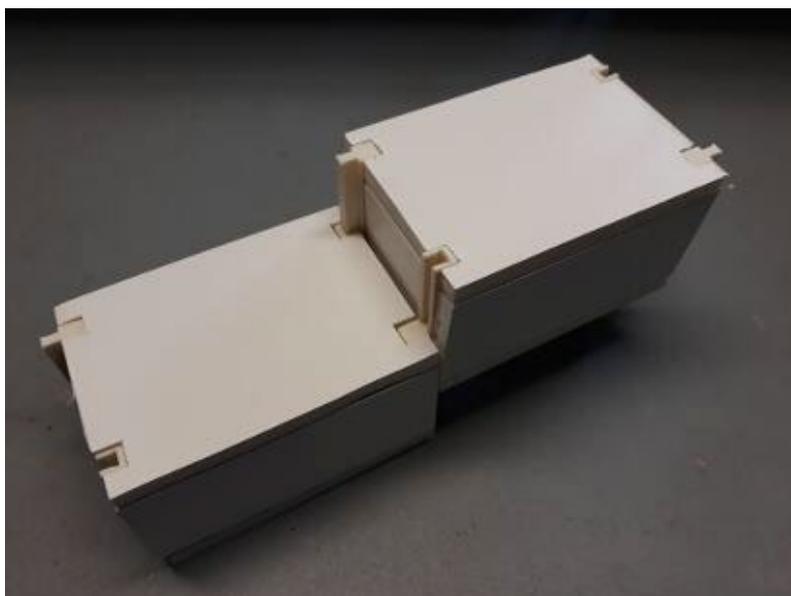


Figura 53: Incastro fra mattoni in materiale plastico.

Pur con i limiti citati, si è potuto verificare la costruibilità del manufatto singolo e la componibilità della muratura di tamponatura.

Si è altresì evidenziato, se si rinuncia alla planarità dei componenti, come sia possibile pensare ad una realizzazione dell'intero prototipo in un numero inferiore di pezzi. Utilizzando un doppio estrusore e due tipi di materiale (di cui uno a base plastica ma con caratteristiche metalliche ed elettricamente conduttivo) si può ipotizzare di realizzare l'intero guscio del mattone completo di profili a incastro in unica passata e elettricamente funzionante. Questa possibilità sarà oggetto di approfondimento nella Terza Annualità.

2.3.2 Modello in scala reale

Avendo verificato la componibilità di principio della soluzione progettuale tramite un modello plastico tridimensionale (Paragrafo 2.3.1), è stato poi realizzato un prototipo del modulo-mattone in legno in scala 1:1 (Figura 55) secondo le specifiche geometriche riportate nel paragrafo 2.1.1 e utilizzate per le simulazioni numeriche.



Figura 54: Prototipo assemblato.

Il primo prototipo quindi, come da tradizione meccanica, è stato interamente realizzato in legno e non risulta elettricamente funzionante. Questo ha permesso tuttavia di verificare non soltanto le geometrie dei componenti (Tabella 12) e le loro relazioni di assemblabilità meccanica (Figura 56 e Figura 57), ma anche la producibilità a partire da una tavola di legno. Le operazioni di taglio sono semplici e automatizzabili, come anche quelle di assemblaggio del guscio. La struttura metallica verrà presa in considerazione nelle attività della Terza Annualità per realizzare un prototipo funzionante.

Tabella 12: Geometria del rivestimento del prototipo in scala reale 1:1 in legno (corrispondente a Tabella 1).

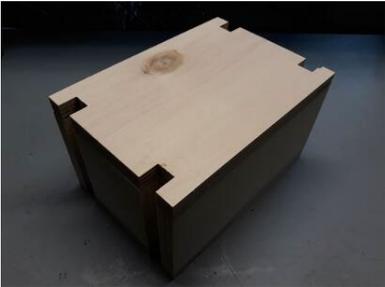
Ingombro complessivo	Pannelli necessari per il rivestimento del singolo mattoncino		
Spessore di rivestimento 20 mm 	2 Pannelli di Tipo F (269mmx114mmx20mm) 	2 Pannelli di Tipo G (114mmx107mmx20mm) 	2 Pannelli di Tipo H (269mmx187mmx20mm) Fori da 20mmx20mm a 20mm di distanza dal bordo 

Tabella 13: Modelli dei profili metallici realizzati in legno (corrispondenti a Tabella 2).

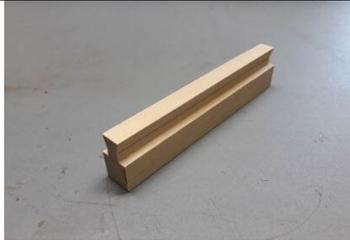
Profili a coda di rondine	
2 Maschi	2 Femmine
	



Figura 55: Incastro tra i profili.

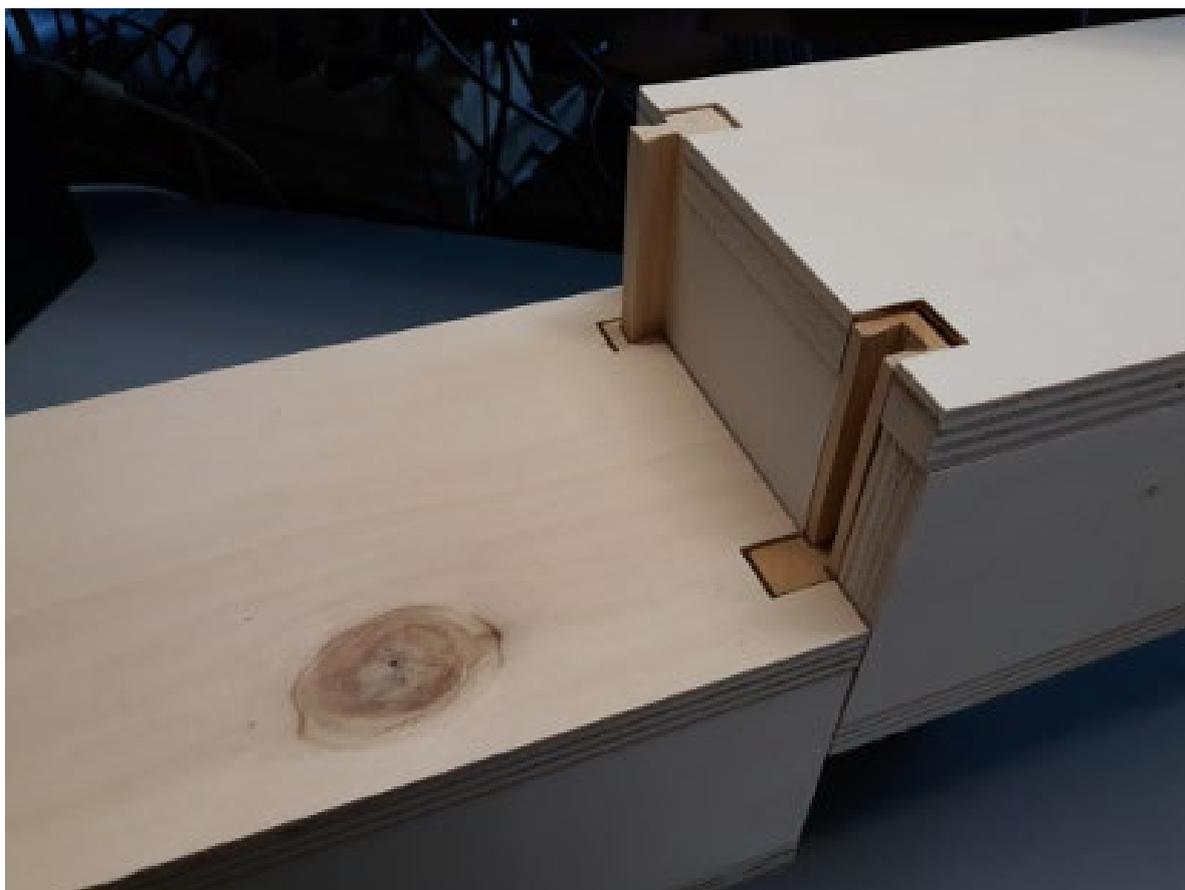


Figura 56: Incastro fra mattoni.



Figura 57: Componenti ricavati da una sola tavola.

3 Conclusioni

Le attività svolte nel corso della Seconda Annualità hanno consentito di raggiungere un duplice obiettivo:

- a) dimostrare la fattibilità strutturale e descrivere la performance termo-igrometrica di una parete di tamponatura realizzata in moduli di mattone condensatore;
- b) costruire un pre-prototipo di modulo-mattone in legno in scala 1:1.

Il primo obiettivo è stato perseguito svolgendo delle analisi numeriche mediante software agli elementi finiti, per simulare la risposta meccanica, e software di analisi termo-igrometrica, per simulare il trasferimento di calore e umidità.

Con particolare riferimento alla risposta meccanica, si è passati dallo studio numerico del comportamento del modulo-mattone sollecitato con soli carichi verticali (oggetto della Prima Annualità) alla simulazione di un'intera parete di tamponatura soggetta a carichi sismici. È stato raggiunto un elevato livello di dettaglio della modellazione, costruendo la parete per assemblaggio di singoli moduli mattone e ciascuno di essi per assemblaggio di parti elementari (condensatore, profili metallici, elementi di alloggiamento/riempimento, rivestimento esterno). Ciò ha consentito di valutare singolarmente, e tenendo conto delle interazioni reciproche, la risposta di ciascuna parte. Per la definizione del carico sismico sono state formulate delle ipotesi di tipo conservativo, assumendo che la parete sia realizzata in una zona a elevata pericolosità sismica, e con rilevanti amplificazioni locali, e all'interno di un edificio in cui sia massimizzata l'interazione dinamica tra telaio e tamponatura. Sono state simulate quattro Configurazioni diverse, studiando la dipendenza del sistema dai due parametri che, con maggior probabilità, si ritiene possano variare nei casi applicativi: il tipo di materiale utilizzato per il rivestimento esterno e il suo spessore. I risultati ottenuti hanno evidenziato un buon comportamento della parete. Per ciascuna parte elementare, di ciascun modulo mattone, si è registrato, infatti, un livello di sollecitazione inferiore rispetto alla resistenza del materiale di cui è costituita. Ciò ha consentito di dimostrare la fattibilità strutturale del sistema lasciando anche margine per modifiche o affinamenti che potranno nascere in fase di costruzione.

Infine, benché lo studio del sistema di connessione tra parete e telaio non sia oggetto della presente attività di ricerca, è stata formulata una prima ipotesi concettuale delle fasi di posa in opera e di collegamento della parete agli elementi strutturali (travi e pilastri).

Le analisi numeriche termoigrometriche condotte con il programma WUFI® hanno consentito di constatare una buona prestazione della parete in termini di isolamento termico e traspirabilità. Inoltre, avendo constatato che il blocco mattone offre le stesse performance con il rivestimento sia di materiale ligneo sia di materiale canapa, nella realizzazione del prototipo si potrà scegliere l'uno o l'altro materiale in funzione di altri fattori (reperibilità costi, lavorabilità, caratteristiche meccaniche, ecc.).

4 Riferimenti bibliografici

1. M. Artioli, A. Marzo, C. Triepi. 2018. Elemento di tamponature con sistema di accumulo energetico integrato. Domanda brevetto n. 102018000006280. Data deposito 13/06/2018. Titolare brevetto: ENEA.
2. M. Artioli, S. Beozzo, A. Marzo, C. Triepi. Tamponature con accumulo elettrico integrato: prima validazione in simulazione. Report/Ricerca di Sistema Elettrico-ENEA, Roma, *in pubblicazione*.
3. MIT (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti). 2019. Istruzioni per l'applicazione dell' 'Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni' di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana G.U. 11.02.2019, Serie Generale 35, Supplemento Ordinario 5. Rome: MIT.
4. MIT (Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti). 2018. Aggiornamento delle Norme Tecniche per le Costruzioni. NTC (Norme Tecniche per le Costruzioni) 2018. Gazzetta Ufficiale della Repubblica Italiana G.U. 20.02.2018, Serie Generale 42, Supplemento Ordinario 8. Rome: MIT.