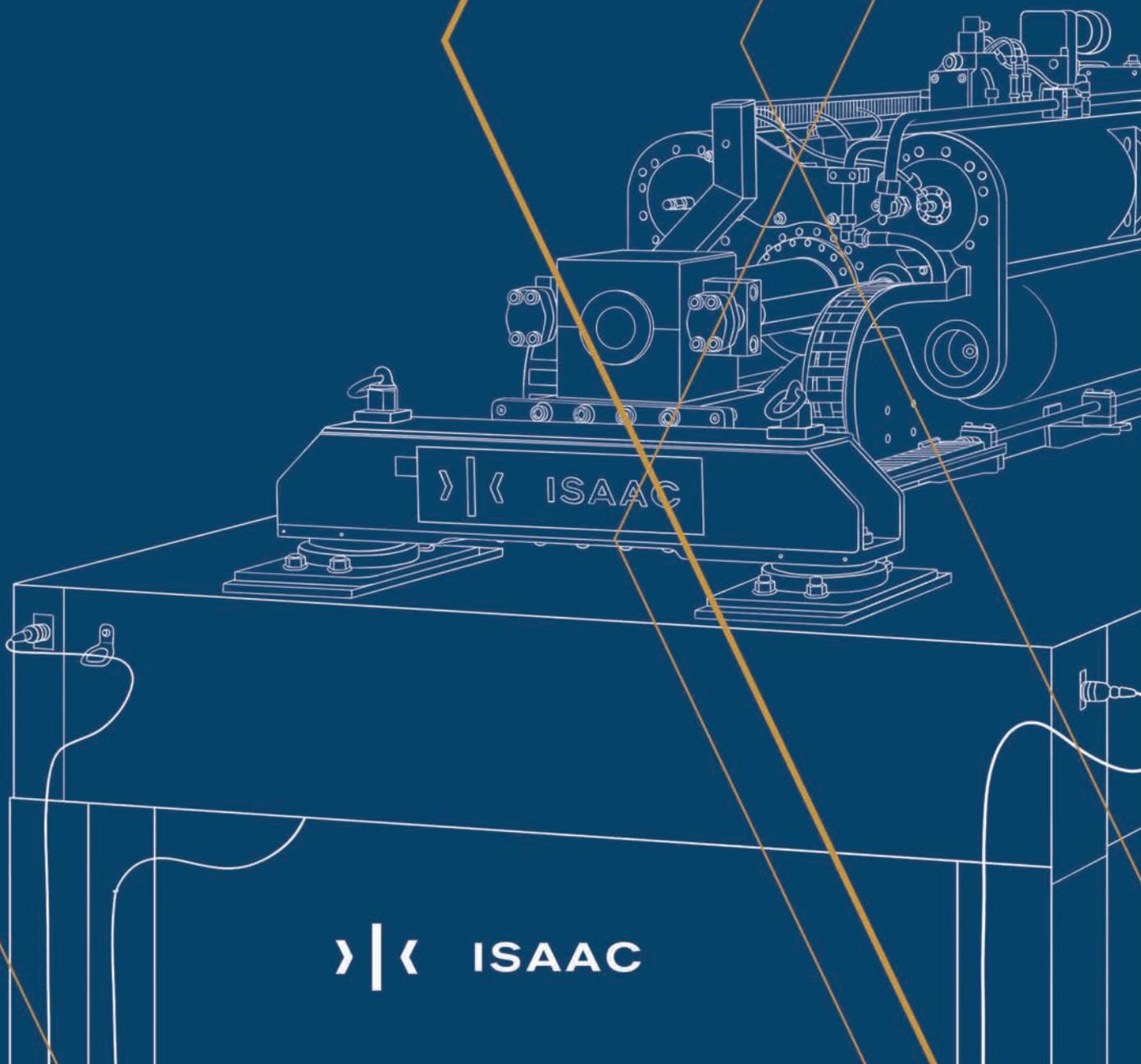


**Prove di laboratorio
Sistema di Controllo
Attivo I-Pro 1:
I RISULTATI.**



> | < ISAAC



PROVE DI LABORATORIO SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO I-PRO 1: I RISULTATI.

INDICE

01	Introduzione	4
	Obiettivo	5
02	Sistema di controllo attivo della risposta sismica I-Pro 1	6
	Descrizione generale	6
03	Campagna sperimentale: edifici di prova	10
	Descrizione degli edifici testing	11
	Setup installato	12
	Analisi dinamica edifici	14
04	Sistema di controllo qualità: Hardware in the Loop	19
	Descrizione del sistema di controllo qualità	19
	Risultati	20
05	Analisi delle prove sperimentali	23
	Sisma PGA 0,1 G.	24
	Sisma PGA 0,24 G.	26
	Sisma PGA 0,26 G.	29
	Sisma PGA 0,44 G.	32
06	Conclusioni	46
	Risultati delle prove di laboratorio	46
	Appendice	47

01 INTRODUZIONE.



Negli ultimi anni si è investito molto per effettuare opere di riqualificazione di edifici esistenti, al fine di renderli sicuri in caso di evento sismico. Tuttavia, le tecnologie tradizionali implicano interventi altamente invasivi, che spesso costringono allo sgombero dell'intero fabbricato, o la rimozione di impianti esistenti all'interno dell'edificio, disincentivando i proprietari dell'immobile ad effettuare l'intervento di miglioramento, o adeguamento sismico. Spesso, inoltre, le operazioni di riqualificazione prevedono la rimozione di componenti architettonici, elementi che costituiscono gran parte del valore dell'immobile. Questo rende di fatto l'intervento costoso e di difficile attuazione obbligando il progettista a poter agire principalmente sull'esterno della struttura, o potendo effettuare per lo più interventi locali di rinforzo, senza poter agire in modo

importante sul comportamento globale dell'edificio. Negli ultimi anni, nel mercato dell'ingegneria sismica e strutturale, si è assistito ad un forte incremento dell'utilizzo di tecnologie attive nel settore, in primis per il monitoraggio strutturale. Tuttavia, questa tecnica permette di tenere sotto controllo il comportamento del fabbricato, ma non di poterne controllare la risposta sismica. ISAAC ha sviluppato I-Pro 1, il primo sistema di controllo attivo della risposta sismica distribuito sul mercato Europeo che permette di migliorare significativamente il

comportamento globale della struttura soggetta ad un evento sismico. Il sistema viene installato sull'ultimo impalcato dell'edificio con interventi non-invasivi, permettendo quindi di mantenere il patrimonio architettonico dell'edificio, non limitando le libertà d'intervento del progettista e soprattutto creando il minor disturbo possibile ad i residenti del fabbricato oggetto di intervento. Per verificare il funzionamento e l'efficacia di questa tecnologia innovativa, ISAAC ha deciso di testare tramite prova comparativa il sistema di controllo attivo I-Pro 1, confrontando il comportamento di due edifici in scala reale costruiti presso i laboratori EUCENTRE di Pavia e sottoponendoli ad evento sismico su tavola vibrante, analizzando così il miglioramento sismico apportato dal sistema di controllo attivo installato su uno dei due edifici.

I terremoti rientrano tra i pericoli più grandi per la popolazione e per le infrastrutture italiane, come risulta ben evidente dai dati presenti nella tabella. In circa 45 anni si sono verificati più di 4,650 eventi sismici, con un costo totale per le ricostruzioni di oltre 121 miliardi di Euro. Questo è dovuto non solo all'alto rischio sismico del territorio, ma anche all'alta vulnerabilità del patrimonio edilizio italiano.

Evento	Anno	Magnitudo (Mw)	Morti	Pianificazione interventi di ricostruzione	Costo aggiornato al 2014 (miliardi di €)
Valle del Belice (*)	1968	6.1	370	1968-2028	9,179
Friuli V.G. (*)	1976	6.4	989	1976-2006	18,540
Irpinia	1980	6.9	2,914	1980-2023	52,026
Marche Umbria (*)	1997	6.0	11	1997-2024	13,463
Puglia Molise (*)	2002	6.0	30	2002-2023	1,400
Abruzzo (**)	2009	6.3	309	2009-2029	13,700
Emilia (**)	2012	6.0	27	2012-	13,300
Totale					121,608

(*) Dati finali sulle risorse allocato allo Stato

(**) Previsione di spese delle autorità locali responsabili della ricostruzione

TABELLA 1
Sommaro dei terremoti più significativi del periodo 1968-2012, magnitudo, morti e costi di ricostruzione.
Fonte: National Council of Engineers study center (2014).

Obiettivo.

Le prove di laboratorio hanno come obiettivo quello di dimostrare secondo lo Stato dell'Arte il funzionamento del sistema di controllo attivo I-Pro 1 installato su edifici in scala reale. Per questo motivo sono stati realizzati due edifici identici a tre impalcati in calcestruzzo armato e tamponati in laterizio ed ancorati allo stesso basamento al fine di simulare su entrambi lo stesso evento sismico. Gli edifici sono stati sottoposti a sismi di intensità crescente al fine di analizzare con metodo

comparativo lo stato di danneggiamento graduale dei due edifici: uno equipaggiato del sistema di controllo attivo I-Pro 1 e l'altro privo di esso. Lo scopo delle prove di laboratorio è stato quindi quello di analizzare il comportamento strutturale di un tipico edificio esistente rispetto allo stesso edificio, tuttavia equipaggiato del sistema di controllo attivo della risposta sismica I-Pro 1. Scopo di questo report è documentare le attività svolte ed i risultati ottenuti durante tutta la campagna sperimentale. Nel *Capitolo 2* viene descritto il sistema di controllo attivo I-Pro 1. Nel *Capitolo 3* viene descritto il setup utilizzato durante le prove. Il *Capitolo 4* è dedicato alle prove Hardware in the Loop effettuate presso i laboratori del Politecnico di Milano, volte ad effettuare verifiche di controllo qualità sul sistema. Nel *Capitolo 5* sono mostrati i risultati ottenuti durante le prove di laboratorio presso EUCENTRE, mentre nel *Capitolo 6* vengono tratte le conclusioni sull'efficacia del sistema I-Pro 1.

02 SISTEMA DI CONTROLLO ATTIVO DELLA RISPOSTA SISMICA: I-PRO 1.

Descrizione generale

Il sistema I-Pro 1 è una macchina attiva ed intelligente per il controllo della risposta sismica di edifici esistenti costituito da 4 componenti base, opportunamente assemblati in un "sistema di controllo attivo della risposta sismica", secondo norma ISO3010:2017 che ne permette l'applicazione a livello nazionale ed internazionale. Nel dettaglio, il sistema si compone dei seguenti componenti:

- ① Macchina IP-D01
- ② Sensori IP-S
- ③ Computer centrale IP-UT
- ④ Batterie tampone IP-A

Sensori IP-S. ②
Sensori accelerometrici analogici a basso rumore elettrico, necessari al continuo monitoraggio del fabbricato ed al controllo della risposta sismica durante il terremoto.

Macchina IP-D01. ①
Sono le masse inerziali che generano le forze di controllo sul fabbricato, unitamente ai relativi quadri elettrici, centraline di ripristino olio ed eventuali banchi accumulatori di olio (ove ritenuti necessari in fase di progettazione). Queste vengono ancorate all'edificio su cui viene effettuato l'intervento di miglioramento sismico, grazie a delle carpenterie leggere che permettono di distribuire il carico verticale ed orizzontale delle macchine.

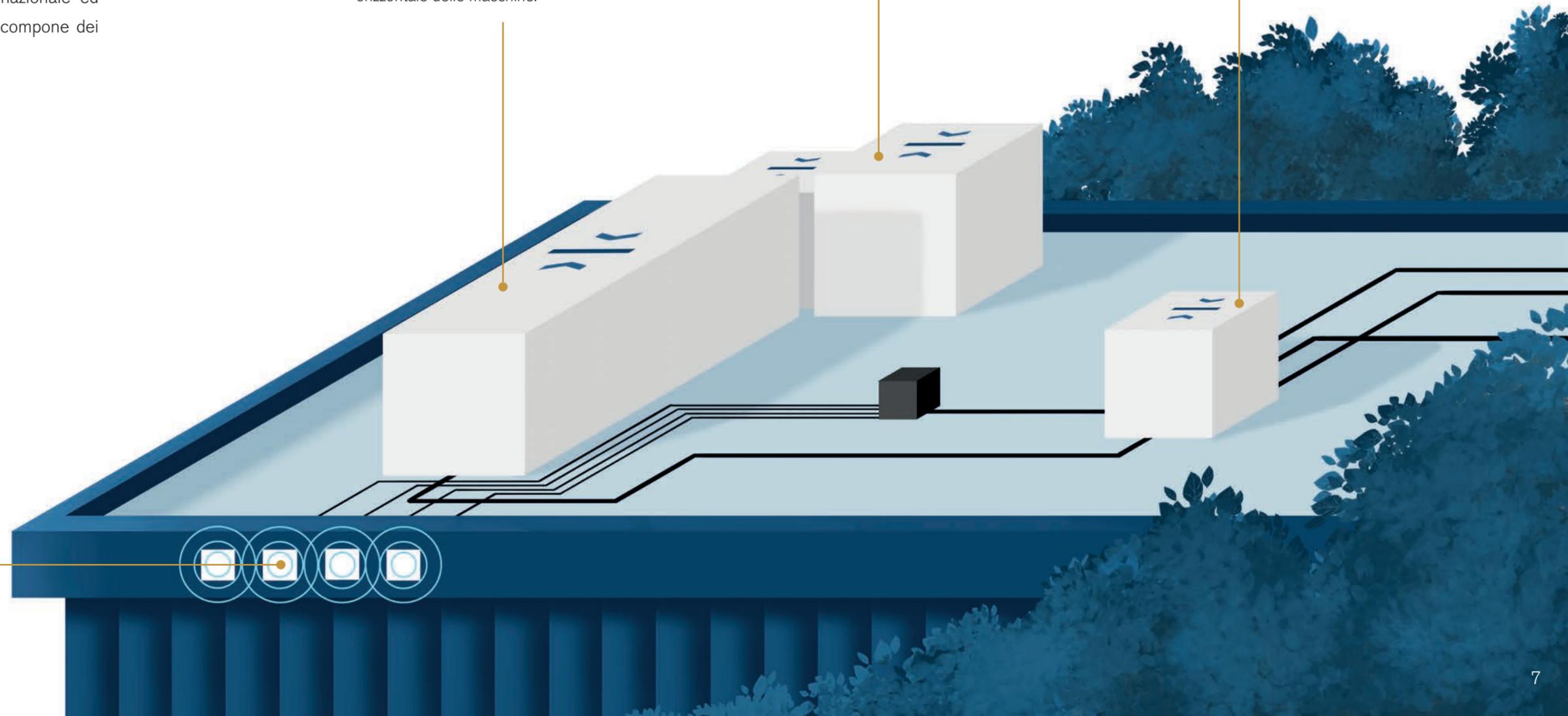
④ Batterie tampone IP-A.
Sistema di alimentazione con gruppo di continuità.

③ Computer centrale IP-UT.
Computer centrale Real-Time di acquisizione dei dati ed elaborazione tramite algoritmi di controllo ISAAC.

ISAAC effettua la progettazione dell'impianto in collaborazione con lo studio di progettazione: scelta di quali, quanti e dove posizionare i moduli singoli che sono già progettati (IP-D01 + IP-S + IP-A + IP-UT) e che devono essere assemblati in un "sistema di controllo attivo".

Le Macchine IP-D01 vengono installate assieme ai sensori accelerometrici (componenti IP-S) sulla struttura (vedi *Figura 1* e *Figura 2*) e collegati all'unità di controllo centrale, denominata IP-UT, che coordina e

controlla l'intero sistema (Macchine IP-D01 e Sensori IP-S). Lo scopo del sistema è quello di "contrastare" il movimento dell'edificio sul quale è installato durante l'evento sismico, riducendo le ampiezze di oscillazione della costruzione e di conseguenza gli sforzi applicati sugli elementi strutturali. Questo avviene grazie alla generazione di forze da parte di ogni Macchina IP-D01 nella propria direzione di installazione e con ampiezze determinate dall'algoritmo di controllo implementato sul Computer centrale IP-UT.



Questo misura le accelerazioni dell'edificio nei punti di installazione dei sensori e di conseguenza calcola le forze da generare nei diversi punti di installazione delle macchine. Il sistema richiede di essere collegato alla rete elettrica solo per il funzionamento dei mantenitori di carica e degli UPS (componente IP-A) che permettono che le macchine ed i comandi restino pronti anche in mancanza di corrente elettrica. Infatti, l'erogazione di forza avviene grazie agli accumulatori idraulici, parte integrante delle Macchine IP-D01. I sistemi, inoltre, restano monitorati per tutta la loro vita utile: infatti, oltre ad inviare dati in telemetria, gli attuatori di ogni Macchina

IP-D01 si attivano periodicamente per movimentare la massa inerziale e verificare il corretto funzionamento dell'intero impianto idraulico.

La soluzione si propone come applicabile in scala su edifici di diversa dimensione in pianta e altezza (vedi *Figura 3*) aumentando il numero di Macchine IP-D01 installate su ogni edificio e disponendole in diverse opportune direzioni, senza però modificare il sistema di azionamento di ogni singola macchina, ma modificando eventualmente gli algoritmi di controllo implementati nel computer centrale di comando installato per ogni edificio (IP-UT).

FIGURA 1
Esempio di installazione del sistema I-Pro 1 su un edificio di 10 piani in cemento armato.



FIGURA 2
Sensori di movimento IP-S installati sull'edificio per permettere il controllo durante l'evento sismico.

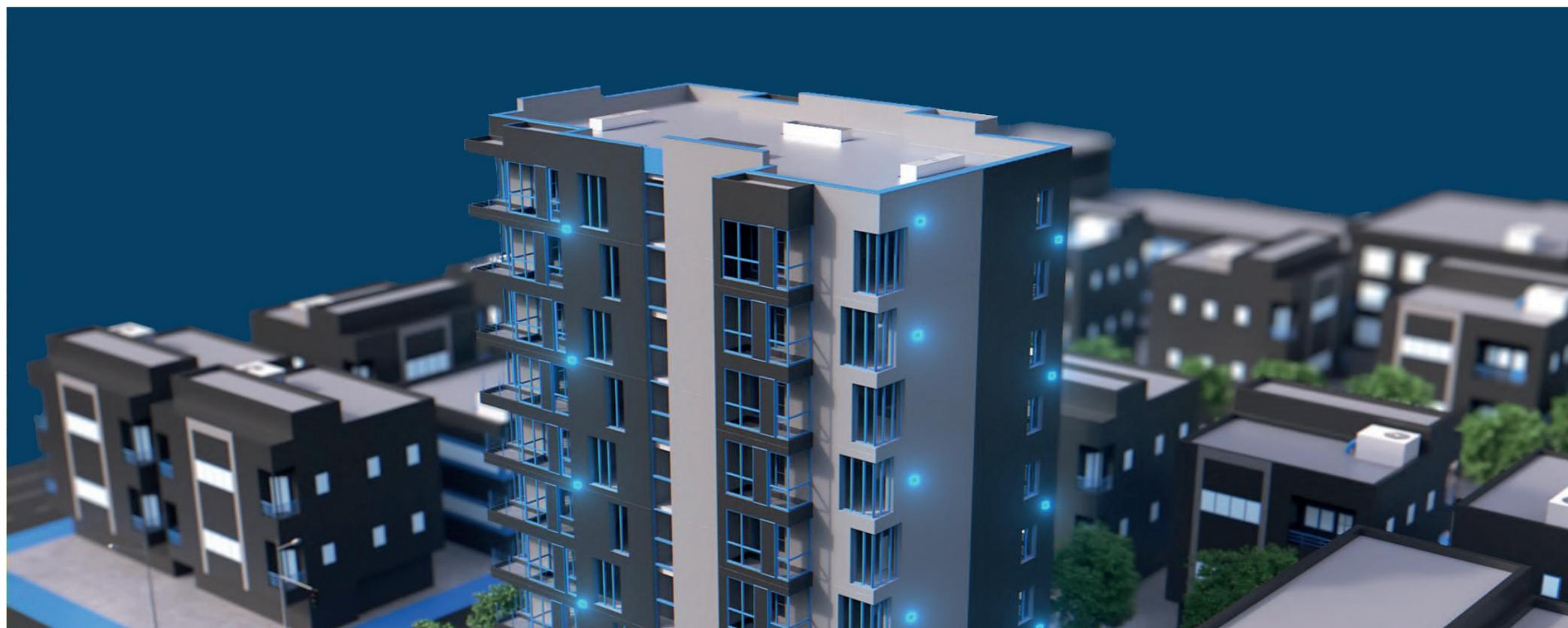


FIGURA 3
Esempi di installazione del sistema I-Pro 1 su edifici di diversa grandezza in pianta e altezza.

L'utilizzo di questo sistema di controllo attivo della risposta sismica non prescinde dallo studio preliminare della vulnerabilità sismica della costruzione fatta dallo studio di progettazione incaricato dell'intervento di miglioramento sismico. Infatti, la taratura del sistema di controllo attivo della risposta sismica viene fatta considerando i due asintoti di comportamento dell'edificio: la risposta dell'edificio misurata sperimentalmente in campo lineare iniziale e che comprende la risposta delle tamponature e degli altri elementi non strutturali, e la risposta "sismica" della struttura in cui principalmente il comportamento

viene definito dal telaio in CA.

Per quanto riguarda la risposta sperimentale in campo lineare dell'edificio, ISAAC si occupa delle misurazioni ed analisi dati, mentre per quanto riguarda la modellazione della risposta "sismica" della struttura, lo studio di progettazione incaricato di effettuare l'intervento di miglioramento sismico, fornisce il modello lineare/non lineare dell'edificio e verifica i miglioramenti ottenuti sul comportamento della costruzione grazie all'inserimento del sistema di controllo attivo, su indicazioni di ISAAC.

Descrizione degli edifici testing

I provini utilizzati per le prove di laboratorio consistono in 2 edifici di 3 piani in scala reale in calcestruzzo armato e tamponati in laterizio con un'altezza totale di 8,7 m. I provini sono stati realizzati con lunghezza di 5 m (nella direzione principale di analisi), una larghezza di 2,1 m e una altezza interpiano di 2,5 m, entrambi realizzati sullo stesso basamento di spessore 40 cm (vedi *Figura 4*).

Al fine dell'esecuzione delle prove di laboratorio il sistema I-Pro 1 è stato installato solamente su uno dei due edifici (edificio a destra nella *Figura 4*).

Il basamento è stato ancorato alla tavola vibrante a un grado di libertà in modo da esercitare la stessa accelerazione al suolo su entrambi i provini. Questi, infatti, sono stati realizzati in modo identico a meno dello spessore dell'ultimo solaio: per poter simulare l'aumento di massa dovuto all'adozione del sistema di controllo I-Pro 1, che nei casi reali non supera l'1% della massa totale dell'edificio, lo spessore dell'ultimo solaio dell'edificio privo del sistema I-Pro 1 è stato aumentato di 14 cm al fine di ottenere, sulla struttura equipaggiata del sistema

di controllo, un aumento di massa paragonabile a quello ottenibile nelle normali applicazioni su edifici esistenti.

Come descritto nei capitoli precedenti, non è necessaria una conoscenza approfondita della metodologia costruttiva e dei materiali del fabbricato per poter adottare il sistema di controllo attivo della risposta sismica. Per questo motivo, non è rilevante ai fini specifici di questo report la conoscenza dettagliata delle armature e dei materiali dei provini in quanto realizzati in modo identico. Infatti, lo scopo di questo documento è mostrare il funzionamento generico del sistema di controllo attivo della risposta sismica I-Pro 1 su edifici in CA tamponati in laterizio, tramite una prova comparativa dei comportamenti dei 2 edifici. Per questo motivo la progettazione e realizzazione dei provini è stata solamente supervisionata dal team di ISAAC. Ad ogni modo, per eventuali necessità di chiarimenti, e per i lettori interessati, vengono allegati nell'appendice le immagini dei progetti esecutivi degli edifici e alcune immagini delle fasi di realizzazione delle strutture.

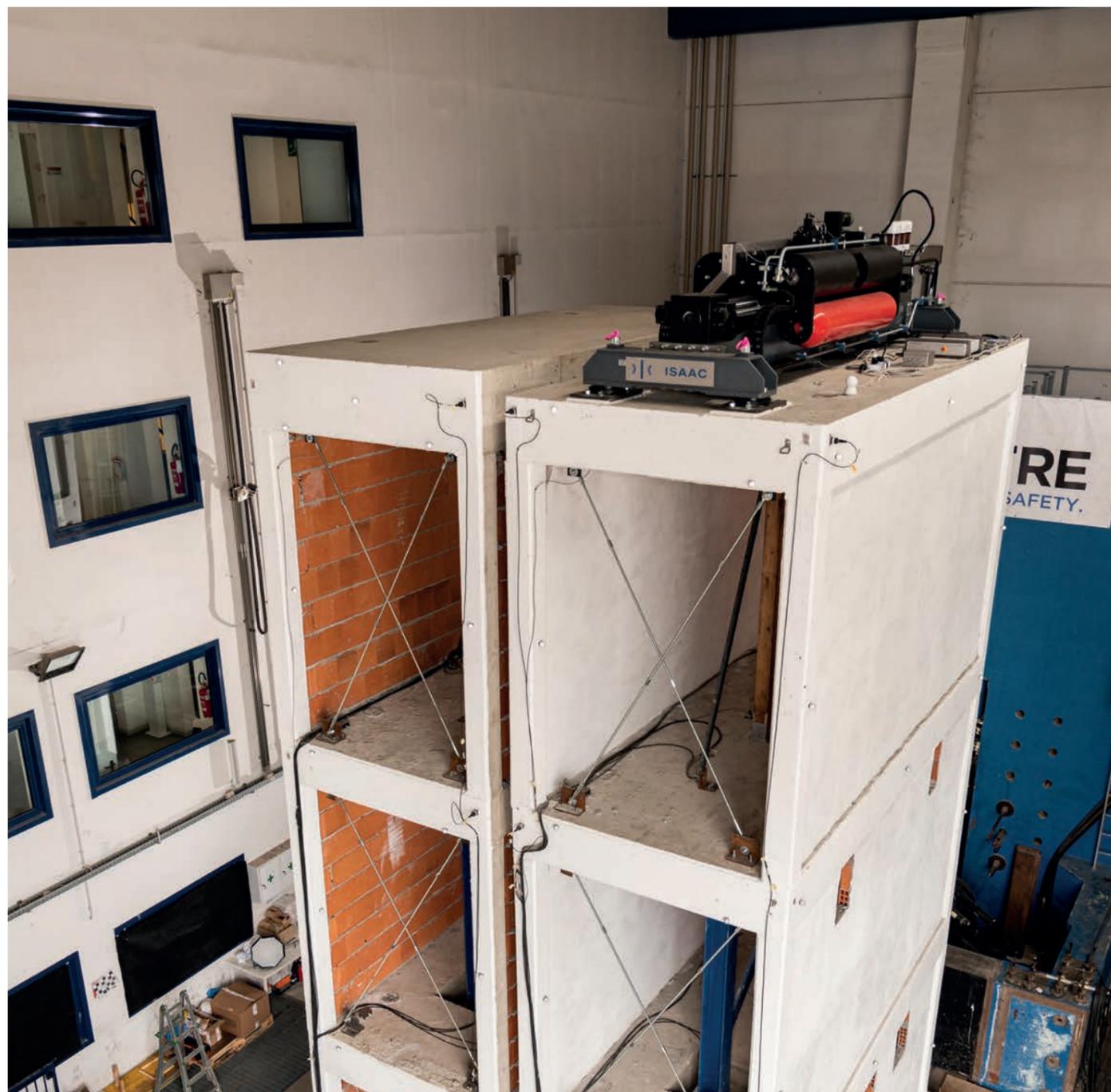


FIGURA 4
Edifici realizzati per la prova di laboratorio: a destra l'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1, a sinistra quello privo del sistema.

03

CAMPAGNA SPERIMENTALE: EDIFICI DI PROVA.



FIGURA 5
Sistema di controllo attivo I-Pro 1 (Macchina IP-D01) installato su uno dei due edifici.

Setup installato

Per le prove di laboratorio effettuate presso il centro di ricerca EUCENTRE di Pavia, il sistema di controllo attivo della risposta sismica installato è stato realizzato con il seguente numero di componenti di base:

- ① Macchine IP-D01 x 1.
- ② Sensori IP-S x 4.
- ③ Computer centrale IP-UT x 1.
- ④ Batterie tampone IP-A x 1.

Di seguito vengono riportate le immagini dettagliate del setup sperimentale. In *Figura 6* e in *Figura 8* viene mostrata una panoramica del setup del sistema di controllo installato sull'ultimo impalcato dell'edificio.

In *Figura 7* viene mostrato uno dei Sensori IP-S utilizzati per il controllo della risposta strutturale e il monitoraggio dell'integrità della struttura dotata del sistema I-Pro 1.

Le strutture sono state inoltre equipaggiate con sensori di spostamento a filo per poter misurare in tempo reale gli spostamenti relativi di ogni impalcato. Essi misurano lo spostamento tra il telaio in acciaio di sicurezza montato internamente alle strutture (e considerato infinitamente rigido) ed il solaio, come mostrato in *Figura 9*.



FIGURA 7
Sensori IP-S utilizzati per il controllo della risposta sismica: (a) Dettaglio di installazione e cablaggio del sensore montato sul basamento; (b) Vista del sensore montato sul primo solaio.



FIGURA 6
Sistema di controllo attivo I-Pro 1 (Macchina IP-D01) installato su uno dei due edifici.



FIGURA 8
Sistema di controllo attivo I-Pro 1 (Macchina IP-D01) installato su uno dei due edifici.



FIGURA 9 - Sensori di spostamento a filo installati: (a) Sensore montato tra carpenteria di sicurezza e primo solaio della struttura con sistema I-Pro 1; (b) Sensore montato tra carpenteria di sicurezza e primo solaio della struttura normale.

Analisi dinamica degli edifici.

Una volta che gli edifici sono stati completati, sono stati sottoposti ad analisi dinamica per identificare i parametri modali d'interesse (frequenze proprie, coefficienti di smorzamento e modi di vibrare delle strutture). La conoscenza di tali parametri permette di generare un modello analitico della struttura, utile sia per prevedere la risposta dinamica lineare dell'edificio tramite simulazioni, sia per la realizzazione dei controlli qualità Hardware In the Loop, del quale si parlerà nel *Capitolo 4*.

L'analisi modale è stata effettuata tramite installazione di sensori accelerometrici piezoelettrici in corrispondenza dei nodi degli edifici (*Figura 11*). Le strutture sono state sottoposte ad una eccitazione generata da una vibrodina

da 1,5 Kg installata sugli ultimi impalcati degli edifici (*Figura 10*).

Note le storie temporali degli output (tramite gli accelerometri piezoelettrici) e degli input (tramite sensore accelerometrico MEMS installato sulla vibrodina stessa), è stato possibile applicare tecniche di analisi modale sperimentale (EMA) al fine di identificare il modello analitico dell'edificio in campo lineare. In *Figura 12* sono rappresentate le funzioni di risposta in frequenza ed i diagrammi di stabilità ottenuti tramite analisi modale sperimentale. Queste funzioni vengono in seguito analizzate tramite programmi di identificazione modale che restituiscono in output i parametri modali



richiesti. Tramite questi ultimi è possibile estrarre il modello modale dell'edificio e confrontarlo con i risultati ottenuti sperimentalmente, come mostrato in *Figura 13*. I risultati ottenuti sono riassunti in *Tabella 2* dove sono raccolti i valori di frequenze proprie e smorzamenti identificati, ed in *Tabella 3* dove sono mostrati i modi di vibrare delle due strutture. Come si può notare, i modi di vibrare nella direzione di interesse (U1, direzione di movimentazione della tavola vibrante) sono il 4° ed il 6° per entrambi gli edifici. I valori delle frequenze proprie, degli smorzamenti e degli spostamenti adimensionali di questi modi sono estremamente simili; dunque, in assenza del sistema di controllo attivo I-Pro 1, la risposta degli edifici sottoposti allo stesso sisma in direzione U1 sarebbe pressoché identica.

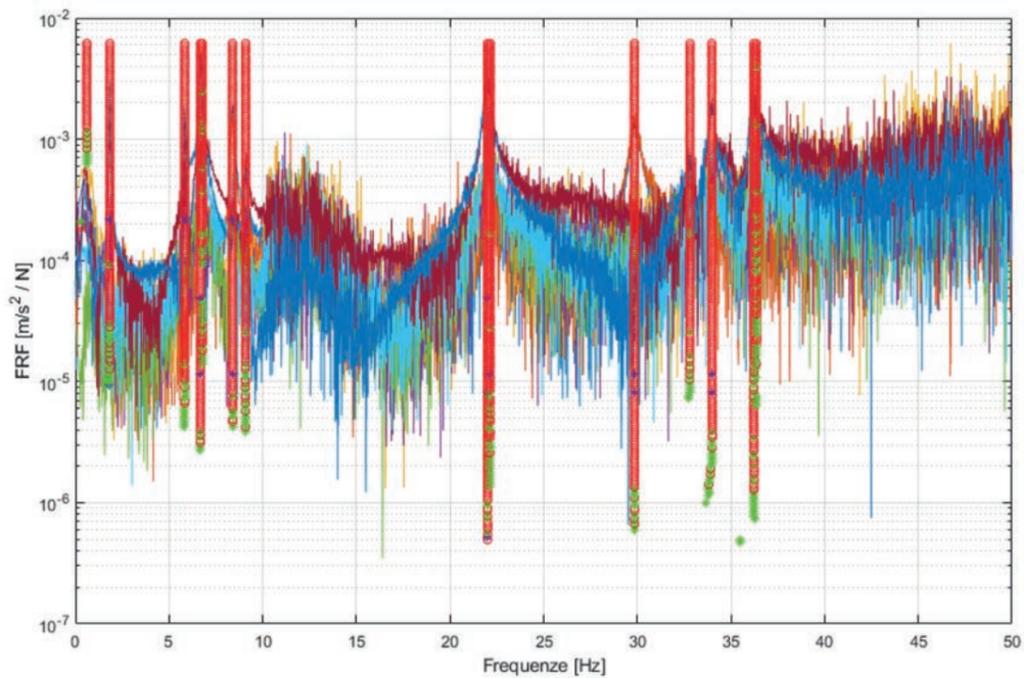
Dai parametri modali identificati è inoltre possibile valutare l'incremento di

rigidezza fornito dalla presenza delle tamponature. Infatti, le frequenze proprie del 1° e del 2° modo, che corrispondono ai primi due modi di "bending" in direzione U2 (direzione priva di tamponature) sono molto inferiori rispetto alle frequenze proprie del 4° e 6° modo, primi modi di "bending" in direzione U1 (direzione con tamponature). Infatti, è stato dimostrato dall'analisi del telaio in CA delle strutture non tamponate (realizzate fino al secondo impalcato), la coincidenza del 1° modo di bending in direzione U1 con il 1° modo di bending in direzione U2 e lo stesso con il 2° modo di bending in direzione U1 ed U2. Si rimanda a report successivo la pubblicazione dei grafici delle analisi modali del solo telaio in CA fatte durante le fasi costruttive degli edifici.

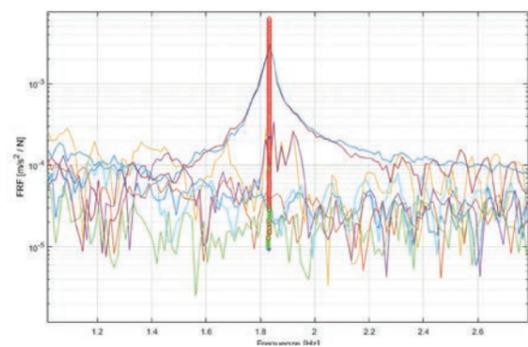
FIGURA 10 (sopra) - Vibrodina da 1,5 kg utilizzata per l'identificazione dinamica sperimentale. FIGURA 11 (sotto) - Accelerometri piezoelettrici utilizzati per la misurazione delle accelerazioni della struttura in fase di identificazione dinamica.



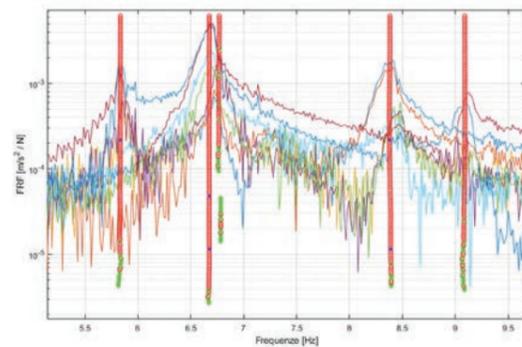
FIGURA 11



(a)

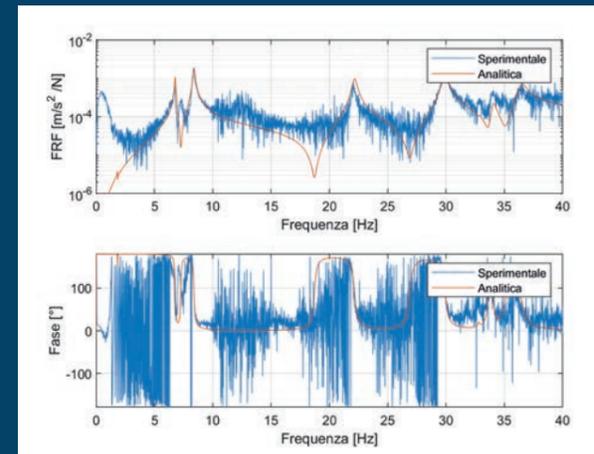


(b)

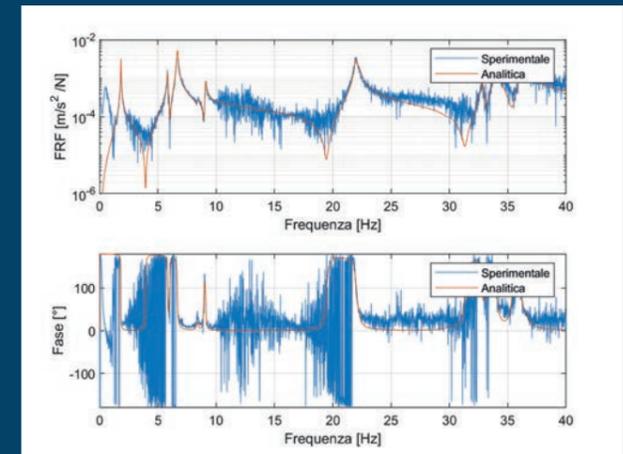


(c)

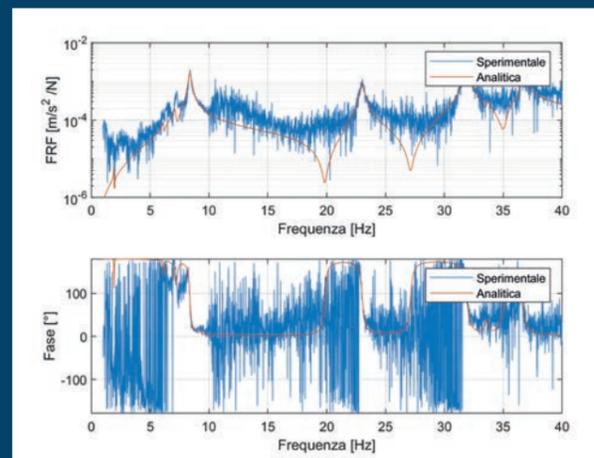
FIGURA 12
 (a) Funzioni di risposta in frequenza della struttura in tutti i nodi di misurazione e diagramma di stabilità utilizzato per identificazione dinamica;
 (b) Dettaglio 1 della funzione di risposta in frequenza e diagramma di stabilità;
 (c) Dettaglio 2 della funzione di risposta in frequenza e diagramma di stabilità.



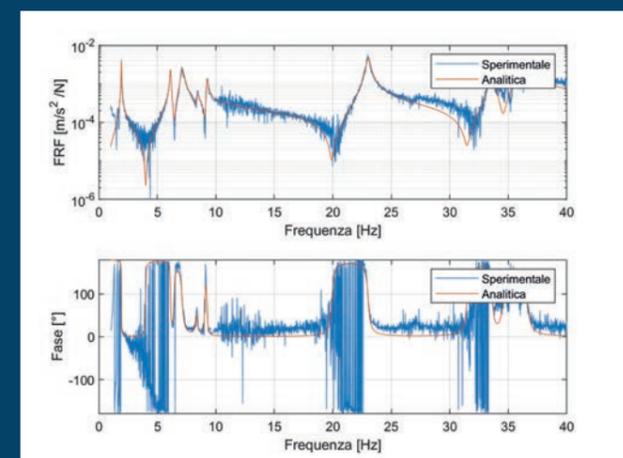
(a)



(b)



(c)



(d)

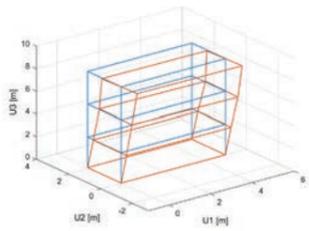
FIGURA 13
 Confronto tra modello analitico identificato e dati sperimentali della funzione di risposta in frequenza: (a) Output in direzione U1 della copertura vs. input di forza in direzione U1 edificio normale; (b) Output in direzione U2 della copertura vs. input di forza in direzione U2 edificio normale; (c) Output in direzione U1 della copertura vs. input di forza in direzione U1 edificio con sistema I-Pro 1; (d) Output in direzione U2 della copertura vs. input di forza in direzione U2 edificio con sistema I-Pro 1.

Parametri modali				
Provino	Edificio I-Pro 1		Edificio normale	
Modo N	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]	Frequenza [Hz]	Frequenza [Hz]
1	1,93	0,68	1,84	0,68
2	6,13	0,69	5,84	0,66
3	7,13	1,79	6,68	0,71
4	8,38	1,23	8,39	0,91
5	9,25	0,63	9,09	0,56
6	31,91	0,58	29,91	0,73

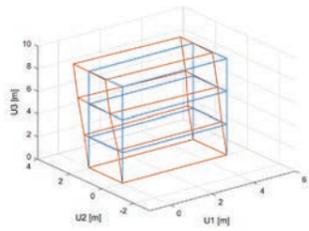
TABELLA 2 - Parametri dinamici identificati: frequenze proprie e smorzamento adimensionali.

Edificio I-Pro 1

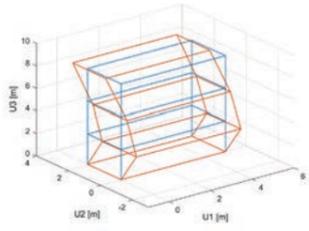
Edificio normale



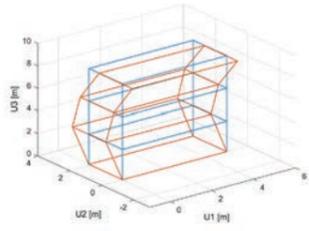
Modo frequenza 1,93 Hz



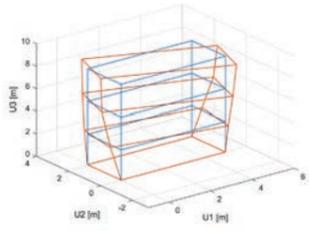
Modo frequenza 1,84 Hz



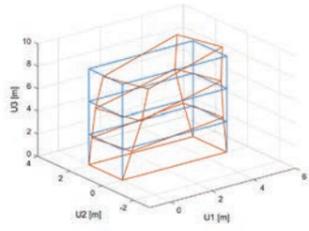
Modo frequenza 6,13 Hz



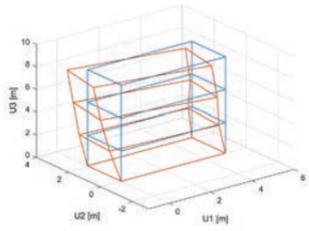
Modo frequenza 5,84 Hz



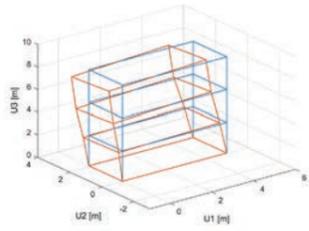
Modo frequenza 7,13 Hz



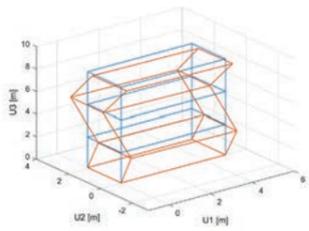
Modo frequenza 6,68 Hz



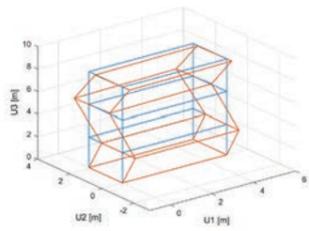
Modo frequenza 8,38 Hz



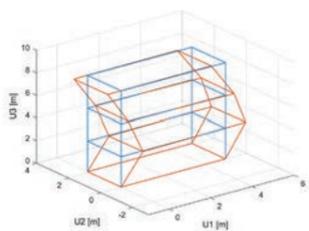
Modo frequenza 8,39 Hz



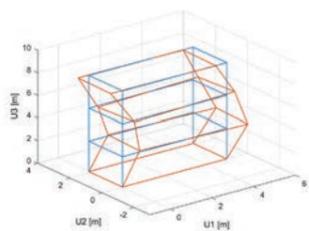
Modo frequenza 9,25 Hz



Modo frequenza 9,09 Hz



18 Modo frequenza 31,90 Hz



Modo frequenza 29,91 Hz

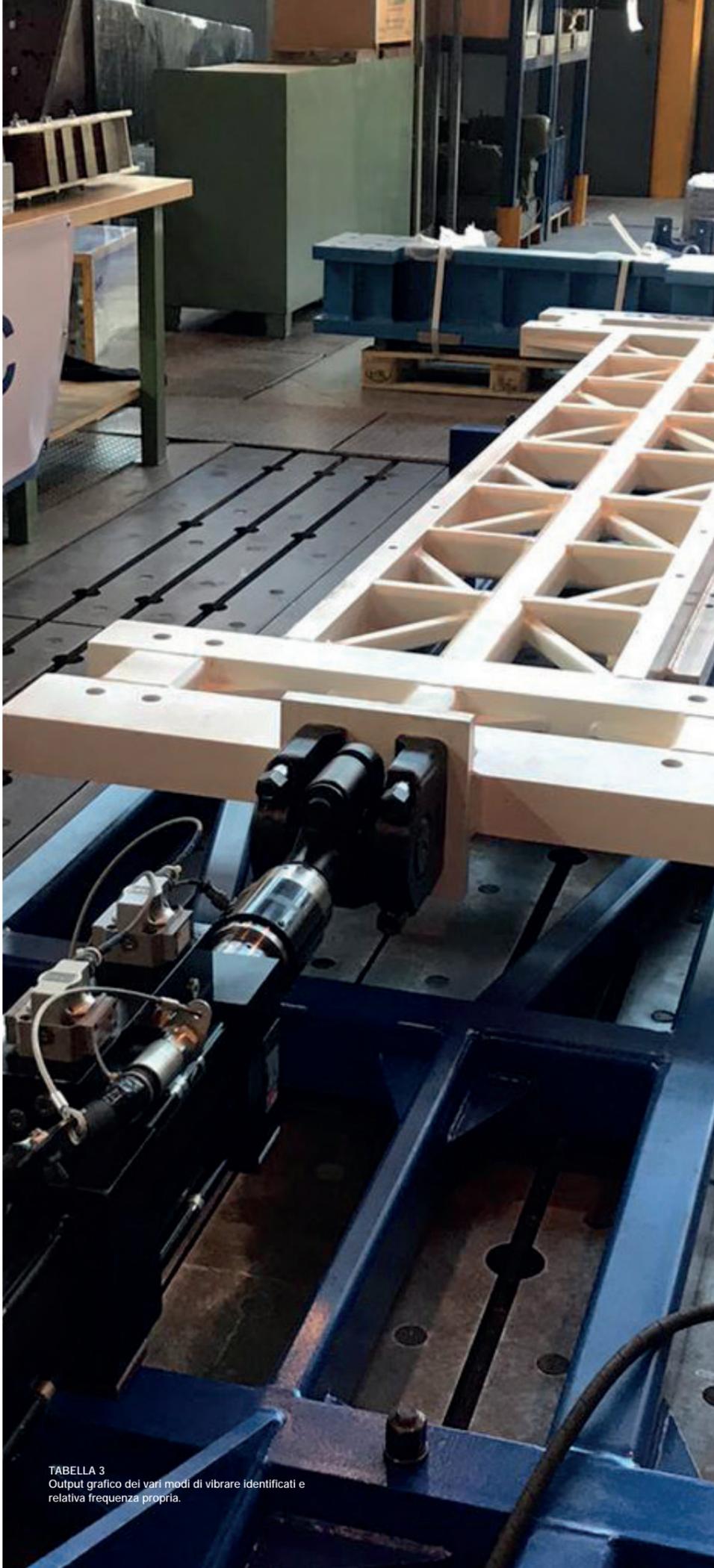


TABELLA 3
Output grafico dei vari modi di vibrare identificati e
relativa frequenza propria.

04

SISTEMA DI CONTROLLO QUALITÀ:
HARDWARE IN THE LOOP.Descrizione
del sistema di
controllo qualità.

In questo capitolo vengono descritte le prove di controllo qualità del sistema di controllo attivo I-Pro 1 effettuate da ISAAC presso i laboratori del Dipartimento di Meccanica del Politecnico di Milano con approccio Hardware In the Loop (HIL), la cui logica viene spiegata di seguito.

Lo scopo di queste prove è quello di verificare il corretto funzionamento di ogni Macchina IP-D01, la corretta generazione di forze da parte di queste ultime, ed infine quello di verificare l'influenza dello spostamento dell'ultimo impalcato sulla forza di controllo generata dal sistema. Data l'importanza di queste verifiche di controllo qualità, il banco prova allestito sarà in futuro riutilizzato come sistema di controllo qualità per ogni Macchina IP-D01 prodotta. Il banco prova consiste in una tavola vibrante ad un grado di libertà appositamente progettata e costruita. Essa consiste di una parte fissa dal peso di 1,800 kg ancorata a terra ed una parte mobile di 1,400 kg, libera di traslare sulla parte fissa tramite guide lineari. Le dimensioni in pianta della tavola vibrante assemblata sono di 1,5 m x 7 m.

La parte mobile viene movimentata tramite attuatore idraulico MTS, in grado di scaricare forze fino a 250 kN ed effettuare corse di 24 cm alla velocità massima di 10 cm/s. Esso viene alimentato tramite l'impianto oleodinamico presente nei laboratori del Dipartimento di Meccanica con portate fino a 70 l/min e con picchi massimi di 130 l/min. La componente mobile della tavola simula il movimento dell'ultimo impalcato dell'edificio da controllare nei punti di applicazione delle singole Macchine IP-D01 secondo progetto. Su essa viene installata ogni Macchina IP-D01 che deve essere testata per poter essere in seguito installata sulla struttura vera e propria. La logica del test HIL è mostrata in *Figura 14*. In particolare, il modello analitico generato tramite analisi modale sperimentale (*Capitolo 3*) viene utilizzato per simulare la risposta dinamica dell'edificio soggetto ad un evento sismico. Lo spostamento dell'ultimo impalcato, ottenuto come output della simulazione, viene utilizzato per movimentare la tavola. Tramite degli accelerometri montati su essa e tramite l'algoritmo di controllo sviluppato da ISAAC,

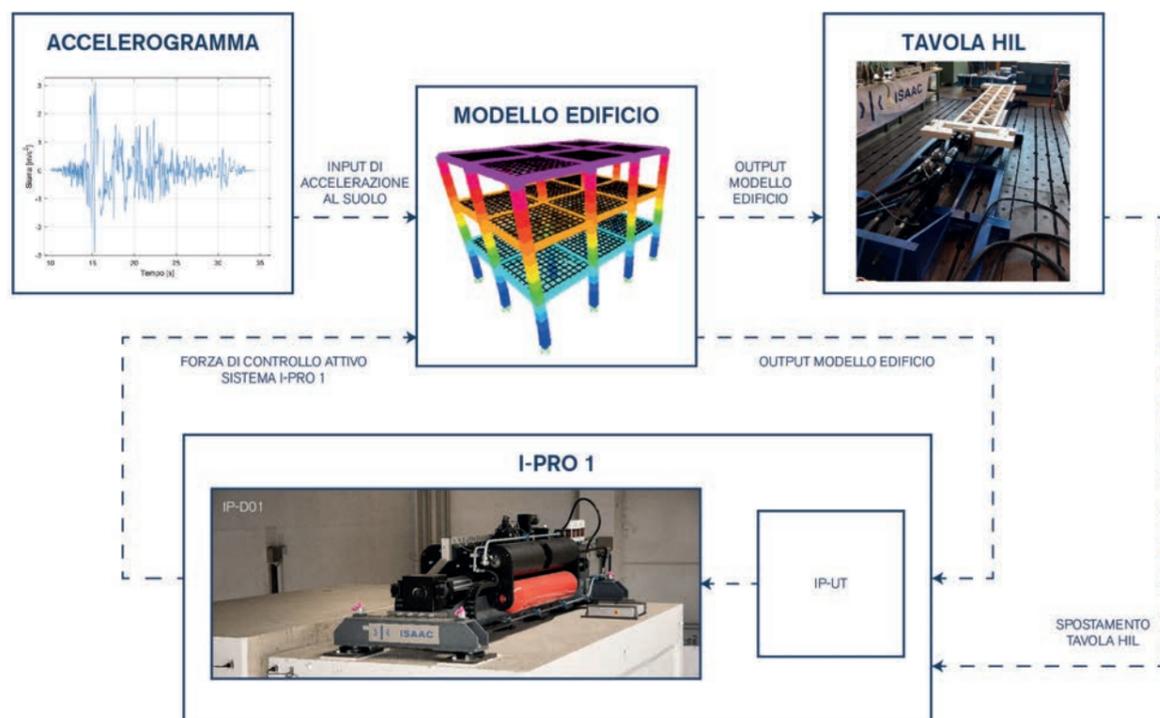


FIGURA 14 - Schema del sistema di controllo qualità.

I-Pro 1 entra in funzione e la Macchina IP-D01 testata viene movimentata in modo tale da ridurre l'ampiezza di oscillazione della tavola. Conoscendo la forza che viene scaricata sulla tavola, è possibile includere questa forza nel modello simulato, ottenendo così la risposta dinamica dell'edificio controllato tramite sistema di controllo attivo I-Pro 1, nel punto di applicazione della Macchina IP-D01 in fase di testing. Questo tipo di prova può essere effettuato indipendentemente dalle dimensioni e tipologia di struttura, dal modello di edificio utilizzato e dalla quantità di Macchine IP-D01 da installare. Ad esempio, il test è stato effettuato sia utilizzando un modello lineare dell'edificio (simulando quindi un edificio che mantiene le proprie capacità strutturali senza degradarsi) sia utilizzando un modello non lineare (che tiene conto della progressiva diminuzione di rigidità del telaio in seguito alle fessurazioni di elementi strutturali e non). In entrambi i casi il sistema di controllo attivo I-Pro 1 è risultato efficace nella riduzione delle ampiezze di oscillazione. In futuro questa tipologia di test verrà ripetuta con tutte le Macchine IP-D01 prodotte. Per adattare il setup del test alla nuova applicazione, sarà sufficiente sostituire l'attuatore idraulico MTS ed il modello analitico dell'edificio reale.

Risultati.

Il test HIL è stato effettuato usando il modello modale dei singoli provini realizzati presso i laboratori EUCENTRE e con sismi d'intensità crescente fino ad arrivare ad un terremoto con un valore di PGA pari a 0,114 g. Cliccando sulla *Figura 17*, è possibile essere re-indirizzati al video del test, nel quale sono ben visibili i miglioramenti ottenuti dotando l'edificio del sistema di controllo attivo I-Pro 1.

Per ogni sisma sono state effettuate tre prove:

1. nella prima (denominata "Prova non controllata") il modello analitico non riceve nessuna forza di controllo. La tavola si muove quindi come si muoverebbe l'edificio sprovvisto del sistema di controllo I-Pro 1.
2. nella seconda (denominata "Prova con controllo passivo") la Macchina IP-D01 viene volontariamente tenuta spenta ed al modello viene fornita soltanto la forza d'inerzia generata dal movimento dell'ultimo solaio. In questo modo viene simulato il comportamento dinamico dell'edificio in condizione di fuori-servizio della Macchina IP-D01.
3. nella terza (denominata "Prova con controllo attivo") la Macchina IP-D01 viene azionata ed al modello viene

data la forza effettivamente scaricata sul solaio. Con questa prova si vuole simulare l'oscillazione dell'edificio provvisto del sistema I-Pro 1 perfettamente funzionante. Nel caso di sisma con PGA di 0,114g, si sono ottenuti spostamenti massimi del terzo piano di 15,76 mm nella "Prova non controllata", 13,24 mm nella "Prova con controllo passivo" (con un miglioramento del 16%

rispetto alla "Prova non controllata") e 4,02 mm nella "Prova con controllo attivo" (con un miglioramento del 74% rispetto alla "Prova non controllata").

FIGURA 15 - Sistema I-Pro 1 installato sulla tavola HIL per il controllo qualità (vista 1).

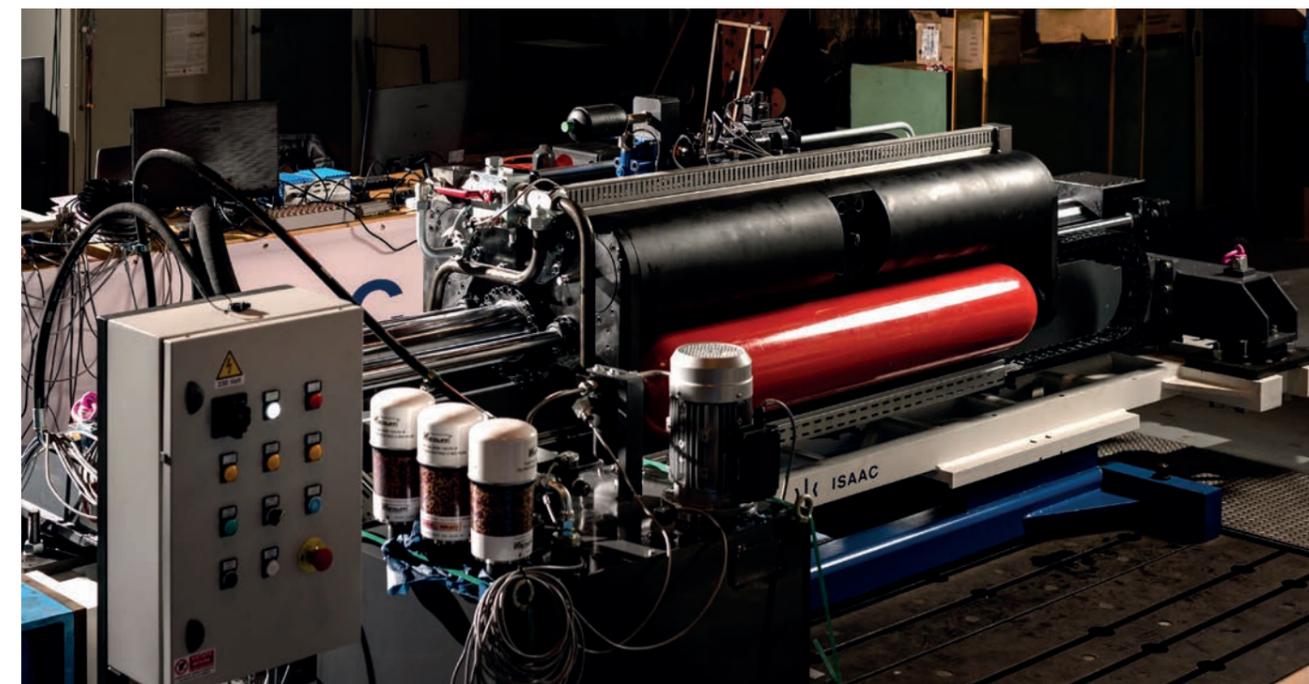


FIGURA 16 - Sistema I-Pro 1 installato sulla tavola HIL per il controllo qualità (vista 2).





FIGURA 17 - Video del funzionamento della tavola HIL: differenze tra edificio controllato e non controllato (cliccare sull'immagine per vedere il video link nell'ipertesto).

Come è ben visibile dalla *Figura 18*, l'efficacia del sistema di controllo attivo I-Pro 1 è verificata. Anche nell'indesiderata condizione di fuori-servizio, il sistema fornisce passivamente un importante smorzamento delle oscillazioni.

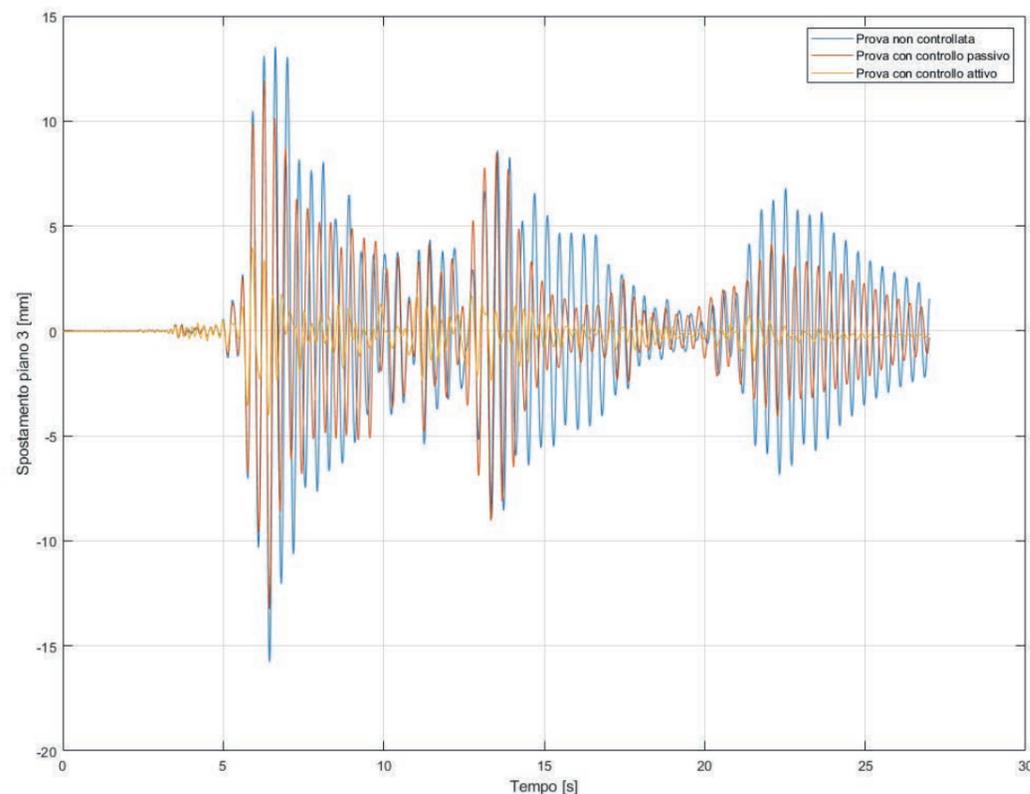


FIGURA 18 - Spostamenti del terzo piano dell'edificio simulato ottenuti durante le prove Hardware in the Loop.

05

ANALISI DELLE PROVE SPERIMENTALI.

In data 8, 9 e 10 Marzo 2021 sono stati effettuati i test presso i laboratori EUCENTRE di Pavia su tavola vibrante. Gli edifici costruiti sono stati sottoposti a sismi di intensità crescente per valutare il progressivo danneggiamento delle componenti strutturali e non strutturali.

Il sisma di riferimento utilizzato è il terremoto dell'Irpinia, avvenuto il 23 Novembre 1980. Il sisma di magnitudo pari a 6.9 e con valore di PGA pari a 0,32g ha comportato un elevatissimo numero di vittime (quasi 3000 decessi) ed un costo totale di ricostruzione che supera i 50 miliardi di Euro.

I sismi utilizzati per le prove sono stati generati moltiplicando la storia temporale del sisma (mostrata in *Figura 19*) per un coefficiente di scalatura. Si è partiti da un sisma con intensità pari al 10% fino ad arrivare ad un sisma con intensità superiore al 100% del sisma dell'Irpinia.

Nei seguenti paragrafi verranno riportati solo i risultati ottenuti a seguito di prove ritenute significative per la verifica del funzionamento del sistema I-Pro 1. In particolare, le prove analizzate saranno le seguenti:

- Sisma con PGA pari a 0,10 g a seguito del quale la struttura priva di sistema di controllo ha riportato lievi danni all'intonaco delle tamponature.
- Sisma con PGA pari a 0,24 g a seguito del quale la struttura priva di sistema di controllo ha mostrato fessurazioni significative degli elementi

non strutturali.

- Sisma con PGA pari a 0,26 g a seguito del quale si sono verificati crolli parziali di elementi non strutturali già danneggiati dai sismi precedenti nella struttura priva di sistema di controllo.

- Sisma con PGA pari a 0,44 g che ha portato al crollo degli elementi non strutturali e a danneggiamenti degli elementi strutturali nella struttura priva di sistema di controllo.

I test sono stati interrotti quando l'edificio privo del sistema di controllo attivo ha iniziato a mostrare danni ad elementi strutturali, in modo tale da non arrivare al completo collasso della struttura e da garantire la sicurezza del laboratorio.

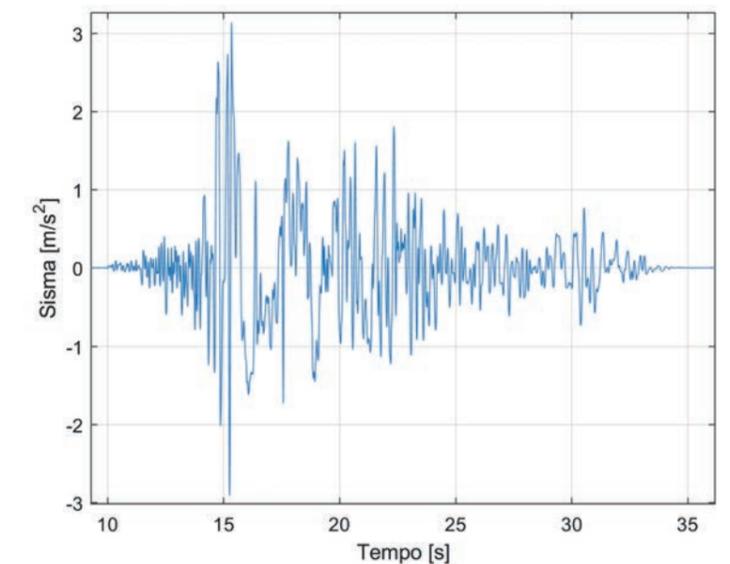


FIGURA 19 - Sisma di riferimento: Terremoto dell'Irpinia del 1980.

SISMA PGA 0,1 G.

In *Figura 20* viene mostrata la storia temporale dell'accelerazione al suolo misurata durante questo test. In *Figura 21*, *Figura 22* e *Figura 23* vengono confrontate le storie temporali degli spostamenti registrati del terzo, secondo e primo piano relativi al terreno delle due strutture. In *Figura 24* vengono confrontate le derive interpiano dei due edifici. Infine, in *Figura 25* è mostrato lo spostamento della massa mobile della Macchina IP-D01, mentre in *Figura 26* è rappresentata la forza di controllo scaricata durante questa prova sull'ultimo solaio dell'edificio equipaggiato del sistema di controllo.

Durante questa prova si è raggiunto un PGA di 0,1 g, pari al 31% del sisma di riferimento. In *Tabella 4* sono riportati gli spostamenti relativi dei solai e le derive interpiano misurate durante la prova. In particolare, si nota un miglioramento del 47,6% di spostamento del terzo solaio (1,55 mm per la struttura priva di sistema di controllo e 0,81 mm per la struttura che ne è equipaggiata) ed un miglioramento del 59,1% per lo spostamento del primo piano (0,58 mm contro 0,23 mm).

In questa prova si è ottenuto uno spostamento massimo della massa mobile di 10,3 mm, pari al 2,1% dello spostamento massimo esprimibile dalla Macchina IP-D01 (500 mm). Inoltre, la forza massima scaricata è stata di 7,4 kN, pari al 3,4% della forza di picco esercitabile dalla Macchina IP-D01 (220 kN). Al termine della prova non sono stati riscontrati danni evidenti su nessuno degli edifici. Sull'edificio privo di sistema di controllo si sono trovati soltanto lievi accenni di fessurazioni dell'intonaco.

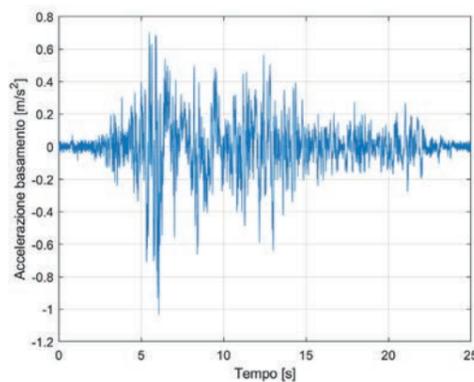


FIGURA 20 - Accelerazione misurata nella direzione U1 sul basamento dei provini.

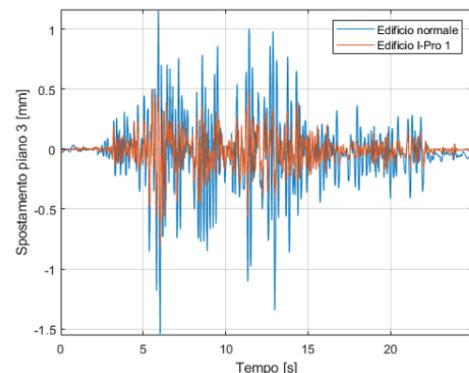


FIGURA 21 - Spostamento relativo alla base del piano 3. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

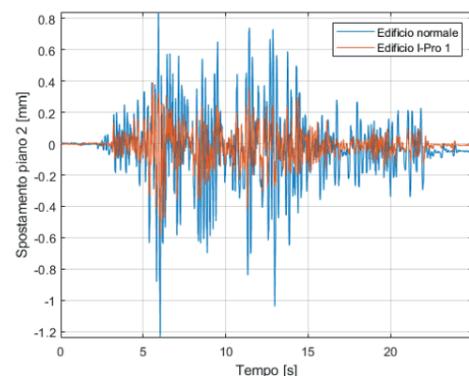


FIGURA 22 - Spostamento relativo alla base del piano 2. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

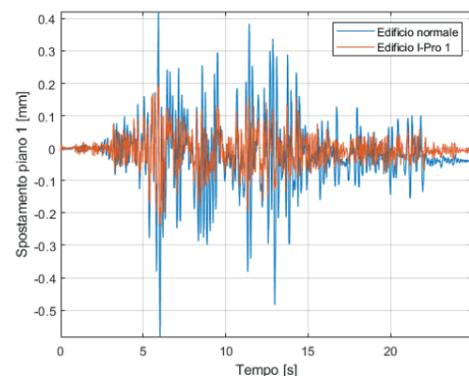


FIGURA 23 - Spostamento relativo alla base del piano 1. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

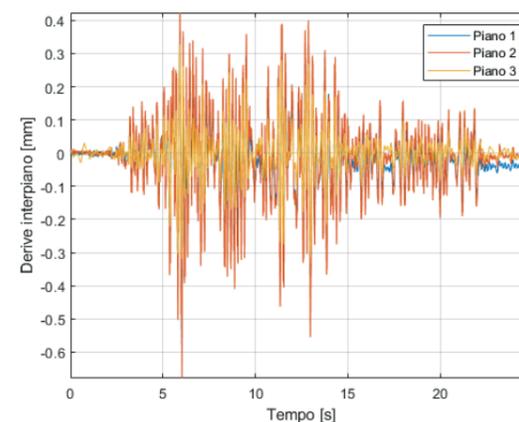


FIGURA 24 (a) - Derive interpiano dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.

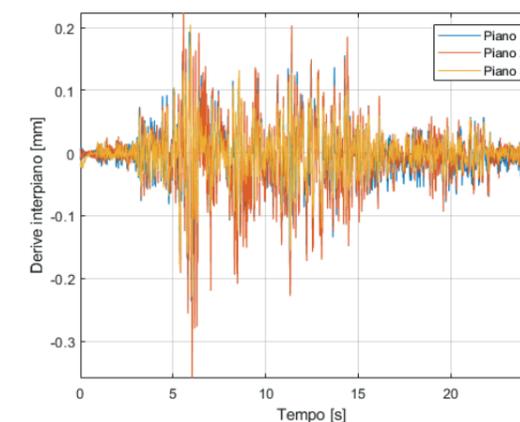


FIGURA 24 (b) - Derive interpiano dell'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

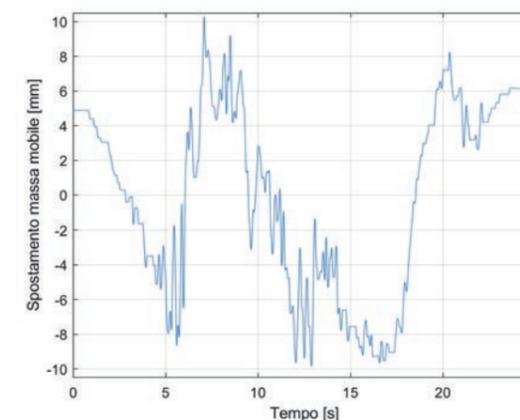


FIGURA 25 - Spostamento relativo della massa attiva del sistema I-Pro 1 durante il sisma.

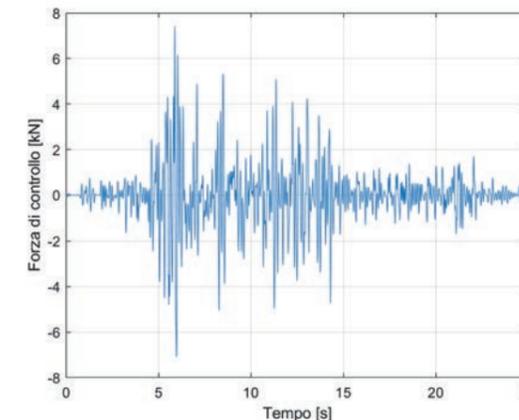


FIGURA 26 - Forza di controllo attivo scaricata dal sistema I-Pro 1 sull'edificio durante il sisma.

Picco massimo raggiunto Sisma PGA 0,1 [g]	Edificio normale	Edificio I-Pro 1	Miglioramento [%]
Spostamento relativo al basamento Piano 3 [mm]	1,55	0,81	47,6
Spostamento relativo al basamento Piano 2 [mm]	1,24	0,58	52,8
Spostamento relativo al basamento Piano 1 [mm]	0,58	0,23	59,1
Deriva interpiano Piano 3 [mm]	0,33	0,23	30,1
Deriva interpiano Piano 2 [mm]	0,68	0,36	47,1
Deriva interpiano Piano 1 [mm]	0,58	0,23	59,1

TABELLA 4 - Resoconto dei risultati della prova: spostamenti relativi massimi, derive interpiano massime, miglioramenti percentuali tra edificio equipaggiato del sistema di controllo ed edificio privo del sistema.

SISMA PGA 0,24 G.

In *Figura 27* viene mostrata la storia temporale dell'accelerazione al suolo misurata durante questo test. In *Figura 28*, *Figura 29* e *Figura 30* vengono confrontate le storie temporali degli spostamenti registrati del terzo, secondo e primo piano relativi al terreno delle due strutture. In *Figura 31* vengono confrontate le derive interpiano dei due edifici.

Infine, in *Figura 32* è mostrato lo spostamento della massa mobile della Macchina IP-D01, mentre in *Figura 33* è rappresentata la forza di controllo scaricata durante questa prova sull'ultimo solaio dell'edificio.

Durante questa prova si è raggiunto un PGA di 0,24 g, pari al 75% del sisma di riferimento.

In *Tabella 5* sono riportati gli spostamenti relativi dei solai e le derive interpiano misurate durante la prova. In particolare, si nota un miglioramento del 59,0% di spostamento del terzo solaio (13,36 mm per la struttura priva di sistema di controllo e 5,47 mm per la struttura che ne è equipaggiata) ed un miglioramento del 53,0% per lo spostamento del primo piano (6,04 mm contro 2,84 mm).

In questa prova si è ottenuto uno spostamento massimo della massa mobile di 69,15 mm, pari al 13,8% dello spostamento massimo esprimibile dalla macchina IP-D01 (500 mm). Inoltre, la forza massima scaricata è stata di 29,48 kN, pari al 13,4% della forza di picco esercitabile dalla macchina IP-D01 (220 kN).

Al termine della prova sono stati riscontrati danni evidenti sull'edificio privo del sistema di controllo I-Pro 1, mentre l'edificio equipaggiato del sistema di controllo ha riportato soltanto lievi fessurazioni dell'intonaco. In particolare, in *Figura 34* sono mostrate le differenze tra il danneggiamento della struttura non controllata ed il danneggiamento della struttura controllata nelle stesse porzioni di edificio.

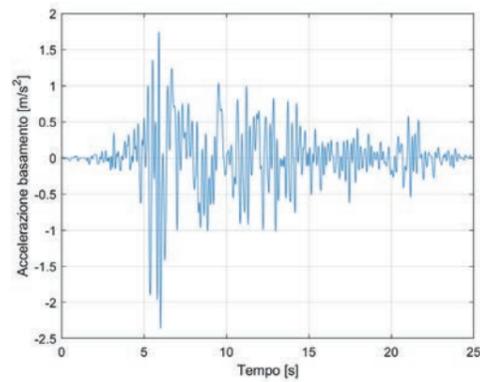


FIGURA 27 - Accelerazione misurata nella direzione U1 sul basamento dei provini.

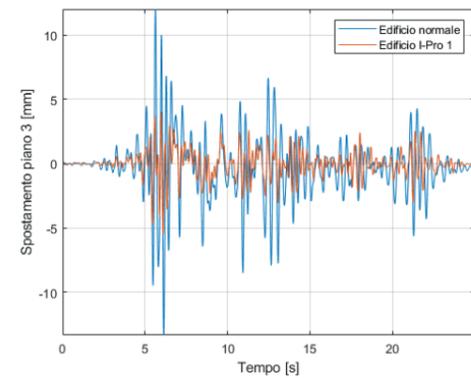


FIGURA 28 - Spostamento relativo alla base del piano 3. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

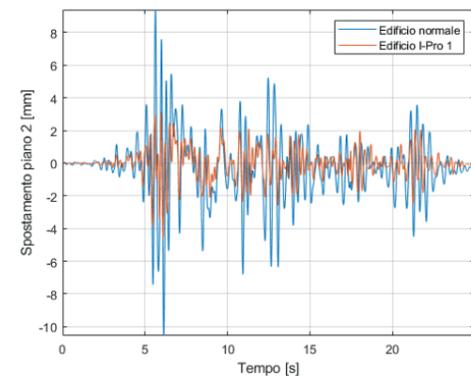


FIGURA 29 - Spostamento relativo alla base del piano 2. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

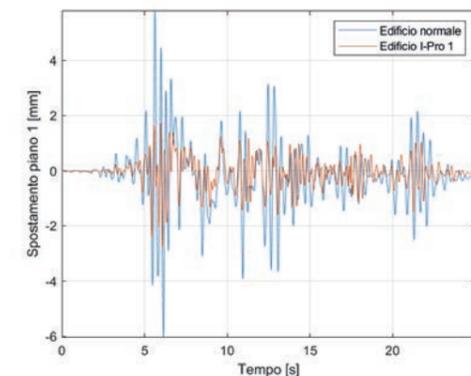


FIGURA 30 - Spostamento relativo alla base del piano 1. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

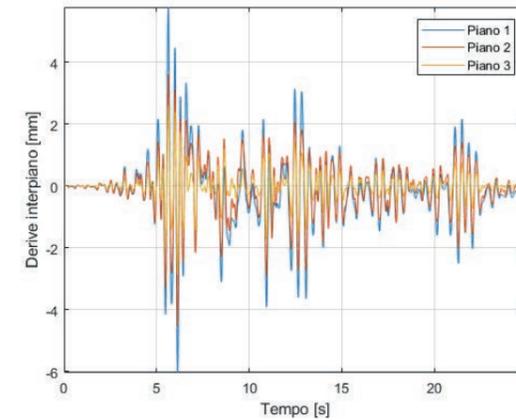


FIGURA 31 (a) - Derive interpiano dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.

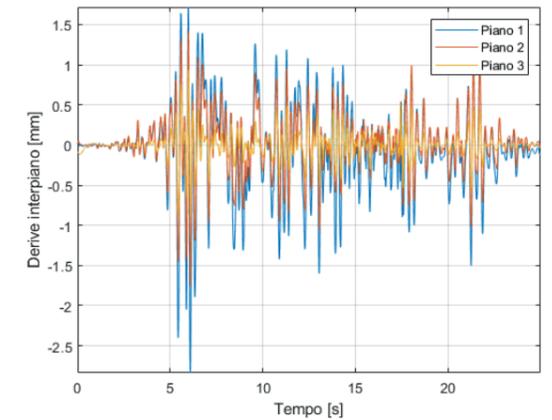


FIGURA 31 (b) - Derive interpiano dell'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

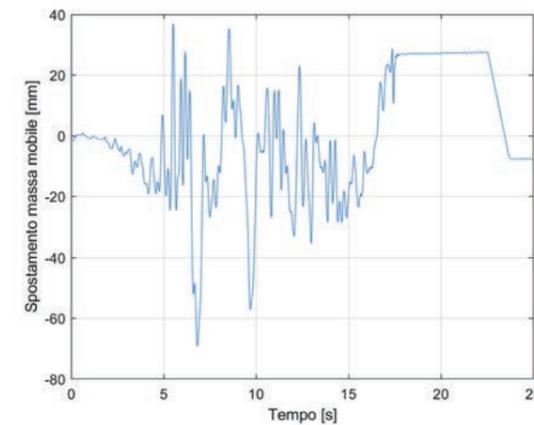


FIGURA 32 - Spostamento relativo della massa attiva del sistema I-Pro 1 durante il sisma.

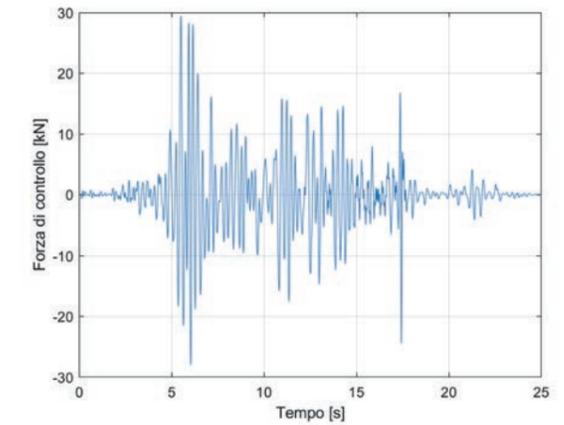


FIGURA 33 - Forza di controllo attivo scaricata dal sistema I-Pro 1 sull'edificio durante il sisma.

Picco massimo raggiunto Sisma PGA 0,24 [g]	Edificio normale	Edificio I-Pro 1	Miglioramento [%]
Spostamento relativo al basamento Piano 3 [mm]	13,36	5,47	59,0
Spostamento relativo al basamento Piano 2 [mm]	10,58	4,59	56,3
Spostamento relativo al basamento Piano 1 [mm]	6,04	2,84	53,0
Deriva interpiano Piano 3 [mm]	2,80	0,94	66,4
Deriva interpiano Piano 2 [mm]	4,54	1,76	61,2
Deriva interpiano Piano 1 [mm]	6,04	2,84	53,0

TABELLA 5 - Resoconto dei risultati della prova: spostamenti relativi massimi, derive interpiano massime, miglioramenti percentuali tra edificio equipaggiato del sistema di controllo ed edificio privo del sistema.

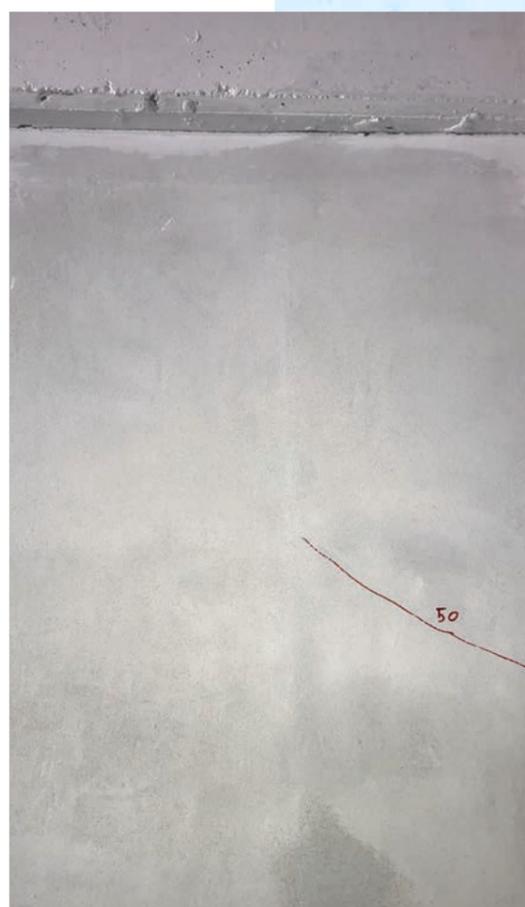
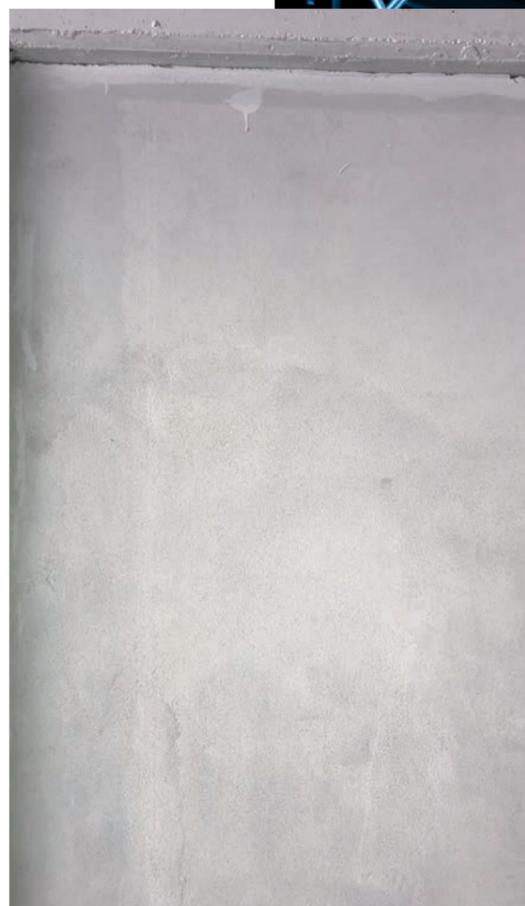


FIGURA 34 - Confronto dei danneggiamenti agli elementi non strutturali dei 2 edifici. Sinistra: tamponatura lato posteriore-destro e anteriore-destro dell'edificio privo del sistema I-Pro 1; destra: tamponatura lato posteriore-sinistro e anteriore-sinistro dell'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

SISMA PGA 0,26 G.

In *Figura 35* viene mostrata la storia temporale dell'accelerazione al suolo misurata durante questo test. In *Figura 36*, *Figura 37* e *Figura 38* vengono confrontate le storie temporali degli spostamenti registrati del terzo, secondo e primo piano relativi al terreno delle due strutture. In *Figura 39* vengono confrontate le derive interpiano dei due edifici.

Infine, in *Figura 40* è mostrato lo spostamento della massa mobile della Macchina IP-D01, mentre in *Figura 41* è rappresentata la forza di controllo scaricata durante questa prova sull'ultimo solaio dell'edificio.

Durante questa prova si è raggiunto un PGA di 0,26 g, pari all'81% del sisma di riferimento.

In *Tabella 6* sono riportati gli spostamenti relativi dei solai e le derive interpiano misurate durante la prova. In particolare, si nota un miglioramento del 50,3% di spostamento del terzo solaio (17,62 mm per la struttura priva di sistema di controllo e 8,75 mm per la struttura che ne è equipaggiata) ed un miglioramento del 68,0% per lo spostamento del primo piano (10,39 mm contro 3,32 mm).

In questa prova si è ottenuto uno spostamento massimo della massa mobile di 69,85 mm, pari al 14,0% dello spostamento massimo esprimibile dalla Macchina IP-D01 (500 mm). Inoltre, la forza massima scaricata è stata di 24,92 kN, pari all' 11,3% della forza di picco esercitabile dalla macchina IP-D01 (220 kN).

Il sisma ha portato al peggioramento dei danni già evidenti nelle prove precedenti sull'edificio privo di sistema di controllo. L'edificio dotato del sistema I-Pro 1 invece non ha riportato nessun peggioramento. Come ben visibile dalla *Figura 42 (a)*, parti dell'intonaco e della rasatura dell'edificio privo del sistema sono crollate e lo stato di danneggiamento delle tamponature è fortemente peggiorato. La *Figura 42 (b)* mostra invece che l'integrità dell'edificio dotato del sistema I-Pro 1 che non è stata compromessa.

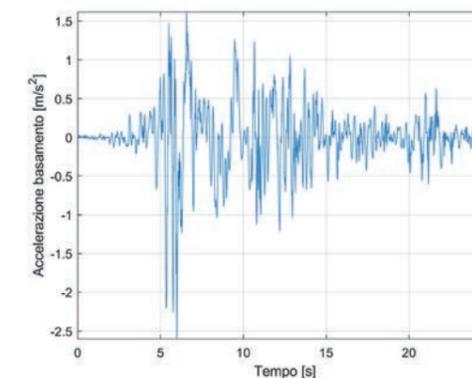


FIGURA 35 - Accelerazione misurata nella direzione U1 sul basamento dei provini.

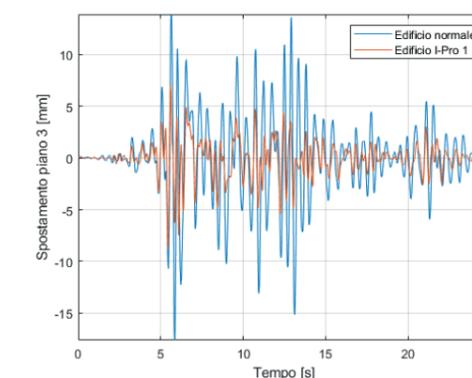


FIGURA 36 - Spostamento relativo alla base del piano 3. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

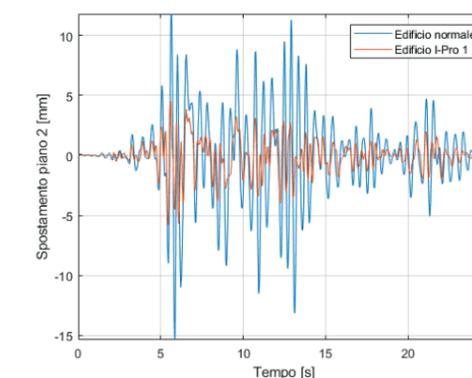


FIGURA 37 - Spostamento relativo alla base del piano 2. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

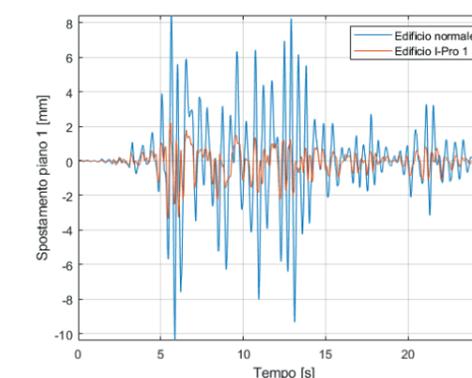


FIGURA 38 - Spostamento relativo alla base del piano 1. Blu: edificio privo del sistema I-Pro 1; rosso: edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

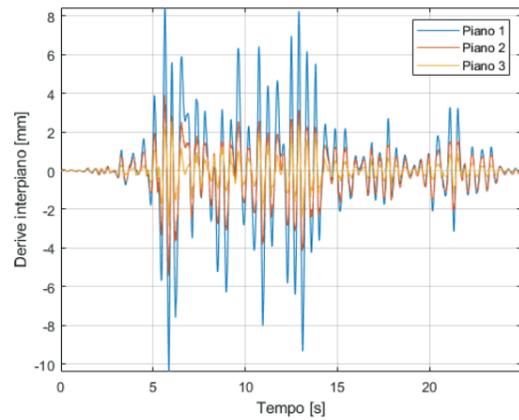


FIGURA 39 (a) - Derive interpiano dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.

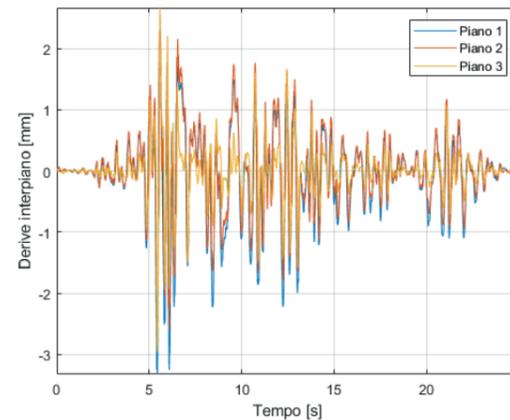


FIGURA 39 (b) - Derive interpiano dell'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

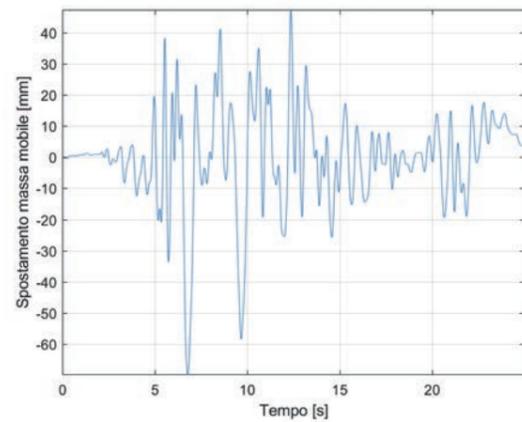


FIGURA 40 - Spostamento relativo della massa attiva del sistema I-Pro 1 durante il sisma.

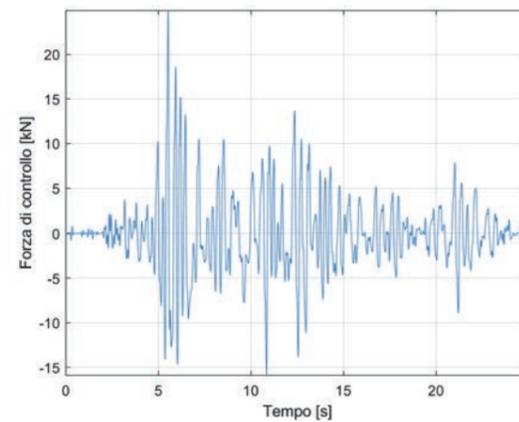


FIGURA 41 - Forza di controllo attivo scaricata dal sistema I-Pro 1 sull'edificio durante il sisma.

Confronto dei danneggiamenti agli elementi non strutturali dopo la simulazione di sisma a 0,26 g.



FIGURA 42 (a) - Sopra: Edificio privo del sistema di controllo I-Pro 1.
FIGURA 42 (b) - Destra: Vista globale dell'edificio equipaggiato del sistema di controllo I-Pro 1.

Picco massimo raggiunto Sisma PGA 0,26 [g]	Edificio normale	Edificio I-Pro 1	Miglioramento [%]
Spostamento relativo al basamento Piano 3 [mm]	17,62	8,75	50,3
Spostamento relativo al basamento Piano 2 [mm]	15,36	5,81	62,1
Spostamento relativo al basamento Piano 1 [mm]	10,39	3,32	68,0
Deriva interpiano Piano 3 [mm]	2,85	2,96	-3,9
Deriva interpiano Piano 2 [mm]	5,41	2,64	51,2
Deriva interpiano Piano 1 [mm]	10,39	3,32	68,0

TABELLA 6 - Resoconto dei risultati della prova: spostamenti relativi massimi, derive interpiano massime, miglioramenti percentuali tra edificio equipaggiato del sistema di controllo ed edificio privo del sistema.

SISMA PGA 0,44 G.

Al lettore interessato, si consiglia di cliccare sulla *Figura 50*, *Figura 51* e *Figura 52* per essere re-indirizzati ai video delle prove con sisma di intensità 0,44 g. In essi sono ben visibili a occhio nudo le differenze di oscillazioni degli edifici da tre angolazioni diverse.

In *Figura 43* viene mostrata la storia temporale dell'accelerazione al suolo misurata durante questo test. In *Figura 44*, *Figura 45* e *Figura 46* vengono confrontate le storie temporali degli spostamenti registrati del terzo, secondo e primo piano relativi al terreno delle due strutture. In *Figura 47* vengono confrontate le derive interpiano dei due edifici. Infine, in *Figura 48* è mostrato lo spostamento della massa mobile della Macchina IP-D01, mentre in *Figura 49* è rappresentata la forza di controllo scaricata durante questa prova sull'ultimo solaio dell'edificio.

Durante questa prova si è raggiunto un PGA di 0,44 g, pari al 137% del sisma di riferimento. In *Tabella 7* sono riportati gli spostamenti relativi dei solai e le derive interpiano misurate durante la prova. In particolare, si nota un miglioramento del 57,4% di spostamento del terzo solaio (31,64 mm per la struttura priva di sistema di controllo e 13,46 mm per la struttura che ne è equipaggiata) ed un miglioramento del 71,9% per lo spostamento del primo piano (22,48 mm contro 6,31 mm).

In questa prova si è ottenuto uno spostamento massimo della massa mobile di 116,7 mm, pari al 23,3% dello spostamento massimo esprimibile dalla Macchina IP-D01 (500 mm). Inoltre, la forza massima scaricata è stata di 41,63 kN, pari al 18,9% della forza di picco esercitabile dalla macchina IP-D01 (220 kN).

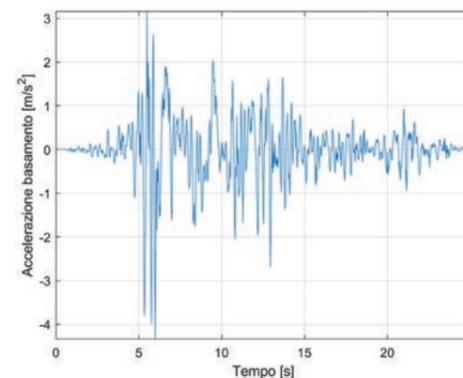


FIGURA 43 - Accelerazione misurata nella direzione U1 sul basamento dei provini.

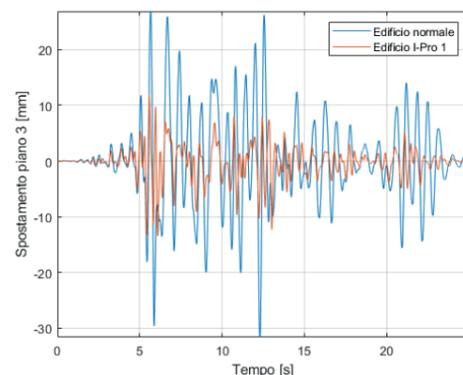


FIGURA 44 - Spostamento relativo alla base del piano 3. **Blu:** edificio privo del sistema I-Pro 1; **rosso:** edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

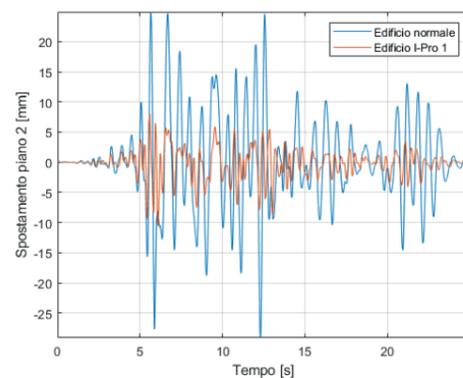


FIGURA 45 - Spostamento relativo alla base del piano 2. **Blu:** edificio privo del sistema I-Pro 1; **rosso:** edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

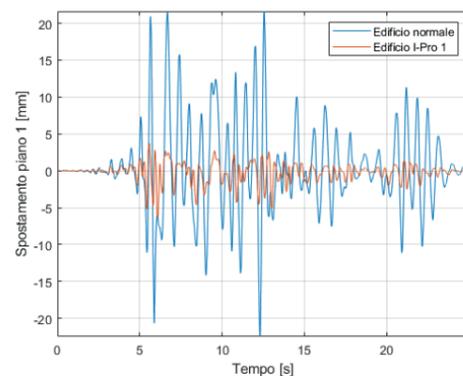


FIGURA 46 - Spostamento relativo alla base del piano 1. **Blu:** edificio privo del sistema I-Pro 1; **rosso:** edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

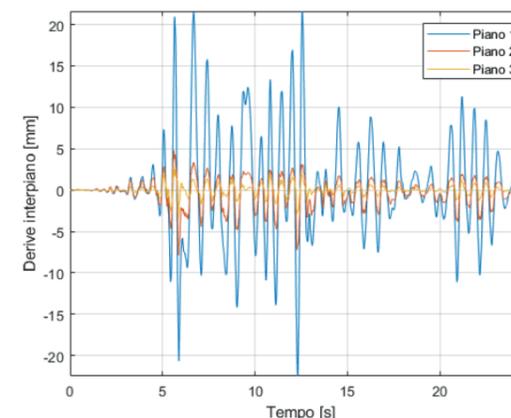


FIGURA 47 (a) - Derive interpiano dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.

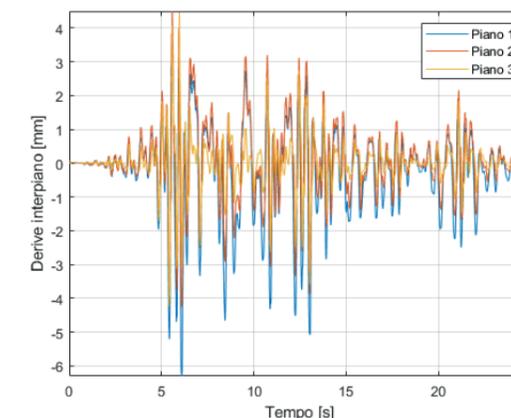


FIGURA 47 (b) - Derive interpiano dell'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1.

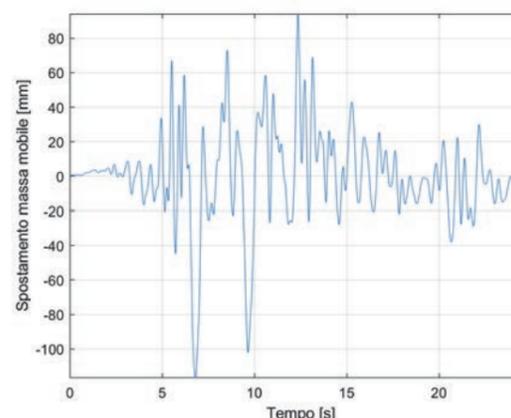


FIGURA 48 - Spostamento relativo della massa attiva del sistema I-Pro 1 durante il sisma.

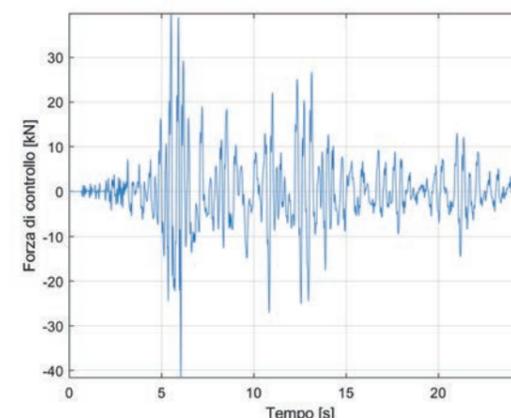
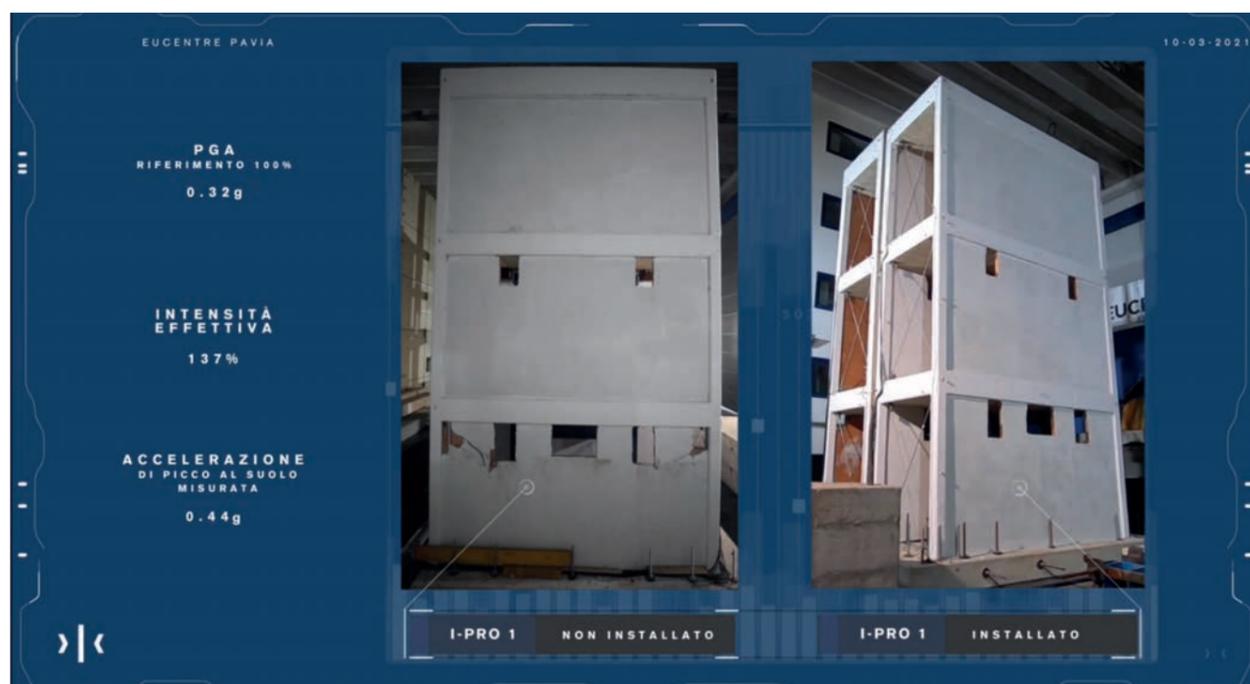


FIGURA 49 - Forza di controllo attivo scaricata dal sistema I-Pro 1 sull'edificio durante il sisma.

Picco massimo raggiunto Sisma PGA 0,44 [g]	Edificio normale	Edificio I-Pro 1	Miglioramento [%]
Spostamento relativo al basamento Piano 3 [mm]	31,64	13,46	57,4
Spostamento relativo al basamento Piano 2 [mm]	29,13	10,53	63,8
Spostamento relativo al basamento Piano 1 [mm]	22,48	6,31	71,9
Deriva interpiano Piano 3 [mm]	3,44	4,47	-29,9
Deriva interpiano Piano 2 [mm]	7,90	4,50	40,0
Deriva interpiano Piano 1 [mm]	22,48	6,31	71,9

TABELLA 7 - Resoconto dei risultati della prova: spostamenti relativi massimi, derive interpiano massime, miglioramenti percentuali tra edificio equipaggiato del sistema di controllo ed edificio privo del sistema.



Attenzione:

Nonostante un valore negativo del miglioramento percentuale della deriva del piano 3 possa far pensare ad un peggioramento del comportamento strutturale dell'edificio dotato del sistema I-Pro 1 rispetto all'edificio privo di esso, si fa notare invece che la struttura priva del sistema I-Pro 1 risponde con meccanismo definito di "piano debole". Di conseguenza le derivate inter piano dei piani superiori non sono comparabili con quelli che avrebbe avuto la stessa struttura se fosse rimasta in campo elastico-lineare, cosa che è appunto avvenuta per la struttura equipaggiata del sistema di controllo I-Pro 1. Il sisma di intensità massima ha prodotto ingenti danni sulla struttura non dotata del sistema I-Pro 1 (Figura 53). Gli elementi non strutturali sono stati fortemente danneggiati arrivando al crollo di porzioni delle tamponature al primo piano (come dimostrato in Figura 55 e Figura 56) Inoltre gli elementi strutturali hanno subito forti danni arrivando al cedimento dei nodi

soffitto-pilastro del primo piano (vedi Figura 57, Figura 58, Figura 59 e Figura 60), di fatto compromettendo l'agibilità della struttura e portando al minimo la capacità di resistenza a carichi orizzontali. L'edificio ha presentato un meccanismo di fallimento definibile di "piano debole" portando di fatto ad un comportamento non desiderabile dovuto all'annullamento delle capacità dissipative residue. Inoltre, si sono verificati danneggiamenti agli elementi non strutturali anche del secondo piano dell'edificio (vedi Figura 61). La struttura equipaggiata del sistema di controllo I-Pro 1, invece, ha riscontrato solo lievi fessurazioni sugli elementi non strutturali (intonaco e rasatura), mantenendo l'integrità di tutti gli elementi strutturali e non strutturali. Infatti, come è possibile vedere in Figura 62, l'unica fessurazione già presente nella parte architettonica non ha subito peggioramenti ed è rimasta sostanzialmente uguale a quella già mostrata in Figura 34.

Cliccare sulle immagini a lato per vedere i video in ipertesto:

FIGURA 50 - vista 1 della prova di sisma a 0,44 g.
 FIGURA 51 - vista 2 della prova di sisma a 0,44 g.
 FIGURA 52 - vista 3 della prova di sisma a 0,44 g.



FIGURA 53 - Vista dell'edificio privo del sistema I-Pro 1 post simulazione di sisma a 0,44 g.

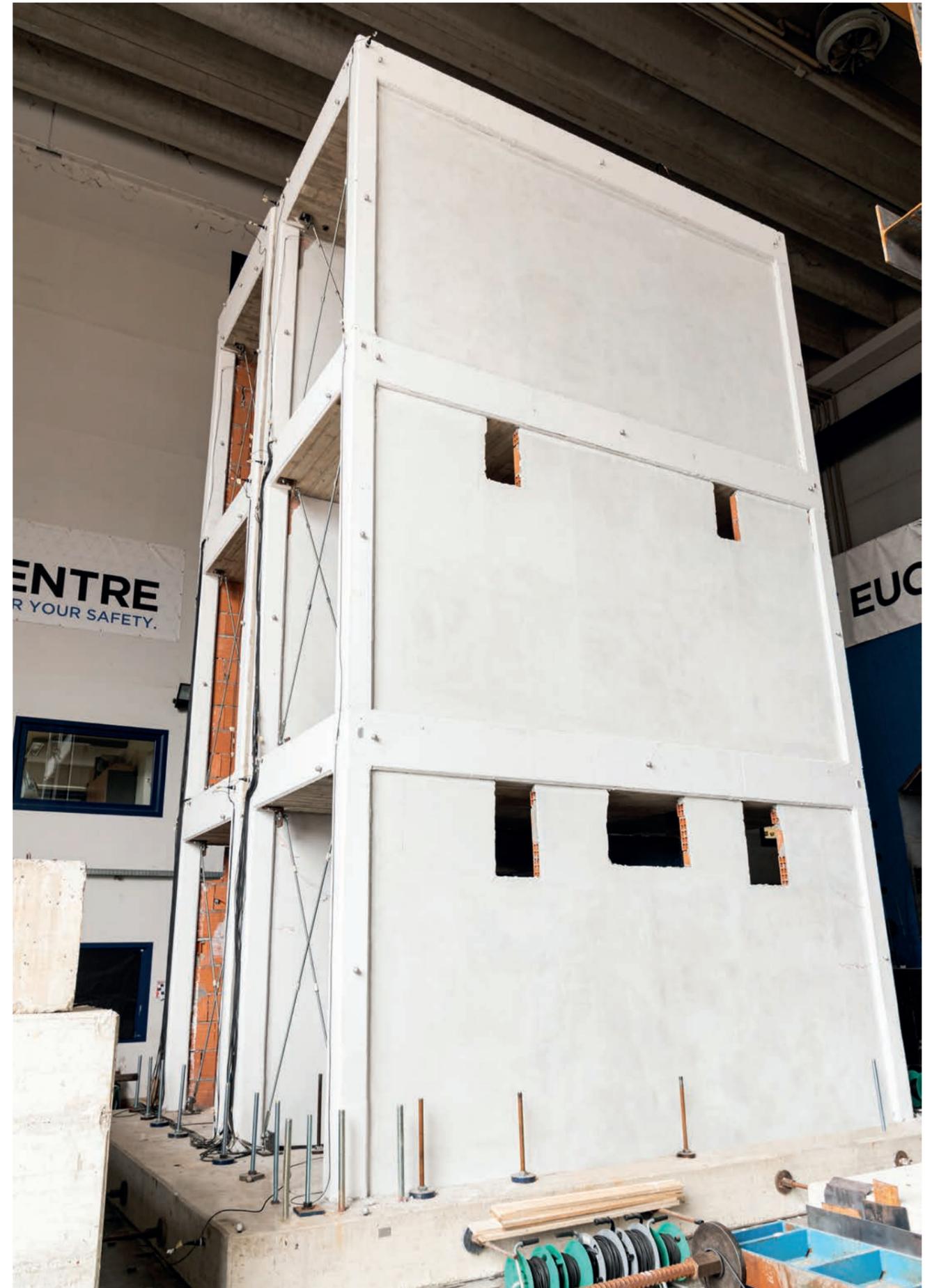


FIGURA 54 - Vista dell'edificio equipaggiato del sistema I-Pro 1 post simulazione di sisma a 0,44 g.

Danneggiamenti agli
elementi strutturali e
non strutturali.



FIGURA 55 - Danneggiamenti agli elementi strutturali e non strutturali della porzione posteriore-destra dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.



FIGURA 56 - Danneggiamenti agli elementi strutturali e non strutturali della porzione anteriore-destra dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.



FIGURA 57 - Vista di dettaglio della porzione posteriore-destra dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.

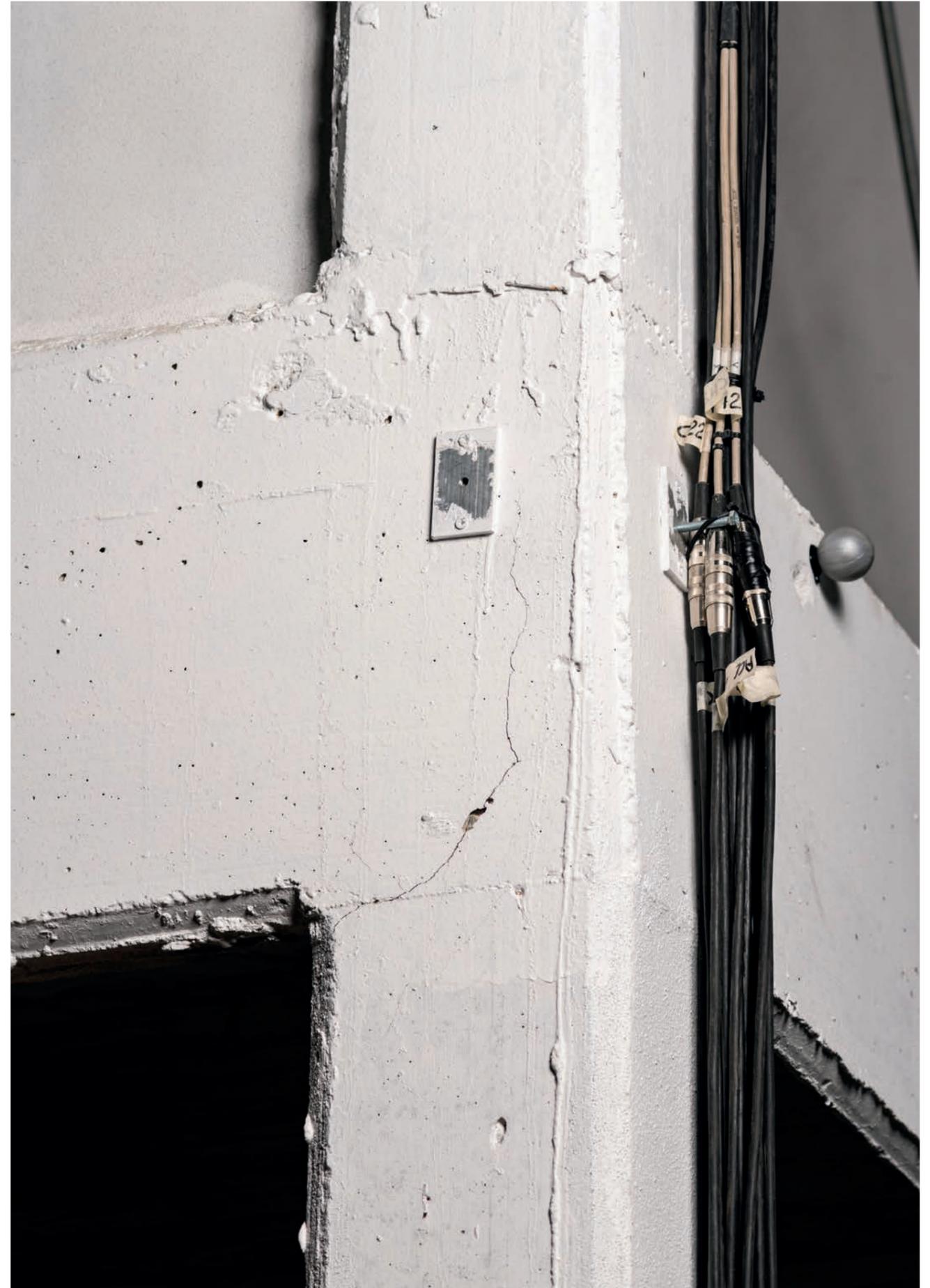


FIGURA 58 - Vista di dettaglio della porzione anteriore-destra dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.



FIGURA 59 - Cedimento del nodo pilastro-solai della porzione posteriore-sinistra dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.



FIGURA 60 - Cedimento del nodo pilastro-solai della porzione posteriore-destra dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.

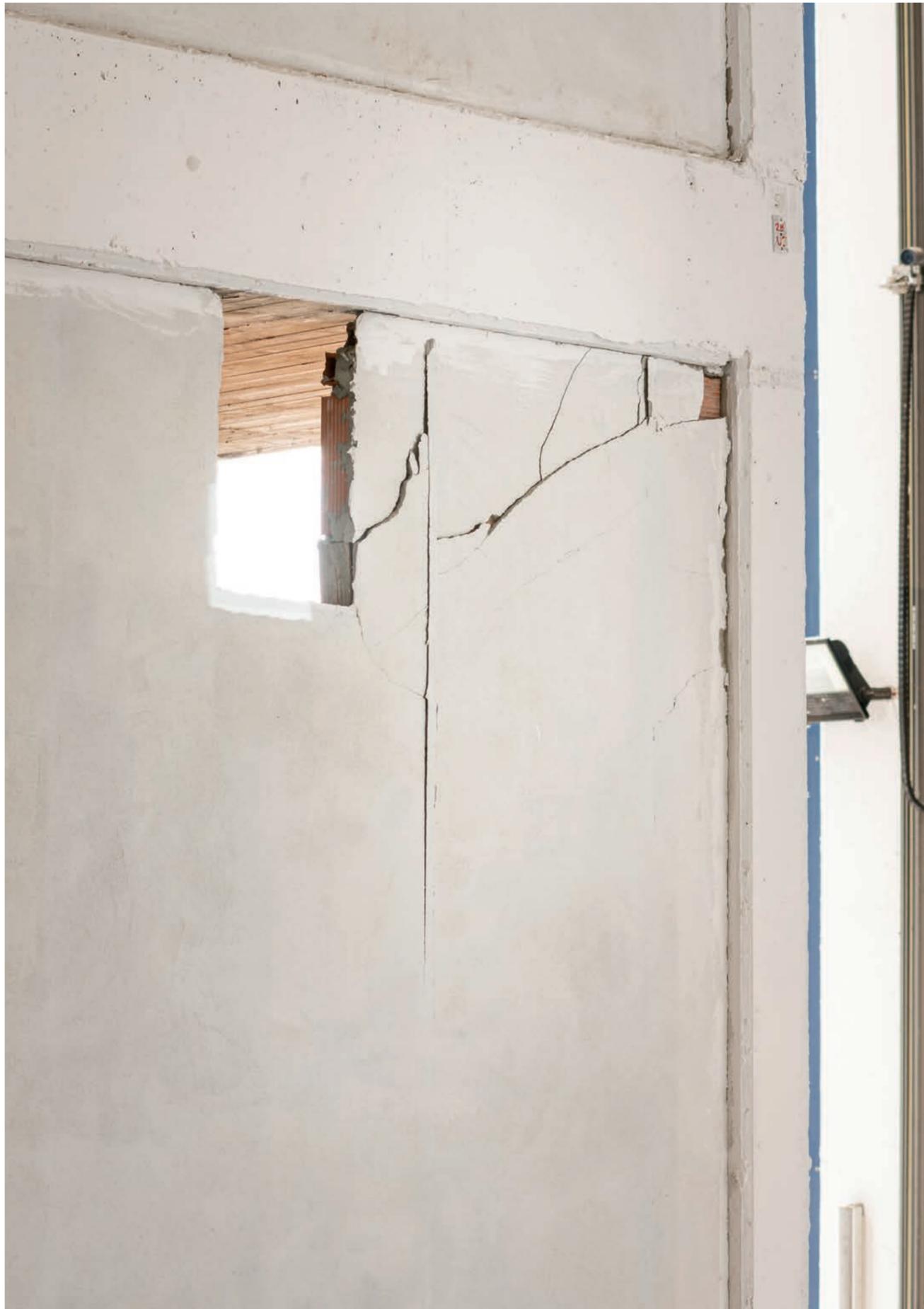


FIGURA 61 - Danneggiamenti degli elementi non strutturali al secondo piano dell'edificio privo del sistema I-Pro 1.



FIGURA 62 - Stato degli elementi strutturali e non strutturali della struttura dotata del sistema I-Pro 1: leggera fessurazione già presente sulla tamponatura del piano terra della struttura e non peggiorata nei sismi successivi.

06 CONCLUSIONI

RISULTATI DELLE PROVE DI LABORATORIO.

Nei capitoli precedenti è stata mostrata la campagna sperimentale che ha portato a testare l'innovativo sistema di controllo attivo I-Pro 1 sulla tavola vibrante ad 1 GdL più grande d'Europa, presso i laboratori EUCENTRE di Pavia.

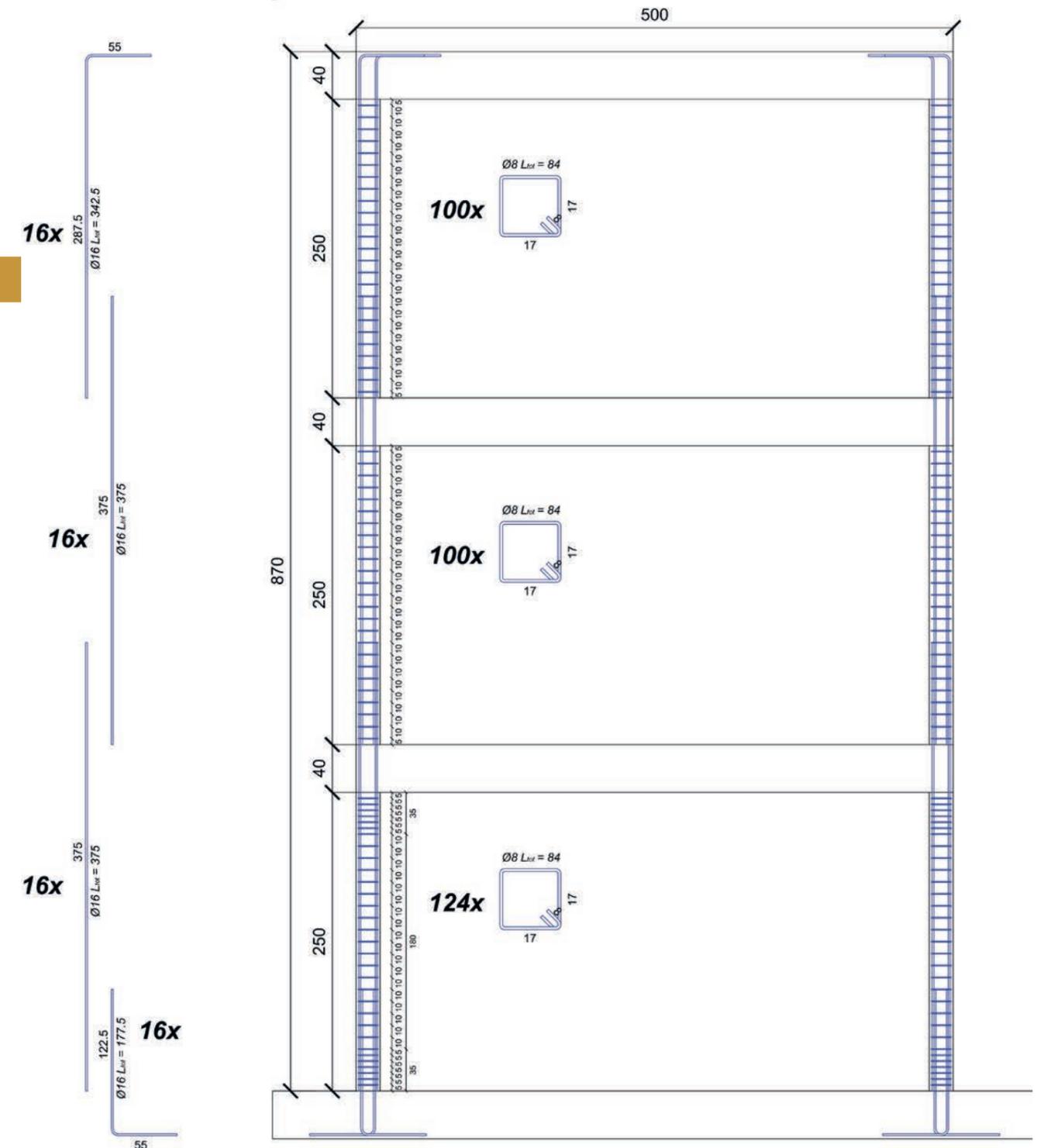
In particolare, è stato mostrato:

- Il funzionamento del sistema di controllo attivo della risposta sismica I-Pro 1;
 - Le strutture reali che sono state realizzate presso i laboratori EUCENTRE di Pavia ed ancorate sulla tavola vibrante;
 - Il setup del sistema installato su uno dei due edifici ed i componenti di cui è composto;
 - I risultati dell'analisi di identificazione modale delle strutture che hanno dimostrato l'uguaglianza delle due strutture oggetto delle prove in laboratorio;
- Le prove Hardware In the Loop (HIL) effettuate per verifica, controllo qualità e collaudo del sistema;
- I risultati sperimentali ottenuti dalle prove di laboratorio.

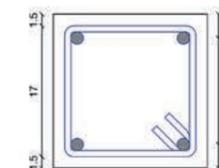
Con questo report tecnico si è dimostrata la capacità del sistema di controllo attivo I-Pro 1 di ridurre la risposta sismica di un edificio in scala reale a diverse intensità di sisma. Le prestazioni dinamiche globali dell'edificio sono migliorate significativamente, portando ad una riduzione degli spostamenti relativi dei solai e di conseguenza salvaguardando la struttura da rischi di danneggiamenti di elementi strutturali e non strutturali.

Si è ottenuto un miglioramento/adeguamento sismico dell'edificio per diversi stati limite, permettendo alla struttura di rispettare anche gli stringenti requisiti sul comportamento in campo lineare-elastico. Contrariamente all'edificio equipaggiato con il sistema di controllo attivo I-Pro 1, l'edificio non controllato ha subito gravi danni agli elementi strutturali e non-strutturali portando a un comportamento non lineare dell'edificio di fatto compromettendo l'agibilità della struttura e portando al minimo la capacità di resistenza a carichi orizzontali.

Edificio 1 - Disposizione barre di armatura



Materiali:
Acciaio B450C
Calcestruzzo C30/37



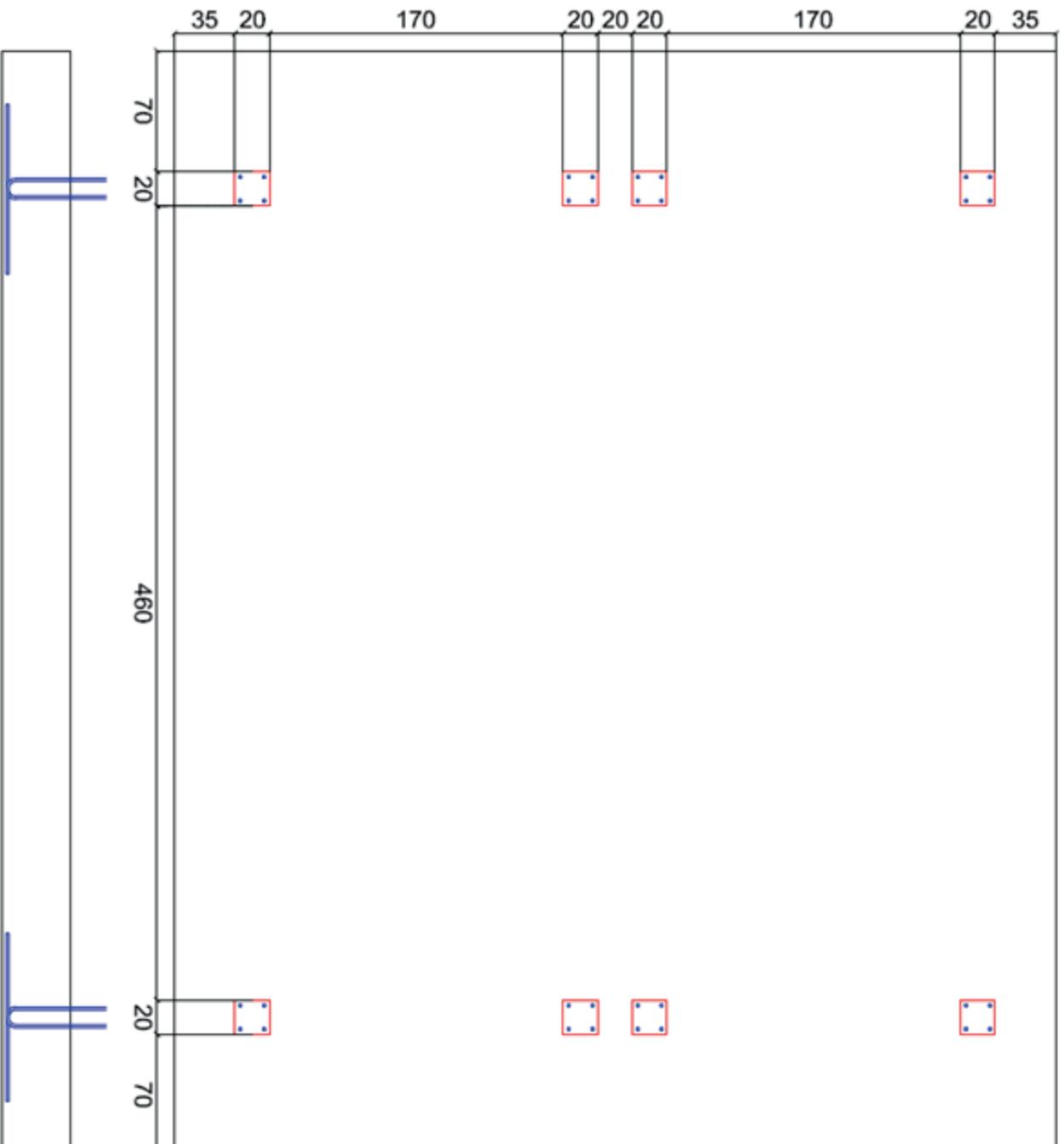
EUCENTRE

European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering

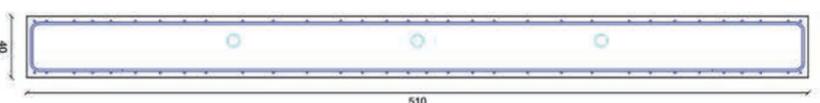
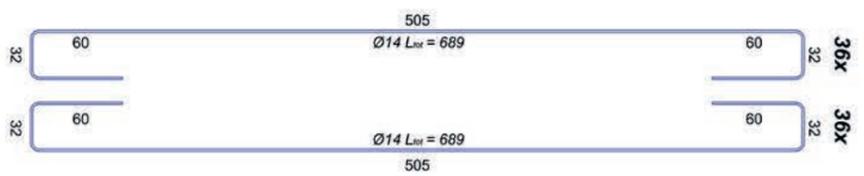
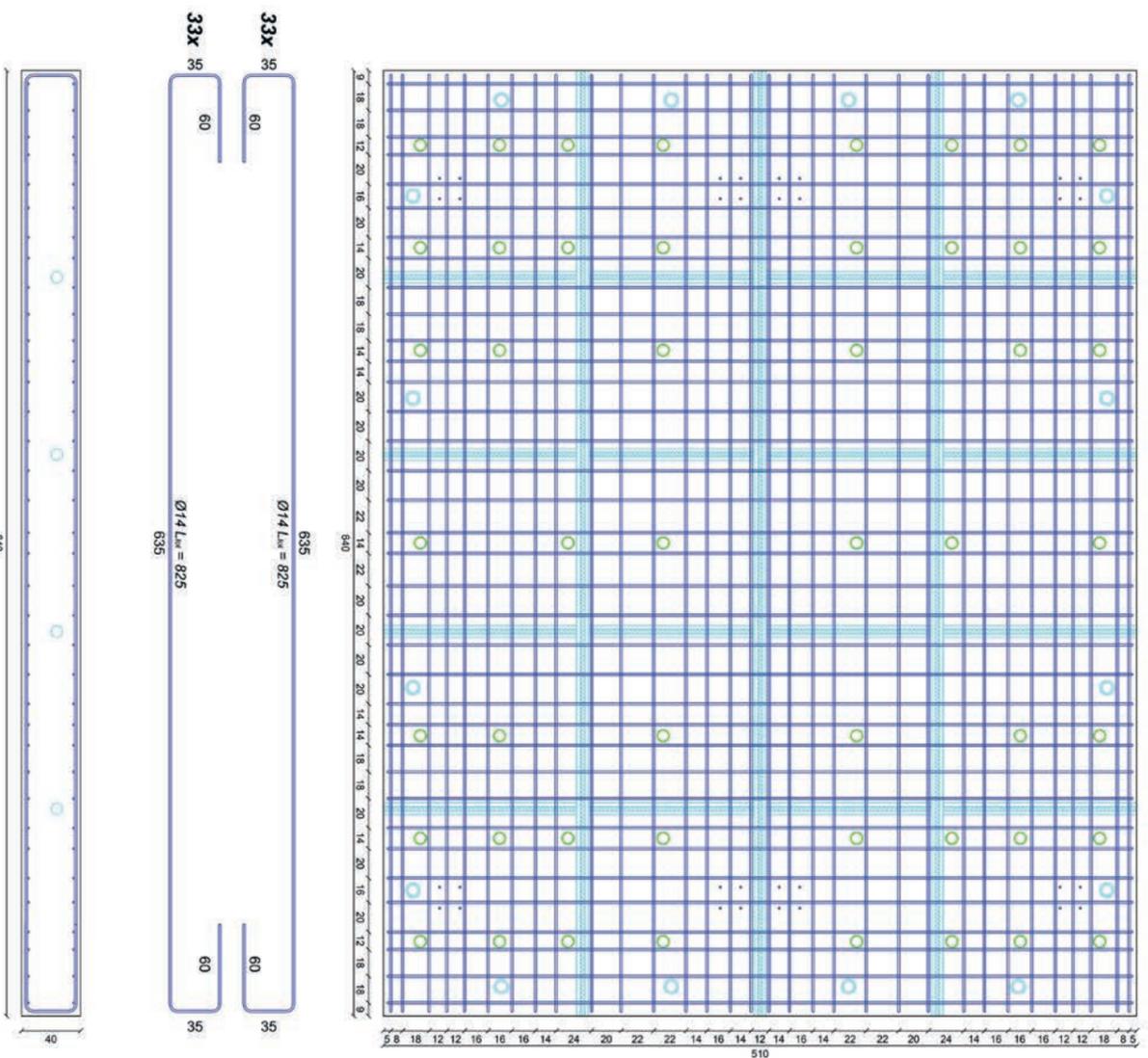
ISAAC

Progetto esecutivo di provini in calcestruzzo armato

Edificio 1 - Disposizione barre di armatura



Plataea fondazione - Disposizione barre di armatura

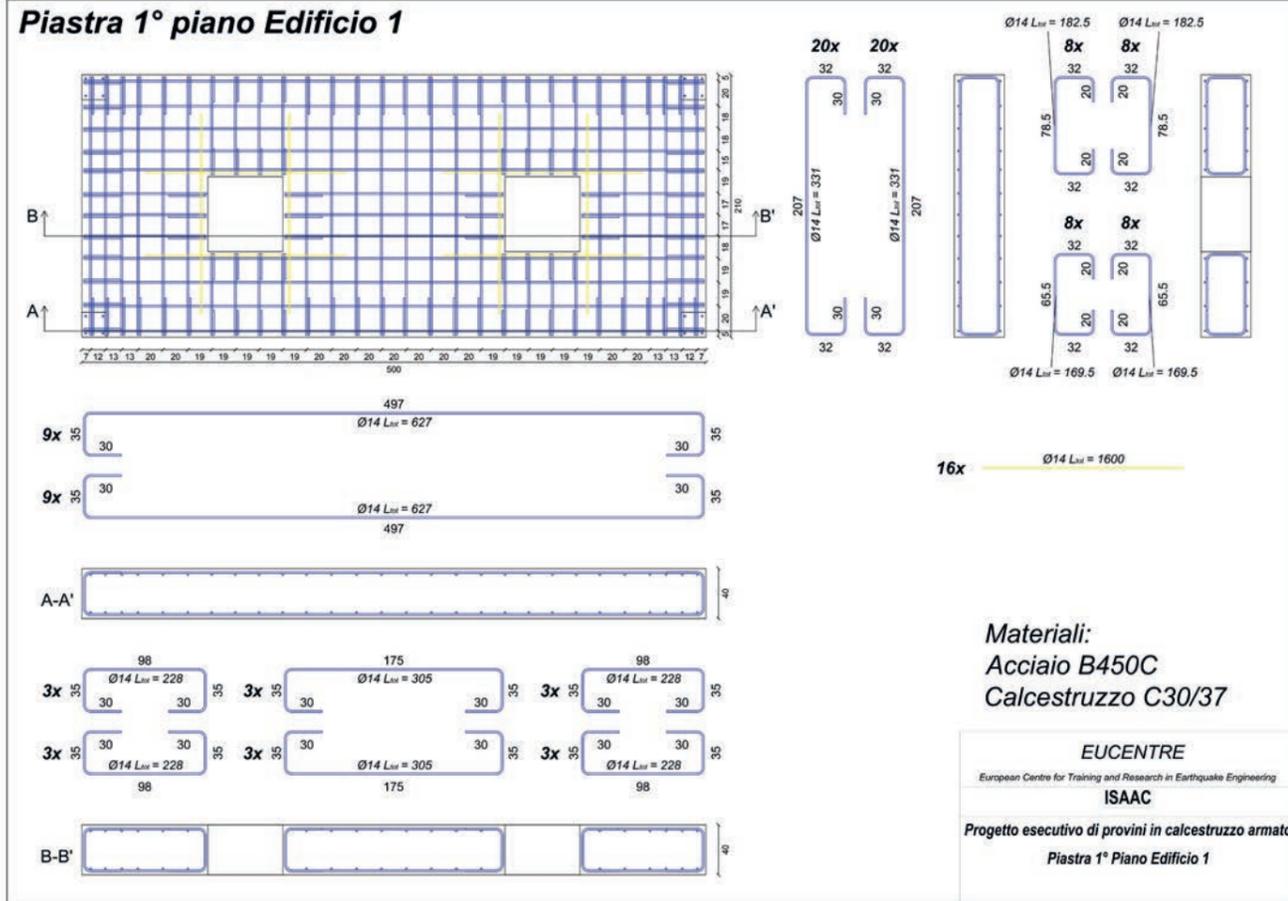


Materiali:
Acciaio B450C
Calcestruzzo C30/37

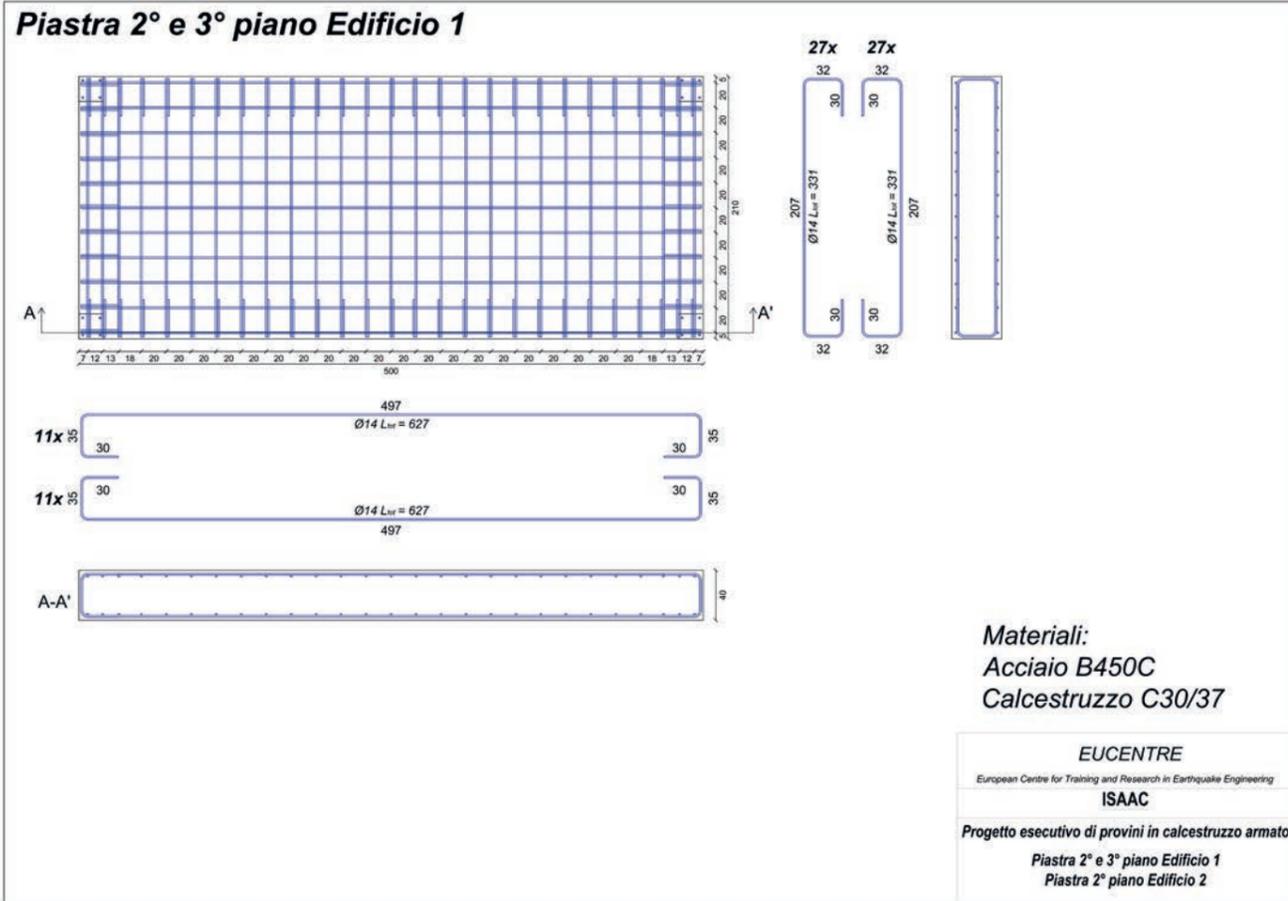
EUCENTRE
 European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering
ISAAC

Progetto esecutivo di provini in calcestruzzo armato
Plataea fondazione

Piastra 1° piano Edificio 1



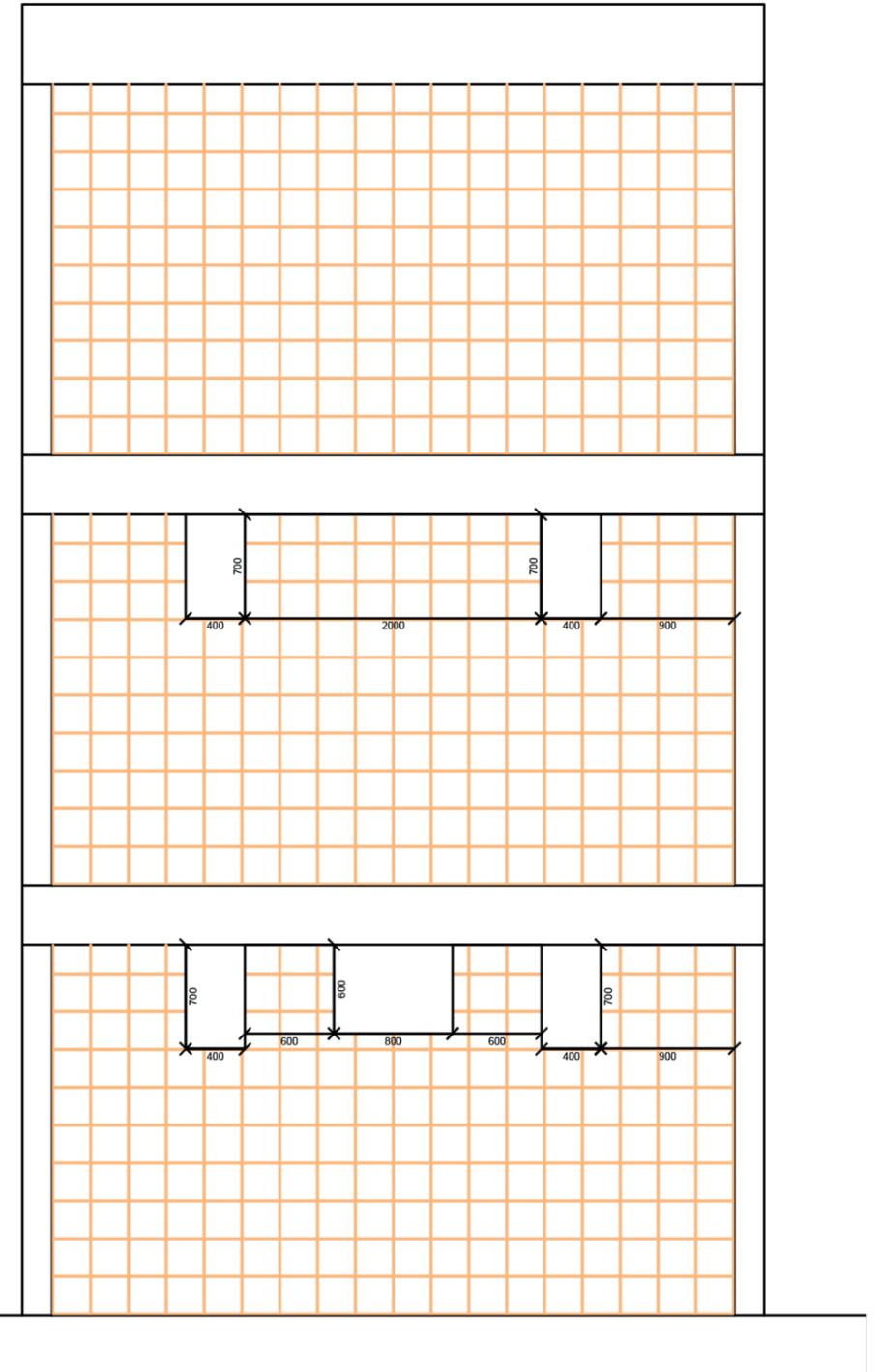
Piastra 2° e 3° piano Edificio 1



Edificio 1 - Tamponamenti sui lati lunghi

Blocchi disposti con fori orizzontali e malta solo nei letti orizzontali

Materiali:
 - Forati spessore 8 cm
 Dimensioni circa 25x25 con foratura circa 55%
 - Malta M5



EUCENTRE
 European Centre for Training and Research in Earthquake Engineering
ISAAC
 Progetto esecutivo di provini in calcestruzzo armato
 Tamponamenti



FIGURA 63 - Fase realizzativa del secondo piano degli edifici all'esterno dei laboratori (vista 1).



FIGURA 64 - Fase realizzativa del secondo piano degli edifici all'esterno dei laboratori (vista 2).



FIGURA 65 - Fase realizzativa del secondo piano degli edifici all'esterno dei laboratori (vista 3).



FIGURA 66 - Telai degli edifici in c.a. non ancora tamponati e con telaio di sicurezza interno in acciaio prima del trasporto su tavola vibrante.



FIGURA 67 - Telai degli edifici in c.a. non ancora tamponati e con telaio di sicurezza interno in acciaio durante le fasi di trasporto e di posizionamento su tavola vibrante.



FIGURA 68 - Telai degli edifici in c.a. non ancora tamponati e con telaio di sicurezza interno in acciaio durante le fasi di trasporto e di posizionamento su tavola vibrante.



FIGURA 69 - Fase di realizzazione del terzo piano dei telai in c.a. degli edifici posizionati su tavola vibrante.



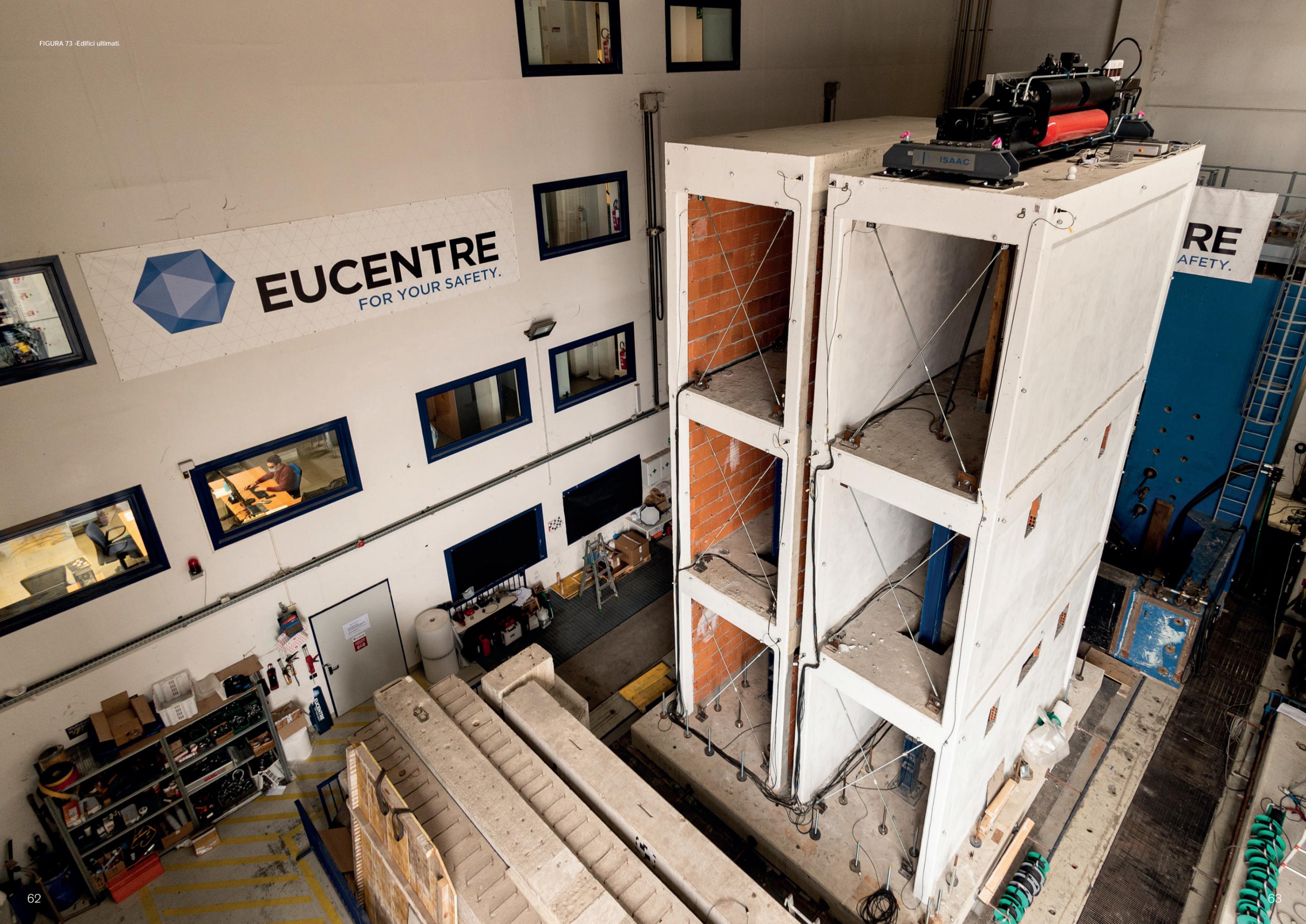
FIGURA 70 - Tamponamento del primo piano degli edifici.



FIGURA 71 - Fase di realizzazione del terzo piano dei telai in c.a. degli edifici e inizio dei tamponamenti in laterizio.



FIGURA 72 - Telai degli edifici in c.a. tamponati durante le ultime fasi di realizzazione all'interno dei laboratori.



#ProtectValues



ISAAC srl
+39 02 50021099
info@isaacsrl.com
isaacantisismica.com