



# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività SIC\_F4.3 | Affiancamento per la valutazione dell'operatività strutturale degli edifici strategici in condizioni dinamiche nei Contesti Territoriali individuati come prioritari

## Valutazioni operatività strutturale edifici strategici Regione Siciliana

**Versione 1.2**

Publicato in data 13/12/2021





# PON GOVERNANCE 2014-2020 Rischio Sismico e Vulcanico

Attività SIC\_F4.3 | Affiancamento per la valutazione dell'operatività strutturale degli edifici strategici in condizioni dinamiche nei Contesti Territoriali individuati come prioritari

## Valutazioni operatività strutturale edifici strategici Regione Siciliana

**Versione 1.2**

Publicato in data 13/12/2021



## PON GOVERNANCE E CAPACITÀ ISTITUZIONALE 2014-2020

PROGRAMMA PER IL SUPPORTO AL RAFFORZAMENTO DELLA GOVERNANCE IN MATERIA DI RIDUZIONE DEL RISCHIO SISMICO E VULCANICO AI FINI DI PROTEZIONE CIVILE

### DIPARTIMENTO DELLA PROTEZIONE CIVILE

#### Struttura responsabile dell'attuazione del Programma

Fabrizio Curcio (responsabile), Eliana Mazzaro (supporto)

Immacolata Postiglione (delega funzioni specifiche)

#### Unità di coordinamento

Fabrizio Brammerini, Angelo Corazza, Luigi D'Angelo, Fausto Guzzetti, Francesca Romana Paneforte, Paola Stefanelli

#### Unità operativa rischi

Paola Bertuccioli, Sergio Castenetto, Stefano Ciolli, Andrea Duro, Emilio De Francesco, Marco Falzacappa, Domenico Fiorito, Pietro Giordano, Antonella Gorini, Giuseppe Naso, Stefania Renzulli, Daniele Spina

#### Unità di raccordo DPC

Silvia Alessandrini, Sara Babusci, Pierluigi Cara, Patrizia Castigliero, Valter Germani, Maria Penna

#### Unità amministrativa e finanziaria

Valentina Carabellese, Francesca De Sandro, Susanna Gregori, Maria Cristina Nardella

#### Hanno fatto parte della struttura

Angelo Borrelli, Gabriella Carunchio, Luciano Cavarra, Pietro Colicchio, Biagio Costa, Lavinia Di Meo, Gianluca Garro, Antonio Gioia, Francesca Giuliani, Italo Giulivo, Fabio Maurano, Natale Mazzei, Agostino Miozzo, Paolo Molinari, Anna Natili, Roberto Oreficini Rosi, Lucia Palermo, Simona Palmiero, Ada Paolucci, Sara Petrinelli, Biagio Prezioso, Umberto Rosini, Marco Rossitto, Sisto Russo, Chiara Salustri Galli, Maria Siclari, Maurilio Silvestri, Gianfranco Sorchetti, Vincenzo Vigorita

### REGIONI

#### Referenti

*Basilicata:* Claudio Berardi, Antonella Belgiovine, Maria Carmela Bruno, Cinzia Fabozzi, Donatella Ferrara, Cosimo Grieco, Guido Loperte (coordinatore), Alfredo Maffei, Pietro Perrone; *Calabria:* Fortunato Varone (coordinatore); *Campania:* Mauro Biafore (coordinatore), Claudia Campobasso, Luigi Cristiano, Emilio Ferrara, Luigi Gentilella, Maurizio Giannattasio, Francesca Maggiò, Celestino Rampino; *Puglia:* Tiziana Bisantino (coordinatore), Carlo Caricasole, Domenico Donvito, Franco Intini, Teresa Mungari, Fabrizio Panariello, Francesco Ronco, Zoida Tafila; *Sicilia:* Giuseppe Basile, Antonio Brucculeri, Aldo Guadagnino, Maria Nella Panebianco, Antonio Torrisi

#### Sono stati referenti

*Basilicata:* Alberto Caivano; *Calabria:* Giuseppe Iritano, Domenico Pallaria, Francesco Russo (coordinatore), Carlo Tansi, Luigi Giuseppe Zinno; *Puglia:* Giuseppe Tedeschi; *Campania:* Crescenzo Minotta; *Sicilia:* Nicola Alleruzzo

#### Affidamento di servizi del DPC al CNR-IGAG

*Responsabile Unico del Procedimento:* Mario Nicoletti

*Direttore di Esecuzione Contrattuale:* Fabrizio Brammerini

*Referenti rischio sismico:* Fabrizio Brammerini, Sergio Castenetto, Daniele Spina, Antonella Gorini, Giuseppe Naso

*Referente rischio vulcanico:* Stefano Ciolli

*Referenti pianificazione di emergenza:* Domenico Fiorito, Stefania Renzulli

#### CNR-IGAG (operatore economico rischio sismico e vulcanico)

Massimiliano Moscatelli (referente)

#### Struttura di coordinamento

Gianluca Carbone, Claudio Chiappetta, Francesco Fazio, Massimo Mari, Silvia Massaro, Federico Mori, Edoardo Peronace, Attilio Porchia, Francesco Stigliano (coordinatore operativo)

#### Struttura tecnica

Angelo Anelli, Massimo Cesarano, Eleonora Cianci, Stefania Fabozzi, Gaetano Falcone, Cora Fontana, Angelo Gigliotti, Michele Livani, Amerigo Mendicelli, Giuseppe Occhipinti, Federica Polpetta, Alessandro Settimi, Rose Line Spacagna, Daniel Tentori, Valentina Tomassoni

#### Struttura gestionale

Lucia Paciucci (coordinatrice gestionale), Francesca Argiolas (supporto gestionale), Federica Polpetta (supporto gestionale), Francesco Petracchini

#### Revisori

Emilio Bilotta, Paolo Boncio, Paolo Clemente, Maria Ioannilli, Massimo Mazzanti, Roberto Santacroce, Carlo Viggiani

#### Supporto tecnico-amministrativo

Francesca Argiolas, Patrizia Capparella, Martina De Angelis, Marco Gozzi, Alessandro Leli, Patrizia Mirelli, Simona Rosselli

#### Hanno fatto parte della struttura

Raffaella Ciuffreda, Giuseppe Cosentino, Melissa Di Salvo, Giovanni Di Trapani, Rosa Marina Donolo, Carolina Fortunato, Biagio Giaccio, Marco Modica, Marco Nocentini, Andrea Rampa, Laura Ragazzi, Gino Romagnoli, Paolo Tommasi, Vitantonio Vacca

### SIC\_F4.3 | Affiancamento per la valutazione dell'operatività strutturale degli edifici strategici in condizioni dinamiche nei contesti territoriali individuati come prioritari

**Responsabile DPC:** Daniele Spina

**Responsabile CNR-IGAG:** Federico Mori

#### A cura di

Giuseppe Occhipinti, Gianluca Acunzo

versione colophon 06/12/2021

# Sommario

---

<b>1</b>	<b>Introduzione</b>	<b>5</b>
1.1	<i>Modello SMAV</i>	5
1.2	<i>Curve di fragilità tramite modello "SMAV"</i>	7
1.3	<i>Modellazione a macro-elementi discreti</i>	9
1.4	<i>Modello semplificato a trave equivalente</i>	11
<b>2</b>	<b>I modelli per la valutazione di operatività degli edifici strategici</b>	<b>13</b>
2.1	<i>ES1 - COM del Comune di Lentini</i>	13
2.1.1	Ricerca documentale	14
2.1.2	Campagna di misure di vibrazione	20
2.1.3	Risultati sperimentali	27
2.1.4	Modello SMAV	28
2.1.5	Curve di fragilità	30
2.2	<i>ES2 - Presidio Ospedaliero di Lentini</i>	32
2.2.1	Ricerca documentale	34
2.2.2	Campagna di misure di vibrazione	44
2.2.3	Risultati sperimentali	49
2.2.4	Modellazione a macro-elementi discreti	51
2.2.5	Curve di fragilità	69
2.3	<i>ES3 - Caserma dei VVF del Comune di Augusta</i>	71
2.3.1	Ricerca documentale	71
2.3.2	Campagna di misure di vibrazione	73
2.3.3	Risultati sperimentali	77
2.3.4	Modellazione a macro-elementi discreti	78
2.3.5	Modello SMAV	79
2.3.6	Curve di fragilità	81

# 1 Introduzione

Il presente report costituisce l'applicazione della metodologia sperimentale per la valutazione di operatività strutturale degli edifici strategici. I risultati, in termini di curve di fragilità, contribuiscono al calcolo dell'indice di operatività IOCT come esposto nel report SIC\_F4.4.

Per ogni edificio in esame sono stati applicati i seguenti passi di analisi:

- Ricerca documentale presso gli uffici tecnici;
- Attuazione della campagna di misure di vibrazione;
- Restituzione delle grandezze dinamiche fondamentali sperimentali (frequenze, forme modali e smorzamenti)
- Generazione di un modello semplificato denominato SMAV (Mori & Spina, 2015) sulla base dei dati sperimentali
- Creazione delle curve di fragilità specifiche per ogni edificio con l'ausilio del modello SMAV
- Modellazione a Macro-elementi discreti (Caliò & Pantò, 2014) a supporto per alcuni casi su cui la documentazione si è ritenuta congrua al tipo di modellazione.

Nel seguito per ogni edificio oggetto della presente relazione verranno descritti i risultati dei precedenti passi di analisi.

In questa sezione si introducono brevemente gli aspetti teorici che verranno richiamati nei successivi capitoli.

A tal proposito si introducono di seguito:

- La modellazione SMAV,
- L'uso del modello SMAV per la generazione delle curve di fragilità
- La strategia di modellazione a macro-elementi discreti.

Ulteriori approfondimenti agli argomenti possono essere trovati nella letteratura scientifica richiamata in bibliografia.

Per ultimo, si riporta brevemente un approccio semplificato definito di tipo a trave equivalente (Greco, et al., 2020) adottato nella rappresentazione semplificata degli edifici multipiano e calibrato sui dati sperimentali di identificazione dinamica.

## 1.1 Modello SMAV

Il modello SMAV (Mori & Spina, 2015) è basato sui parametri modali sperimentali dell'edificio, cioè frequenze e forme modali, utilizzati per calcolare la risposta sismica della struttura attraverso un'analisi dinamica lineare che opera per sovrapposizione modale.

Per completare il modello modale ed eseguire l'analisi dinamica lineare è necessario conoscere il coefficiente di partecipazione sismica o, in alternativa, la massa sismica di ciascun modo di vibrare. Poiché tali parametri non possono essere ricavati sperimentalmente attraverso tecniche di analisi modale operativa (OMA), essi sono ricavati numericamente definendo un particolare modello cinematico-inerziale dell'edificio denominato Multi Rigid Polygons (MRP).

Nel modello MRP l'edificio è suddiviso in  $p$  impalcati fuori terra, ciascuno dei quali è a sua volta suddiviso in  $n$  poligoni, che si assume abbiano un comportamento rigido nel proprio piano e siano quindi dotati di 3 gradi di libertà, due traslazioni e una rotazione rigida intorno all'asse verticale passante per il baricentro. Tutte le masse dell'edificio, anche quelle che non giacciono

nel piano dell'impalcato, come le masse delle strutture portanti verticali o delle tamponature, sono concentrata nel baricentro dei poligoni, dove si assegna una massa  $M_x=M_y$  e un momento di inerzia polare  $I$  (massa rotazionale). Si osserva che la congruenza degli spostamenti nei punti che appartengono a più poligoni è assicurata attribuendo a essi la media degli spostamenti che risulterebbero dalle traslazioni e rotazioni rigide dei singoli poligoni.

È importante aggiungere che per come è costruito, il modello SMAV consente di calcolare la risposta sismica in tutti i punti di un certo impalcato, cioè anche in punti non oggetto di misure sperimentali.

Il modello matematico sviluppato consente inoltre di stimare l'errore commesso nella ricostruzione degli spostamenti a causa dell'ipotesi cinematica di poligono rigido, confrontando le forme modali originariamente importate con le forme modali ricostruite, negli stessi gradi di libertà con il modello MRP.

La matrice di massa è costruita valutando le masse traslazionali e rotazionali a partire da un'analisi dei carichi agenti sugli impalcati rigidi, eseguita sulla base delle informazioni disponibili o da ipotesi ragionevoli sulla conformazione e i pesi di volume degli elementi strutturali. Viene calcolata la massa per unità di superficie per ciascun poligono che costituisce un orizzontamento, facendo riferimento ad un valore medio equivalente, lì dove si presentassero differenti tipologie di solaio all'interno dello stesso poligono.

Si osserva che la determinazione del tipo e della disposizione degli elementi strutturali è importante esclusivamente per il loro contributo alle caratteristiche inerziali della struttura, mentre non è necessario valutare il loro contributo alla rigidità, perché quest'ultimo è già implicitamente contenuto nei parametri modali sperimentali.

Una volta espresse le forme modali sperimentali nei gradi di libertà rigidi che caratterizzano il modello cinematico a poligoni rigidi, la matrice  $\mathbf{M}$  permette di calcolare i coefficienti di partecipazione modale e le corrispondenti masse partecipanti (Clough & Penzien, 2003).

L'analisi svolta è un'analisi dinamica lineare equivalente, in cui gli effetti dei singoli modi identificati vengono combinati attraverso la combinazione quadratica completa (Complete Quadratic Combination CQC).

Si può parlare di un'analisi lineare equivalente in quanto il modello SMAV tiene conto del decremento delle frequenze naturali al crescere della deformazione mediante una procedura iterativa basata su tre curve limite, ricavate da un'analisi probabilistica, che esprimono il decremento delle frequenze naturali in funzione del massimo *drift* medio, cioè del massimo spostamento dell'ultimo impalcato rispetto al terreno, diviso per la sua quota  $H$  rispetto al suolo.

Per valutare il decadimento delle frequenze al variare del *drift* tenendo conto della variabilità presente nel patrimonio edilizio esistente si è ricorso, sia per le strutture in muratura che per quelle in c.a., ad un'analisi di tipo Monte Carlo, ottenendo curve di abbattimento rappresentative delle incertezze sui parametri. In particolare in mancanza di dati sperimentali disponibili si genera un campione di dati dove vengono assegnati degli intervalli di valori ai parametri necessari a definire il modello, trattandoli come variabili aleatorie aventi distribuzione probabilistica. A partire dal campione generato si ricavano tre curve al di sotto delle quali ricadono rispettivamente il 16, il 50 e l'84 % dei campioni, che definiscono la curva limite inferiore, quella media e quella limite superiore.

Viene eseguita una prima analisi utilizzando le frequenze naturali dell'edificio risultanti dall'identificazione modale e vengono calcolati, per ciascuna curva, i valori di accelerazioni, spostamenti e *drift* di interpiano in ogni punto o coppia di punti. Noto il *drift* medio, viene calcolato il relativo decadimento delle frequenze e viene condotta una seconda analisi utilizzando le frequenze abbattute, ottenendo nuovi valori di *drift*. L'analisi prosegue in questo modo fino a convergenza, generalmente

raggiunta in meno di 10 iterazioni, nell'ipotesi di forme modali invarianti rispetto al massimo *drift* medio. Per lo smorzamento, anch'esso assunto invariante, si assume il valore convenzionale del 5 %.

La probabilità cumulata del massimo *drift* dell'edificio è ottenuta eseguendo tre diverse analisi lineari equivalenti, ciascuna con riferimento a una delle tre curve sopra descritte, che correlano il decremento della frequenza al *drift* medio. La prima analisi fa riferimento alla curva media, mentre le altre due rappresentano la curva limite inferiore e superiore.

A partire dai 3 valori di *drift* massimo così ottenuti, per un dato input sismico, viene costruita la funzione di probabilità cumulata del massimo *drift* dell'edificio, assumendo per essa una distribuzione di tipo log normale, che è risultata la più adatta a rappresentare la variabile aleatoria *drift* di interpiano, a seguito di un'analisi mirata a comparare le diverse distribuzioni probabilistiche.

## 1.2 Curve di fragilità tramite modello “SMAV”

La metodologia proposta si basa sull'identificazione delle specifiche proprietà dinamiche dell'edificio e del terreno di fondazione tramite misure di vibrazioni prodotte da sorgenti ambientali.

I parametri modali sono estratti dalle misure utilizzando tecniche afferenti alla Operational Modal Analysis (OMA).

Il modello matematico spaziale dell'edificio (SMAV, Seismic Model from Ambient Vibrations (Mori & Spina, 2015)), che prevede la riproduzione della cinematica di piano secondo una suddivisione ideale della planimetria in poligoni a comportamento rigido e massa concentrata, permette di eseguire un'analisi dinamica lineare equivalente al fine di prevedere la risposta sismica dell'edificio e determinare i valori di *drift* massimo in sommità e di interpiano. Questi, secondo un approccio probabilistico, vengono usati per generare i dati necessari al calcolo della funzione di fragilità.

Il parametro di intensità di misura lungo l'asse delle ascisse per le curve di fragilità è il parametro ASI. Acceleration Spectrum Intensity:

$$ASI_{T_1-T_2} = \int_{T_1}^{T_2} S_a(\xi, T) dT$$

Sa è lo spettro di risposta delle pseudo-accelerazioni,  $\xi$  è lo smorzamento (assunto convenzionalmente pari a 0.05), T il periodo di oscillazione, T1 e T2 rappresentano gli estremi dell'intervallo di periodi considerati. Questo parametro include gli effetti dell'ampiezza e del contenuto in frequenza del segnale.

Ai fini dell'utilizzazione dei risultati all'interno di IOCT si adottano gli stessi periodi di interesse adottati nel calcolo del parametro HMS (Mori, et al., 2019) espressi in funzione del numero di piani in elevazione degli edifici:

\* 0.1 - 0.5 sec per edifici con 1-3 piani.

\* 0.4 - 0.8 sec per edifici con 4-6 piani.

\* 0.7 – 1.1 sec per edifici con un numero di piani maggiore di 6 o isolati alla base.

La metodologia proposta si articola in tre fasi principali:

Fase 1 – Definizione dell'input sismico;

Fase 2 – Analisi SMAV (con l'impiego del software VaSCO-smav);

Fase 3 – Costruzione della Curva di Fragilità.

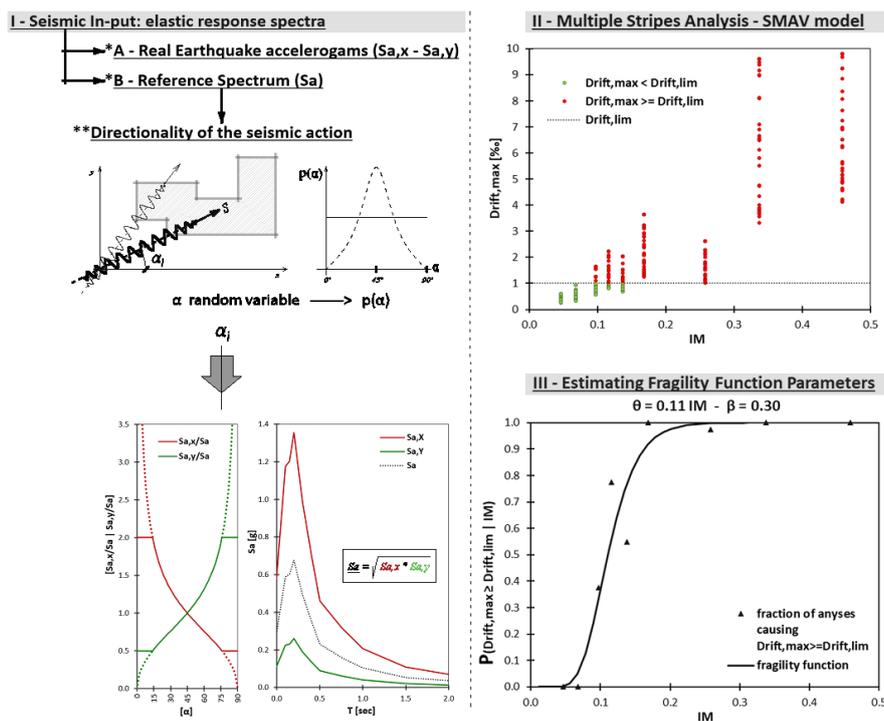


Figura 1-1 Rappresentazione delle fasi metodologiche per la costruzione delle curve di fragilità

### Fase 1 – Definizione dell'input sismico

Nella logica dell'approccio di tipo Multiple Stripes Analyses (J.M., 2015), al fine di ottenere una curva affidabile per tutte le intensità sismiche (IM), è necessario selezionare un input sismico che abbia la stessa numerosità di spettri per ogni sotto-intervallo di intensità sismica in cui è stato suddiviso l'intero intervallo di intensità sismica.

### Fase 2 – Analisi lineari equivalenti con modello SMAV ed elaborazione statistica dei risultati

A partire dalle proprietà modali (frequenze, forme modali e smorzamenti) valutate con opportune campagne di identificazione dinamica, l'edificio in esame viene interpretato matematicamente tramite un modello semplificato denominato SMAV (Spina, et al., 2019) ed elaborato tramite il software VascoSMAV (Acunzo, et al., 2015). Il software, in grado di determinare un parametro di operatività, IOPS (Dolce, et al., 2016), per ogni analisi, viene eseguito iterativamente per ogni input generato.

### Fase 3 – Costruzione della Curva di Fragilità

Le curve di fragilità forniscono la probabilità di un sistema strutturale, soggetto ad un input sismico assegnato, di superare determinati livelli di danno. Nell'approccio di tipo Multiple Stripes Analyses (J.M., 2015) alla curva di fragilità si perviene attraverso il calcolo di media  $\mu$  e deviazione standard  $\delta$  dei risultati delle analisi SMAV (Spina, et al., 2019) in base ai risultati delle singole bande a pari IM.

Le curve così ottenute esprimono la probabilità che il valore di drift sia superabile. È possibile, in via semplificata, correlare suddetto valore di spostamento con un livello di danneggiamento della struttura ed uno Stato Limite raggiunto.

### 1.3 Modellazione a macro-elementi discreti

La modellazione numerica di dettaglio è eseguita tramite approccio a macroelementi discreti implementato nel software commerciale 3DMacro (Caliò, et al., 2009) che è uno strumento per l'analisi e la stima della vulnerabilità sismica degli edifici in muratura e struttura mista.

La modellazione su cui è basato il software è riferita alla schematizzazione delle pareti sia in muratura che in cls mediante un macro-elemento piano sviluppato in ambito accademico da un team di ricerca dell'Università di Catania ed ampiamente validato dalla letteratura scientifica (Caddemi, et al., 2018; Caddemi, et al., 2018; Caliò & Pantò, 2014; Caliò, et al., 2006; Caliò, et al., 2004; Caliò, et al., 2012). Tale elemento simula i principali meccanismi di rottura nel piano dei pannelli murari e consente di modellare l'interazione tra muratura e telai in calcestruzzo armato. Tale interazione è modellata mediante un approccio in cui gli elementi del telaio sono modellati mediante elementi beam-column a plasticità concentrata mentre le tamponature sono modellate tramite il macro-elemento. Una modellazione di questo tipo, consente di trovare il giusto compromesso tra la complessità dei metodi agli elementi finiti non-lineari, accurati ma computazionalmente onerosi e difficili da interpretare, e l'eccessiva approssimazione degli approcci semplificati (modelli a telaio equivalente, ecc.).

A ciascun pannello murario è associato uno o più macro-elementi (con una mesh fitta quanto basta) in grado di cogliere i meccanismi di rottura e di stimarne, attraverso analisi non lineari (come le analisi pushover) la capacità portante.

Il vantaggio principale del tipo di modellazione a macroelementi è la riduzione dell'onere computazionale. Il macro-elemento con cui vengono modellate le porzioni di muratura o di cls, nella sua definizione piana, è costituito da un quadrilatero i cui vertici sono collegati da due molle diagonali non lineari e i cui lati rigidi interagiscono con i lati degli altri macro-elementi mediante delle interfacce discrete con limitata resistenza a trazione. Pertanto il macro-elemento può essere pensato come formato da due elementi principali: un elemento "pannello" costituito dal quadrilatero articolato e un elemento "interfaccia" costituito di un insieme discreto di molle che determinano l'interazione non lineare con gli elementi adiacenti.

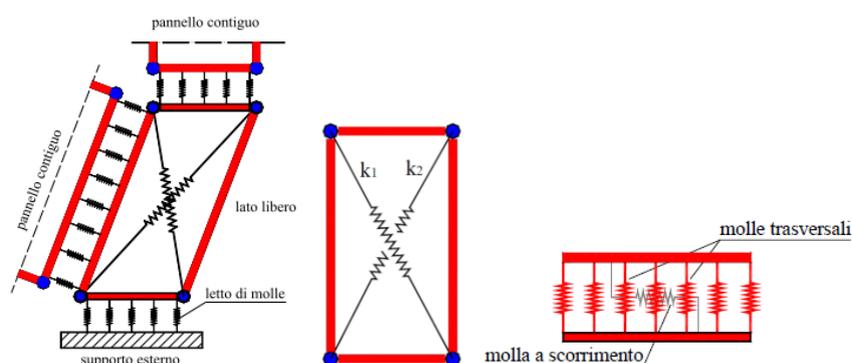


Figura 1-2 Rappresentazione del macro-modello piano (a sx) e di un'interfaccia (a dx)

Le molle diagonali dell'elemento pannello simulano la deformabilità a taglio della muratura rappresentata. Nelle molle poste in corrispondenza delle interfacce è concentrata la deformabilità assiale e flessionale di una porzione di muratura corrispondente a due pannelli contigui. Le molle non lineari (NLink), nel loro insieme, consentono di simulare i principali meccanismi di collasso della muratura nel proprio piano. L'interazione con altri elementi avviene su ciascuno dei lati del pannello. Il modello prevede la presenza di un'interfaccia ogni qualvolta un pannello abbia un lato, o una porzione di esso, in comune con un altro pannello.

Il numero di molle dell'interfaccia non aumenta i gradi di libertà, tuttavia, l'onere computazione dovuto a un maggior numero di molle è maggiore a causa della non-linearità del loro comportamento.

Tale approccio permette di modellare una parete di muratura sia con una mesh di macro-elementi minima che mediante una discretizzazione più fitta, modellando agevolmente anche schemi strutturali che presentano geometrie complesse e irregolari.

Considerato che il collasso di un elemento murario caricato verticalmente e sollecitato da azioni orizzontali nel proprio piano può avvenire secondo tre modalità, il modello consente di cogliere tutte e tre le tipologie di collasso nel piano.

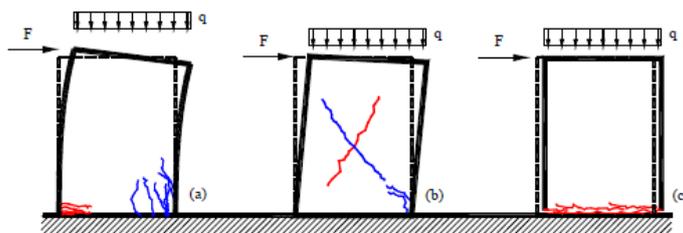


Figura 1-3 Meccanismi di rottura nel piano di un pannello murario: per flessione (a), per taglio diagonale (b), per scorrimento (c)

Il meccanismo di collasso flessionale viene simulato mediante le molle di interfaccia disposte ortogonalmente all'interfaccia stessa, le quali sono caratterizzate da una limitata resistenza a trazione e un comportamento elasto-fragile a trazione: lo schiacciamento della muratura sarà quindi associato alla progressiva plasticizzazione a compressione delle molle, mentre la fessurazione verrà associata alla rottura per trazione delle stesse. Il meccanismo di collasso a taglio per fessurazione diagonale, che rappresenta il più diffuso meccanismo di collasso nel piano, si manifesta con un quadro fessurativo costituito da fessure diagonali nella porzione centrale del pannello, lungo le isostatiche di compressione, dovute alla limitata resistenza a trazione. Tale meccanismo è simulato dal modello mediante l'attribuzione di un legame costitutivo non lineare ad hoc alle molle diagonali. Il meccanismo di collasso per scorrimento, infine, che in genere è trascurabile nelle applicazioni pratiche, diviene possibile solo in presenza di bassi valori del carico verticale (e quindi dello sforzo normale) o a seguito di consistenti parzializzazioni delle sezioni. Esso si manifesta con mutui scorrimenti tra due pannelli; viene simulato mediante un'unica molla longitudinale di interfaccia.

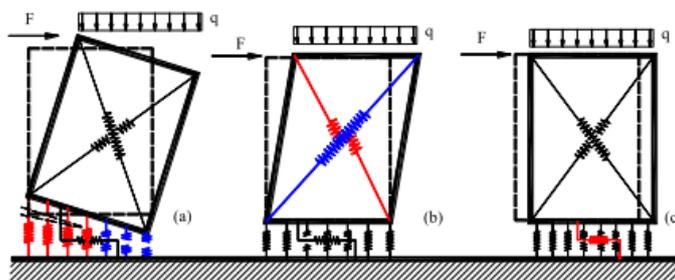


Figura 1-4 Simulazione dei meccanismi di rottura nel piano di un pannello murario: per flessione (a), per taglio diagonale (b), per scorrimento (c)

Cordoli e architravi vengono modellati attraverso elementi finiti non lineari di tipo beam a plasticità concentrata; la presenza di eventuali tiranti invece viene modellata mediante elementi reagenti solo a trazione di tipo truss. Un'asta può avere solo comportamento assiale (tiranti o catene), comportamento assiale e flessionale in un'unica direzione (cordolo, travi),

comportamento assiale e flessionale in due direzioni (pilastri). Il comportamento meccanico delle aste viene caratterizzata a partire dalle caratteristiche dei materiali componenti le sezioni. 3DMacro genera automaticamente i domini di ammissibilità delle sollecitazioni per una certa sezione. Dal punto di vista flessionale, per cogliere le progressive plasticizzazioni (comportamento non lineare) e per consentire l'interazione con la muratura, viene prevista la possibilità di suddividere l'asta in un numero arbitrario di sotto-elementi, in modo tale che anche le proprietà non lineari dell'asta (cerniere plastiche a comportamento elastico-perfettamente plastico), saranno determinate coerentemente con la suddivisione in segmenti dell'asta (senza il bisogno di dover ipotizzare a priori una sezione in cui possa formarsi la cerniera). Dal punto di vista assiale l'asta si comporta come un elemento non suddiviso in segmenti, caratterizzato quindi dai soli gradi di libertà assiali esterni.

Nel caso di aste interagenti con pannelli murari si possono apprezzare l'interazione a flessione tra asta e muratura e l'interazione tra il comportamento a scorrimento della muratura e quello assiale dell'asta.

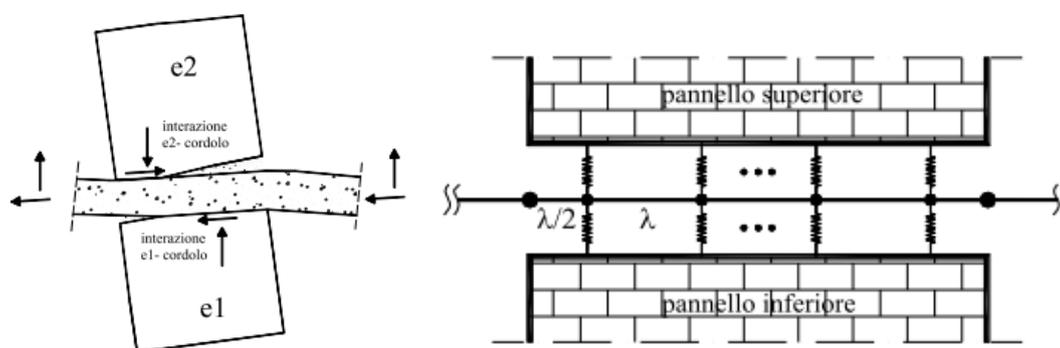


Figura 1-5 Interazione tra asta e pannelli

A ciascun segmento dell'asta viene associata una sezione critica posta in mezz'asta, in cui vi è la possibilità di formazione di una cerniera plastica, la cui attivazione viene valutata sullo stato sollecitante medio del segmento. Lo snervamento di una cerniera avviene per il raggiungimento del momento plastico nel piano corrispondente. Ad ogni cerniera è associato un legame elastico – perfettamente plastico.

Sono supportate analisi non lineari come le analisi pushover. Le analisi non lineari sono condotte aumentando in maniera monotona le distribuzioni di carico, statiche e sismiche, e proseguendo le analisi a controllo di spostamento fino al collasso convenzionale della struttura (determinato a partire dalle curve di capacità), consentendo così di cogliere il degrado della resistenza dei singoli elementi a seguito di grandi spostamenti e quindi dell'escursione in campo plastico. Le analisi forniscono in output una serie di informazioni che vanno opportunamente analizzate.

Le informazioni ad oggi reperite e le analisi della documentazione tecnica disponibile fanno protendere per la possibilità di attuare le modellazioni come riportato nella seguente tabella. In essa ogni edificio viene considerato modellabile o meno in base ai dati raccolti. Singolarmente una nota a commento è riportata per chiarire sinteticamente lo stato dei modelli.

## 1.4 Modello semplificato a trave equivalente

In questa sezione viene brevemente descritto un modello a trave equivalente non uniforme in grado di tenere conto di due diverse irregolarità. Il modello, proposto recentemente (Greco, et al., 2020), è adatto per la schematizzazione di edifici reali che non hanno una distribuzione uniforme della massa e della rigidità lungo l'altezza. L'equazione del moto del modello

proposto è derivata dall'applicazione del principio di Hamilton. Il comportamento dinamico lineare dell'elemento viene valutato discretizzando il modello continuo secondo un approccio di Rayleigh-Ritz basato su un numero appropriato di forme modali di una trave continua uniforme avente solo deformabilità a taglio e torsione (Chopra, 2001). L'approccio consente una descrizione accurata del comportamento dinamico di edifici bassi e medi con uno sforzo computazionale limitato. Inoltre, eventuali incertezze nei parametri della struttura possono essere prese in considerazione mediante un'opportuna strategia di calibrazione, basata sull'introduzione di appropriati coefficienti di rigidità di correzione.

Il modello proposto a trave equivalente (BLM) è in grado di rappresentare strutture Figura 1-6a) mediante un elemento trave 1D (Figura 1-6d). Con riferimento al k-esimo piano dell'edificio nel piano X, Y mostrato Figura 1-6b si assume che i centri di massa (CM) e rigidità (CS) non coincidano tra loro inducendo così un comportamento torsionale della struttura. Ad ogni piano il punto CM è posizionato sull'asse verticale globale (Z) e, di conseguenza, le coordinate CS coincidono con l'eccentricità CS-CM ( $e_x, e_y$ ). Ogni piano è modellato da un elemento trave con proprietà di rigidità uniformi, masse distribuite  $m_{x,k}, m_{y,k}$  e momento del secondo ordine  $I_{o,k}$ . I valori concentrati per le masse  $M_{x,k}$  e  $M_{y,k}$  e il momento del secondo ordine  $\bar{I}_{o,k}$  vengono applicati alla fine di ogni segmento di trave al fine di simulare la presenza di masse di travi e di pavimento e carichi applicati.

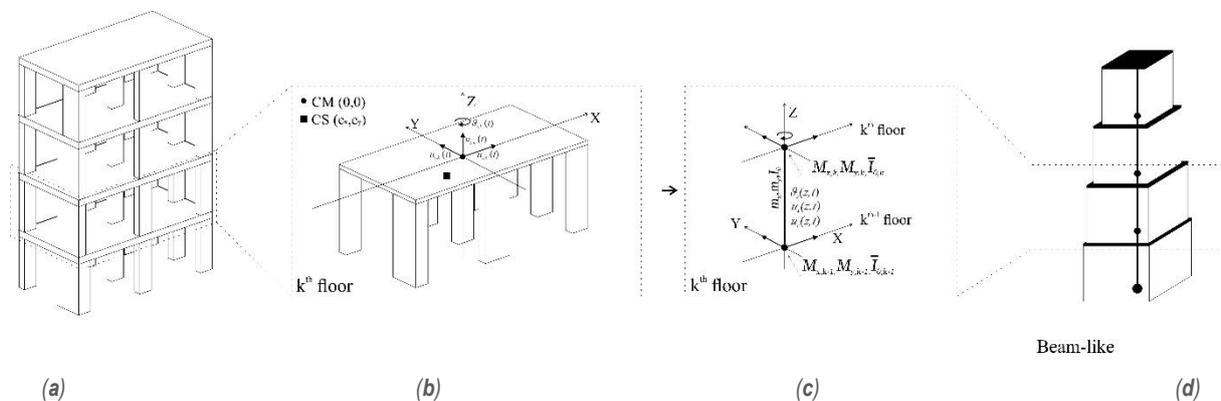


Figura 1-6 Rappresentazione del modello BLM a partire dalla (a) struttura 3D e (b) il generico piano fino all'elemento (c) computazionale di interpiano e al modello (d) globale assemblato. (Greco, et al., 2020)

Una volta generato il modello di trave equivalente esso può essere calibrato in base a approcci mono o multi-obiettivo in base alle peculiarità del caso specifico e assumendo come parametri target quelli derivanti dall'identificazione dinamica se disponibili o da modellazioni più accurate. L'algoritmo di ottimizzazione e la strategia di correzione dei parametri elastici di rigidità tramite coefficienti che possano considerare la deformabilità trave-colonna, del solaio fuori piano, di danni locali o irregolarità evidenti o occulte è ampiamente descritto in (Greco, et al., 2020).

## 2 I modelli per la valutazione di operatività degli edifici strategici

In questa sezione ogni edificio viene analizzato secondo i passi di analisi richiamati in introduzione. Verranno quindi mostrati gli aspetti legati a:

- Documentale progettuale;
- Campagna di misure di vibrazione;
- Grandezze dinamiche fondamentali sperimentali
- Modello SMAV
- Curve di fragilità
- Modellazione a Macro-elementi discreti.
- Modellazione semplificata a trave equivalente

Le modellazioni sono sviluppate in base ai dati a disposizione, alle caratteristiche dell'edificio ed alle incertezze delle prove di identificazione dinamica.

### 2.1 ES1 - COM del Comune di Lentini

Il centro COM (ES1), situato nel comune di Lentini (SR) in via Cerere N. 41 di Rapone, (coordinate: 37.292309 Lat. - 14.997022 long.) è rappresentato nelle immagini seguenti (Figura 2-1). L'edificio è realizzato con una struttura a telaio in calcestruzzo armato ed è irregolare in altezza.



Figura 2-1 Immagini del centro COM di Lentini – ES1

### 2.1.1 Ricerca documentale

Per l'edificio in questione è stato anche possibile reperire documentazione relative alle carpenterie degli impalcati che vengono riportate in seguito. Non si hanno dati relativi alle caratteristiche meccaniche dei materiali e del terreno di fondazione. Non sono presenti dati relativi alle carpenterie degli elementi strutturali.



Figura 2-2 ES1 – CT Lentini

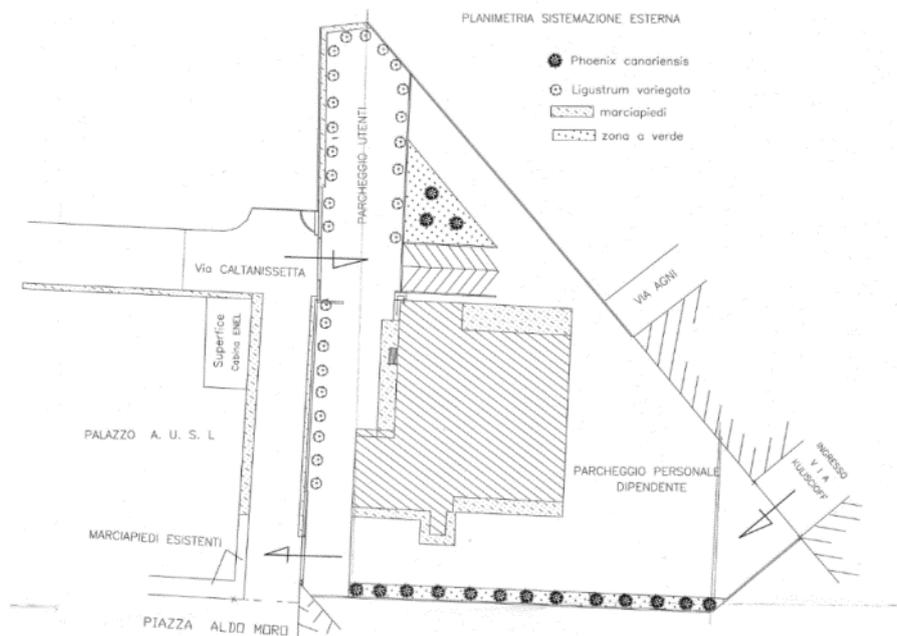


Figura 2-3 Stralcio inquadramento planimetrico



Figura 2-4 Prospetto lato Nord

Le planimetrie sono a carattere architettonico e, sebbene riportino la collocazione dei pilastri, non hanno carattere strutturale.





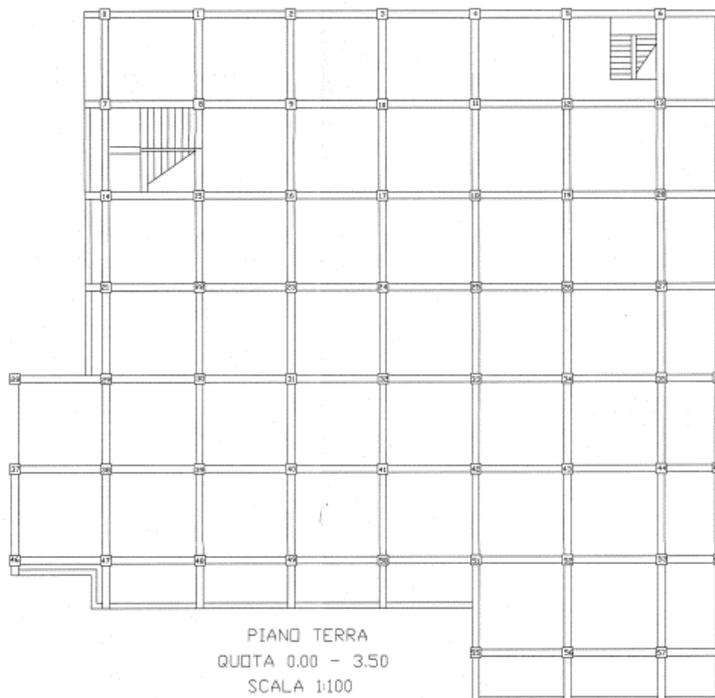


Figura 2-9 Planimetria Piano Terra

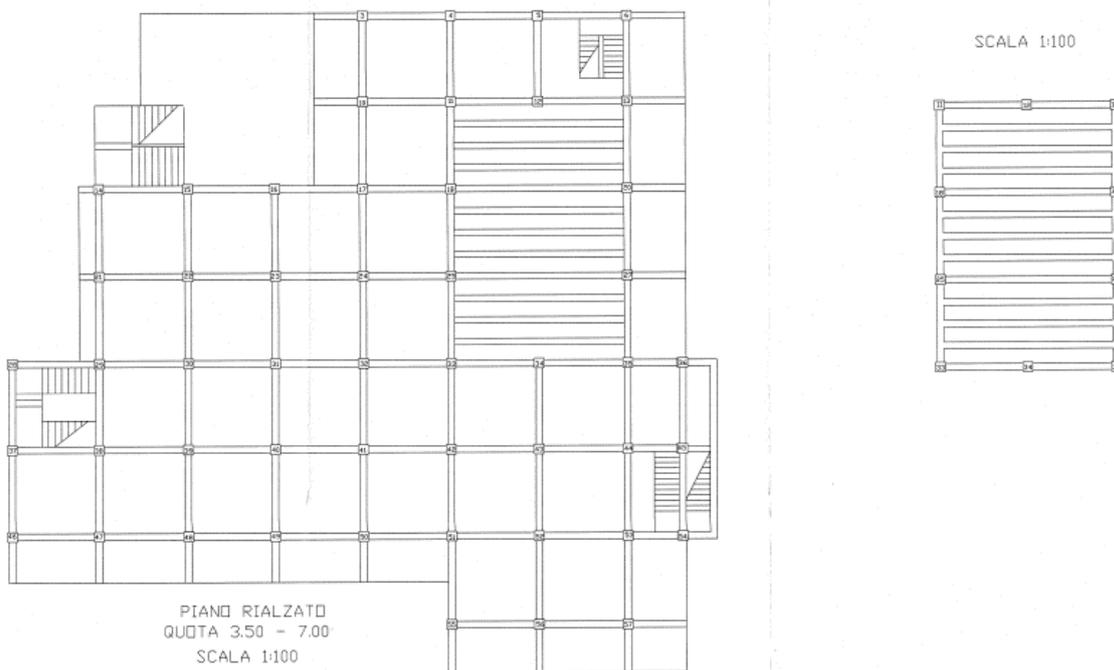


Figura 2-10 Planimetria Piano Rialzato

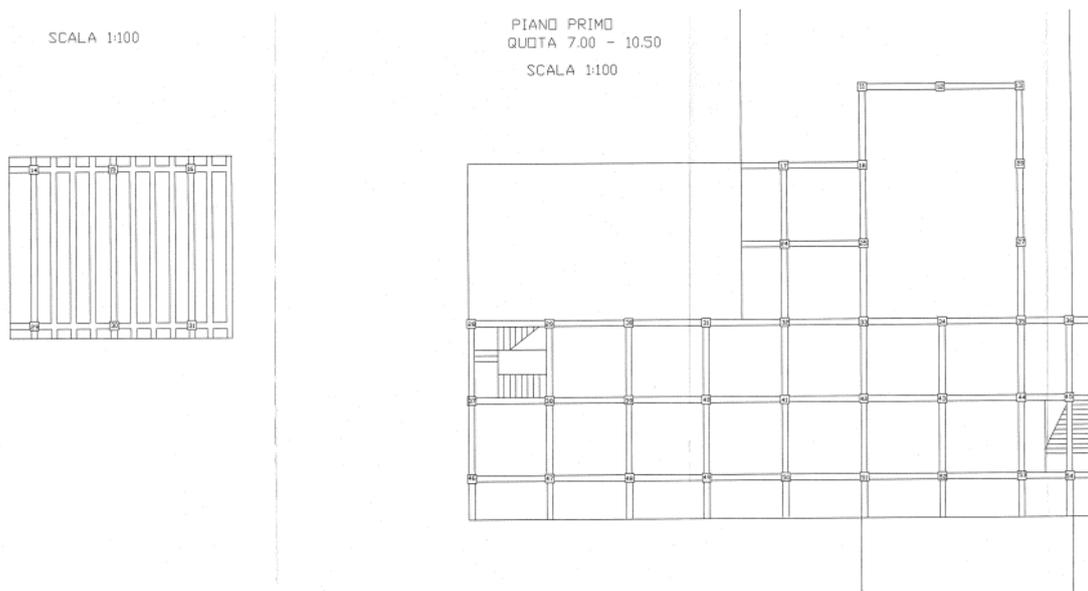


Figura 2-11 Planimetria Piano Primo

Si riassumono di seguito i dati reperiti per l'edificio in oggetto. Nelle tabelle si è scelto di indicare con □ il dato mancante e con ■ il dato presente.

Tabella 2-1 Informazioni generali

REGIONE	CODICE	ANNO DI COSTRUZ	N. PIANI	PRESENZA DI SETTI
		Normativa di riferimento	(n. di elevazioni)	
SICILIA	ES1	-	2	□

Tabella 2-2 Informazioni Architettoniche

REGIONE	CODICE	N. PIANI (n. di elevazioni)	PLANIMETRIE													COPETURA	PROSPETTI	NOTE
			-2	-1	PT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10			
SICILI A	ES1	2			■	■											■	■

Tabella 2-3 Informazioni Strutturali

REGIONE	CODICE	N. PIANI (n. di evazioni)	CARPENTERIE											Note				
				F	-2	-1	PT	P1	P2	P3	P4	P5	P6		P7	P8	P9	P10
SICILI	ES1	2	<input type="checkbox"/>				<input checked="" type="checkbox"/>	<input checked="" type="checkbox"/>										<input checked="" type="checkbox"/>
A																		

Tabella 2-4 Informazioni dettagli architettonici e dati materiali e terreno

REGIONE	CODICE	DETTAGLI	DATI	Note
SICILIA	ES1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

### 2.1.2 Campagna di misure di vibrazione

La struttura è stata oggetto di campagna di identificazione dinamica giorno **18/02/2020**. L'analisi ha previsto 4 configurazioni di strumentazione disposti opportunamente per poter descrivere il comportamento dinamico modale dell'edificio. Al fine di caratterizzare il comportamento dinamico dell'edificio e del terreno di fondazione sono state utilizzate due tipologie di strumenti di misura: tre stazioni accelerometriche triassiali e due stazioni accelerometriche biassiali tipo Poseidon, della LeaneNet, e una stazione velocimetrica tri-direzionale tipo SR04 GeoBox, della "Sara Electronic Instruments".

Ogni set di acquisizione accelerometrico ha avuto una durata di circa 34 minuti ed una frequenza di campionamento di 250 Hz.

Il sistema Poseidon integra un sensore accelerometrico tri-assiale, un digitalizzatore a 24bit, una memoria di massa, un ricevitore GPS per la sincronizzazione, apparati di comunicazione e microprocessore per la gestione di tutto il sistema.

Il sensore accelerometrico è di tipo "force balance" a bassissimo rumore ed elevata dinamica che consente di rilevare rumore ambientale e forti fenomeni sismici (strong-motion). La sezione di conversione A/D ha una risoluzione di 24 bit, la frequenza di campionamento è programmabile fino al massimo di 500 Hz per canale. I canali sono campionati in modo sincrono, requisito indispensabile per il monitoraggio strutturale. Il ricevitore GPS integrato consente di creare una rete di strumenti tutti sincronizzati con il tempo assoluto. È possibile collegarsi localmente al sistema tramite un collegamento di rete via cavo o Wi-Fi, oppure tramite interfaccia Bluetooth. Il registratore integra, inoltre, un sistema di comunicazione UMTS/HSPA che consente di poter controllarne il funzionamento da remoto.



Figura 2-12 Stazione accelerometrica TIPO utilizzata per i test

### Caratteristiche tecniche generali

#### Sensore:

- Accelerometro Mono-, Bi- o Tri-assiale tipo Force Balance
- Range da +/- 0,1 g a +/-2 g
- Dinamica 140 dB
- Auto test per verifica calibrazione/funzionamento

#### Sezione analogico/digitale:

- Risoluzione 24 bit
- Frequenza di campionamento programmabile fino a 500 Hz per canale

#### Sezione trigger:

- Trigger sulla soglia e durata del trigger indipendente per ogni canale
- Gestione falsi eventi
- Configurazione AND/OR su tutti i canali

#### Sezione digitale:

- CPU a basso consumo
- Tecnologia costruttiva "LPC" (Lower Power Consumption)
- Interfaccia di rete per gestione locale o remota
- Interfacce di comunicazione remota disponibili: PSTN, ISDN, ADSL, HDSL, GSM/GPRS/EDGE/UMTS/HSPA, modem satellitare
- Memoria di massa compact flash di tipo industrial da 32/64 GB
- Buffer circolare "storico" impostabile fino a 7 giorni, indipendentemente dal buffer di "evento" - Sincronizzazione tempo assoluto con GPS integrato ad alta sensibilità

#### Sezione alimentazione:

- Alimentazione da rete 115-230 VAC o pannelli solari
- Batteria di backup integrata agli ioni di litio. Autonomia 4 ore
- Gestione del bilancio energetico controllato da microprocessore
- Gestione allarmi remoti in caso di mancata alimentazione

#### Range di temperatura:

-20°C ÷ 70 °C

### Caratteristiche meccaniche:

- Case in alluminio anodizzato
- Grado di protezione IP65
- Dimensioni 26.3 x 11 x 7.5
- Peso 1.2 Kg

Caratteristiche firmware e software:

- Controllo del sistema "punto/punto" o mediante browser di rete su VPN
- Gestione invio allarmi, "warning" ed eventi via GSM
- Possibilità di aggiornamento "Firmware" da postazione remota
- Trasferimento dati automatico al server di gestione

I 4 test hanno previsto la disposizione degli strumenti in prestabiliti quanto più allineati lungo verticali. I test sono stati così organizzati come descritto in Tabella 2-5e la strumentazione posizionata secondo le coordinate del sistema relativo raffigurate in Figura 2-13 e Tabella 2-6.

Tabella 2-5 Descrizione dei 4 test di acquisizione

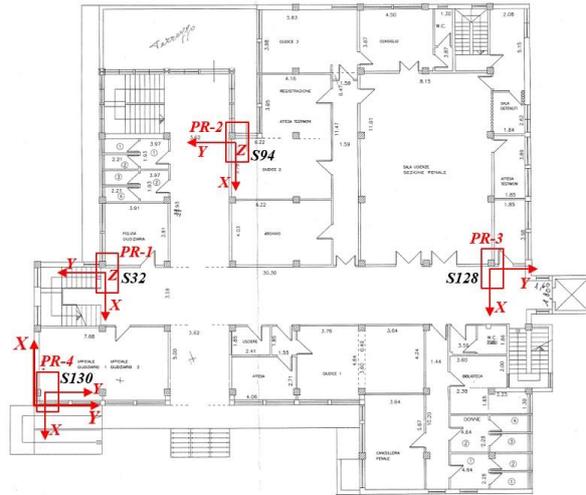
<b>TEST 1 – COM DI LENTINI - 18/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-5	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	38 min.
2	PT-6	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	38 min.
3	PR-1	Piano Rialzato PR	S32	Triassiale	250	38 min.
4	PR-2	Piano Rialzato PR	S94	Triassiale	250	38 min.
5	PR-3	Piano Rialzato PR	S128	Biassiale	250	38 min.
6	PR-4	Piano Rialzato PR	S130	Biassiale	250	38 min.
<b>TEST 2 – COM DI LENTINI - 18/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-5	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	34 min.
2	PT-6	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	34 min.
3	P1-1	Piano Primo P1	S32	Triassiale	250	34 min.
4	P1-2	Piano Primo P1	S94	Triassiale	250	34 min.
5	P1-3	Piano Primo P1	S128	Biassiale	250	34 min.
6	P1-4	Piano Primo P1	S130	Biassiale	250	34 min.
<b>TEST 3 – COM DI LENTINI - 18/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-5	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	34 min.
2	PT-6	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	34 min.
3	P1-1	Piano Primo P1	S32	Triassiale	250	34 min.
4	P1-2	Piano Primo P1	S94	Triassiale	250	34 min.
5	PC1-1	Piano Copertura PC1	S128	Biassiale	250	34 min.
6	PC1-2	Piano Copertura PC1	S130	Biassiale	250	34 min.
<b>TEST 4 – COM DI LENTINI - 18/02/2020</b>						

<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-5	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	34 min.
2	PT-6	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	34 min.
3	PC3-7	Piano Copertura PC3	S32	Triassiale	250	34 min.
4	PC3-8	Piano Copertura PC3	S94	Triassiale	250	34 min.
5	PC2-3	Piano Copertura PC2	S130	Biassiale	250	34 min.
6	PC2-4	Piano Copertura PC2	S128	Biassiale	250	34 min.

**PIANO TERRA – TEST 1**



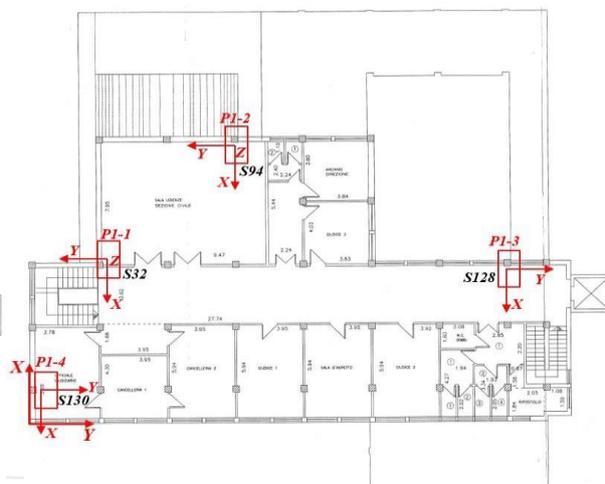
**PIANO RIALZATO – TEST 1**



**PIANO TERRA – TEST 2**



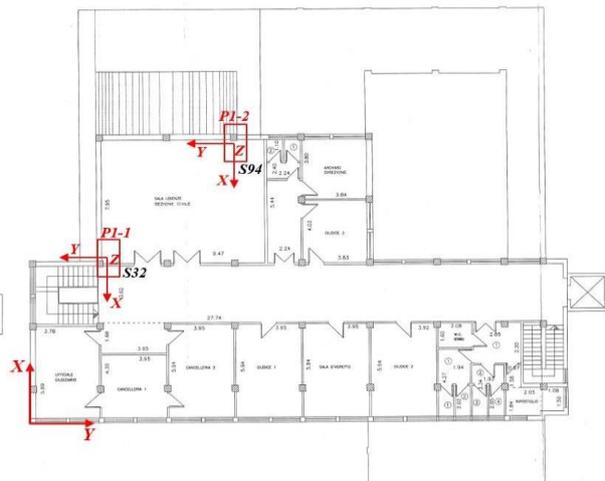
**PIANO PRIMO – TEST 2**



**PIANO TERRA – TEST 3**



**PIANO PRIMO – TEST 3**



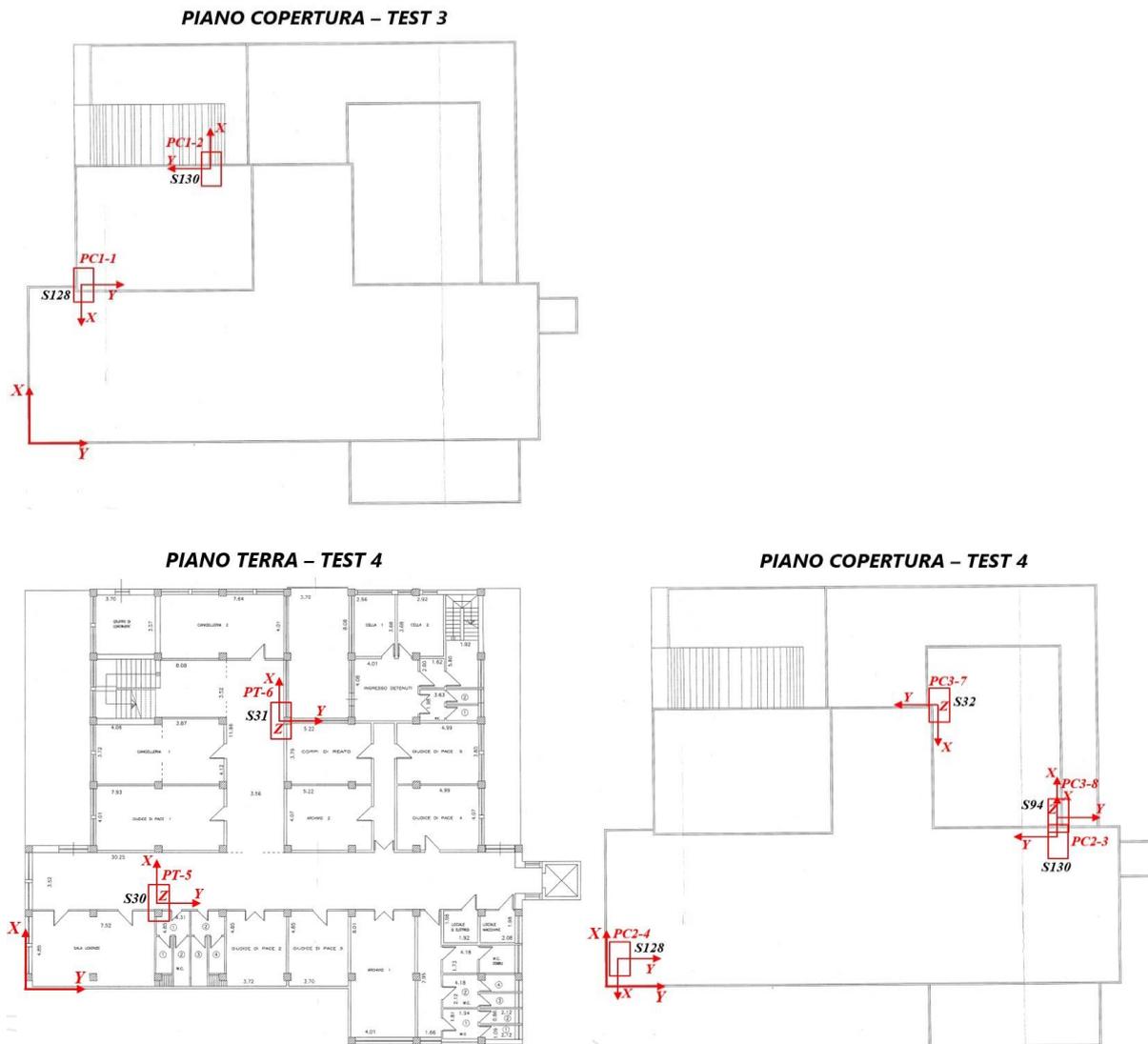


Figura 2-13 Disposizione punti di misura durante i 4 test

Tabella 2-6 Coordinate posizioni dei punti di misura

Coordinate Stazioni Accelerometriche COM Lentini															
TEST 1				TEST 2				TEST 3				TEST 4			
STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]
S30	5.2	8.25	0	S30	5.2	8.25	0	S30	5.2	8.25	0	S30	5.2	8.25	0
S31	16.8	16.2	0	S31	16.8	16.2	0	S31	16.8	16.2	0	S31	16.8	16.2	0
S32	8.5	4.35	3.65	S32	10.35	4.35	7.3	S32	10.35	4.35	7.3	S32	18	20	9.1
S94	16.55	12.4	3.65	S94	17.45	11.8	7.3	S94	17.45	11.8	7.3	S94	10.35	27.5	9.1
S128	8.55	28.2	3.65	S128	9.8	27.5	7.3	S128	10.35	4.35	12.6	S130	2.1	0.5	10.9
S130	0.85	0.45	3.65	S130	2.1	0.45	7.3	S130	17.45	11.8	12.6	S128	9.8	27.5	10.9

I dati accelerometrici registrati sotto le condizioni di rumore ambientale sono stati rielaborati in termini di spettri si Welch (Figura 2-14) e funzioni di trasferimento (Figura 2-15) al fine di ricostruire le grandezze dinamiche modali fondamentali dell'edificio.

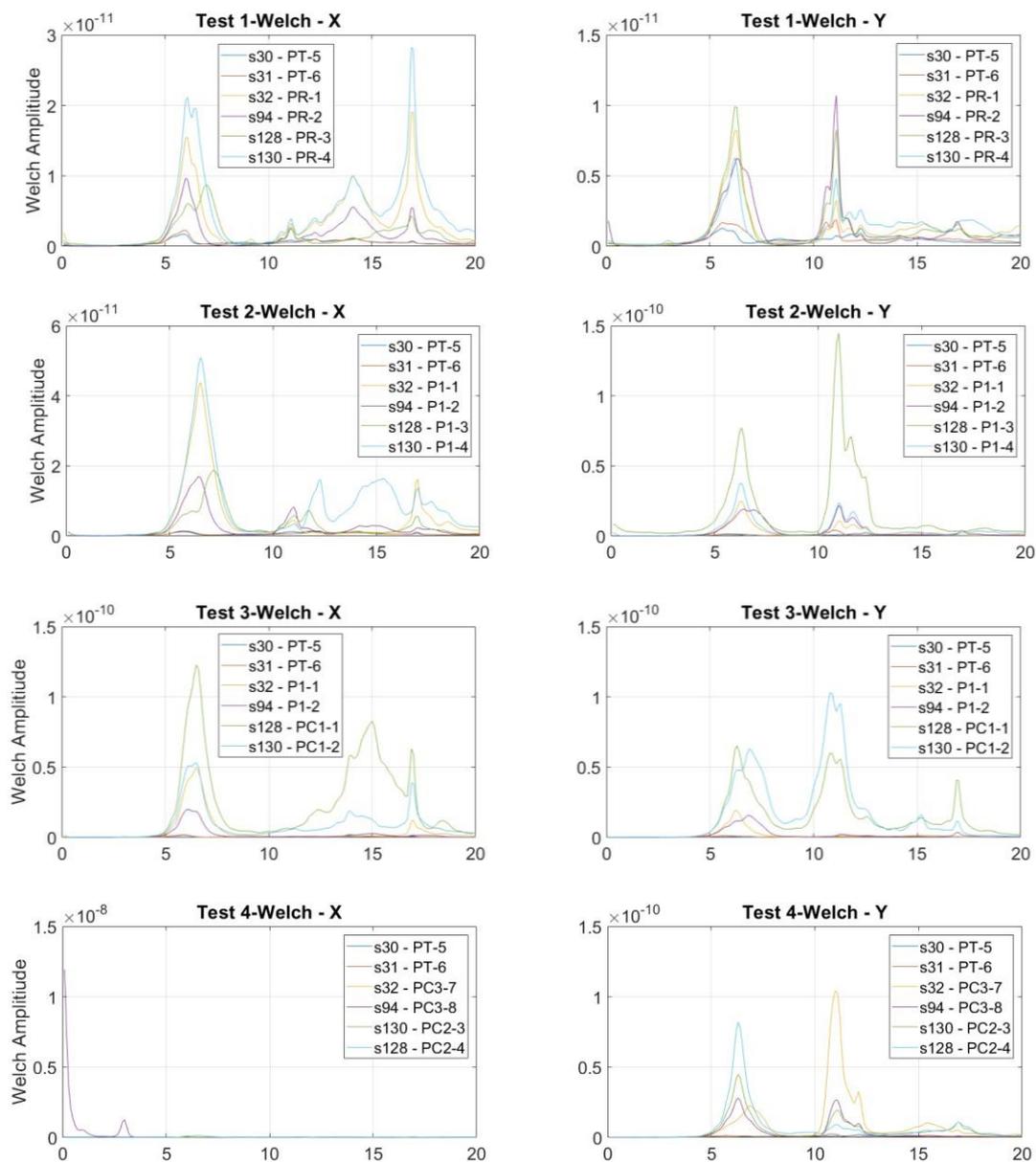


Figura 2-14 Trasformate di Welch

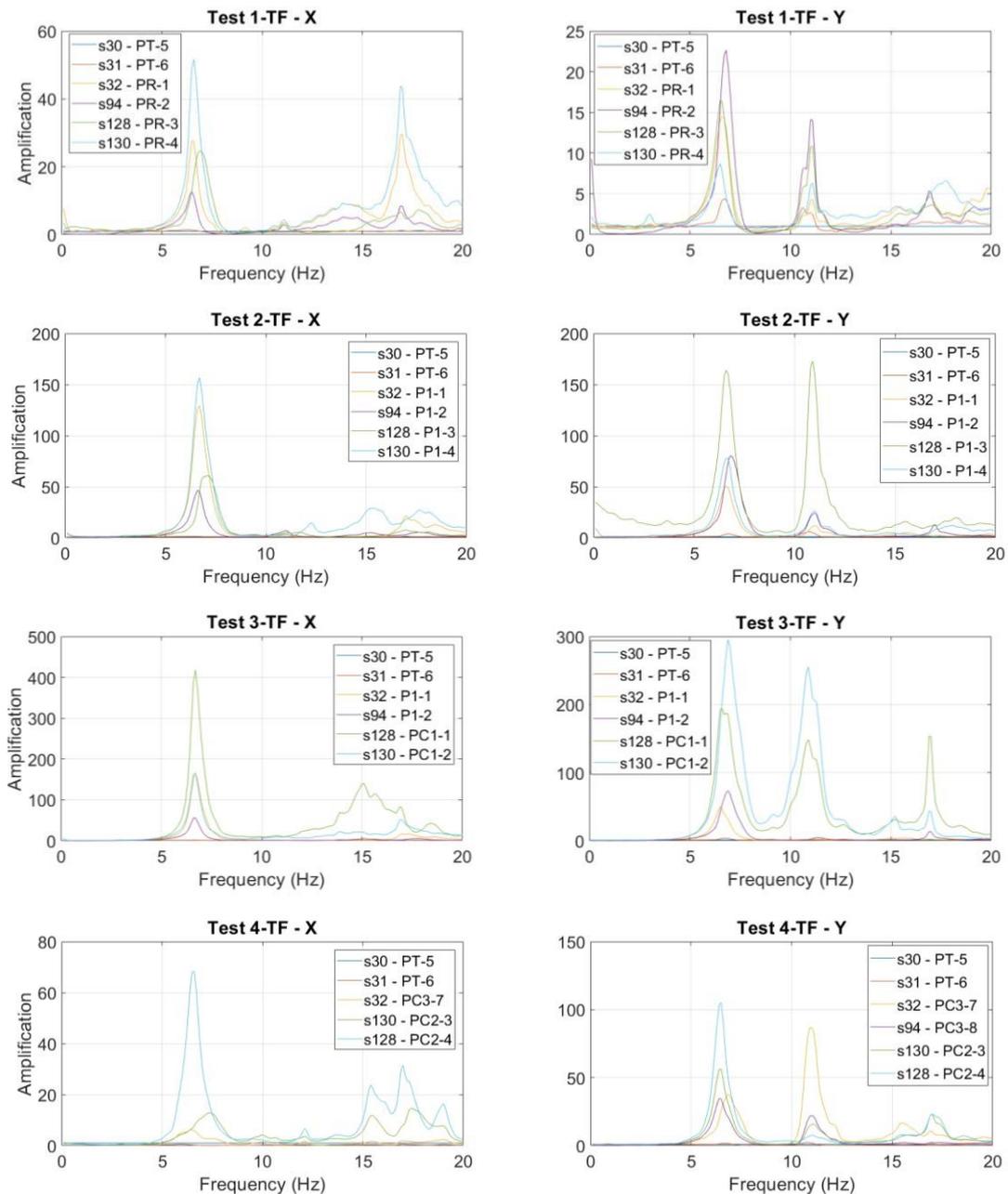


Figura 2-15 Funzioni di Trasferimento

Si evidenzia la presenza di un modo di vibrare a circa 6.6Hz, un secondo modo di vibrare a circa 11.0Hz e un terzo modo di vibrare a circa 17.0Hz.

### 2.1.3 Risultati sperimentali

Nella Tabella 2-7 sono riepilogate le deformate modali del corpo di fabbrica oggetto di indagini. L'etichetta nella prima colonna è composta da un numero romano, che indica il numero dell'impalcato, un numero arabo, che indica la verticale di misura e infine la direzione di misura. Nelle colonne invece, per ogni modo identificato, sono riportati i vettori reali.

DOF	6.6Hz	11Hz	17Hz
I:1:+X	0.07	0.02	0.03
I:1:+Y	0.03	0.02	0.03
I:2:+X	0.03	0.01	0.05
I:2:+Y	0.06	0.06	0.03
I:3:+X	0.06	0.01	0.04
I:3:+Y	0.04	0.05	0.03
I:4:+X	0.12	0.02	0.03
I:4:+Y	0.02	0.03	0.03
II:1:+X	0.31	0.02	0.14
II:1:+Y	0.12	0.05	0.01
II:2:+X	0.11	0.03	0.02
II:2:+Y	0.15	0.11	0.08
II:3:+X	0.11	0.02	0.05
II:3:+Y	0.39	0.68	0.08
II:4:+X	0.38	0.01	0.12
II:4:+Y	0.19	0.11	0.05
III:1:+X	1	0.04	0.52
III:1:+Y	0.47	0.58	1
III:2:+X	0.4	0.04	0.33
III:2:+Y	0.48	1	0.27
III:3:+X	0.02	0.01	0.05
III:3:+Y	0.13	0.07	0.15
III:4:+X	0.16	0	0.2
III:4:+Y	0.25	0.03	0.15
III:7:+X	0.01	0	0.01
III:7:+Y	0.06	0.37	0.07
III:8:+X	0.01	0	0.01
III:8:+Y	0.08	0.09	0.01

Tabella 2-7 Deformate modali

#### 2.1.4 Modello SMAV

Tramite l'applicativo vascoSMAV è stato generato il modello numerico SMAV per la definizione delle curve di fragilità secondo il procedimento brevemente descritto al capitolo 1.2. In questa sezione alcuni aspetti della modellazione vengono riassunti tramite immagini e tabelle. In questo caso, a causa delle incertezze determinatesi sulle misure in situ, sono state processate le frequenze ottenute da campagna di identificazione dinamica e forme modali ottenute da modellazione tramite macroelementi. Il modello a macroelementi è stato calibrato in base alle frequenze sperimentalmente identificate.

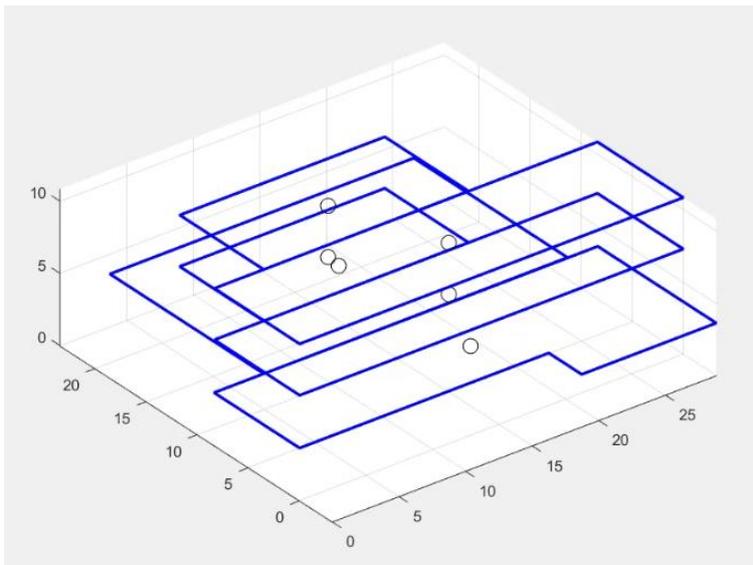


Figura 2-16 Rappresentazione semplificata della geometria della struttura.

**Parametri modello SMAV**

Coefficienti di ortogonalità				Masse partecipanti		Ipotesi di poligono rigido	
	1	2	3	Mx	My		MAC
1	1	0.7680	0.8934	0.28	0.35	1	0.8335
2	0.7680	1	0.7297	0.01	0.44	2	0.9481
3	0.8934	0.7297	1	0.34	0.27	3	0.7712
				0.63	1.06		

Figura 2-17 Parametri modello SMAV

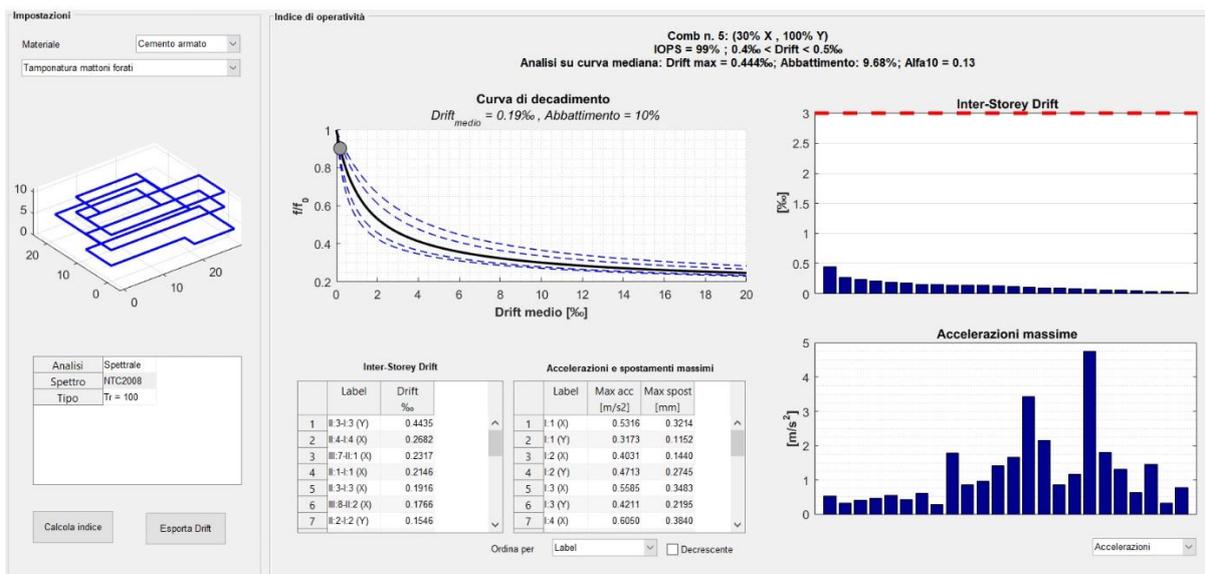
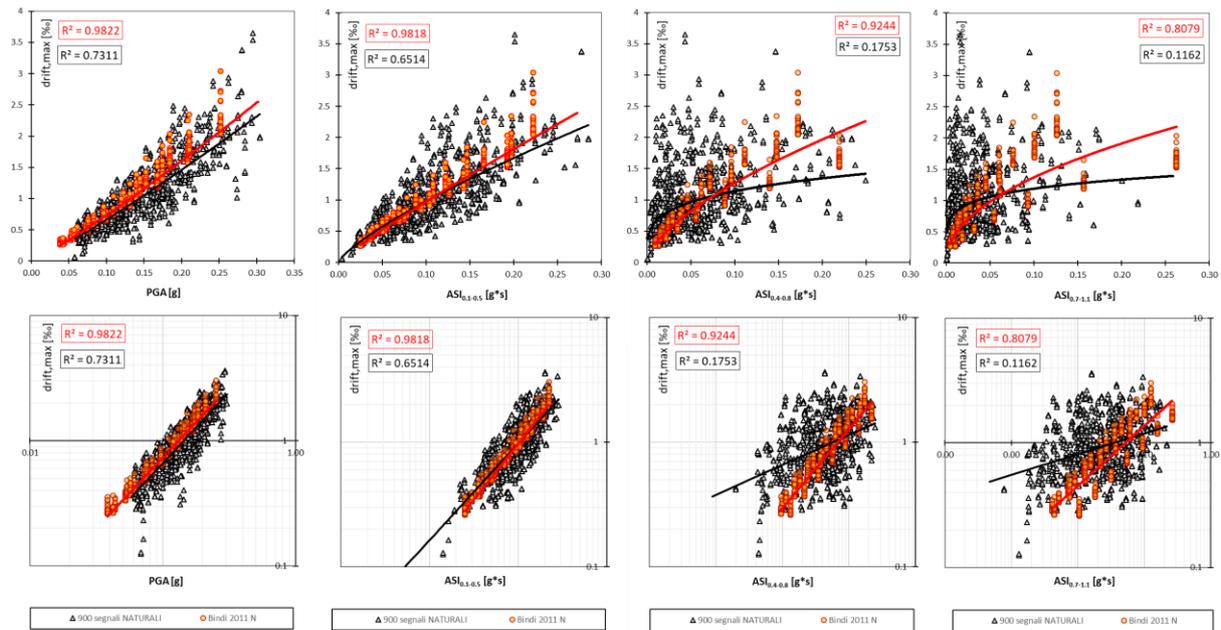


Figura 2-18 Scheda riassuntiva dei risultati SMAV

### 2.1.5 Curve di fragilità

Tramite la procedura descritta al capitolo 1.2, sono state determinate le curve di fragilità riportate in questa sezione. In questa sede, come mostrano i diagrammi successivi, sono stati analizzati due set di spettri di progetto. I due set, costruiti rispettivamente da accelerogrammi sintetici e naturali mostrano, in termini di curva di fragilità, una stabilità del risultato. Quest'ultimo è debolmente influenzato dalla scelta del set di spettri sebbene gli spettri artificiali appaiano determinare una maggiore richiesta di spostamento per la struttura. Questo può determinare una lieve sovrastima della probabilità di danneggiamento come mostra la curva rossa nella Figura 2-64. La curva adotta come parametro di intensità di misura il valore ASI nell'intervallo 0.1-0.5 secondi.



I risultati hanno evidenziato ridotti valori di drift di interpiano diversamente da quanto potrebbe essere atteso per questo tipo di strutture. In base a questi risultati la curva di fragilità restituisce una probabilità di danneggiamento nullo per tutti gli stati limite. Sebbene rara, questa condizione può verificarsi in determinate condizioni legate all'irregolarità della struttura, all'incertezza delle masse o a problemi legati al procedimento di interpretazione delle misure di rumore. In condizioni di questo tipo risulta preferibile adottare curve di letteratura tipologiche e calibrate su strutture simili per tipologia costruttiva. Si può far riferimento, ad esempio, a curve elaborate da altri ricercatori. In base alla tipologia appaiono tipologicamente simili i modelli adottati da Borzi et al., 2008 (Borzi B., Pinho R., Crowley H. Simplified pushover-based vulnerability analysis for large-scale assessment of RC buildings. Engineering Structures, 30, 804-820, 2008°) relative ad edifici non progettati per azioni sismiche.

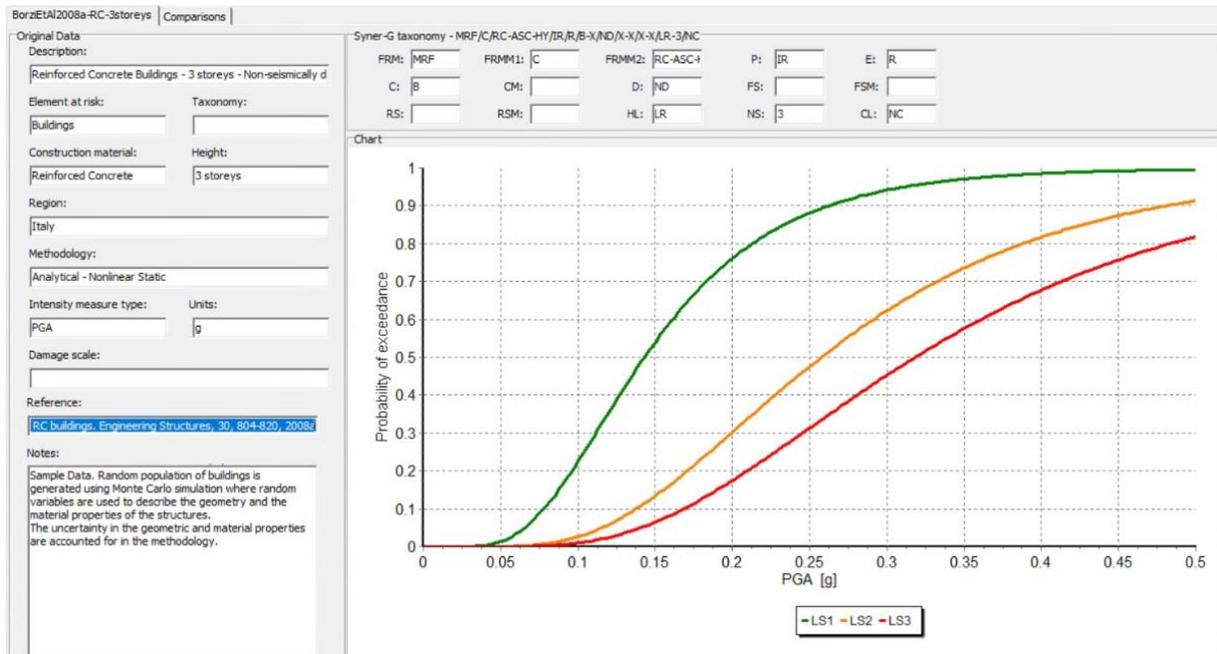


Figura 2-19 Curve di fragilità per ES1

## 2.2 ES2 - Presidio Ospedaliero di Lentini

Il Presidio Ospedaliero (ES2), situato nel comune di Lentini (SR) in contrada Colle Reggio (coordinate: 37.284466 lat - 14.982593 long.) è rappresentato nelle immagini seguenti (Figura 2-20). La struttura è costituita da numerose unità strutturali (Figura 2-21) interposte da giunti di diversa dimensione ed è fortemente irregolare e con tipologie costruttive differenti. Il corpo strutturale C, scelto per la sperimentazione, si sviluppa su sette livelli (un piano seminterrato e sei piani fuori terra).



Figura 2-20 Presidio Ospedaliero di Lentini

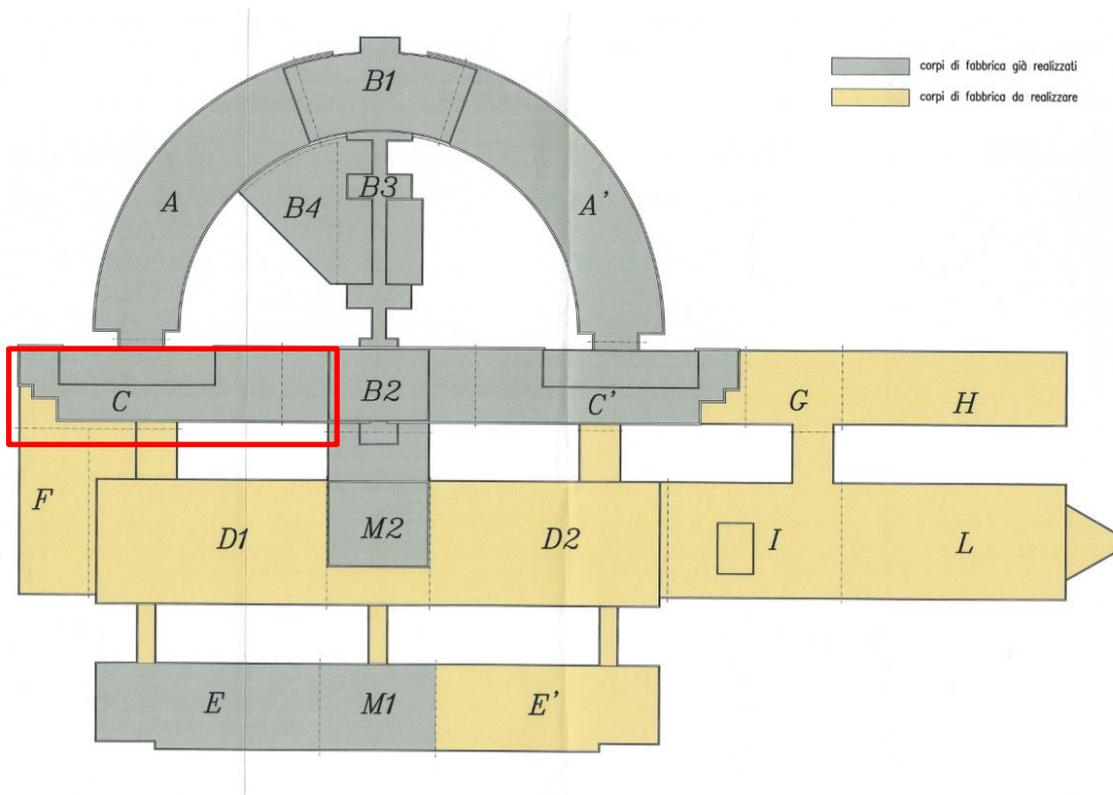


Figura 2-21 Planimetria generale corpi ES2 e individuazione del corpo C

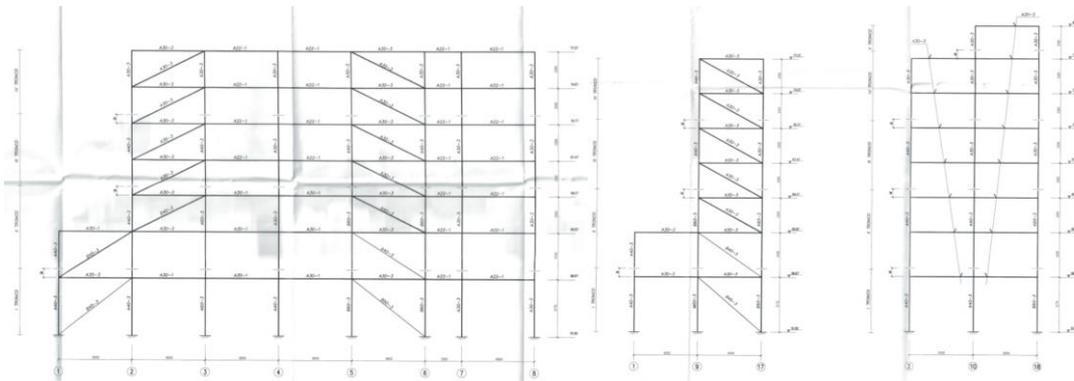


Figura 2-22 Alcuni schemi strutturali telai piani

## 2.2.1 Ricerca documentale

Le informazioni relative alla struttura, alla caratterizzazione del suolo e alle caratteristiche dei materiali sono state estrapolate dalla documentazione di progetto<sup>1</sup>.

L'edificio oggetto di analisi ha una struttura portante in acciaio con telai controventati. In particolare è uno schema "pendolare" con maglie irrigidenti realizzate con diagonali di controvento. L'organismo strutturale, di forma regolare e compatta, ha gli elementi strutturali delle maglie solidali ai solai. Lo schema planimetrico presenta le colonne disposte secondo un reticolo di maglie quadrangolari regolari. La fondazione è su pali. L'edificio si sviluppa dalla quota 51.50 m (estradosso delle fondazioni) e la quota 80.47 m (quota del piano del ferro del solaio di copertura dei volumi tecnici). Gli interpiani sono di 3.30 m. Fanno eccezione il primo e secondo impalcato per il quali sono rispettivamente 4.80 m e 4.20 m.

La struttura è dotata di telai in acciaio controventati.

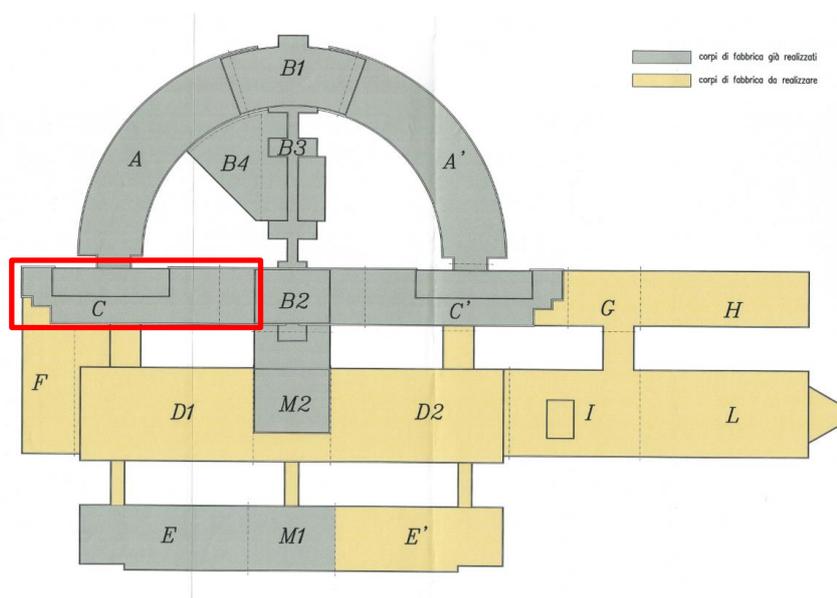


Figura 2-23 - Planimetria generale corpi ES2 e individuazione del corpo C

1

- ES2 Lentini - Progetto del nuovo ospedale; Relazione sulle strutture, Elaborato 3  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR) - Lavori di costruzione del nuovo presidio ospedaliero di Lentini, Indagine sismica  
 ES2 Lentini - Allegato D alla relazione a struttura ultimata, Lavori di costruzione del nuovo ospedale generale di Lentini - 1 stralcio; SOLAI  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Piante, prospetti, sezioni (TAV 4 / TAV 11)  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C, Carpenteria delle fondazioni (TAV a/300)  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C1-C2, Carpenteria dal 1° al 3° impalcato (TAV a/301)  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpo C-C1, Carpenteria dal 4° al 8° impalcato (TAV a/302)  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C-C1, Telai 1-8; 17-24; 9-16; 1-17; 2-18 (TAV a/303)  
 ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C-C1, Telai 3-19; 4-20; 6-22; 7-23; 8-24; 5-21; 25-26 (TAV a/304)  
 ES2 Lentini - Progetto del nuovo ospedale; Relazione geotecnica, Elaborato 4.

Si riassumono di seguito i dati reperiti per l'edificio in oggetto. Nelle tabelle si è scelto di indicare con □ il dato mancante e con ■ il dato presente.

Tabella 2-8 Edifici Strategici – Informazioni generali

REGIONE	CODICE	ANNO DI COSTRUZ	N. PIANI	PRESENZA DI SETTI
		Normativa di riferimento	(n. di elevazioni)	
SICILIA	ES2	1995	7	□

Tabella 2-9 Edifici Strategici – Informazioni Architettoniche

REGIONE	CODICE	N. PIANI (n. di elevazioni)	PLANIMETRIE													COPERTURA	PROSPETTI	NOTE	
			-2	-1	PT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10				
SICILIA	ES2	7	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	□
A																			

Tabella 2-10 Edifici Strategici – Informazioni Strutturali

REGIONE	CODICE	N. PIANI (n. di elevazioni)	CARPENTERIE													COPERTURA	Note		
			F	-2	-1	PT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9			P10	
SICILIA	ES2	7	■				■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■	■
A																			

Tabella 2-11 Edifici Strategici – Informazioni dettagli architettonici e dati materiali e terreno

REGIONE	CODICE	DETTAGLI	DATI		Note
			MATERIALI	TERRENI	
SICILIA	ES3	■	■	■	

Dalla documentazione di progetto<sup>2</sup> sono stati ricavati i parametri relativi a:

- Classificazione sismica del sito di costruzione:  $a_g = 0.265$
- Categoria di suolo: C

I materiali e le sezioni relative alla carpenteria metallica sono indicati nelle tavole di progetto<sup>3</sup>

Le aste sono in acciaio, di queste i pilastri sono caratterizzati da acciaio Fe510, mentre per le aste si riscontrano due tipologie: Fe360 e Fe510.

Nel documento<sup>4</sup> vengono invece indicate le caratteristiche dei tamponamenti. Le tamponature dei corpi in acciaio sono realizzate con pannelli di mattoni forati al piano terra e con pannelli prefabbricati in tutti gli altri impalcati.

I solai previsti sono di tipo semi-fabbricato costituiti da travetti in c.a.p e blocchi di alleggerimento con una soletta in c.a. gettata in opera. Per l'armatura portante aggiuntiva sono state impiegate barre in acciaio di tipo Fe B 44k. Nei corpi di fabbrica a struttura in acciaio il solaio risulta compreso, a meno della soletta superiore in c.a., entro l'altezza delle travi in acciaio portanti. Le dimensioni delle pignatte sono state ricavate dai disegni contenuti in: progetto<sup>5</sup>.

Nel documento di progetto<sup>6</sup> è descritta la tipologia di fondazioni, costituita da un sistema di fondazione su pali. Dalla consultazione del documento<sup>7</sup> si individuano le sezioni delle travi di fondazione e i plinti. Si individua, inoltre, il tipo di calcestruzzo e di acciaio utilizzato.

Non si conosce la quota di fondazione, è stato quindi supposto che sia al di sotto del livello del piano di calpestio. Maggiori informazioni relative alle fondazioni potranno garantire un futuro.

Le tamponature sono realizzate con pannelli di mattoni forati al piano terra e con pannelli prefabbricati a tutti gli altri impalcati. Per i pannelli prefabbricati si assume un peso proprio pari a 4kN/m.

Da un'ispezione visiva gli elementi di tamponature risultano essere elementi prefabbricati collegati alla struttura metallica a livello degli impalcati. Queste pannellature non interagiscono quindi con la struttura metallica se non in termini di massa aggiunta, non verranno quindi modellate esplicitamente.

<sup>2</sup> ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR) - Lavori di costruzione del nuovo presidio ospedaliero di Lentini, Indagine sismica

<sup>3</sup> ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C1-C2, Carpenteria dal 1° al 3° impalcato (TAV a/301)

ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpo C-C1, Carpenteria dal 4° al 8° impalcato (TAV a/302)

ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C-C1, Telai 1-8; 17-24; 9-16; 1-17; 2-18 (TAV a/303)

ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C-C1, Telai 3-19; 4-20; 6-22; 7-23; 8-24; 5-21; 25-26 (TAV a/304)

<sup>4</sup> ES2 Lentini - Progetto del nuovo ospedale; Relazione sulle strutture, Elaborato 3

<sup>5</sup> ES2 Lentini - Allegato D alla relazione a struttura ultimata, Lavori di costruzione del nuovo ospedale generale di Lentini - 1 stralcio; SOLAI

<sup>6</sup> ES2 Lentini - Progetto del nuovo ospedale; Relazione geotecnica, Elaborato 4.

<sup>7</sup> ES2 Lentini - USL, 28 Lentini (SR), progetto del nuovo ospedale; Corpi C, Carpenteria delle fondazioni (TAV a/300)



Figura 2-24 Dettaglio elementi di tamponamento

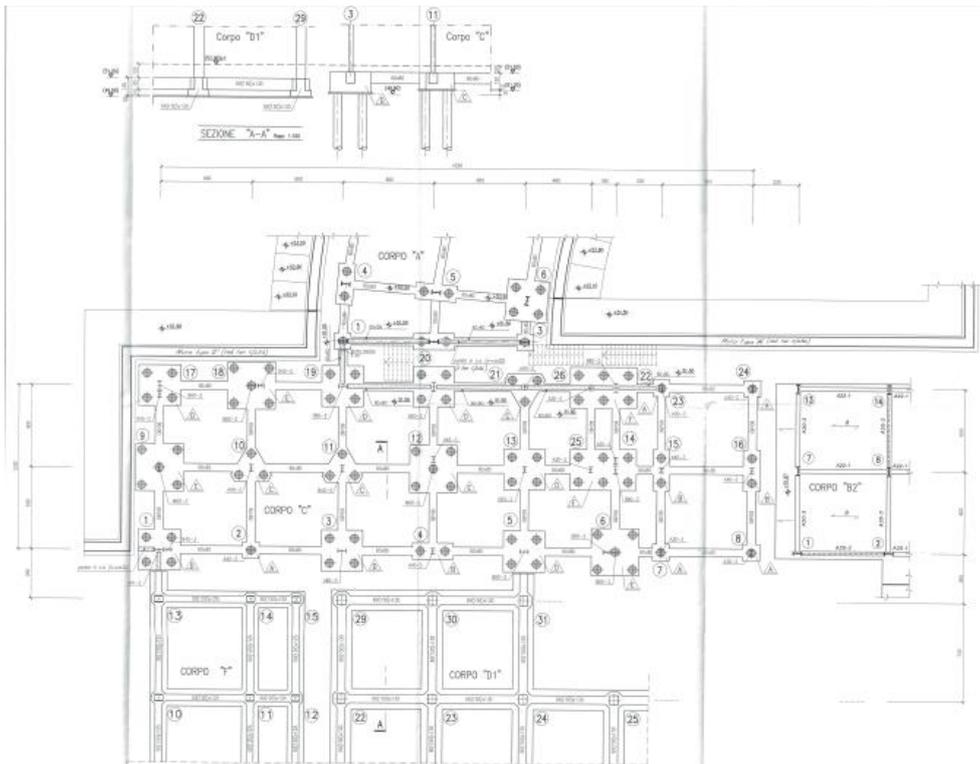


Figura 2-25 - Pianta fondazioni - CORPO C

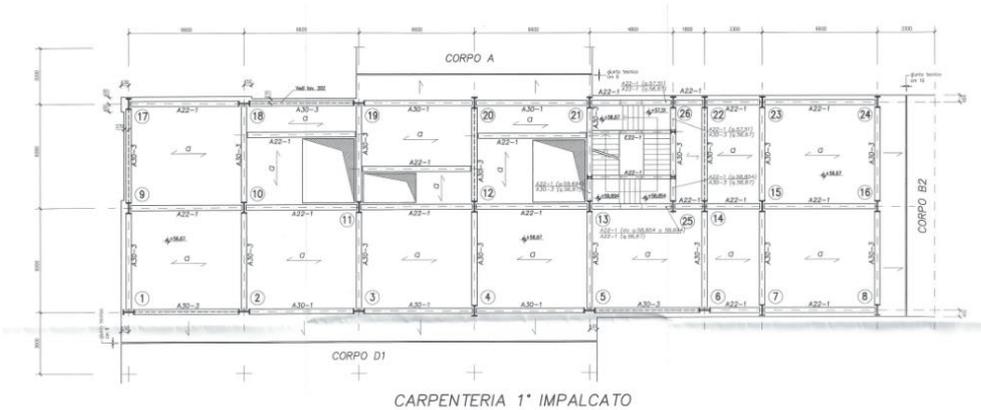


Figura 2-26 - Carpenteria primo impalcato

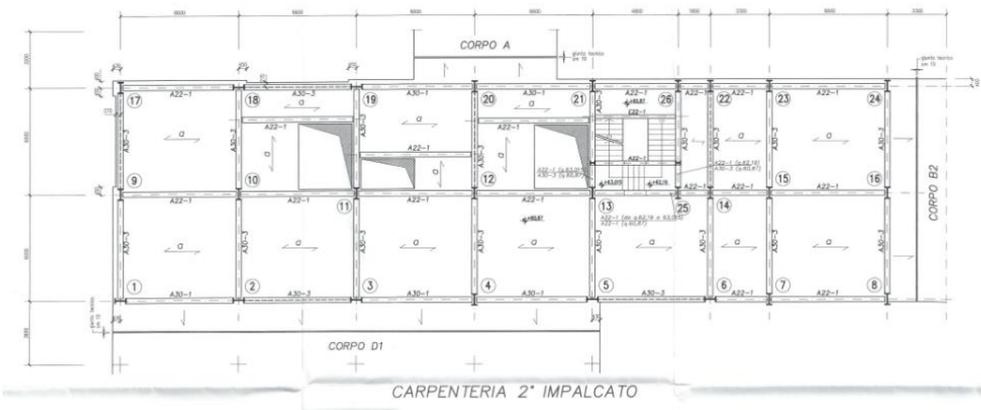


Figura 2-27 - Carpenteria secondo impalcato

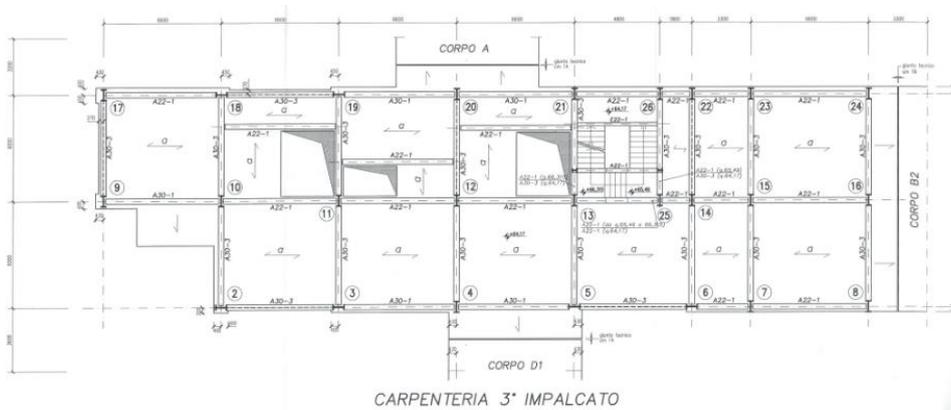


Figura 2-28 - Carpenteria terzo impalcato

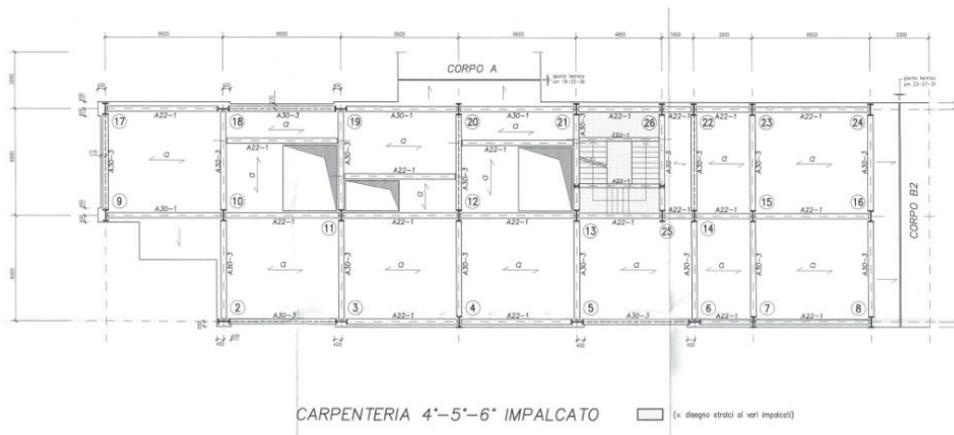


Figura 2-29 - Carpenteria quarto, quinto, sesto impalcato



Figura 2-30 - Planimetria settimo impalcato

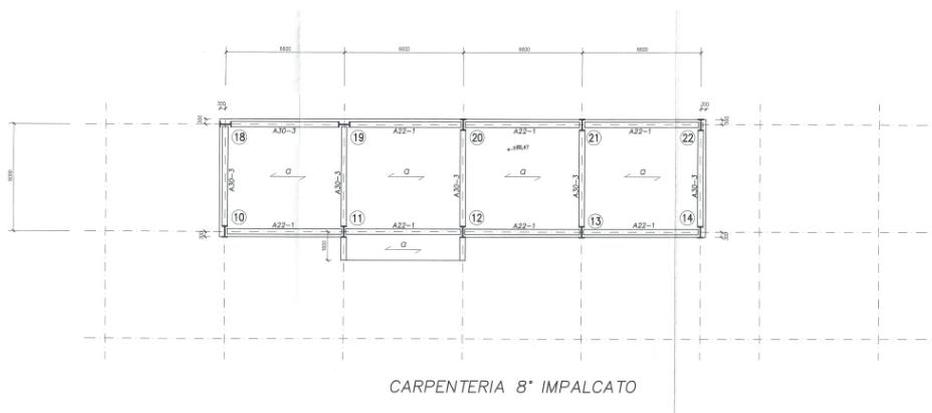


Figura 2-31 - Planimetria ottavo impalcato

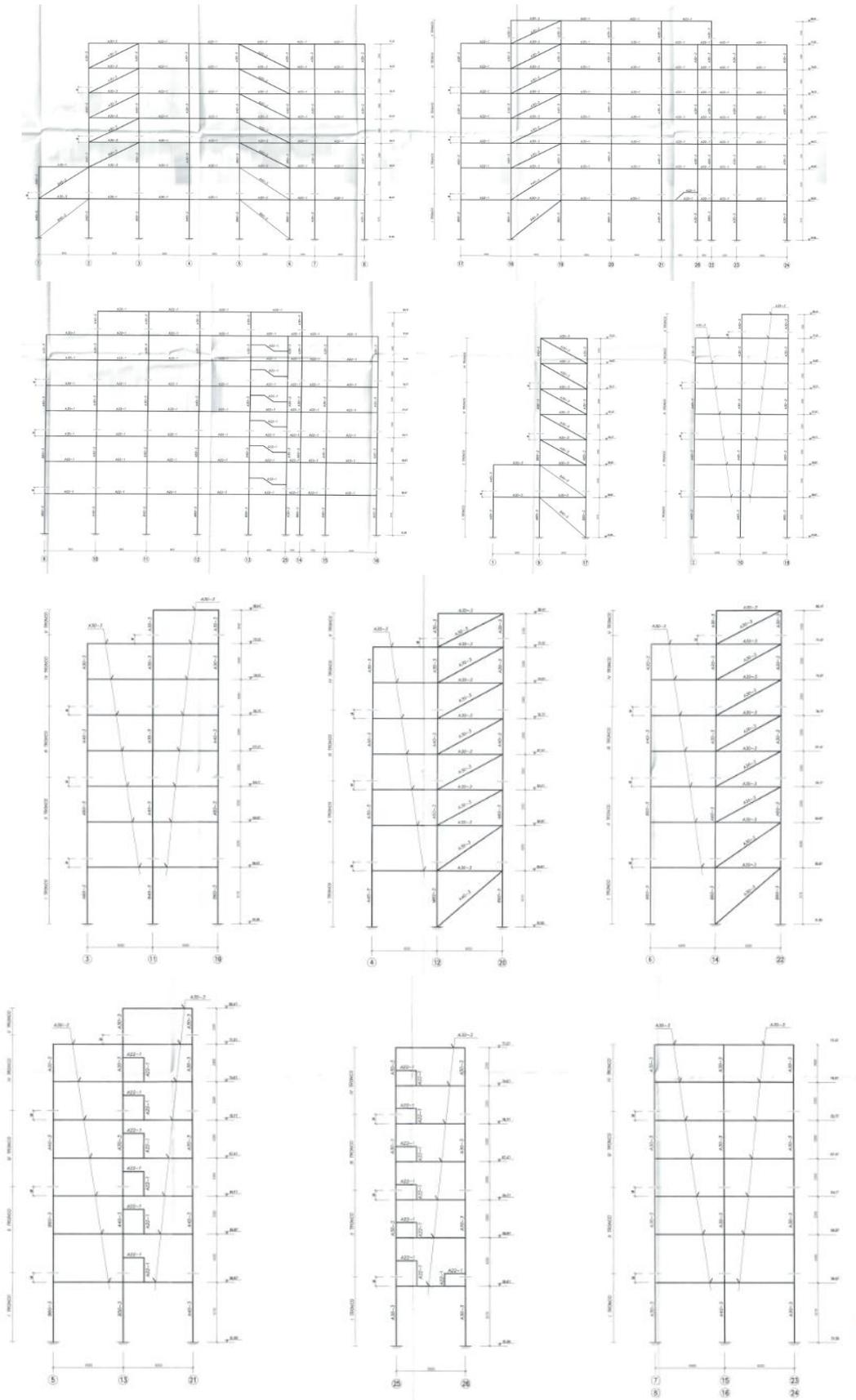


Figura 2-32 - Schemi strutturale telai piani – CORPO C

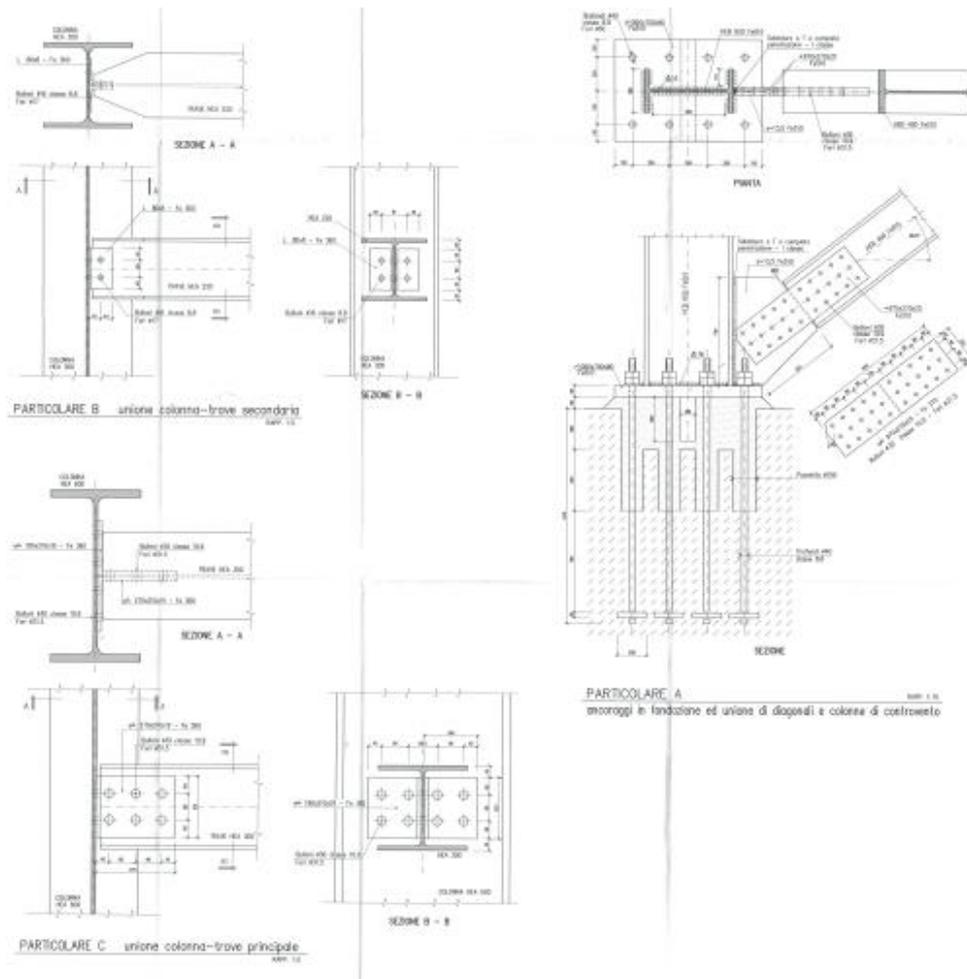


Figura 2-33 - Particolari dei nodi - CORPO C

I solai di interpiano sono a travetti precompressi 13/14 – serie T1. Essi hanno un'altezza pari a 20+4 cm e un peso di circa 315 kg/mq. Di questi ultimi soltanto si conosce l'armatura e i tabulati di calcolo con relativa analisi dei carichi.

Per quanto riguarda le caratteristiche del terreno di fondazione, il territorio comunale di Lentini risultava incluso, secondo il D.M. LL.PP. del 23/09/1981, in zona sismica di II categoria. Tale normativa per queste zone sismiche imponeva un grado di sismicità  $S=9$ . Le indagini eseguite nel 1993 prevedevano n.2 sondaggi meccanici con sonda idraulica a carotaggio continuo. Da questi si è evitata la composizione stratigrafica del terreno di fondazione. Si hanno dati su prove dinamiche in cui si è indagata la velocità di propagazione delle onde di taglio.

Per quanto riguarda i materiali utilizzati si hanno a disposizione informazioni sulla composizione del calcestruzzo utilizzato e sulle caratteristiche meccaniche di questo e dell'acciaio di armatura. Sono anche a conoscenza le prove di schiacciamento dei provini che sono state effettuati.

Per completezza si riportano le planimetrie architettoniche con indicazione delle funzioni in esse contenute.

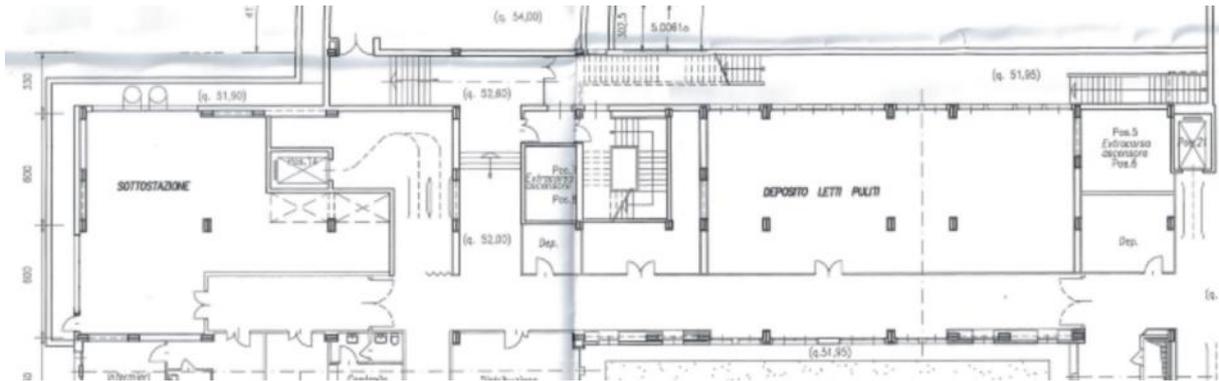


Figura 2-34 – Sottostazione e Deposito

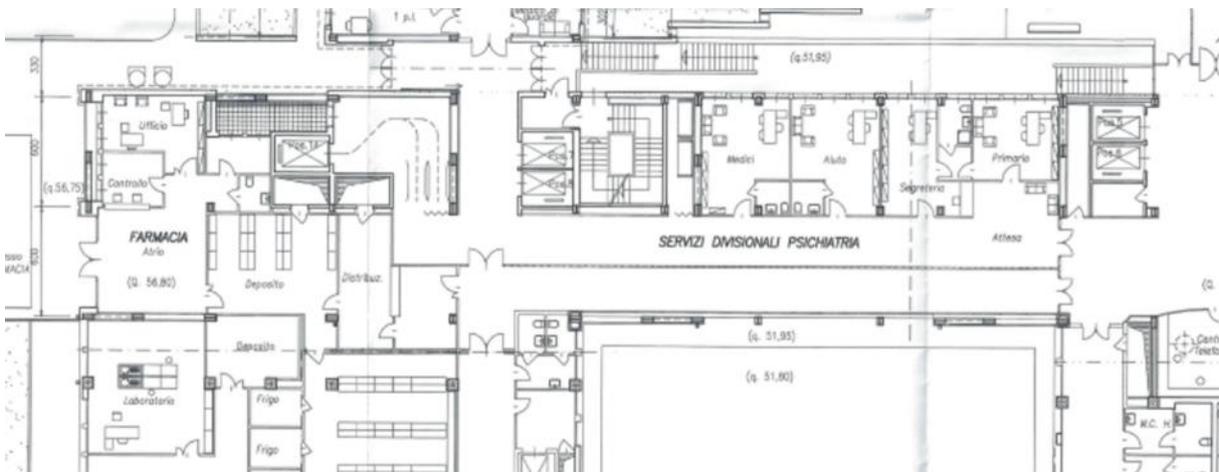


Figura 2-35 Farmacia – Psichiatria



Figura 2-36 Chirurgia – Day Hospital

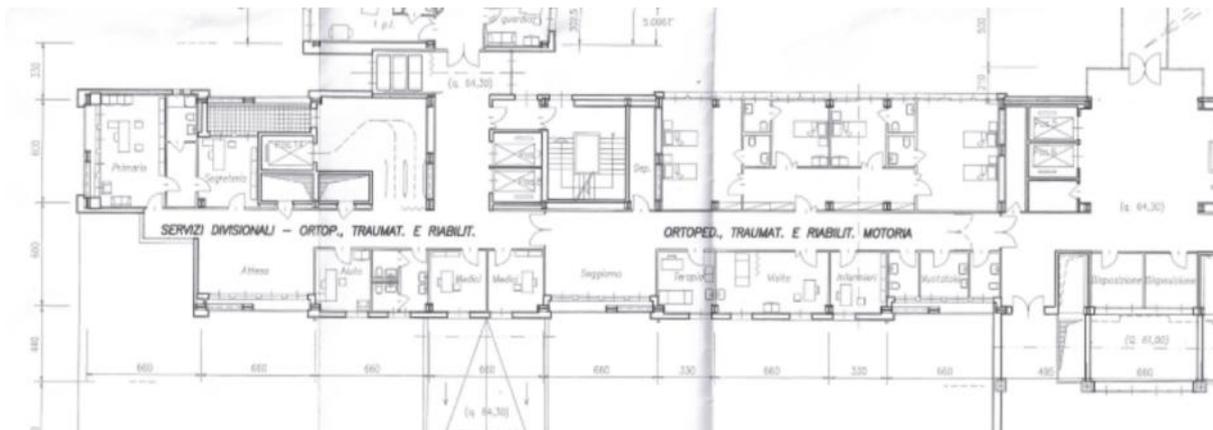


Figura 2-37 Ortopedia – Traumatologia e Riabilitazione Motoria

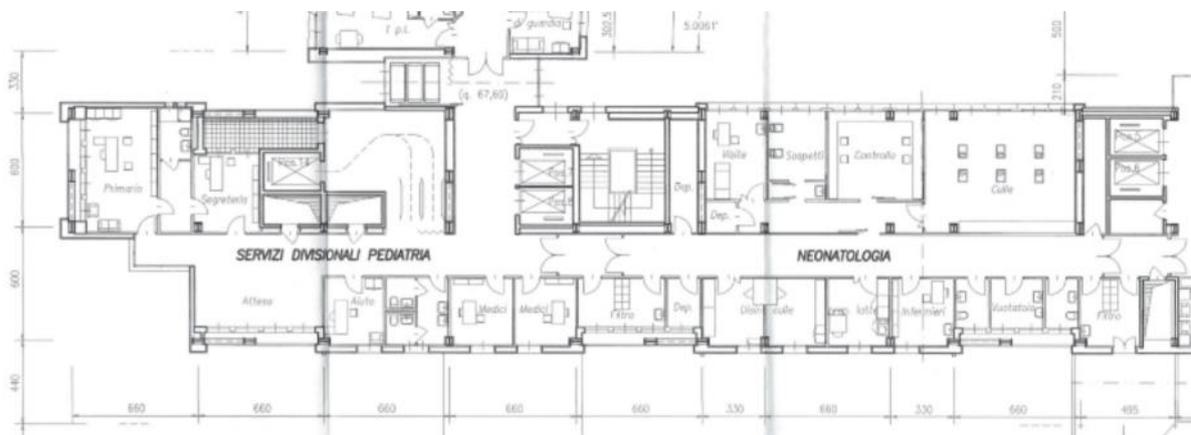


Figura 2-38 Pediatria – Neonatologia

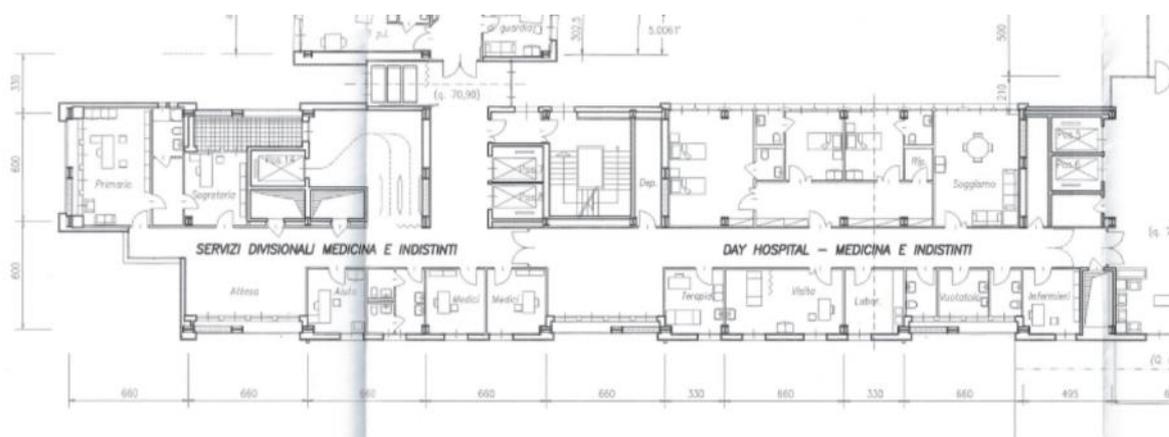


Figura 2-39 Medicina e Indistinti

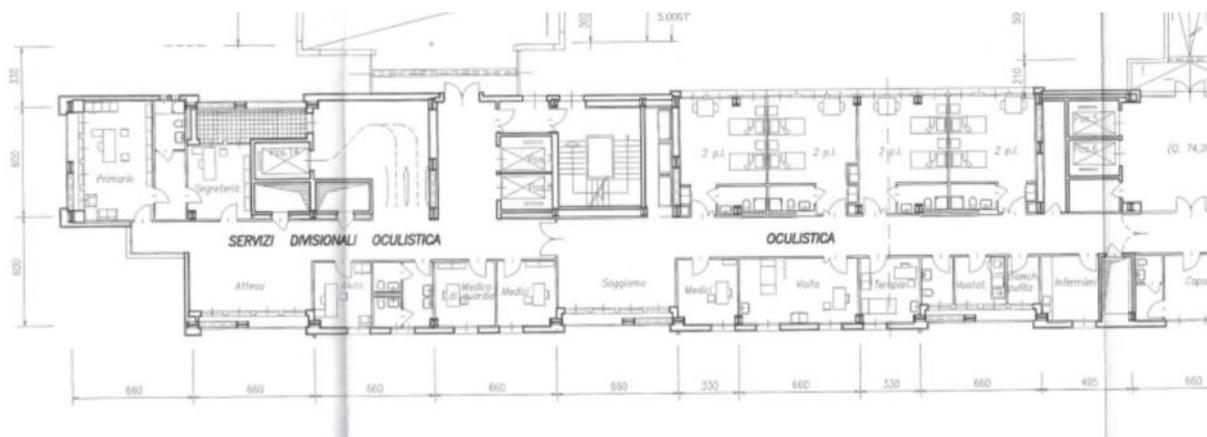


Figura 2-40 Oculistica

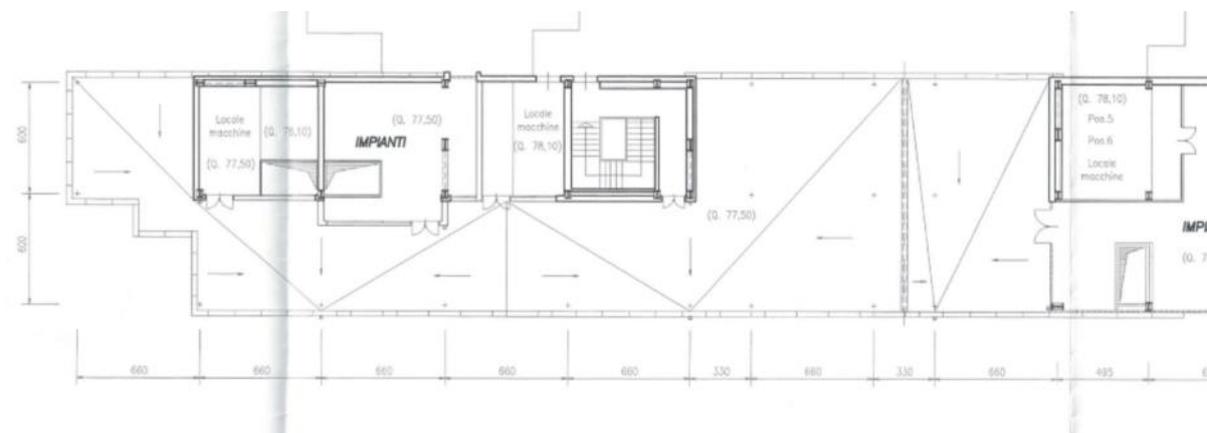


Figura 2-41 Impianti

## 2.2.2 Campagna di misure di vibrazione

La struttura è stata oggetto di campagna di identificazione dinamica giorno **17/02/2020**. L'analisi ha previsto 4 configurazioni di strumentazione disposti opportunamente per poter descrivere il comportamento dinamico modale dell'edificio. Al fine di caratterizzare il comportamento dinamico dell'edificio e del terreno di fondazione sono state utilizzate due tipologie di strumenti di misura: tre stazioni accelerometriche triassiali e due stazioni accelerometriche biassiali tipo Poseidon, della LeaneNet, e una stazione velocimetrica tri-direzionale tipo SR04 GeoBox, della "Sara Electronic Instruments".

Ogni set di acquisizione accelerometrico ha avuto una durata di circa 35 minuti ed una frequenza di campionamento di 250 Hz.

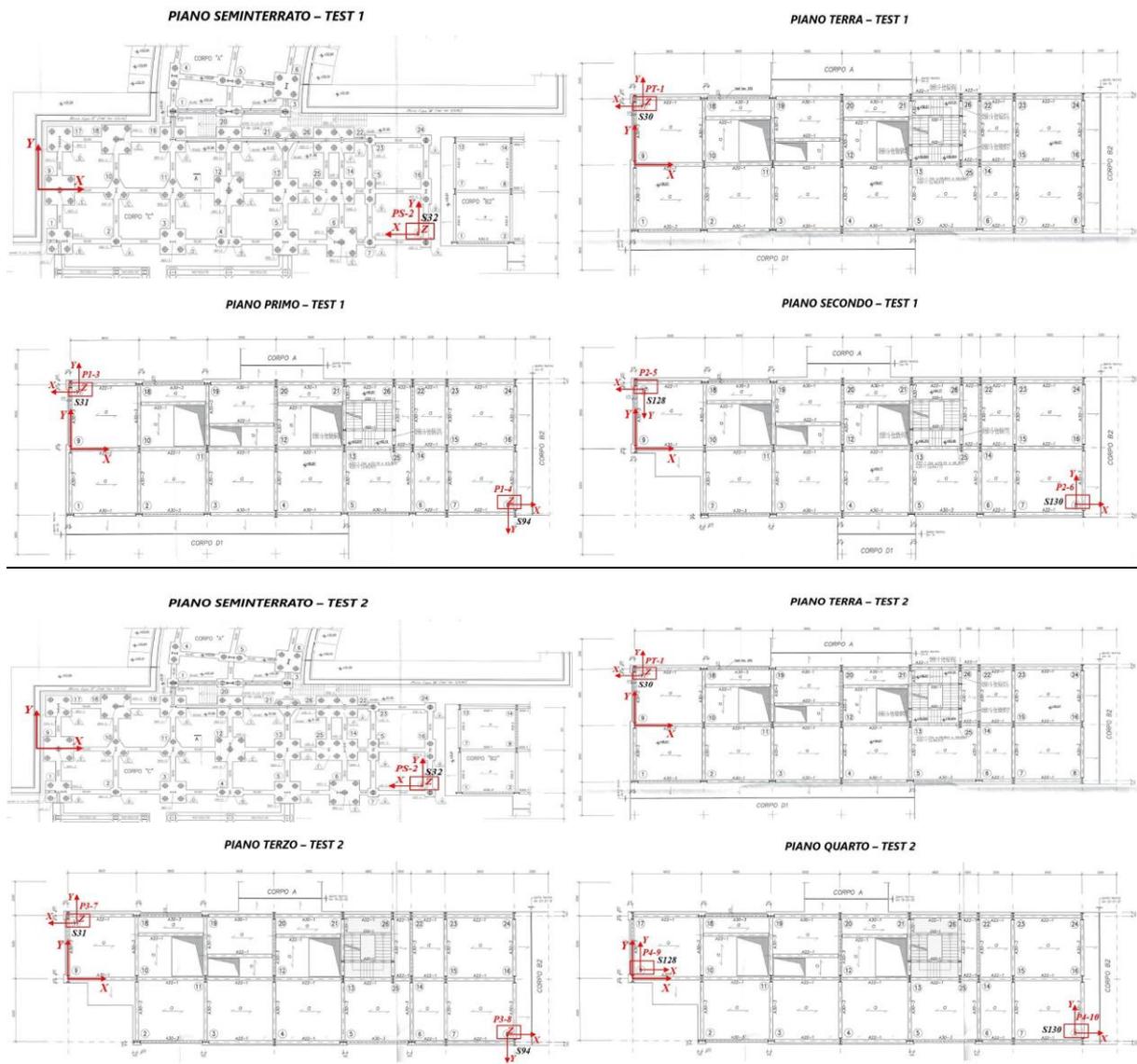
I dettagli della strumentazione accelerometrica sono riportati al capitolo 2.1.1.2.

I 4 test hanno previsto la disposizione degli strumenti in prestabiliti punti quanto più allineati lungo verticali. I test sono stati così organizzati come descritto in Tabella 2-12 e la strumentazione posizionata secondo le coordinate del sistema relativo raffigurate in Figura 2-43 e Tabella 2-13.

Tabella 2-12 Descrizione dei 4 test di acquisizione

<b>TEST 1 – OSPEDALE DI LENTINI - 17/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-1	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	35 min.
2	PS-2	Piano Seminterrato PS	S32	Triassiale	250	35 min.
3	P1-3	Piano Primo P1	S31	Triassiale	250	35 min.
4	P1-4	Piano Primo P1	S94	Triassiale	250	35 min.
5	P2-5	Piano Secondo P2	S128	Biassiale	250	35 min.
6	P2-6	Piano Secondo P2	S130	Biassiale	250	35 min.
<b>TEST 2 – OSPEDALE DI LENTINI - 17/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-1	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	34 min.
2	PS-2	Piano Seminterrato PS	S32	Triassiale	250	34 min.
3	P3-7	Piano Terzo P3	S31	Triassiale	250	34 min.
4	P3-8	Piano Terzo P3	S94	Triassiale	250	34 min.
5	P4-9	Piano Quarto P4	S128	Biassiale	250	34 min.
6	P4-10	Piano Quarto P4	S130	Biassiale	250	34 min.
<b>TEST 3 – OSPEDALE DI LENTINI - 17/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-1	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	33 min.
2	PS-2	Piano Seminterrato PS	S32	Triassiale	250	33 min.
3	P5-11	Piano Quinto P5	S31	Triassiale	250	33 min.
4	P5-12	Piano Quinto P5	S94	Triassiale	250	33 min.
5	PC-13	Piano Copertura PC	S128	Biassiale	250	33 min.
6	PC-14	Piano Copertura PC	S130	Biassiale	250	33 min.
<b>TEST 4 – OSPEDALE DI LENTINI - 17/02/2020</b>						
<b>Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Punto di Misura</b>	<b>Ubicazione Punto di Misura</b>	<b>Denominazione Accelerometro</b>	<b>Tipologia Accelerometro</b>	<b>Frequenza di Campionamento [Hz]</b>	<b>Durata Misura</b>
1	PT-1	Piano Terra PT	S30	Triassiale	250	35 min.
2	PS-2	Piano Seminterrato PS	S32	Triassiale	250	35 min.
3	PT-2	Piano Terra PT	S94	Triassiale	250	35 min.

Figura 2-42 Disposizione punti di misura durante i 4 test



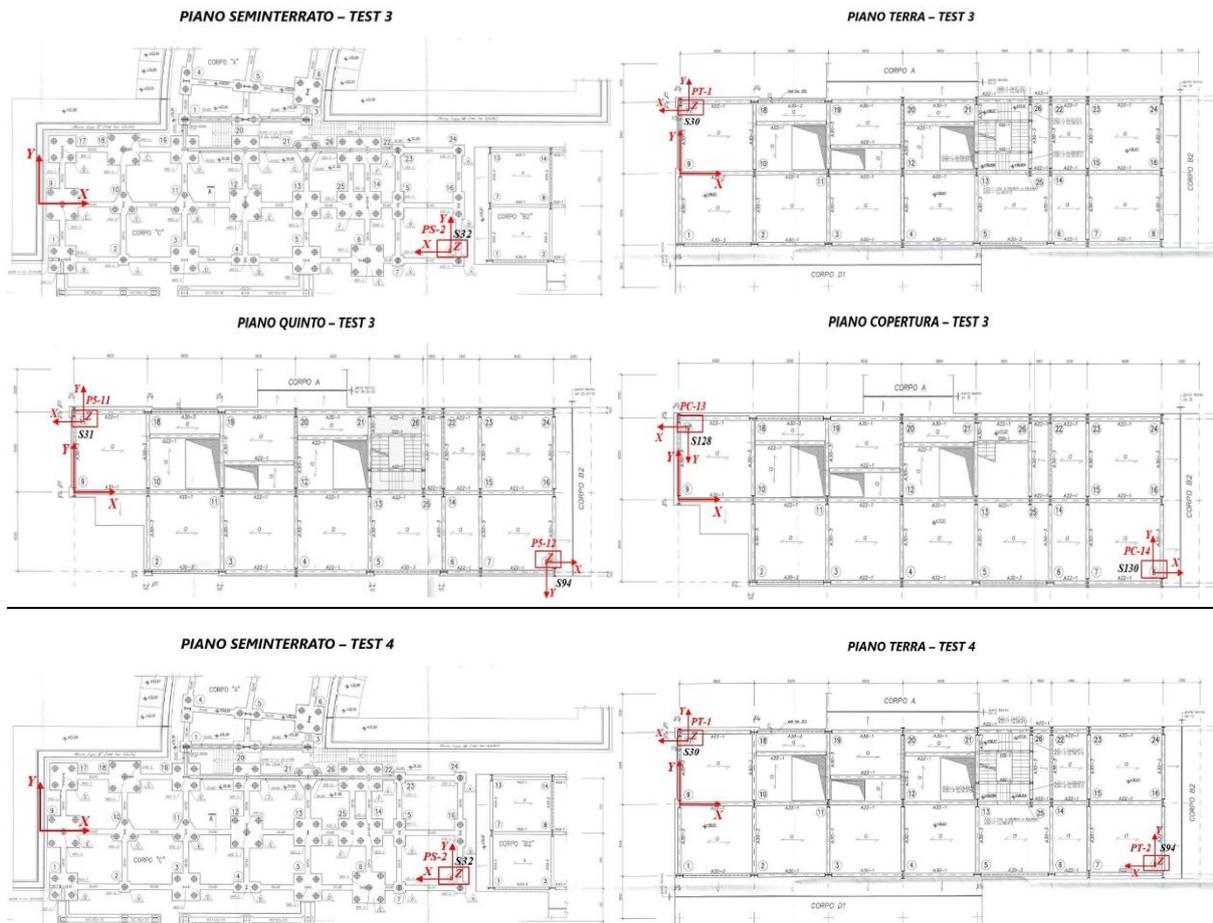


Figura 2-43 Disposizione punti di misura durante i 4 test

Tabella 2-13 Coordinate posizioni dei punti di misura

Coordinate Stazioni Accelerometriche ES2 Lentini															
TEST 1				TEST 2				TEST 3				TEST 4			
STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]
S30	1.30	5.40	5.30	S30	1.30	5.40	5.30	S30	1.30	5.40	5.30	S30	1.30	5.40	5.30
S32	44.60	-5.80	0.00	S32	44.60	-5.80	0.00	S32	44.60	-5.80	0.00	S32	44.60	-5.80	0.00
S31	0.80	5.70	9.50	S31	0.80	5.80	16.10	S31	0.80	5.80	22.70	S94	42.50	5.60	5.30
S94	42.00	-5.60	9.50	S94	42.00	-5.80	16.10	S94	42.00	-5.80	22.70				
S128	0.80	5.70	12.80	S128	0.80	0.30	19.40	S128	0.80	5.80	26.00				
S130	42.00	-5.60	12.80	S130	42.00	-5.80	19.40	S130	42.00	-5.80	26.00				

I dati accelerometrici registrati sotto le condizioni di rumore ambientale sono stati rielaborati in termini di spettri si Welch (Figura 2-44) e funzioni di trasferimento (Figura 2-45) al fine di ricostruire le grandezze dinamiche modali fondamentali dell'edificio.

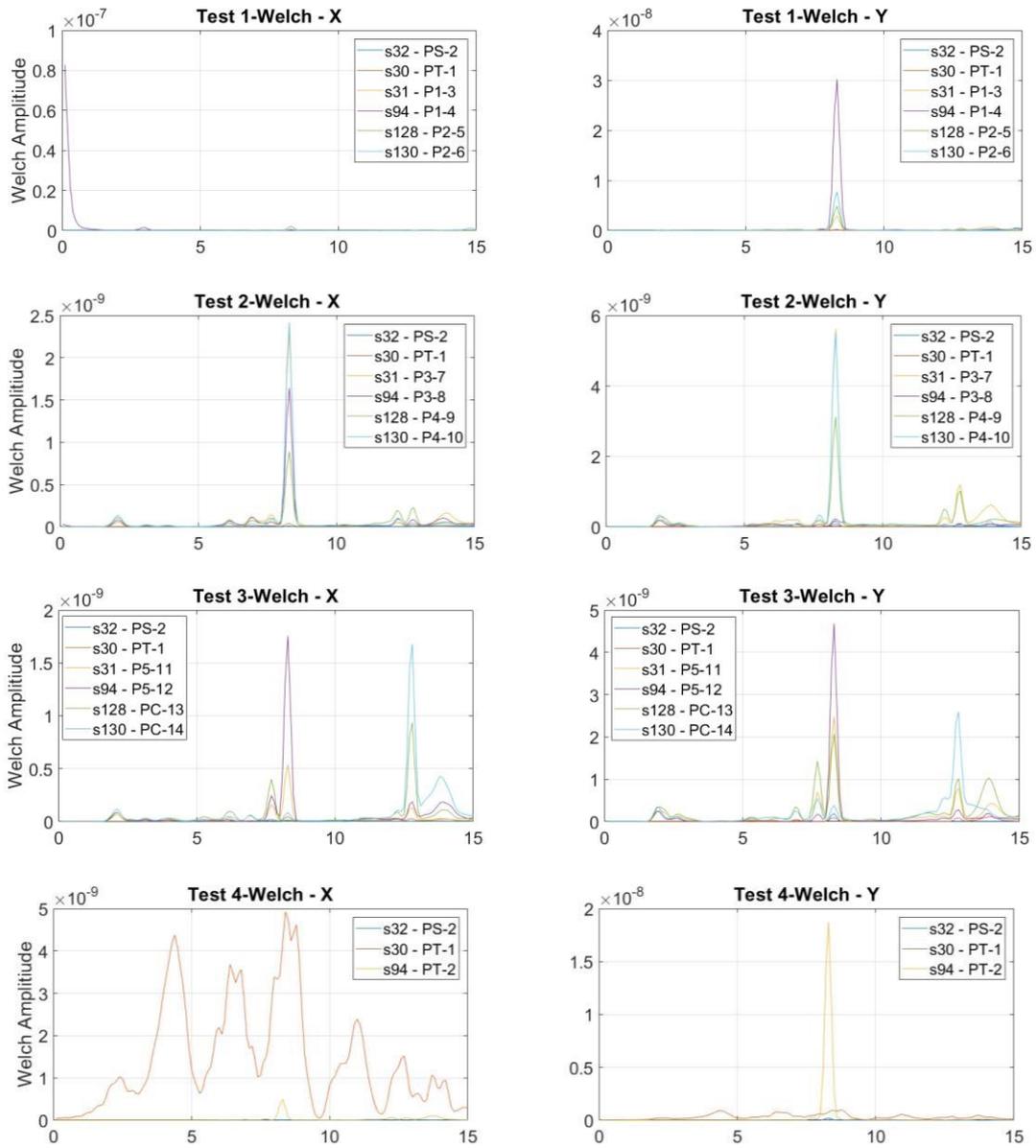
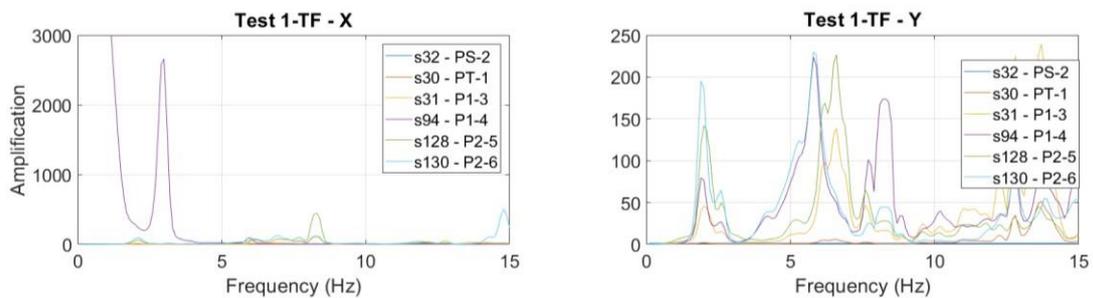


Figura 2-44 Trasformate di Welch



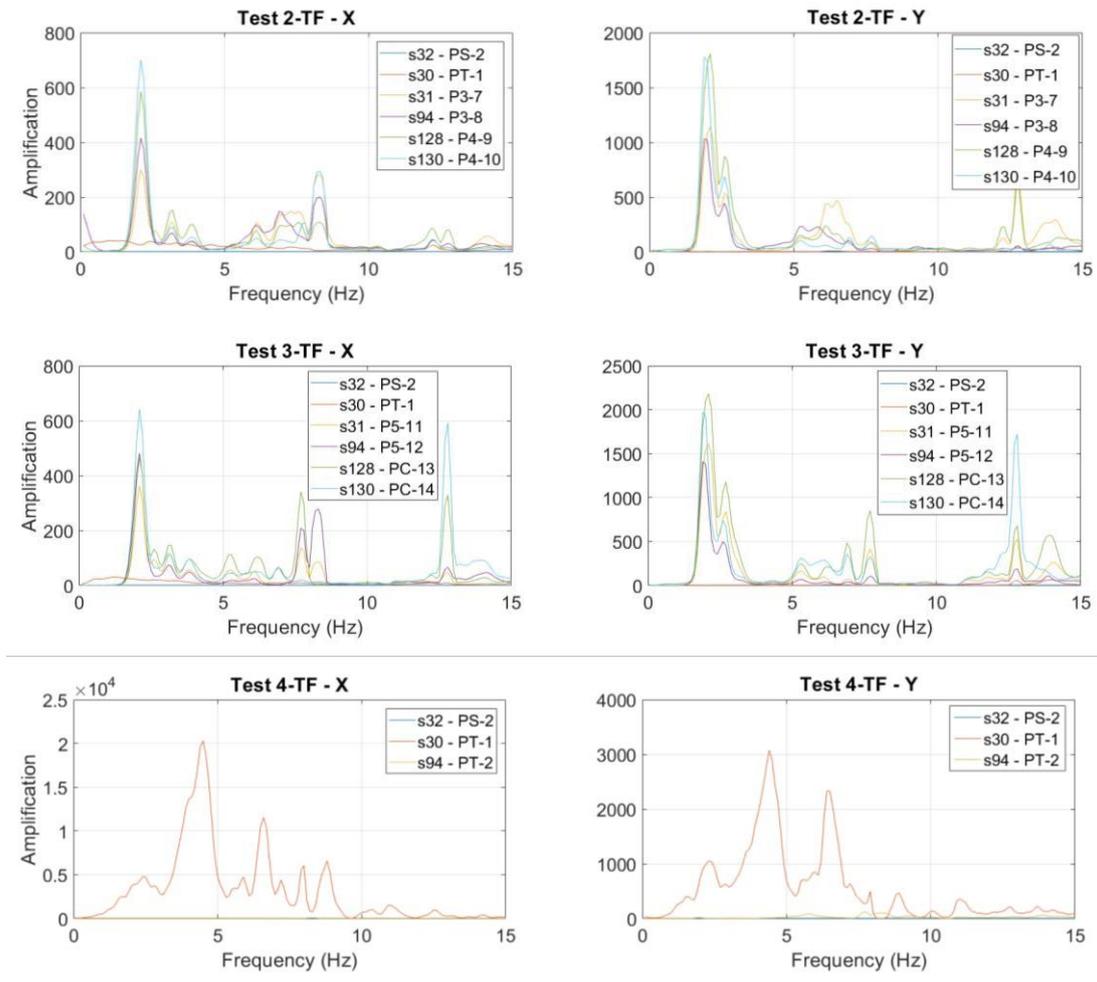


Figura 2-45 Funzioni di Trasferimento

Le funzioni di trasferimento della struttura, calcolate a partire dalle acquisizioni accelerometriche che forniscono: un picco a circa 2Hz, un secondo picco a circa 2.6Hz e un terzo picco a circa 3.2Hz.

### 2.2.3 Risultati sperimentali

Nella Tabella 2-14 sono state riepilogate le deformate modali del corpo di fabbrica oggetto di indagini. L'etichetta nella prima colonna è composta da un numero romano, che indica il numero dell'impalcato, un numero arabo, che indica la verticale di misura e infine la direzione di misura. Nelle colonne invece, per ogni modo identificato, sono riportati i vettori reali.

Response DOF	2Hz	2.6Hz	3.2Hz
I:1:+X	0.00	0.00	0.00
I:1:+Y	0.00	0.00	0.00
I:2:+X	0.00	0.00	0.01
I:2:+Y	-0.01	0.01	0.01
II:1:+X	0.01	0.00	0.01
II:1:+Y	0.02	0.01	-0.01
II:2:+X	0.10	0.00	0.02
II:2:+Y	-0.04	0.02	0.01
III:1:+X	0.03	0.01	0.04
III:1:+Y	0.07	0.04	-0.03
III:2:+X	0.04	0.01	0.03

Response DOF	2Hz	2.6Hz	3.2Hz
III:2:+Y	-0.09	0.05	0.01
IV:1:+X	0.11	0.07	0.34
IV:1:+Y	0.47	0.36	-0.27
IV:2:+X	0.16	0.03	0.21
IV:2:+Y	-0.47	0.32	0.11
V:1:+X	0.22	0.04	0.48
V:1:+Y	0.80	0.58	-0.59
V:2:+X	0.27	0.04	0.28
V:2:+Y	-0.80	0.49	0.19
VI:1:+X	0.17	0.08	0.34
VI:1:+Y	0.74	0.71	-0.61
VI:2:+X	0.21	0.03	0.22
VI:2:+Y	-0.63	0.39	0.19
VII:1:+X	0.21	0.11	0.46
VII:1:+Y	1.00	1.00	-1.00
VII:2:+X	0.29	0.06	0.34
VII:2:+Y	-0.89	0.57	0.32

Tabella 2-14 Modi di Vibrare

I valori sopra riportati sono rappresentati successivamente in 3D.

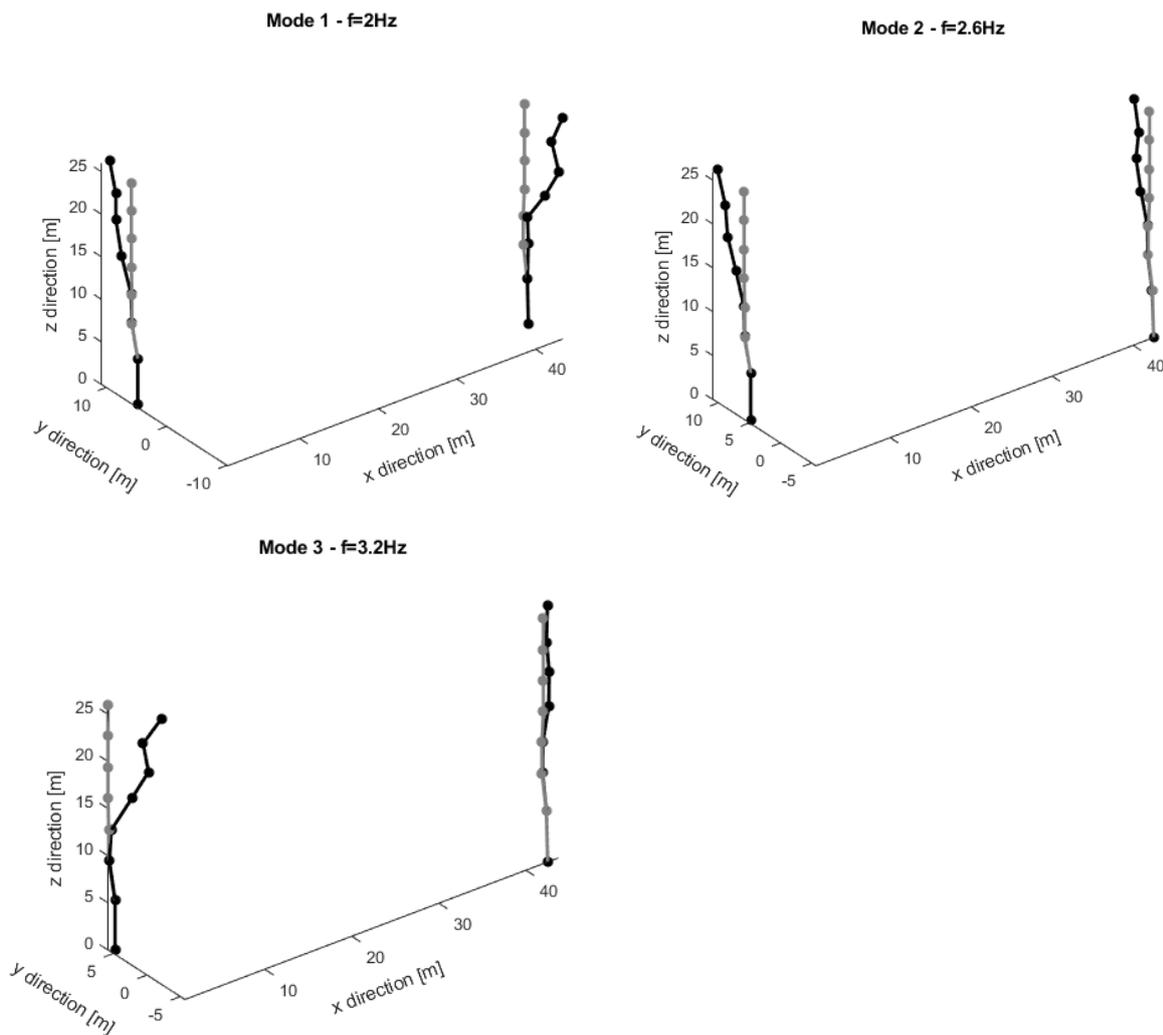
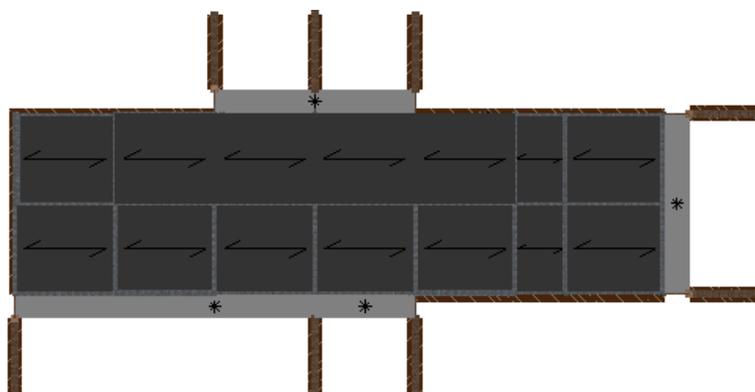


Figura 2-46 Forme modali relative alle prime tre frequenze identificate

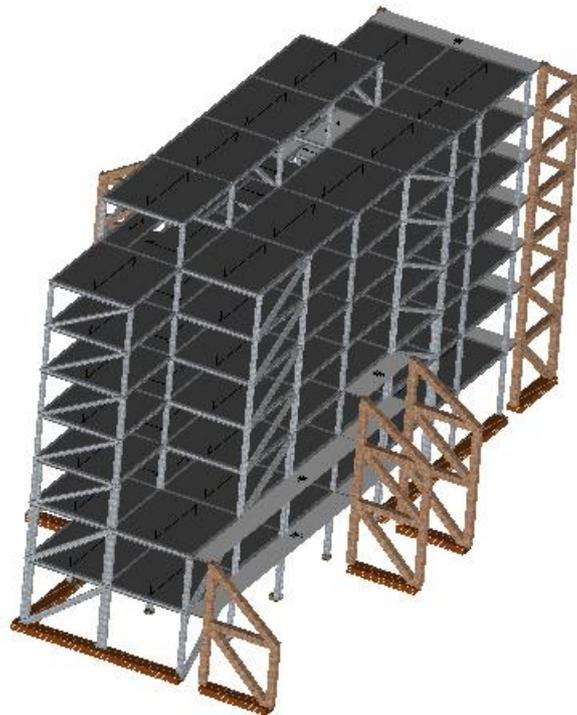
#### 2.2.4 Modellazione a macro-elementi discreti

Dalla risposta dinamica sperimentale si osserva come la struttura abbia spostamenti modali quasi nulli fino al terzo impalcato. Similmente si osserva che il primo modo identificato, contrariamente alla apparente regolarità strutturale, è spiccatamente torsionale. Similmente, sia il secondo che il terzo non appaiono puramente flessionali ma sembrano caratterizzati da evidenti eccentricità. Per ultimo nessuno dei primi tre modi è flessionale nella direzione longitudinale della struttura. Queste poche ma fondamentali osservazioni hanno lasciato supporre che i modi identificati siano fortemente influenzati dalla presenza di edifici attigui anche se giuntati. Per questo motivo è stato sviluppato un modello numerico capace di considerare sia l'interazione con le strutture che il comportamento libero. Il modello numero, descritto nel seguito è stato affiancato da un modello tipo a trave equivalente per la generazione delle curve di fragilità.

Di seguito si riportano le caratteristiche principali del modello numerico della struttura in oggetto. Tali informazioni facilitano la lettura dei risultati riportati nei capitoli successivi della presente relazione e i tabulati di calcolo allegati.



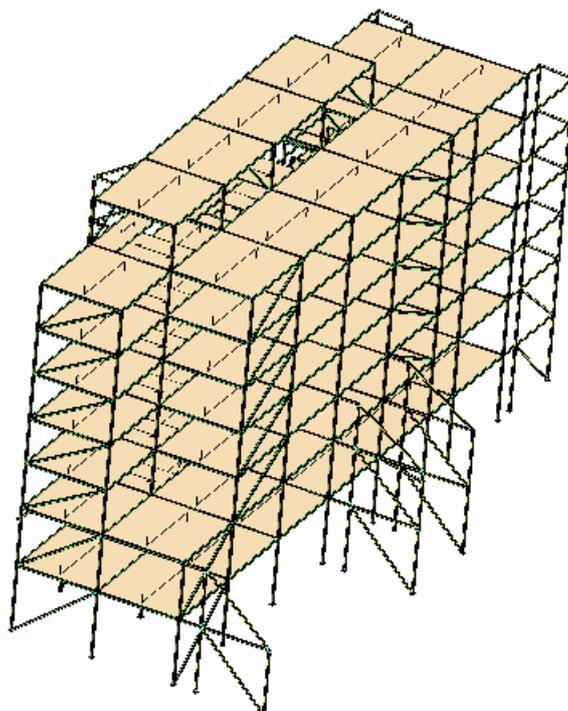
Modello Geometrico - Vista piana



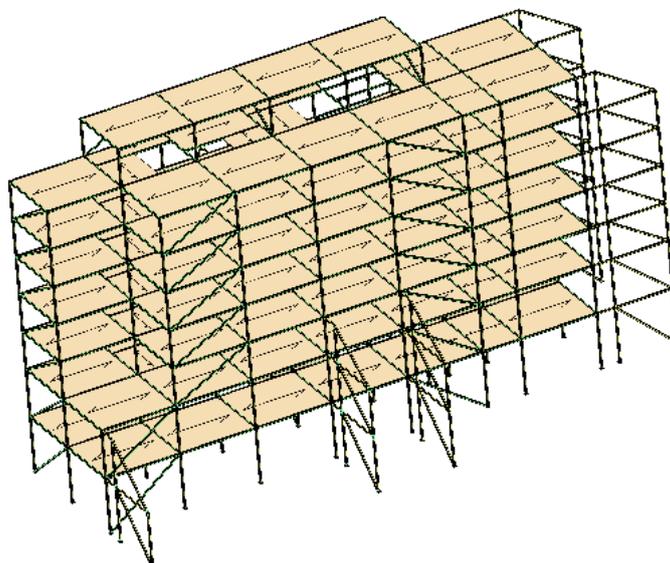
Modello Geometrico - Vista assonometrica 1



Modello Geometrico - Vista assonometrica 2

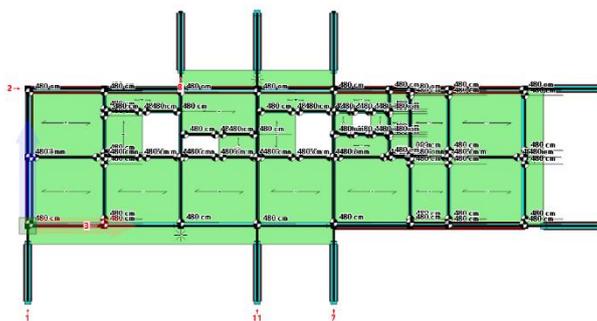


Modello Computazionale - Vista assonometrica 1

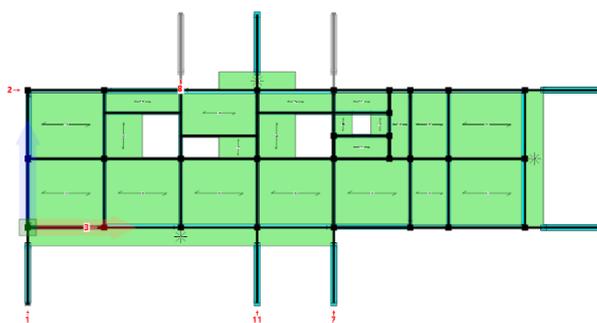


Modello Computazionale - Vista assonometrica 2

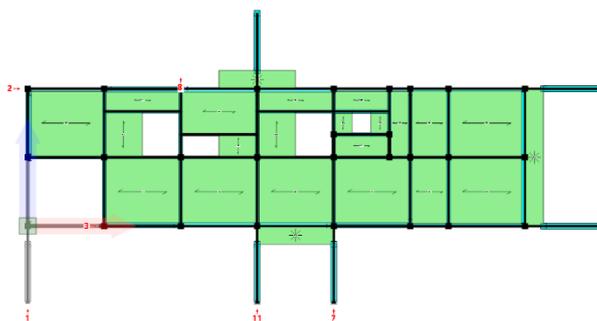
Si riportano di seguito le piante dell'edificio con l'indicazione e denominazione degli elementi resistenti (setti murari, telai).



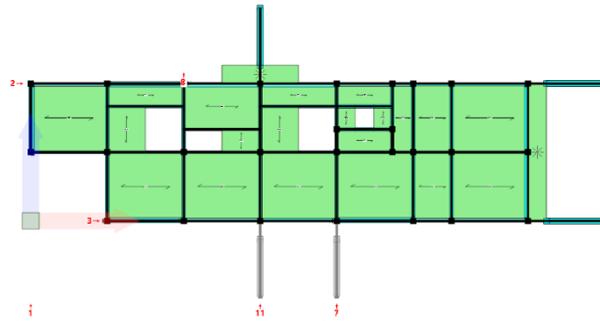
Pianta a quota 480 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti



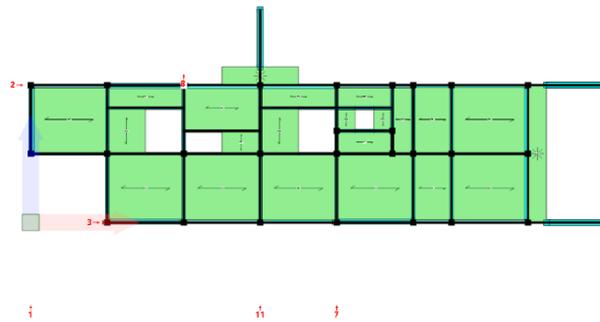
Pianta a quota 900 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti



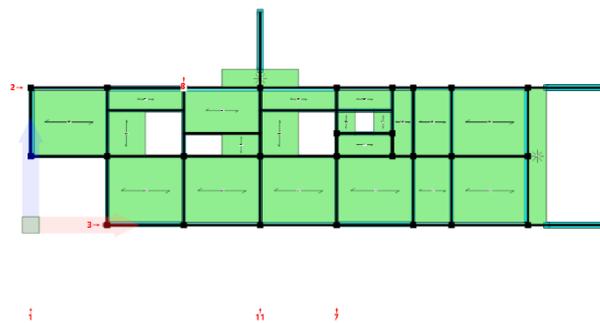
Pianta a quota 1230 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti



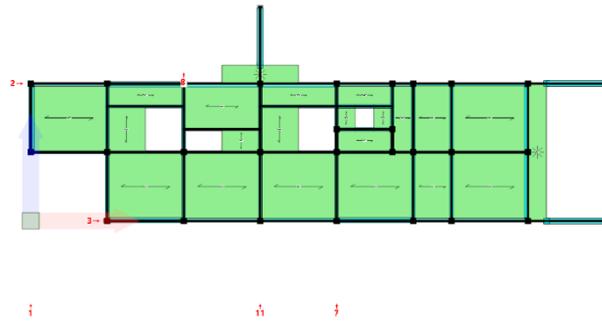
Pianta a quota 1560 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti



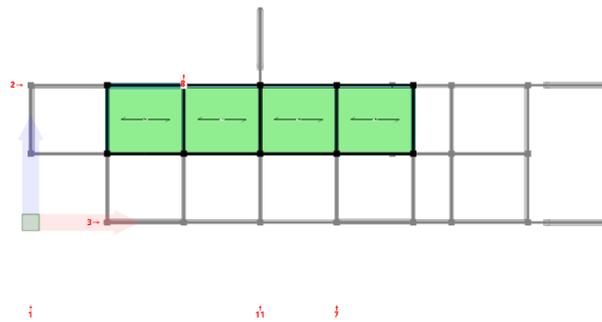
Pianta a quota 1890 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti



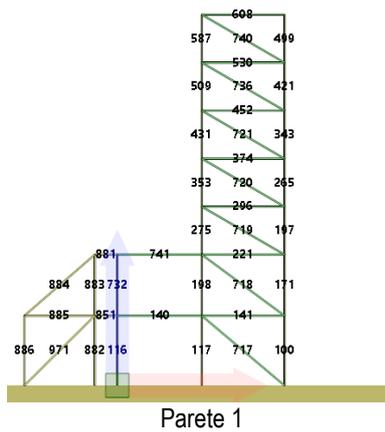
Pianta a quota 2220 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti

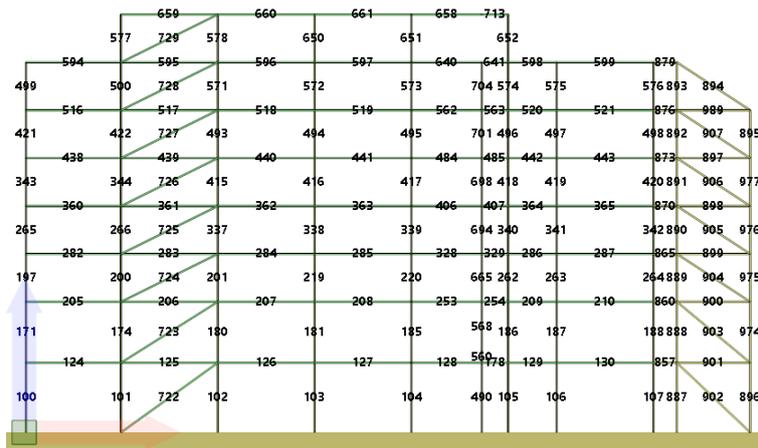


Pianta a quota 2550 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti

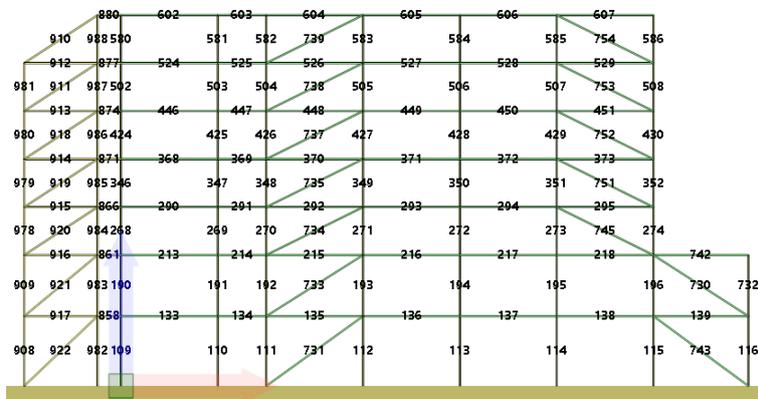


Pianta a quota 2880 cm con l'indicazione dei numeri attribuiti alle pareti

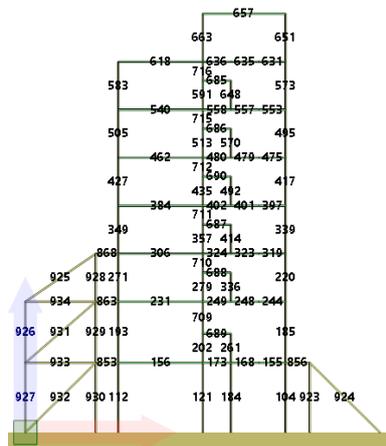




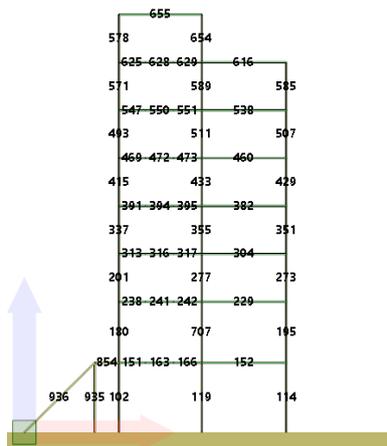
Parete 2



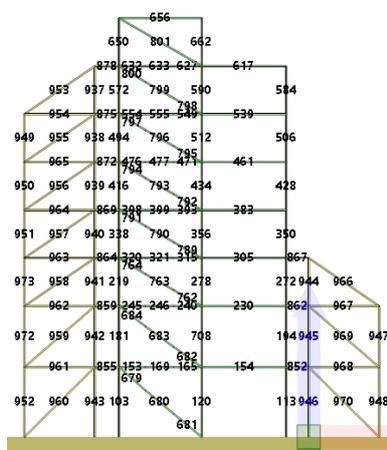
Parete 3



Parete 7



Parete 8



Parete 11

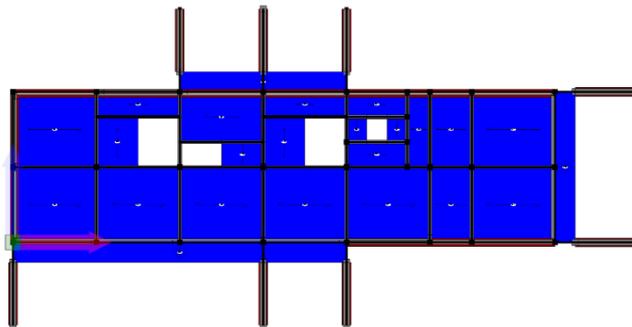
Di seguito si riporta l'analisi dei carichi gravitazionali considerati nel modello. Non vengono riportati i carichi derivanti dagli elementi strutturali, calcolati in automatico dal programma.

Ciascun carico può contenere molteplici voci di carico. Ciascuna voce di carico viene assegnata a una *condizione di carico* tra quelle definite.

Nome	Voce di carico	Condizione di carico	Tipo	Valore	Destinazione d'uso	Coefficienti di combinazione			
						$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_{2sis}$
				kN/m2					
Solaio_interno	Permanenti non strutturali	Permanenti Non Strutturali	Permanente non strutturale	2.05	-	1	1	1	1
Solaio_interno	Accidentali	Variabili	C3. Ambienti suscettibili di affollamento	5	C. Ambienti suscettibili di affollamento	0.7	0.7	0.6	0.6
Coperture	Permanenti non strutturali	Permanenti Non Strutturali	Permanente non strutturale	2.2	-	1	1	1	1
Coperture	Accidentali	Variabili	I. Coperture	2	A. Ambienti ad uso residenziale	0.7	0.5	0.3	0.3
Scale	PP	Permanenti Strutturali	Permanente strutturale	14	-	1	1	1	1
Scale	Accidentale	Variabili	B. Aree di affollamento	4	B. Uffici	0.7	0.5	0.3	0.3

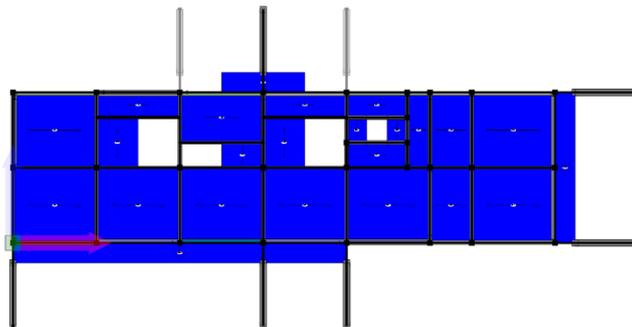
Carichi di linea Nome	Voce di carico	Condizione di carico	Valore kN/m	Destinazione d'uso	Coefficients di combinazione			
					$\psi_0$	$\psi_1$	$\psi_2$	$\psi_{2sis}$
Linea1	carico	Permanenti Strutturali	13.2	-	1	1	1	1
Linea2	carico	Permanenti Strutturali	17.6	-	1	1	1	1
PannelliPrefabbricati	PP	Permanenti Strutturali	4	-	1	1	1	1

Negli schemi che seguono viene riportata la dislocazione dei carichi gravitazionali.



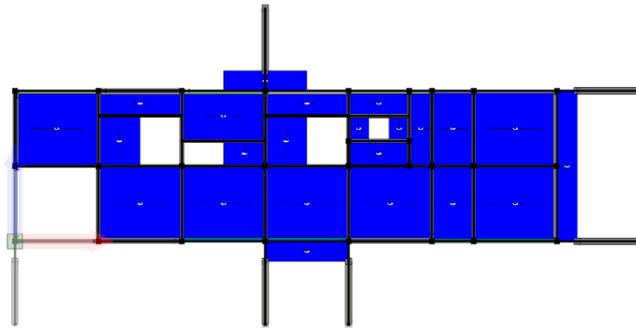
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 480 cm: carichi di area applicati ai solai



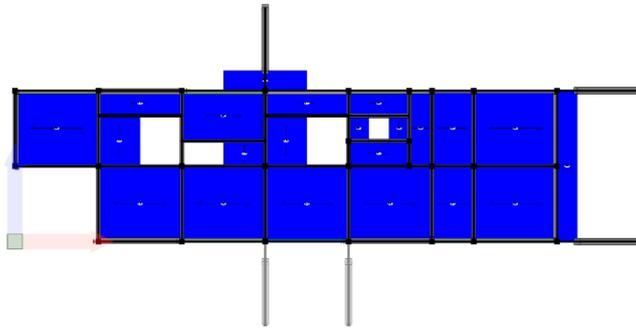
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 900 cm: carichi di area applicati ai solai



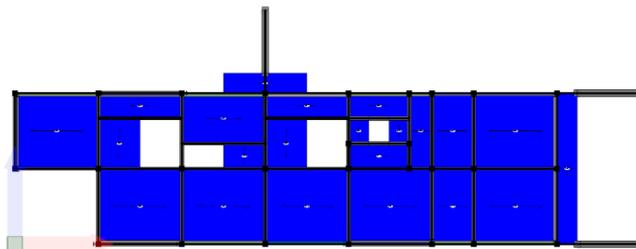
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 1230 cm: carichi di area applicati ai solai



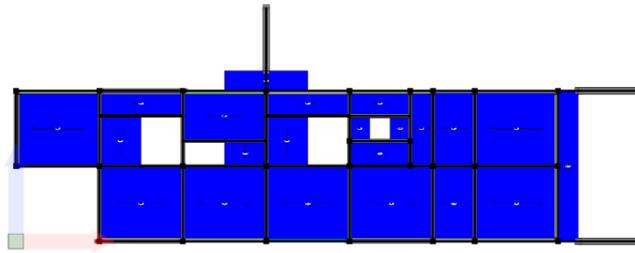
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 1560 cm: carichi di area applicati ai solai



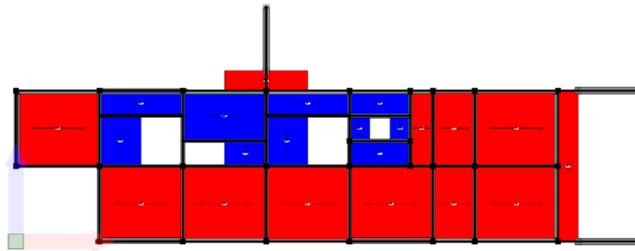
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 1890 cm: carichi di area applicati ai solai



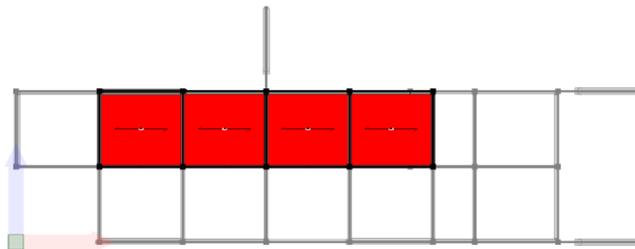
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 2220 cm: carichi di area applicati ai solai



Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

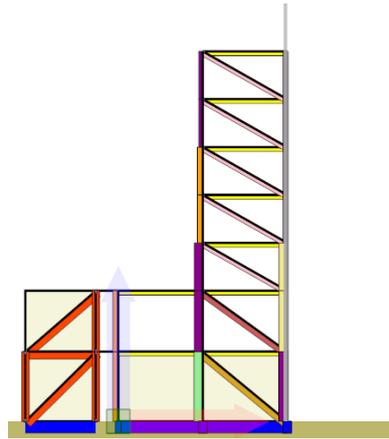
Pianta a quota 2550 cm: carichi di area applicati ai solai



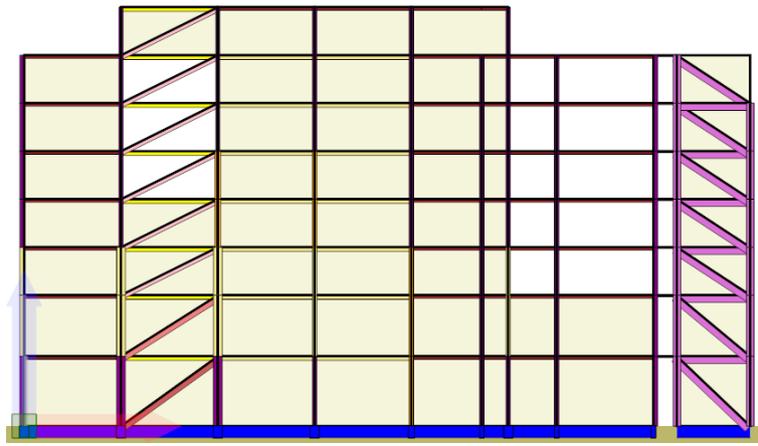
Carichi di Area	Solaio_interno	Scale	Nessuno	Linea2
Nessuno	Coperture	Carichi di Linea	Linea1	PannelliPrefabbricati

Pianta a quota 2880 cm: carichi di area applicati ai solai

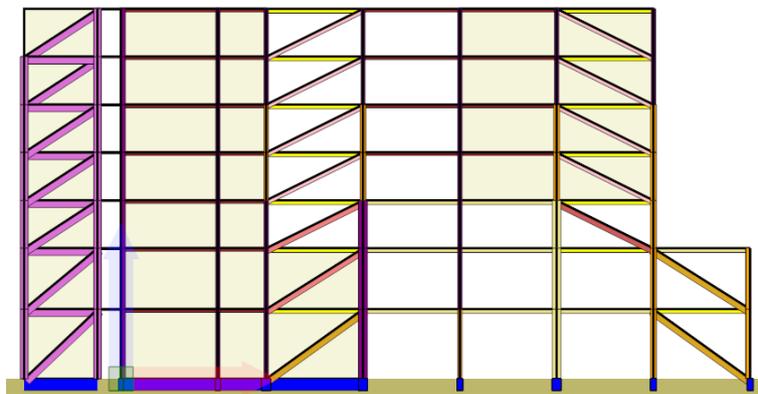
Le figure seguenti mostrano la distribuzione dei formati per le varie tipologie di murature adottate all'interno del modello.



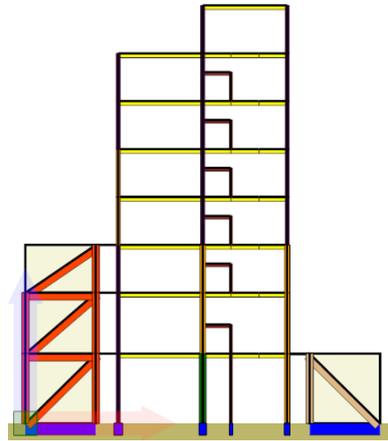
Parete 1



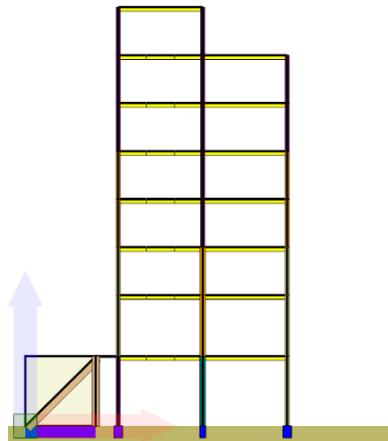
Parete 2



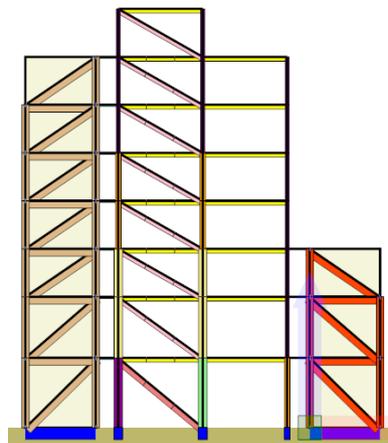
Parete 3



Parete 7



Parete 8



Parete 11

Trave2D	HEA30Fe510_Copia	
Trave3D	PIL_HEA30	
Pilastro3D	PIL_HEM60	
Catena	PIL_HEA22	

Legenda Formati Aste

Fondazioni	HEB60	link1	link17
HE_220_A	HEB40	link2	link18
HE_300_A_Copia	HEM60	link3	link19
HE_220_A_Copia	HEA40_Copia	link4	link20
Punt_HE450B	TR_HEA30_1	link5	link21
Punt_HE400B	HE_450_B_3_upd	link6	link22
Punt_HE300A	HE_400_B_3_upd	link7	link23
Punt_HE400A	HE_300_A_3_upd	link8	link24
HEA40	HE_400_A_3_upd	link9	link25
HEA22	HE_450_B_3	link10	link26
HEA60	lato1	link11	link27
HEB50	lato2	link12	link28
	lato3	link13	link29
FondazioneLinea1	Traliccio_lato1	link14	
FondazionePunto1	Traliccio_lato2	link15	

Legenda Formati Fondazioni

Il modello è stato oggetto di una specifica procedura di model updating secondo la quale alcuni specifici parametri elastici sono stati aggiornati tramite l'applicazione di un coefficiente correttivo al fine di ridurre l'errore sulle forme modali e sulle frequenze. La procedura è sviluppata in modo da interfacciarsi con il solutore del software 3DMacro. I parametri selezionati vengono variati e l'analisi modale elaborata. Ad ogni elaborazione i valori di frequenze e modi vengono confrontati con quelli sperimentali.

La procedura si articola nei seguenti punti principali:

- Lettura proprietà dinamiche desunte dalle prove di identificazione dinamica
- Lettura file .tmp del modello numerico a macroelementi
- Selezione parametri sensibili alla procedura di calibrazione
- Analisi e calcolo del valore di funzione di fitness.

L'interfaccia è così composta:

- Finestra Dati Generali
- Finestra dati per analisi di Sensibilità
- Finestra Opzioni
- Finestra dati derivanti da analisi OMA
- Finestra Log analisi
- Finestra Help

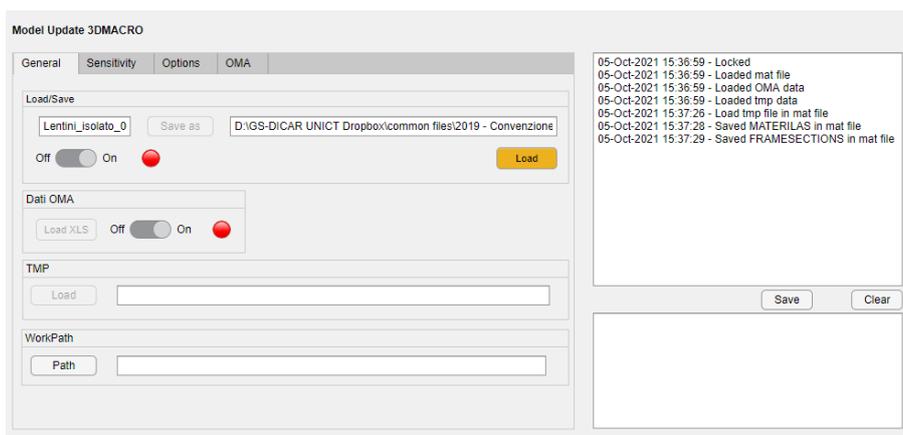


Figura 2-47 Esempio di finestra dati Generale

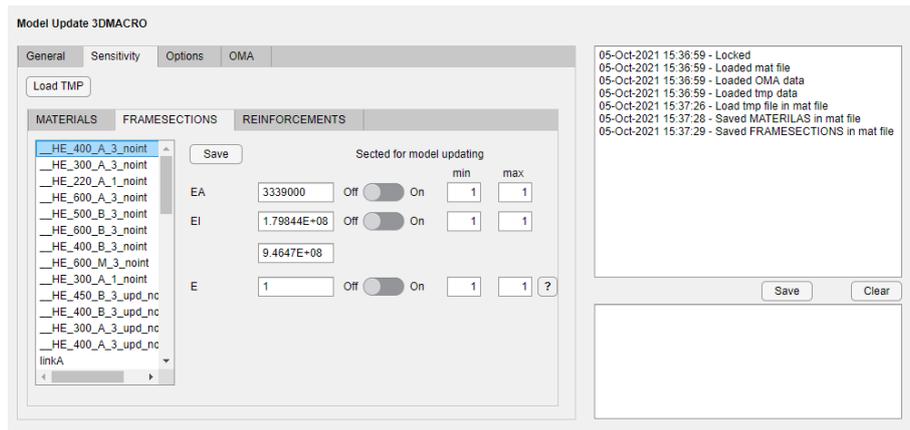


Figura 2-48 Esempio di finestra dati per analisi di Sensibilità

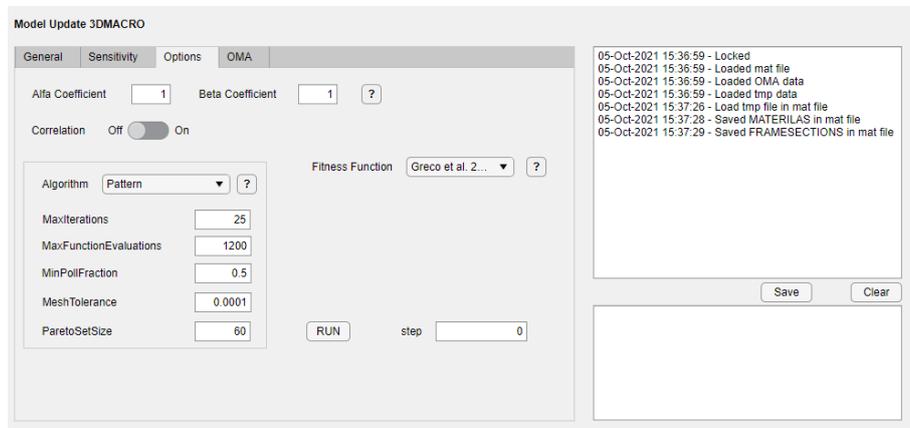


Figura 2-49 Esempio di finestra Opzioni

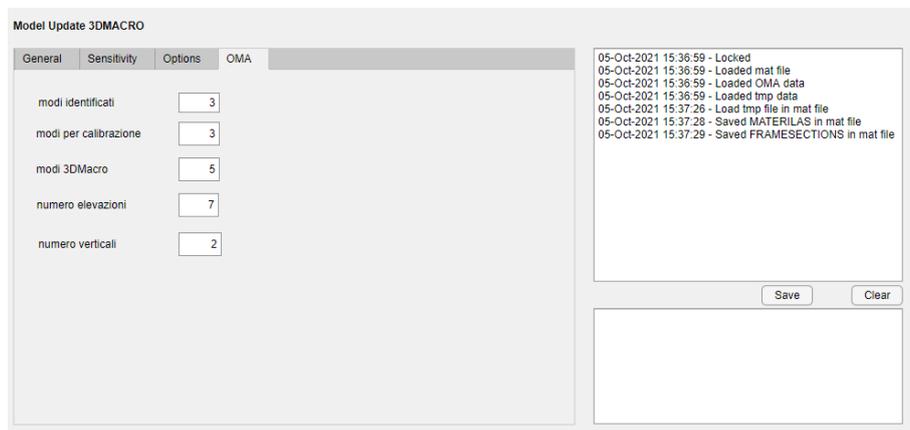


Figura 2-50 Esempio di parametri da identificazione dinamica OMA

La calibrazione del modello avviene iterativamente fino a minimizzare la funzione di fitness (obiettivo)  $O(\mathbf{k})$  calcolata con il confronto dei dati in frequenze e forme modali ottenuti dalle analisi sperimentali e numeriche.

Ad ogni iterazione vengono applicati coefficienti correttivi  $k$  ai parametri selezionati da aggiornare. I contributi di frequenze e forme modali vengono combinati tramite coefficienti di combinazione  $\alpha$  e  $\beta$ . Per ogni  $j$ -esimo modo viene calcolata la frequenza  $\omega_j$  e la forma modale  $\boldsymbol{\varphi}_j$ . Entrambi i valori sono funzione del vettore  $\mathbf{k}$  che contiene i singoli parametri correttivi  $k$  inserirei la

dipendenza da  $k$  nella formula della funzione fitness. La strategia di ottimizzazione tende a trovare una soluzione che riduce il valore di  $O(\mathbf{k})$ .

$$O(\mathbf{k}) = \alpha \underbrace{\sqrt{\sum_{j=1}^n \left( \frac{\omega_j(\mathbf{k}) - \tilde{\omega}_j}{\tilde{\omega}_j} \right)^2}}_{\text{frequenze}} + \beta \underbrace{\left[ n - \sum_{j=1}^n \frac{|\boldsymbol{\varphi}_j(\mathbf{k}) \cdot \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_j^T|^2}{(\boldsymbol{\varphi}_j(\mathbf{k}) \cdot \boldsymbol{\varphi}_j^T(\mathbf{k})) (\tilde{\boldsymbol{\varphi}}_j \cdot \tilde{\boldsymbol{\varphi}}_j^T)} \right]}_{\text{forme modali}}$$

A seguito della procedura di updating si sono ottenuti i risultati riportati di seguito con riferimento alle prime tre frequenze e forme modali.

Tabella 2-15 Confronto tra prime tre frequenze

	I modo	II modo	III modo
Da prova sperimentale	2.00 Hz	2.60 Hz	3.20 Hz
Modello calibrato con Model Updating	2.02 Hz	2.89 Hz	3.20 Hz

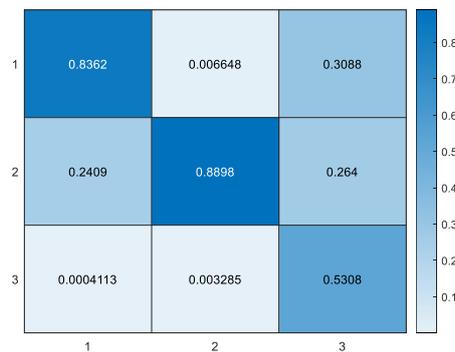


Figura 2-51 Matrice MAC

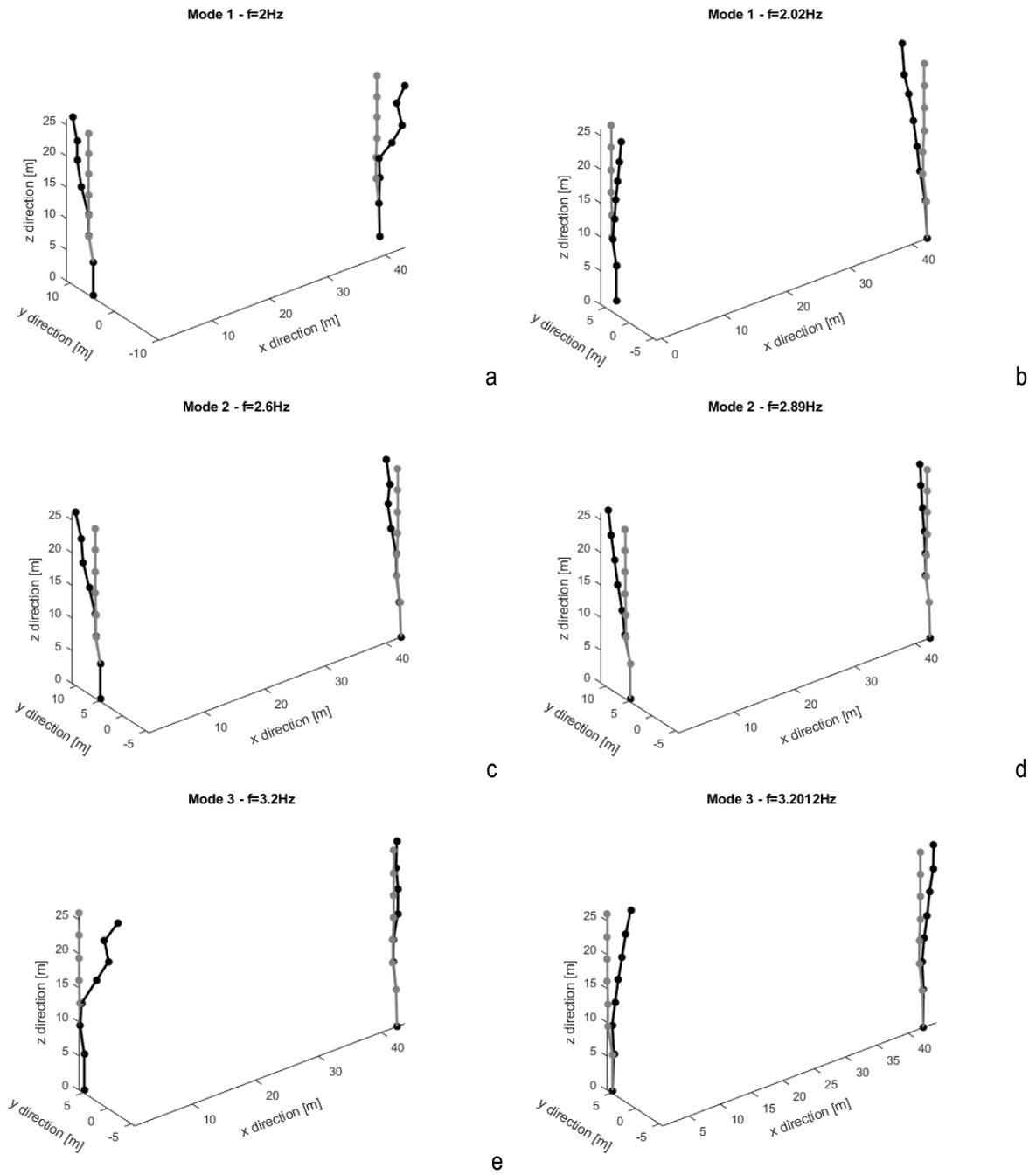
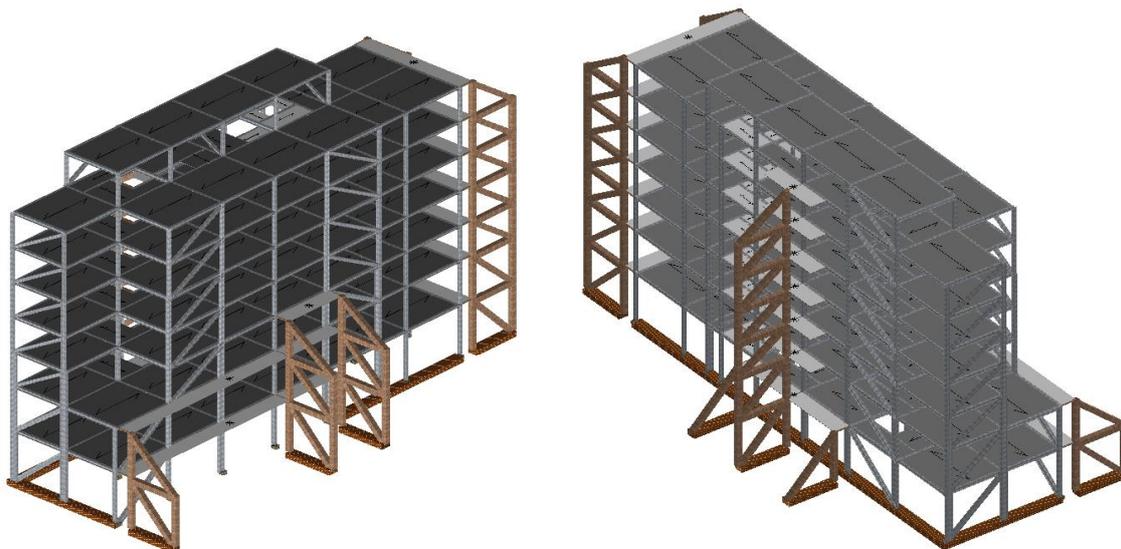


Figura 2-52 Confronto deformate modali sperimentali (a,c,e) e calcolate con updating (b,d,f)



I parametri oggetto di aggiornamento sulla base dei quali si è effettuata la procedura di updating sono riportati di seguito, questi sono da considerarsi come variazione del parametro elastico dei singoli elementi che collegano le strutture di contrasto all'edificio. Di seguito si riporta l'andamento della funzione obiettivo all'aumentare delle iterazioni.

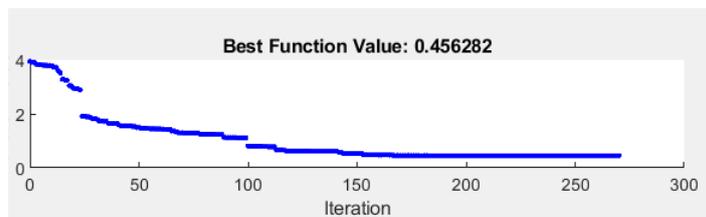


Tabella 2-16 Parametri elastici identificati – link di collegamento con le strutture limitrofe

Parametro	Valore del Parametro di base	Valore del Parametro dopo l'updating
	EA kNcm <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup>	EA kNcm <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup>
EA link1	6.17E+06	6.17E+06
EA link2	7.45E+06	9.95E+06
EA link3	4.89E+06	9.89E+06
EA link4	5.18E+06	8.72E+06
EA link5	5.39E+06	2.89E+06
EA link6	6.56E+06	9.06E+06
EA link7	8.55E+06	8.55E+06
EA link8	5.71E+06	3.21E+06
EA link9	6.94E+06	4.44E+06
EA link10	8.30E+06	8.30E+06
EA link11	2.95E+06	7.95E+06
EA link12	8.86E+06	8.86E+06
EA link13	4.55E+06	3.09E+06
EA link14	8.15E+06	3.15E+06
EA link15	6.55E+06	9.05E+06

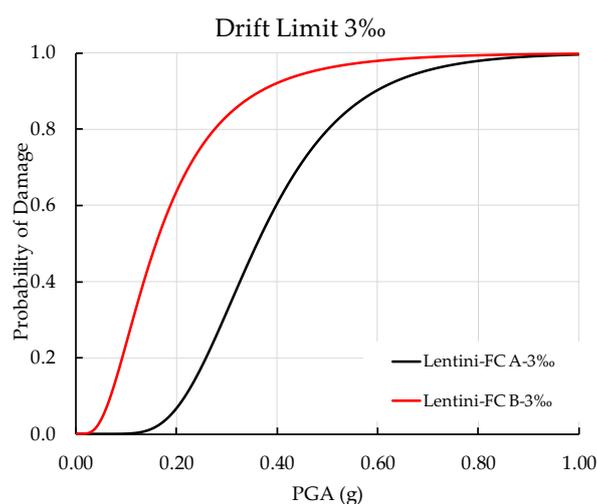
Parametro	Valore del Parametro di base	Valore del Parametro dopo l'updating
	EA	EA
	kNcm <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup>	kNcm <sup>-2</sup> cm <sup>2</sup>
EA <sub>link16</sub>	5.20E+06	7.70E+06
EA <sub>link17</sub>	6.08E+06	8.58E+06
EA <sub>link18</sub>	2.52E+06	2.52E+06
EA <sub>link19</sub>	7.73E+06	7.73E+06
EA <sub>link20</sub>	3.69E+06	8.69E+06
EA <sub>link21</sub>	2.95E+06	2.95E+06
EA <sub>link22</sub>	2.71E+06	7.71E+06
EA <sub>link23</sub>	6.32E+06	8.82E+06
EA <sub>link24</sub>	8.39E+06	3.39E+06
EA <sub>link25</sub>	9.96E+06	9.96E+06
EA <sub>link26</sub>	9.23E+06	9.23E+06
EA <sub>link27</sub>	3.73E+06	3.73E+06
EA <sub>link28</sub>	3.74E+06	8.74E+06
EA <sub>link29</sub>	9.75E+06	9.75E+06

## 2.2.5 Curve di fragilità

Si riportano in questa sezione le curve di fragilità ottenute tramite due modelli semplificati basati su modelli beam-like calibrati sulle proprietà modali ottenute da misure di rumore e modelli numerici. Come osservato precedentemente, il modello è stato calibrato considerando il vincolo restituito dai giunti. Questi, sotto azioni sismiche, perdono il loro comportamento di vincolo riscontrato per microtremiti e consentono spostamenti pari alla loro capacità di spostamento ed alle dimensioni del giunto stesso. Emerge quindi la necessità di valutare il comportamento dell'edificio in due condizioni differenti.

Curva di Fragilità A – Sulla base del modello numerico viene calibrato un modello tipo beam-like sulla scorta dei dati modali sperimentali e quest'ultimo usato per la generazione delle curve di fragilità.

Curva di Fragilità B- Viene calibrato un modello beam-like sulla risposta modale dell'edificio in assenza di vincoli. Il modello viene adottato per la generazione delle curve di fragilità.



Il risultato mostra una significativa differenza tra i risultati ottenibili sulla base della sola identificazione dinamica e quelli tramite l'implementazione di modelli numerici a supporto della campagna di identificazione. È quindi utile osservare che il caso A, generato considerando la risposta dinamica della struttura sotto microtremiti, restituisce una probabilità di accadimento

minore rispetto al rispettivo caso B. Osservando ad esempio il risultato relativo al drift di interpiano del 3‰, si annota che per un input sismico caratterizzato da un PGA di 0.4g il modello basato solo sui dati sperimentali restituisce una probabilità di danno di circa il 60%, di contro, il modello che valuta l'assenza di interazione restituisce una probabilità di circa il 90%. Questo porta a concludere che l'uso del solo modello legato al dato sperimentale in caso di interazione con altre strutture sotto microtremiti sovrastima la reale capacità della struttura a non oltrepassare il drift prestabilito e, conseguentemente, a non danneggiarsi. In condizioni sismiche, durante le quali il comportamento dei giunti è attivo, l'interazione con i corpi attigui si riduce o si annulla e la struttura ha una maggiore deformabilità. Questo determina probabilità di danneggiamento più alte. Il risultato, che ha previsto l'uso parallelo di più tecniche di modellazione riveste un importante aspetto nella definizione metodologica delle curve di fragilità in strutture complesse come quelle in oggetto.

Si considererà quindi, ai fini delle definizioni dell'Indice di Operatività del Contesto Territoriale, l'uso della seguente curva di fragilità. Il parametro di intensità è il parametro ASI.

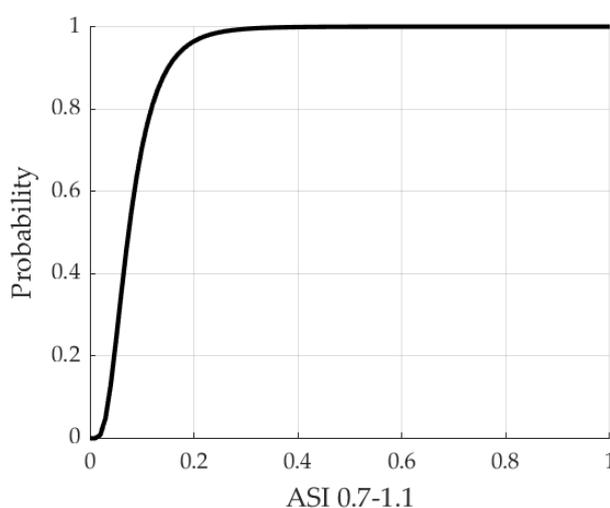


Figura 2-53 ES2 Presidio Ospedaliero Lentini Curva di Fragilità Drift 3‰

## 2.3 ES3 - Caserma dei VVF del Comune di Augusta

La caserma dei Vigili del Fuoco (ES3), situata nel comune di Augusta (SR) in Contrada Balate, (coordinate: 37.255667 lat. - 15.214667 long.) è rappresentata nelle immagini seguenti. La struttura è di tipo a telaio in c.a. e si sviluppa su due livelli fuori terra (piano terra e piano primo). La struttura ha una forma pressoché rettangolare con una corte interna. Il complesso è costituito da altri elementi strutturali che non sono stati oggetto di indagine poiché non sono di interesse ai fini della sperimentazione (torre e ricovero mezzi).

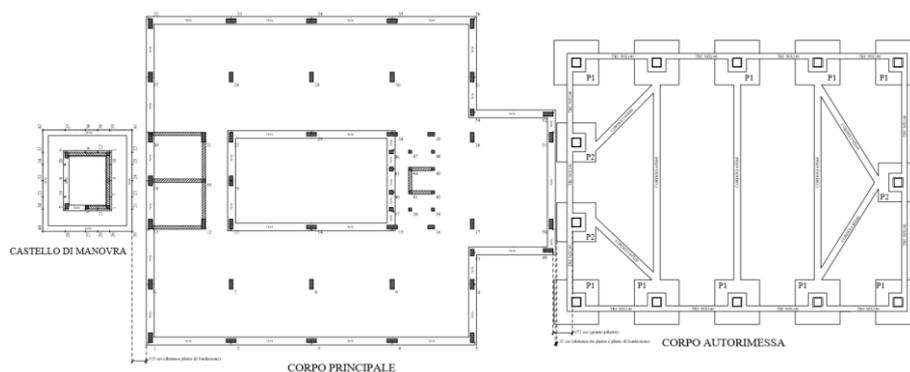


Figura 2-54 Stralcio planimetrico generale

### 2.3.1 Ricerca documentale

Le informazioni relative alla struttura, alla caratterizzazione del suolo e alle caratteristiche dei materiali sono state estrapolate dai documenti originali di progetto<sup>8</sup>.

Si riassumono di seguito i dati reperiti per l'edificio in oggetto. Nelle tabelle si è scelto di indicare con □ il dato mancante e con ■ il dato presente.

Tabella 2-17 Edifici Strategici – Informazioni generali

REGIONE	CODICE	ANNO DI COSTRUZ	N. PIANI	PRESENZA DI SETTI
		Normativa di riferimento	(n. di elevazioni)	
SICILIA	ES3	NTC08	2	■

Tabella 2-18 Edifici Strategici – Informazioni Architettoniche

<sup>8</sup> ES3 Augusta - "Relazione Geologico-tecnica. Oggetto: Progetto per la realizzazione della nuova sede di distacco della caserma dei VV.FF. di Augusta (SR)", Elaborato B.2

ES3 Augusta - "Calcoli strutturali – Relazione Generale Corpo Centrale e Castello di Manovra", Elaborato D.1

ES3 Augusta - "Calcoli strutturali – Relazione sui materiali Corpo Centrale e Castello di Manovra", Elaborato D.2

ES3 Augusta - "Elaborati strutturali Corpo centrale" Elaborati C.3

ES3 Augusta - "Relazione tecnica generale", Elaborato R

REGIONE	CODICE	N. PIANI (n. di levazioni)	PLANIMETRIE										COPERTURA	PROSPETTI	NOTE		
			-2	-1	PT	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7				P8	P9
SICILI A	ES3	2			■	■										■	□

Tabella 2-19 Edifici Strategici – Informazioni Strutturali

REGIONE	CODICE	N. PIANI (n. di evazioni)	CARPENTERIE										COPERTURA	Note			
			F	-2	-1	PT	P1	P2	P3	P4	P5	P6			P7	P8	P9
SICILI A	ES3	2	■			■	■										■

Tabella 2-20 Edifici Strategici – Informazioni dettagli architettonici e dati materiali e terreno

REGIONE	CODICE	DETTAGLI	DATI		Note
			MATERIALI	TERRENI	
SICILIA	ES3	■	■	■	

La struttura è di tipo a telaio in ca spaziale. Architettonicamente è a sezione pseudoquadrata con una corte interna che si articola su due piani fuori terra. La quota relativa al primo piano è di 3,60 m, la quota di copertura è di 7,20 m, mentre il torrino scala/ascensore raggiunge quota 9,40 m.

Dalla relazione geologica<sup>9</sup>, sono stati ricavati i parametri relativi a:

- Classificazione sismica del sito di costruzione:  $a_g = 0.2362$
- Categoria di suolo: C

Gli elementi in cemento armato, platee/travi di fondazione, pilastri, travi d'elevazione, piastre, setti, sono in calcestruzzo di classe C25/30, mentre i solai sono a travetti prefabbricati in c.a.p in calcestruzzo di classe C45/55. Le armature delle strutture saranno in acciaio nervato per c.a. di classe B450C.

<sup>9</sup> ES3 Augusta - "Relazione Geologico-tecnica. Oggetto: Progetto per la realizzazione della nuova sede di distacco della caserma dei VV.FF. di Augusta (SR)", Elaborato B.2

Relativamente ai pilastri<sup>10</sup> sono state identificate sezioni e le relative armature.

La tamponatura esterna<sup>11</sup> è in blocco splittato in calcestruzzo.

Vi è inoltre la presenza di setti in cemento armato<sup>12</sup> che individuano il vano ascensore e i locali tecnico e gruppo elettrogeno.

I solai<sup>13</sup> del Corpo Principale sono costituiti da solai in c.a. pieni armati a piastra per quanto riguarda il locale tecnico “Centrale termica/gruppo elettrogeno” e la copertura del vano ascensore, di spessore 12 cm e 20 cm, e solai a travetti prefabbricati in c.a.p., alleggeriti con blocchi di laterizio e completati in opera col getto della nervatura restante e soletta per una altezza totale di 30 cm.

Ad ogni solaio sono stati attribuiti i carichi derivanti dal peso proprio e dagli elementi non strutturali, inoltre sono stati tenuti in considerazione i sovraccarichi accidentali, derivanti dalla destinazione d'uso dell'ambiente insistente sul solaio. Per i solai al piano di calpestio la destinazione d'uso è Uffici (Categoria B2), l'ultimo impalcato è invece destinato a Copertura (Categorie I e H).

Relativamente alle travi di fondazione dalla consultazione dagli elaborati (Anon., s.d.) è stata identificata la quota di fondazione, la sezione e la relativa armatura.

### 2.3.2 Campagna di misure di vibrazione

La struttura è stata oggetto di campagna di identificazione dinamica giorno 19/02/2020. L'analisi ha previsto 3 configurazioni di strumentazione disposti opportunamente per poter descrivere il comportamento dinamico modale dell'edificio. Al fine di caratterizzare il comportamento dinamico dell'edificio e del terreno di fondazione sono state utilizzate due tipologie di strumenti di misura: tre stazioni accelerometriche triassiali e due stazioni accelerometriche biassiali tipo Poseidon, della LeaneNet, e una stazione velocimetrica tri-direzionale tipo SR04 GeoBox, della “Sara Electronic Instruments”.

Ogni set di acquisizione accelerometrico ha avuto una durata di circa 35 minuti ed una frequenza di campionamento di 250 Hz.

I dettagli della strumentazione accelerometrica sono riportati al capitolo 2.1.1.2.

I 3 test hanno previsto la disposizione degli strumenti in prestabiliti punti quanto più allineati lungo verticali. I test sono stati così organizzati come descritto in Tabella 2-21 e la strumentazione posizionata secondo le coordinate del sistema relativo raffigurate in Figura 2-56 e Tabella 2-22.

Tabella 2-21 Descrizione dei 4 test di acquisizione

TEST 1 VIGILI DEL FUOCO - 19/02/2020						
Punto di Misura	Denominazione Punto di Misura	Ubicazione Punto di Misura	Denominazione Accelerometro	Tipologia Accelerometro	Frequenza di Campionamento [Hz]	Durata Misura
1	PT-4	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	30 min.
2	PC-1	Piano Copertura PC	S32	Triassiale	250	30 min.

<sup>10</sup> ES3 Augusta - “Elaborati strutturali corpo centrale – esecutivi pilastri Tav. 1”, Elaborato C.3.8.1

ES3 Augusta - “Elaborati strutturali corpo centrale – Esecutivi trave di elevazione”, Elaborati C.3.12 e C.3.13

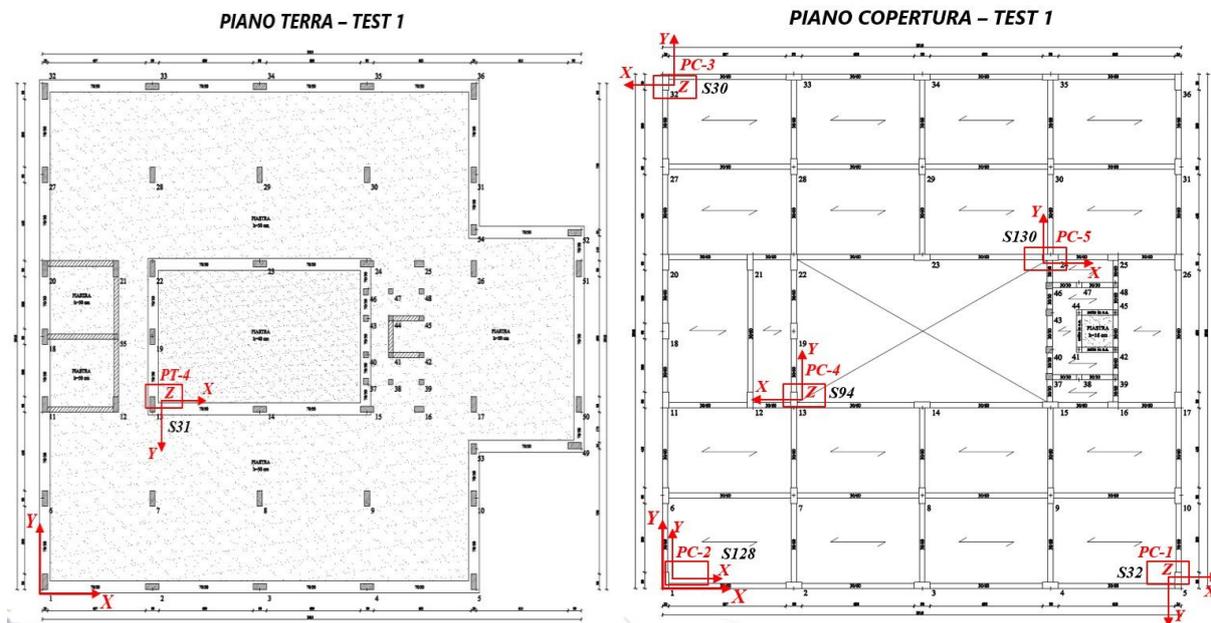
<sup>11</sup> ES3 Augusta - Particolari modifica tamponatura esterna caserma VVF Augusta

<sup>12</sup> ES3 Augusta - “Elaborati strutturali Corpo centrale” Elaborati C.3

<sup>13</sup> ES3 Augusta - “Calcoli strutturali – Relazione Generale Corpo Centrale e Castello di Manovra”, Elaborato D.1

3	PC-2	Piano Copertura PC	S128	Biassiale	250	30 min.
4	PC-3	Piano Copertura PC	S30	Triassiale	250	30 min.
5	PC-4	Piano Copertura PC	S94	Triassiale	250	30 min.
6	PC-5	Piano Copertura PC	S130	Biassiale	250	30 min.
TEST 2						
Punto di Misura	Denominazione Punto di Misura	Ubicazione Punto di Misura	Denominazione Accelerometro	Tipologia Accelerometro	Frequenza di Campionamento [Hz]	Durata Misura
1	PT-4	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	32 min.
2	P1-2	Piano Primo P1	S94	Triassiale	250	32 min.
3	P1-5	Piano Primo P1	S128	Biassiale	250	32 min.
4	P1-6	Piano Primo P1	S32	Triassiale	250	32 min.
5	PC-5	Piano Copertura PC	S130	Biassiale	250	32 min.
6	PC-6	Piano Copertura PC	S30	Triassiale	250	32 min.
TEST 3						
Punto di Misura	Denominazione Punto di Misura	Ubicazione Punto di Misura	Denominazione Accelerometro	Tipologia Accelerometro	Frequenza di Campionamento [Hz]	Durata Misura
1	PT-4	Piano Terra PT	S31	Triassiale	250	32 min.
2	P1-1	Piano Primo P1	S130	Biassiale	250	32 min.
3	P1-2	Piano Primo P1	S94	Triassiale	250	32 min.
4	P1-3	Piano Primo P1	S32	Triassiale	250	32 min.
5	P1-4	Piano Primo P1	S30	Triassiale	250	32 min.
6	P1-5	Piano Primo P1	S128	Biassiale	250	32 min.

Figura 2-55 Disposizione punti di misura durante i 4 test



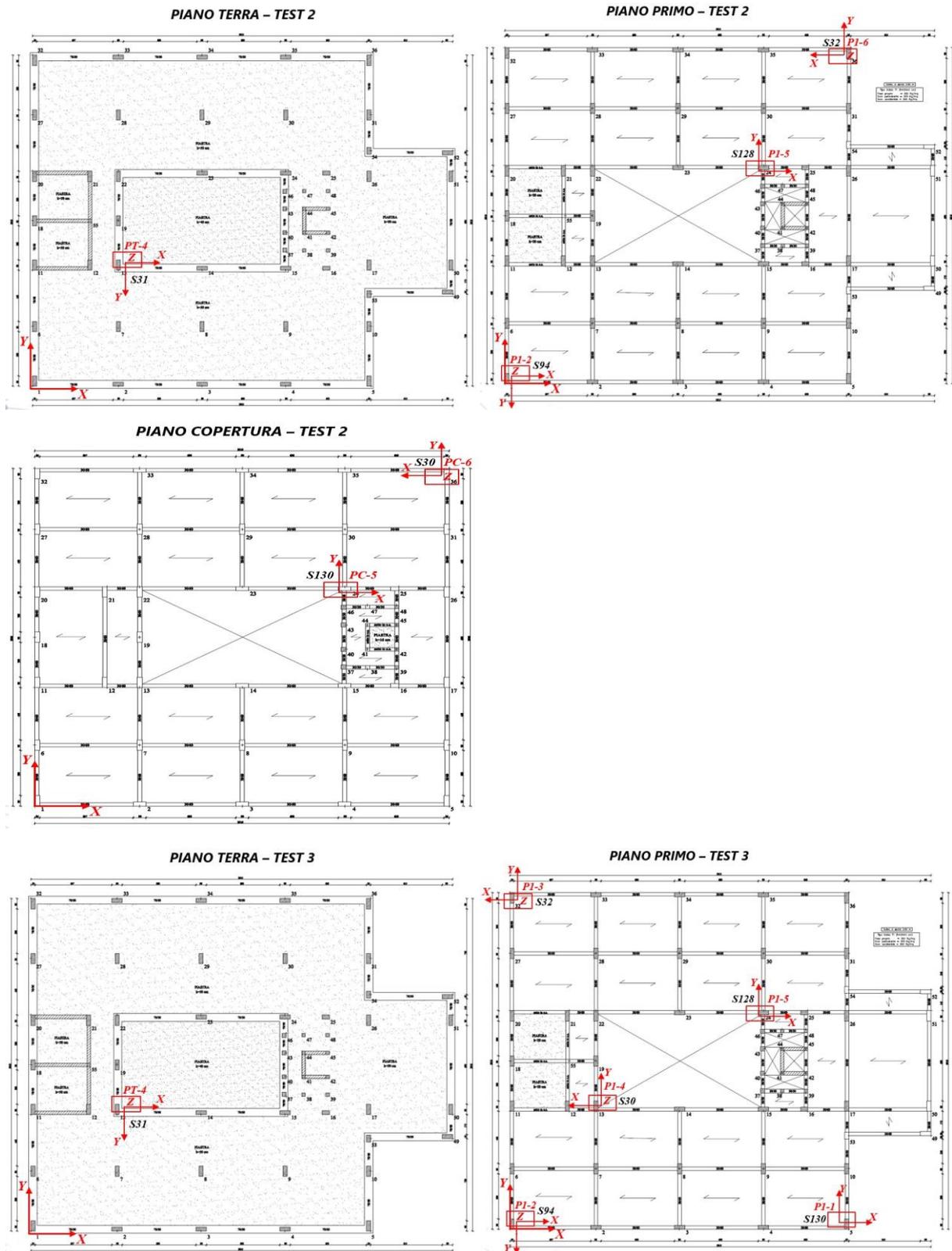


Figura 2-56 Disposizione punti di misura durante i 3 test

Tabella 2-22 Coordinate posizioni dei punti di misura

Coordinate Stazioni Accelerometriche ES2 Lentini											
TEST 1				TEST 2				TEST 3			
STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]	STAZIONE	X [m]	Y [m]	Z [m]
S31	8.20	11.00	0.00	S31	8.20	11.00	0.00	S31	8.20	11.00	0.00
S32	28.35	0.30	7.20	S94	0.55	0.30	3.60	S130	28.35	0.30	3.60
S128	0.55	0.30	7.20	S128	21.30	18.70	3.60	S94	0.55	0.30	3.60
S30	0.65	28.70	7.20	S32	28.40	28.70	3.60	S32	0.65	28.70	3.60
S94	7.80	10.50	7.20	S130	21.30	18.70	7.20	S30	7.80	10.50	3.60
S130	21.30	18.70	7.20	S30	28.40	28.70	7.20	S128	21.30	18.70	3.60

I dati accelerometrici registrati sotto le condizioni di rumore ambientale sono stati rielaborati in termini di spettri si Welch (Figura 2-57) e funzioni di trasferimento (Figura 2-58) al fine di ricostruire le grandezze dinamiche modali fondamentali dell'edificio.

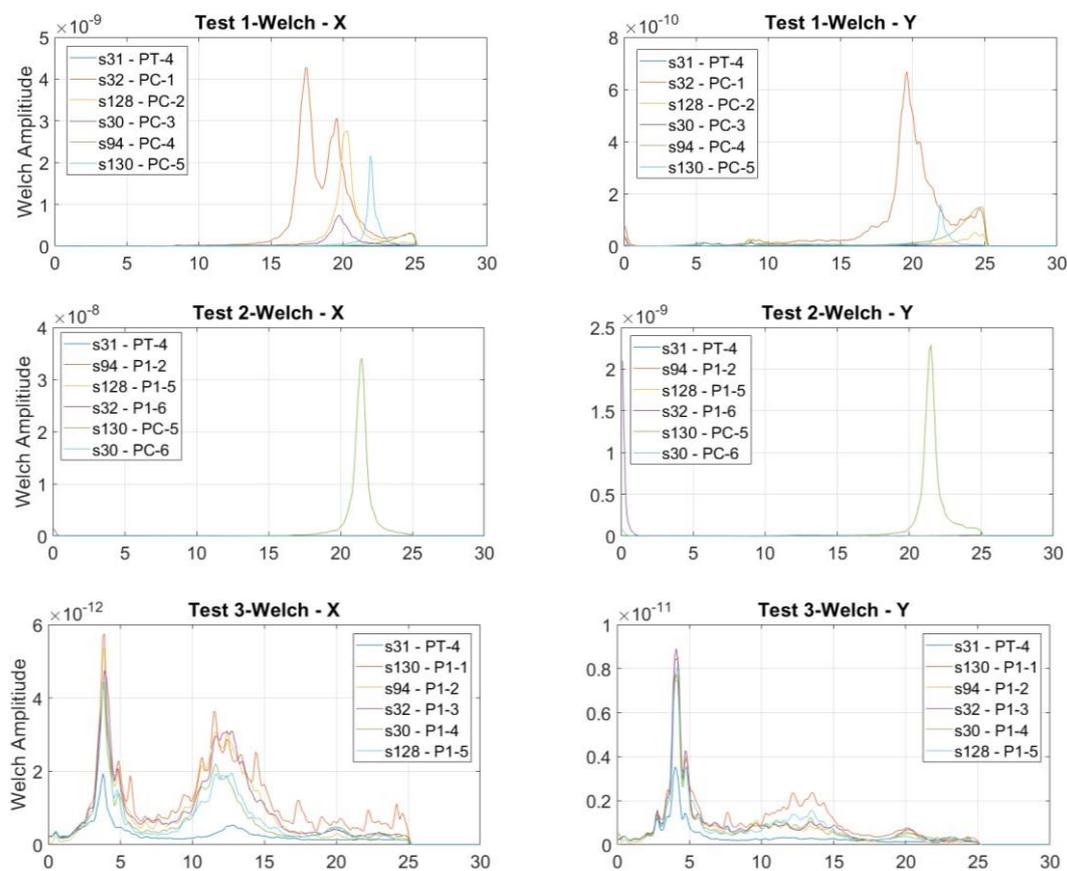


Figura 2-57 Trasformate di Welch

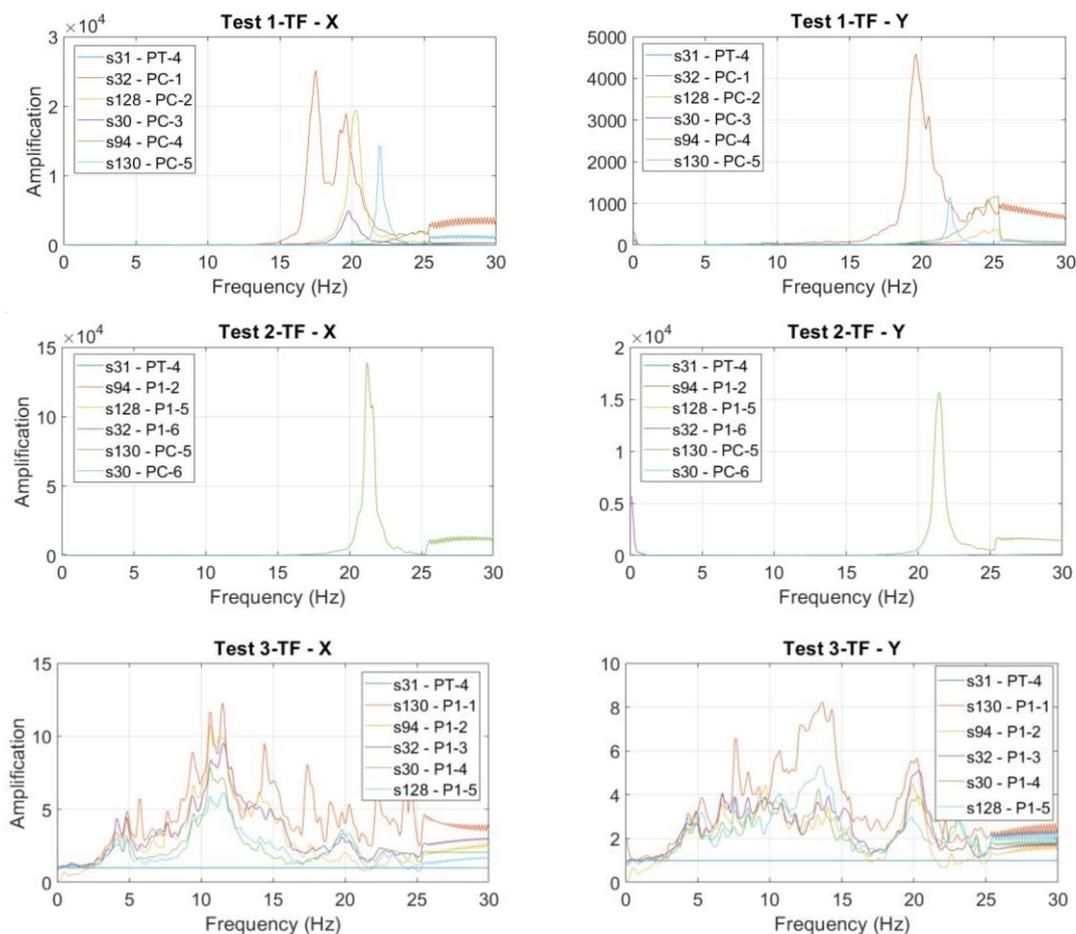


Figura 2-58 Funzioni di Trasferimento

Le funzioni di trasferimento della struttura, calcolate a partire dalle acquisizioni accelerometriche che forniscono: un picco a circa 3.9Hz, un secondo picco a circa 4.1Hz e un terzo picco a circa 4.9Hz.

### 2.3.3 Risultati sperimentali

Nella Tabella 2-23 sono state riepilogate le deformate modali del corpo di fabbrica oggetto di indagini. L'etichetta nella prima colonna è composta da un numero romano, che indica il numero dell'impalcato, un numero arabo, che indica la verticale di misura e infine la direzione di misura. Nelle colonne invece, per ogni modo identificato, sono riportati i vettori reali.

Tabella 2-23 Frequenze e Modi di Vibrare sperimentalmente identificati

Response	3.9Hz	4.1Hz	4.9Hz
I:1:+X	0.44	0.31	0.45
I:1:+Y	0.25	0.22	0.29
I:2:+X	0.38	0.28	0.40
I:2:+Y	0.25	0.19	0.27
I:3:+X	0.44	0.39	0.39
I:3:+Y	0.29	0.24	0.29
I:4:+X	0.25	0.24	0.27
I:4:+Y	0.24	0.20	0.24
I:5:+X	0.34	0.27	0.27
I:5:+Y	0.24	0.20	0.24
I:6:+X	0.63	0.36	0.45
I:6:+Y	0.88	0.64	0.64

Response	3.9Hz	4.1Hz	4.9Hz
II:1:+X	0.88	0.55	0.91
II:1:+Y	0.75	0.64	1.00
II:2:+X	0.63	0.55	1.00
II:2:+Y	0.63	0.55	0.64
II:3:+X	0.50	0.36	0.73
II:3:+Y	0.63	0.45	0.73
II:4:+X	0.38	0.27	0.45
II:4:+Y	0.50	0.36	0.64
II:5:+X	1.00	1.00	0.45
II:5:+Y	0.50	0.27	0.91
II:6:+X	0.50	0.36	0.36
II:6:+Y	0.38	0.27	0.55

### 2.3.4 Modellazione a macro-elementi discreti

In questa sezione viene descritta la modellazione a macro-elementi discreti adottata a supporto delle prove sperimentali. Come a volte può accadere, il dato sperimentale può essere affetto da particolare incertezza sulle frequenze o sulle forme modali. In questo caso, le condizioni in situ hanno reso incerto il risultato in termini di forme modali rendendolo potenzialmente non del tutto rappresentativo del comportamento dinamico della struttura. In queste situazioni è quindi utile l'uso di un modello numerico di supporto che garantisca la ricostruzione del parametro o dato incerto. Nella fattispecie è stato sviluppato un modello a macroelementi discreti calibrato sulle sole frequenze. Il modello è stato soggetto alla procedura di model updating già descritta al capitolo 2.2.4 ottenendo una struttura dotata di frequenze proprie prossime a quelle identificate. I modi ottenuti numericamente sono stati adottati per la generazione del modello SMAV.

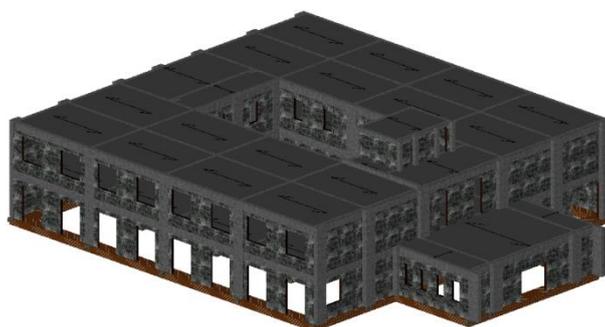


Figura 2-59 MODELLO A ES3 Augusta - Modello 3DMacro - Vista assonometrica modello geometrico con interazione delle tamponature

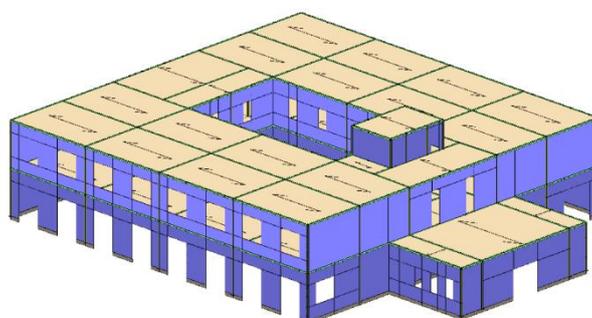


Figura 2-60 MODELLO AES3 Augusta - Modello 3DMacro - Vista assonometrica modello computazionale con interazione delle tamponature

Il modello prevede la modellazione esplicita delle tamponature. Di seguito si riportano i coefficienti correttivi ottenuti dalla procedura di updating, i risultati in termini di frequenze.

La calibrazione è effettuata solo con riferimento alle frequenze. Per questo motivo non vengono riportati valori relativi alle forme modali.

La Tabella 2-24 riporta i parametri elastici della muratura identificati tramite la procedura di updating. Questi assumono valori estremamente ridotti e non fisicamente significativi. Il risultato è determinato dalla ridotta interazione tra le strutture in ca e quelle di tamponamento che nella realtà caratterizza la risposta dinamica di questo edificio.

Tabella 2-24 Parametri elastici identificati - muratura

Parametro	Modulo E	Modulo G
	MPa	MPa
Muratura	76.40	36.16

Tabella 2-25 Parametri elastici identificati - ca

Parametro	Valore del Parametro di base		Valore del Parametro dopo l'updating	
	kN cm <sup>2</sup>		kN cm <sup>2</sup>	
	Elx	Ely	Elx	Ely
PIL_A	9.30E+08	6.15E+09	4.65E+08	3.08E+09
PIL_B	6.15E+09	9.30E+08	3.67E+09	5.55E+08
PIL_C	9.30E+08	6.15E+09	8.82E+08	5.83E+09
PIL_D	9.30E+08	6.15E+09	8.69E+08	5.75E+09
PIL_E	1.82E+09	6.20E+08	9.11E+08	3.10E+08
PIL_F	9.30E+08	6.15E+09	8.67E+08	5.74E+09
PIL_G	6.15E+09	9.30E+08	4.32E+09	6.53E+08
PIL_H	9.30E+08	6.15E+09	6.98E+08	4.61E+09
PIL_I	3.62E+08	3.62E+08	1.81E+08	1.81E+08
PIL_J	1.95E+08	1.95E+08	1.71E+08	1.71E+08
PIL_K	1.95E+08	1.95E+08	1.19E+08	1.19E+08
PIL_L	1.95E+08	1.95E+08	1.11E+08	1.11E+08
PIL_M	1.95E+08	1.95E+08	9.76E+07	9.76E+07
PIL_N	6.20E+08	1.82E+09	3.10E+08	9.11E+08
PIL_O	6.15E+09	9.30E+08	5.95E+09	8.99E+08
PIL_P	9.30E+08	6.15E+09	5.23E+08	3.46E+09

Tabella 2-26 Frequenze

Frequenze di partenza	Frequenze ottenute con model updating	Frequenze sperimentali
[Hz]	[Hz]	[Hz]
5.34	3.99	3.9
5.60	4.07	4.1
6.64	4.83	4.9

Tabella 2-27 Valori della funzione obiettivo

	Prima del model updating	Dopo il model updating
Valore legato alle frequenze	0.6291	0.0583

### 2.3.5 Modello SMAV

Tramite l'applicativo vascoSMAV è stato generato il modello numerico SMAV per la definizione delle curve di fragilità secondo il procedimento brevemente descritto al capitolo 1.2. In questa sezione alcuni aspetti della modellazione vengono riassunti tramite immagini e tabelle. In questo caso, a causa delle incertezze determinatesi sulle misure in situ, sono state processate

le frequenze ottenute da campagna di identificazione dinamica e forme modali ottenute da modellazione tramite macroelementi. Il modello a macroelementi è stato calibrato in base alle frequenze sperimentalmente identificate.

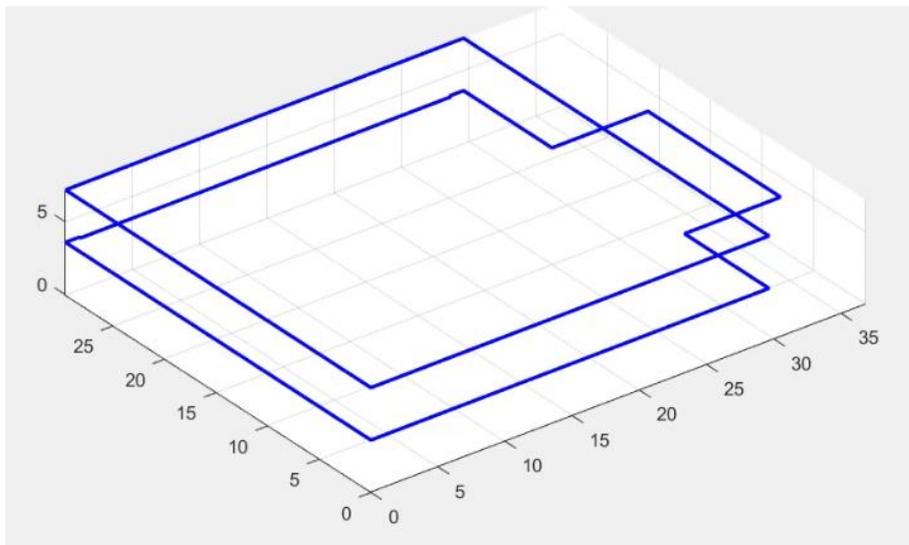


Figura 2-61 Rappresentazione semplificata della geometria della struttura.



Figura 2-62 Parametri modello SMAV

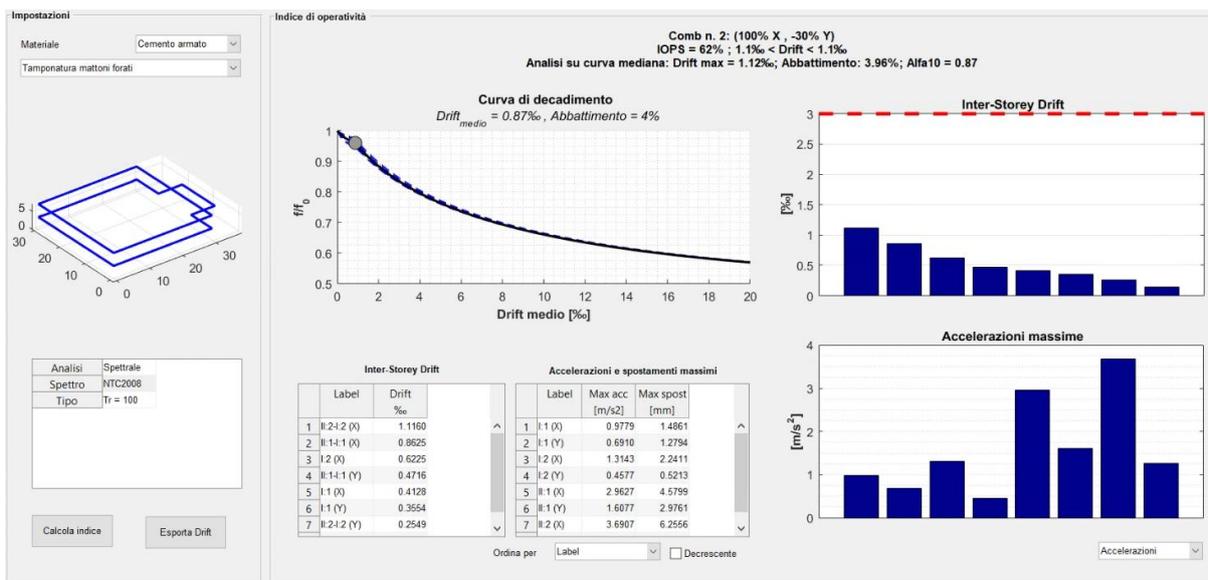


Figura 2-63 Scheda riassuntiva dei risultati SMAV

### 2.3.6 Curve di fragilità

Tramite la procedura descritta al capitolo 1.2, sono state determinate le curve di fragilità riportate in questa sezione. In questa sede, come mostrano i diagrammi successivi, sono stati analizzati due set di spettri di progetto. I due set, costruiti rispettivamente da accelerogrammi sintetici e naturali mostrano, in termini di curva di fragilità, una stabilità del risultato. Quest'ultimo è debolmente influenzato dalla scelta del set di spettri sebbene gli spettri artificiali appaiano determinare una maggiore richiesta di spostamento per la struttura. Questo può determinare una lieve sovrastima della probabilità di danneggiamento come mostra la curva rossa nella Figura 2-64. La curva adotta come parametro di intensità di misura il valore ASI nell'intervallo 0.1-0.5 secondi.

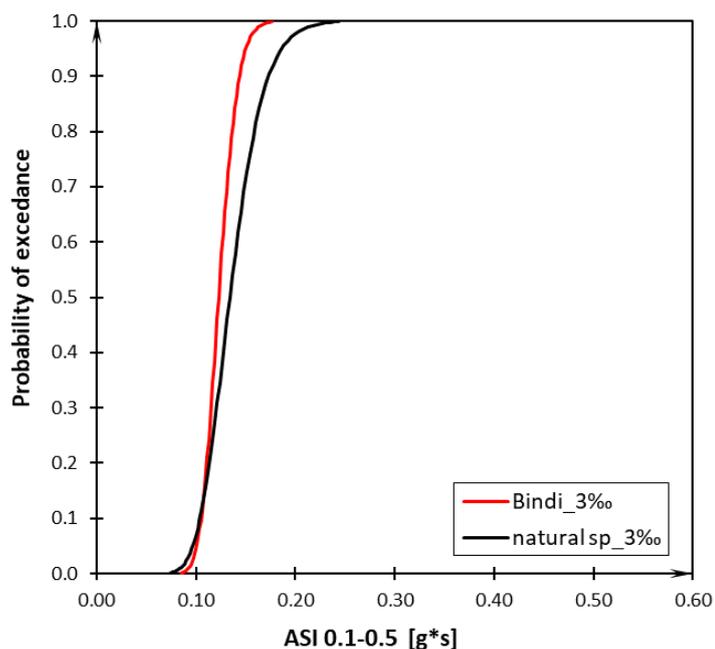


Figura 2-64 Risultati finali