



Soluzioni per la valutazione statica e sismica del patrimonio storico

Le Procuratie Vecchie di Venezia

Hilti Seismic Academy | Bologna | 10 ottobre 2019

Luca Buzzoni | Giammichele Melis





Contenuto

- Il contesto, l'edificio, la storia, l'uso
- Il progetto, l'apertura dell'edificio al pubblico per la prima volta in 500 anni
- La riqualificazione
- Le esigenze strutturali e i vincoli
- L'approccio, le indagini, le soluzioni tecniche
- Le soluzioni analitiche, le calibrazioni, i risultati
- Le conclusioni

Piazza San Marco

- Procuratie Vecchie
- Basilica di San Marco
- Ala Napoleonica
(Museo Correr)
- Procuratie Nuove
- Biblioteca Marciana
- Palazzo Ducale



Procuratie Vecchie

L'impianto gotico



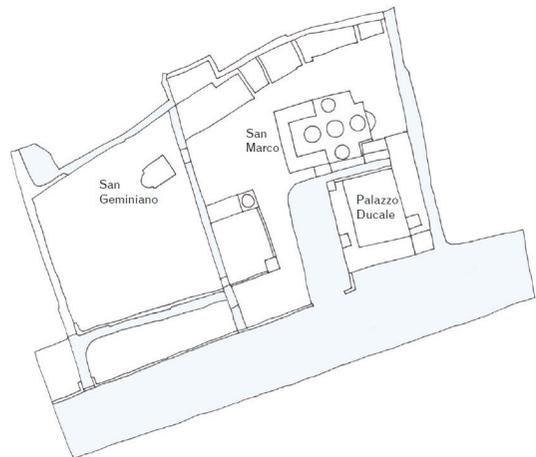
Processione in Piazza San Marco, Gentile Bellini, 1496
(fonte: Gallerie dell'Accademia, Venezia)

Procuratie Vecchie

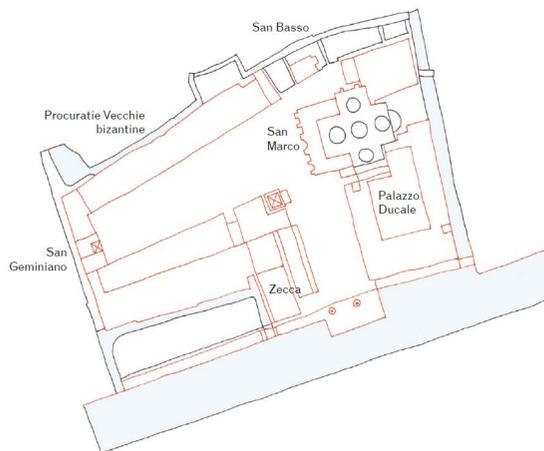
L'impianto rinascimentale



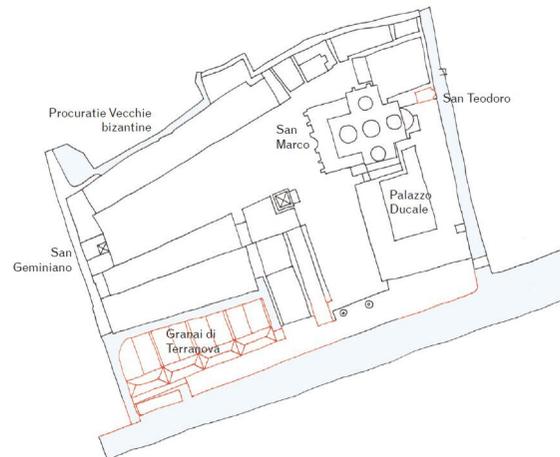
Giovanni Antonio Canal detto Canaletto, 1723 circa
Piazza San Marco verso la Basilica
(fonte: Museo Thyssen-Bornemisza, Madrid)



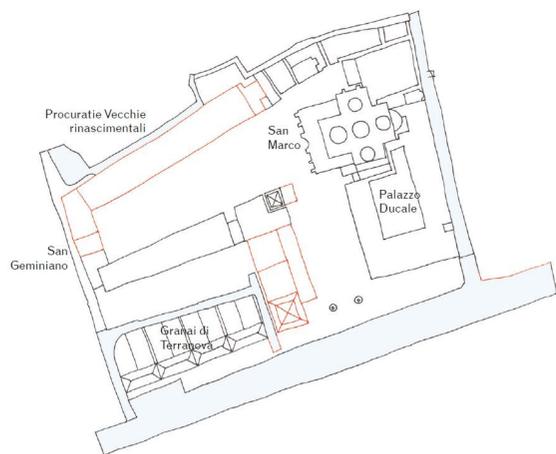
XI secolo



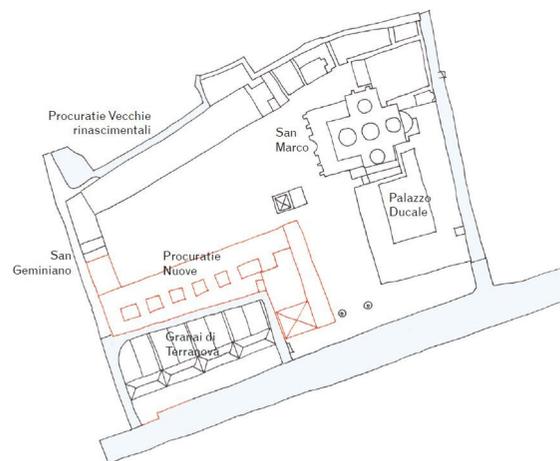
XIII secolo



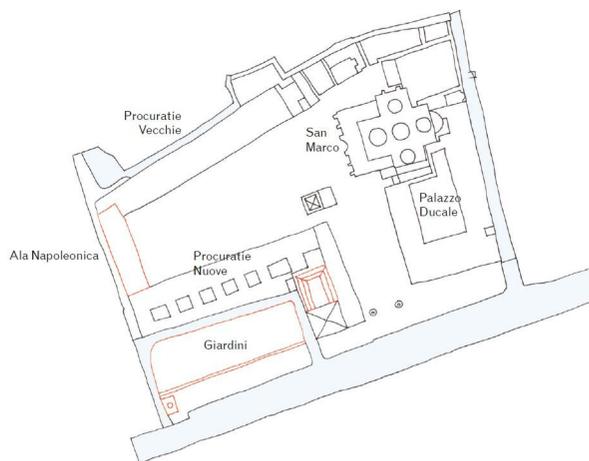
XV secolo



XVI secolo



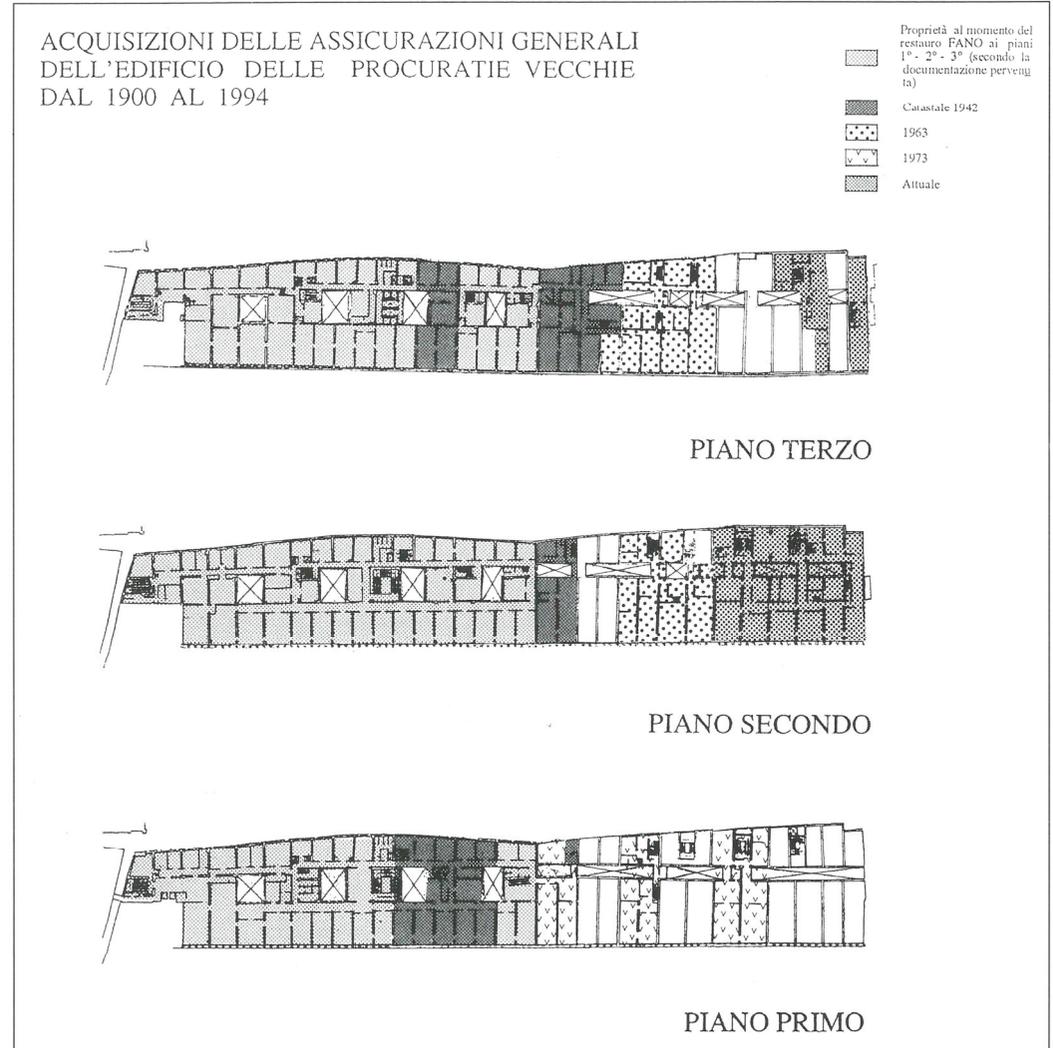
XVII secolo



XIX secolo

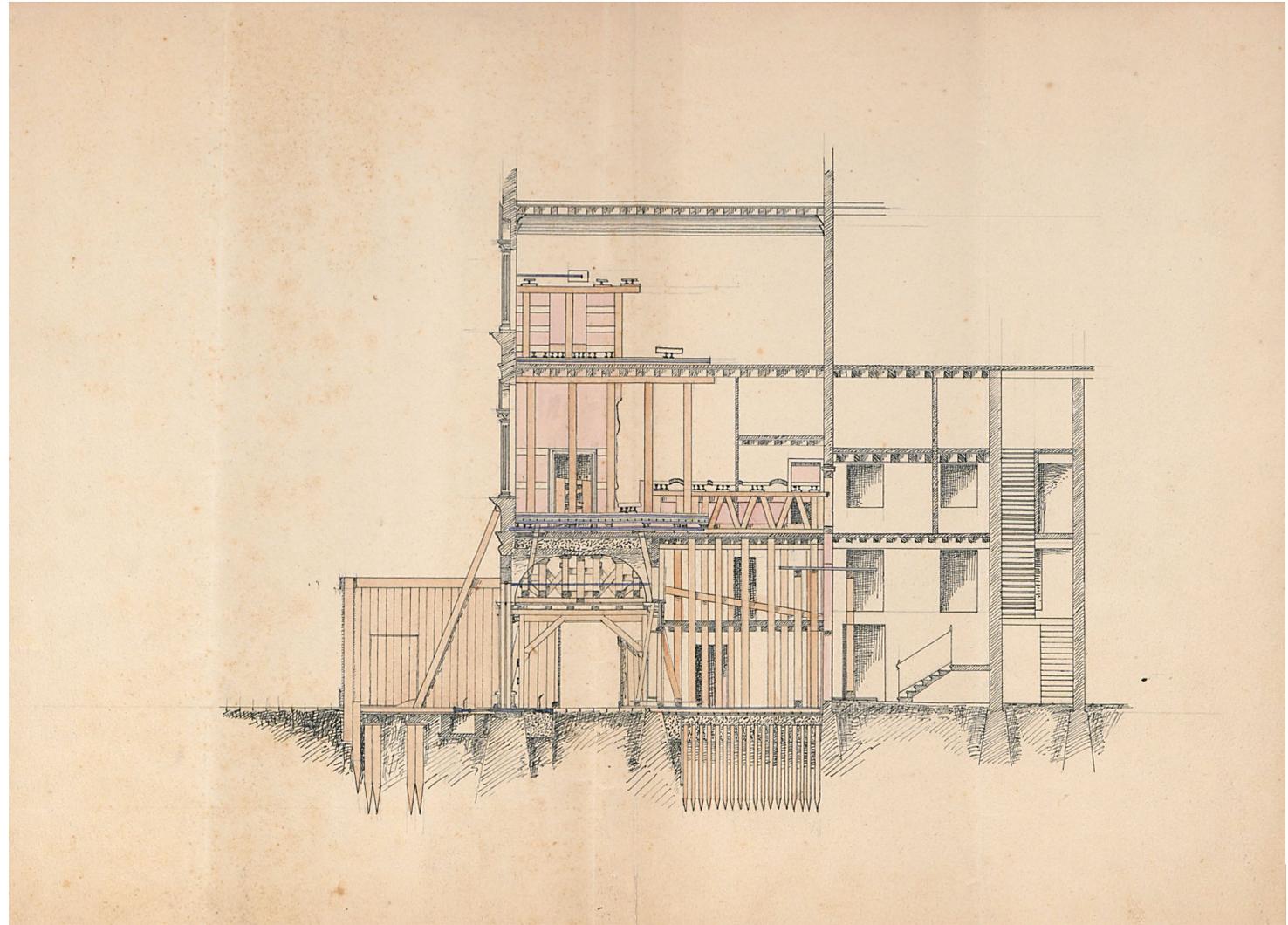
Procuratie Vecchie

Assicurazioni Generali
e le acquisizioni otto-novecentesche



Procuratie Vecchie

Il consolidamento novecentesco



Procuratie Vecchie, Consolidamenti, Venezia, 1960 ca.
(fonte: Archivio Generali)



Procuratie Vecchie

Gli interventi commerciali di pregio

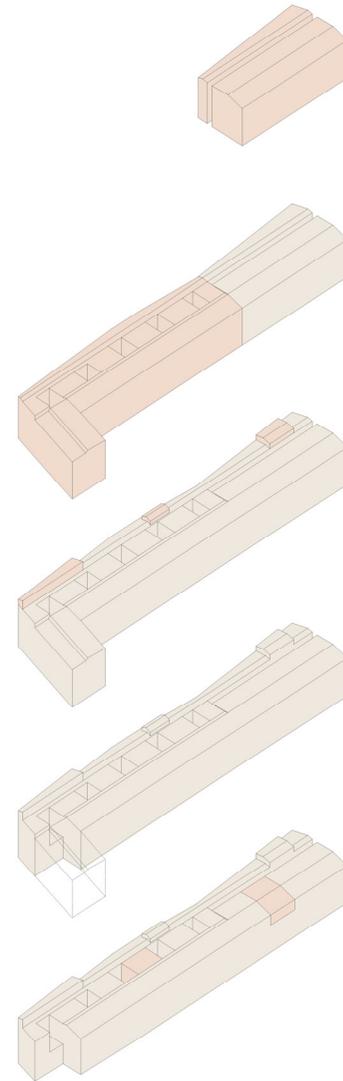


Carlo Scarpa, 1958
Procuratie Vecchie, Negozio Olivetti, Venezia
(fonte: Archivio Generali)



Riepilogo storico

XI-XII secolo	Realizzazione delle Procuratie Bizantine di impianto medievale
1519-1529	Ricostruzione rinascimentale delle Procuratie Vecchie, su direzione di Bartolomeo Bon, dalla Torre dell'Orologio al Sottoportico dei Dai
1530-1560	Completamento della ricostruzione rinascimentale ad opera di Jacopo Sansovino, dal Sottoportico dei Dai al Ramo del Salvadego
1650	Inizio della cessione ai privati
XVII-XVIII secolo	Modifiche estese ad opera dei singoli proprietari
1832	Inizio dell'acquisizione di Assicurazioni Generali e degli interventi di trasformazione dall'uso residenziale a terziario
1844	Inizio dei consolidamenti
1902	Crollo del campanile di San Marco
1909-1950	Interventi di trasformazione e consolidamento da parte di Assicurazioni Generali su progetto di Fano e Repossi
2009-oggi	Inizio degli interventi contemporanei





Proprietà e sviluppo



Utente finale e curatore spazi espositivi
(Gruppo Generali)

David
Chipperfield
Architects

Progettista architettonico e degli allestimenti espositivi

ARUP

Progettista strutture, geotecnica, impianti e acustica



Project manager e direzione lavori



Impresa esecutrice
(Gruppo Rizzani de Eccher)

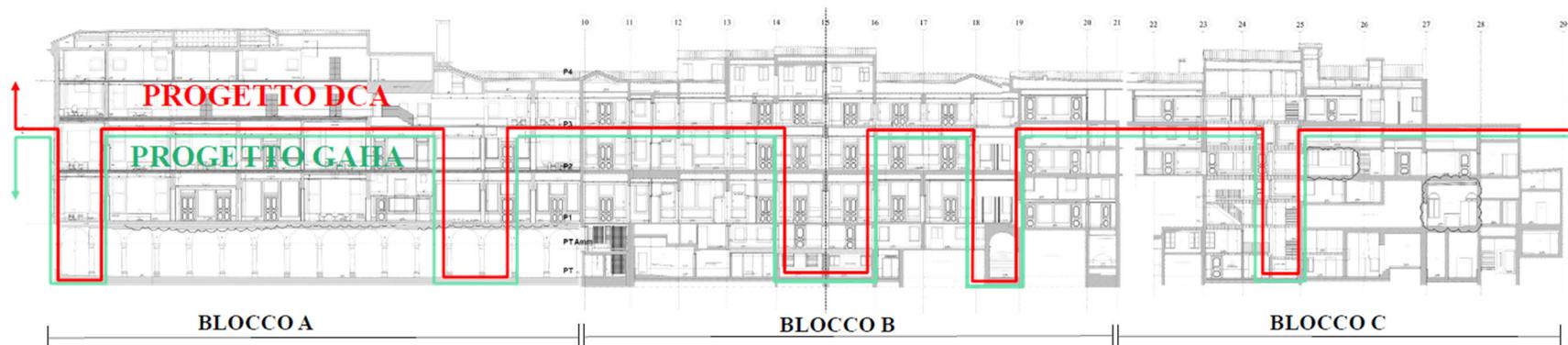
Progettazione impiantistica e strategie energetico-ambientali

Approccio all'edificio storico vincolato

Principali problematiche:

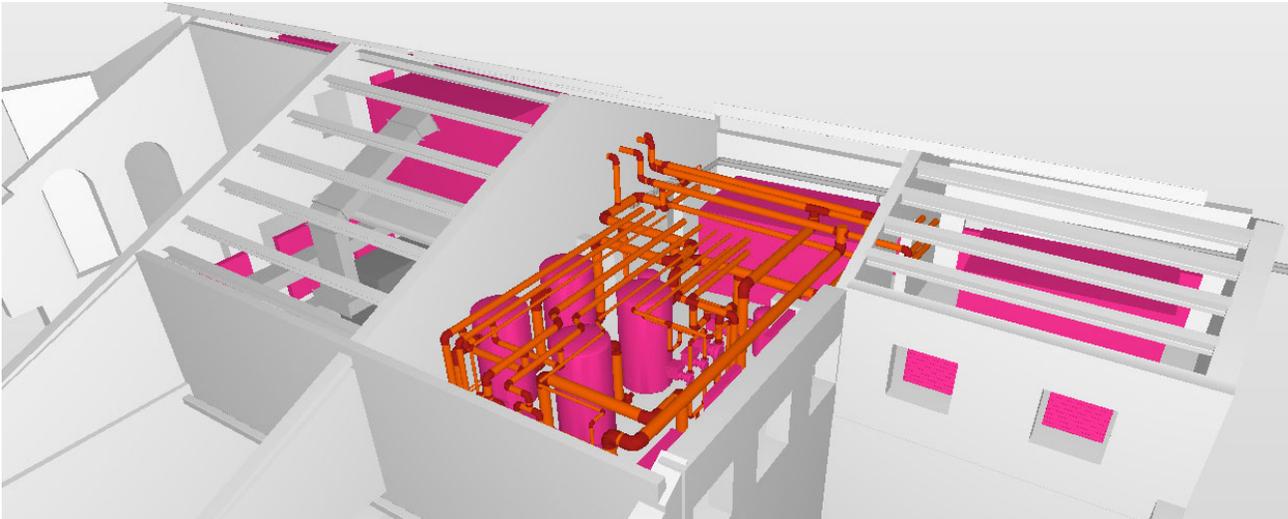
- Incertezza sulle prestazioni dell'involucro edilizio dal punto di vista termico e tenuta all'aria
- Conservazione elementi strutturali esistenti e coordinamento con nuove distribuzioni impianti
- Necessità di garantire prestazioni da spazi pubblici in spazi storici con criticità di spessori/altezze
- Forti vincoli sovrintendenza

Ottimizzazione della strategia energetico-ambientale partendo dal progetto esecutivo già in cantiere, concentrandosi su 3° e 4° piano, includendo i collegamenti verticali di nuova costruzione e la riorganizzazione degli spazi in copertura.

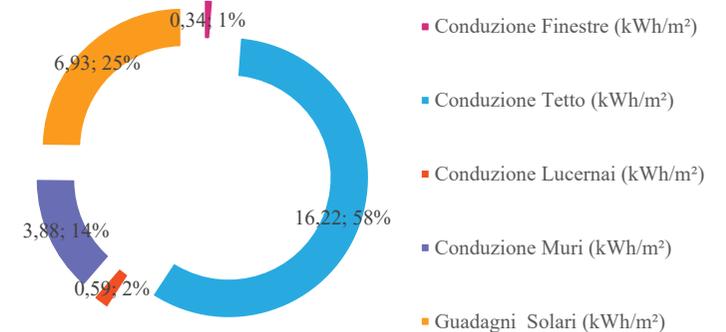


Approccio all'edificio storico vincolato

- Centrali impianti in locali interni e aperti, non in copertura
- Restituzione alla funzione pubblica e valorizzazione degli spazi precedentemente occupati dagli impianti
- Perfetta integrazione tra gli elementi di impianto, anche a vista, con il concept architettonico
- Mantenimento del manufatto storico a vista e valorizzazione dello stesso
- Analisi energetica per individuare numericamente le criticità del progetto

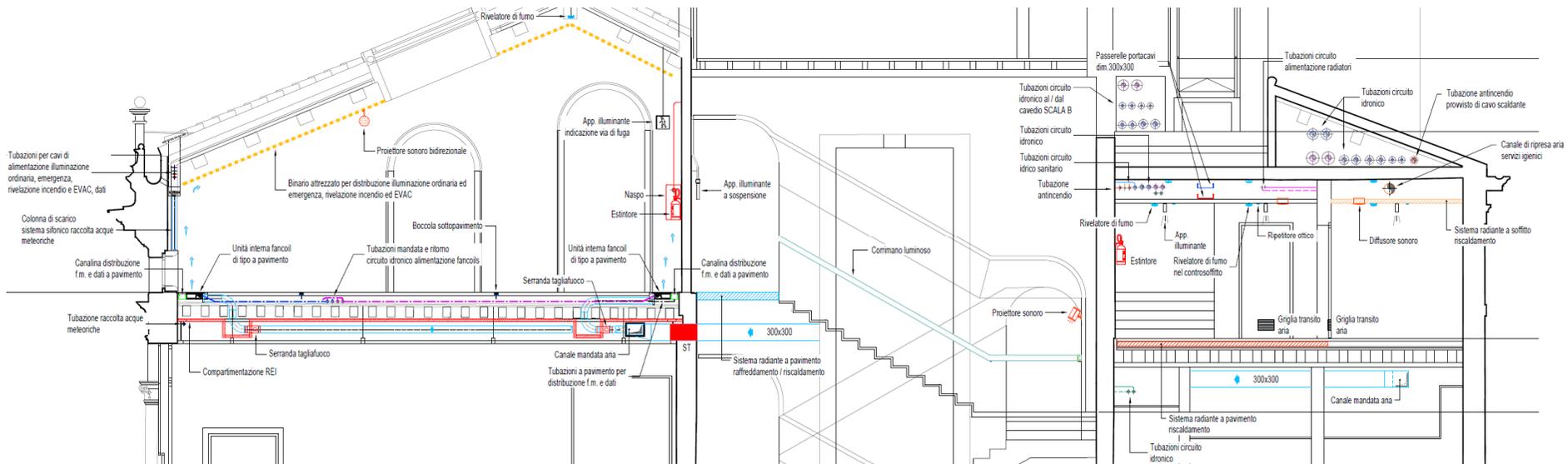


Stato di Fatto – Luglio
Flussi energia Involucro [kWh/m²]



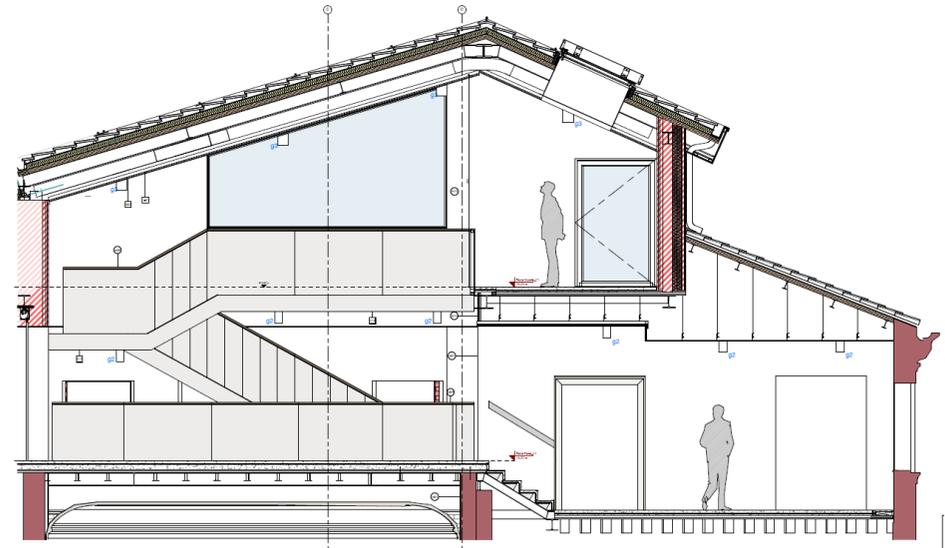
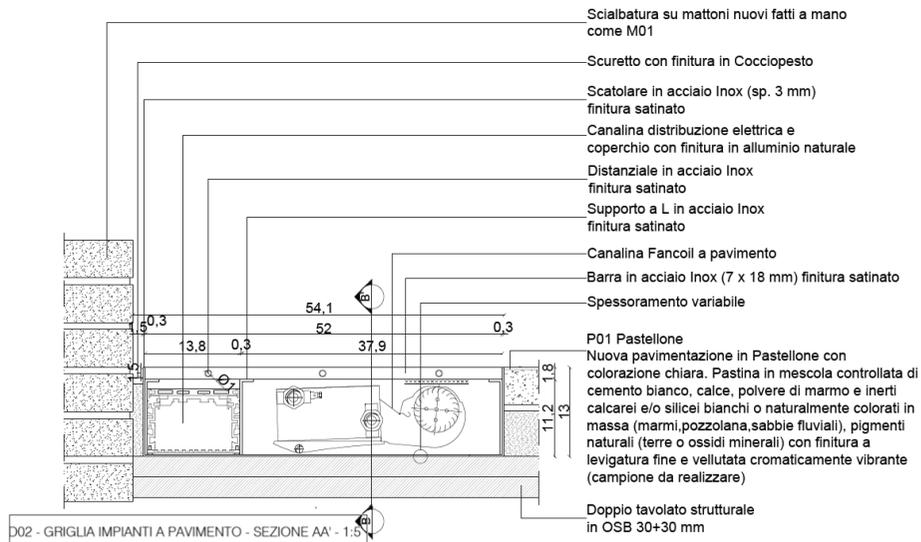
Comfort e fruibilità degli spazi

- Scelta di pompe di calore per produzione di acqua calda/refrigerata e fancoil 4 tubi ad incasso nel pavimento, per garantire massimo comfort e controllo negli spazi della fondazione THSN
- Mandata aria di rinnovo da pavimento, distribuzione aria nel controsoffitto del piano inferiore
- Isolamento copertura, dove possibile, per garantire comfort riducendo consumi energetici



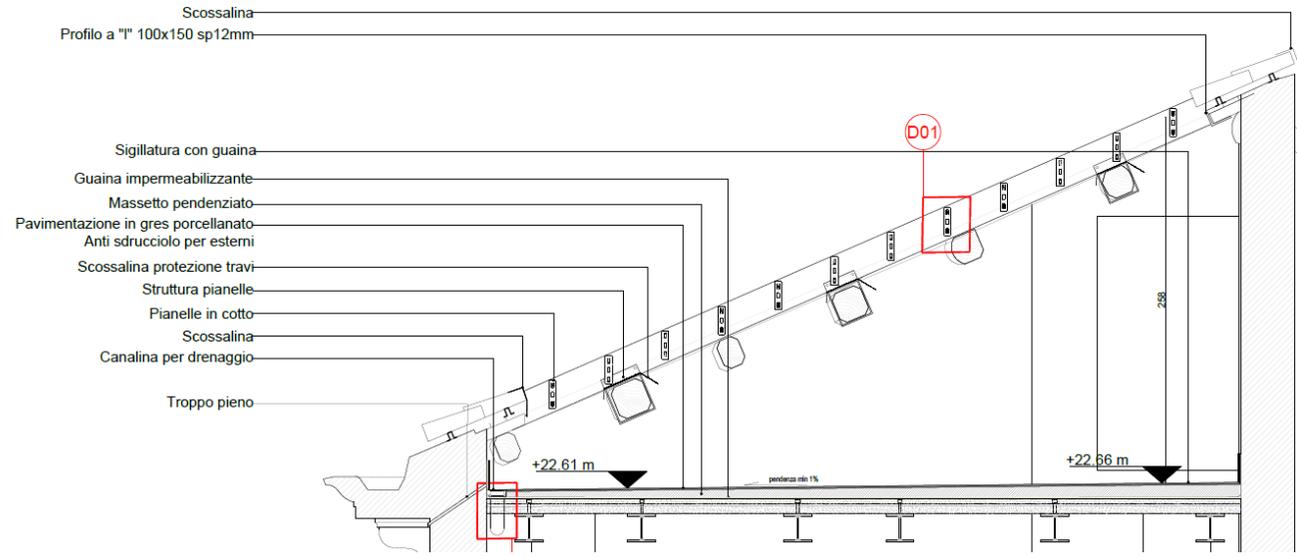
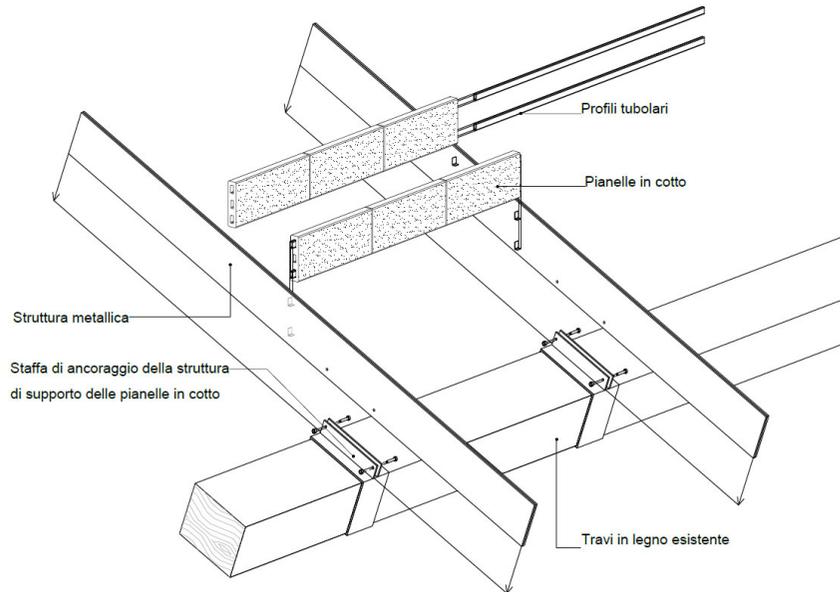
Soluzioni innovative

- Studio della ventilazione per poter installare in ambienti interni alcune tipologie di impianto prettamente da esterno
- Proposta di soluzioni di attenuazione del rumore su misura, in ragione della ventilazione richiesta nelle centrali
- Distribuzione impiantistica compattata lungo due lati delle stanze, con innovativo sistema customizzato per integrare la climatizzazione, la ventilazione e la distribuzione impianti elettrici e speciali
- Tutto il resto della distribuzione rimane a vista, ma con un impatto visivo minimo

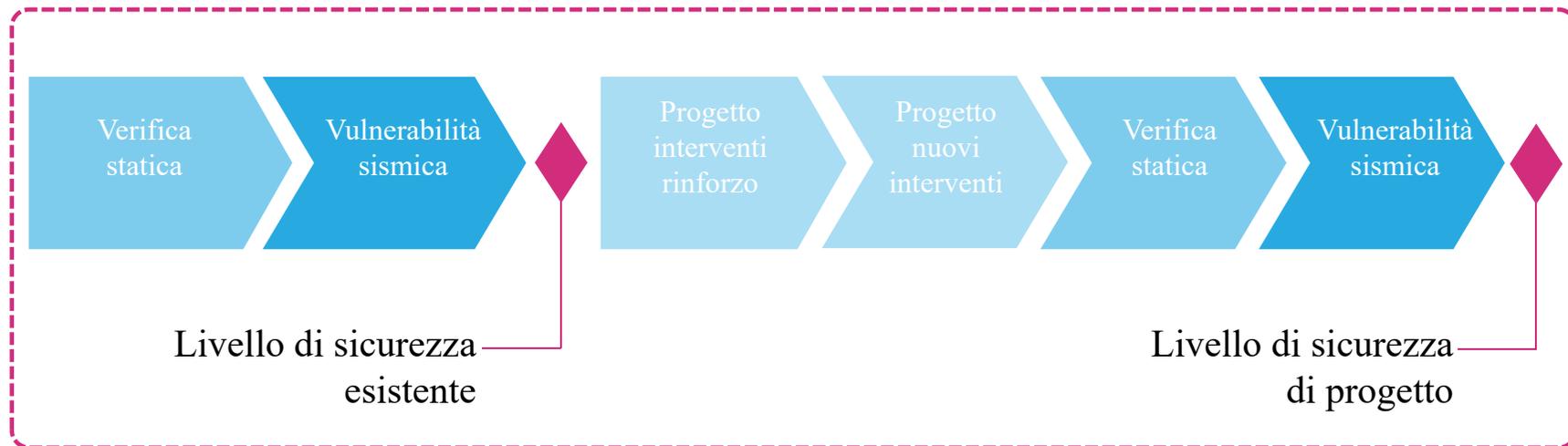


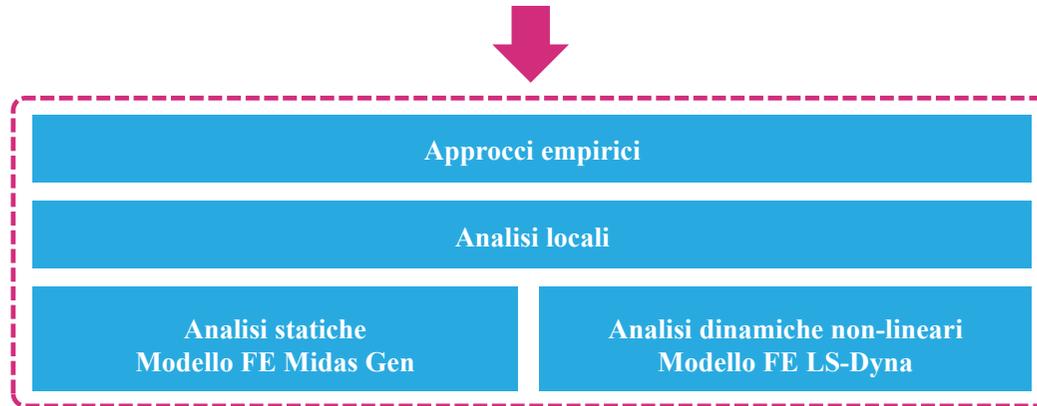
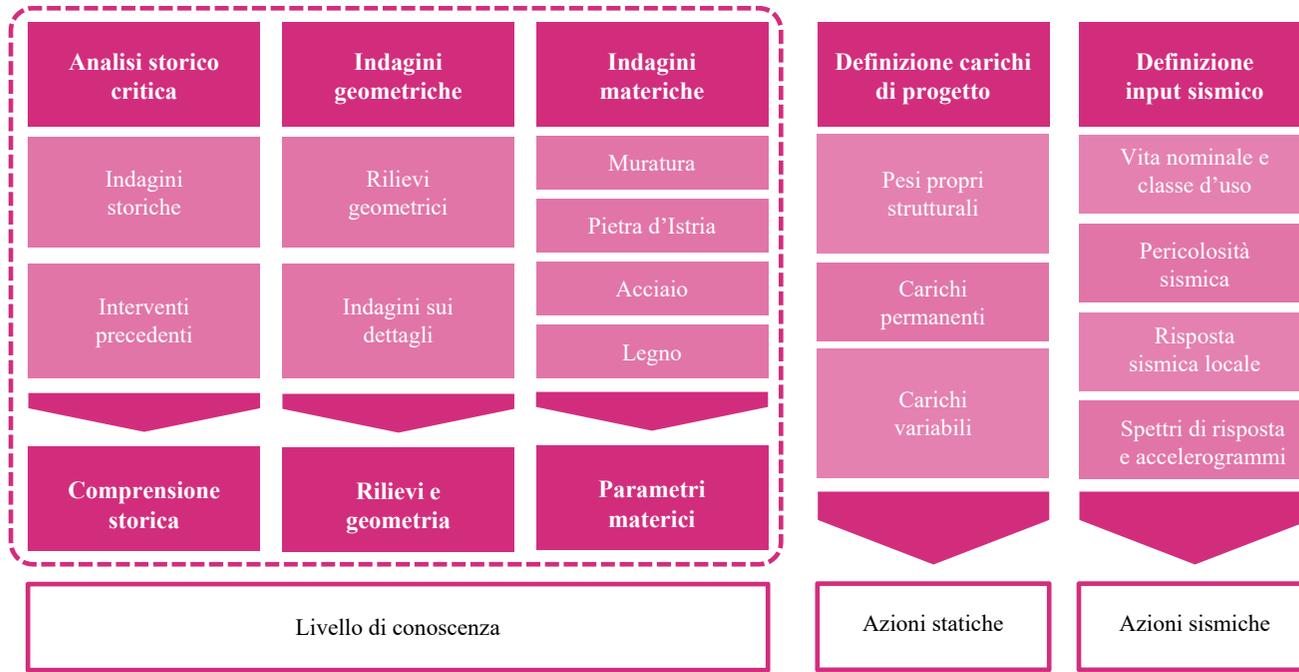
Efficienza energetica e acustica

- Produzione di acqua calda mediante recupero di energia con macchine polivalenti, in funzione dei profili di carico delle macchine e delle destinazioni d'uso
- Fancoil performanti, dimensionamento a velocità molto basse per ridurre il rumore generato
- Utilizzo di soluzioni studiate su misura per abbattimento del rumore generato da impianti



Progettazione strutturale e vulnerabilità sismica

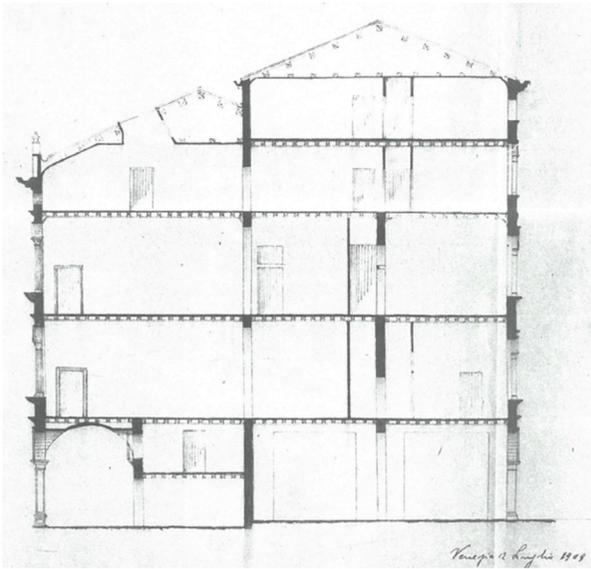




Fase conoscitiva
Indagini geometriche

Descrizione dell'edificio

- Periodo di costruzione: 1519-1560
- Superficie: 15.000m² circa
- Piani: 4-5
- Lunghezza: 150m circa
- Profondità: 13-25m circa

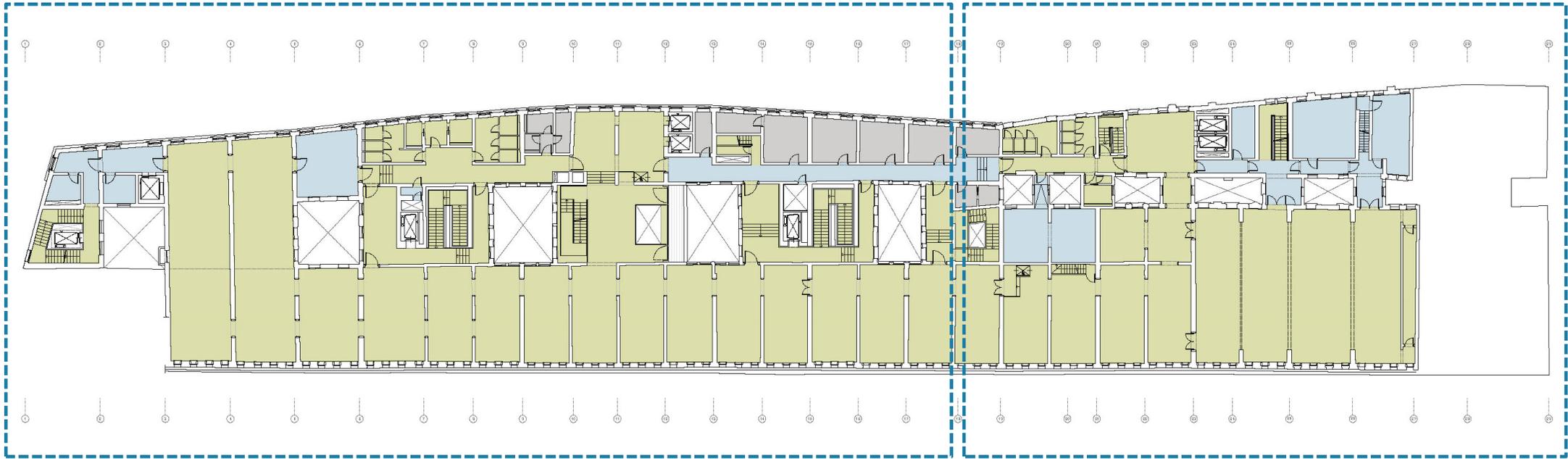


Procuratie Vecchie, sezione tipica



Procuratie Vecchie, vista aerea

Descrizione dell'edificio



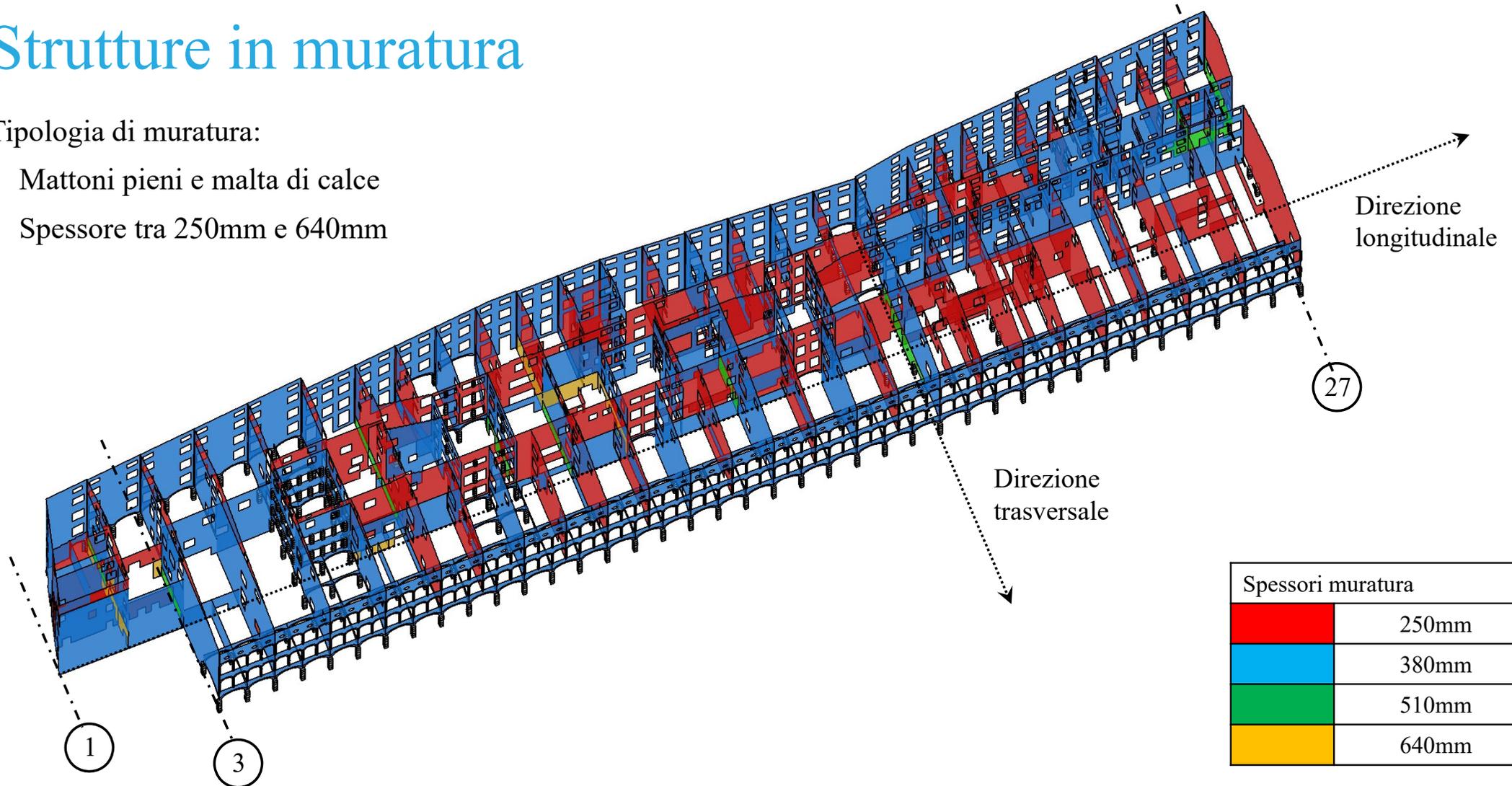
Intervento di Jacopo Sansovino
(1530-1560)

Intervento di Bartolomeo Bon
(1519-1529)

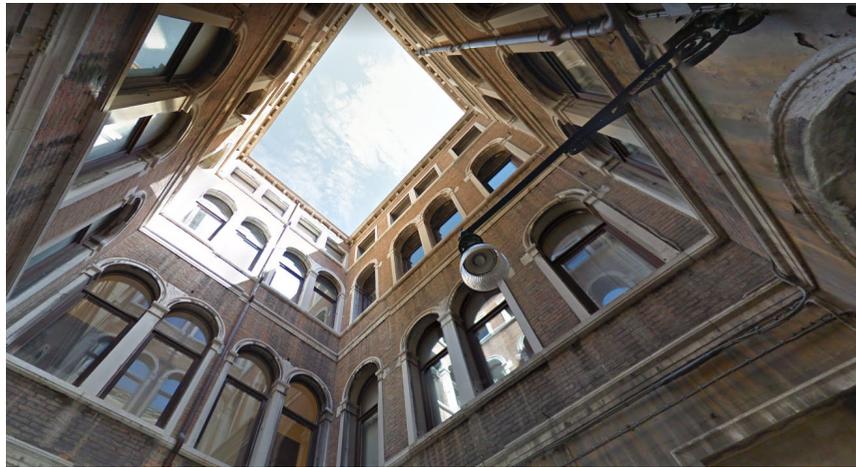
Strutture in muratura

Tipologia di muratura:

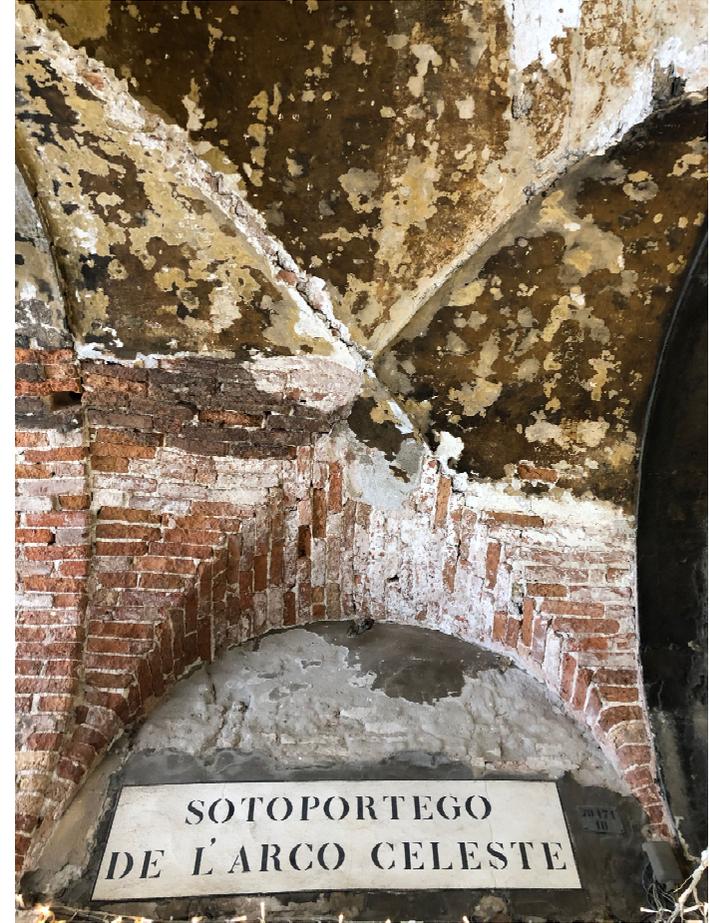
- Mattoni pieni e malta di calce
- Spessore tra 250mm e 640mm



Gli esterni



Gli esterni | Lo stato di conservazione



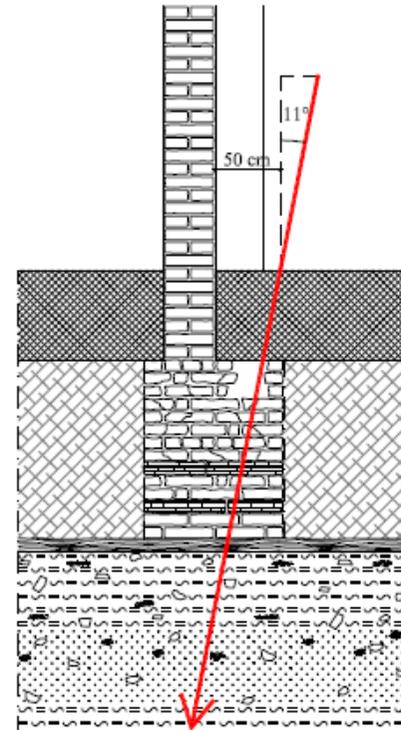
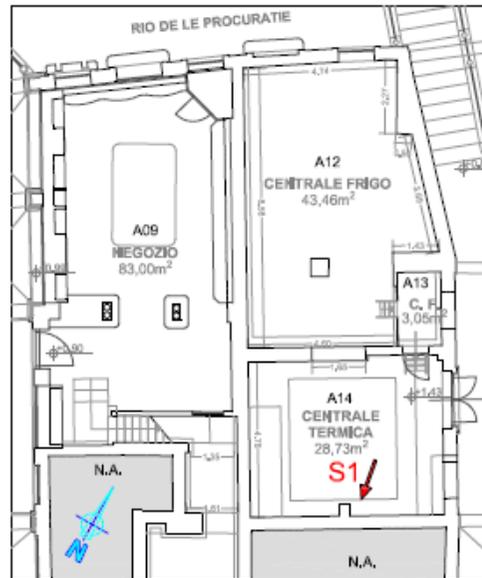
Gli interni



Le fondazioni

Fondazioni in muratura su tavolati in legno:

- Non sono presenti pali al di sotto della fondazione
- Le strutture risultano impostate su un tavolato ligneo (fondazioni “a zattera”)
- Larghezza tra 1.0m e 1.5m
- Profondità tra 1.2m e 1.5m



Fase conoscitiva
Indagini materiche

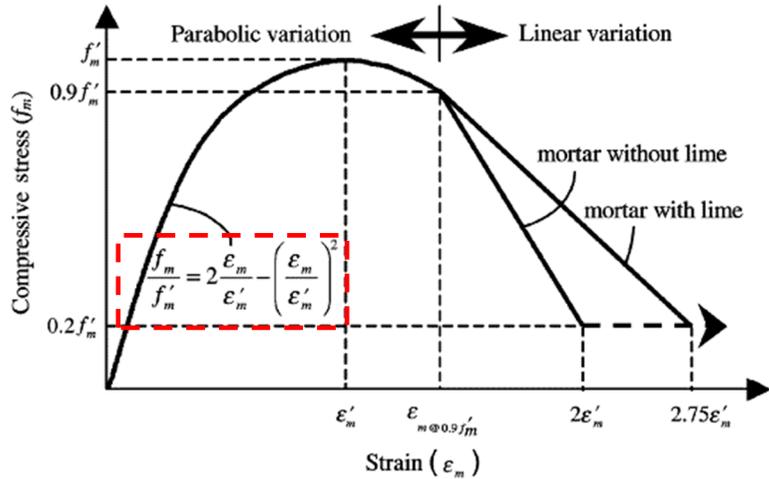
Prove sui materiali: muratura

Le proprietà meccaniche della muratura sono state ricavate attraverso due tipi di prove:

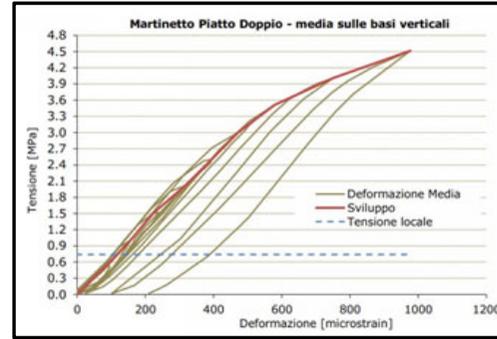
Prova #1	Parametri ricavati
Flat jack test (martinetti piatti singoli e doppi)	Resistenza a compressione: $\sigma_{c,m}$
	Modulo elastico: E_m
Prova #2	Parametri ricavati
Shove test (prove di taglio)	Coesione: f_{vm0}
	Angolo di attrito: μ

Muratura per analisi non lineare

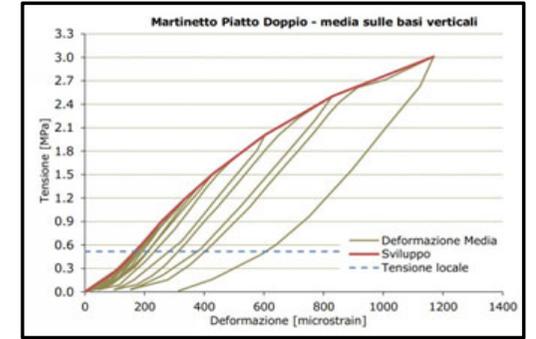
La curva sforzi-deformazioni in compressione è stata calibrata con il seguente modello (*H.B. Kaushik et al., Journal of materials in civil engineering, September 2007*)



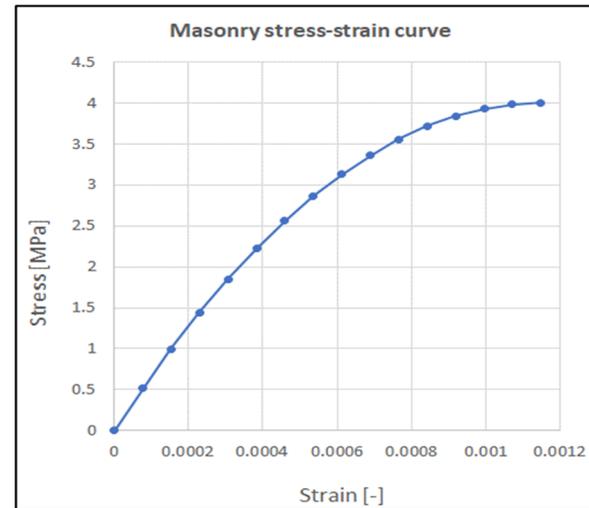
I risultati dei test con martinetti piatti doppi (deformazione e tensione al picco) sono stati utilizzati all'interno della formulazione analitica proposta.



Flat jack test n.5



Flat jack test n.10



Stress strain curve ascending branch used in LS-dyna

Fase conoscitiva

Determinazione della pericolosità sismica

Domanda sismica: dati iniziali

Normativa: NTC 2008

Dati edificio:

- Vita nominale $V_N = 50$ anni
- Classe d'uso III $C_u = 1.5$
- Periodo di riferimento ($V_N \times C_u$) $V_R = 75$ anni

Tempo di ritorno per lo stato limite SLV

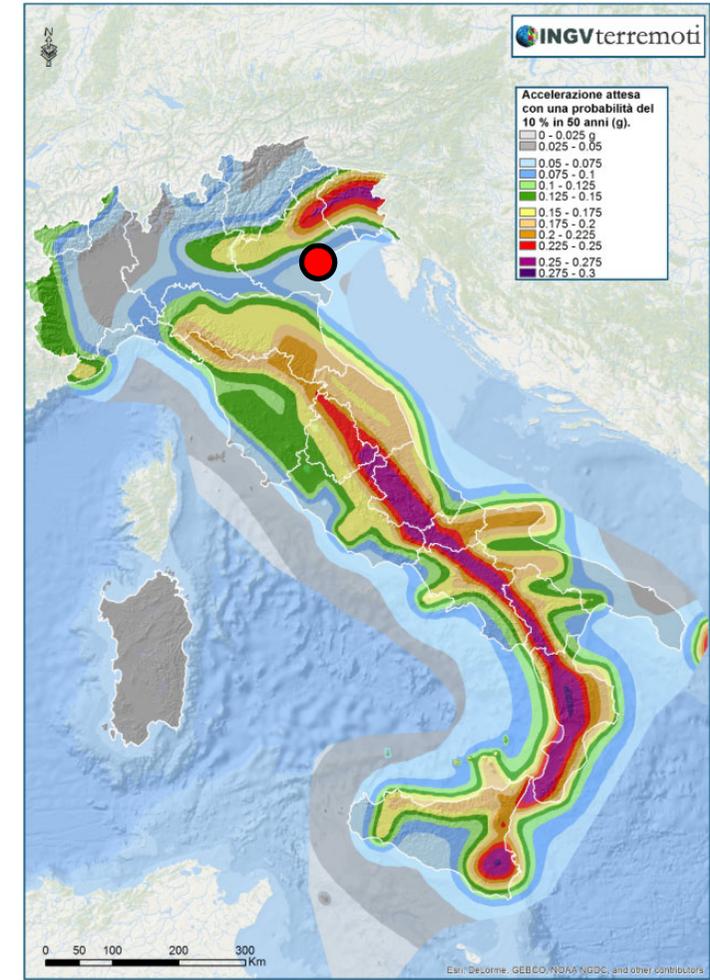
SLV (salvaguardia della vita)	$P_{VR} = 10\%$	$T_R = 712$ anni
-------------------------------	-----------------	------------------

Parametri spettrali

PGA di riferimento su suolo A	$a_g = 0.08g$
-------------------------------	---------------

Massimo fattore di amplificazione	$F_0 = 2.65g$
-----------------------------------	---------------

Inizio del tratto a velocità costante	$T_c^* = 0.38$
---------------------------------------	----------------



Mapa di pericolosità sismica (fonte: INGV)

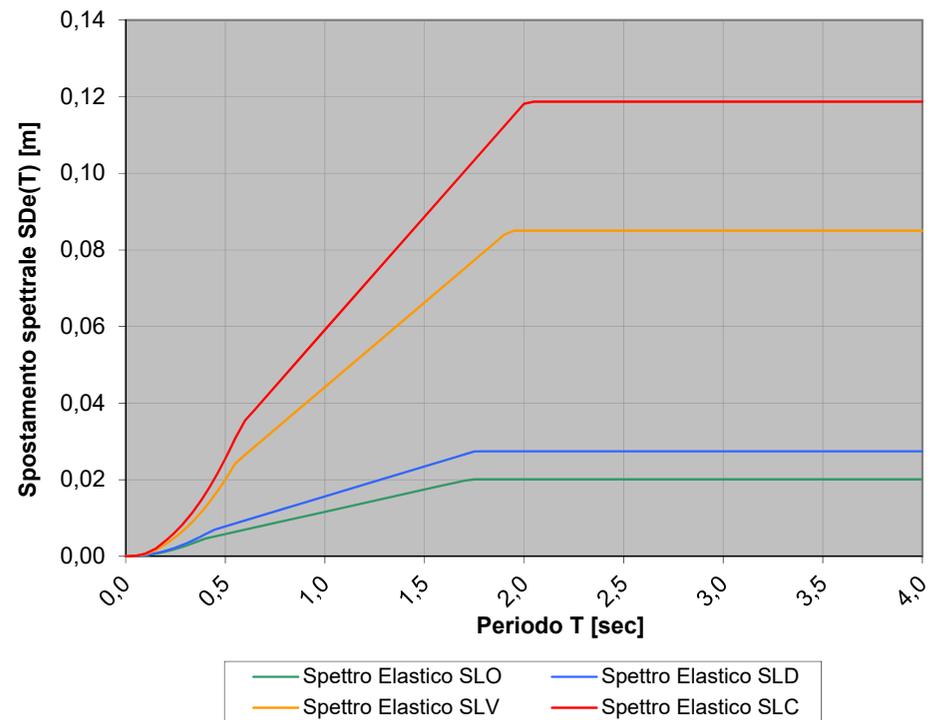
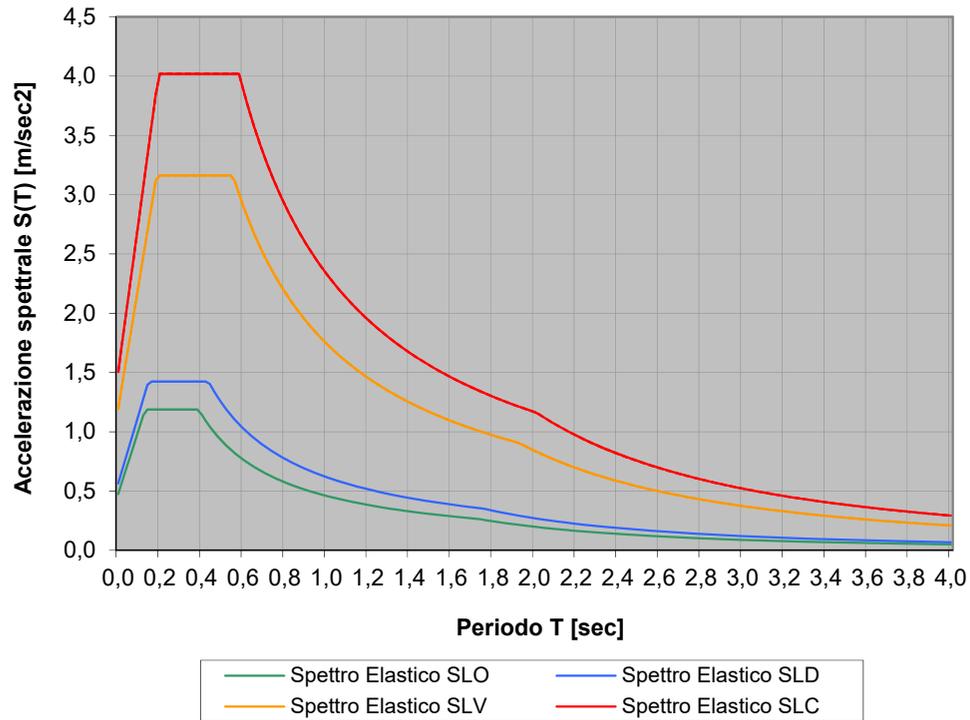
Domanda sismica: spettri di risposta

Dalle indagini geognostiche:

Tipo di suolo: C



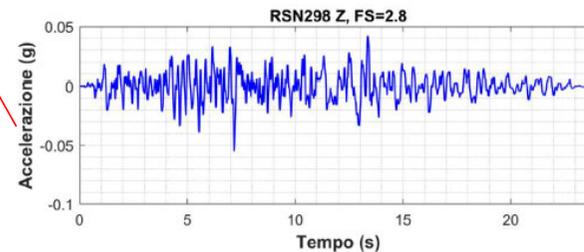
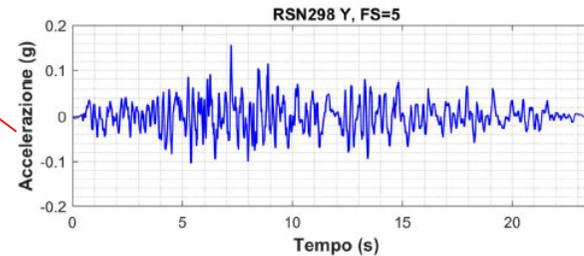
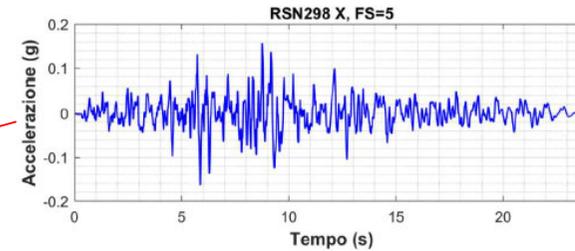
Fattore di amplificazione $S = 1.5$



Domanda sismica: selezione dei segnali accelerometrici

La selezione delle storie temporali è stata svolta seguendo le indicazioni delle NTC 2008:

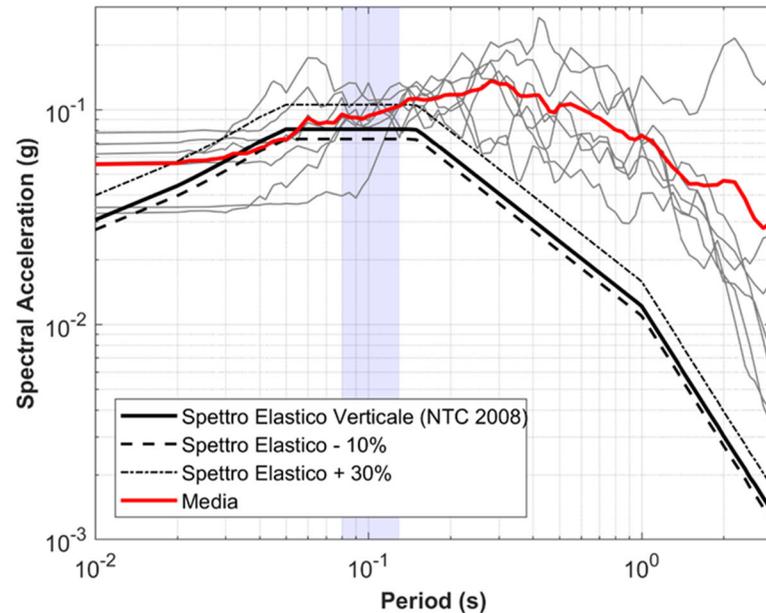
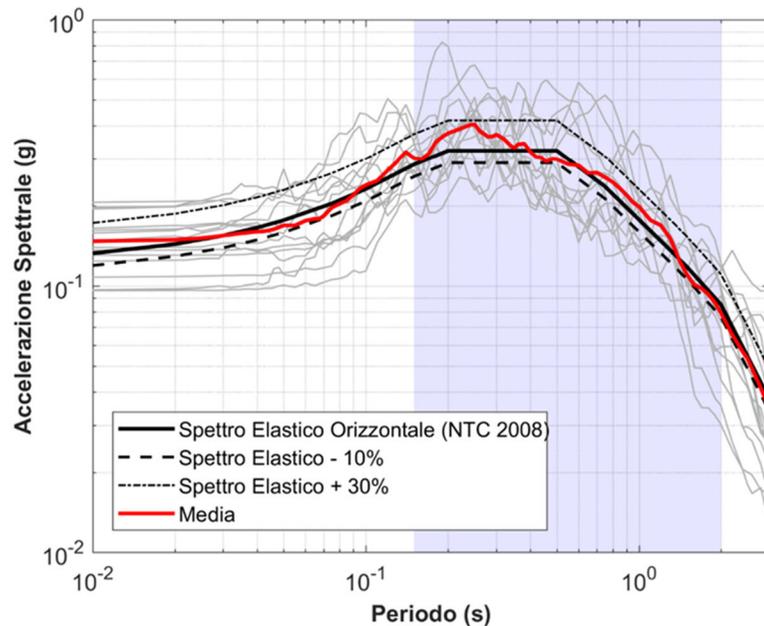
Earthquake Name	Stazione	Anno	M _w	R (km)	D _{5-95%} (s)	V _{s30} (m/s)	FS Orizz.	FS Vert.
Dinar (Turchia)	Burdur	1995	6.4	37	16.9	468	2.7	1
Friuli (Italia)	Codroipo	1976	5.9	41	23.8	249	5	4.8
Irpinia (Italia)	Bovino	1980	6.2	44	15.7	356	5	2.8
Umbria-Marche (Italia)	Gubbio-Piana	1997	5.5	36	20.8	492	2.2	1.3
L'Aquila (Italia)	Ortucchio	2009	6.3	37	13.7	388	3	2.5
Lazio-Abruzzo (Italia)	Garigliano-Centrale	1984	5.8	49	13.1	266	2.25	4.2
Christchurch (Nuova Zelanda)	CSTC	2011	6.2	36	12.9	333	2.5	1.2



Domanda sismica: selezione dei segnali accelerometrici

La selezione delle storie temporali è stata svolta seguendo le indicazioni delle NTC 2008:

- Un minimo di 3 accelerogrammi può essere usato per analizzare la risposta della struttura;
- I segnali utilizzati risultano spettro-compatibili con lo spettro di progetto e lo spettro medio calcolato dai segnali non è mai inferiore al 90% di quello di progetto nell'intervallo dei periodi propri dell'edificio.



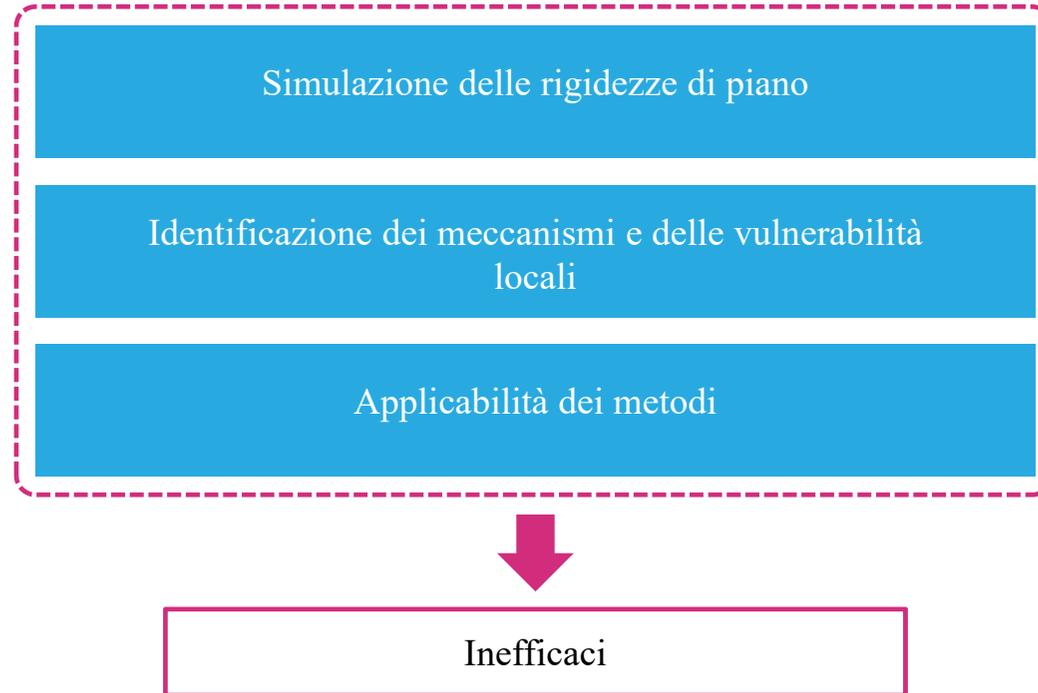
Fase analitica

Le simulazioni numeriche lineari e non lineari

Fase analitica

Limiti e possibilità degli strumenti disponibili:

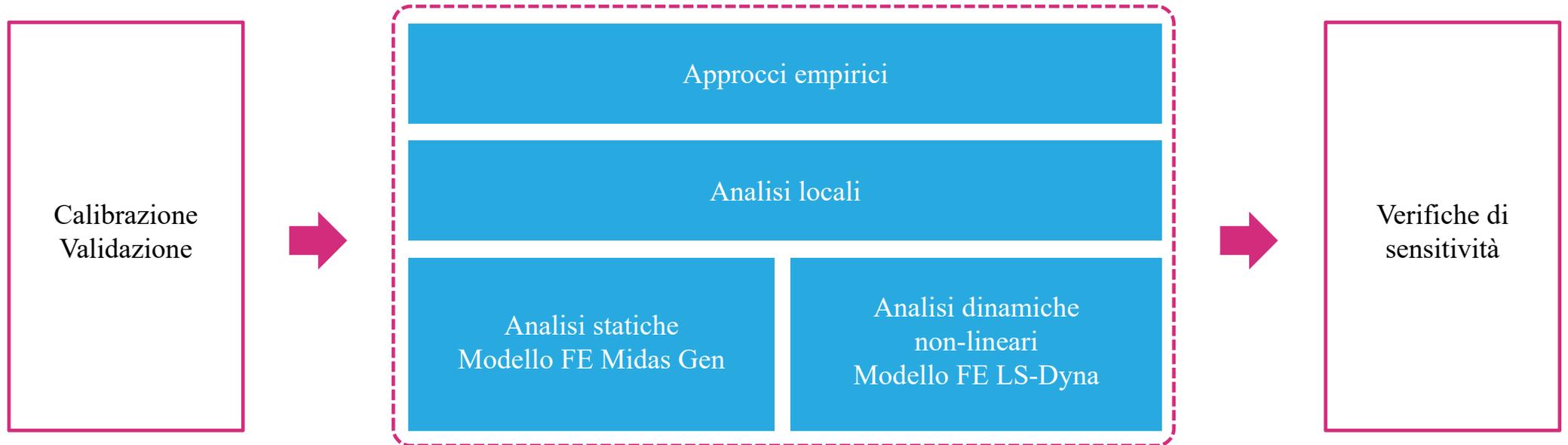
- Valutazione del quadro fessurativo esistente (verifica statica)
- Analisi lineari statiche e dinamiche
- Analisi statiche non-lineari



Fase analitica

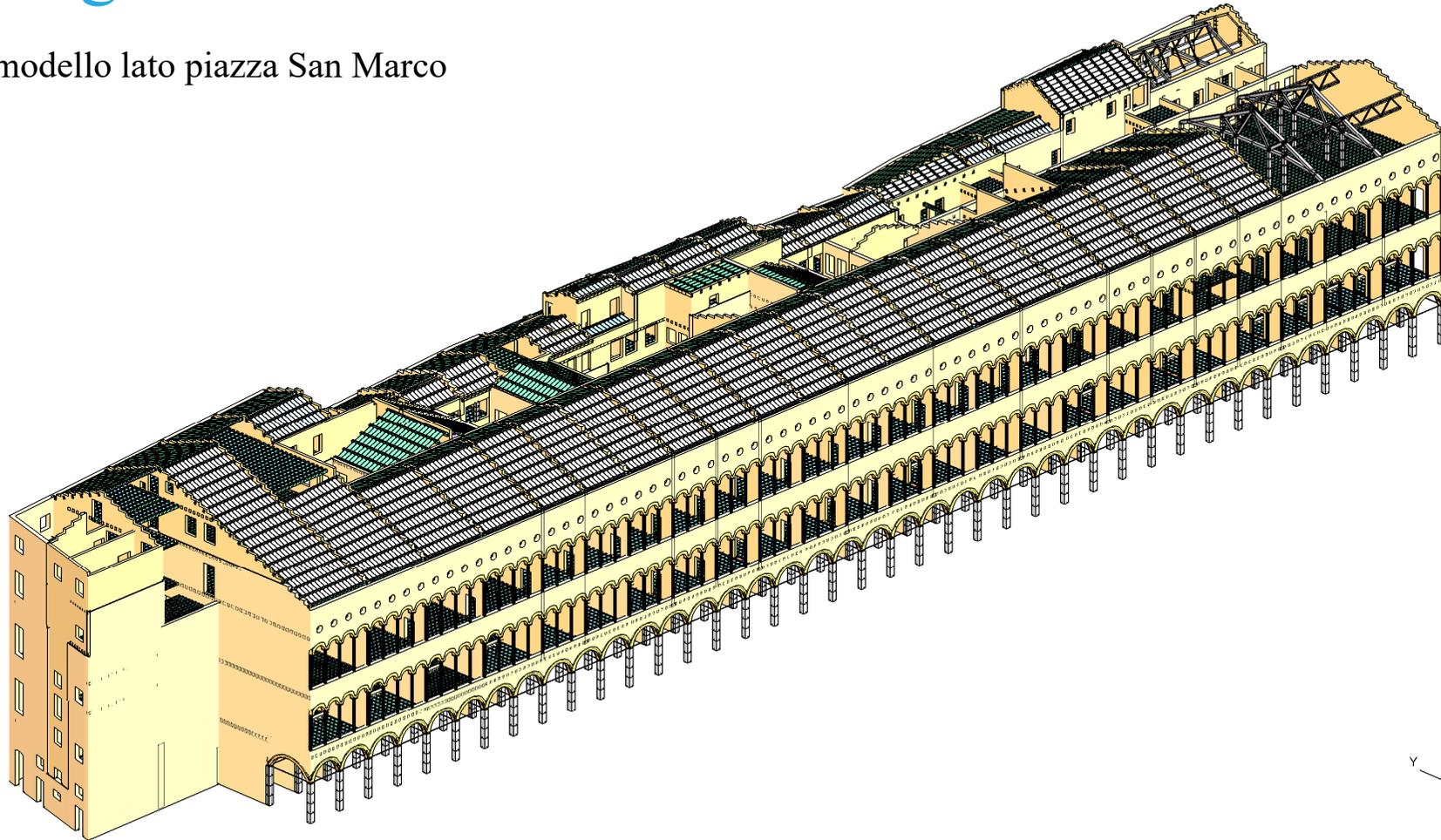
Limiti e possibilità degli strumenti disponibili:

- Analisi limite dei meccanismi di collasso locale (lineari e non-lineari)
- Analisi dinamiche non-lineari globali



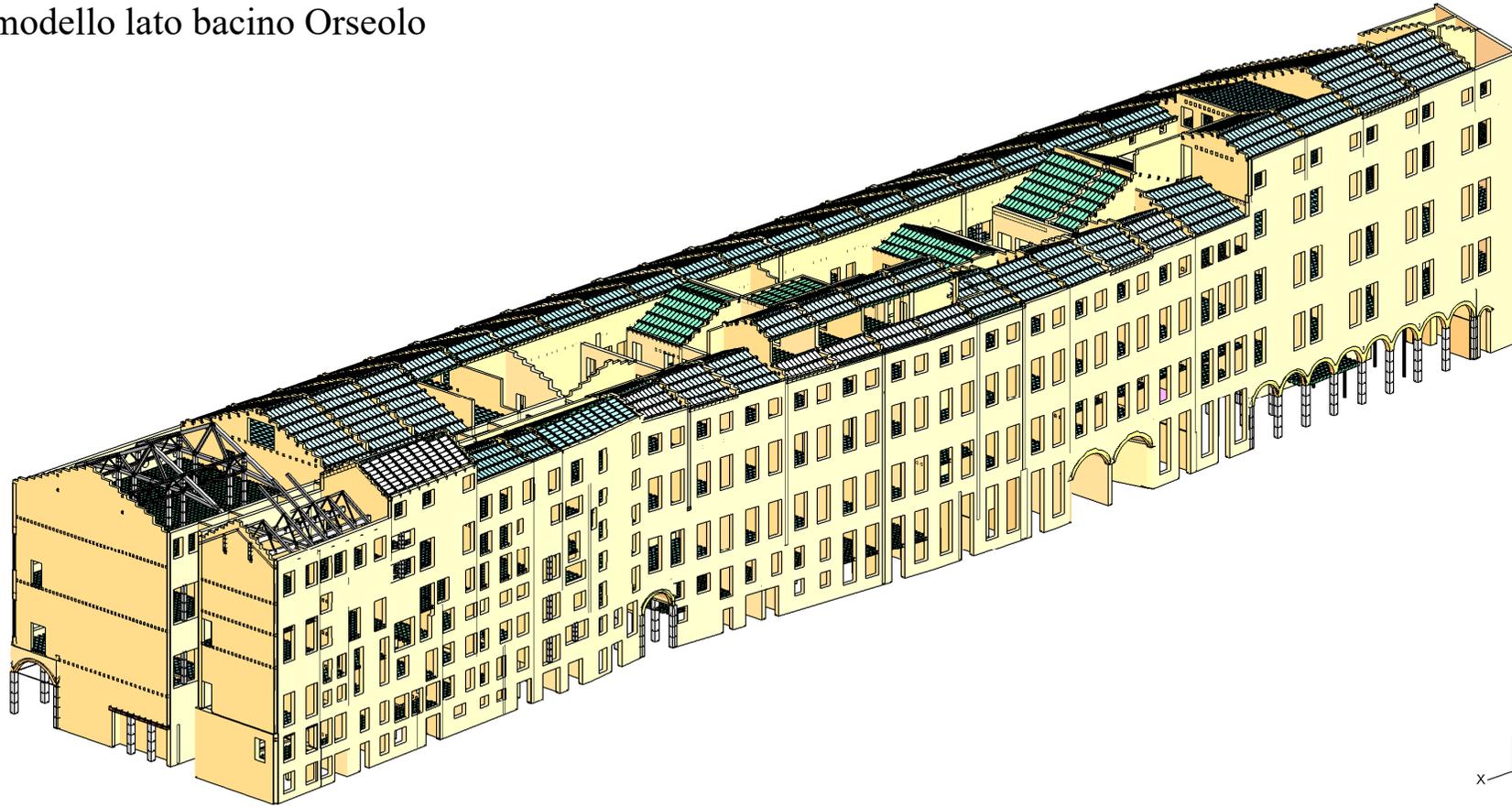
Modello geometrico

Vista 3D del modello lato piazza San Marco

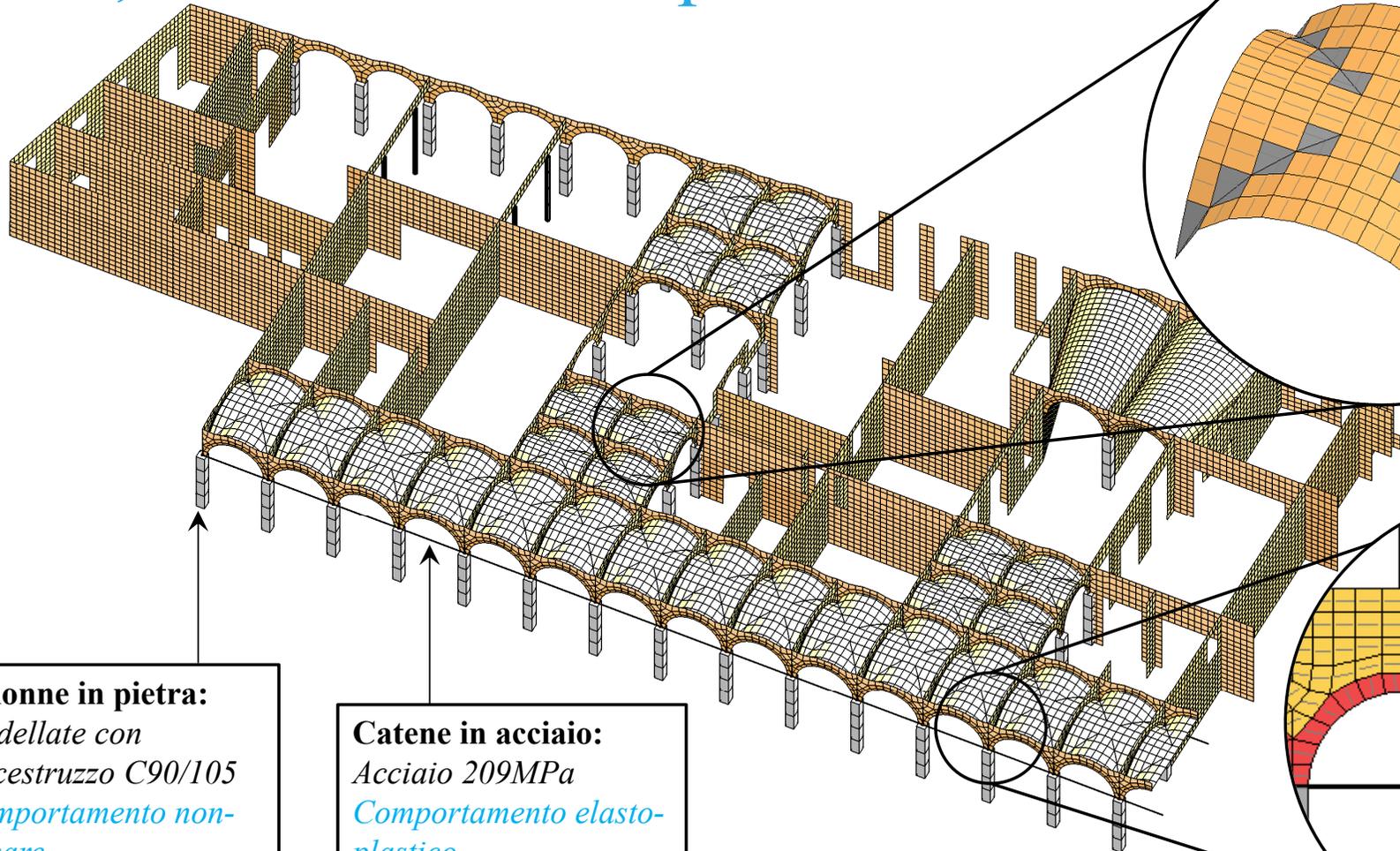


Modello geometrico

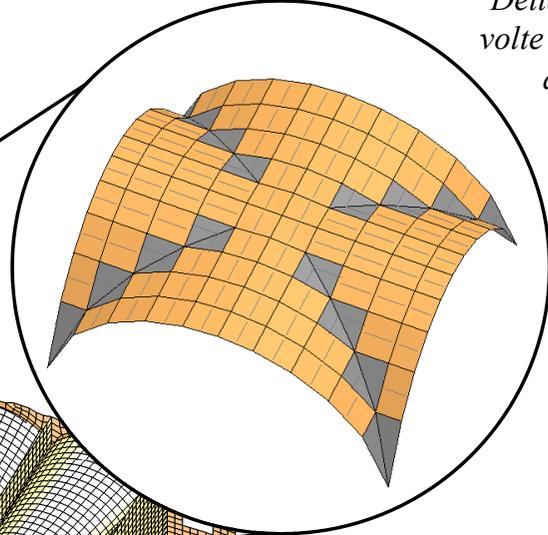
Vista 3D del modello lato bacino Orseolo



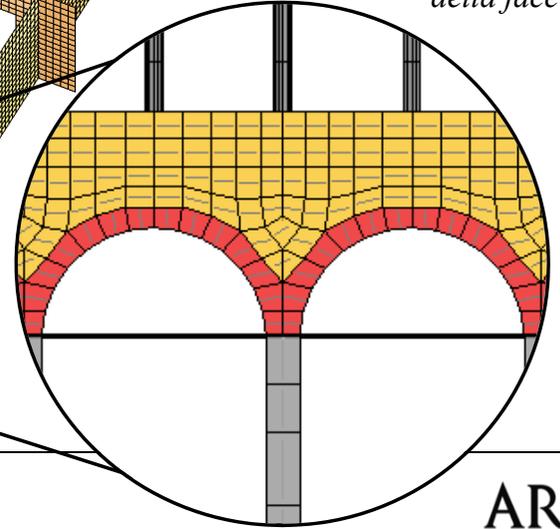
Archi, catene e volte al piano terra



Dettaglio delle volte a crociera del portico



Dettaglio degli archi della facciata



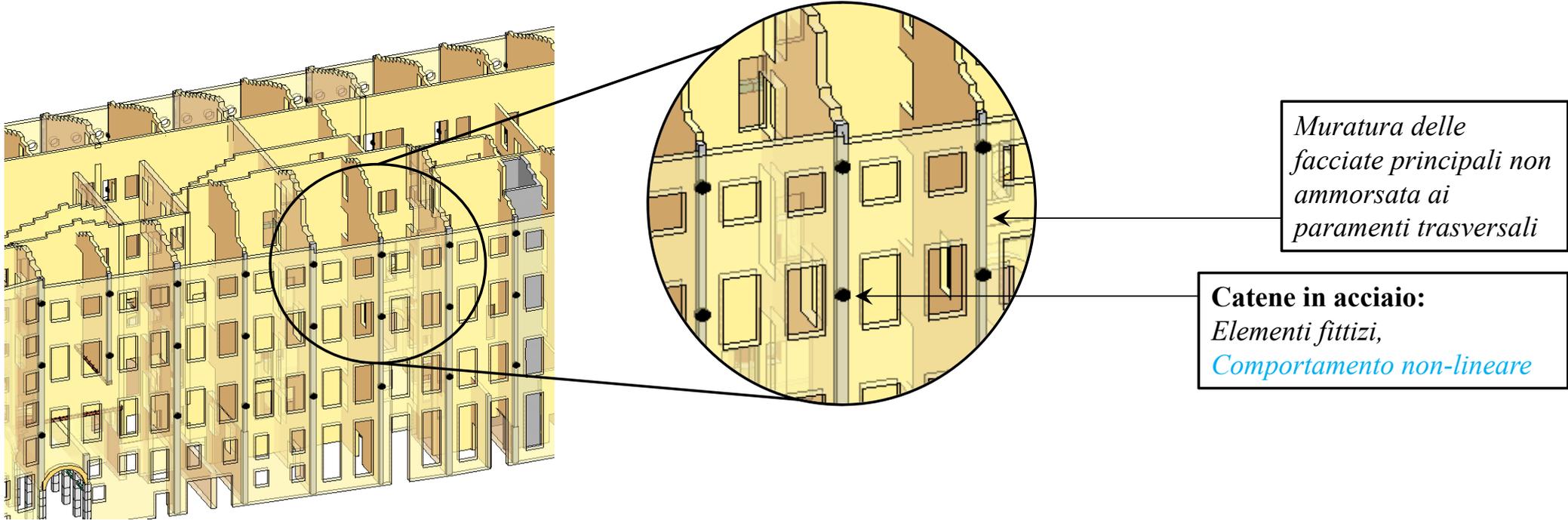
Colonne in pietra:
Modellate con calcestruzzo C90/105
Comportamento non-lineare

Catene in acciaio:
Acciaio 209MPa
Comportamento elastoplastico



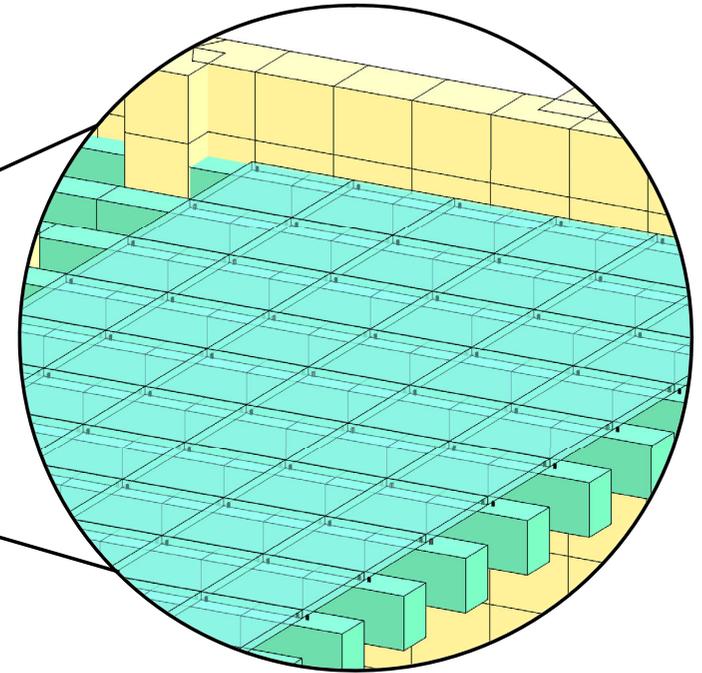
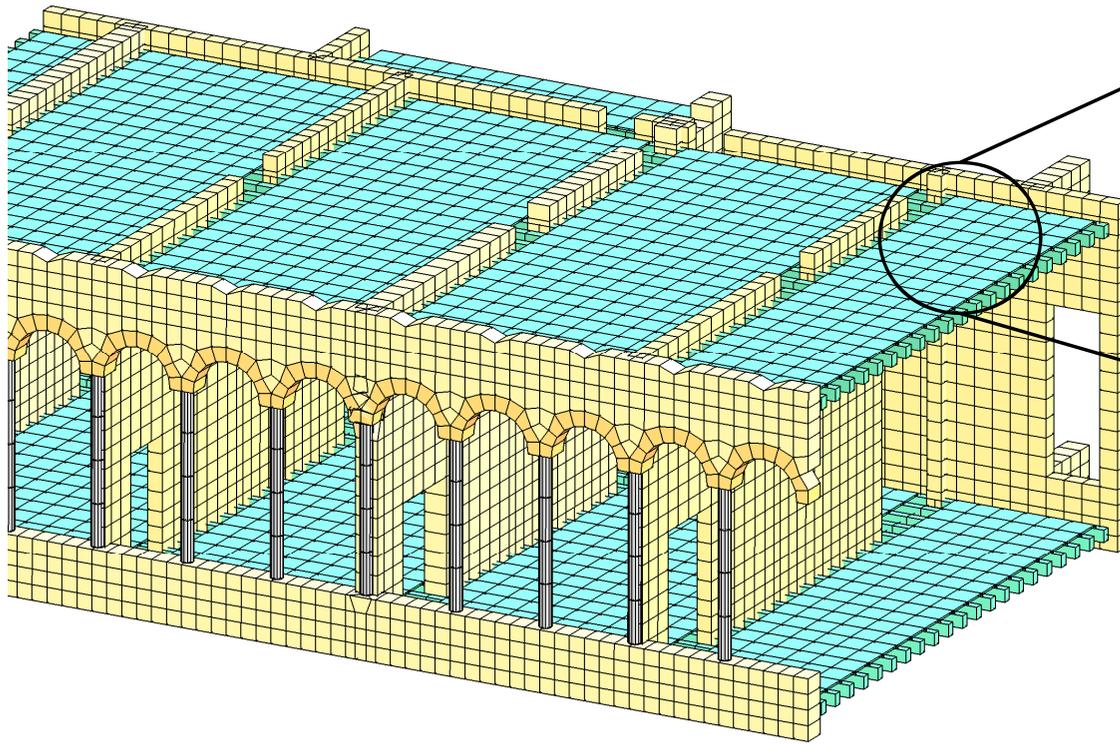
Catene di ritegno delle facciate

- Le catene in acciaio sono modellate con degli elementi che permettono di collegare le facciate con le murature trasversali, tenendo in conto della forza assiale massima corrispondente alla potenziale rottura del tirante stesso.
- Il valore della forza di rottura del tirante è stato calibrato considerando i possibili meccanismi di collasso, tra cui lo snervamento del tirante, il punzonamento e lo schiacciamento della muratura.



Solai in legno

Solai in legno modellati esplicitamente con travi principali e tavolato collagato tramite chiodatura (2+2 chiodi per pannello).

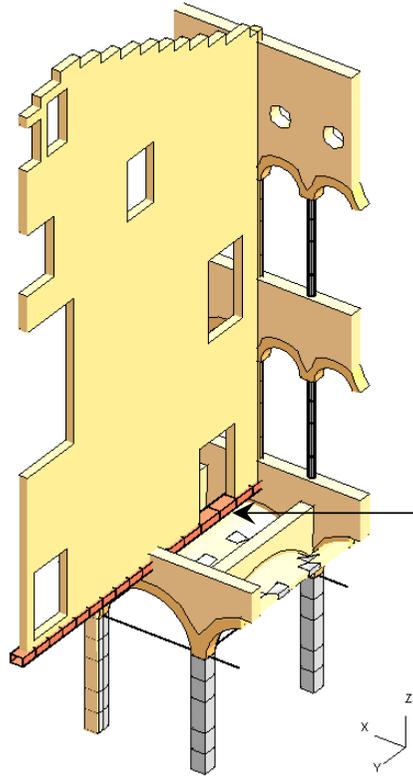


Dettaglio della modellazione dei solai in legno.

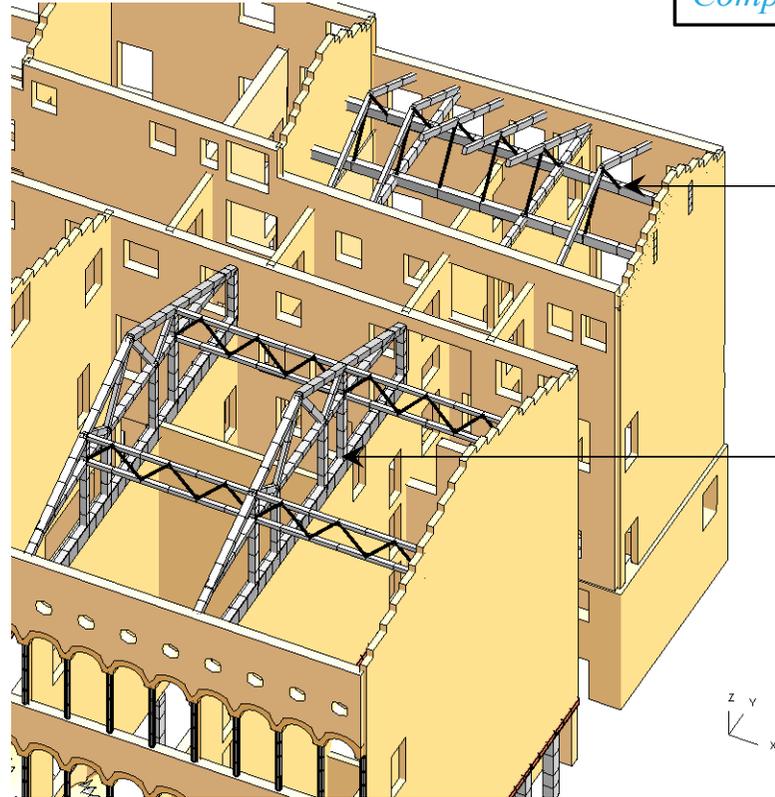


Elementi in acciaio e in cemento armato

Le travi e le colonne in acciaio e in cemento armato presenti sono modellate con comportamento non-lineare.



Travi in acciaio:
*Acciaio 209MPa,
Comportamento elasto-plastico*



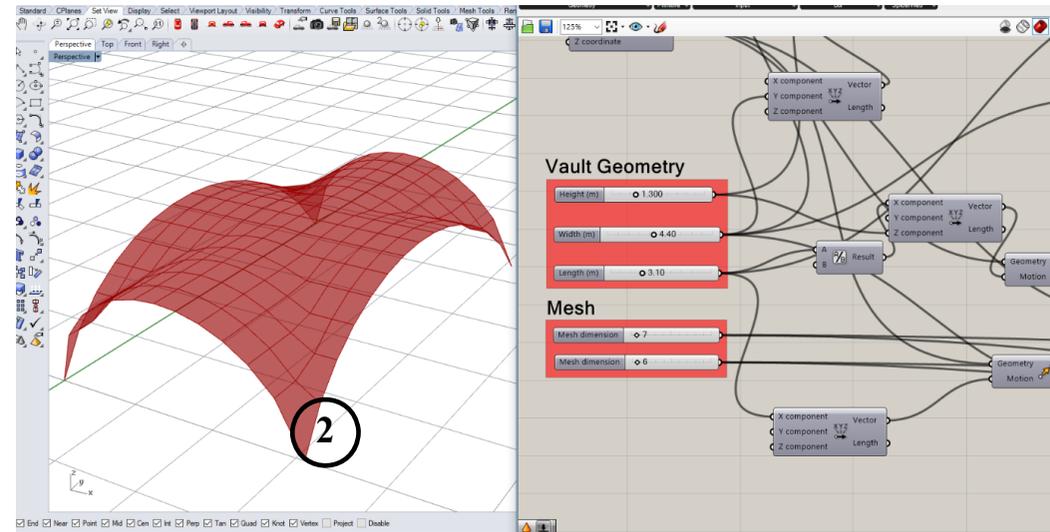
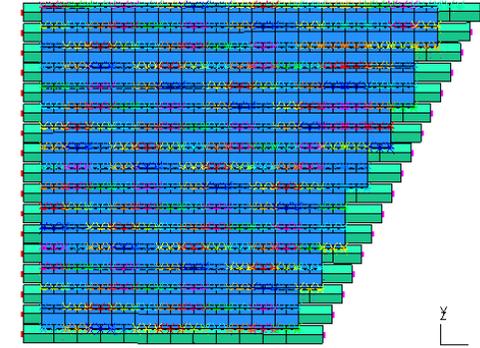
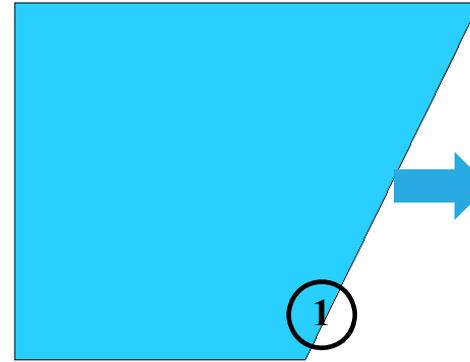
Travi e colonne in cemento armato:
*Modellato con classe C20/25,
Comportamento non-lineare*

Statistiche del modello LS-DYNA

- Elementi 2D della muratura: 218.682
- Travi (legno, acciaio e c.a.): 260.736
- Chiodi: 122.112
- Totale elementi: 481.752

- Passo temporale NLTH: $7.5e-5s$
- Tempo di analisi: 1.0 h/s

- Digital & Automation:
 1. Script in JS per la generazione dei solai in legno
 2. Script in Grasshopper per la generazione delle volte

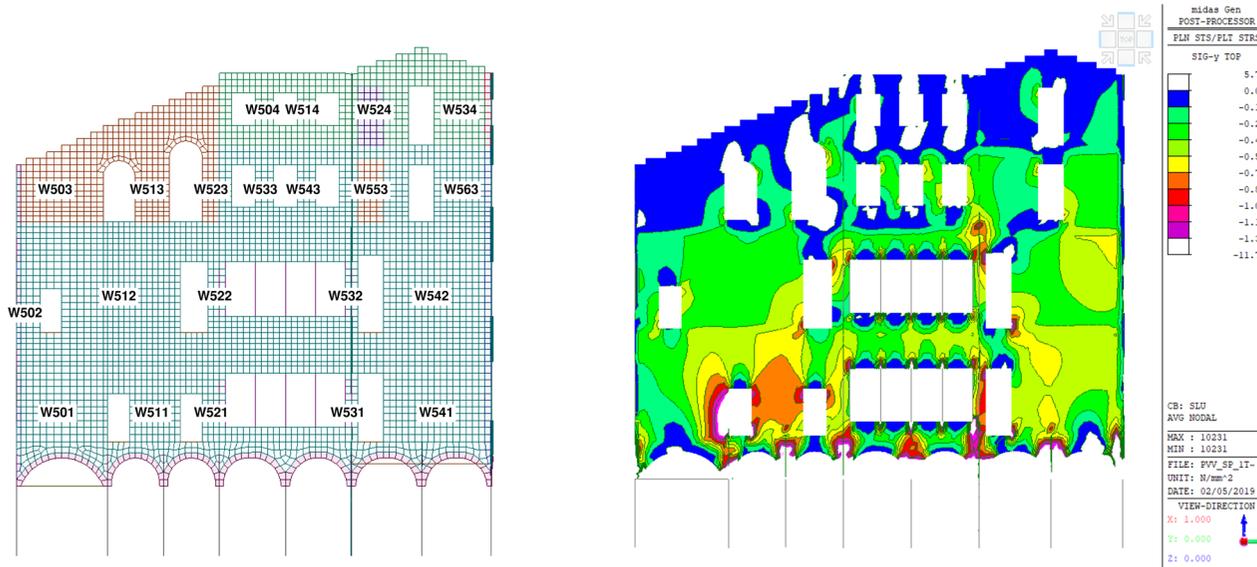


Verifica del livello di sicurezza statica

Verifica del livello di sicurezza statica

La verifica statica è stata svolta su ogni maschio murario di tutti gli assi trasversali e longitudinali in combinazione dei carichi allo Stato Limite Ultimo

Le verifiche sono state svolte in accordo a quanto riportato al paragrafo 4.5.6.2 delle NTC2008



Nomenclatura dei maschi

Andamento delle tensioni

Verifica del livello di sicurezza statica

Asse 5

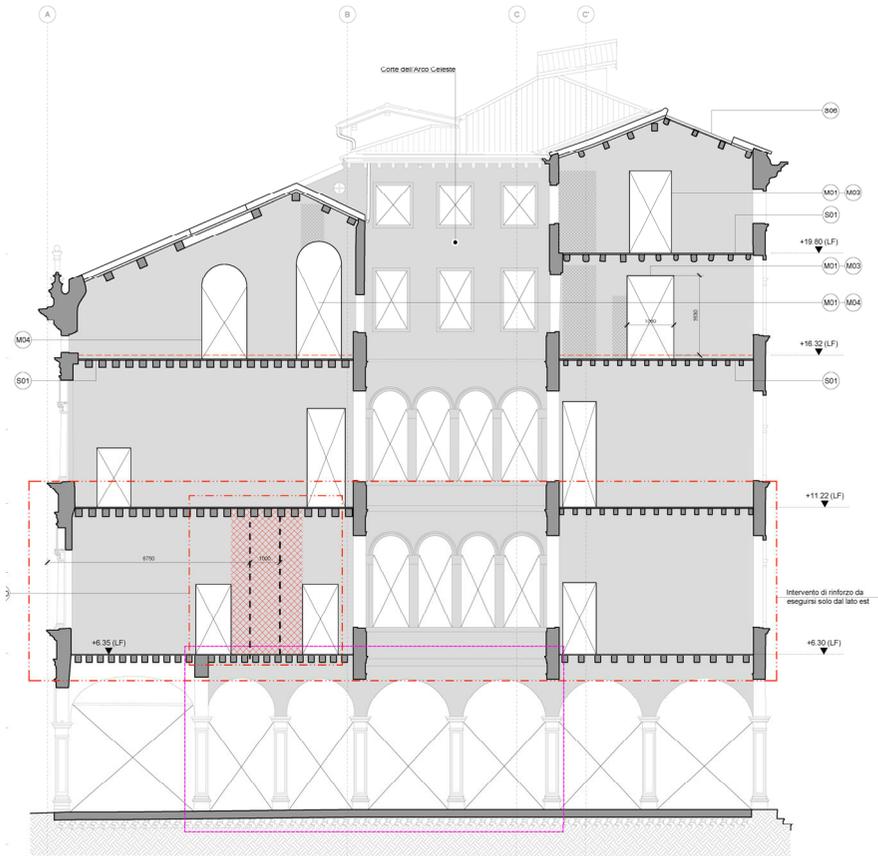
Legenda:

 Proprietà di terzi da entrambi i lati



Rappresentazione dei risultati

Verifica del livello di sicurezza statica



Rappresentazione degli interventi di rinforzo



Verifica del livello di sicurezza sismica

Analisi di vulnerabilità sismica

Obiettivo: miglioramento sismico

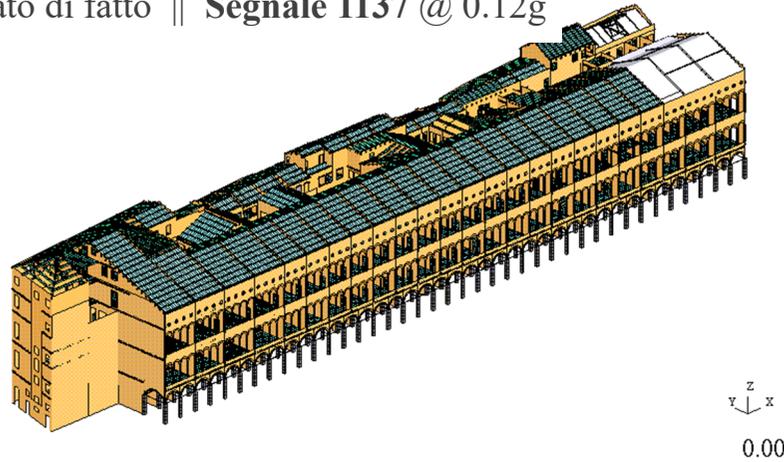
La vulnerabilità sismica delle Procuratie Vecchie è stata studiata utilizzando analisi dinamiche non lineari (NLTHA) con l'impiego di accelerogrammi, sia per lo stato di fatto, sia per la configurazione dello stato di progetto.

Inoltre, in accordo con le NTC2008, sono stati utilizzati tre segnali accelerometrici (minimo consentito) e sono stati considerati i massimi effetti sulla struttura.

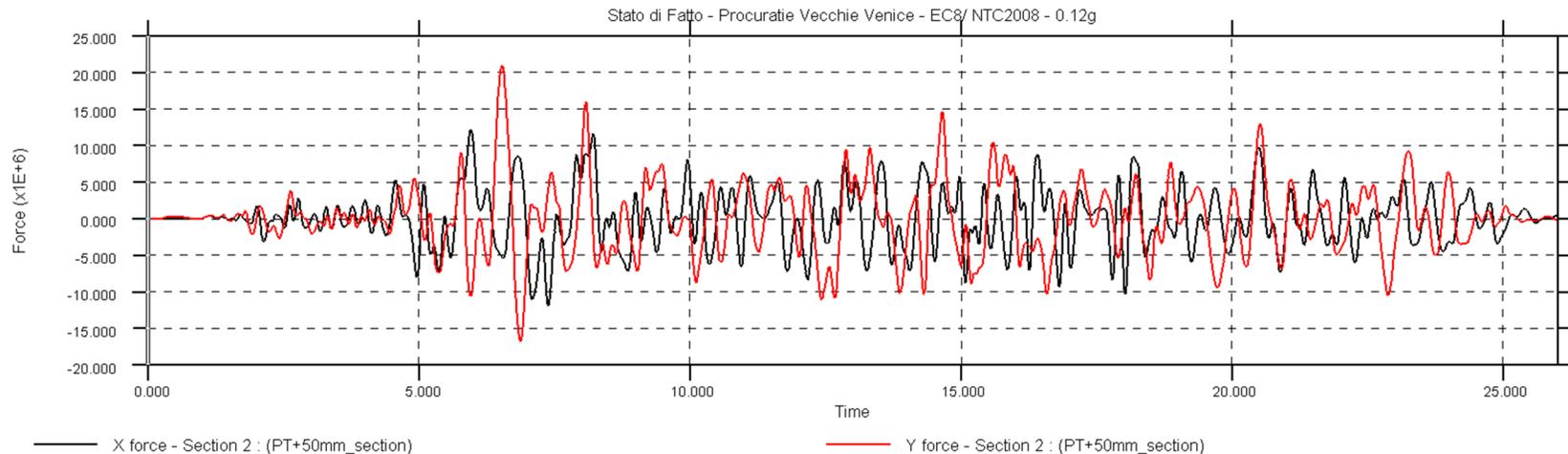
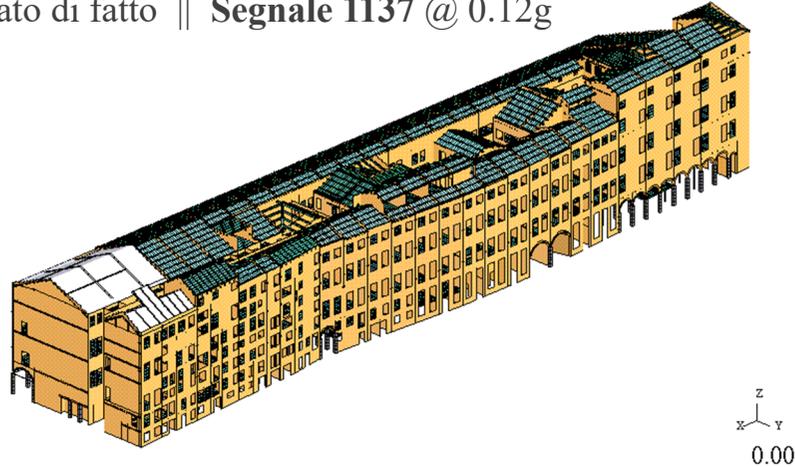
Infine, sono stati individuati gli indicatori di vulnerabilità sismica per lo stato limite di salvaguardia della vita, SLV per le due configurazioni analizzate, per poter verificare il miglioramento sismico dell'edificio nella condizione dello stato di progetto.

Comportamento sismico dell'edificio | Animazione

Stato di fatto || Segnale 1137 @ 0.12g

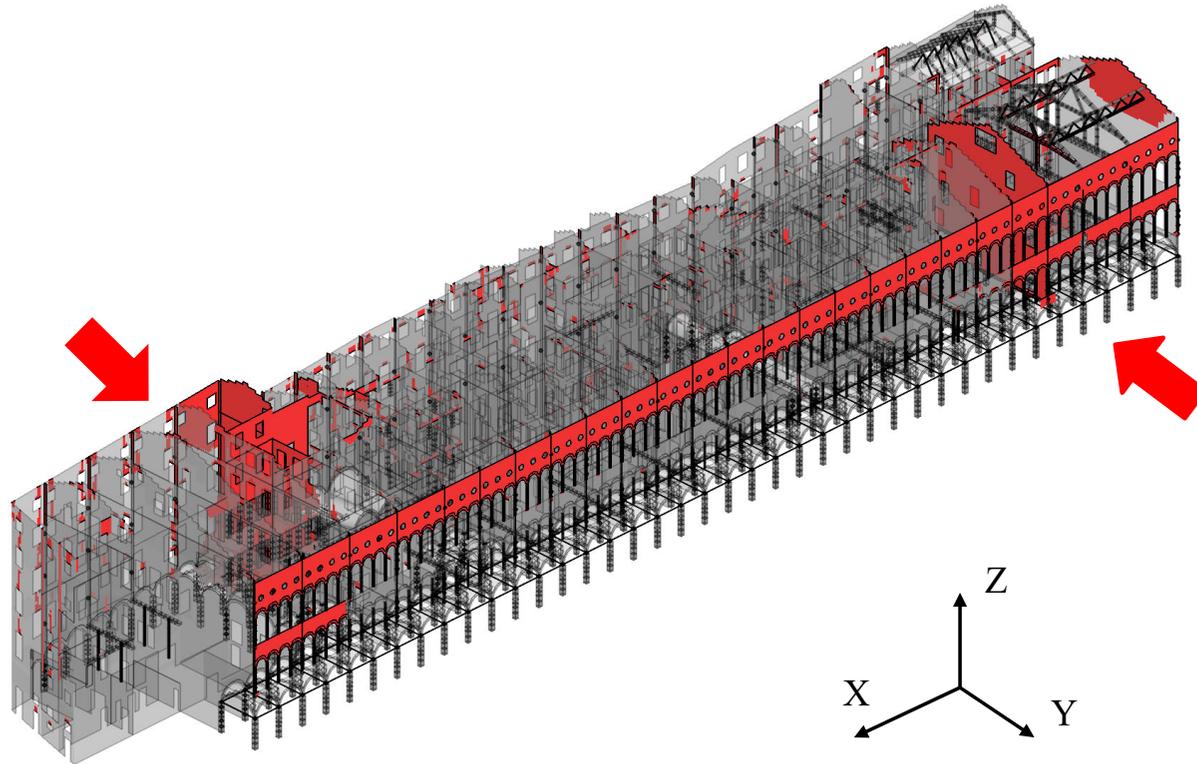


Stato di fatto || Segnale 1137 @ 0.12g



Porzioni collassate al termine dell'analisi

Stato di fatto || Segnale 0298 @ 0.12g



 *Porzioni collassate*



*I collassi interessano
principalmente due aree distinte.
Murature collassate $\approx 8.4\%$*



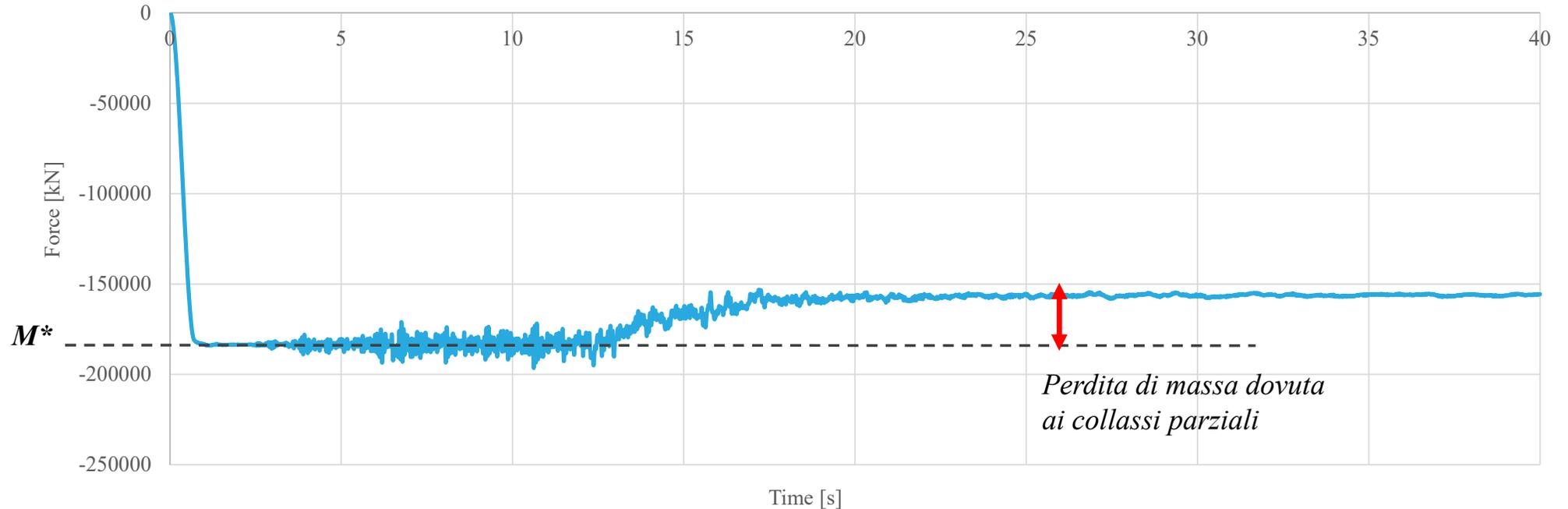
*Nota:
Una significativa porzione
della facciata monumentale
collassa fuori piano*

Reazione verticale in fondazione

Stato di fatto || **Record 8069 @ 0.12g**

Vertical reaction

— Z force - Section 2 : (PT+50mm_section)



Massa dell'edificio: $M^* \approx 188000\text{kN} \approx 18800\text{ t}$

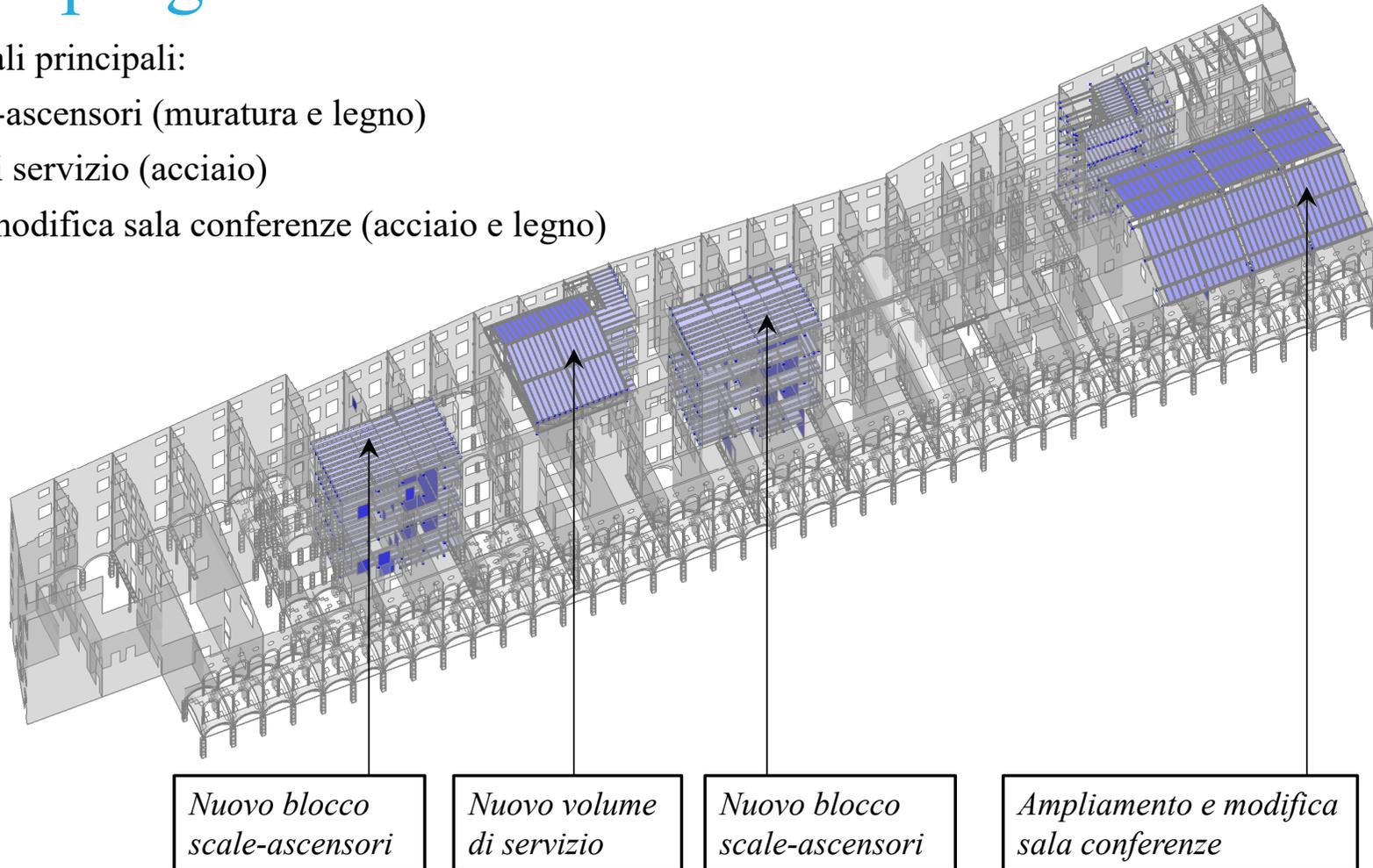
Verifica del livello di sicurezza sismica

Scenario di progetto

Scenario di progetto

Nuovi opera strutturali principali:

1. Nuovi vani scale-ascensori (muratura e legno)
2. Nuovo volume di servizio (acciaio)
3. Ampliamento e modifica sala conferenze (acciaio e legno)



*Nuovo blocco
scale-ascensori*

*Nuovo volume
di servizio*

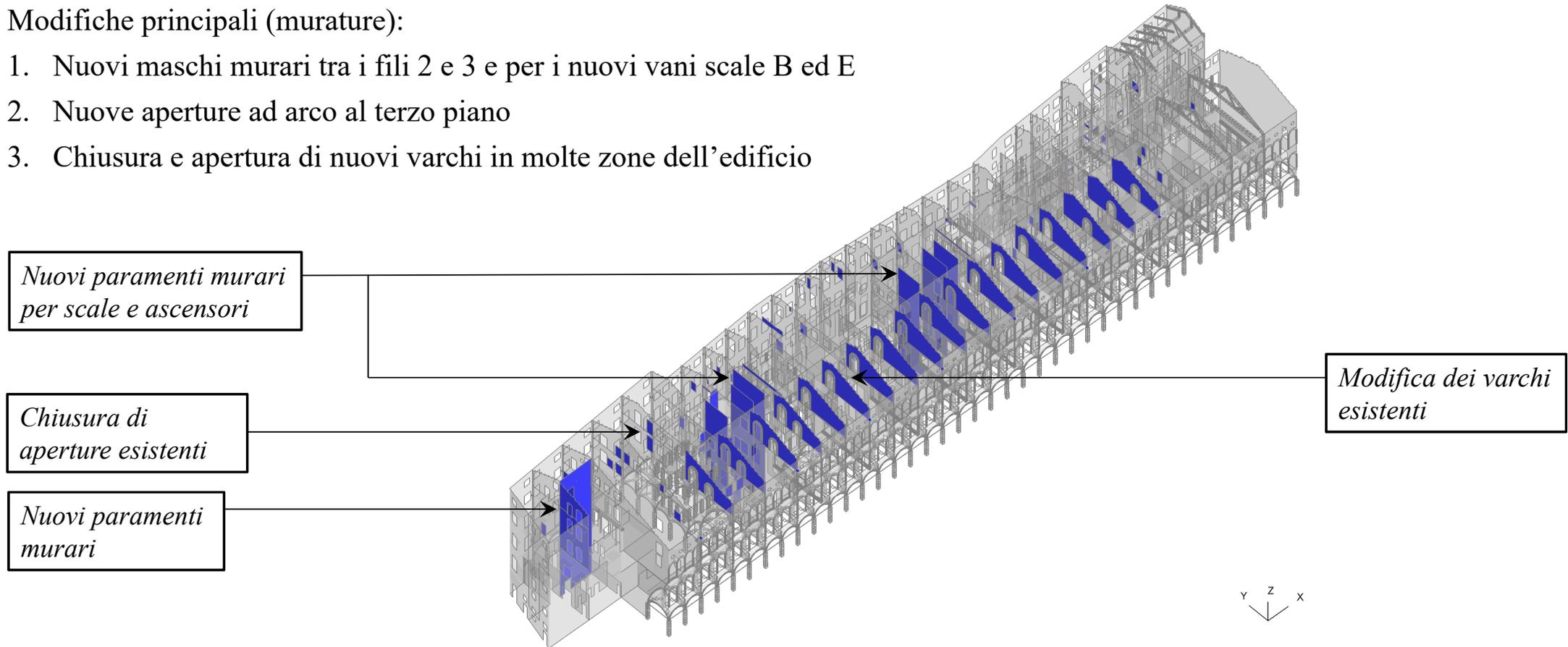
*Nuovo blocco
scale-ascensori*

*Ampliamento e modifica
sala conferenze*

Scenario di progetto

Modifiche principali (murature):

1. Nuovi maschi murari tra i fili 2 e 3 e per i nuovi vani scale B ed E
2. Nuove aperture ad arco al terzo piano
3. Chiusura e apertura di nuovi varchi in molte zone dell'edificio



*Nuovi paramenti murari
per scale e ascensori*

*Chiusura di
aperture esistenti*

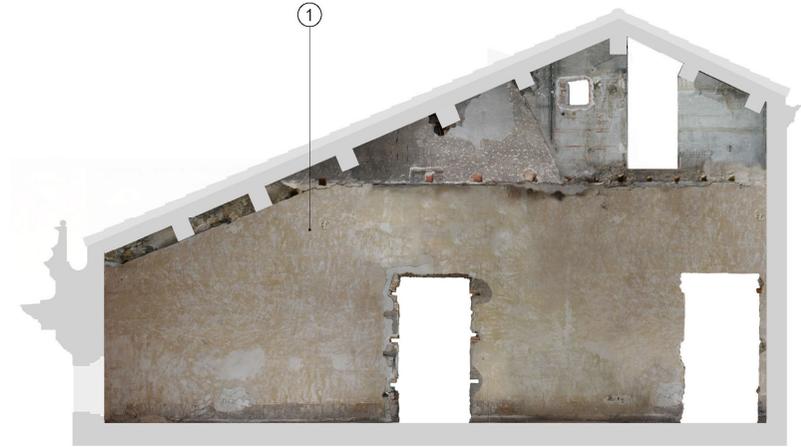
*Nuovi paramenti
murari*

*Modifica dei varchi
esistenti*

Scenario di progetto

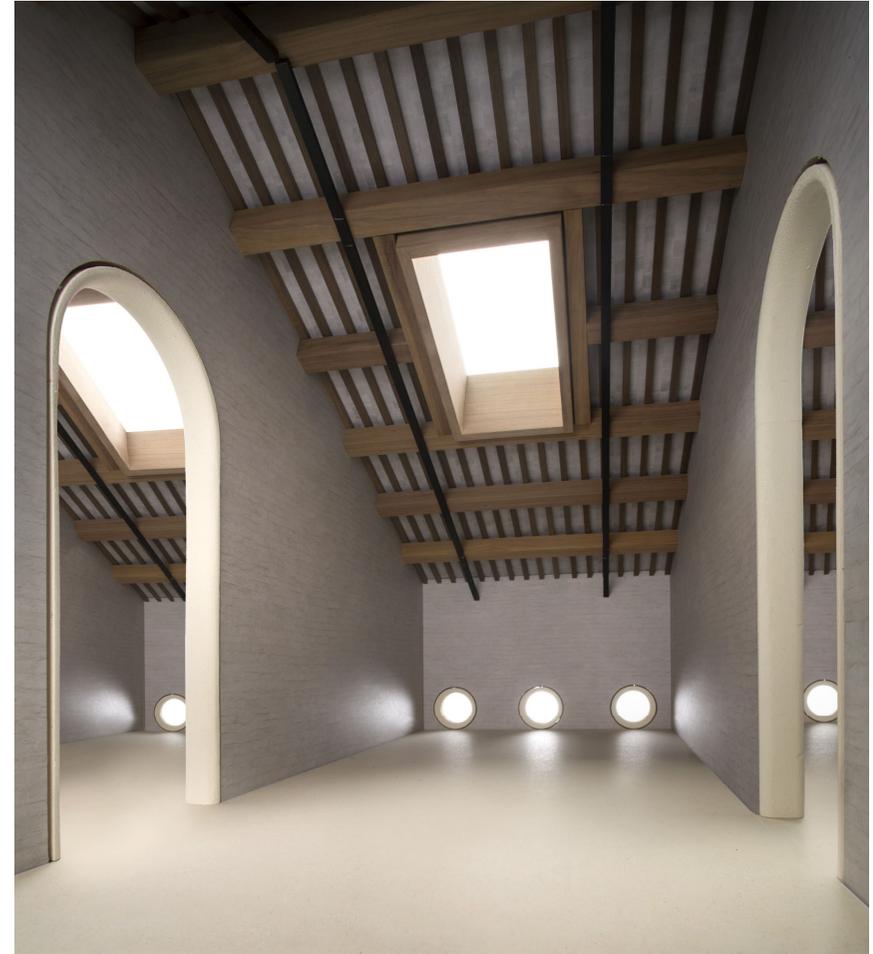
Modifica dei percorsi distributivi longitudinali (terzo piano):

1. Consolidamento delle murature
2. Chiusura dei varchi inutilizzati
3. Apertura di nuovi varchi



Procuratie Vecchie, Venezia, 2019
Modifica dei percorsi distributivi, terzo piano
(fonte: David Chipperfield Architects)

Scenario di progetto

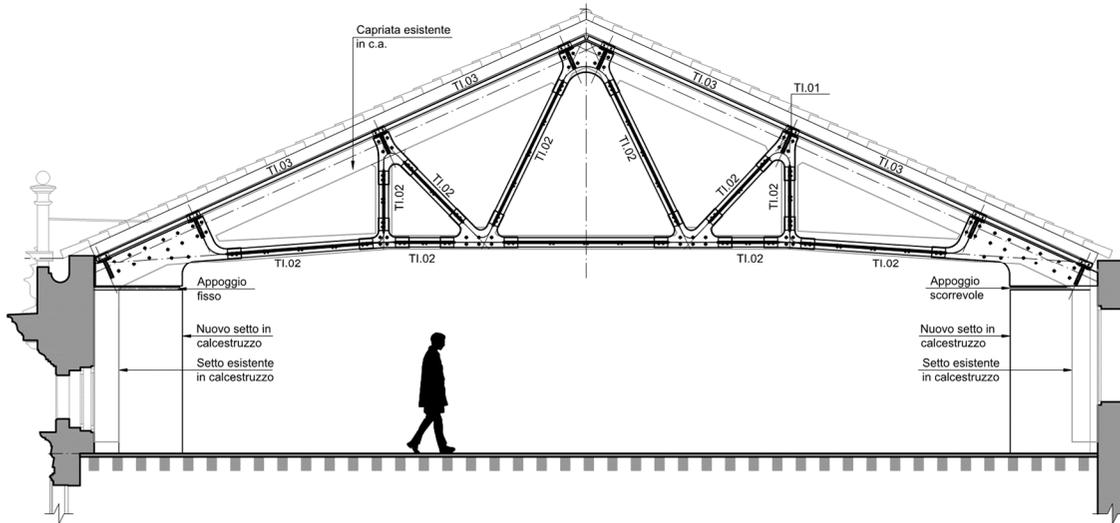


Procuratie Vecchie, Venezia, 2019
Nuovi spazi espositivi, terzo piano
(fonte: David Chipperfield Architects)

Scenario di progetto

Sala conferenze:

1. Rimozione dei solai in latero-cemento e sostituzione con solai lignei
2. Rinforzo delle capriate esistenti (c.a.) con placature in acciaio
3. Rinforzo dei supporti esistenti con elementi in muratura



Interventi di rinforzo: solai

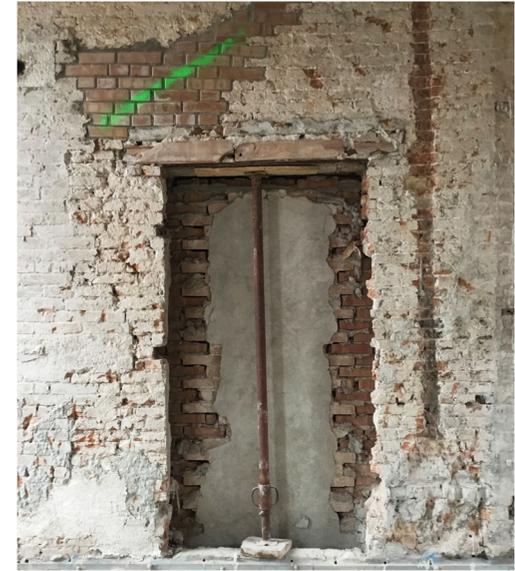
- Doppio tavolato con connessione alle pareti perimetrali
 - Procedura di intervento:
 - Verifica dello stato di ammaloramento delle travature lignee
 - Eventuale riparazione o sostituzione degli elementi ammalorati
 - Posa di nuovo doppio tavolato in pannelli in OSB/4 strutturale con viti mordenti
 - Solai del secondo e terzo piano: collegamento con le murature perimetrali mediante angolare metallico e tasselli chimici.
 - Benefici:
 - Aumento della capacità portante degli orizzontamenti
 - Aumento della rigidezza complessiva e del comfort
 - Miglioramento del comportamento sismico della struttura e della trasmissione dell'azione tagliante tra solaio e pareti
 - Miglioramento della stabilità delle pareti nel meccanismo di ribaltamento fuori piano



Interventi di rinforzo: murature esistenti

- «Scuci-cuci»

Demolizione e ricostruzione in corrispondenza di zone ammalorate, carichi concentrati, ammorsamenti non efficaci



Interventi di rinforzo: murature esistenti

- Intonaco armato con connessioni trasversali

- Caratteristiche:

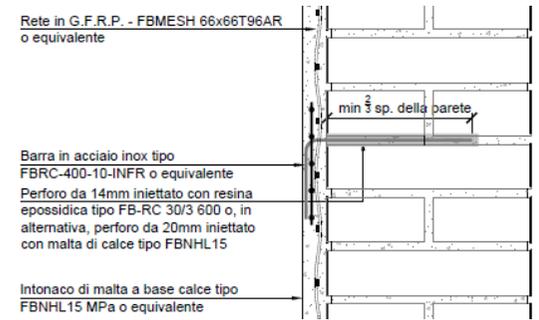
- Esecuzione su entrambi i lati, ove possibile
 - Malta a base di calce e rete in fibra di vetro
 - Spessore 30mm per lato
 - Connettori in acciaio inox $9/m^2$, passanti nel caso di intervento su entrambi i lati
 - Iniezione di resina epossidica o malta a base di calce

- Benefici:

- Aumento della resistenza a compressione della muratura, per effetto del confinamento indotto dai connettori passanti
 - Riduzione del carico agente sul paramento murario per trasferimento di parte di esso all'intonaco tramite i connettori
 - Diminuzione della snellezza della muratura rinforzata per incremento del suo spessore, comprensivo degli strati di intonaco.



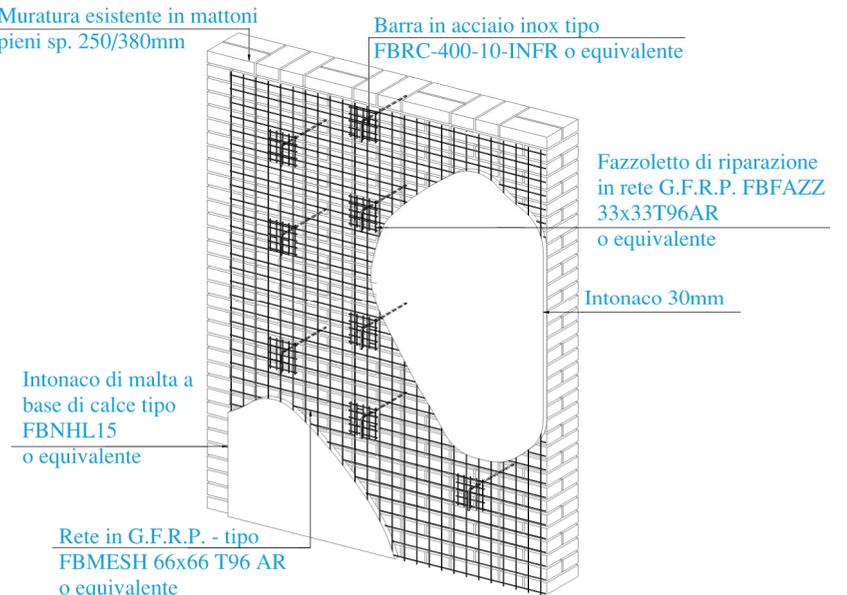
Intervento su 2 lati



Intervento su 1 lato

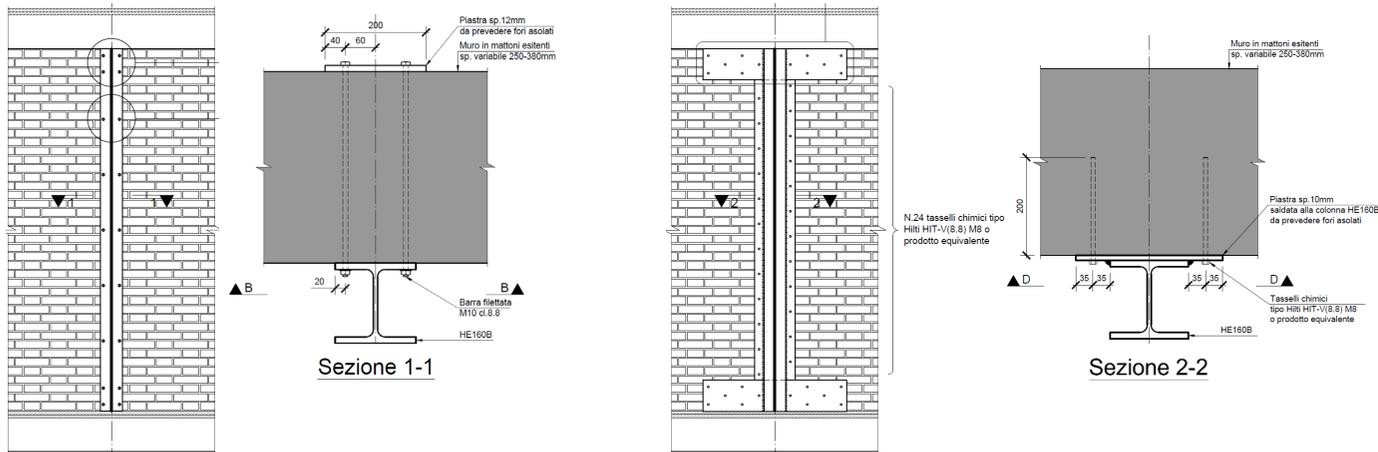
Muratura esistente in mattoni pieni sp. 250/380mm

Barra in acciaio inox tipo FBRC-400-10-INFR o equivalente

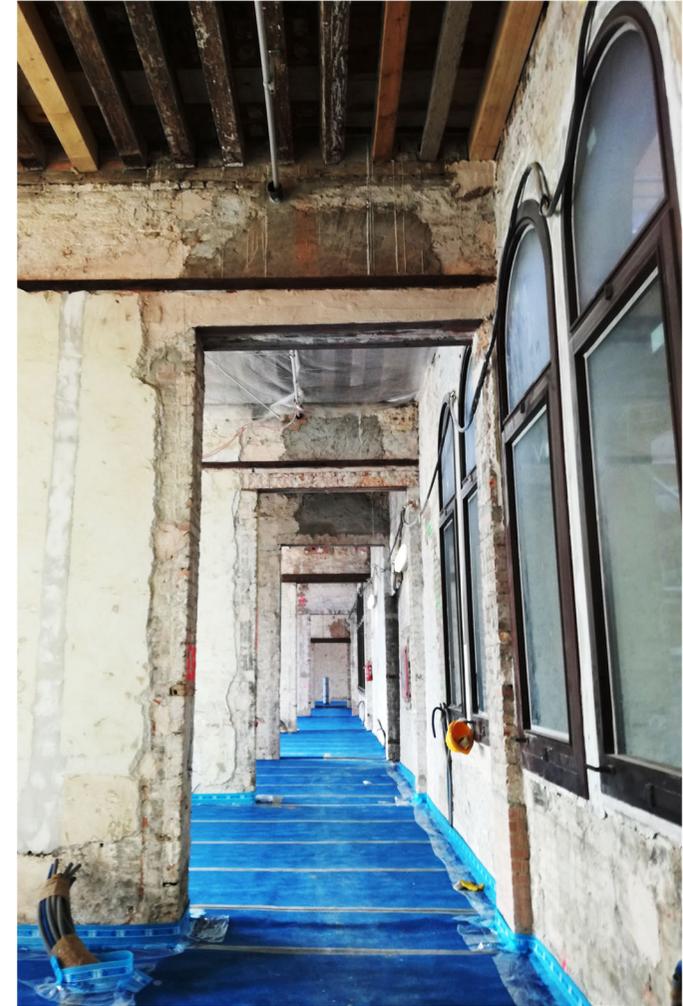


Altri interventi di rinforzo

- Steel post
 - Irrigidimento con funzione di ritegno nel fuori piano nel caso di pareti con eccessiva snellezza, in cui l'intonaco armato non è sufficiente
 - Profili metallici fissati alle pareti murarie con connessione a tutta altezza: barre filettate con piastra continua o tasselli chimici

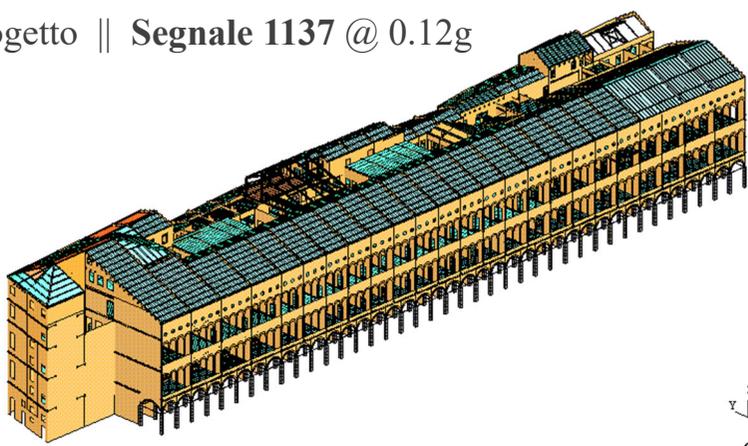


- Rifacimento o rinforzo degli architravi
- Riparazione delle travi lignee
- Consolidamento dei tiranti



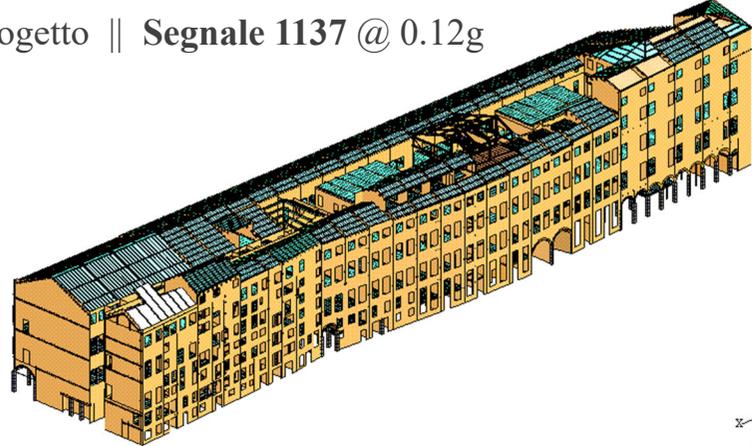
Comportamento sismico dell'edificio | Animazione

Progetto || Segnale 1137 @ 0.12g

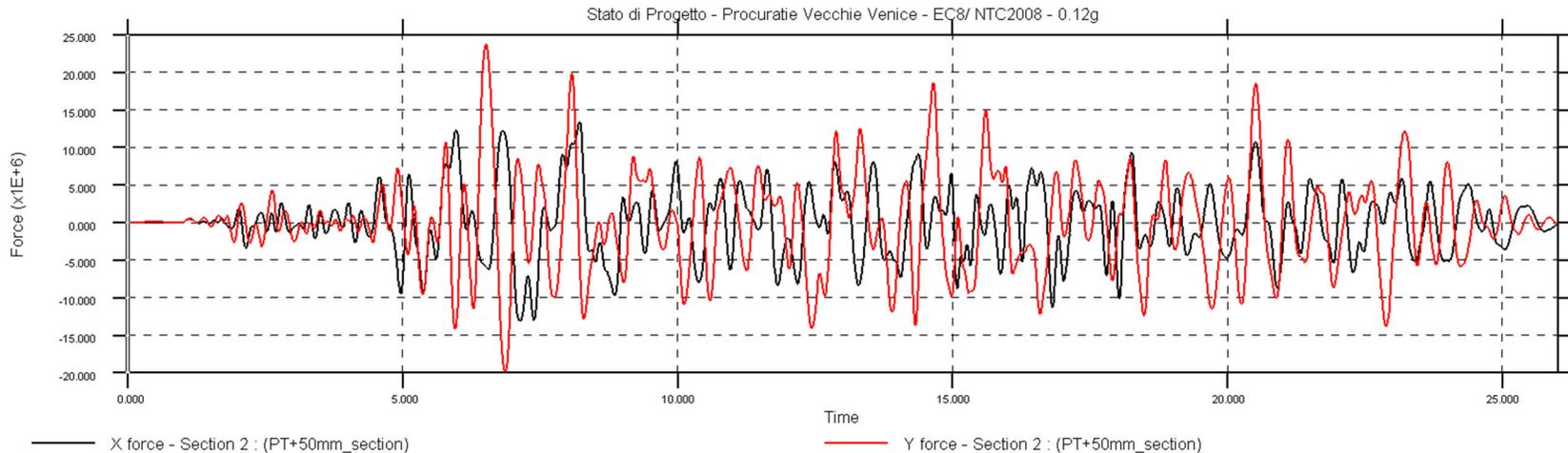


z
y x
0.00

Progetto || Segnale 1137 @ 0.12g

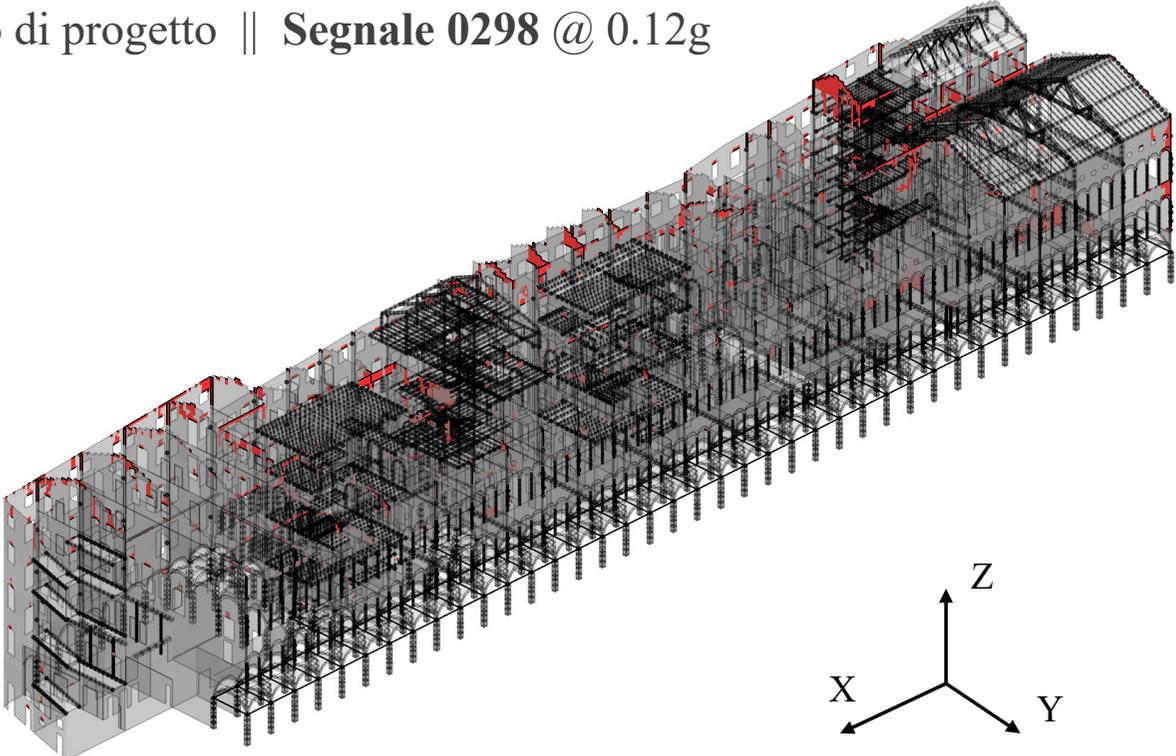


z
x y
0.00



Porzioni collassate al termine dell'analisi

Stato di progetto || Segnale 0298 @ 0.12g

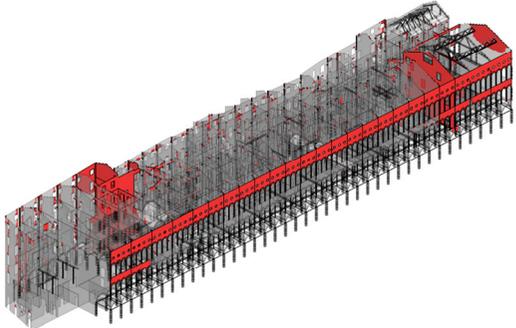


 Porzioni collassate



*Non si osservano collassi estesi.
Murature collassate $\approx 1.8\%$
(8.4% nello stato di fatto)*

Segnale 0298 Stato di fatto



Conclusioni

Confronto tra scenario attuale e scenario di progetto

Richieste normative per edifici tutelati

- In accordo con la normativa tecnica (NTC2008 – sezione 8.4), per edifici tutelati di interesse storico e culturale, anche a seguito di interventi di trasformazione dell'organismo edilizio, non è necessario procedere con l'adeguamento sismico.
- La valutazione della sicurezza deve in ogni caso dimostrare un miglioramento sismico tra lo stato di fatto e lo stato di progetto.
- Tale verifica può essere svolta tramite degli “indici di vulnerabilità sismica”, definiti all'interno delle “*Linee guida per la valutazione e la riduzione del rischio sismico del patrimonio culturale*”, del 2010:

- $I_{S,SL} = \frac{T_{SL}}{T_{R,SL}}$ Indice definito come rapporto dei periodi di ritorno

- $f_{a,SL} = \frac{a_{SL}}{a_{g,SL}}$ Indice definito come rapporto delle accelerazioni

Criteri di accettazione

- In generale, per edifici in muratura non armata, gli indici di vulnerabilità sismica di un edificio sono riferiti alle potenziali modalità di collasso degli elementi principali, ovvero:
 - **Collasso per pressoflessione e taglio nel piano:** il criterio di accettazione è raggiunto per uno spostamento nel piano di ciascun maschio murario pari allo 0.6% dell'altezza per pressoflessione e pari allo 0.4% dell'altezza per taglio.
 - **Collasso per cinematismo fuori piano:** il criterio di accettazione è raggiunto per uno spostamento fuori piano in testa di ciascun maschio murario pari al 2% dell'altezza. Tale valore è stato assunto in base alla geometria dei maschi murari.

Considerazioni finali

Conclusioni:

- Evidenza delle vulnerabilità di dettaglio con possibilità di intervento mirato
- Evidenza dell'interazione con le strutture secondarie e con gli elementi non strutturali
- Evidenza delle risorse non lineari della struttura e riduzione dei rinforzi richiesti

