

Analisi numeriche avanzate di strutture esistenti

Modelli di calcolo ed esempi applicativi nell'ambito delle grandi opere

Paolo Fici

Senior Structural Engineer

paolo.fici@arup.com

Punti chiave della presentazione

Indice

1. Introduzione:
 - Breve presentazione personale
 - Galleria dei principali progetti Arup e strategia di analisi degli edifici esistenti
2. Analisi avanzate e progetto di sistemi di rinforzo per strutture in **cemento armato**
 - Riferimenti normativi e modellazione
 - Caso studio: Stadio di Firenze
3. Analisi avanzate e progetto di sistemi di rinforzo per strutture in **muratura**
 - Riferimenti normativi e modellazione
 - Caso studio 2: Procuratie Vecchie Venezia
 - Caso studio 1: Blind prediction volta in muratura organizzata dall'Università di Genova / Laboratorio prove Lisbona

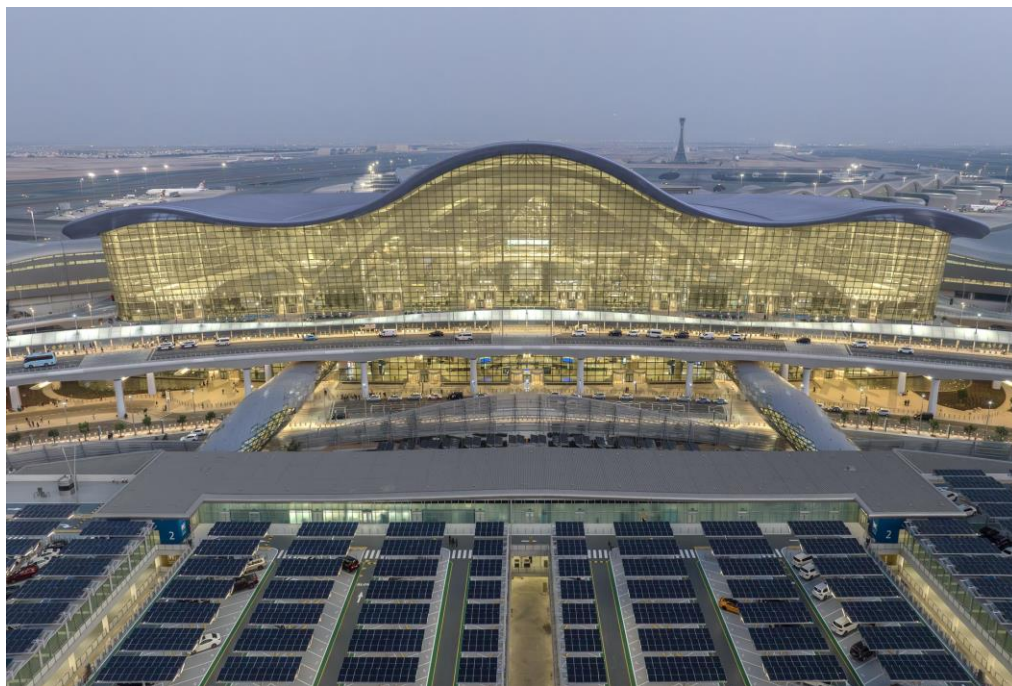
Progetti Arup e strategia edifici esistenti

ARUP

Principali progetti

2014-2015

- Abu Dhabi Airport
- Ex Padiglione 3 di CityLife



Principali progetti

2014-2024

GESU Project (**G**roningen **E**arthquake **S**tructural **U**pgrading)

- Definizione dell'input sismico
- Valutazione di vulnerabilità di 200,000 edifici

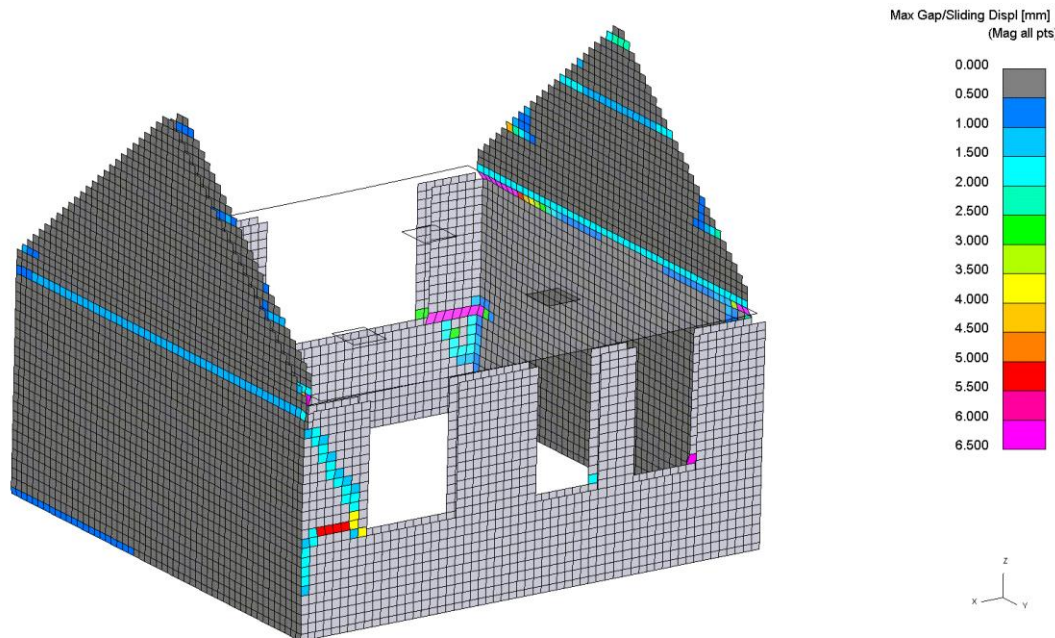


Principali progetti

2014-2024

GESU Project (**G**roningen **E**arthquake **S**tructural **U**pgrading)

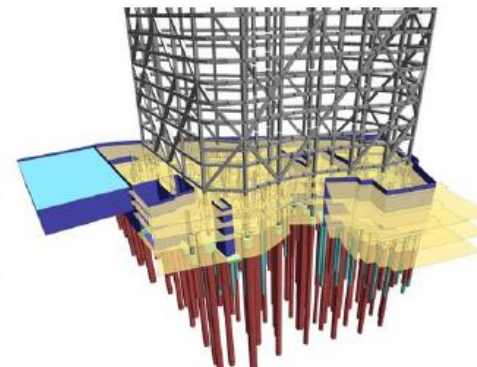
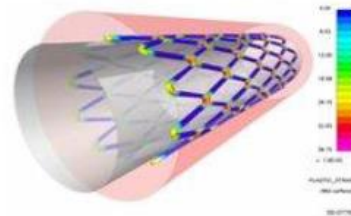
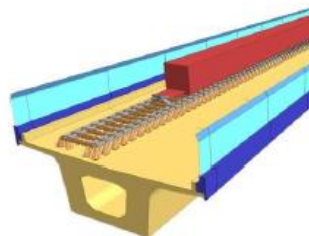
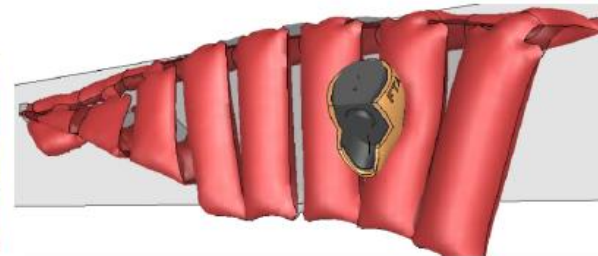
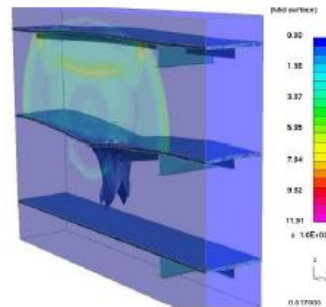
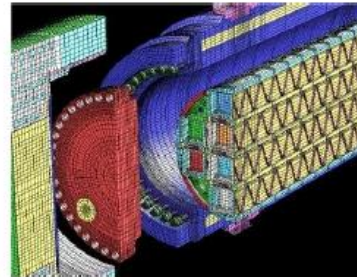
- Test in scala reale (Laboratorio Eucentre)
- Calibrazione e validazione di modelli analitici
- Analisi dinamiche non lineari (NLTH) con LS-DYNA



LS-DYNA

2014 - anno corrente

- Aerospace
- Automotive crashworthiness
- Ballistics
- Biomechanics
- Blast
- Civil Engineering
- Heat Transfer
- Impact and drop testing
- Manufacturing processes
- Metal forming
- Occupant Safety
- Seismic Engineering
- Rail Engineering



Wikipedia:

*“**LS-DYNA** is an advanced general-purpose multiphysics simulation software package”*

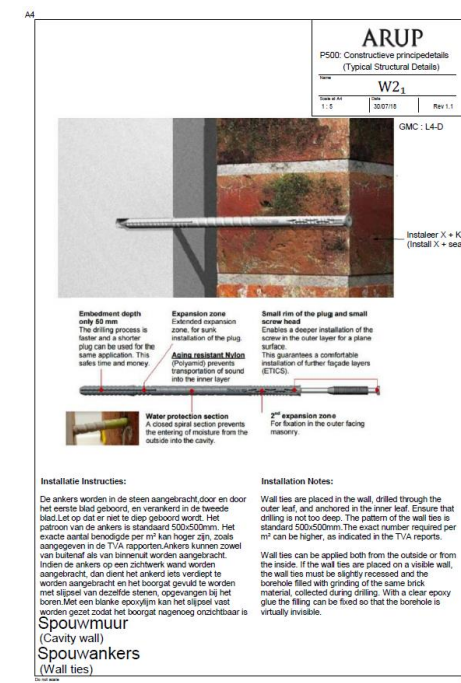
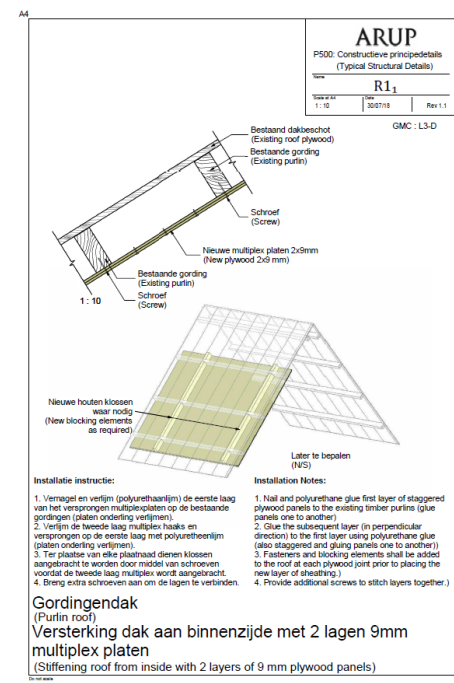
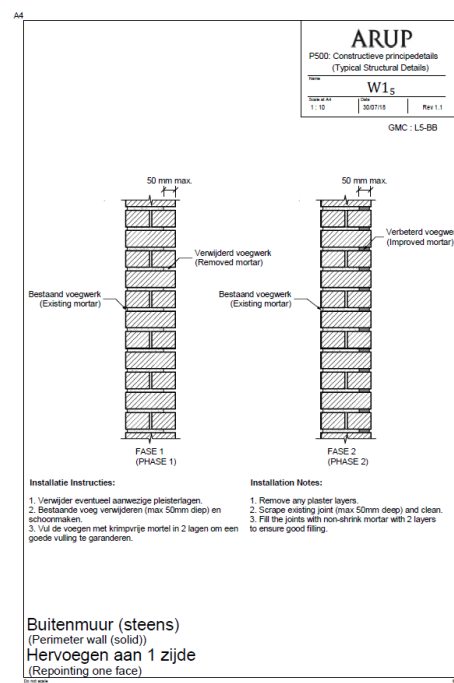
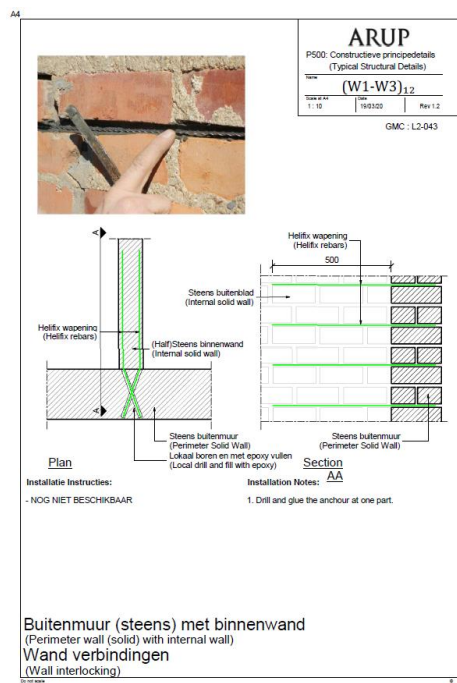
<https://lsdyna.ansys.com/support/>
<https://www.dynaexamples.com>

Principali progetti

2014-2024

GESU Project (Groningen Earthquake Structural Upgrading)

- L'uso di analisi dinamiche non lineari ha permesso di ridurre l'intrusività dei rinforzi.
- Sono stati introdotti sistemi di rinforzo tipici della pratica italiana: scuci-cuci, perfori d'angolo, ristilature, miglioramento del comportamento a diaframma, intonaci armati a basso spessore, FRCM, etc.

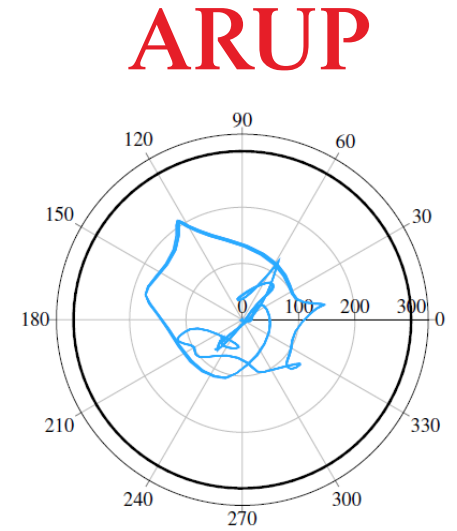
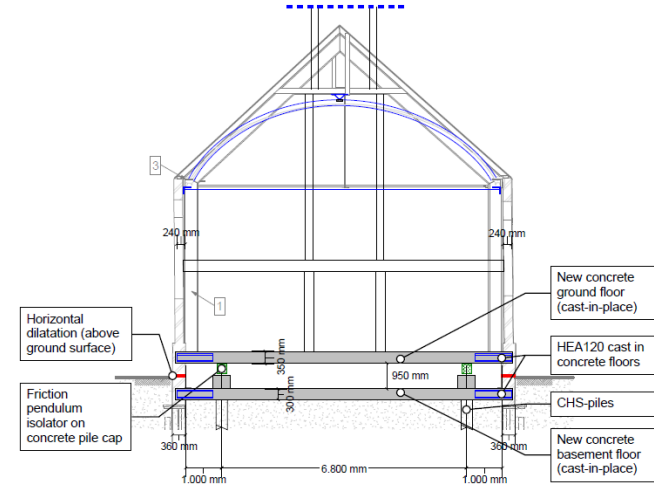


Principali progetti

2014-2024

GESU Project (**G**roningen **E**arthquake **S**tructural **U**pgrading)

- Progetto di rinforzo di una chiesa con isolamento alla base
- Lavori completati nel 2025



Principali progetti

2018 – anno corrente

Principali progetti italiani:

- **Procuratie Vecchie, Venezia, 2018-2019**
- Pirelli 39, Milano, 2020-corrente
- Palazzo Mondadori, Segrate, 2021-2022
- **Stadio di Firenze, 2022-corrente**
- Sede di Generali, Mogliano Veneto, 2025
- Sede di Generali, Roma, 2025



Edifici esistenti

Strategia per analisi di vulnerabilità sismica

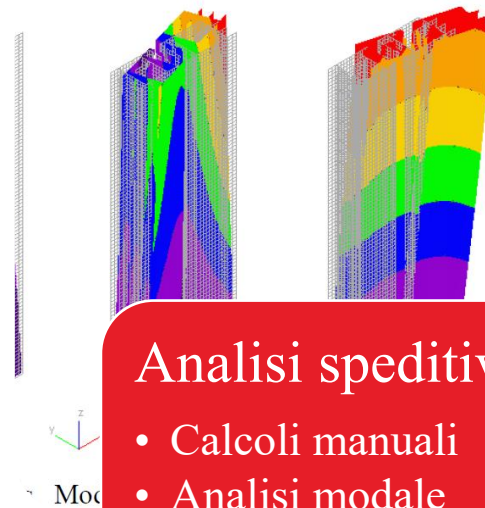


*Possiamo portare
valore aggiunto con
analisi avanzate?*



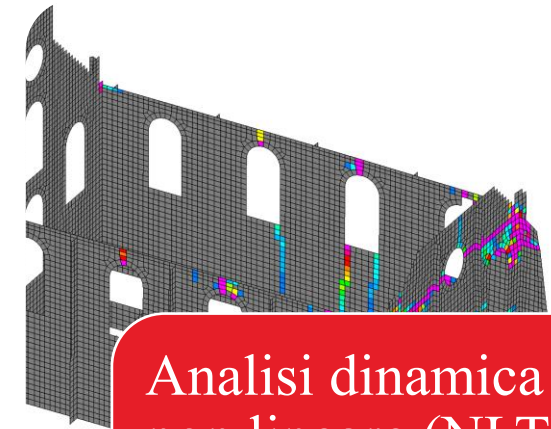
Conoscenza preliminare edificio

- Anno di costruzione
- Normativa di riferimento
- Tipologia costruttiva
- Materiali
- Dettagli costruttivi



Analisi speditive

- Calcoli manuali
- Analisi modale
- Analisi dinamica lineare con spettro di risposta
- Individuazione principali criticità



Analisi dinamica non lineare (NLTH)

- Maggior costo di analisi e progettazione per il cliente
- Riduzione delle misure di rinforzo e del costo dell'intervento

Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in cemento armato



Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in cemento armato

Riferimenti normativi e modellazione

Riferimenti normativi

Per quanto riguarda gli edifici esistenti, la normativa italiana fornisce ai progettisti un discreto margine di manovra, per quanto riguarda:

- **Scelta del livello di conoscenza e del tipo di analisi**
- Definizione delle proprietà dei materiali
- Scelta del metodo di verifica

Tabella C8.5.IV – Livelli di conoscenza in funzione dell'informazione disponibile e conseguenti metodi di analisi ammessi e valori dei fattori di confidenza, per edifici in calcestruzzo armato o in acciaio

Livello di conoscenza	Geometrie (carpenterie)	Dettagli strutturali	Proprietà dei materiali	Metodi di analisi	FC (*)
LC1	Da disegni di carpenteria originali con rilievo visivo a campione; in alternativa rilievo completo ex-novo	Progetto simulato in accordo alle norme dell'epoca e <i>indagini limitate</i> in situ	Valori usuali per la pratica costruttiva dell'epoca e <i>prove limitate</i> in situ	Analisi lineare statica o dinamica	1,35
LC2		Elaborati progettuali incompleti con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini estese</i> in situ	Dalle specifiche originali di progetto o dai certificati di prova originali, con <i>prove limitate</i> in situ; in alternativa da <i>prove estese</i> in situ	Tutti	1,20
LC3		Elaborati progettuali completi con <i>indagini limitate</i> in situ; in alternativa <i>indagini esaustive</i> in situ	Dai certificati di prova originali o dalle specifiche originali di progetto, con <i>prove estese</i> in situ; in alternativa da <i>prove esaustive</i> in situ	Tutti	1,00

(*) A meno delle ulteriori precisazioni già fornite nel § C8.5.4.

Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in cemento armato

Riferimenti normativi e modellazione

Riferimenti normativi

Per quanto riguarda gli edifici esistenti, la normativa italiana fornisce ai progettisti un discreto margine di manovra, per quanto riguarda:

- Scelta del livello di conoscenza e del tipo di analisi
- **Definizione delle proprietà dei materiali**
- Scelta del metodo di verifica

NTC 2018 e circ. 2019

- Prescrive l'uso delle **resistenze medie**
- Prescrive di **considerare eventuali dispersioni** [8.5.3]

- Prescrive l'uso delle “**Linee guida per la valutazione delle caratteristiche del calcestruzzo in opera**”, 2017
- Prescrive l'uso della UNI EN 13791:2008

Altre normative

E' stata pubblicata la **UNI EN 13791:2019**

Linee guida ponti, 2020

Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in cemento armato

Riferimenti normativi e modellazione

Riferimenti normativi

Per quanto riguarda gli edifici esistenti, la normativa italiana fornisce ai progettisti un discreto margine di manovra, per quanto riguarda:

- Scelta del livello di conoscenza e del tipo di analisi
- Definizione delle proprietà dei materiali
- Scelta del metodo di verifica

8.7.2. COSTRUZIONI IN CALCESTRUZZO ARMATO O IN ACCIAIO

Nelle costruzioni esistenti in calcestruzzo armato o in acciaio soggette ad azioni sismiche viene attivata la capacità di elementi e meccanismi resistenti, che possono essere “duttili” o “fragili”.

L’analisi sismica globale deve utilizzare, per quanto possibile, metodi di analisi che consentano di valutare in maniera appropriata sia la resistenza sia la duttilità disponibili. L’impiego di metodi di calcolo lineari richiede al progettista un’opportuna definizione del fattore di comportamento in relazione alle caratteristiche meccaniche, globali e locali, della struttura in esame.

I meccanismi “duttili” si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di deformazione o di resistenza in relazione al metodo utilizzato; i meccanismi “fragili” si verificano controllando che la domanda non superi la corrispondente capacità in termini di resistenza.

Flessione

Verifica

$$M_{Ed} / M_{Rd}$$

Verifica θ_u

[C8.7.2.1]

Taglio

Taglio per elementi senza armature a taglio [4.1.23]

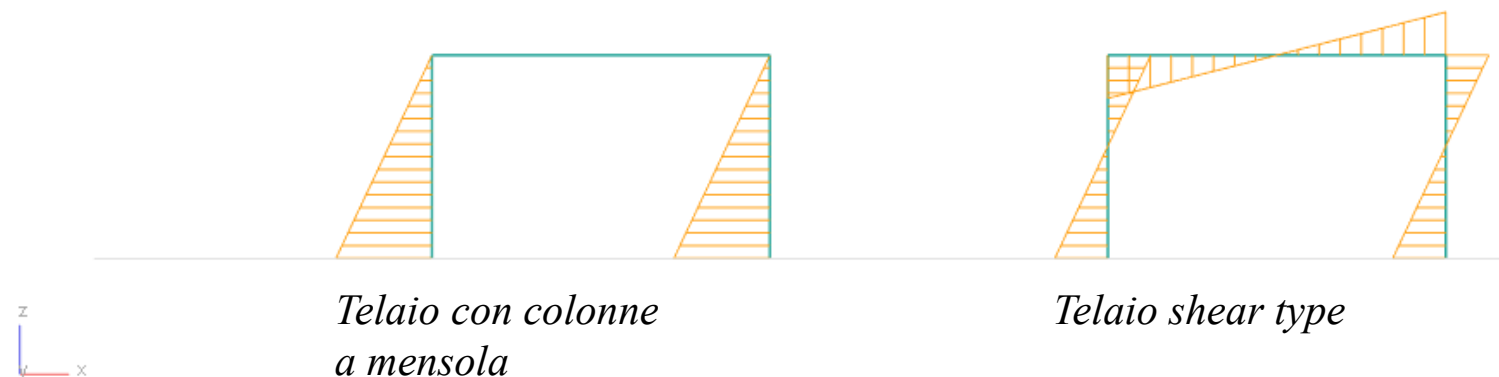
Taglio per elementi armati a taglio [4.1.29]

Taglio ciclico [C8.7.2.8]

Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento armato

Approccio di modellazione – Elementi monodimensionali

- ❑ Elementi trave e **colonna** modellati con materiale non lineare, con le seguenti caratteristiche:
- 1. Plasticità concentrate a flessione e taglio
- 2. Definizione esplicita del diagramma momento - curvatura
- 3. Potenziale collasso per rotazione ultima alla corda
- 4. Potenziale collasso per taglio
- 5. Pinching



Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento armato

Calibrazione e validazione dei materiali di analisi

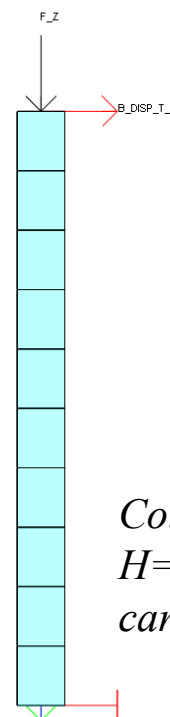
Elemento analizzato

- Colonne in c.a. 400x400mm
- Calcestruzzo C25/30
- Acciaio B450C
- Barre longitudinali 2+2B20, staffe B6-200mm
- $N_{Ed}=300\text{kN}$

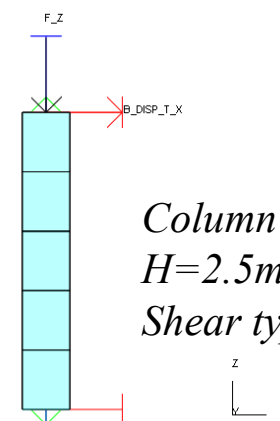
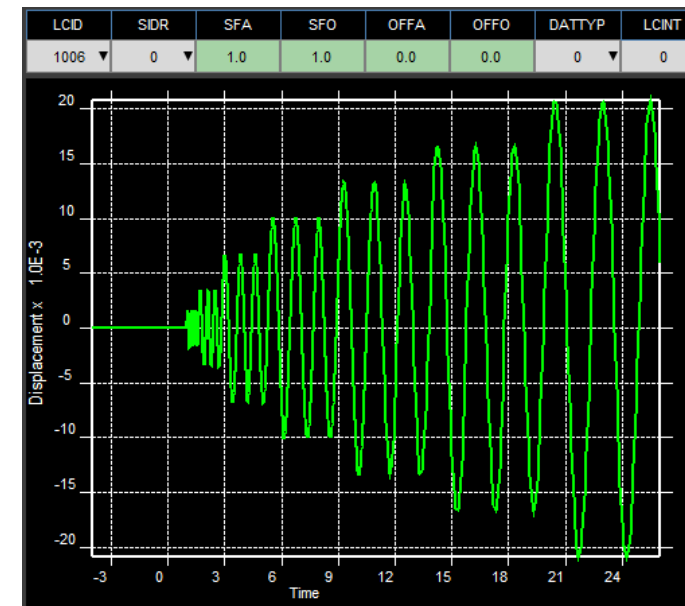
Si studiano due casi:

- Colonna a mensola “snella” $H=5\text{m}$
- Colonna “shear type” $H=2.5\text{m}$

Si applica uno spostamento laterale in testa ciclico con ampiezza crescente.



*Column 1:
 $H=5\text{m}$
cantilever*

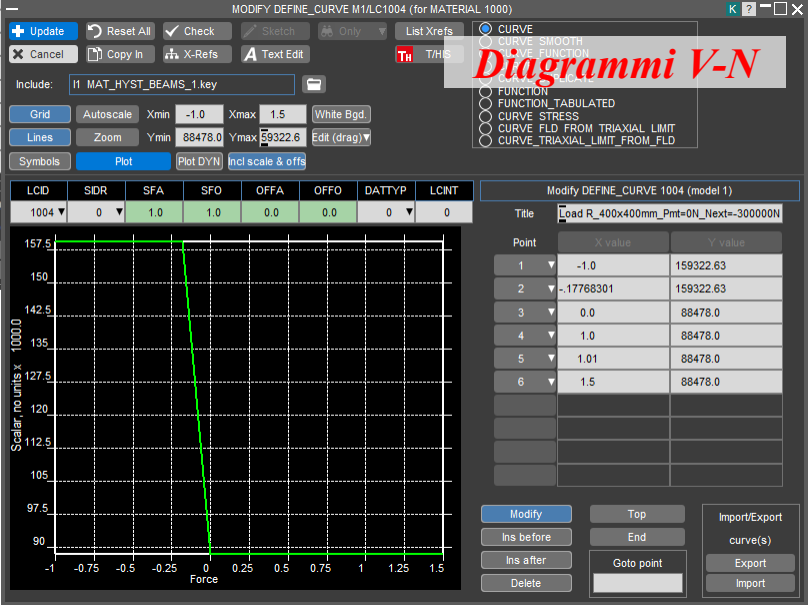
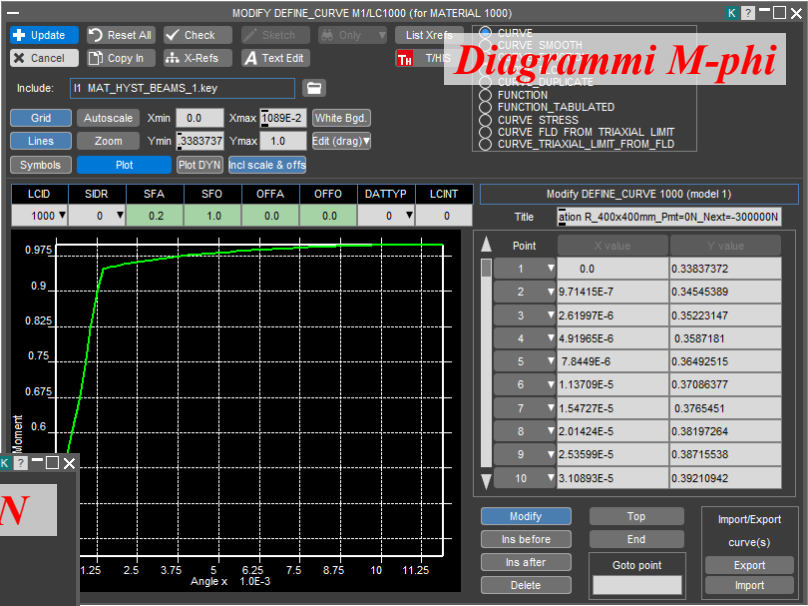
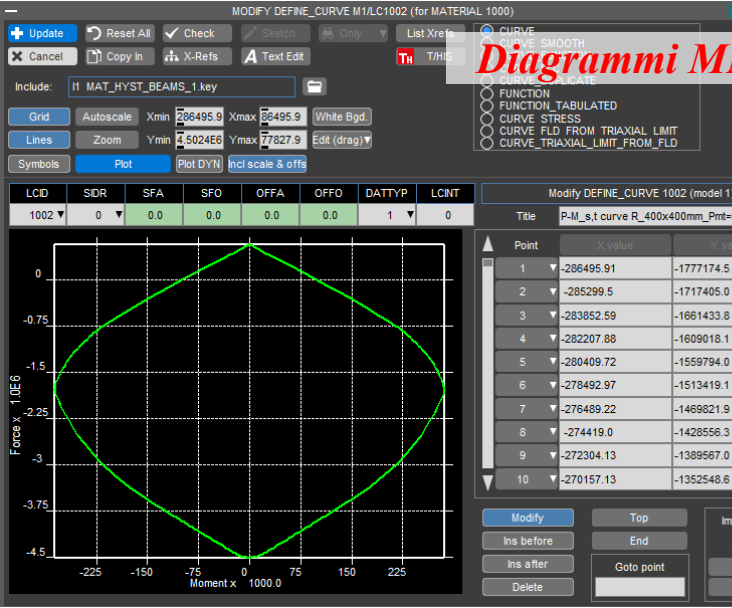
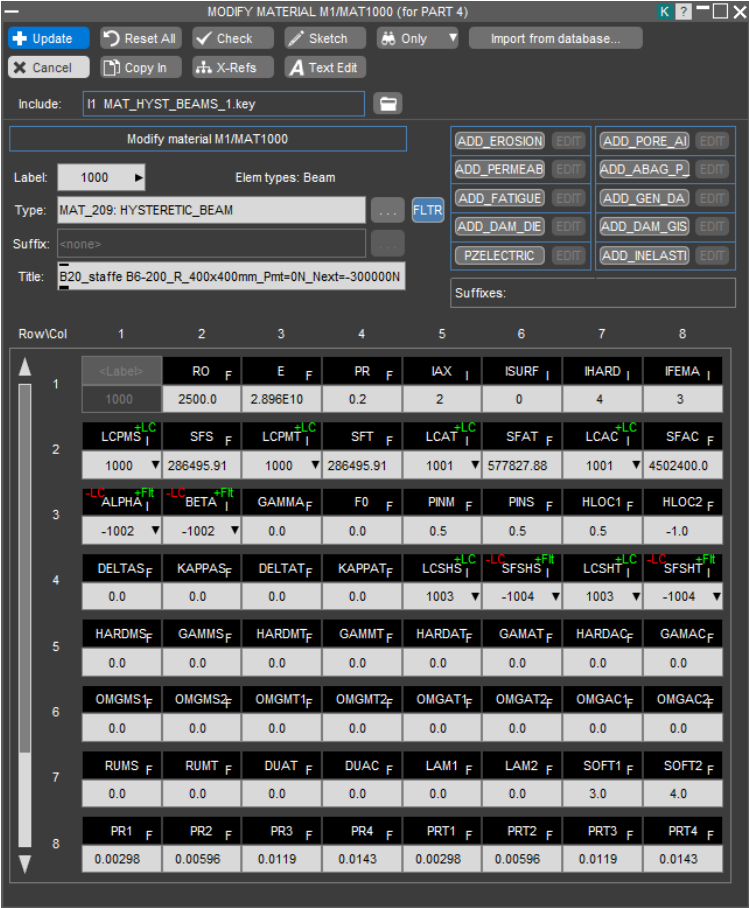


*Column 2:
 $H=2.5\text{m}$
Shear type*

Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento

Calibrazione e validazione dei materiali di analisi

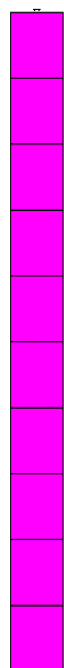
Material card



Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento armato

Test Colonna a mensola

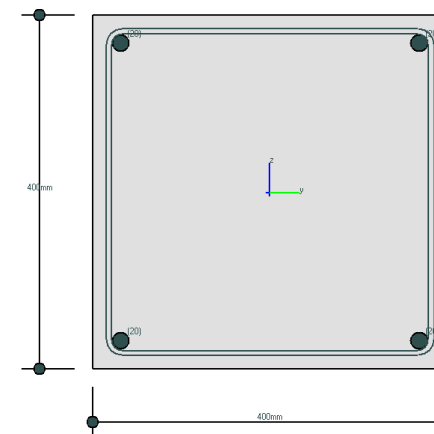
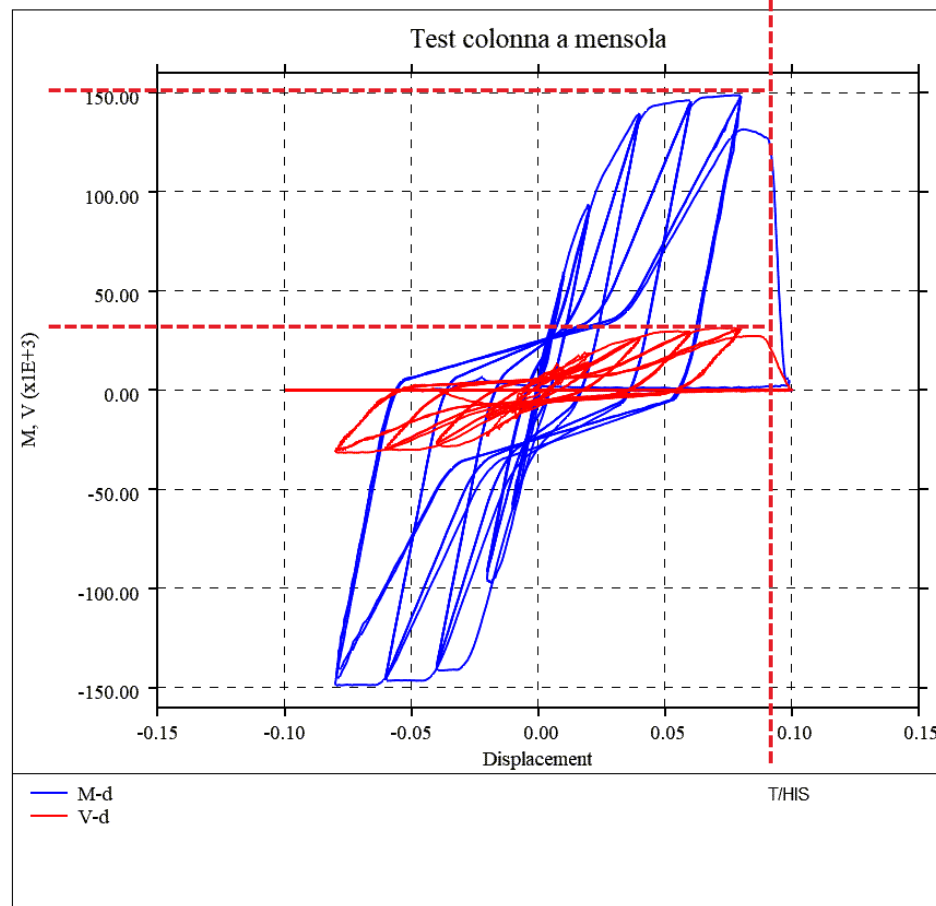
D3PLOT: Test_colonna



X Displacement
(Rel N1)



z
x
0.0



Geometria e armature colonna

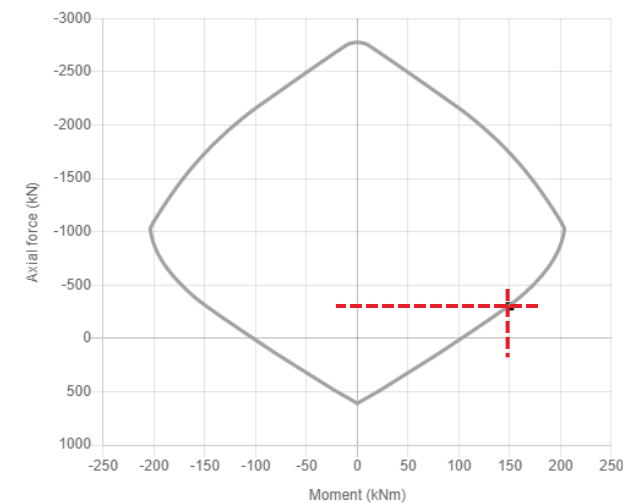
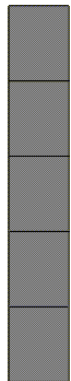


Diagramma MN

Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento armato

Test Colonna shear type

D3PLOT: Test_colonna



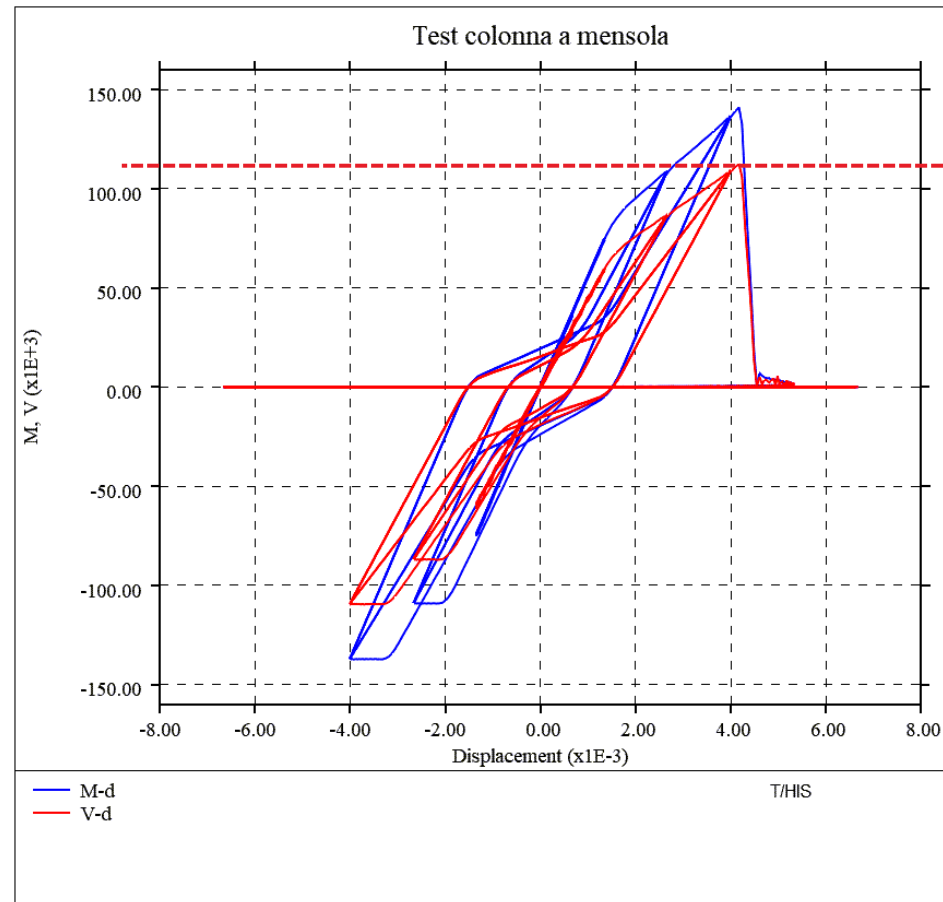
X Displacement
(Rel N3)

0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000
0.000



z
x

0.0



*Da confrontare con la
resistenza a taglio del
meccanismo considerato*

Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento armato

Considerazioni

Il materiale deve essere calibrato in modo tale che:

- Le sezioni raggiungano un momento ultimo a pressoflessione pari a quello che si otterrebbe da calcolo sezionale
- Le sezioni raggiungano una rottura per rotazione alla corda per valori di rotazione pari o minori a quelle suggerite dalla formula [C8.7.2.1]
- Le sezioni raggiungano una resistenza a taglio ultima pari a quella del meccanismo scelto e mostrino una rottura a taglio “fragile”

C8.7.2.3.2 Stato limite di prevenzione del collasso

Allo stato limite di prevenzione del collasso, la capacità θ_u in termini di rotazione totale rispetto alla corda può essere valutata alternativamente utilizzando modelli numerici che tengano in debito conto i contributi del calcestruzzo, dell'acciaio ed dell'aderenza acciaio calcestruzzo, ovvero mediante formule di comprovata validità, come, ad esempio, quelle riportate nel seguito.

$$\theta_u = \frac{1}{\gamma_d} 0,016 \cdot (0,3^v) \left[\frac{\max(0,01; \omega^*)}{\max(0,01; \omega)} f_c \right]^{0,225} \left(\frac{L_v}{h} \right)^{0,35} 25^{\left(\frac{\rho_{st} f_{yk}}{f_c} \right)} (1,25^{100 \rho_s}) \quad [\text{C8.7.2.1}]$$

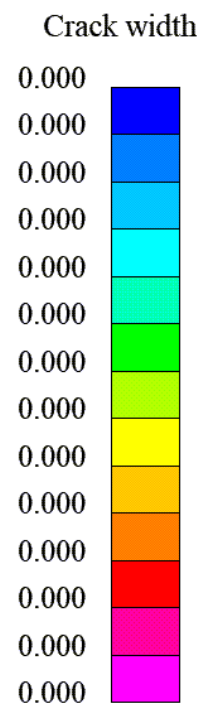
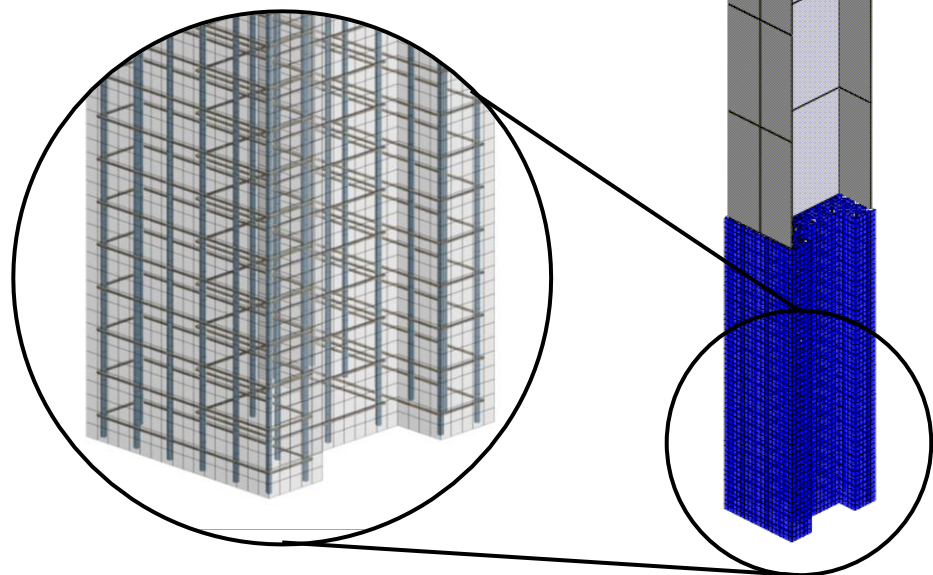
Se queste condizioni sono rispettate:

- **Tutti gli elementi collassati al termine dell'analisi hanno raggiunto una delle due condizioni di collasso (rotazione alla corda o taglio)**
- **Tutti gli elementi non collassati al termine dell'analisi non hanno raggiunto nessuna delle potenziali condizioni di collasso e sono quindi verificati per l'azione di progetto**

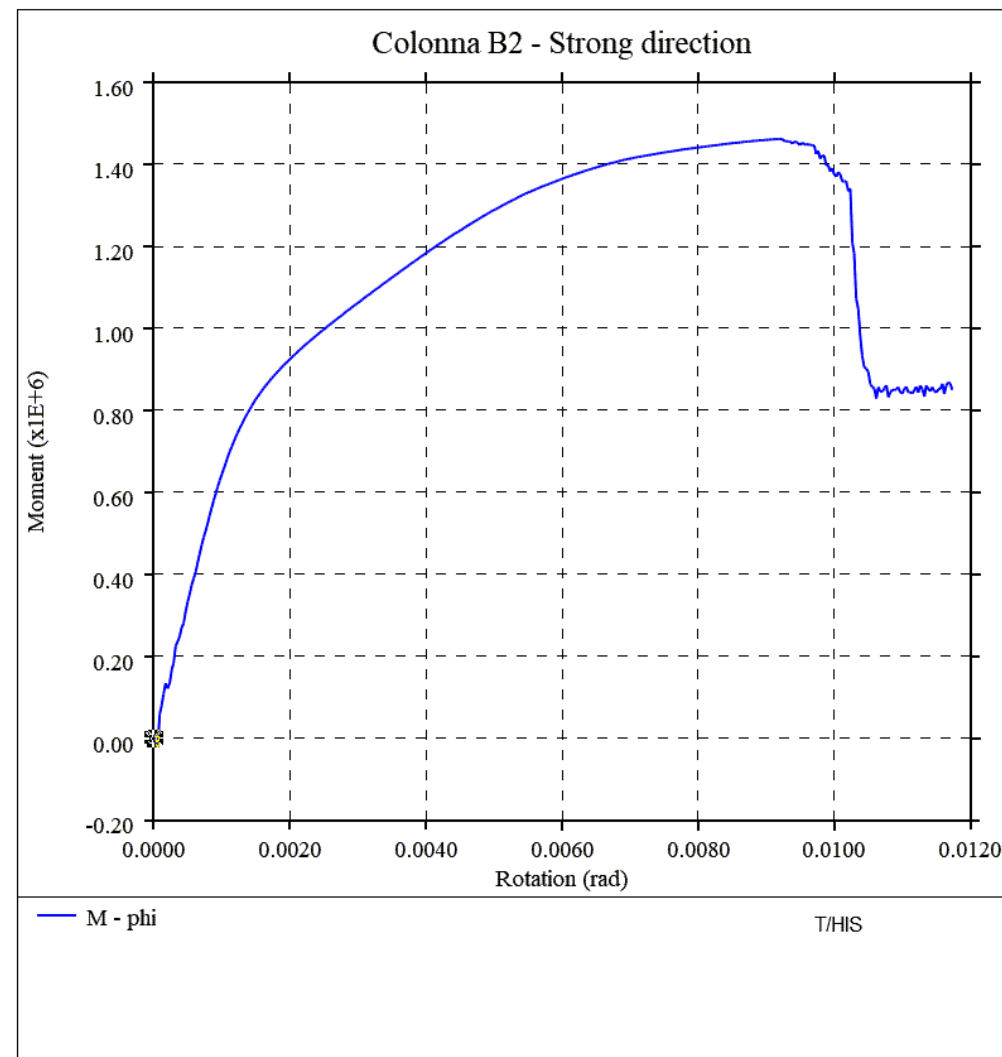
Modellazione teorica e riferimenti normativi per cemento armato

Modelli avanzati

Se la sezione oggetto di analisi non è rettangolare, ha una configurazione non simmetrica delle barre di armature, ecc.



0.0



Caso studio: Stadio di Firenze

Un esempio di “Total Design”

Intervento a basso impatto

Il progetto dello Stadio di Firenze si distingue per un interventi di rinforzo delle strutture esistenti a basso impatto.

Tecniche di rinforzo innovative

Tutti gli interventi proposti non modificano la geometria delle strutture originali di P.L.Nervi

Analisi avanzate

L'utilizzo di analisi avanzate ha permesso di ottimizzare le soluzioni ingegneristiche adottate nel progetto.







Caso studio: Stadio di Firenze

Documentazione disponibile

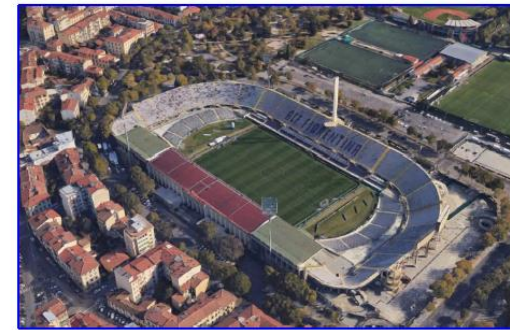
Principali fonti di informazione:

- Documentazione fotografica originale
- Indagini strutturali
- Elaborati grafici e relazioni originali
- Altre analisi svolte negli anni precedenti

RAPPORTO DI PROVA N. 00014 DEL 13/01/2021

RIF. V.A. N. 671/2419 DEL 05/10/2020
RIF. V.A. N. 710/2563 DEL 16/10/2020
RIF. V.A. N. 844/2997 DEL 30/11/2020

Committente:	COMUNE DI FIRENZE - DIREZIONE SERVIZI TECNICI Via Giotto 4 - 50121 Firenze (FI)
Cantiere:	STADIO COMUNALE ARTEMIO FRANCHI Firenze (FI)
V.I.E.:	n.12620 del 05/10/2020, n.12623 del 09/10/2020, n.12624 del 15/10/2020, n.12625 del 16/10/2020, n.12631 del 25/11/2020, n.12632 del 30/11/2020.
Esperienze effettuate:	N. 25 PROVE SONREB; N. 32 PROVE PACOMETRICHE; N. 16 INDAGINI GEORADAR.

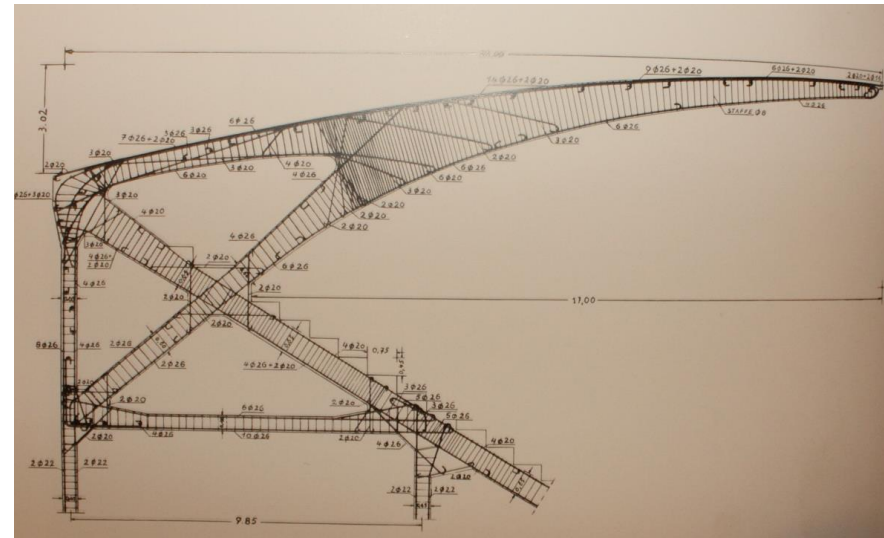
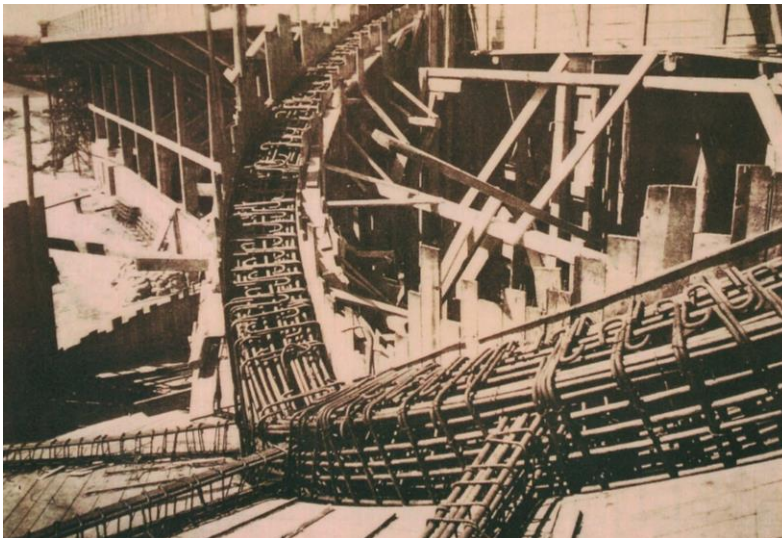


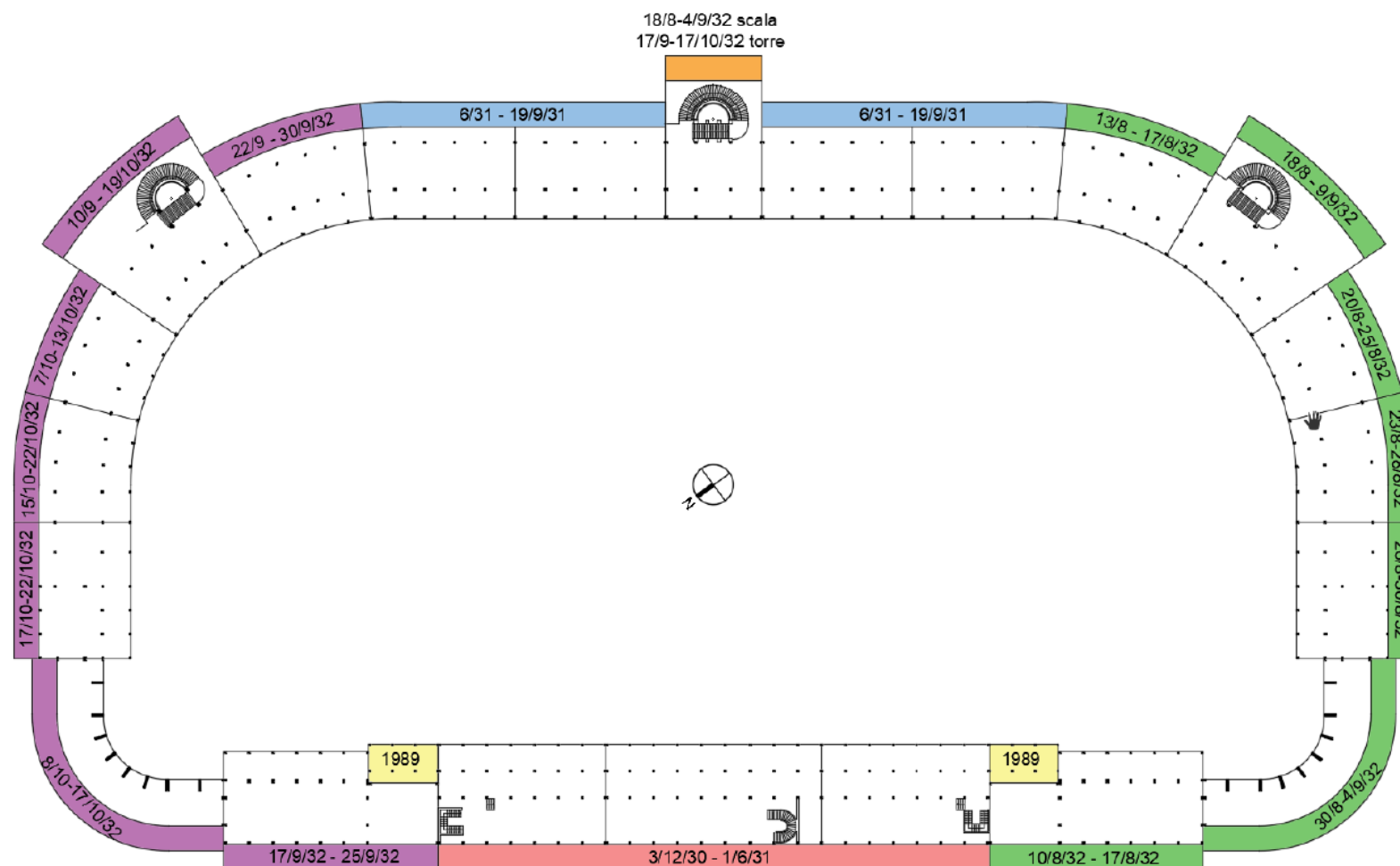
Stadio Comunale "G. Berta",

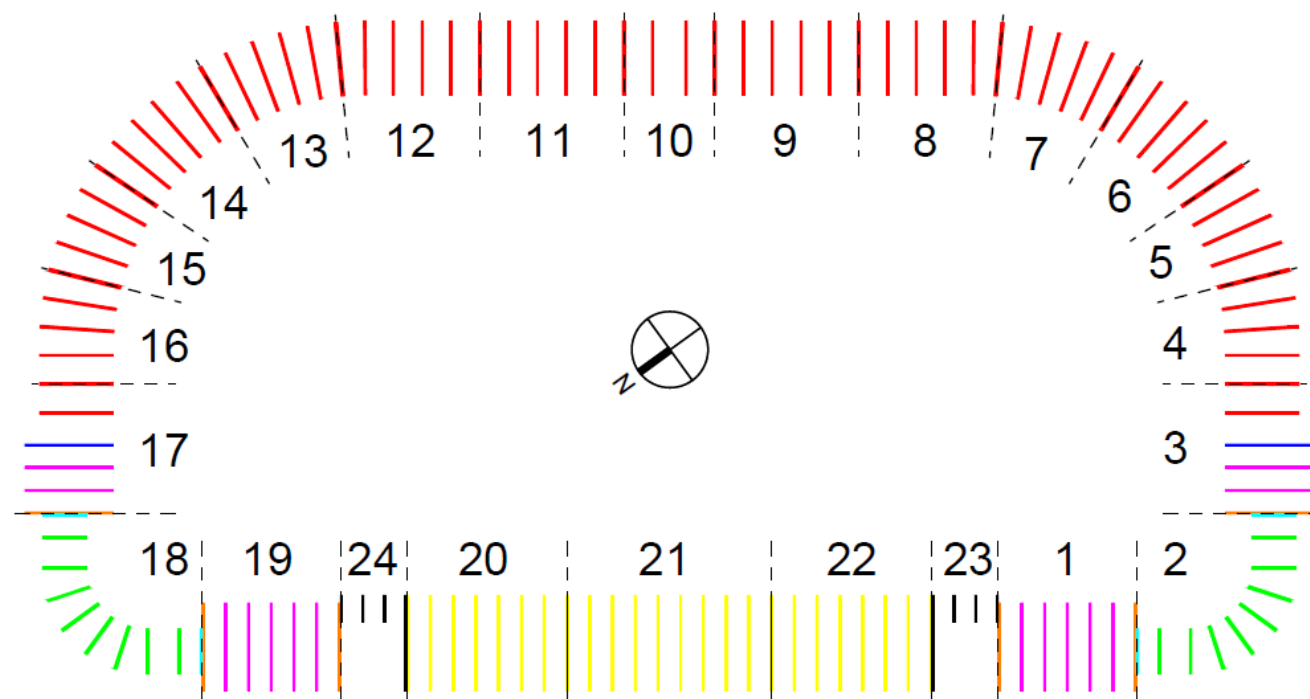
Collaudo tribune cemento armato

di cui nell'atto d'accollo 4 Agosto 1932 (X)

Impresa Ingg. P. L. Nervi e G. Bartoli







 TELAIO 1	 TELAIO 2	 TELAIO 3	 TELAIO 4
 TELAIO 5	 TELAIO 6	 TELAIO 7	 TELAIO 8

128 telai
24 unità strutturali

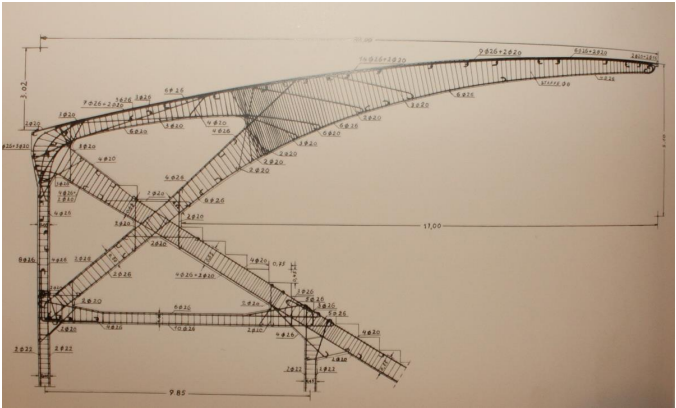
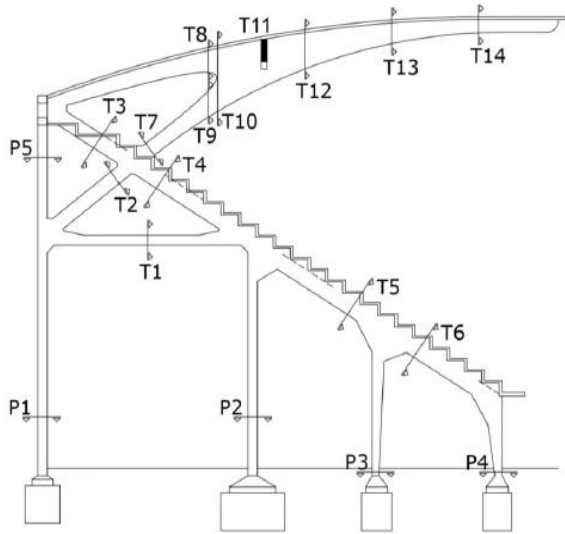
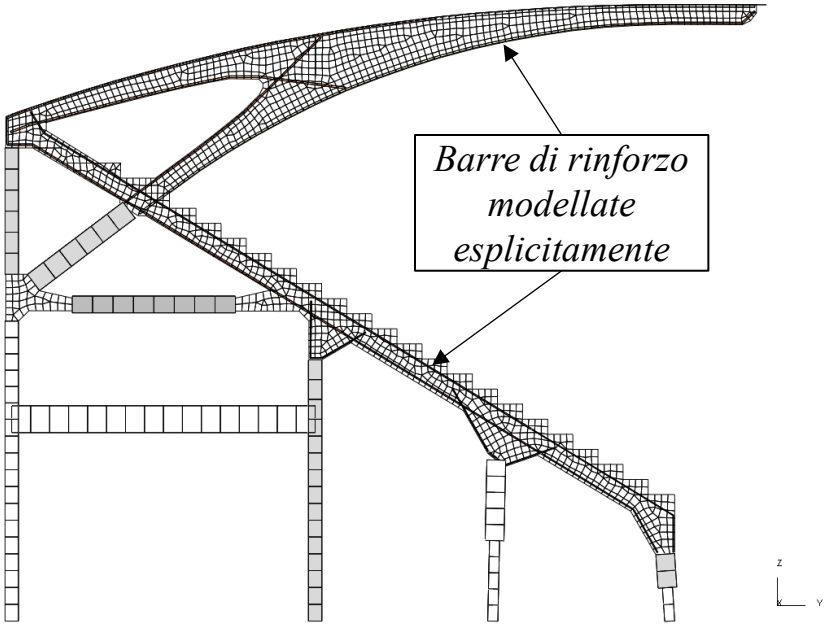
Caso studio: Stadio di Firenze

Modellazione: Modello analitico 3D in LS-DYNA

Tutte le informazioni su proprietà dei materiali e dettagli costruttivi sono state trasferite nel modello analitico

Telaio 1

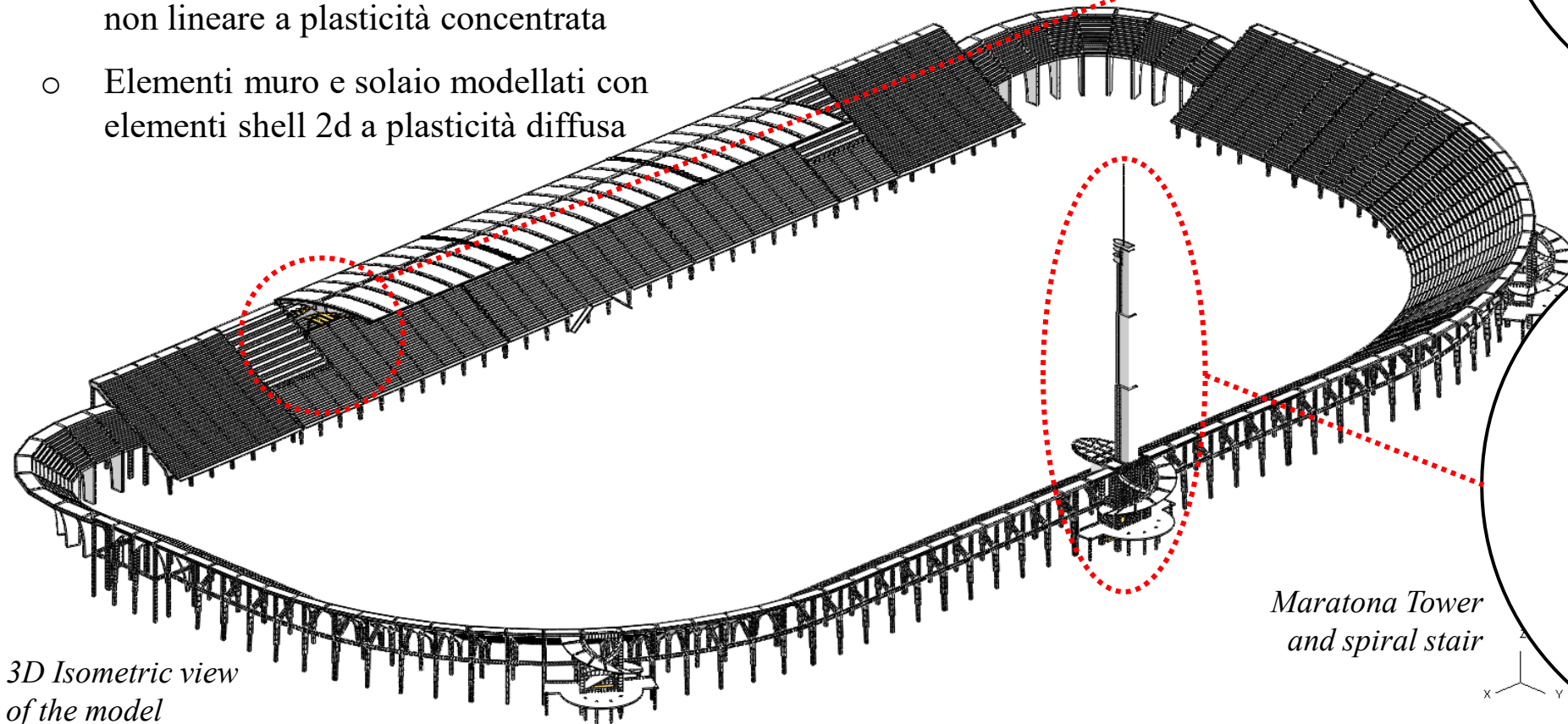
Blocco	Sezione	B [mm]	H [mm]	Armatura inf. 1	Armatura inf. 2	Armatura sup. 1	Armatura sup. 2	Staffe [mm/cm]
20-21-22	P1	400	400	2 Ø 22	-	2 Ø 22	-	Ø 6/20
20-21-22	P2	400	400	2 Ø 22	-	2 Ø 22	-	Ø 6/15
20-21-22	P3	300	300	2 Ø 20	-	2 Ø 20	-	Ø 6/20
20-21-22	P4	300	300	2 Ø 16	-	2 Ø 16	-	Ø 6/25
20-21-22	P5	400	400	8 Ø 26	-	4 Ø 26	-	Ø 6/20
20-21-22	T1	400	500	6 Ø 20	-	6 Ø 26	-	Ø 8/20
20-21-22	T2	400	600	2 Ø 26	-	2 Ø 26	-	Ø 8/20
20-21-22	T3	400	650	4 Ø 26	-	4 Ø 20	-	Ø 8/20
20-21-22	T4	400	650	2Ø20	4Ø26	4 Ø 20	-	Ø 8/20
20-21-22	T5	300	600	2Ø20	4Ø16	4 Ø 20	-	Ø 8/15
20-21-22	T6	300	600	4 Ø 16	-	2 Ø 16	-	Ø 8/20
20-21-22	T7	400	600	6 Ø 26	-	4 Ø 26	-	Ø 8/20



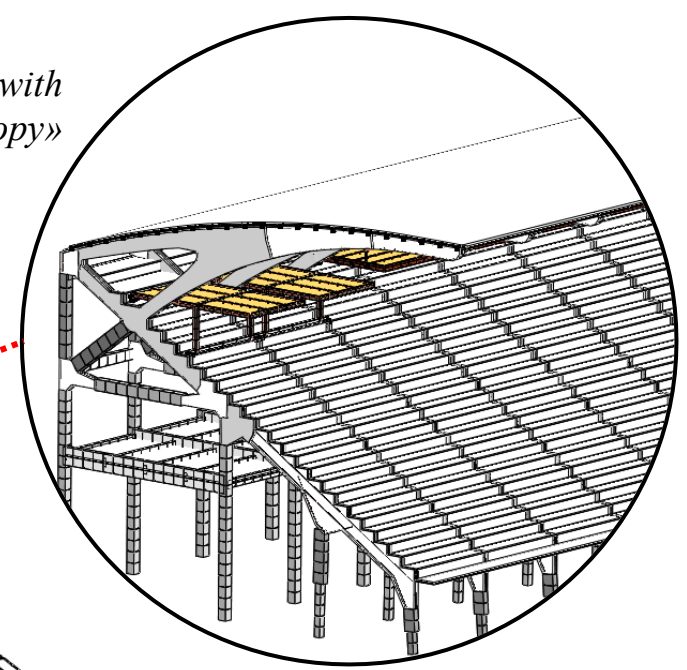
Caso studio: Stadio di Firenze

Modellazione: Modello analitico 3D in LS-DYNA

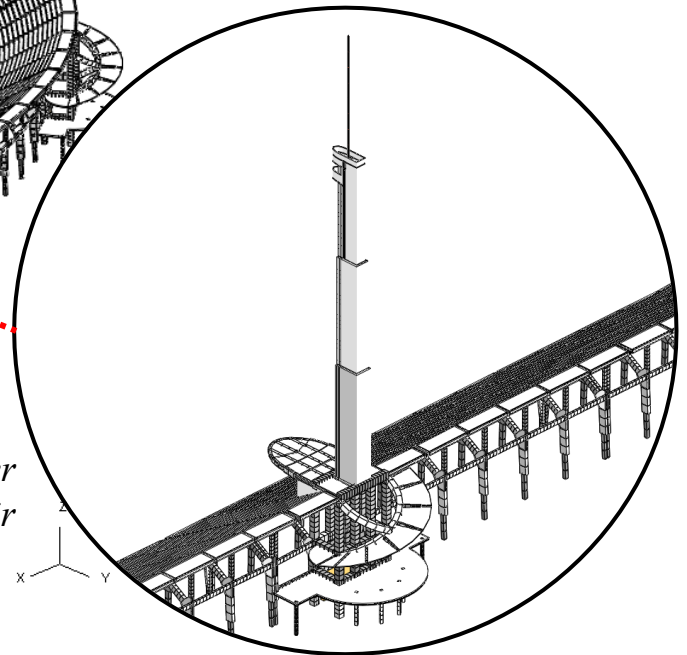
- Modello globale dei 24 blocchi
- Elementi trave modellati con materiale non lineare a plasticità concentrata
- Elementi muro e solaio modellati con elementi shell 2d a plasticità diffusa



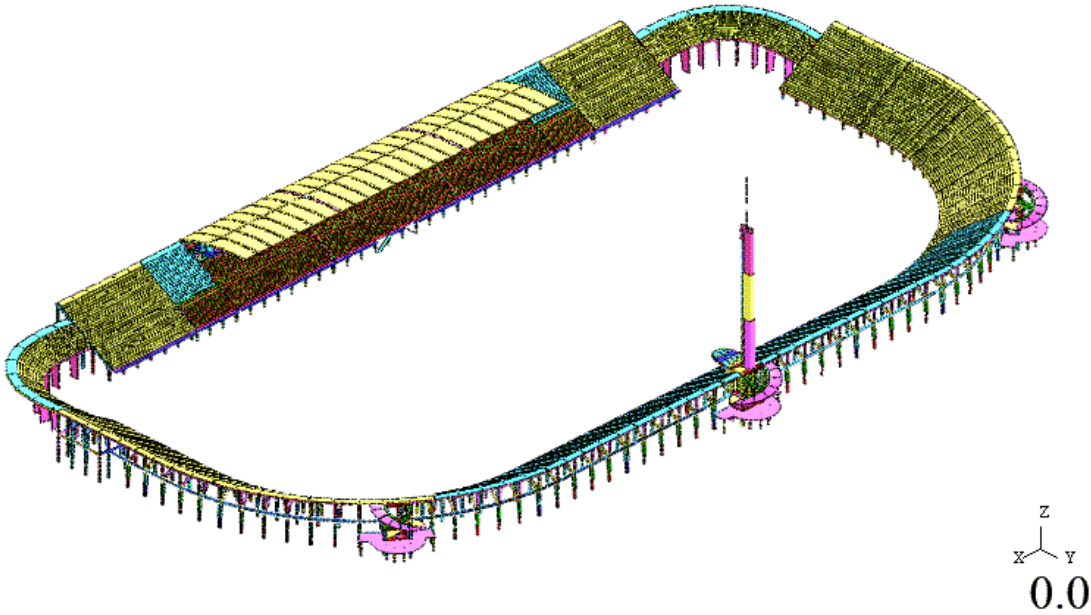
Central stands with
«Nervi Canopy»



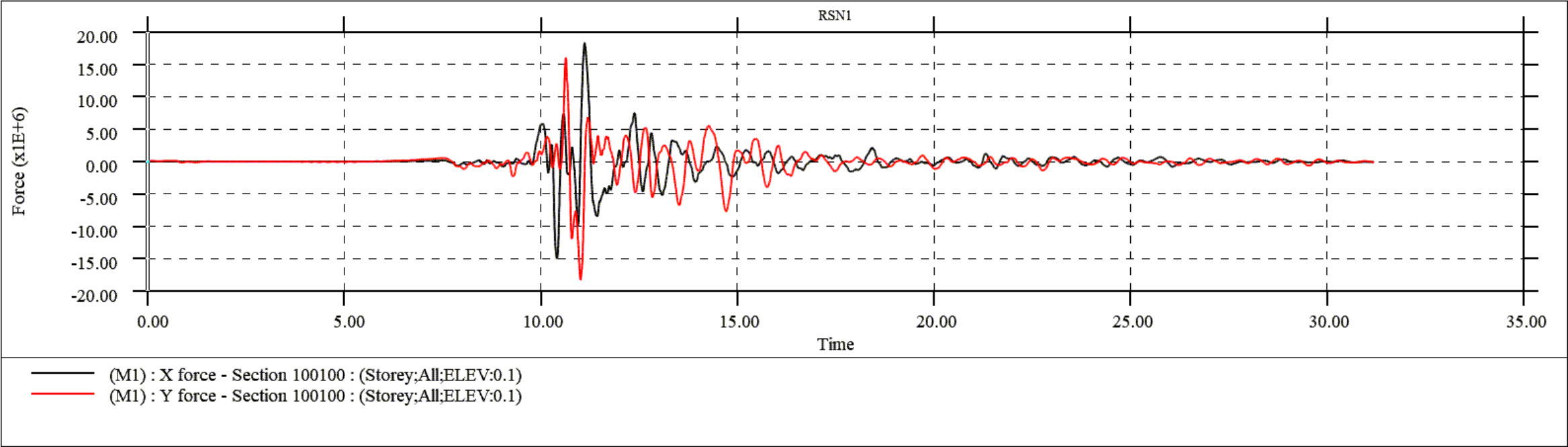
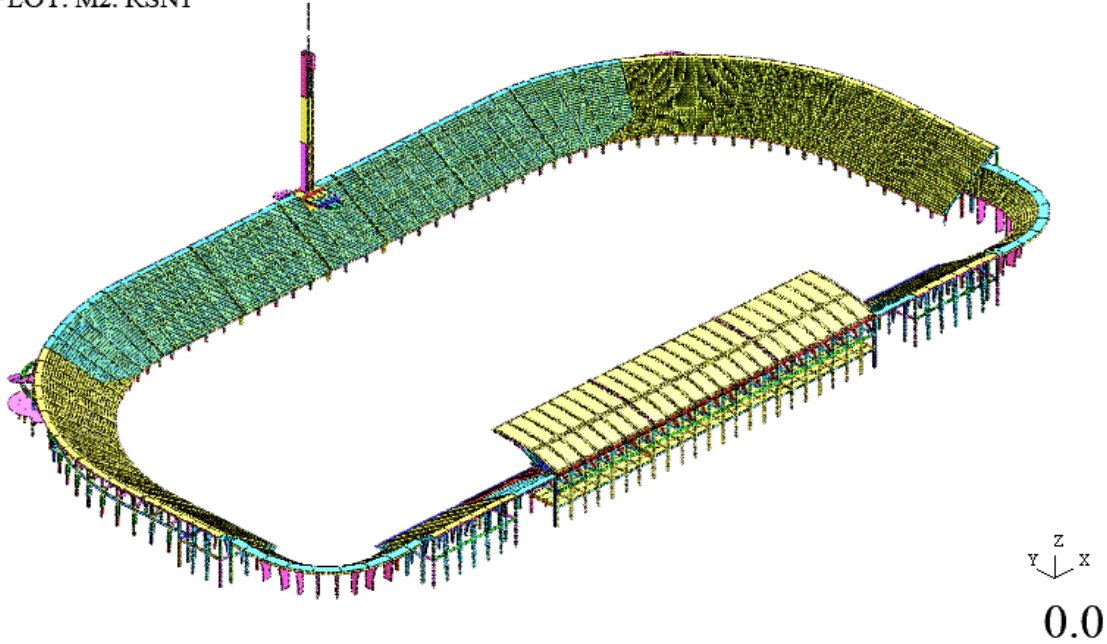
Maratona Tower and spiral stair



D3PLOT: M1: RSN1



D3PLOT: M2: RSN1

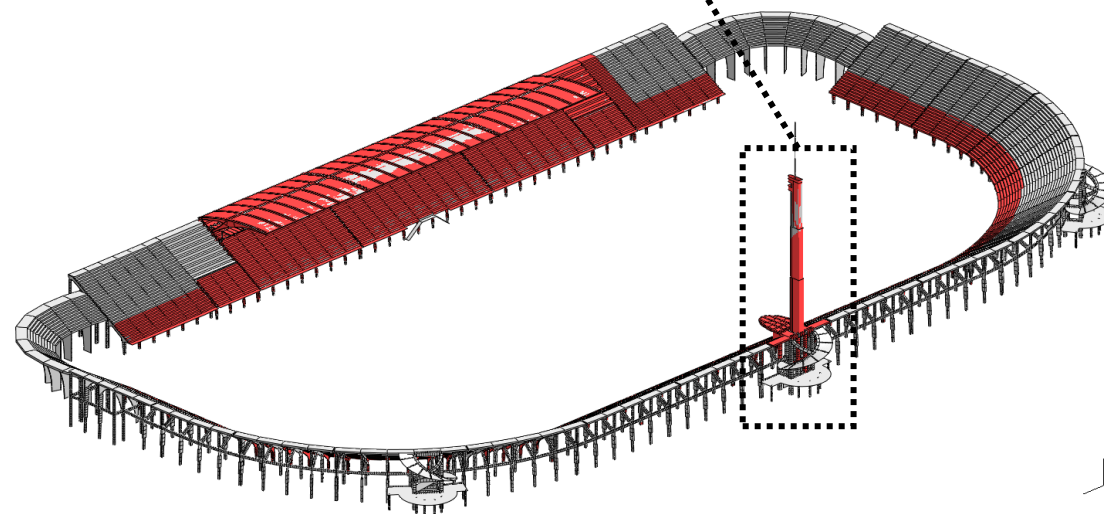
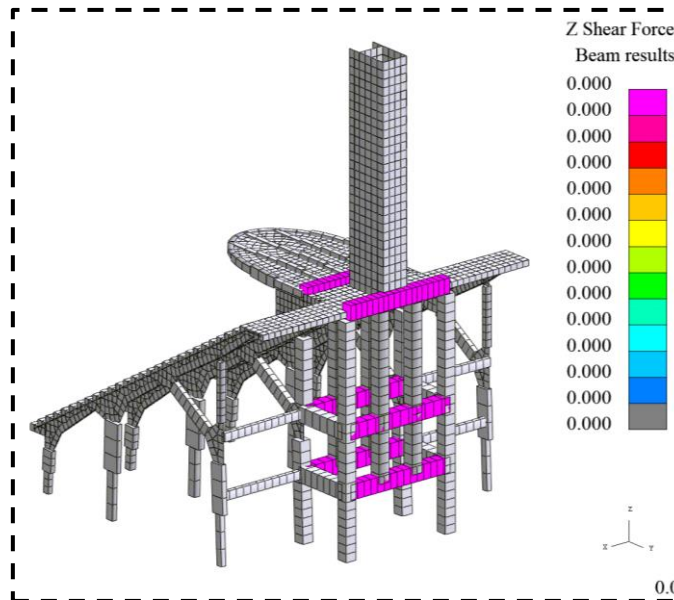
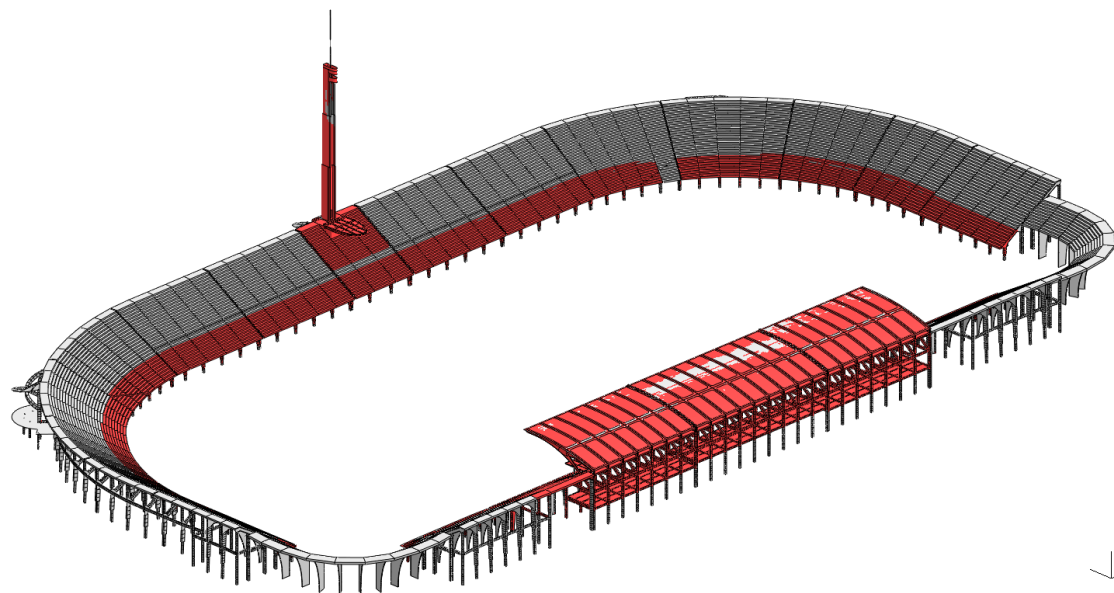


Caso studio: Stadio di Firenze

Risultati dell'analisi

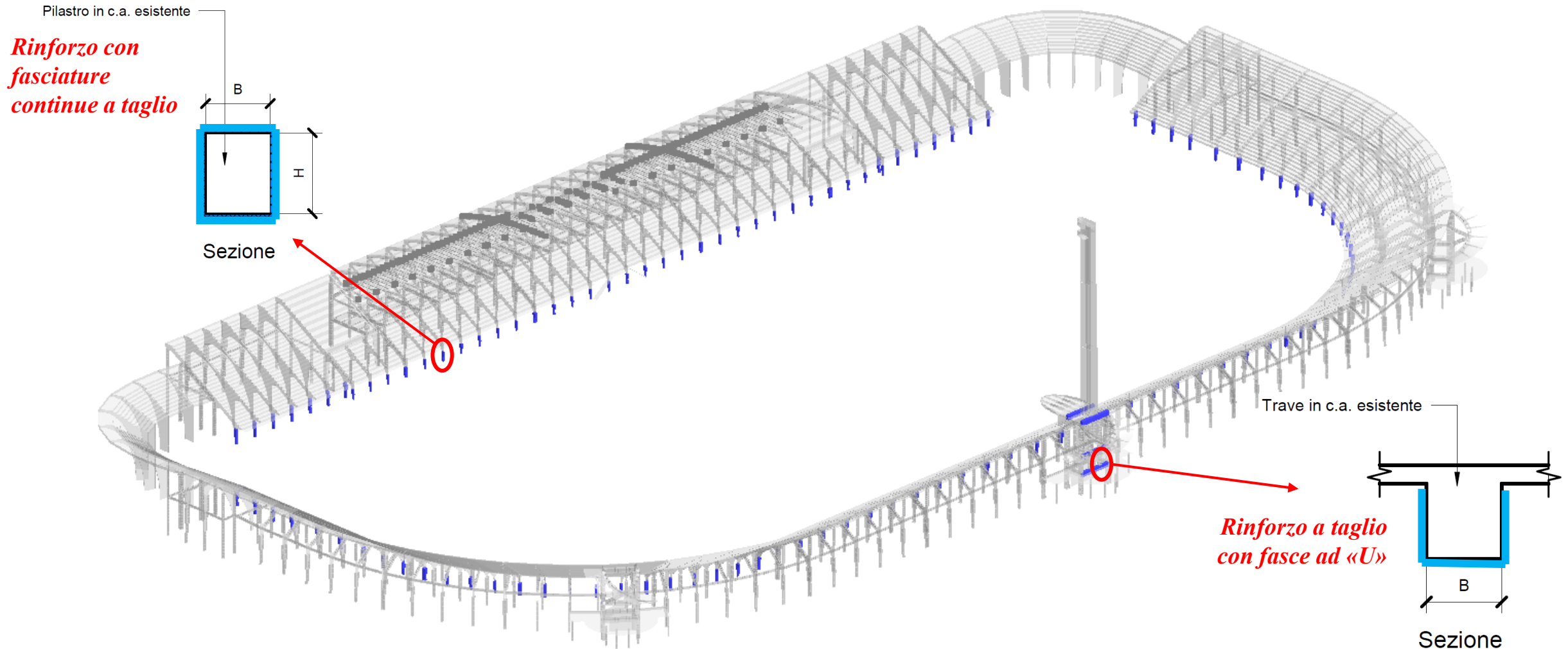
Le vulnerabilità sismiche possono essere ben individuate:

- Collasso a taglio delle travi del telaio di supporto della torre di Maratona
- Collasso a taglio di tutte le colonne interne lato campo (colonne tozze)



Caso studio: Stadio di Firenze

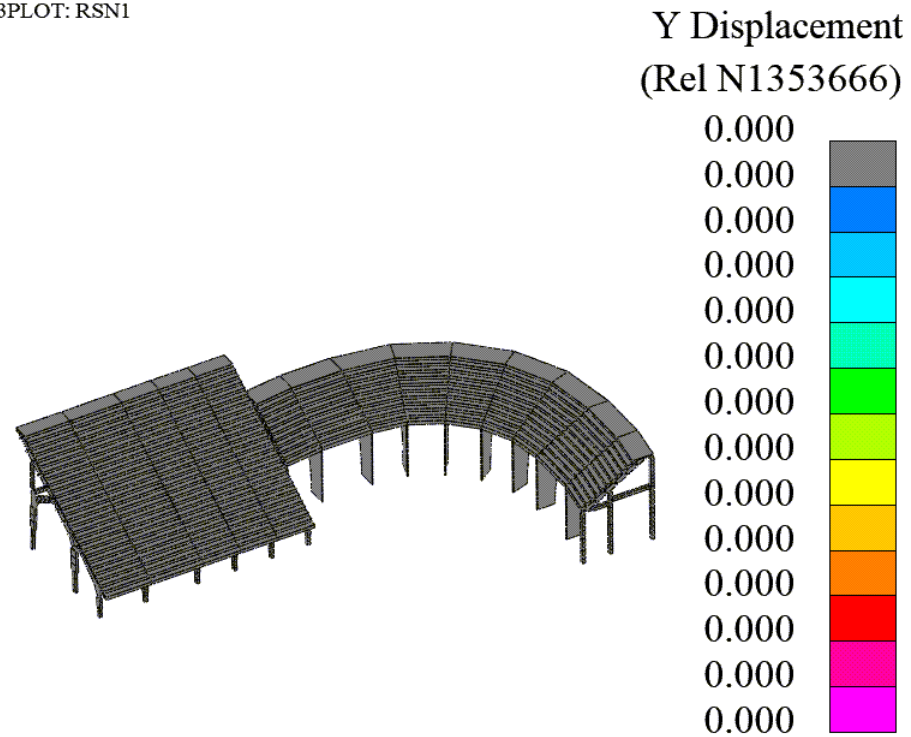
Strategia di rinforzo, con riferimento alla CNR-DT 200 R1/2013



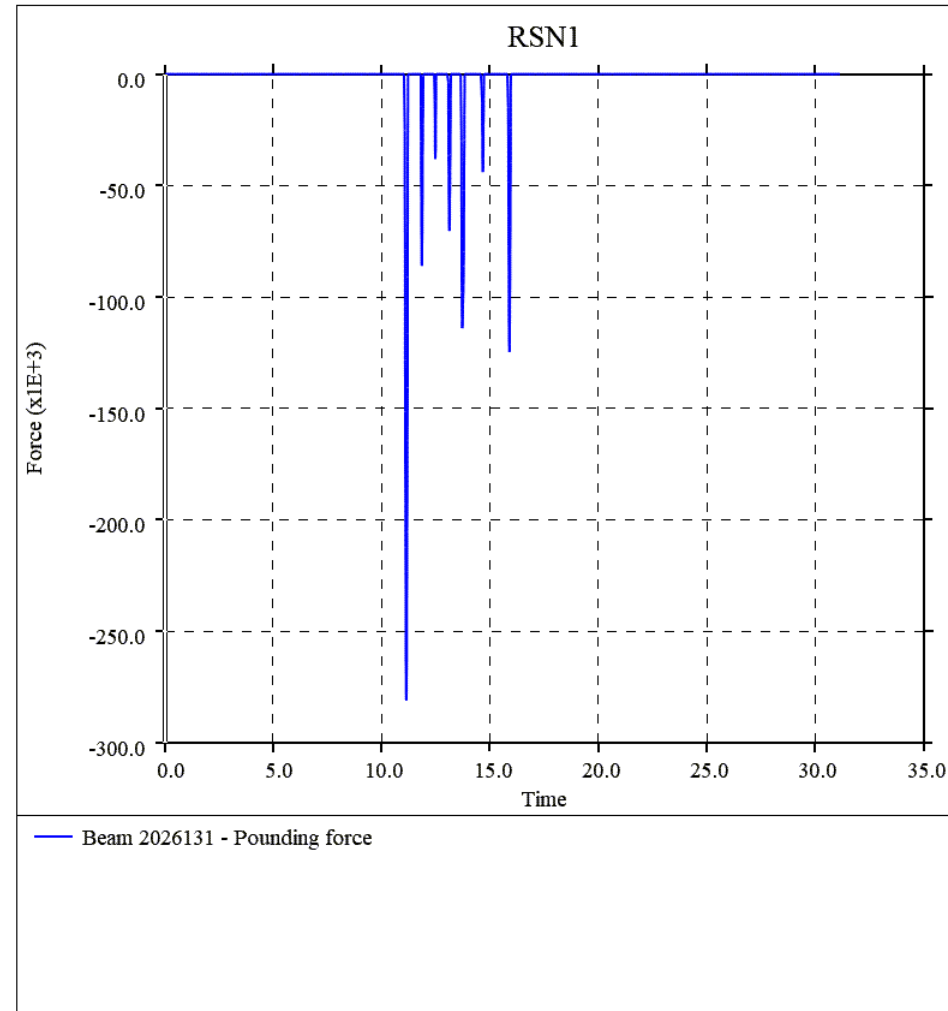
Caso studio: Stadio di Firenze

Modellazione esplicita del martellamento tra blocchi

D3PLOT: RSN1



0.0



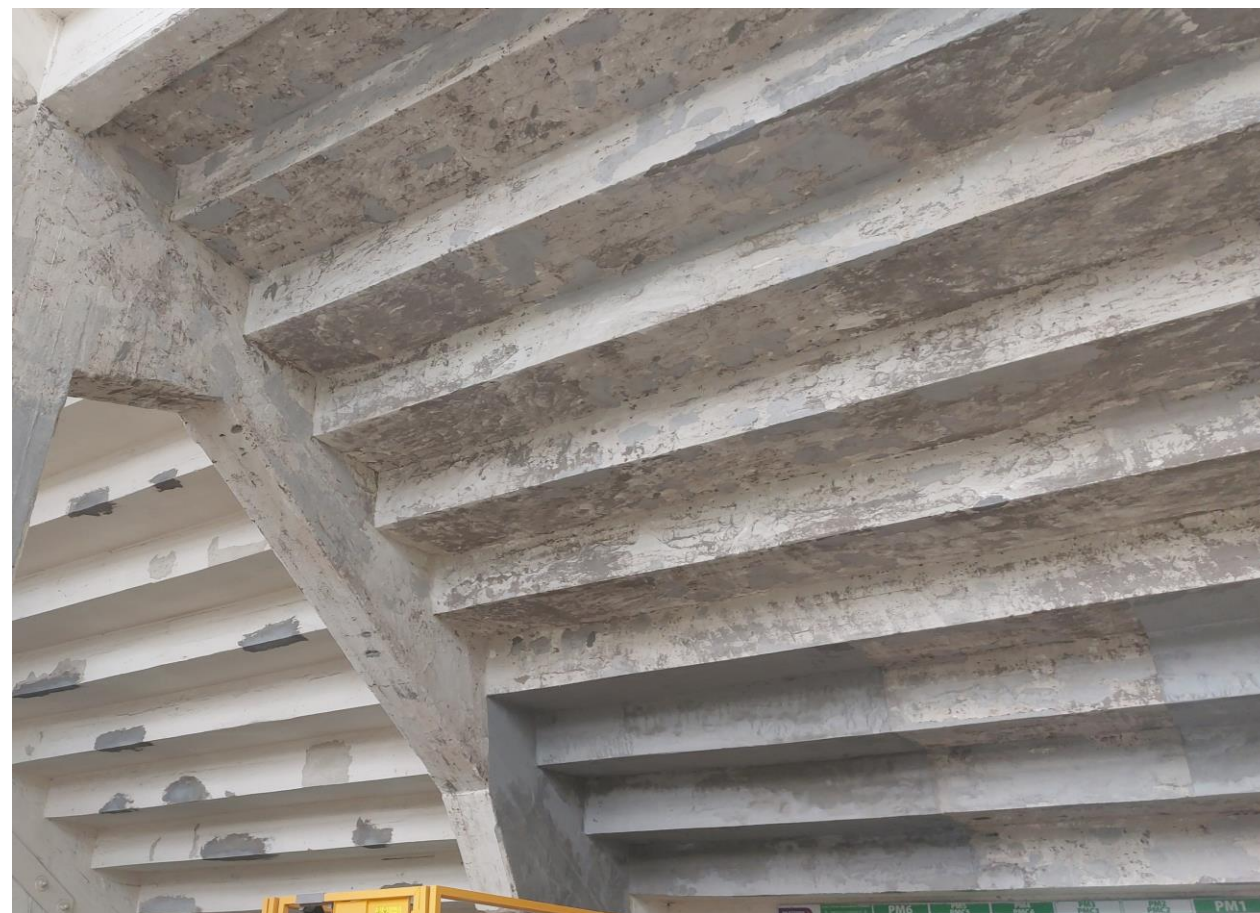
Caso studio: Stadio di Firenze

Intervento di fasciatura a taglio delle colonne interne



Caso studio: Stadio di Firenze

Preparazione del supporto



Caso studio: Stadio di Firenze

Trattamenti finali





Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in muratura



Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in muratura

Caratteristiche del materiale e riferimenti normativi

Caratteristiche del materiale

La muratura in mattoni è un materiale composito (blocchi + malta), le cui proprietà dipendono molto da quelle dei singoli componenti. Inoltre ha delle proprietà direzionali molto spiccate.

Riferimenti normativi

La normativa NTC2018 fornisce molte indicazioni (soprattutto in circolare), circa le proprietà dei materiali dei principali tipi di muratura e circa i fattori moltiplicativi da applicare per i diversi sistemi di rinforzo.



Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in muratura

Caratteristiche del materiale e riferimenti normativi

Riferimenti normativi

- Tabella C8.5.I: proprietà meccaniche della muratura
- Tabella C8.5.II: coefficienti correttivi relativi a diverse tipologie di rinforzo

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

Tipologia di muratura	Stato di fatto			Interventi di consolidamento			
	Malta buona	Ricorsi o listature	Connessione trasversale	Iniezione di miscela leganti (*)	Intonaco armato (**)	Ristilatura armata con connessione dei paramenti (**)	Massimo coefficiente complessivo
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,5	1,3	1,5	2	2,5	1,6	3,5
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo	1,4	1,2	1,5	1,7	2,0	1,5	3,0
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	1,3	1,1	1,3	1,5	1,5	1,4	2,4
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,5	1,2	1,3	1,4	1,7	1,1	2,0
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,6	-	1,2	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura a blocchi lapidei squadrati	1,2	-	1,2	1,2	1,2	-	1,4
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	(***)	-	1,3 (****)	1,2	1,5	1,2	1,8
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es: doppio UNI foratura ≤40%)	1,2	-	-	-	1,3	-	1,3

(*) I coefficienti correttivi relativi alle iniezioni di miscela leganti devono essere commisurati all'effettivo beneficio apportato alla muratura, riscontrabile con verifiche sia nella fase di esecuzione (iniettabilità) sia a posteriori (riscontri sperimentali attraverso prove soniche o similari).

(**) Valori da ridurre convenientemente nel caso di pareti di notevole spessore (p.es. > 70 cm).

(***) Nel caso di muratura di mattoni si intende come "malta buona" una malta con resistenza media a compressione f_m superiore a 2 N/mm². In tal caso il coefficiente correttivo può essere posto pari a $f_m^{0.35}$ (f_m in N/mm²).

(****) Nel caso di muratura di mattoni si intende come muratura trasversalmente connessa quella apparecchiata a regola d'arte.

Tabella C8.5.I - Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max		min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbazzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	
Muratura a blocchi lapidei squadrati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

(*) Nella muratura a conci sbazzati i valori di resistenza tabellati si possono incrementare se si riscontra la sistematica presenza di zeppe profonde in pietra che migliorano i contatti e aumentano l'ammorsamento tra gli elementi lapidei; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente pari a 1,2.

(**) Data la varietà litologica della pietra tenera, il peso specifico è molto variabile ma può essere facilmente stimato con prove dirette. Nel caso di muratura a conci regolari di pietra tenera, in presenza di una caratterizzazione diretta della resistenza a compressione degli elementi costituenti, la resistenza a compressione f_{pu} può essere valutata attraverso le indicazioni del § 11.10 delle NTC.

(***) Nella muratura a mattoni pieni è opportuno ridurre i valori tabellati nel caso di giunti con spessore superiore a 13 mm; in assenza di valutazioni più precise, si utilizzi un coefficiente riduttivo pari a 0,7 per le resistenze e 0,8 per i moduli elastici.

Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in muratura

Caratteristiche del materiale e riferimenti normativi

Riferimenti normativi

- Scelta del livello di conoscenza
- Prove per la definizione delle proprietà dei materiali

C8.5.4.1 COSTRUZIONI DI MURATURA

Nel caso in cui la muratura in esame possa essere ricondotta alle tipologie murarie presenti nelle Tabelle C8.5.I e C8.5.II, i valori medi dei parametri meccanici da utilizzare per le verifiche possono essere definiti, con riferimento alla tipologia muraria in considerazione per i diversi livelli di conoscenza, come segue:

LC1: -Resistenze: i valori minimi degli intervalli riportati in Tabella C8.5.I.

- Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta.

LC2: - Resistenze: i valori medi degli intervalli riportati in Tabella C8.5.I

-Moduli elastici: i valori medi degli intervalli riportati nella tabella suddetta.

LC3: -I valori delle resistenze e dei moduli elastici riportati in Tabella C8.5.I individuano una distribuzione a-priori che può essere aggiornata sulla base dei risultati delle misure eseguite in sito. Considerato il generico parametro X , una stima dei parametri μ' e σ' della distribuzione a-priori può essere dedotta dai valori minimo e massimo in tabella, con le formule seguenti:

$$\mu' = \frac{1}{2}(X_{\min} + X_{\max}) \quad [C8.5.4.1]$$

$$\sigma' = \frac{1}{2}(X_{\max} - X_{\min}) \quad [C8.5.4.2]$$

Eseguito un numero n di prove dirette, l'aggiornamento del valore medio può essere effettuato come segue:

$$\mu'' = \frac{n\bar{X} + \kappa\mu'}{n + \kappa} \quad [C8.5.4.3]$$

dove $\bar{X}$ è la media delle n prove dirette e κ è un coefficiente che tiene conto del rapporto tra la dispersione (varianza) della stima effettuata attraverso le prove (combinazione tra incertezza della misurazione sperimentale e dispersione dei parametri meccanici nell'ambito dell'edificio che si sta analizzando) e la varianza σ'^2 della distribuzione a-priori.

Nel determinare la stima aggiornata del valore medio del parametro meccanico, il coefficiente κ rappresenta il peso relativo della distribuzione a-priori (associata ai parametri della tabella C.8.5.I) rispetto alle prove sperimentali².

Qualora la media delle n prove dirette $\bar{X}$ sia significativamente diversa dal valore μ' adottato per la distribuzione a-priori, e quindi la differenza tra μ' e μ'' risulti rilevante, l'accettabilità del risultato ottenuto applicando l'equazione C8.5.4.3 deve essere adeguatamente motivata.

Tabella C8.5.III -Valori del coefficiente κ suggeriti per l'aggiornamento del valore medio dei parametri meccanici, secondo l'equazione [C8.5.4.3], con riferimento ai più diffusi metodi di indagine diretta sulle proprietà meccaniche della muratura.

Metodo di prova	Parametro	κ
Prova di compressione diretta (su una porzione di parete muraria)	E	1,5
	f	1
Martinetto piatto doppio	E	1,5
	f (*)	2 (*)
Prova di compressione e taglio (su un pannello isolato nella parete muraria) – prova tipo Sheppard	G	1,5
	$\tau_0 - f_{\tau 0}$	1
Prova di compressione diagonale	G	1,5
	τ_0	1
Prova di taglio diretto sul giunto	$f_{\tau 0}$	2
Prove in laboratorio sui costituenti (**)	f_b, f_m, f_g	2

Analisi avanzate e sistemi di rinforzo per strutture in muratura

Caratteristiche del materiale e riferimenti normativi

Riferimenti normativi

- Criteri di verifica degli elementi (maschi murari e fasce di piano)

Nei maschi murari i principali meccanismi di rottura nel piano sono:

- pressoflessione;
- taglio-scorrimento;
- taglio con fessurazione diagonale.

Per la verifica a pressoflessione si rimanda al § 7.8.2.2.1 delle NTC, precisando che lo spostamento ultimo è valutato in base alla rotazione della corda nelle due sezioni di estremità i e j del maschio data dalle formule [C8.7.1.13].

$$\begin{aligned}\theta_i &= \left| \varphi_i - \frac{u_i - u_0}{h_i} \right| \\ \theta_j &= \left| \varphi_j - \frac{u_0 - u_j}{h_j} \right|\end{aligned}\quad [C8.7.1.13]$$

dove (assumendo nel piano della parete una terna destrorsa): φ_i e φ_j sono le rotazioni, u_j e u_i sono gli spostamenti orizzontali, u_0 è lo spostamento orizzontale del punto di flesso, h_i e h_j sono le luci di taglio (essendo $h = h_i + h_j$ l'altezza dell'elemento). Lo spostamento ultimo a SLC è definito in corrispondenza di una rotazione della corda pari a 0,01.

Il criterio di resistenza per la verifica a taglio scorrimento, da valutare nelle sezioni soggette a momento massimo (solitamente le due sezioni di estremità del pannello), è quello indicato al § 7.8.2.2.2 delle NTC, utilizzando i valori di f_{v0} indicati in tabella 8.5.1, con la precisazione che la limitazione $f_{v,lim}$ relativa alla rottura dei blocchi è fornita dalla seguente relazione, ricavata per blocchi di forma standard:

$$f_{v,lim} = \frac{0.065 f_b}{0.7} \quad [C8.7.1.14]$$

dove f_b è la resistenza a compressione del blocco, normalizzata. Lo spostamento ultimo a SLC è definito in corrispondenza di una rotazione della corda, calcolata come sopra per la sezione di estremità di verifica, pari a 0.005.

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Un'opera d'arte Italiana

Contesto storico

Le Procuratie Vecchie sono un importante edificio storico situato a Venezia, simbolo del patrimonio architettonico della città.

Rinforzo strutturale

Il progetto si concentra su tecniche di rinforzo che garantiscono la stabilità senza alterare la struttura originale.

Minimizzazione dell'impatto

Gli interventi sono stati studiati per minimizzare l'impatto conservativo e mantenere l'integrità estetica e culturale.



Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Prove sui materiali

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)	Stato tensionale esistente: σ_c
	Resistenza a compressione: $\sigma_{c,m}$ (*)
	Modulo elastico: E_m

(*) la prova, a rigore, non fornisce indicazioni sulla reale resistenza a compressione

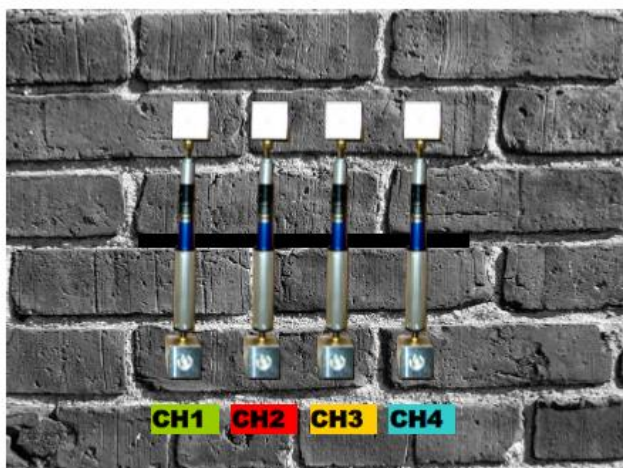
Prova #2	Parametri ricavati
Shove test (prove di taglio)	Coesione: τ_0
	Angolo di attrito: μ

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

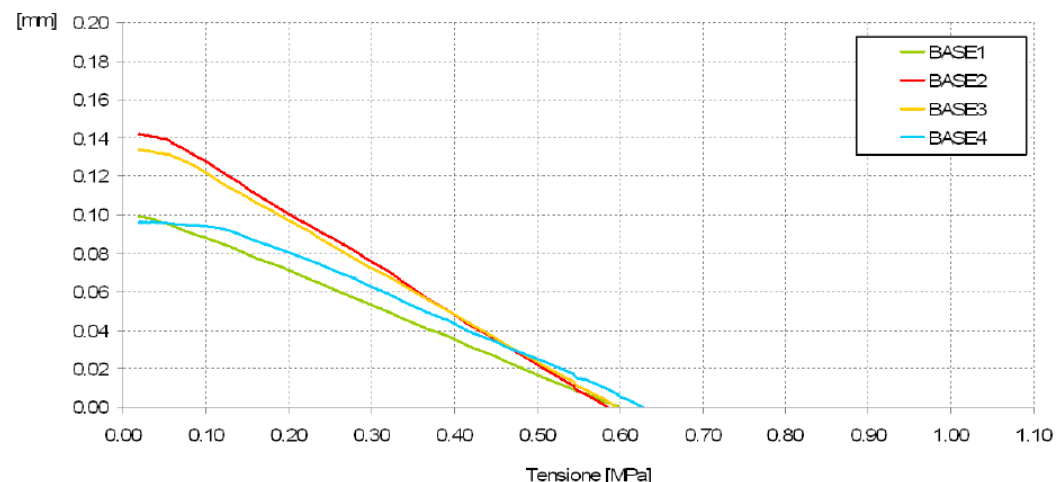
Prove sui materiali

Flat jack test (martinetti piatti singoli):

1. La prova con martinetto piatto singolo permette di stimare lo stato di tensione locale presente nelle strutture murarie.
2. Si esegue un taglio piano in direzione normale alla superficie della muratura, **lungo i giunti orizzontali**.
3. Il rilascio delle tensioni provoca una parziale chiusura del taglio, che viene rilevata tramite misure di distanza.
4. Viene quindi inserito all'interno del taglio un martinetto piatto, realizzato mediante sottili lamiere di acciaio saldate, che viene collegato al circuito idraulico di una pompa, successivamente messa in pressione crescente.



Schema di disposizione dei sensori nel test di martinetto piatto singolo



Tipico risultato di prova: andamento delle tensioni in relazione alla deformazione verticale a cavallo del taglio

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Prove sui materiali

Flat jack test (martinetti piatti singoli):

- I test hanno rilevato **valori medi dello stato tensionale esistente** nei maschi murari investigati **compresi tra 0.0 e 0.8 MPa**

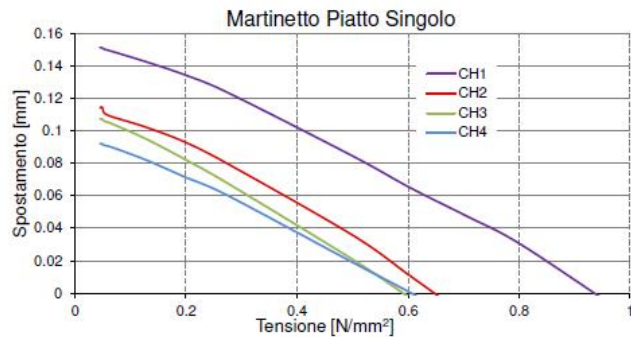


Figura 3-25: test di martinetto singolo MPS 4; variazione relativa della misura registrata dai sensori di spostamento in funzione dello sforzo applicato

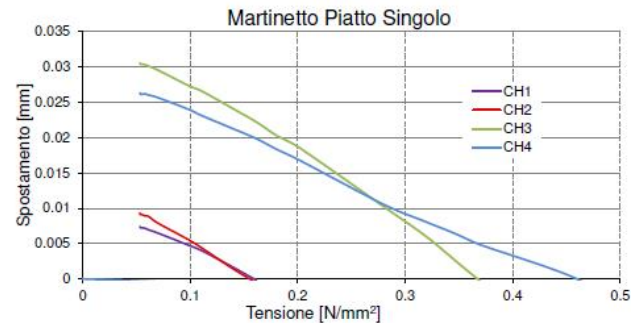
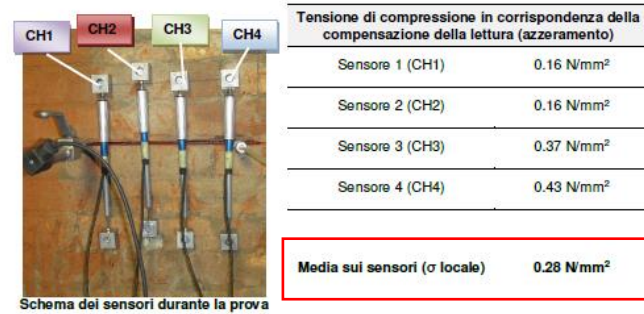
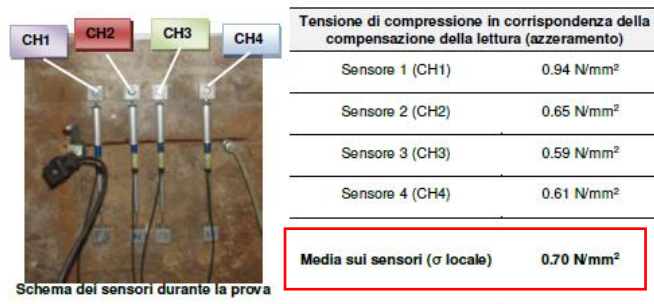


Figura 3-21: test di martinetto singolo MPS 2; variazione relativa della misura registrata dai sensori di spostamento in funzione dello sforzo applicato

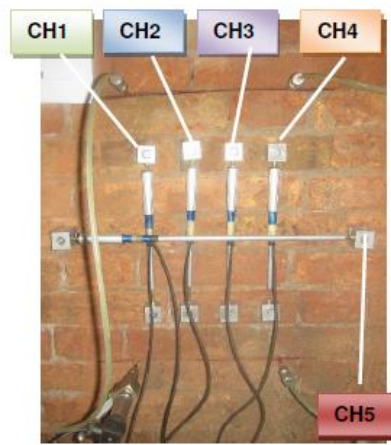


Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Prove sui materiali

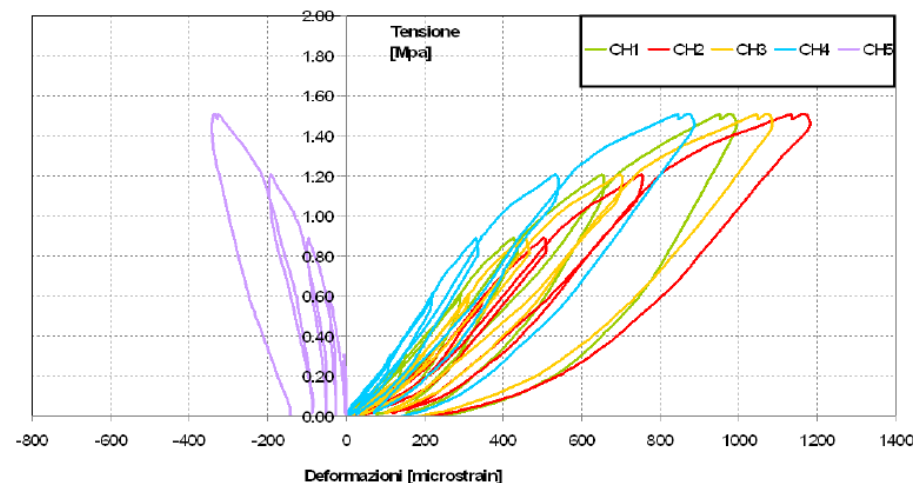
Flat jack test (martinetti piatti doppi):

- La prova con martinetto piatto doppio consente di determinare le caratteristiche di **resistenza e deformabilità della muratura**.
- **Si effettuano due tagli paralleli** fra loro ad una distanza variabile entro cui inserire i due martinetti.
- **I due martinetti paralleli** - opportunamente messi in pressione - **applicano al campione interposto uno stato di sollecitazione mono-assiale**, le **deformazioni** risultanti **vengono misurate** da sensori di spostamento **al fine di determinare il diagramma tensione deformazione** della muratura indagata. Generalmente **il carico viene applicato in maniera ciclica**.



Schema dei sensori durante la prova

Schema di disposizione dei sensori nel test di martinetto piatto singolo



Tipico risultato di prova: andamento delle tensioni in relazione alla deformazione verticale a cavallo del taglio

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Prove sui materiali

Flat jack test (martinetti piatti doppi):

- Svolte due diverse campagne di prova per un **totale di 19 test**. Alcuni test scartati per ambiguità dei risultati.
- Risultati: **curve sforzi-deformazioni in compressione, resistenza a compressione e modulo elastico**.

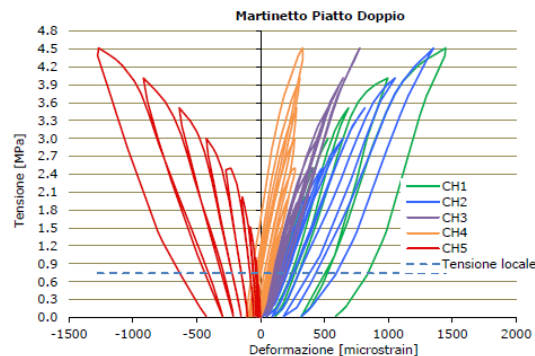
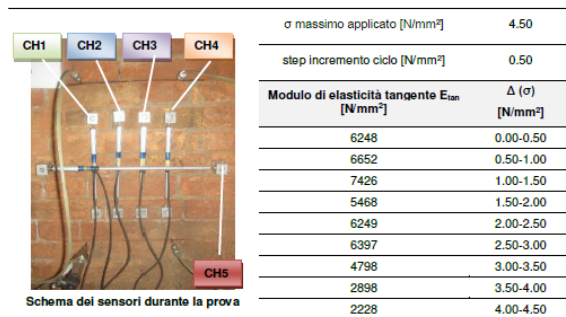
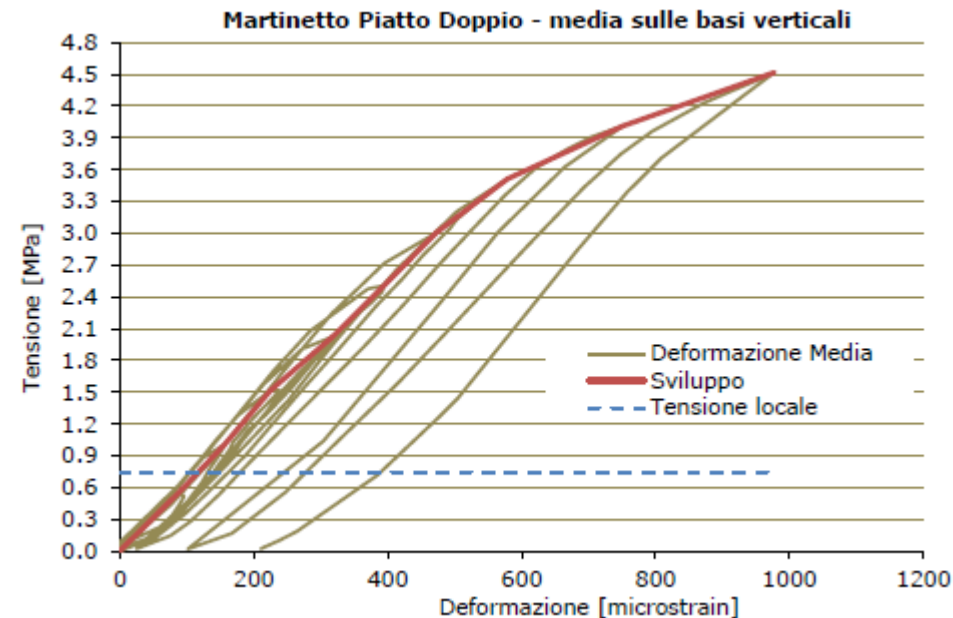


Figura 3-68: test di martinetto doppio MPD 5: diagramma sforzi-deformazioni relativo alle singole basi di misura



Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Prove sui materiali

Martinetti piatti doppi. Confronto con i valori suggeriti dalle NTC 2008:

○ Valori proposti da tabella (C8A.2.1):

$$2.4 \text{ MPa} < \sigma_{c,m} < 4.0 \text{ MPa}$$

$$1200 \text{ MPa} < E_m < 1800 \text{ MPa}$$

○ Media Prove:

$$\sigma_{c,m} = 3.90 \text{ MPa} \quad \text{in linea con i valori in tabella}$$

$$E_{uncr} = 4575 \text{ MPa} \quad \text{maggiore dei valori in tabella}$$

Nota Importante: l'approccio previsto dalle NTC2008 non risulta più valido.

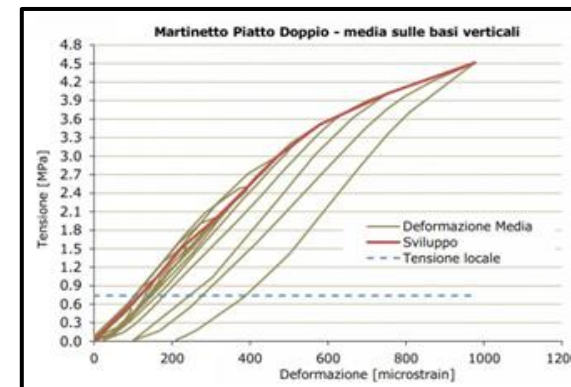
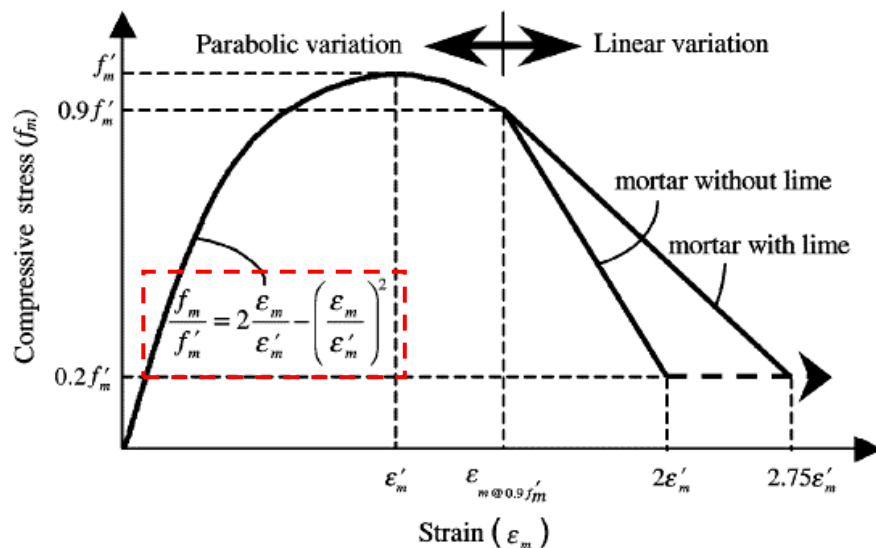
Le NTC2018 prevedono un approccio statistico in cui i valori in tabella devono sempre essere tenuti in considerazione

Tabella NTC2008	f_m	τ_0	E	G	w
Tipologia di muratura	(N/cm ²)	(N/cm ²)	(N/mm ²)	(N/mm ²)	(kN/m ³)
	Min-max	min-max	min-max	min-max	
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	100 180	2,0 3,2	690 1050	230 350	19
Muratura a conci sbozzati, con paramento di limitato spessore e nucleo interno	200 300	3,5 5,1	1020 1440	340 480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	260 380	5,6 7,4	1500 1980	500 660	21
Muratura a conci di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	140 240	2,8 4,2	900 1260	300 420	16
Muratura a blocchi lapidei squadrati	600 800	9,0 12,0	2400 3200	780 940	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce	240 400	6,0 9,2	1200 1800	400 600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤ 40%)	500 800	24 32	3500 5600	875 1400	15
Muratura in blocchi laterizi semipieni (perc. foratura < 45%)	400 600	30,0 40,0	3600 5400	1080 1620	12
Muratura in blocchi laterizi semipieni, con giunti verticali a secco (perc. foratura < 45%)	300 400	10,0 13,0	2700 3600	810 1080	11
Muratura in blocchi di calcestruzzo o argilla espansa (perc. foratura tra 45% e 65%)	150 200	9,5 12,5	1200 1600	300 400	12
Muratura in blocchi di calcestruzzo semipieni (foratura < 45%)	300 440	18,0 24,0	2400 3520	600 880	14

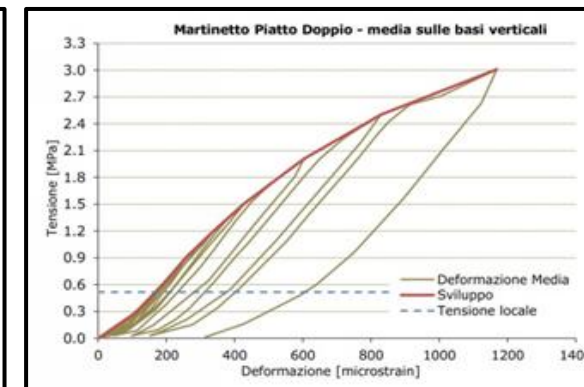
Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Calibrazione del materiale

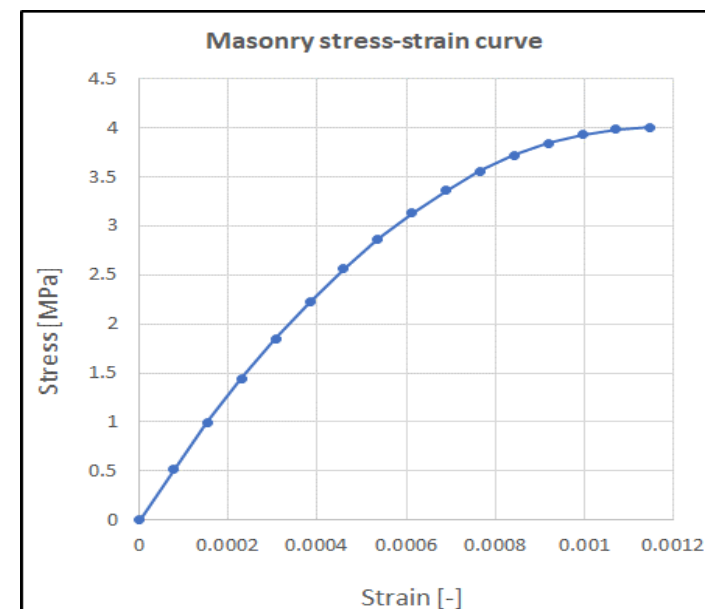
- La curva sforzi-deformazioni in compressione è stata calibrata con il seguente modello (*H.B. Kaushik et al., Journal of materials in civil engineering, September 2007*)
- I risultati dei test con martinetti piatti doppi (deformazione e tensione al picco) sono stati utilizzati all'interno della formulazione analitica proposta.



Flat jack test n.5



Flat jack test n.10



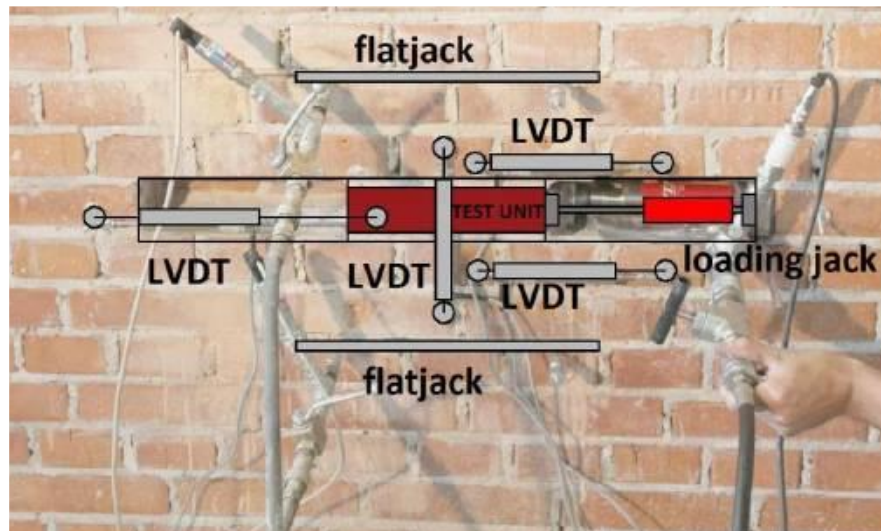
Stress strain curve ascending branch used in LS-dyna

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Calibrazione del materiale

Shove test (prove di taglio):

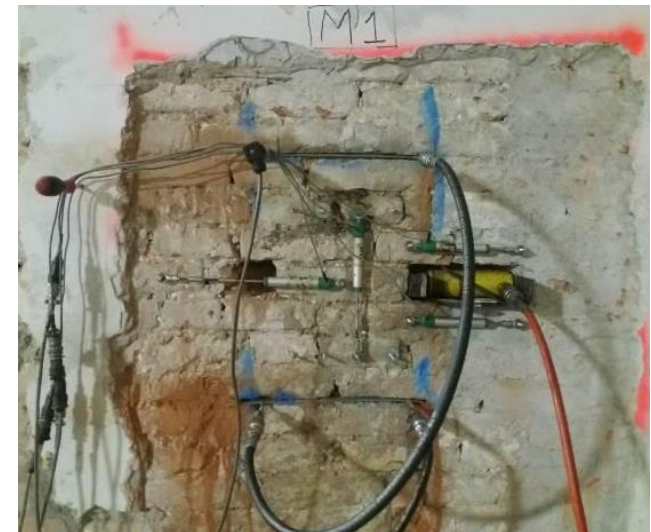
- La prova è finalizzata a misurare in situ la resistenza a taglio della muratura lungo un giunto di malta.
- La prova consiste nel far scorrere orizzontalmente un elemento di laterizio opportunamente isolato lateralmente dal resto della muratura. La forza orizzontale viene trasmessa da un martinetto oleodinamico inserito all'interno della muratura; tale forza è dipendente dallo stato di compressione presente sull'elemento di laterizio.
- La prova prosegue fino a raggiungere la rottura per evidente scorrimento a livello del giunto.



Layout di prova



Martinetti piatti



Shove Test

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Calibrazione del materiale

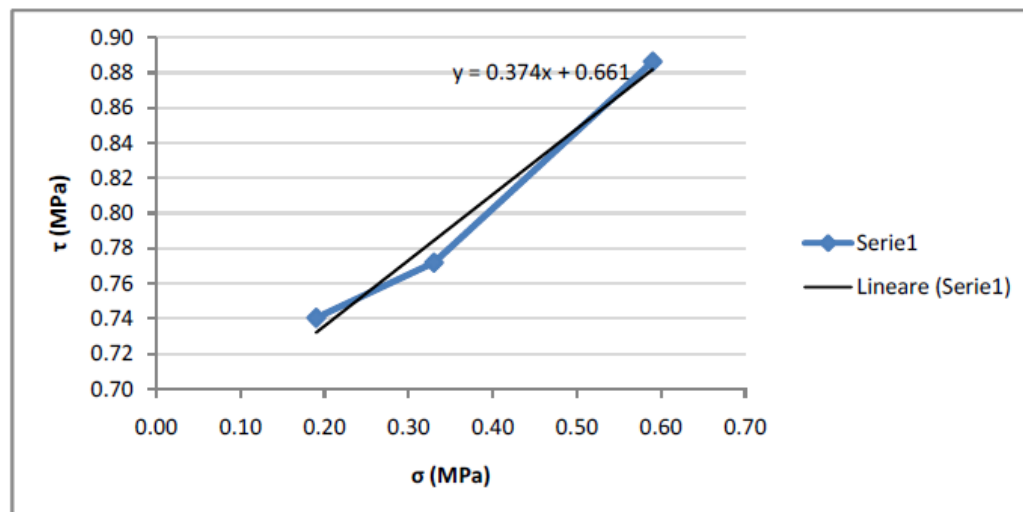
Shove test (prove di taglio):

- Svolta una campagne di prova a Dicembre 2018, su richiesta di Arup.
- 4 test svolti in totale, 1 scartato per l'ambiguità dei risultati.
- Risultati: coesione e angolo di attrito della muratura:

- Coesione media $f_{vk0} \approx 0.02\text{MPa}$
- Angolo di attrito medio $\mu = 0.391$

valore piuttosto basso, scarsa qualità della malta a taglio

valore in linea con quello proposto da codice

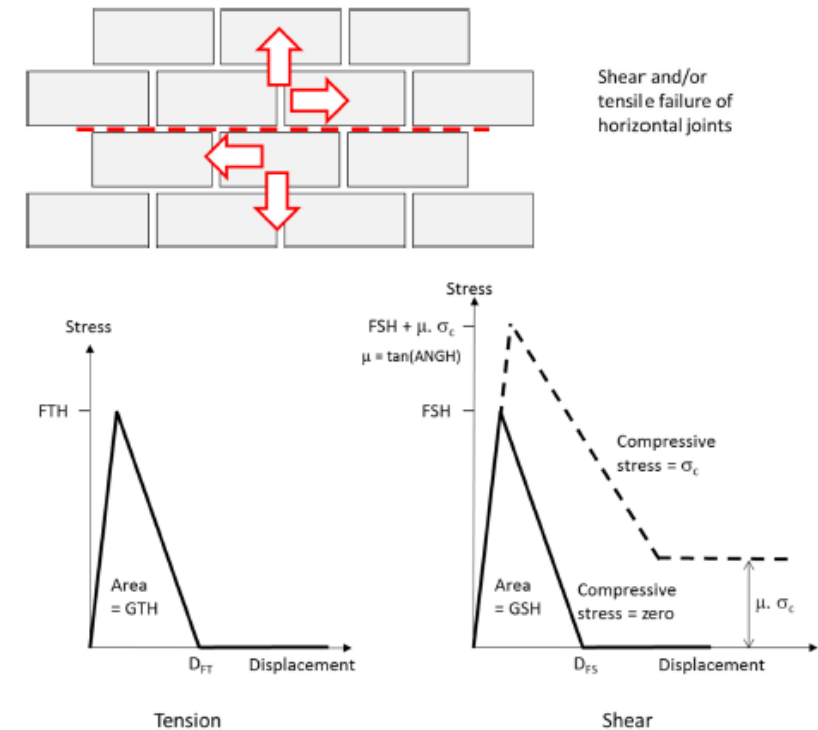
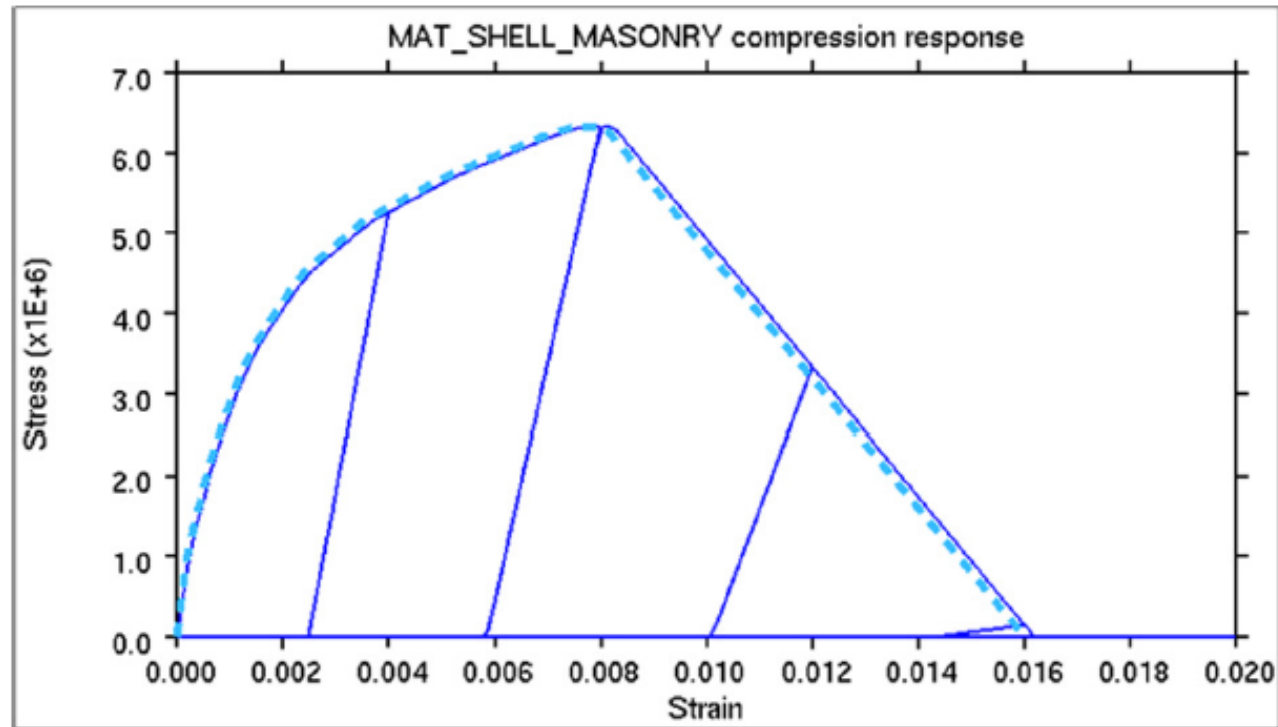


*Tipico risultato di prova:
andamento delle tensioni in
relazione alla deformazione
verticale a cavallo del taglio*

$$f_{vk} = f_{vk0} + 0.4 \cdot \sigma_n \quad [\text{NTC 2008, 4.5.4}]$$

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

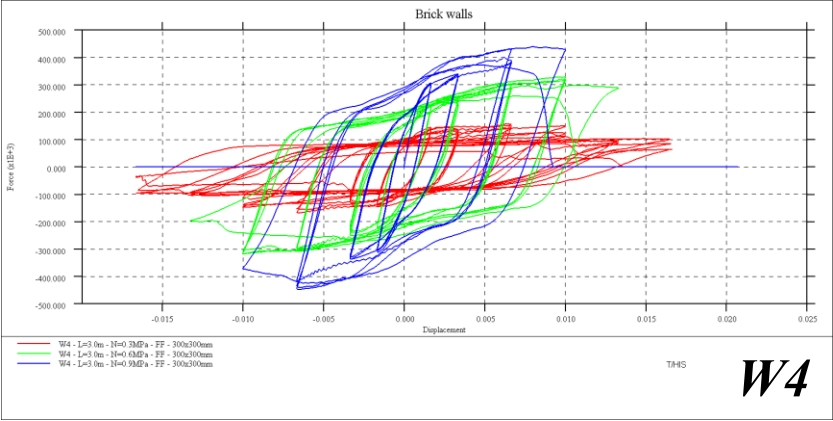
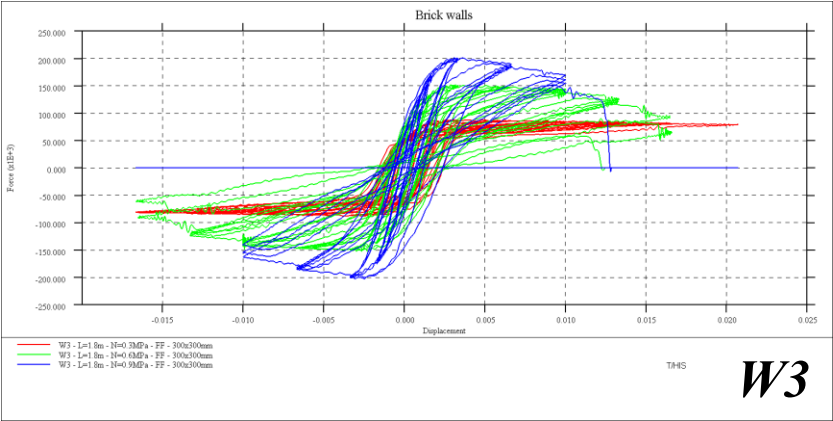
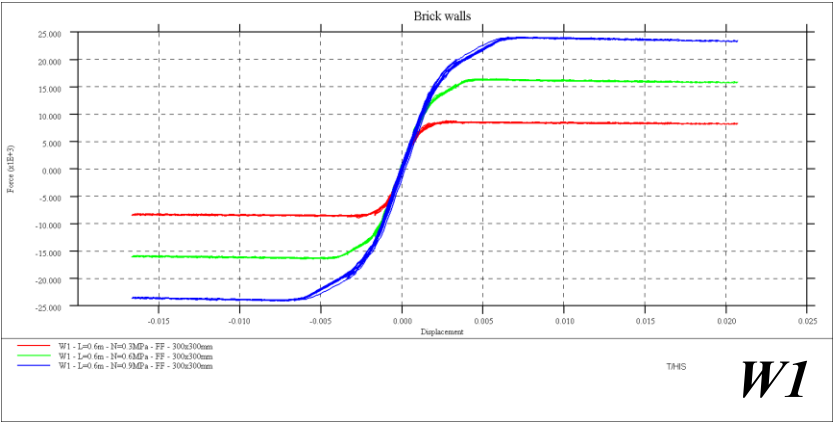
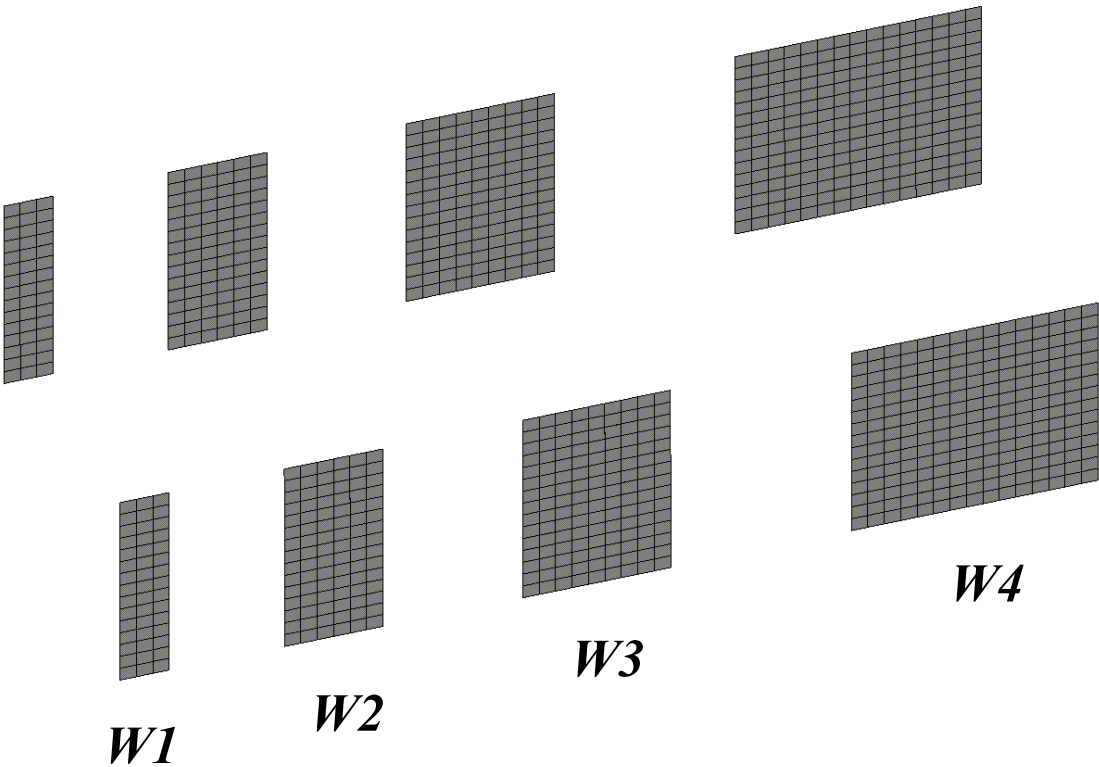
Calibrazione del materiale



Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Calibrazione del materiale

D3PLOT: Brick walls



Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Validazione del materiale

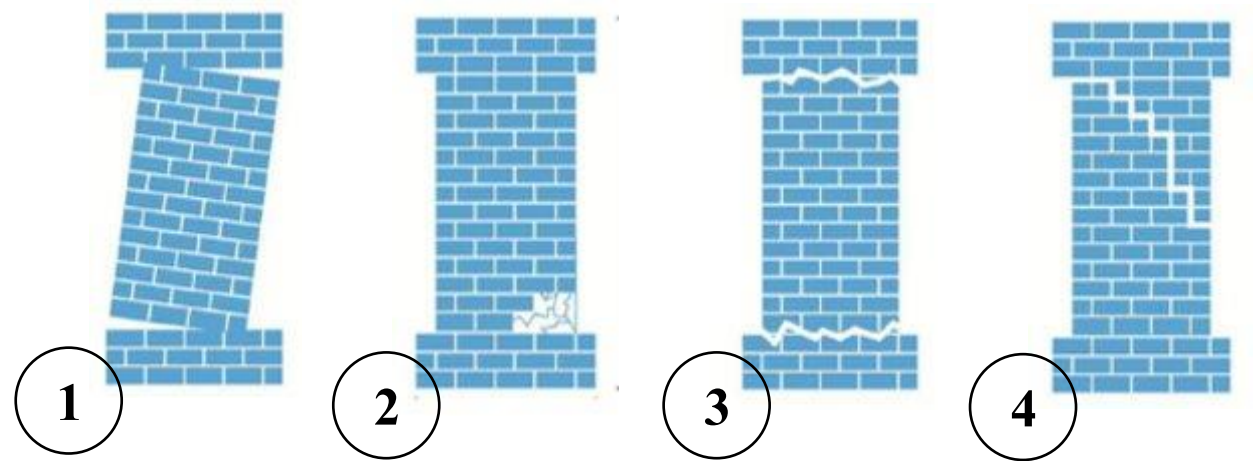
I risultati ottenuti in precedenza vengono confrontati con i valori di resistenza e di spostamento della normativa:

○ **Flessionali** ($\text{drift}_{\text{SLC}} = 1.0\% H$ pannello):

1. Rocking (Ribaltamento)
2. Toe crushing (pressoflessione/schiacciamento)

○ **Taglio** ($\text{drift}_{\text{SLC}} = 0.5\% H$ pannello):

3. Bed joint sliding (scorrimento)
4. Diagonal tension (fessurazione diagonale)

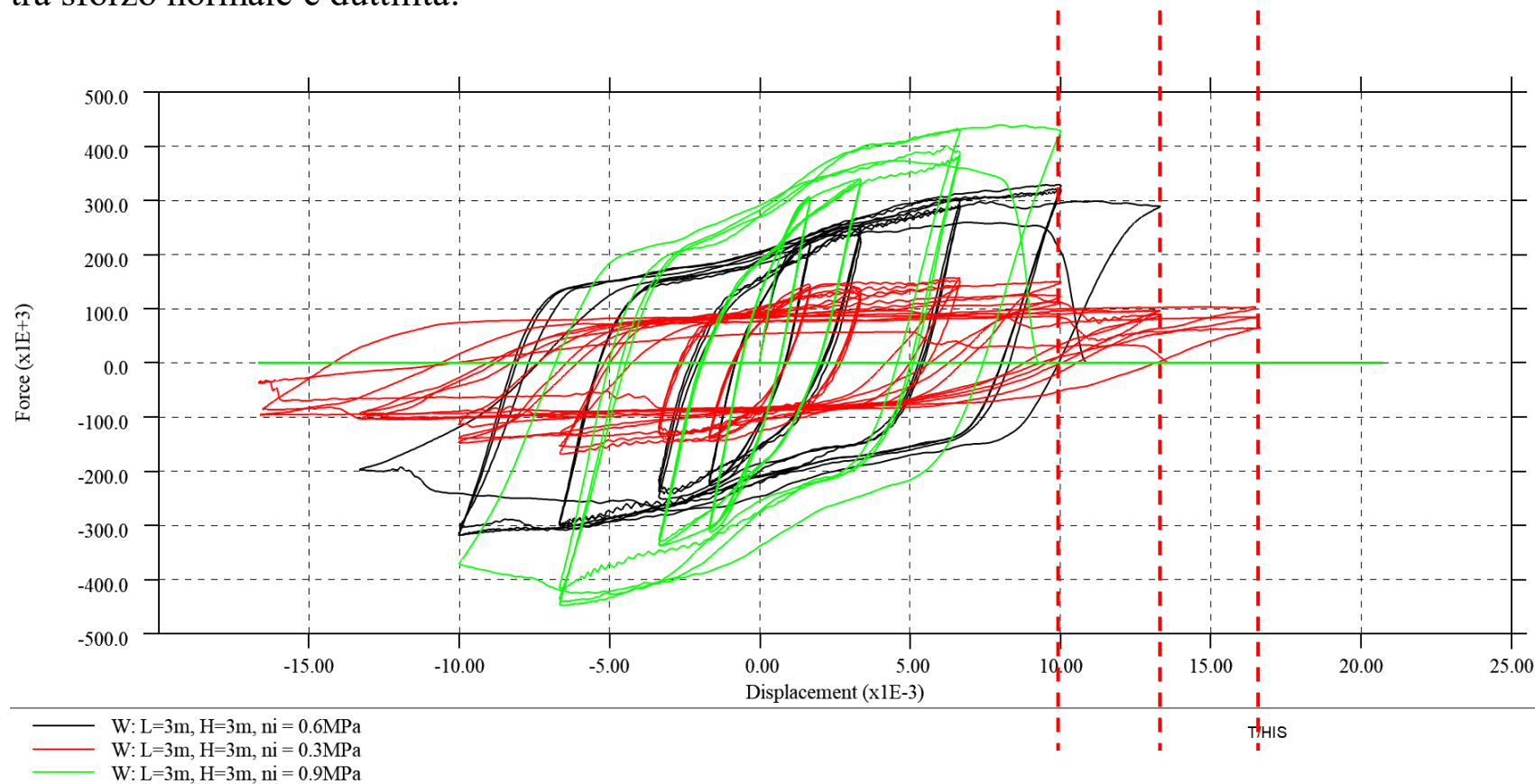


	Rocking	Toe crushing	Bed Joint sliding	Diagonal tension
NTC2018	-	$M_u = \left(l^2 \cdot t \cdot \frac{\sigma_0}{2} \right) \left(1 - \frac{\sigma_0}{0.85 f_d} \right)$	$V_t = l' \cdot t \cdot f_{vd}$	$V_t = l \cdot t \cdot \frac{1.5 \tau_{0d}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{1.5 \tau_{0d}}} = l \cdot t \cdot \frac{f_{td}}{b} \sqrt{1 + \frac{\sigma_0}{f_{td}}}$
EC8 - Part.3	-	$V_f = \frac{DN}{2H_0} (1 - 1.15 v_d)$	$V_f = f_{vd} D' t$	

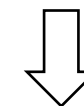
Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Validazione del materiale – Gap normativo

La normativa prevede la diretta corrispondenza tra sforzo normale e resistenza, ma non prevede una corrispondenza tra sforzo normale e duttilità:



*Se ipotizziamo di considerare
un drift a taglio $SLV = 0.4\%H$
 $= 0.004 \times 3000 = 12\text{mm}$*

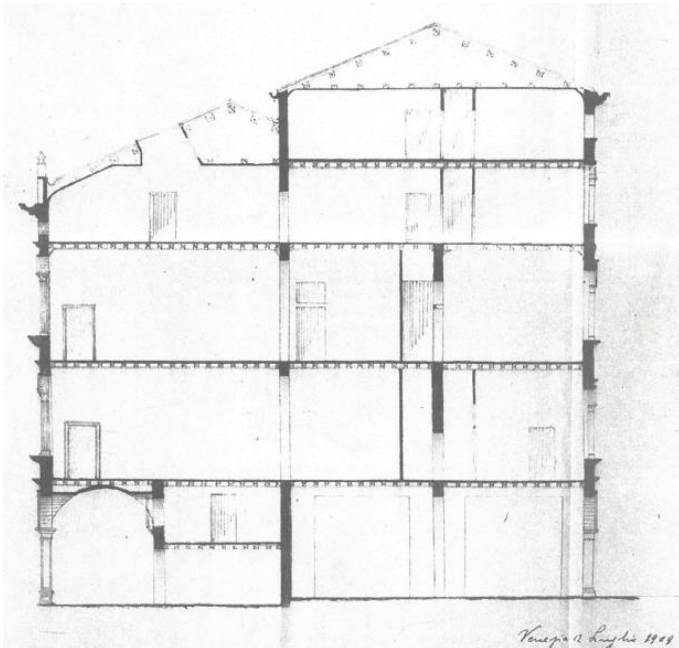


***Possiamo avere collassi con
spostamenti minori o
maggiori del limite
considerato al variare dello
sforzo assiale agente.***

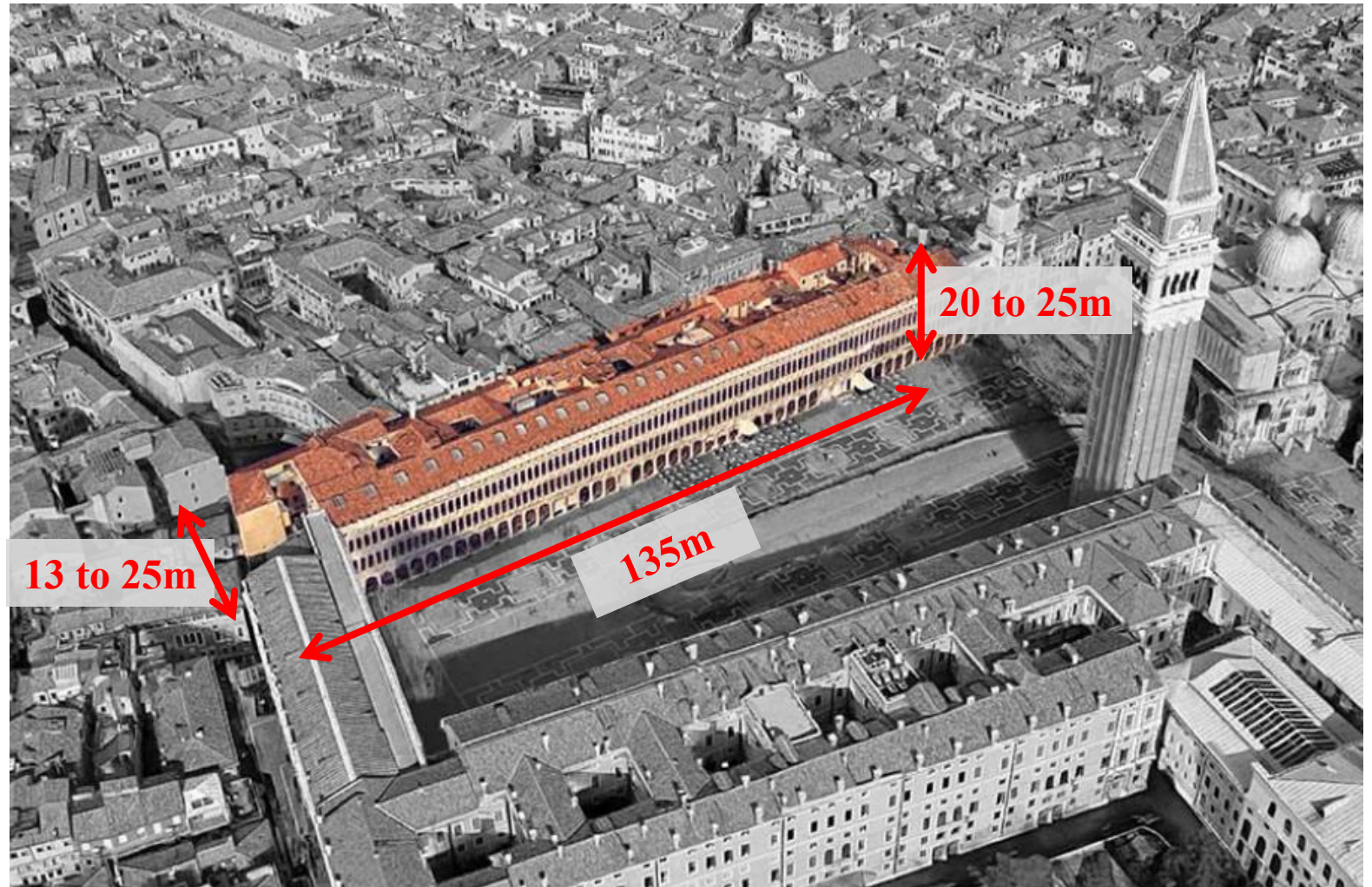
Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Descrizione del fabbricato

- Committente: Generali Italia S.p.A.
- Anno di costruzione: 1519
- Superficie: 15.000 m²
- Piani: 4 - 5



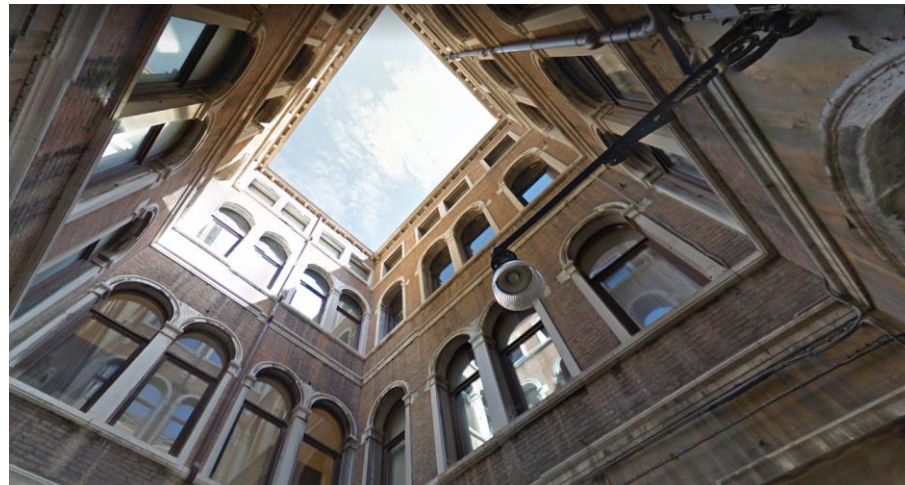
Procuratie Vecchie Venezia, sezione tipica



Procuratie Vecchie Venezia, vista 3D dall'alto

Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

Descrizione del fabbricato



Caso studio: Procuratie Vecchie, Venezia

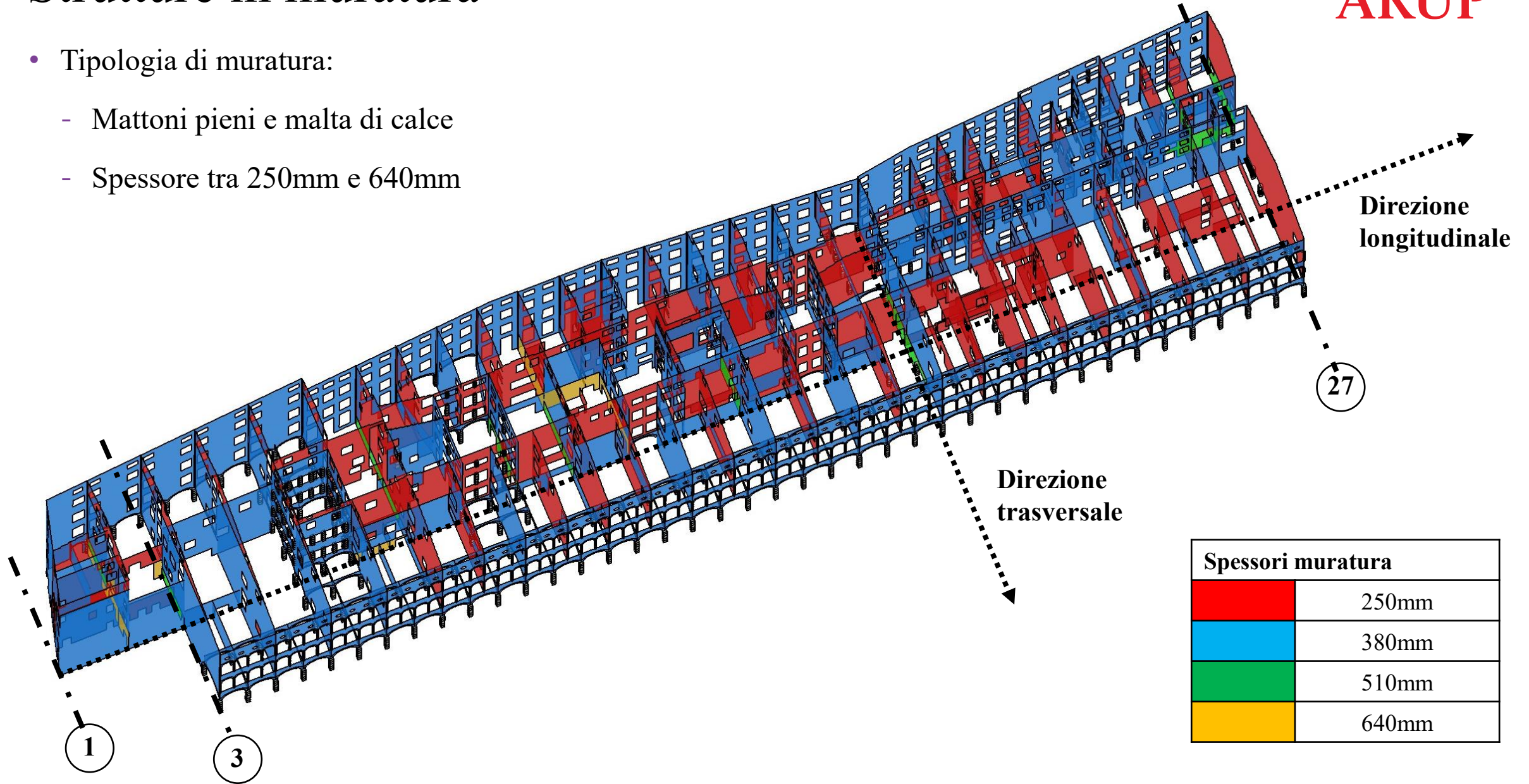
Descrizione del fabbricato



Strutture in muratura

ARUP

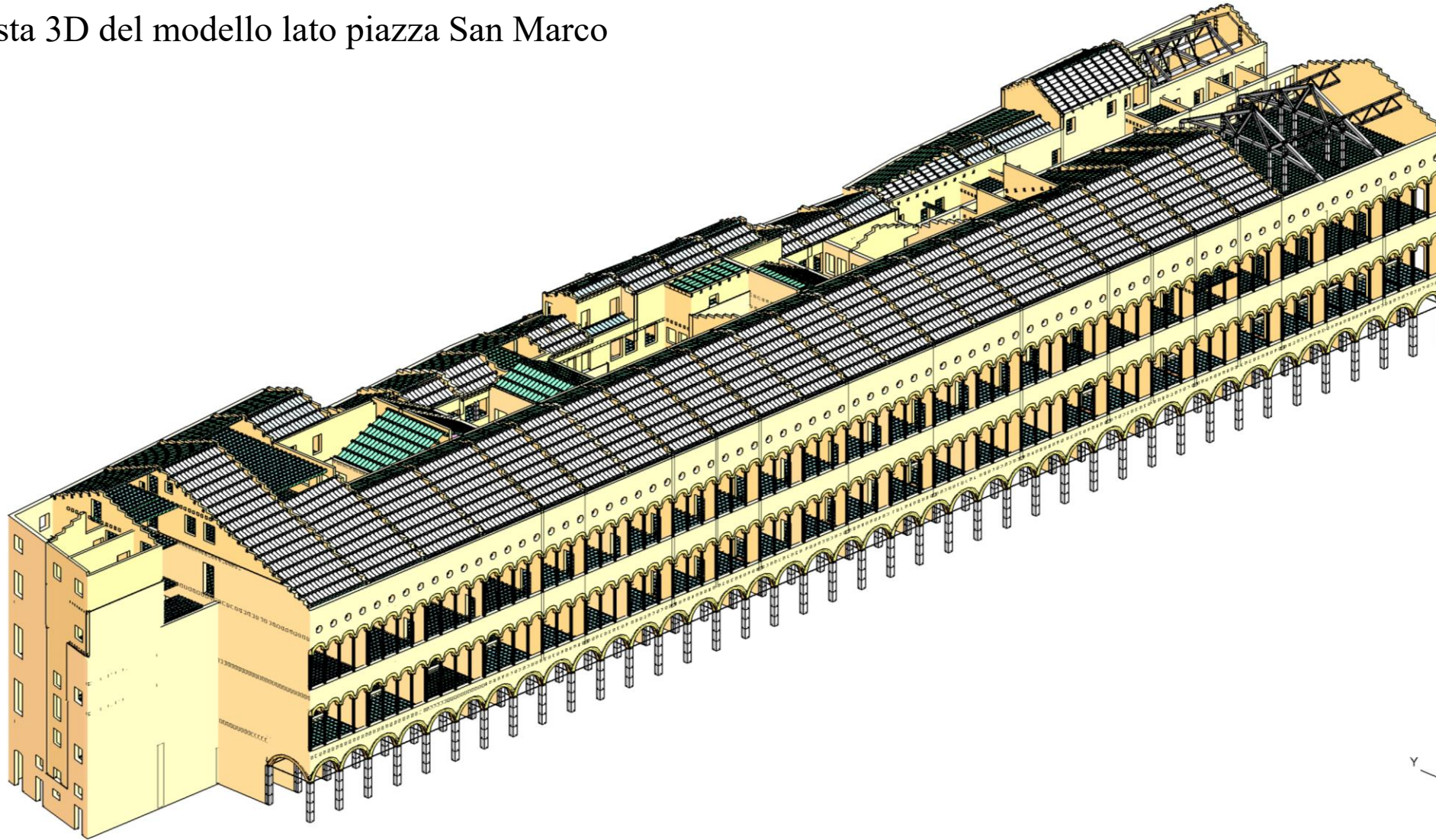
- Tipologia di muratura:
 - Mattoni pieni e malta di calce
 - Spessore tra 250mm e 640mm



Model Overview

ARUP

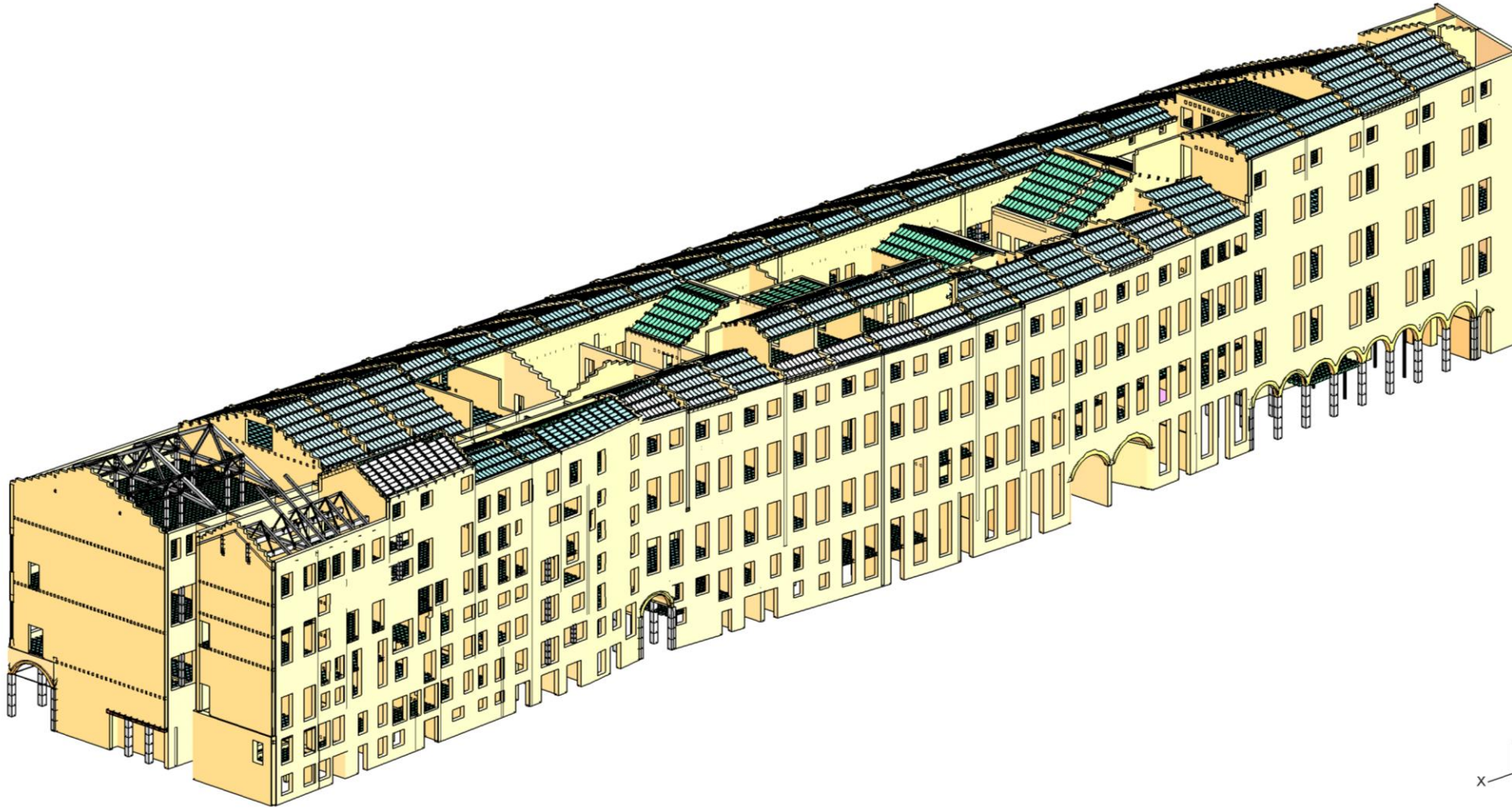
Vista 3D del modello lato piazza San Marco



Model Overview

ARUP

Vista 3D del modello lato bacino Orseolo



Archi, catene e volte al piano terra

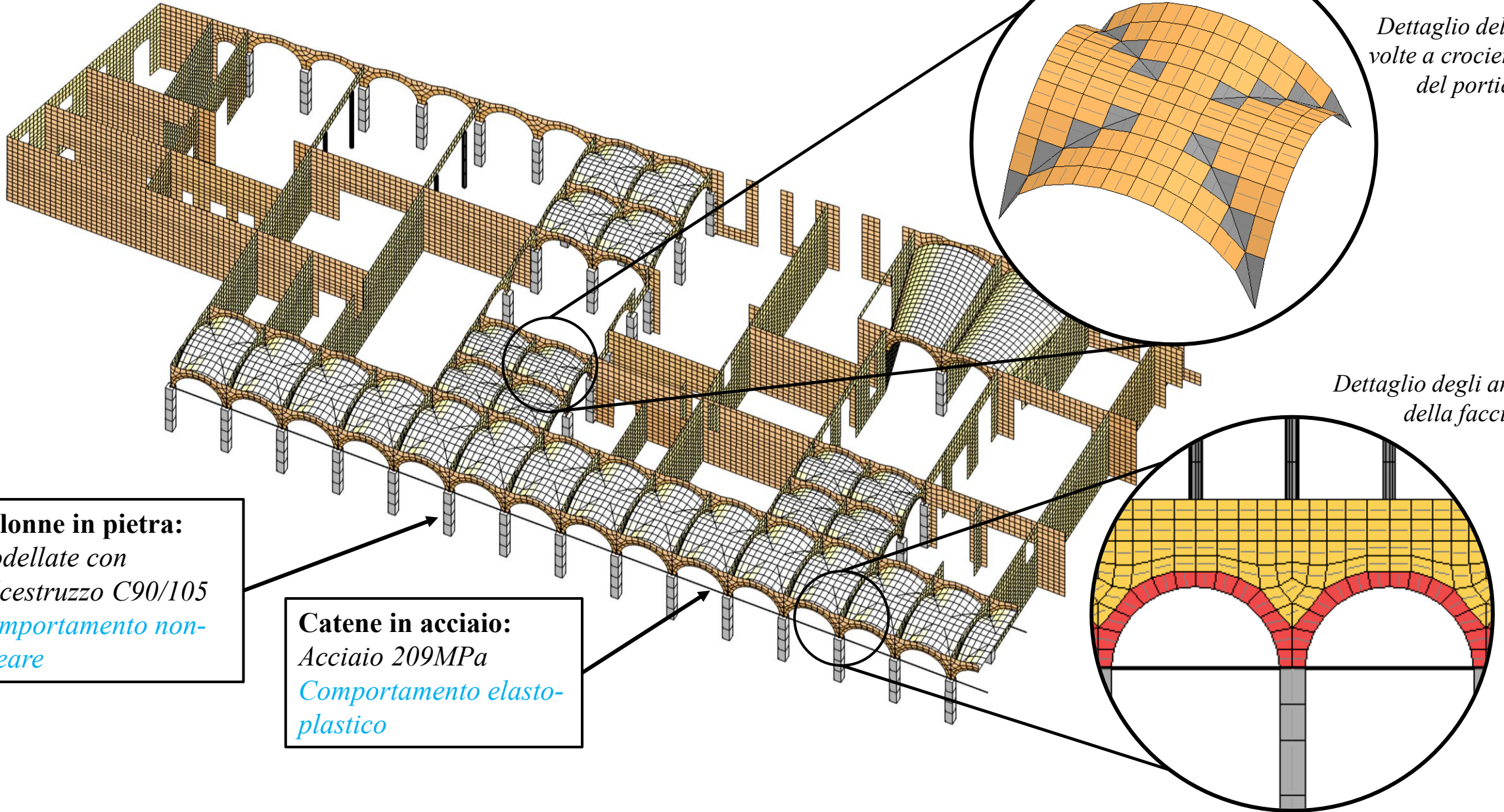
ARUP

*Dettaglio delle
volte a crociera
del portico*

*Dettaglio degli archi
della facciata*

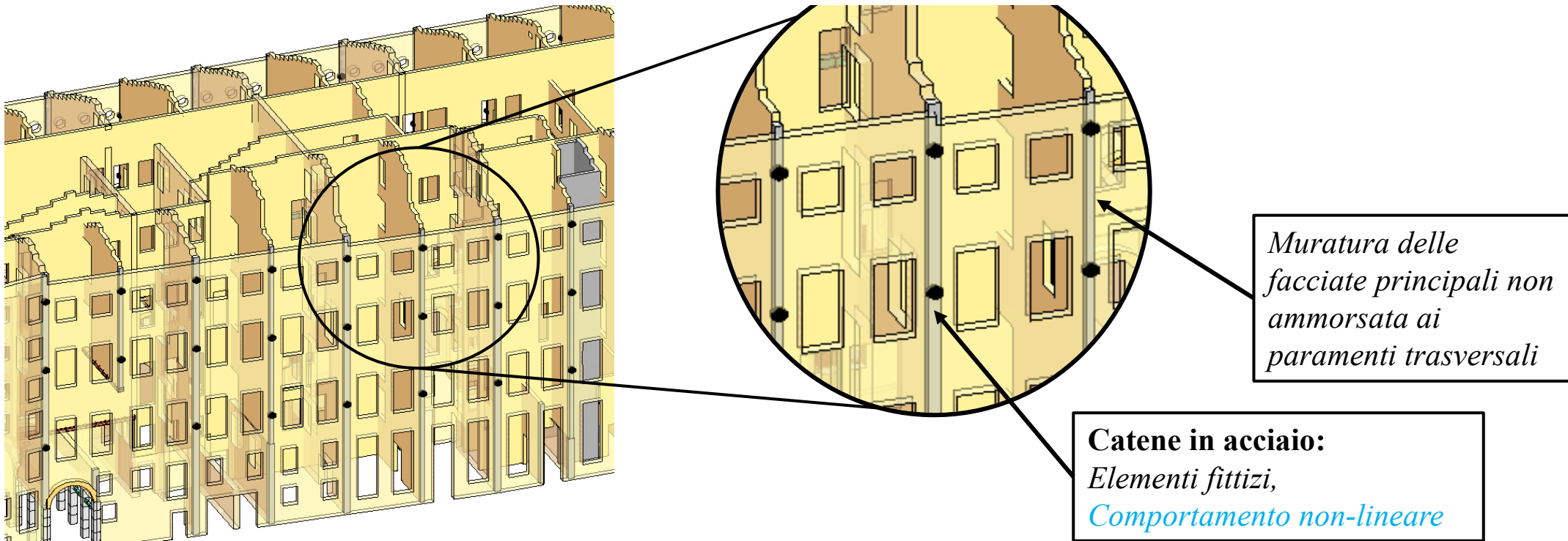
Colonne in pietra:
*Modellate con
calcestruzzo C90/105
Comportamento non-
lineare*

Catene in acciaio:
*Acciaio 209MPa
Comportamento elasto-
plastico*



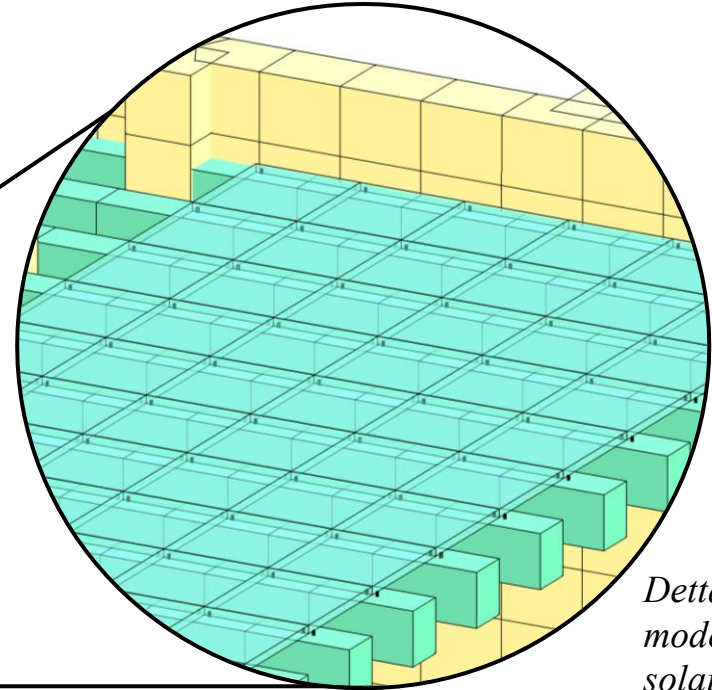
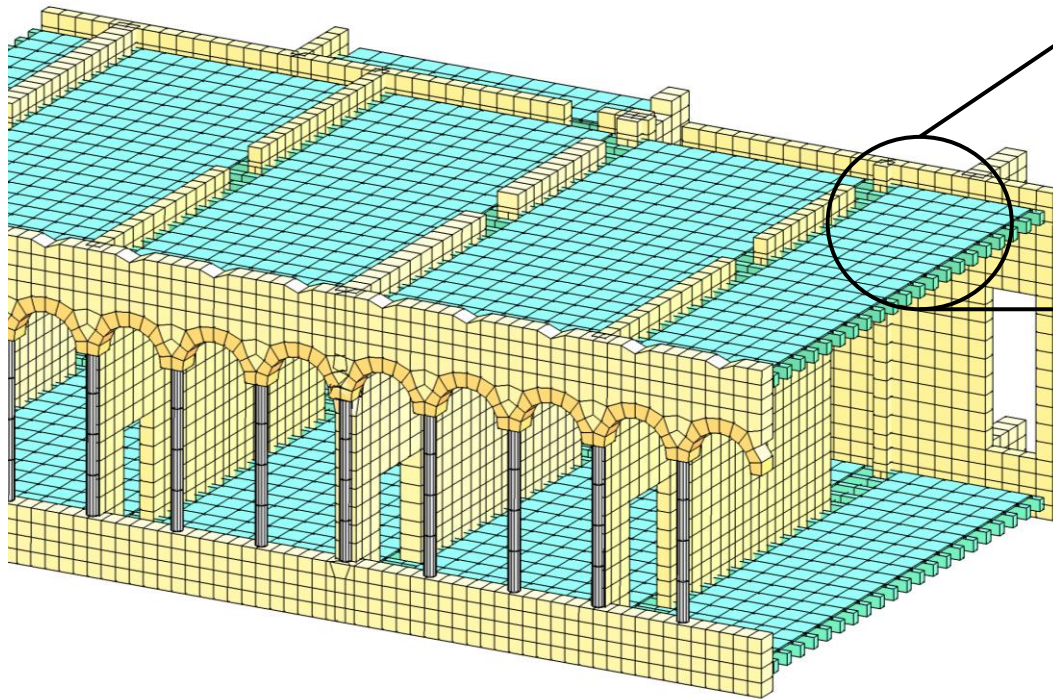
Catene di ritegno delle facciate

- **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).
- Tutti i solai sono collegati alle murature tramite connessioni ad attrito (si considera il possibile scorrimento/perdita di supporto).

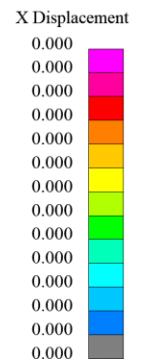
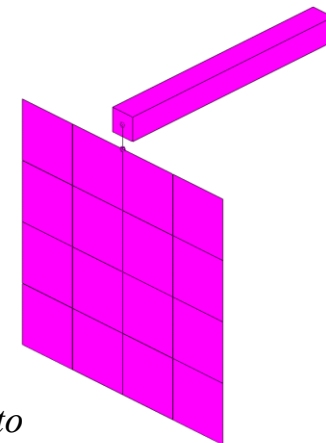


Dettaglio della modellazione dei solai in legno.

DIPLOT: General



Materiale specifico per modellare l'attrito

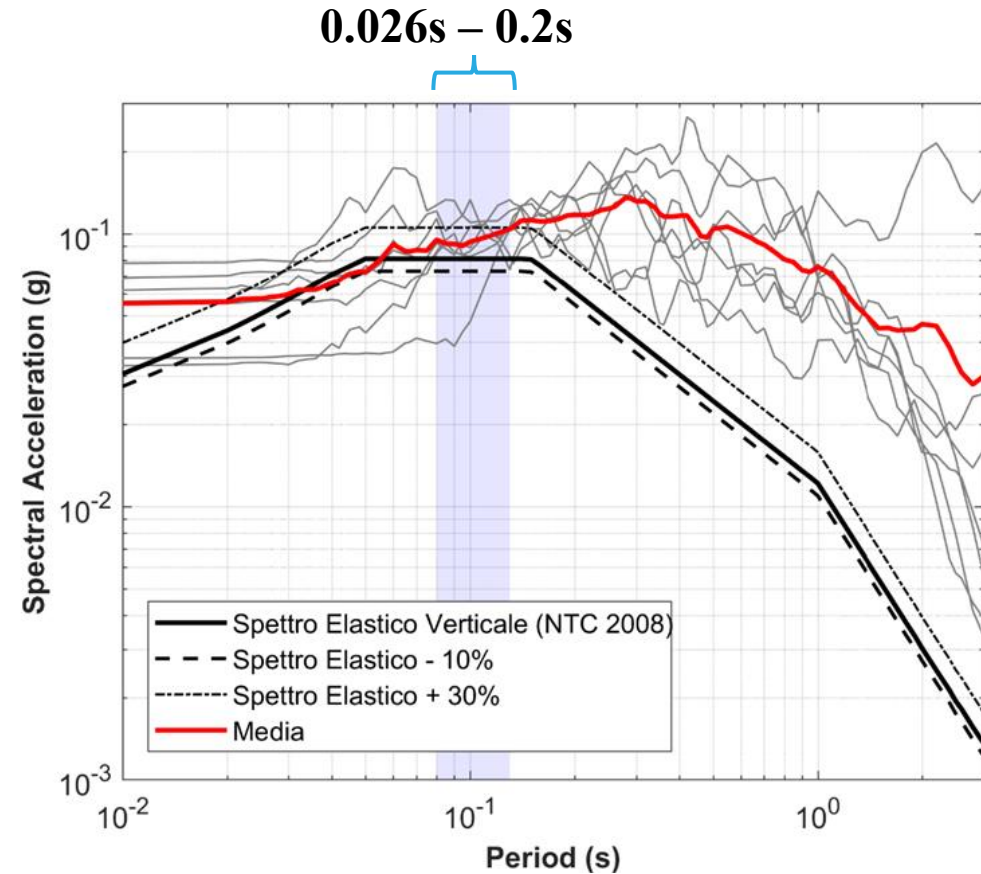
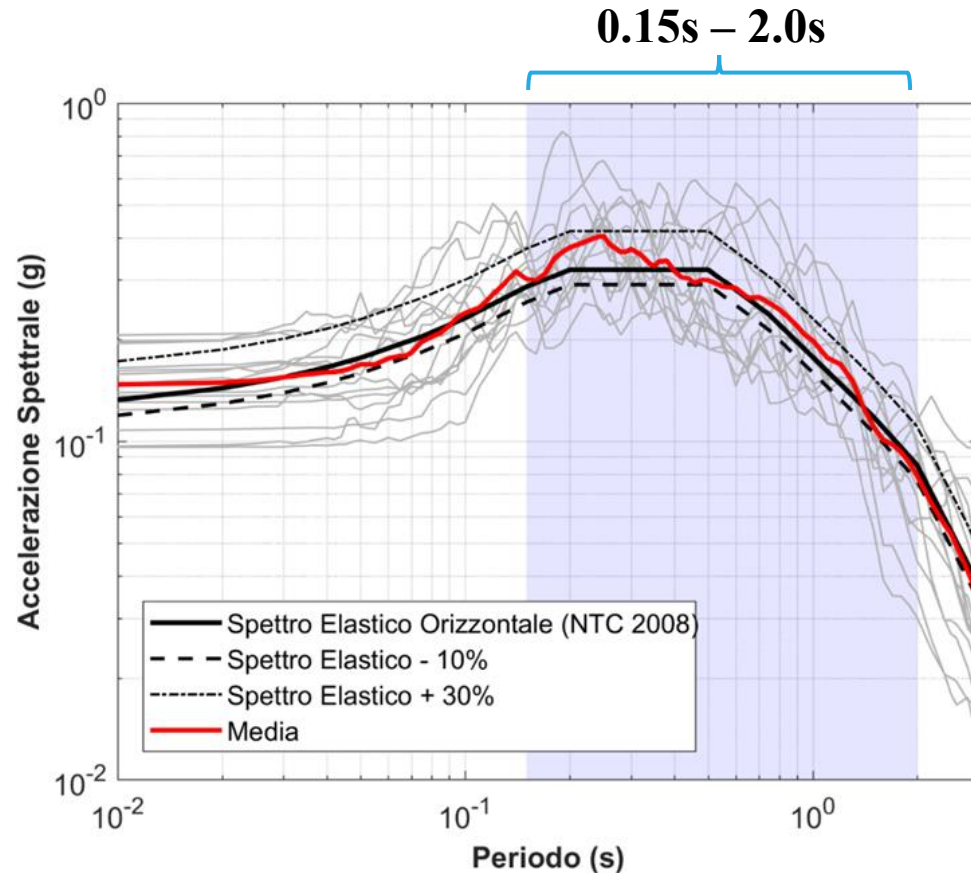


Analisi di vulnerabilità sismica

- 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.

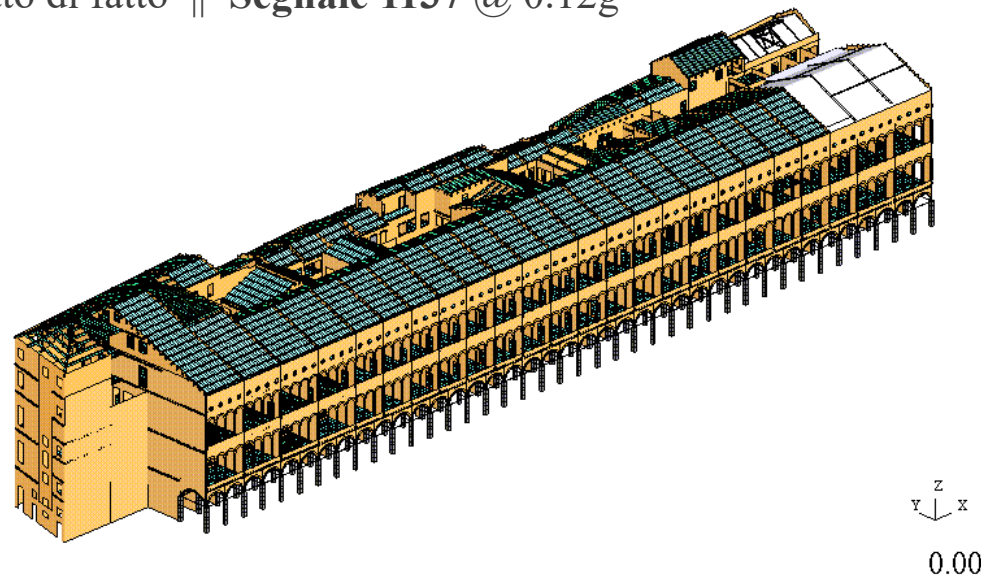
Domanda sismica: generazione dei segnali accelerometrici **ARUP**

- **I 3 segnali utilizzati risultano spettro-compatibili con lo spettro elastico di progetto e lo spettro medio calcolato dai segnali non è mai inferiore del 10%, né superiore del 30%, di quello di progetto nell'intervallo dei periodi propri dell'edificio.**

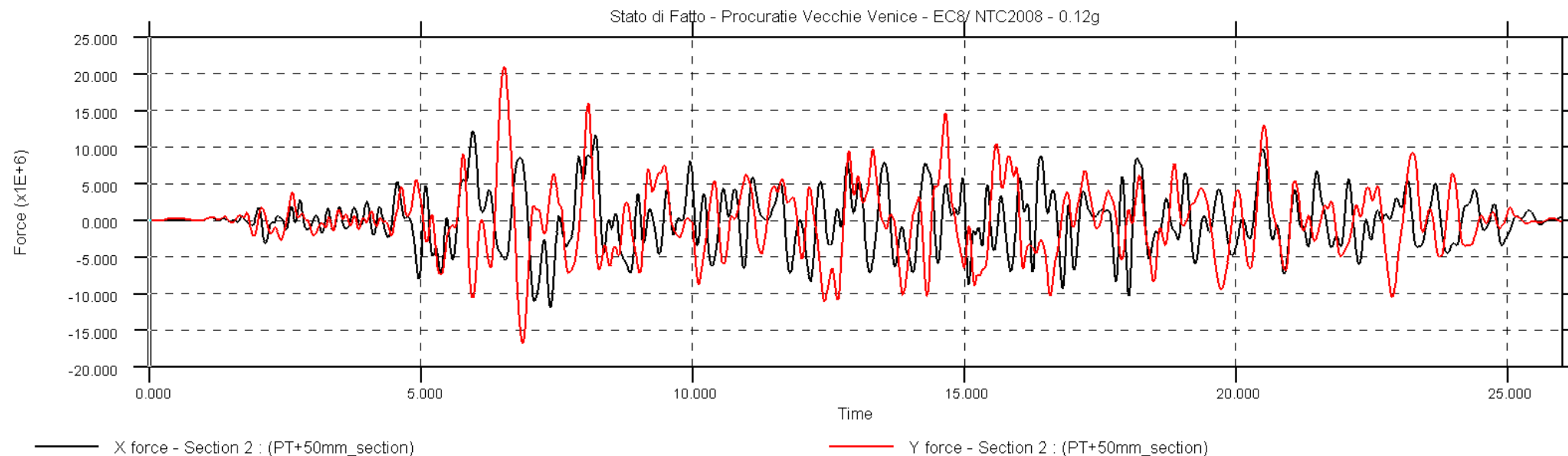
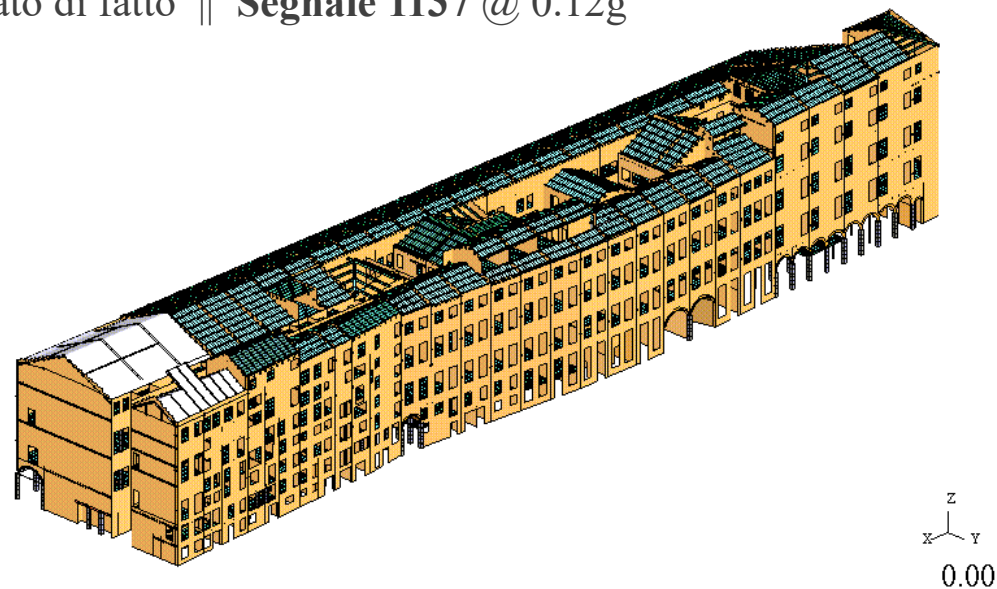


Comportamento sismico dell'edificio – Animazione

Stato di fatto || Segnale 1137 @ 0.12g

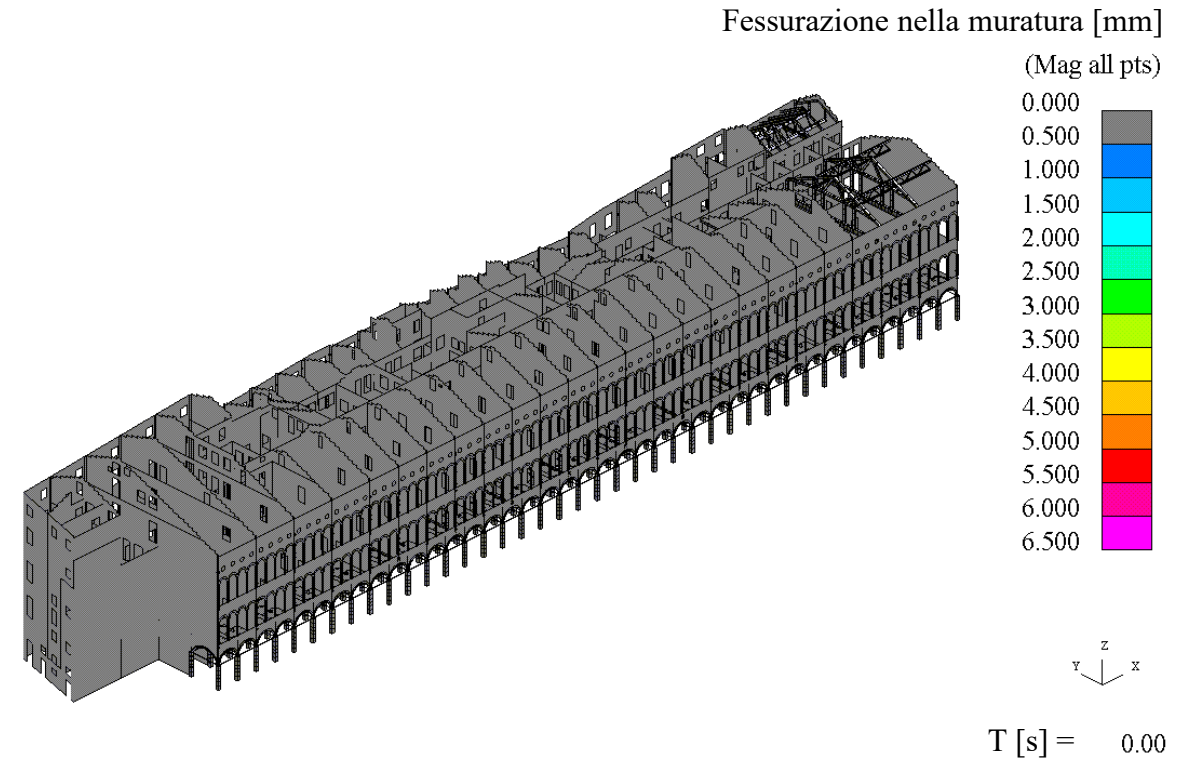
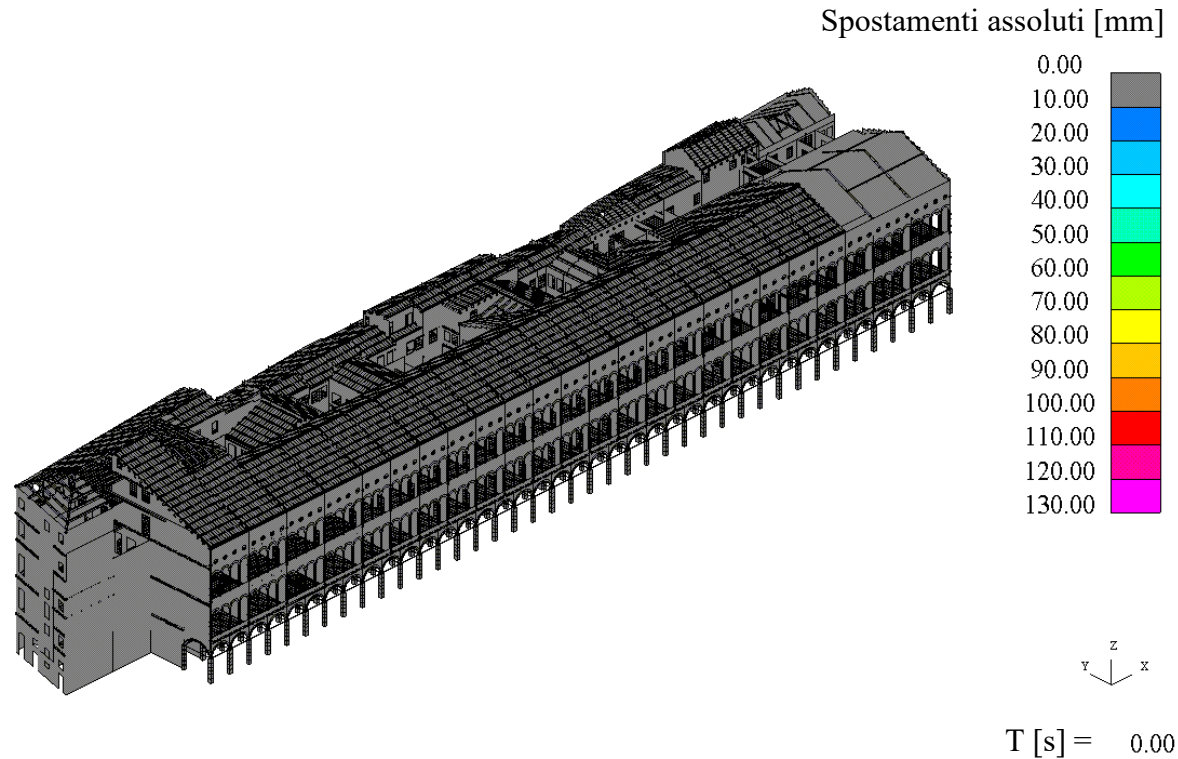


Stato di fatto || Segnale 1137 @ 0.12g



Comportamento sismico dell'edificio – Animazione

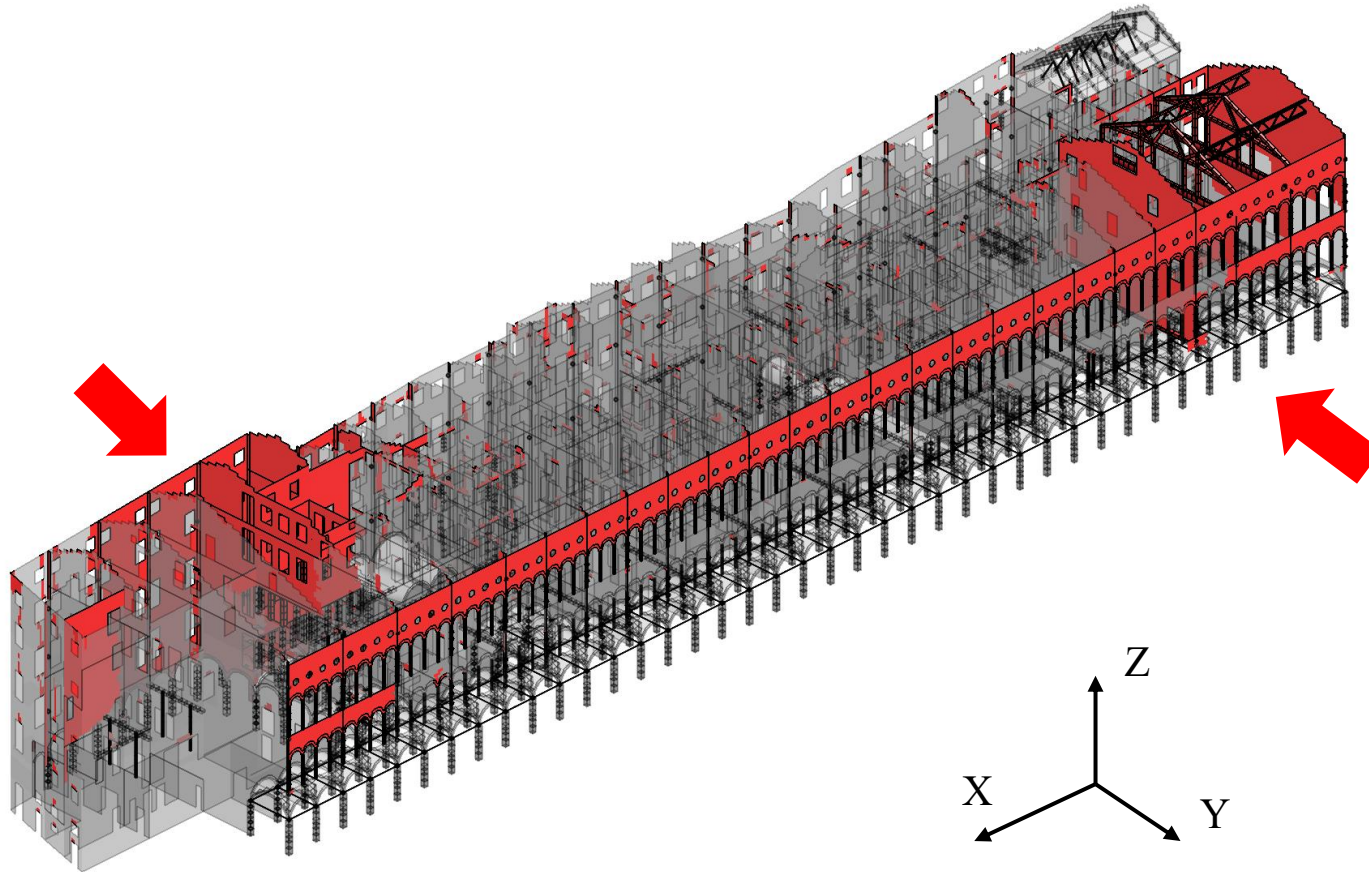
Stato di fatto || Segnale 1137 @ 0.12g



Porzioni collassate al termine dell'analisi

ARUP

Stato di fatto || Segnale 1137 @ 0.12g



■ *Porzioni collassate*



I collassi interessano principalmente due aree distinte.

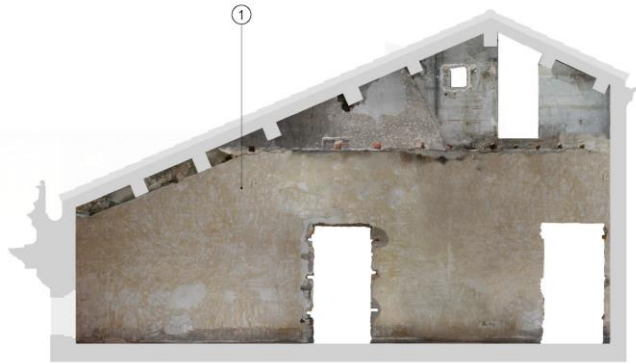


Nota:

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

Stato di Progetto

ARUP

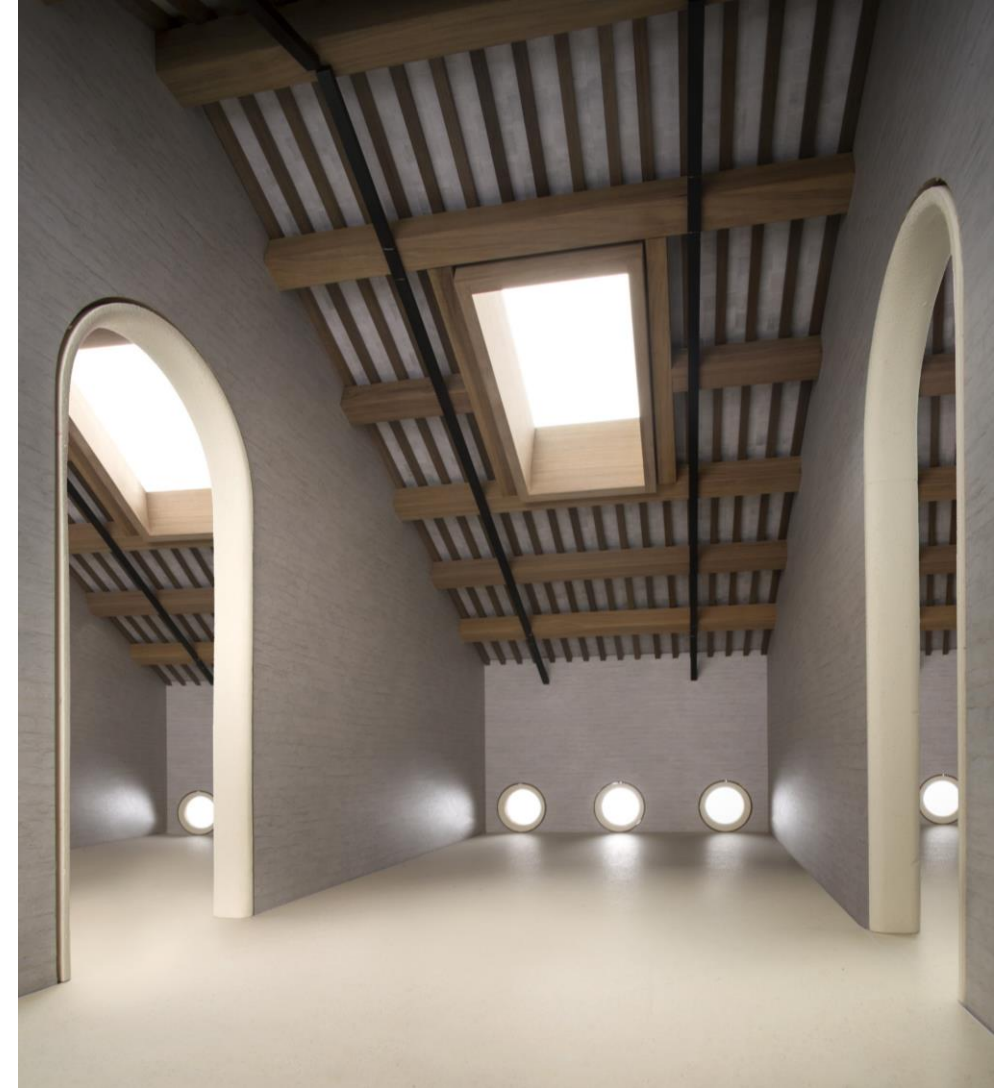
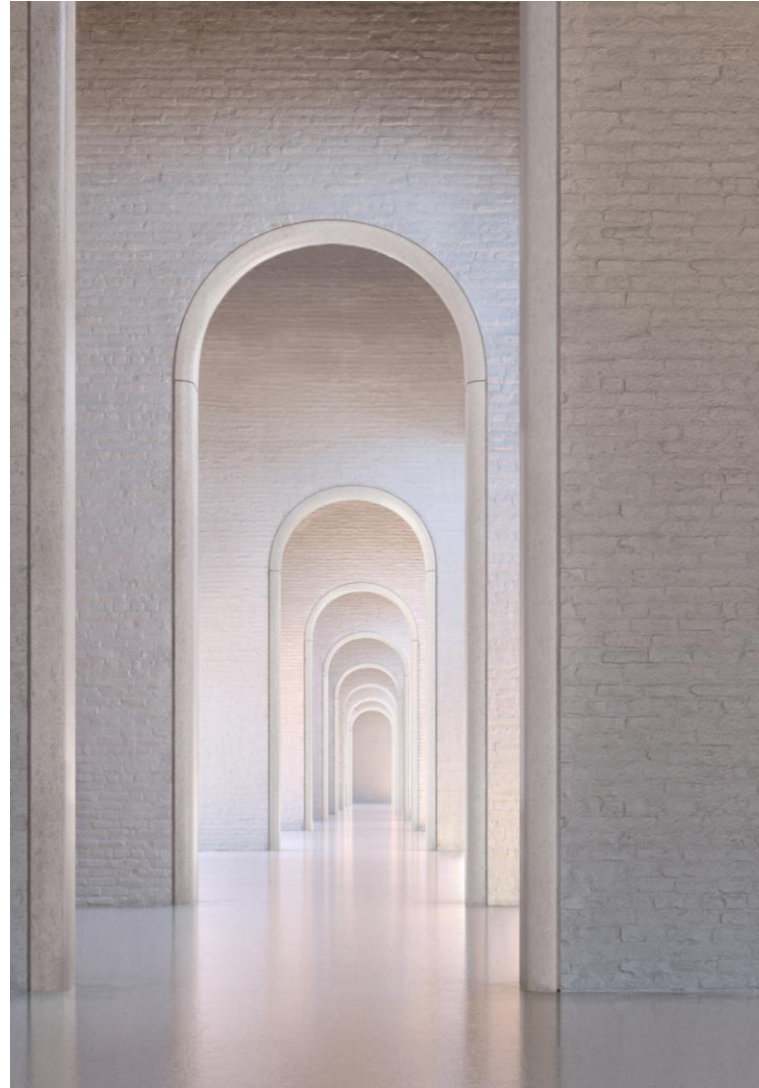


Attuale



Progetto

Procuratie Vecchie, Venezia, 2019
New exhibition area at the third floor
(Source: David Chipperfield Architects)

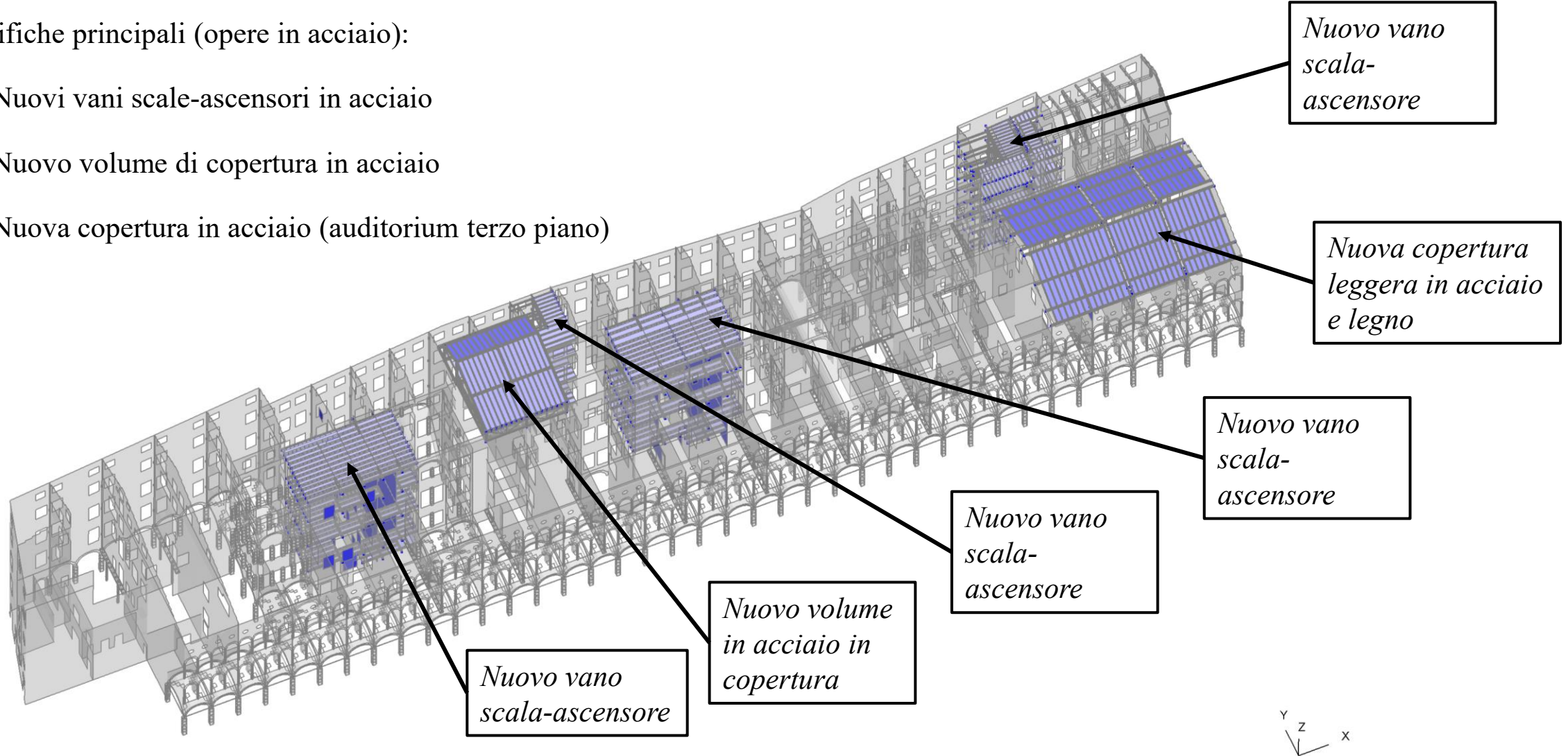


Stato di Progetto

ARUP

Modifiche principali (opere in acciaio):

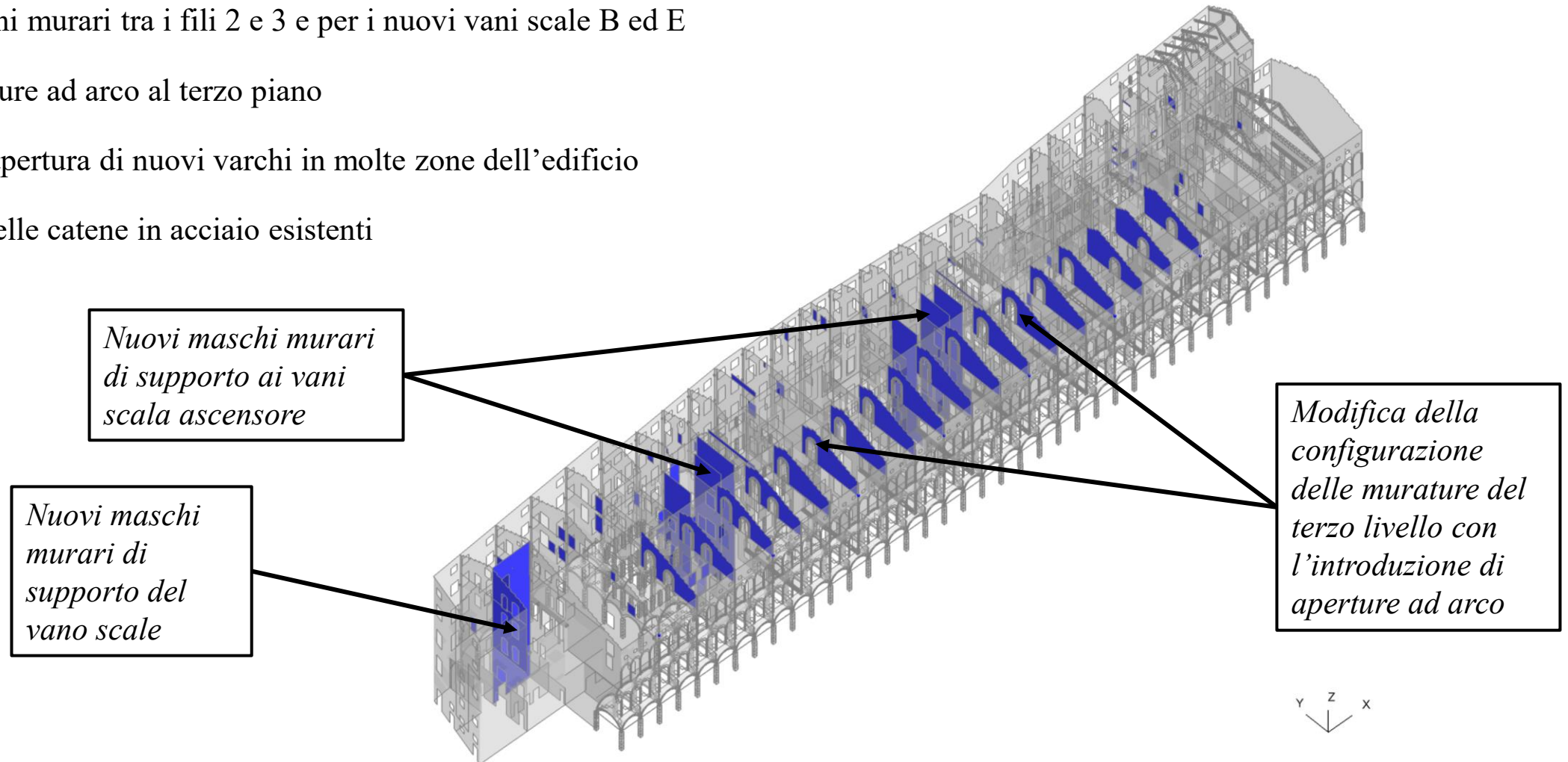
1. Nuovi vani scale-ascensori in acciaio
2. Nuovo volume di copertura in acciaio
3. Nuova copertura in acciaio (auditorium terzo piano)



Stato 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
4. Ripristino delle catene in acciaio esistenti



Stato di Progetto

Modifiche principali (solai):

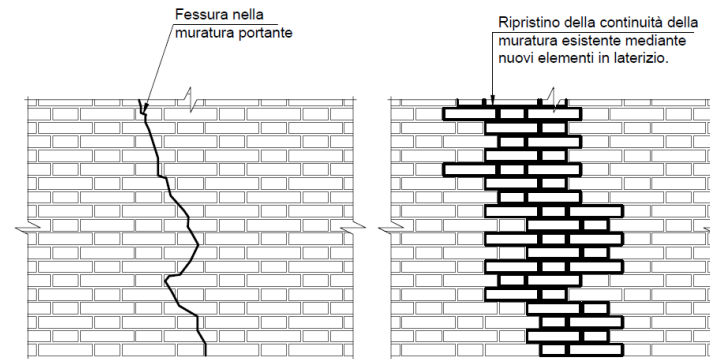
1. Modifica dei carichi variabili al terzo piano da 3.0kN/m^2 a 5.0kN/m^2 (ψ da 0.3 a 0.6)
2. Solai del secondo e del terzo piano rinforzati con doppio tavolato, bandelle in acciaio chiodate e collegati alle murature perimetrali mediante profili ad L in acciaio e perfori armati.
3. Demolito il mezzanino del piano quarto.
4. Carichi accidentali aumentati in altre aree per la presenza di impianti.



Stato di Progetto

Interventi di rinforzo su murature

1. Ristilatura dei giunti / ripristino dei giunti di malta ammalorati
2. Scuci-cuci
3. Riparazione delle lesioni
4. Ripristino delle catene ammalorate
5. **Intonaco armato in basso spessore**
 - Da entrambi i lati dove possibile
 - Malta di calce e rete in fibra
 - Spessore aggiunto circa 30mm per faccia
 - Connettori in acciaio INOX 9/m², iniettati con malta di calce



Prima dell'intervento

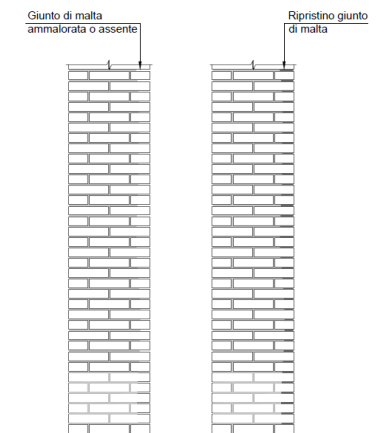
Scala: 1:20

Dopo l'intervento

Scala: 1:20

Intervento di ripristino in caso di muratura lesionata

"Scuci e cucì"



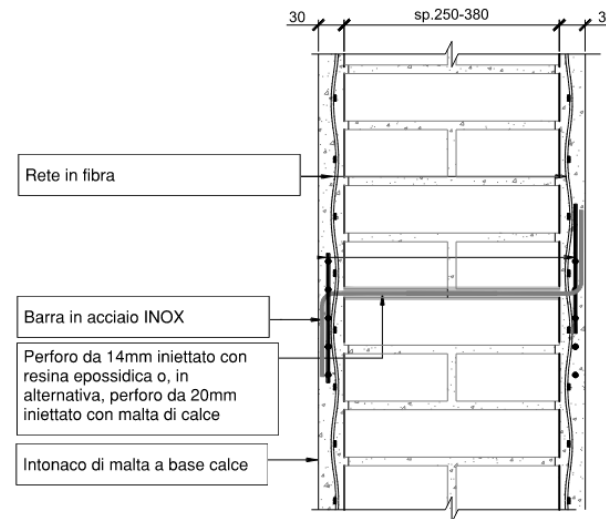
Prima dell'intervento

Scala: 1:20

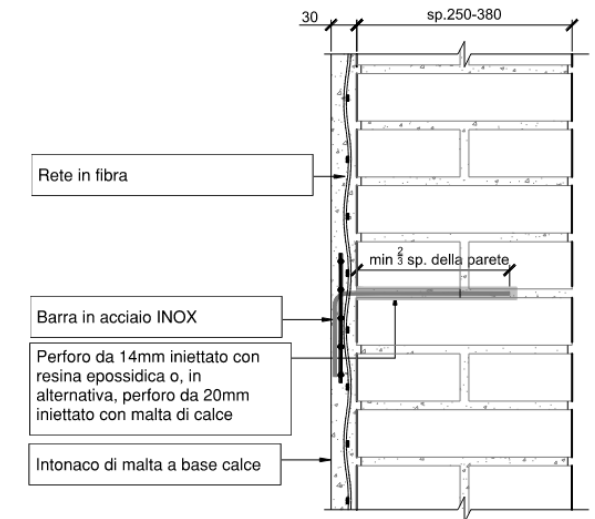
Dopo l'intervento

Scala: 1:20

Ripristino giunti di malta



Dettaglio A
(Intonaco armato su 2 lati)
Scala: 1:5

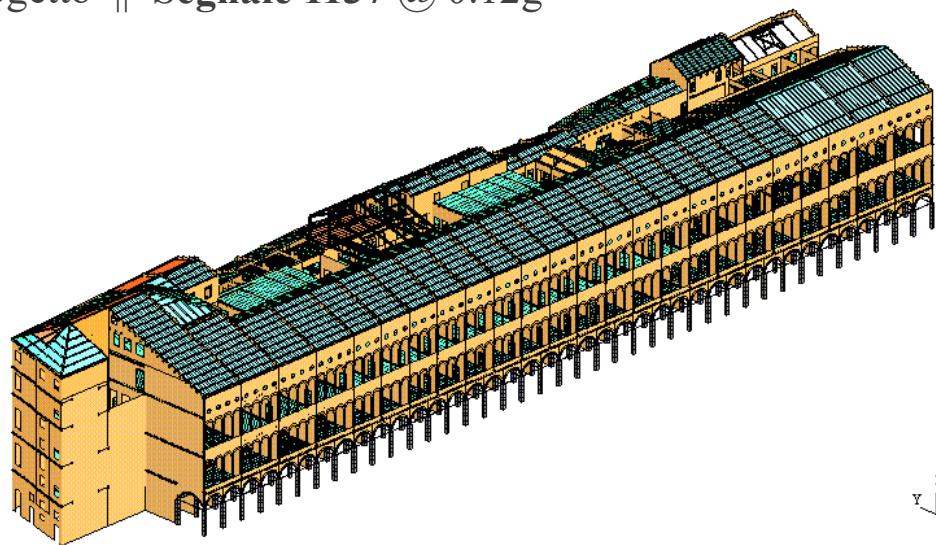


Dettaglio A
(Intonaco armato su 1 lato)
Scala: 1:5

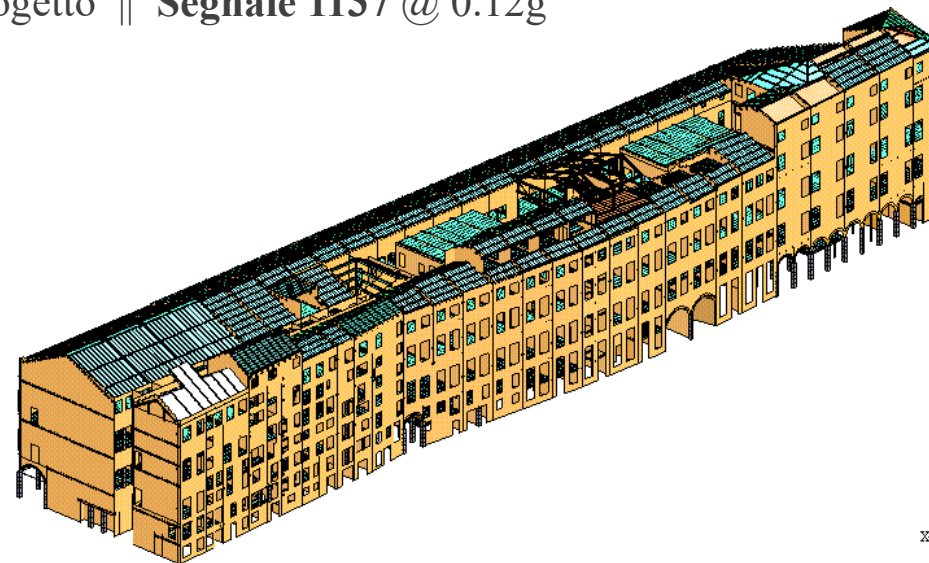
Comportamento sismico dell'edificio – Animazione

Progetto || Segnale 1137 @ 0.12g

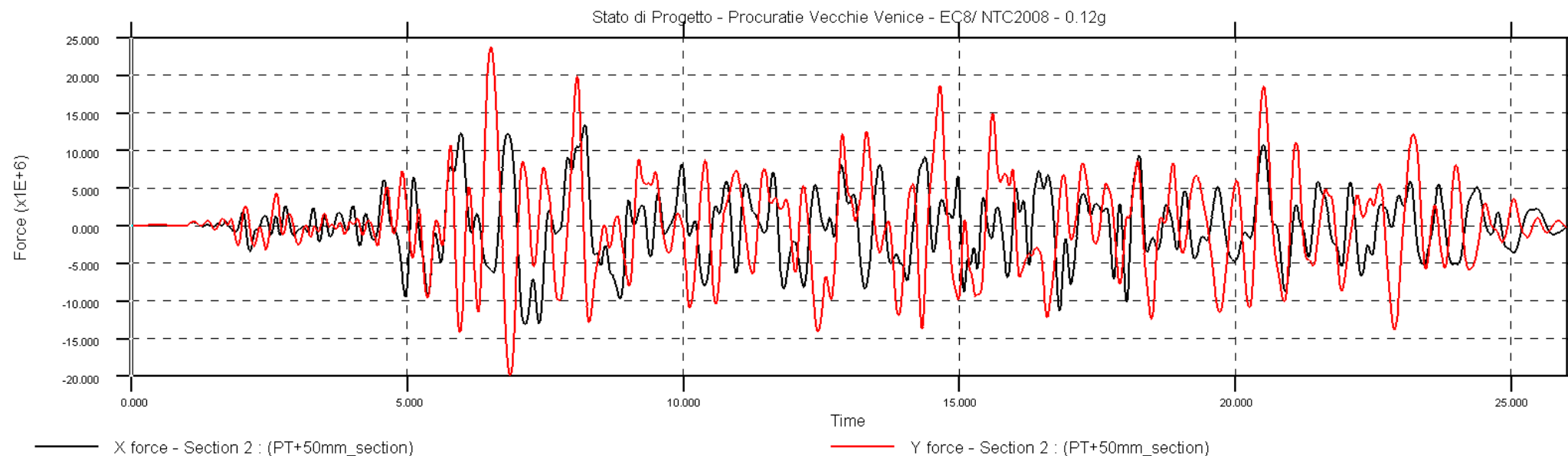
Progetto || Segnale 1137 @ 0.12g



0.00

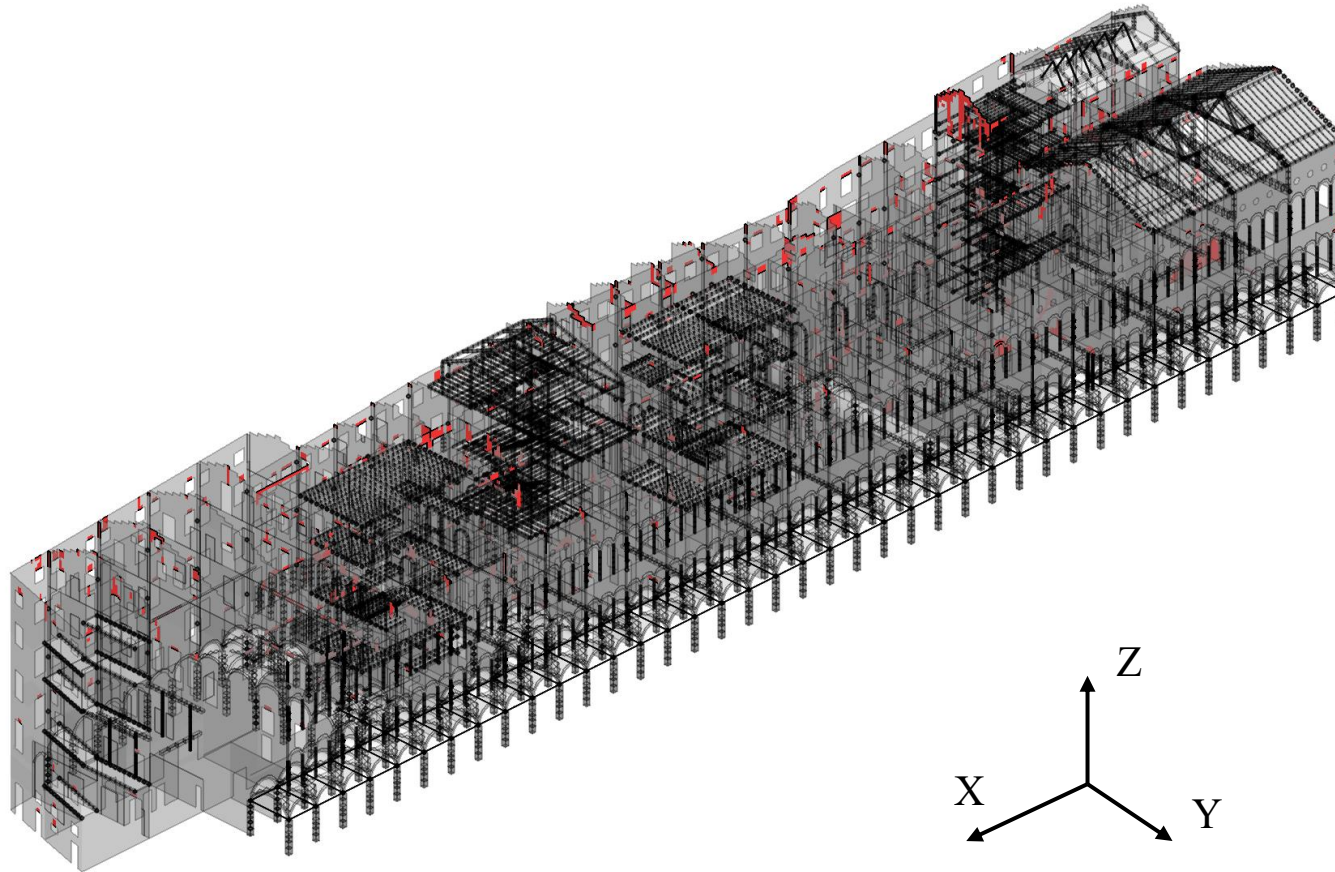


0.00



Porzioni collassate al termine dell'analisi

Stato di progetto || Segnale 1137 @ 0.12g

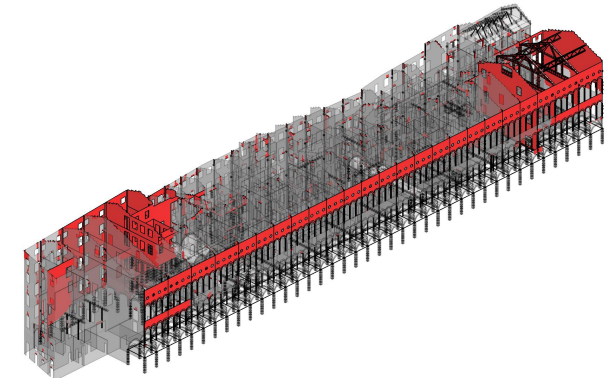


 *Porzioni collassate*



*Non si osservano
collassi estesi.*

Segnale 1137 Stato di fatto



Analisi Modale Stato Attuale

Secondo le indicazioni delle NTC2008 [7.3.4.2], l'analisi dinamica non lineare deve essere confrontata con una analisi modale con spettro di risposta di progetto, al fine di controllare le differenze in termini di sollecitazioni globali alla base delle strutture.

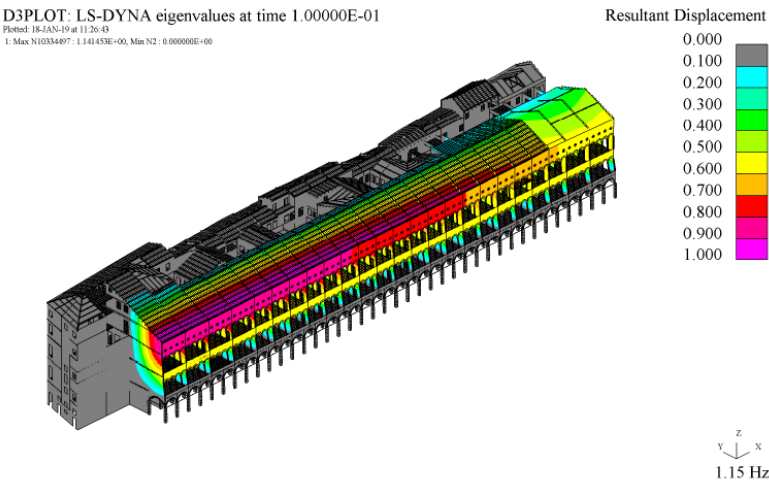


Figura 140 - 1° Modo, T = 0,867 s

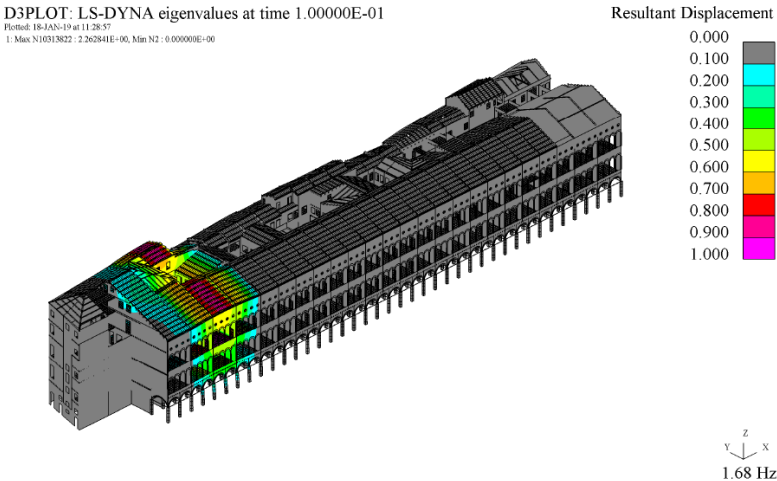


Figura 141 - 3° Modo, T = 0,594 s

ARUP

Modo	Periodo	Massa X	Massa Y
[-]	[s]	[%]	[%]
1	0.867	20.83	0.00
2	0.652	0.00	0.18
3	0.594	0.03	9.70
4	0.577	0.00	0.34
5	0.572	0.00	0.02
6	0.571	0.00	0.28
7	0.567	0.00	0.01
8	0.559	0.15	0.00
9	0.548	0.00	0.53
10	0.537	0.00	0.08
...			
252	0.419	5.66	0.00
...			
2200	0.322	0.01	0.00
Tot M [%]		67.4	57.8

Nota: si osserva una notevole difficoltà nel raggiungimento di % accettabili di massa partecipante.

Analisi Modale Stato di Progetto

Soprattutto grazie agli interventi di irrigidimento dei solai in legno, che hanno portato la struttura ad avere un comportamento dinamico globale più uniforme, è stato possibile svolgere una analisi modale e ottenere risultati in accordo con le prescrizioni normative.

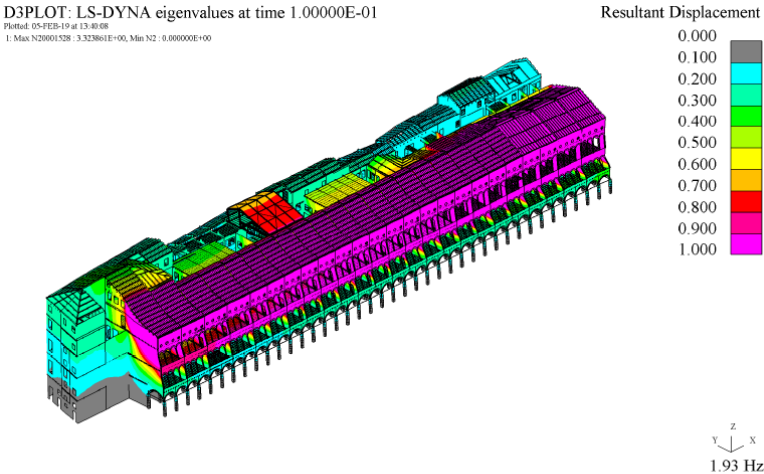


Figura 143 - 1° Modo, T = 0,519 s

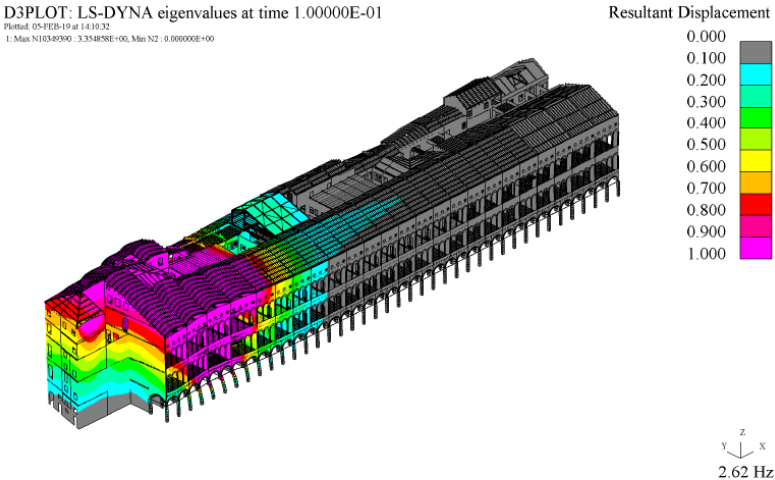


Figura 144 - 3° Modo, T = 0,382 s

ARIIP

Modo	Periodo	Massa X	Massa Y
[-]	[s]	[%]	[%]
1	0.519	38.67	0.01
2	0.420	0.00	0.00
3	0.382	0.02	21.58
4	0.368	0.11	0.00
5	0.362	0.00	0.00
6	0.362	3.09	0.00
7	0.352	3.78	0.01
8	0.341	14.91	0.03
9	0.337	0.00	0.13
10	0.335	2.93	4.20
11	0.335	0.52	0.66
12	0.334	0.17	0.06
13	0.331	0.89	25.85
...			
19	0.313	0.61	11.65
...			
1500	0.108	0.00	0.05
Tot M [%]		89.0	84.0

Caso studio: Blind prediction - SERA Project

Scopo del lavoro

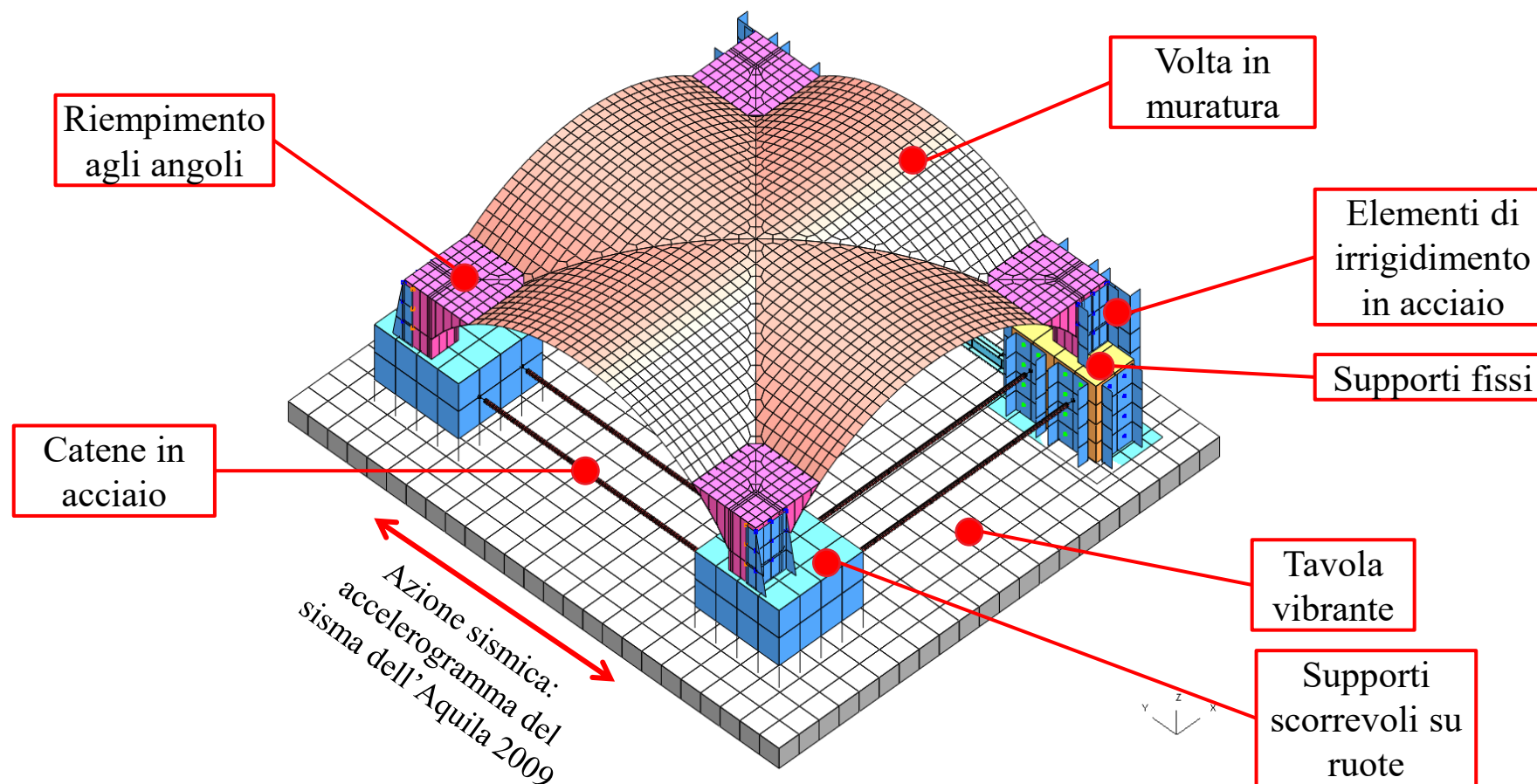
- Nel 2021, l'università di Genova, ha organizzato una competizione con lo scopo di replicare con modelli analitici un **test su tavola vibrante di una volta a crociera in muratura**, poi svolto presso il Laboratório Nacional de Engenharia Civil in Lisbon.
- E' disponibile l'articolo "Shake-Table Testing of a Brick Masonry Groin Vault: Overview of Blind Predictions and Postdictions and Comparison with Experimental Results" [C. Calderini, Ottobre 2024]



Blind prediction: SERA Project (2021)

Modellazione analitica

- Arup ha sviluppato un modello analitico in LS-DYNA molto dettagliato



Blind prediction: SERA Project (2021)

Modellazione analitica

Label: 30001 ▾ Elem types: Shell, Tshell

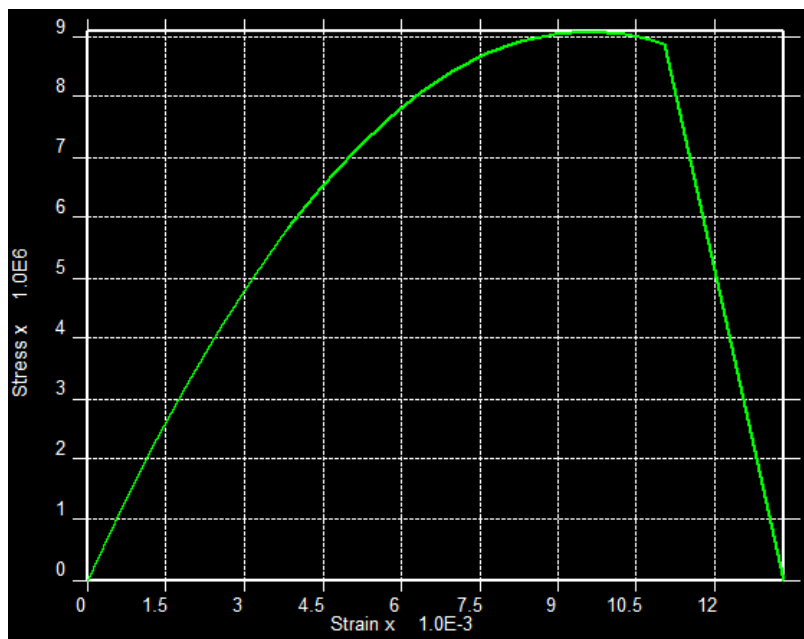
Type: MAT_204: SHELL_MASONRY ... FLTR

Suffix: <none> ...

Title: Clay-pre1945

Suffixes:

Row\Col	1	2	3	4	5	6	7	8
1	<Label>	RO _F	E _F	PR _F	FC _F	HARDEN	RATEFF _F	TYPE _F
	30001	2255.2	2.223E9	0.25	9100000.0	-1003	10000.0	4.0



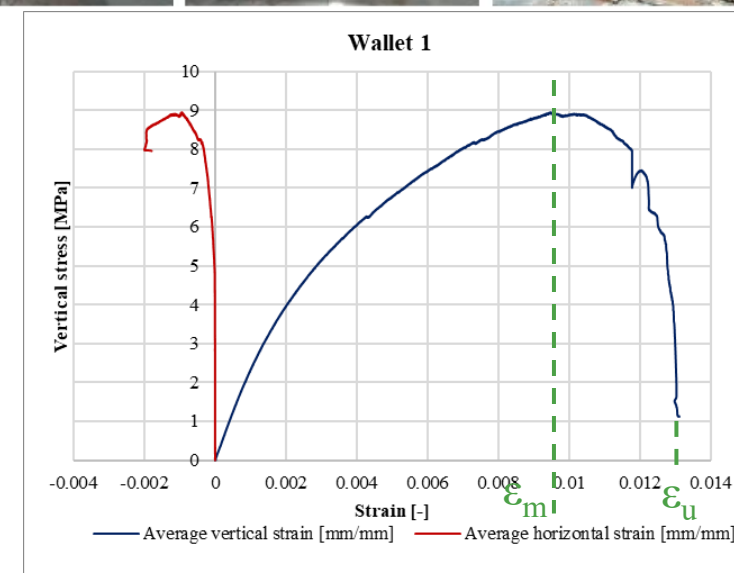
ε_m and ε_u mean values from test curves

$$\frac{f_m}{f'_m} = 2 \frac{\varepsilon_m}{\varepsilon'_m} - \left(\frac{\varepsilon_m}{\varepsilon'_m} \right)^2$$

Test results

Table 4. Axial compression tests results (average values after 8 months of curing). Number of wallets: 4.
(σ : standard deviation; CoV: coefficient of variation)..

Material	Tests		Dimensions	Max force	Density	Elastic modulus	Compressive
			[mm]	[N]	[kg/m³]	[MPa]	strength [MPa]
Masonry wallets	Standard:	Value	619×468×118	5.0e+05	2255.2	2223.0	9.1
	EN 1052-	σ	9.1×0.6×0.5	1.4e+04	20.5	309.6	0.2
	1:1998	CoV	1.5%×0.1%×0.4%	3.0%	1.0%	14.0%	2.0%

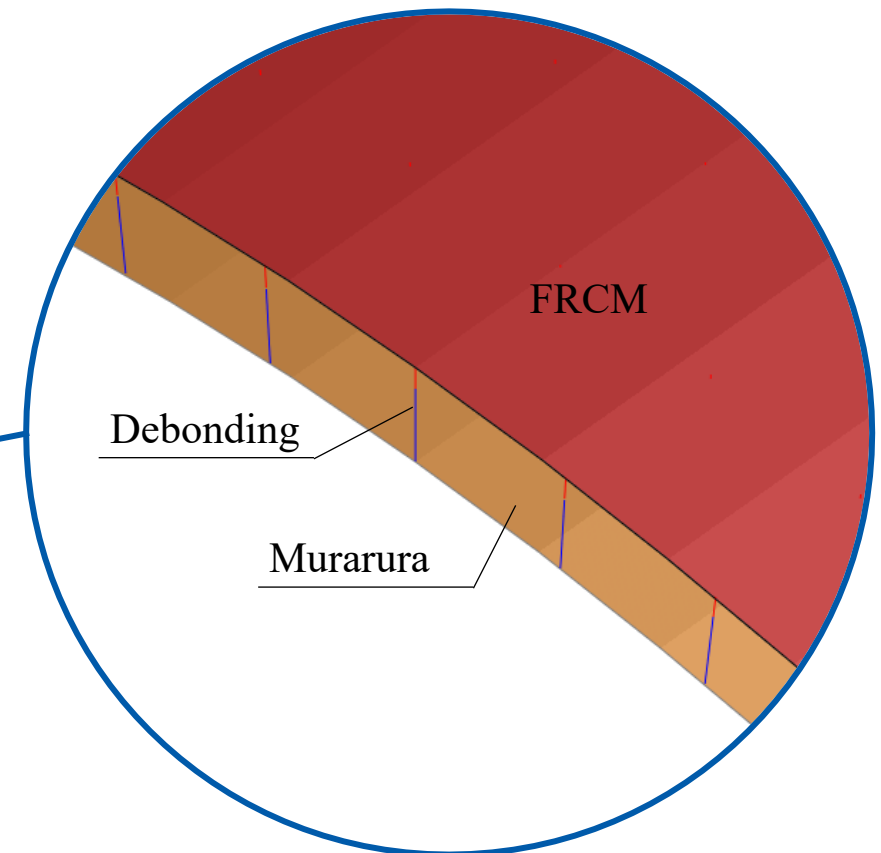
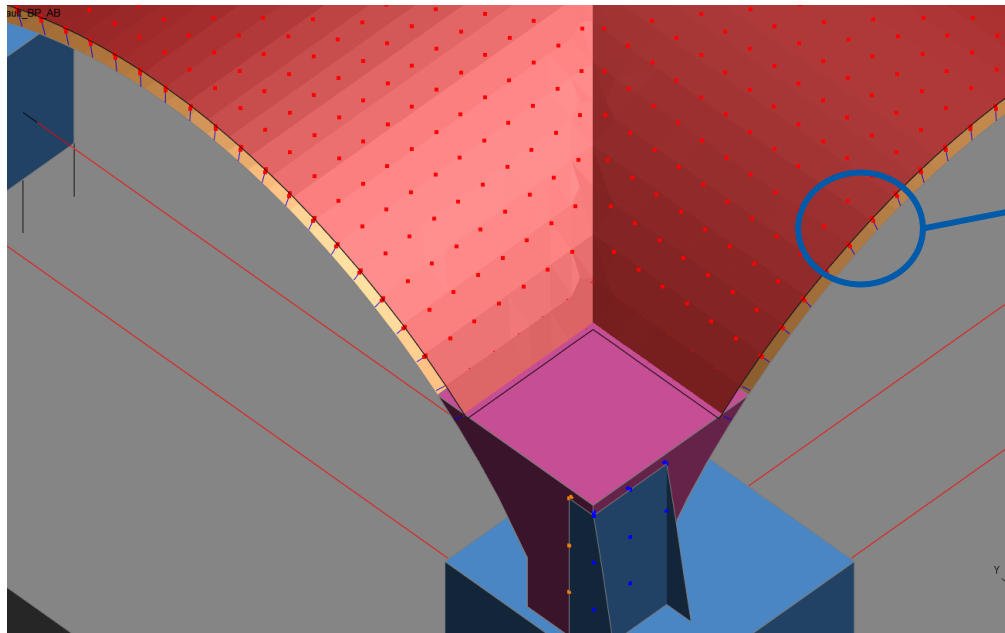


Blind prediction: SERA Project (2021)

Modellazione analitica

L'FRCM viene modellata in modo esplicito:

- Si sovrappone uno strato di malta cementizia agli elementi in muratura
- Lo strato di malta tiene in considerazione della presenza della rete in fibra
- Il collegamento tra muratura e malta è modellato con elementi fittizi che simulano il potenziale fenomeno di «debonding» tra i due materiali

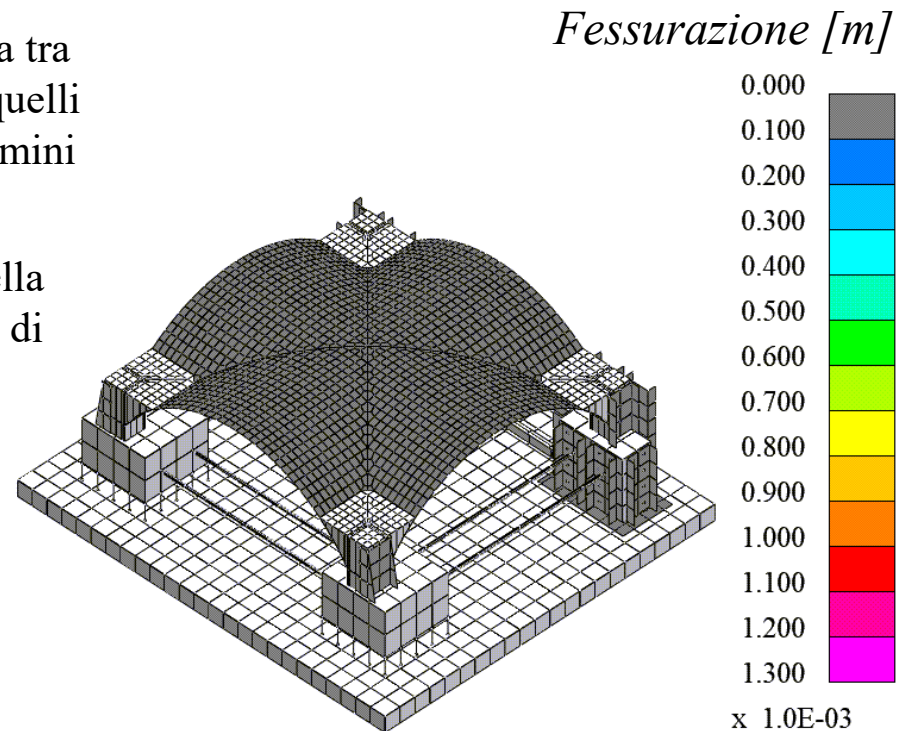
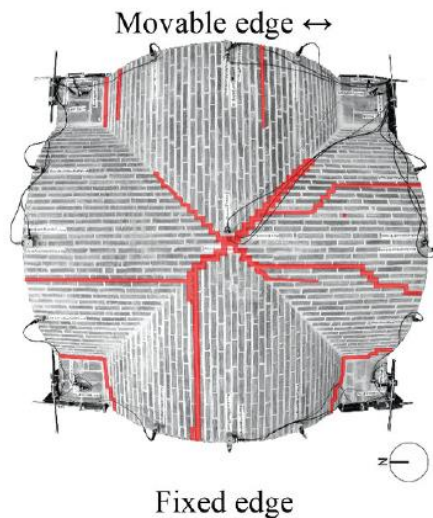


Blind prediction: SERA Project (2021)

Simulazione e risultati

L'analisi ha mostrato:

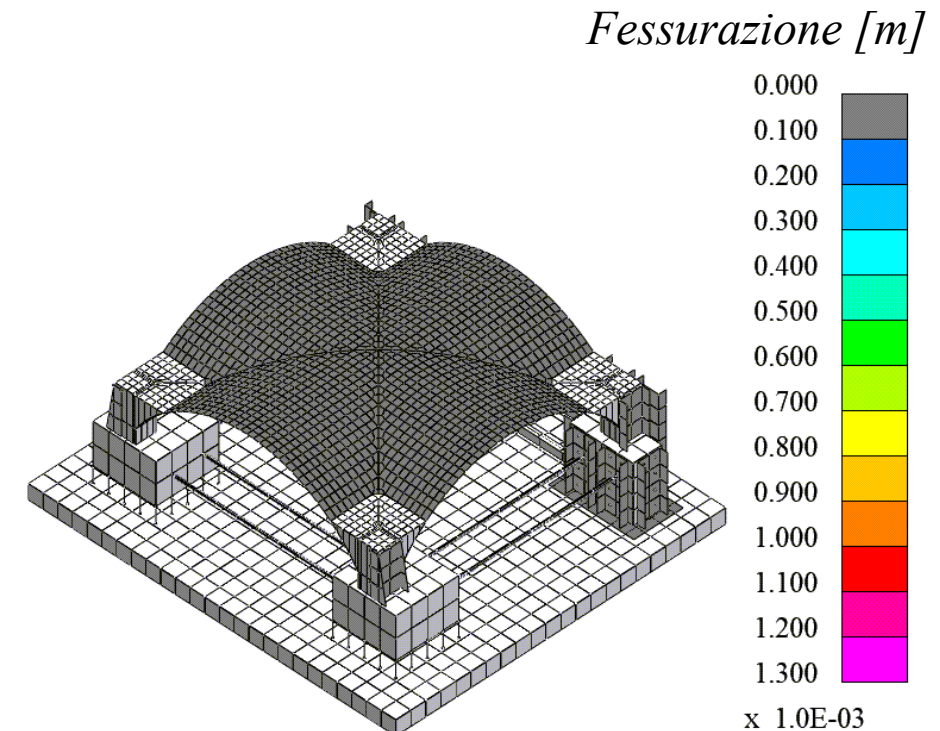
- una buona corrispondenza tra i risultati sperimentali e quelli analitici soprattutto in termini di fessurazione
- Una buona affidabilità nella modellazione del sistema di rinforzo



URM



0.0



+ FRCM



0.0

Conclusione

Sistemi di rinforzo a basso impatto

La progettazione deve essere mirata a rinforzare le strutture esistenti minimizzando l'intrusività degli interventi e il costo.

Analisi avanzate

L'uso di analisi avanzate permette di ridurre il conservativismo, di individuare in modo molto preciso le vulnerabilità e di ottimizzare le misure di rinforzo.

Integrazione di teoria e riferimenti normativi

Le analisi avanzate devono sempre comunque essere supportate da materiale che ne dimostri l'affidabilità e la corrispondenza con le prescrizioni normative.

ARUP