

CONVEGNO FINALE

Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti



19-21 novembre 2025

Applicazioni su ponte in muratura

**Antonio Bilotta, Simona Coccia, Fabio Di Carlo, Antonella Francavilla, Claudio Guarnaccia,
Sergio Lagomarsino, Alberto Meda, Gianvittorio Rizzano, Daniele Sivori**

UR coinvolte: Napoli *Federico II*, Roma *Tor Vergata*, Salerno, Genova

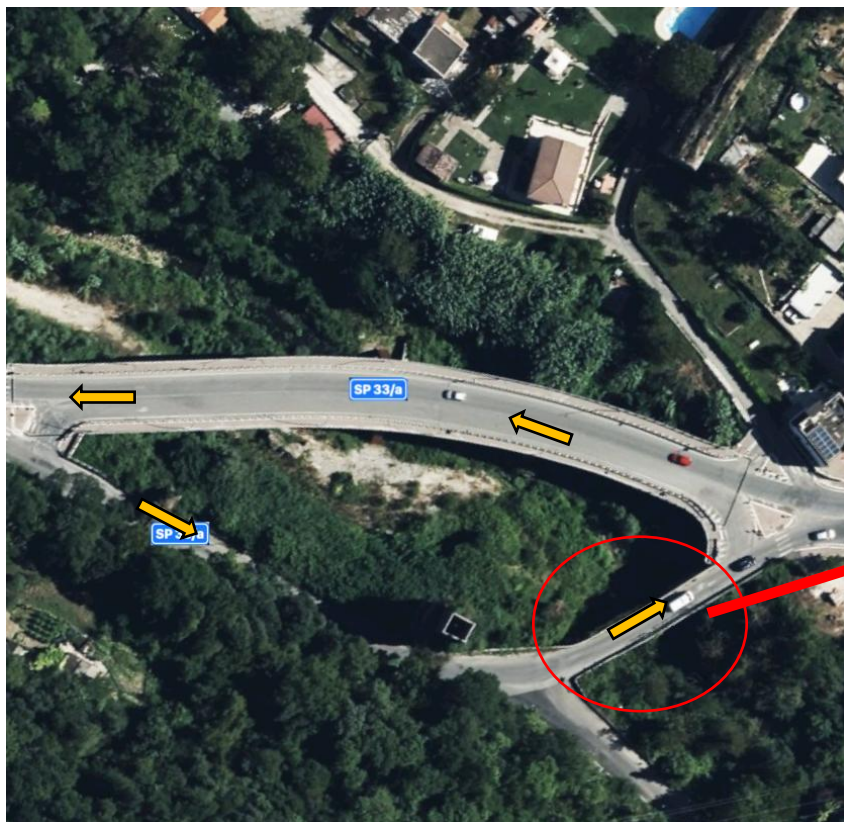
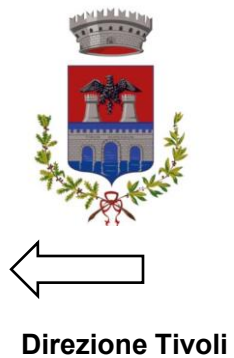
- Inquadramento del ponte
- Rilievo geometrico
- Indagini
- Modellazione numerica
- Progettazione della prova di carico
- Conclusioni



- **Codice IOP:** STSP0033PNRZSKM5VL
- **Opera:** Ponte SP33a 2+100 su Fosso di San Gregorio PNRML 1820002
- **Infrastruttura:** SP 33a SP0033
- **Concedente:** Città Metropolitana di Roma Capitale
- **Concessionario:** Citta Metropolitana di Roma Capitale

Comune	Tivoli	
Provincia	Roma	
Regione	Lazio	
Coordinate geografiche (WGS84)	Lon.	12,82201
	Lat.	41,95034

Ponte degli Arci



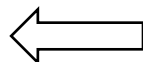
Direzione Autostrada



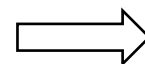
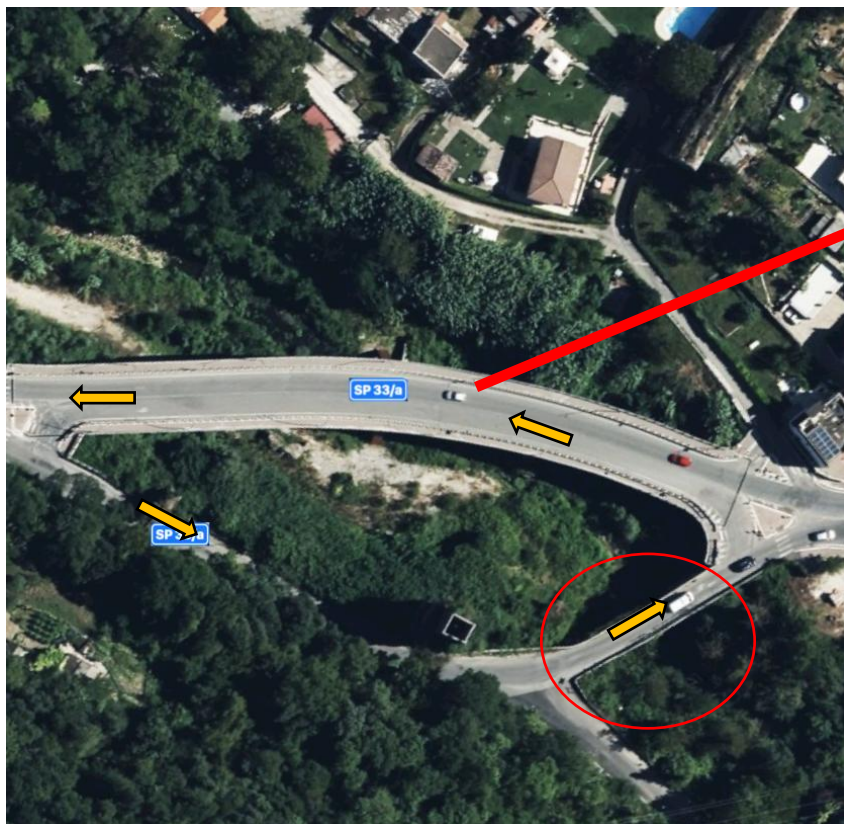
CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

Ponte degli Arci



Direzione Tivoli



Direzione Autostrada A24
Casello Castel Madama



Dal 22 Dicembre 2018, apertura
nuovo ponte degli Acquedotti →
riorganizzazione S.P. 33/a;

CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

ACQUEDOTTI ROMANI: LIMITAZIONE DI SAGOMA





- Assenza di dati ufficiali di TGM per la strada SP33/a → valutazione indiretta
- ✓ Osservazioni in sito: flusso consistente con autovetture, autobus e mezzi pesanti;
- ✓ Riferimento ai dati **ANAS** sulla **SS 5** (postazioni Guidonia, Tivoli, Roviano) come strada analoga;

	alto	medio	basso
TGM commerciale (>3,5t) (sulla singola corsia, in veic/gg)	≥ 700	300 < < 700	≤ 300
TGM totale (sull'intera carreggiata, in veic/gg)	≥ 25000	10000 < < 25000	≤ 300

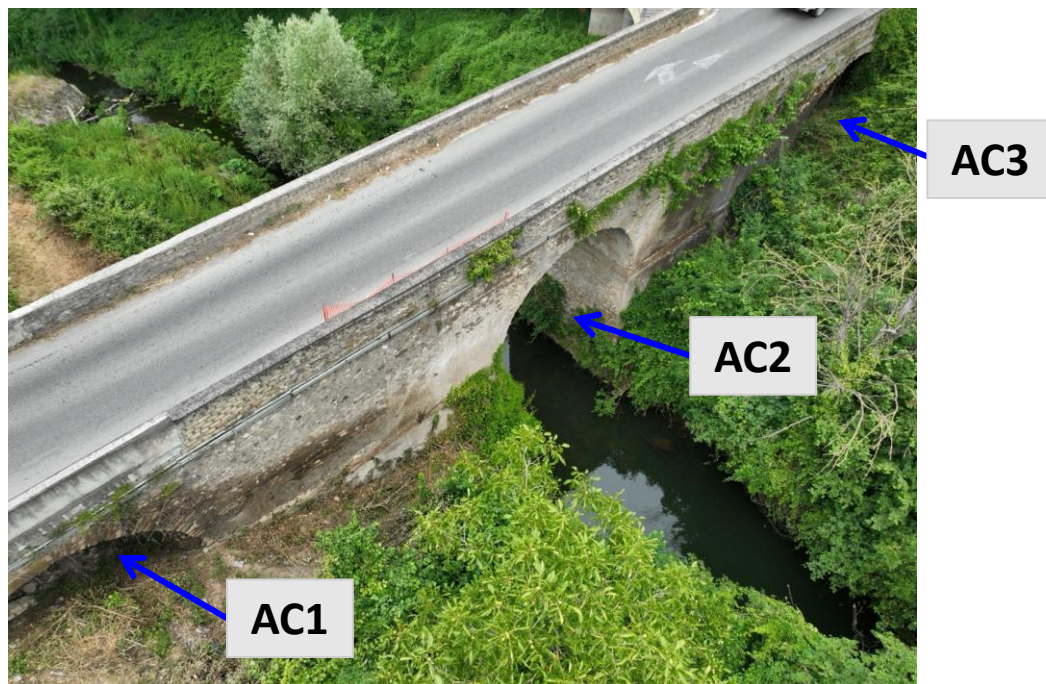


- Risultato: traffico riconducibile ad un livello **medio** secondo i criteri delle LLGG

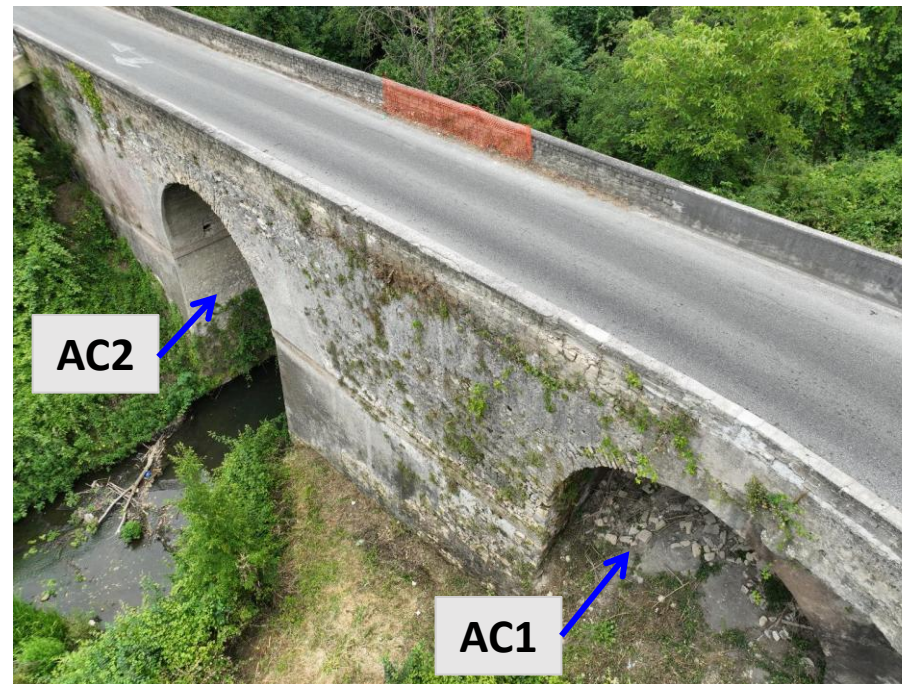
Classificazione livello TGM - alto, medio, basso - secondo criteri LLGG22

CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura



Vista lato monte



Vista lato valle

Ponte a 3 archi

nella scheda livello 0-1-2 definito ponte ad 1 arco
ed un rilievo in cui ci sono 2 archi

Caratteristiche geometriche

Lunghezza (spalla-spalla)	40	m
Larghezza impalcato	5.85	m
Superficie carrabile	5.20	m
Luce maggiore	6.90	m
Altezza massima pila	13.20	m

- Analisi storico critica
- Rilievo geometrico e difettologico
- Campagna di indagini
- Interpretazione dei risultati delle prove
- Modello numerico
- Prova di carico (prevista per il 27 novembre 2025)

Analisi storico critica

- **Assenza** di elaborati progettuali originali e documentazione tecnica del ponte.
- Documentazione **iconografica** storica: tre dipinti del **XVIII – XIX** secolo che ritraggono il Ponte degli Arci e il contesto circostante



Robert & James Adam, 1755



Heinrich Bürkel, Campagnalandschaft, 1834



Cole Thomas, Arch of Nero, 1846

Laser scanner *LEICA RTC 360*



- rilievo **automatizzato**, nuvola di **milioni** di punti con texture reali;
- portata fino a **130 m.**



n. 20 scansioni

Laser scanner *LIXEL L2*



- rilievo in **movimento** senza postazioni fisse

Drone *DJI Mavic*



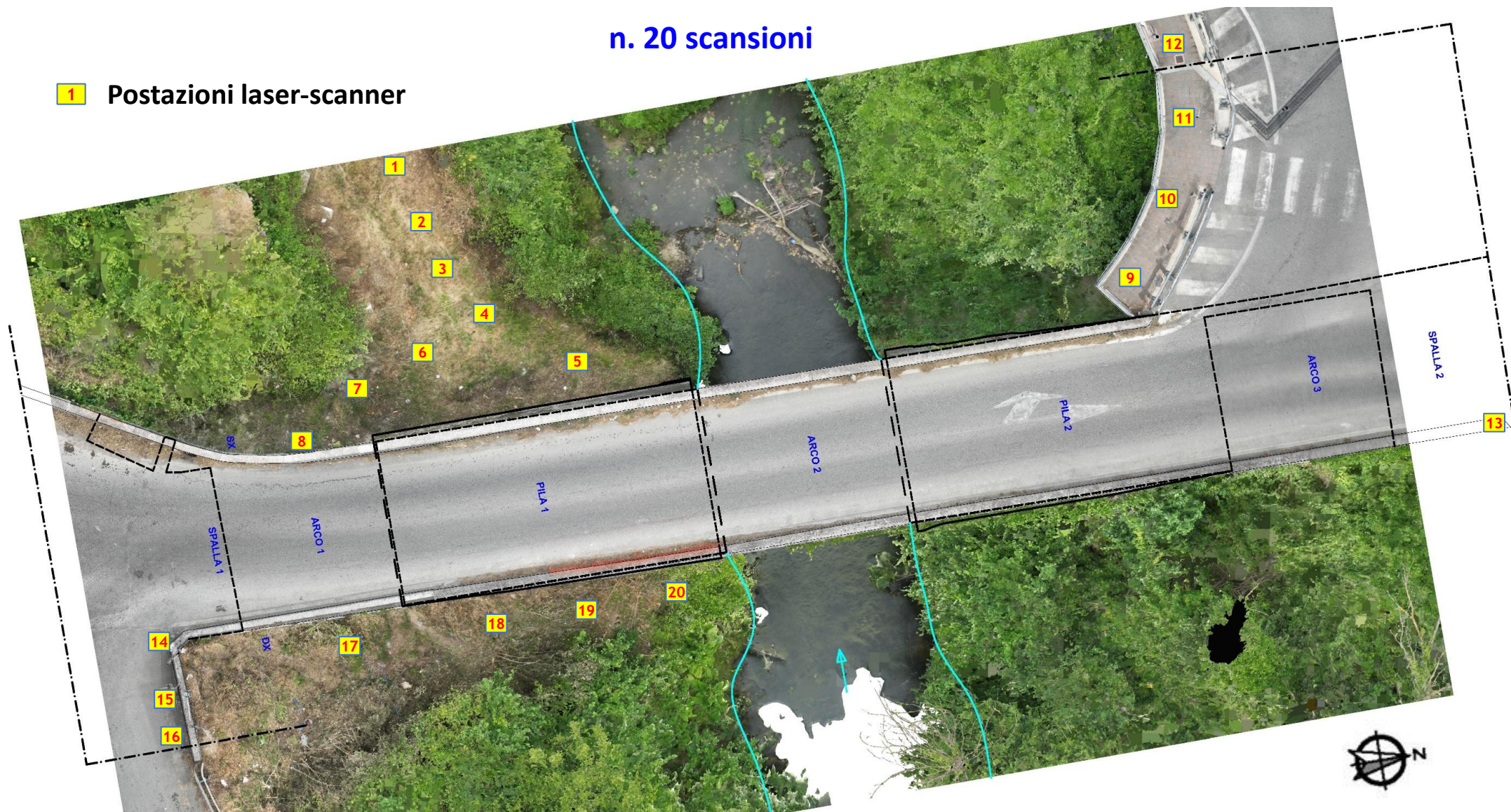
- rilievo **fotogrammetrico**, con foto scattate ogni 2 secondi
- supporto per ispezione delle parti **non accessibili** del ponte

CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

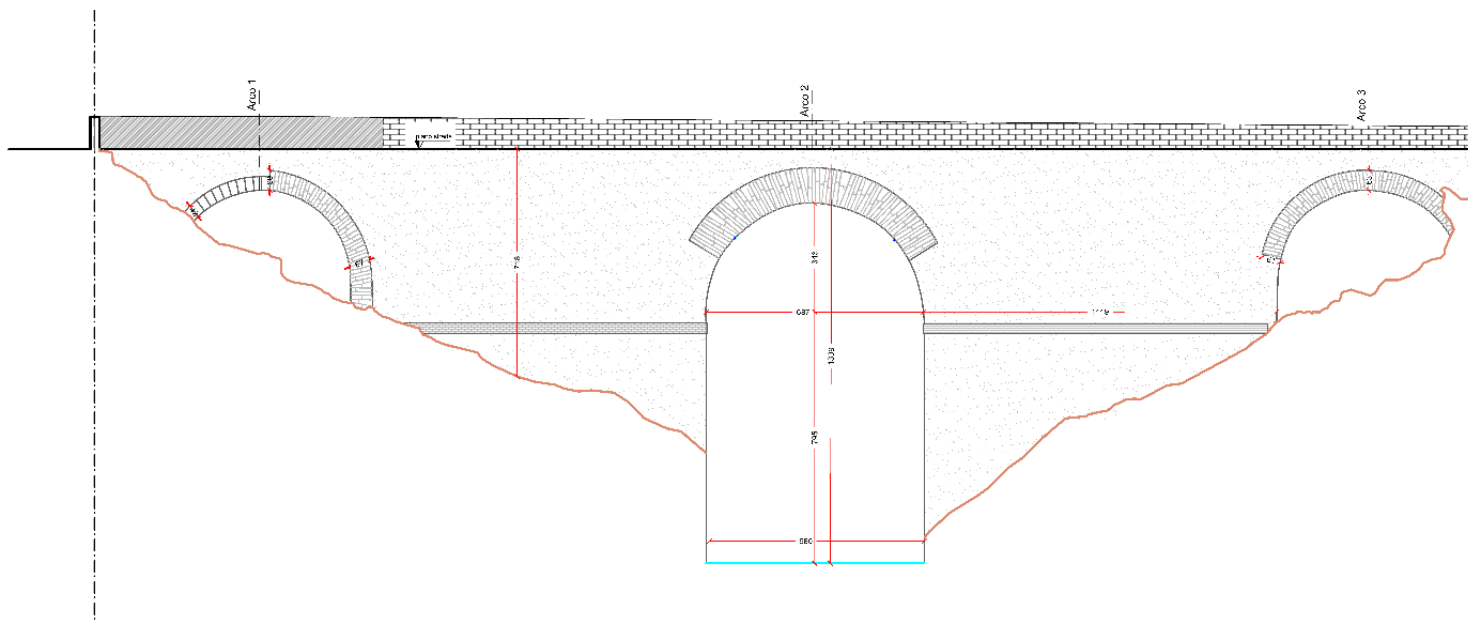
n. 20 scansioni

1 Postazioni laser-scanner

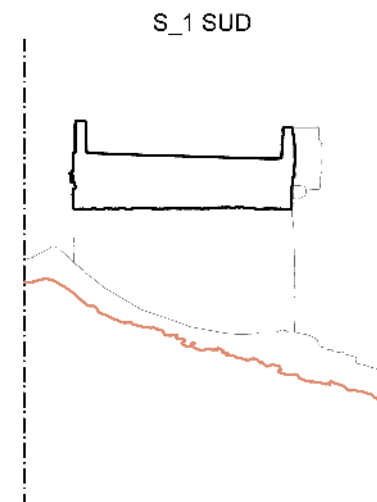


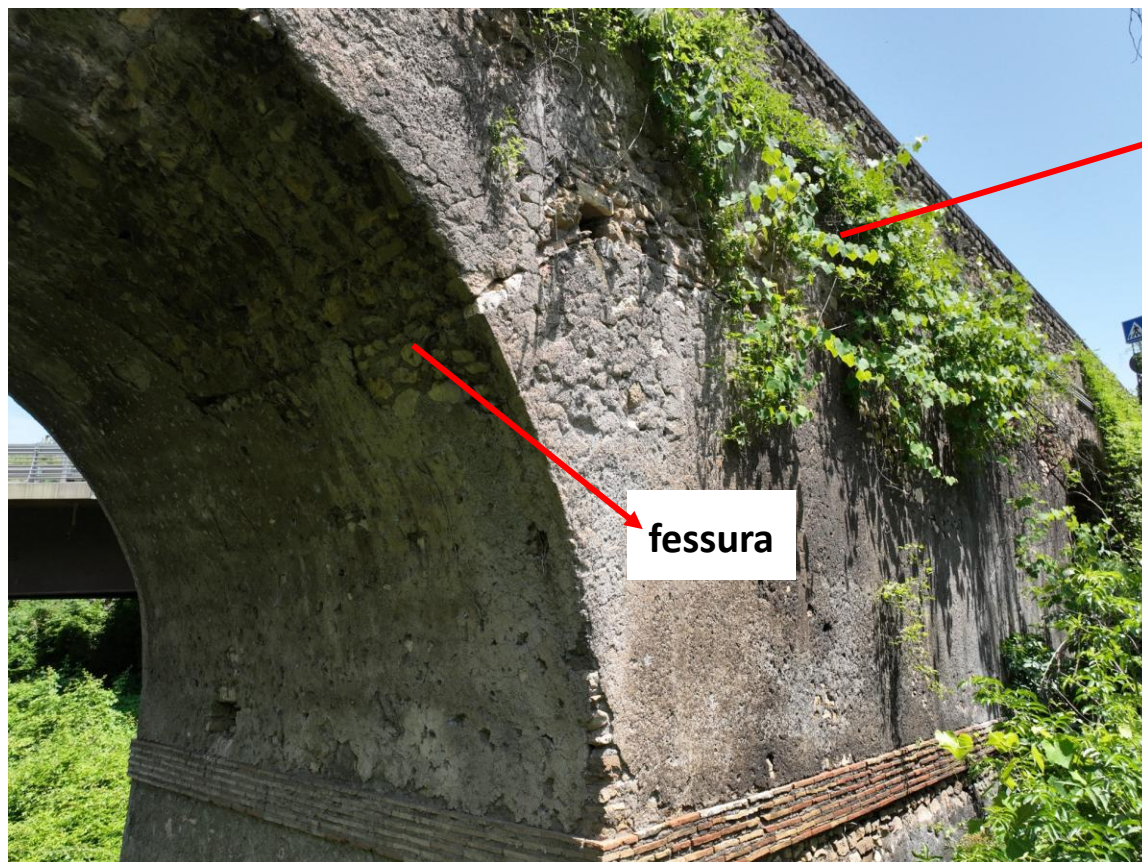
CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura



RESTITUZIONE IN CAD





Vegetazione infestante

fessura

Oltre a:

- distacchi e mancanza di porzioni di muratura,
- polverizzazione dei giunti di malta,
- ammaloramento legato all'assenza di un sistema di smaltimento delle acque meteoriche
- macchie di umidità diffuse lungo l'opera



CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

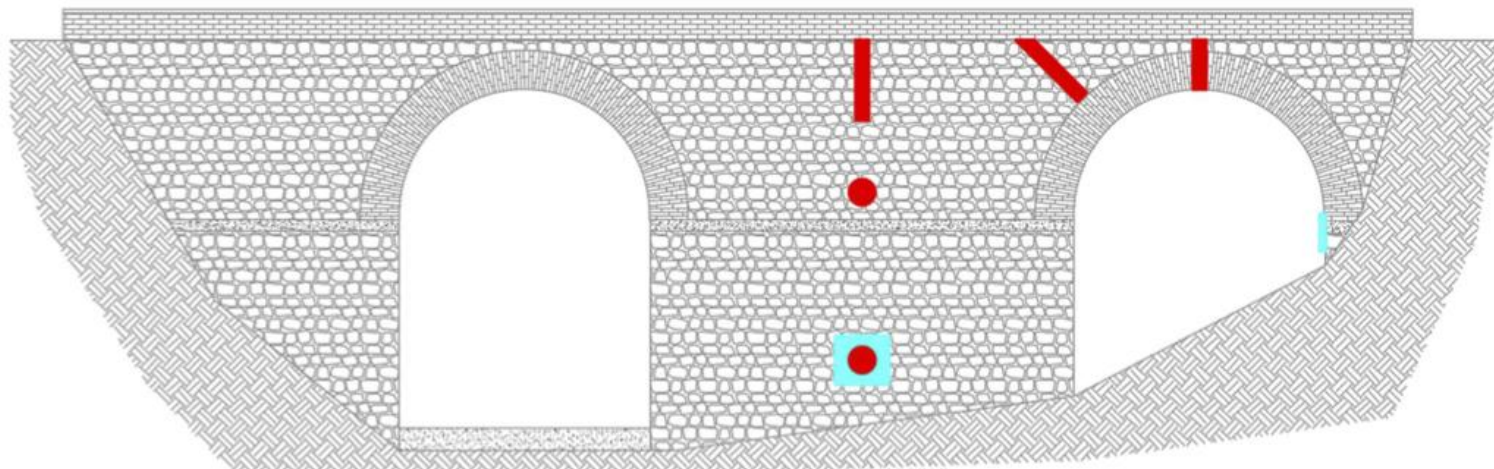
Applicazioni su ponte in muratura



Scopo del sopralluogo:

- verificare l'accessibilità per le indagini prima di richiedere i preventivi per le indagini
- verificare la necessità di eseguire operazioni prima delle indagini (es. sfalcio)
- capire quali aspetti sono importanti da investigare (es. nel caso in esame si era preoccupati che vi fosse una muratura a sacco)

MARTINETTO PIATTO - SINGOLO E DOPPIO
 CAROTE

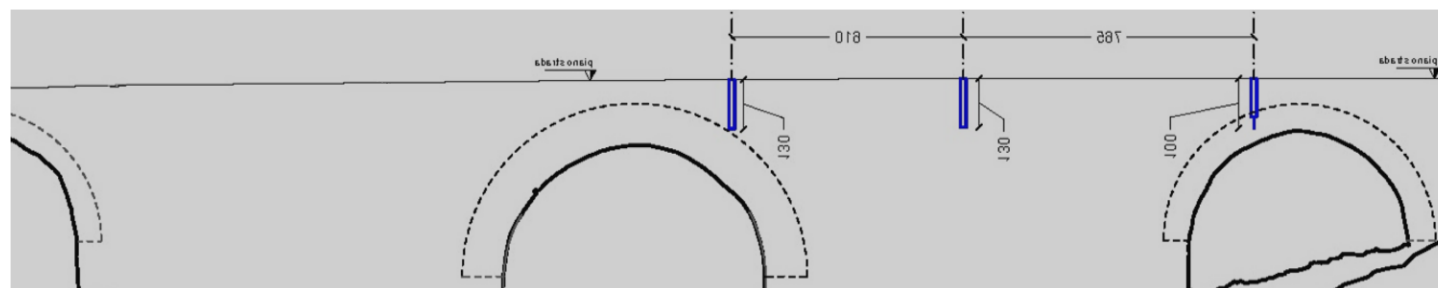


descrizione	quantità
prelievo di campioni di malta, con successiva analisi chimica per la determinazione della composizione;	3
prelievo di elementi in muratura e prova di compressione in laboratorio, finalizzata alla determinazione delle caratteristiche meccaniche della muratura in opera;	3
prova con martinetto piatto doppio per la valutazione dello stato tensionale e dei parametri meccanici della muratura, quali modulo elastico e resistenza;	2
saggi conoscitivi mirati a individuare il punto di connessione tra la barriera di protezione in muratura e l'eventuale soletta dell'impalcato;	3-4
Carotaggio obliquo a $\frac{3}{4}$ dell'arco (metà tra imposta e chiave)	1
Carotaggi orizzontali sulla pila e sull'imposta dell'arco	2
Carotaggi verticali 1 sull'arco in chiave uno sulla pila	2

- **Carotaggi** orizzontali (C1, C2) verticali (C3, C4, C5)
- Indagini **endoscopiche** (E1, E2)
- Test dei **martinetti piatti** (MP1, MP2)
- Prove **sclerometriche** (S1 - S10)
- Prelievo blocchi (BL1, BL2, BL3) per **prova** di **compressione**



In corso d'opera sono state modificate le posizioni delle carote orizzontali e si sono fatte carote verticali per individuare l'arco





endoscopio

- Analisi **stratigrafia interna** del corpo della pila (C1) e del rinfianco (C2)
- Integrazione mediante indagine **endoscopica importanti** per capire le ragioni dei vuoti

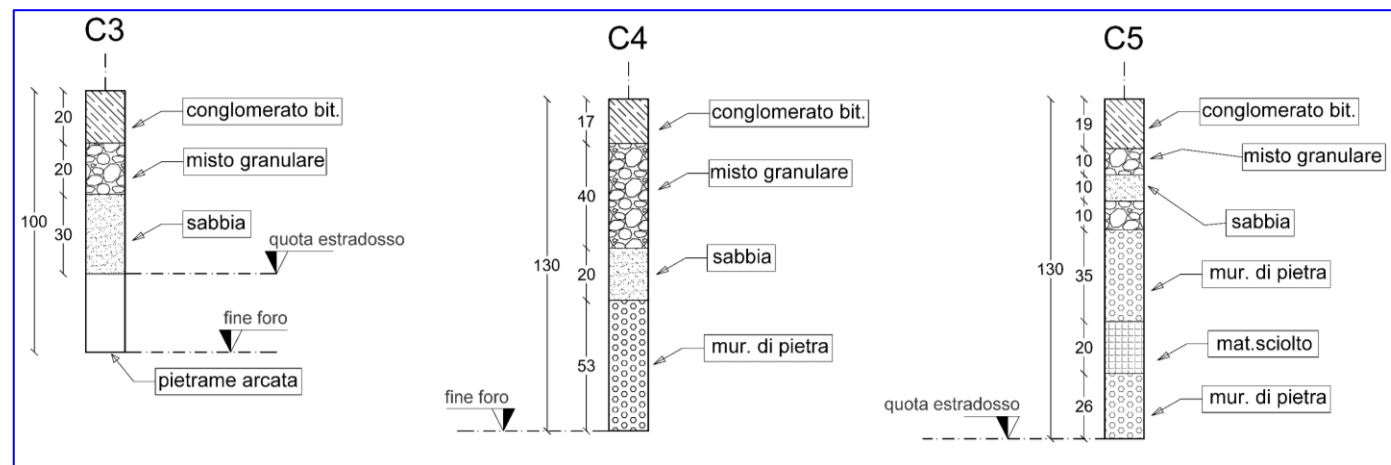


Campionamento carote orizzontali

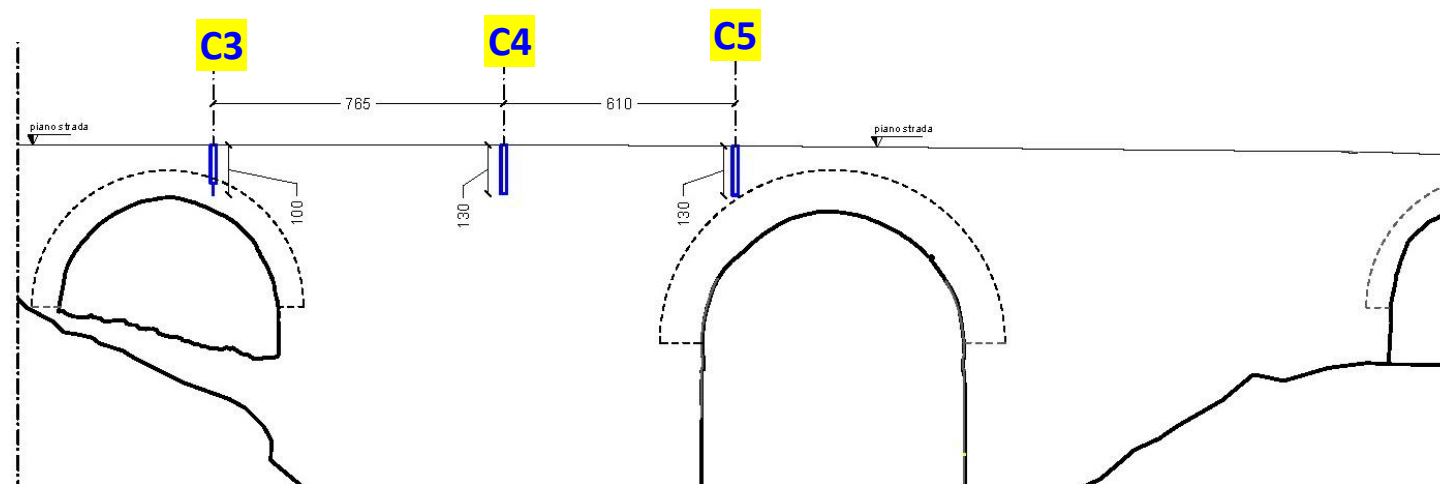
- ➔ • C2: fino a circa 190 cm di profondità con carotiere
- ➔ • C1: fino a circa 50 cm di profondità con carotiere



Carote verticali



Ricostruzione stratigrafia



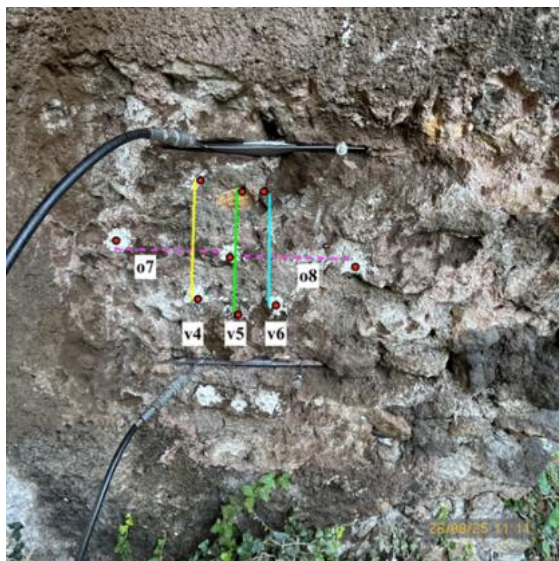
Posizione carotaggi sulla sezione longitudinale (mezzeria carreggiata)

➤ Analisi dei **carichi** non strutturali

➤ Analisi **spessore** volta arcate



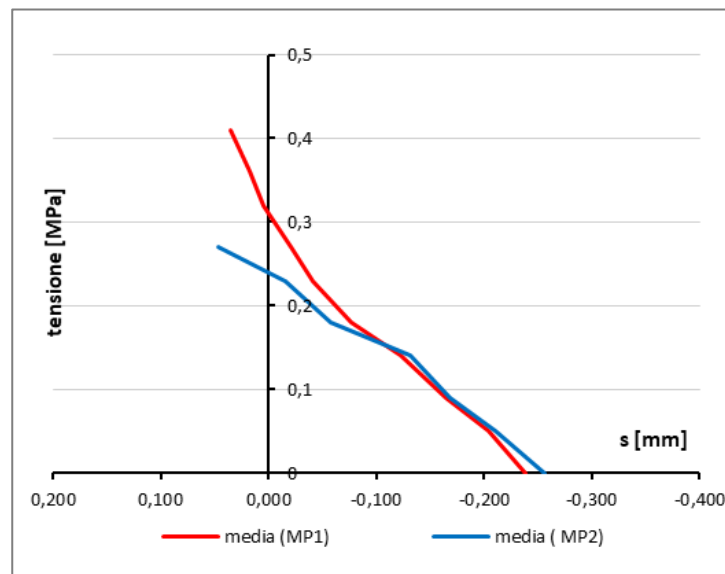
Martinetti piatti



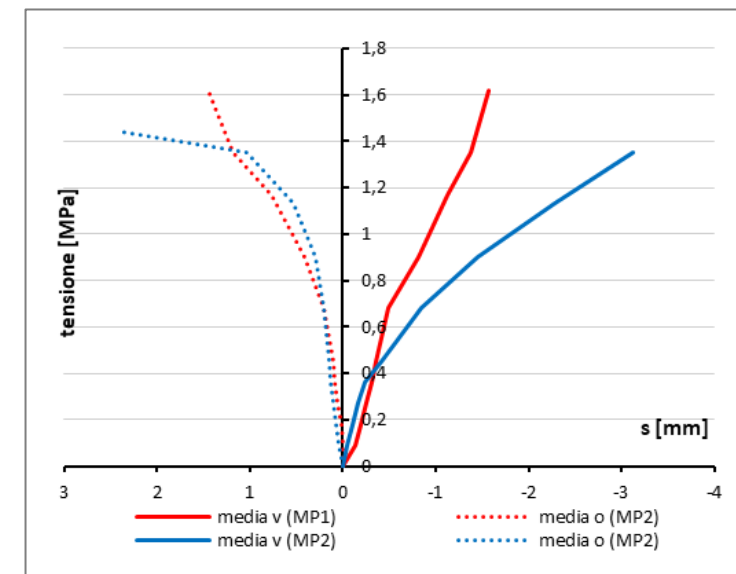
Schema basi di misura

- Martinetto singolo:
 - tensione **esistente** nel punto di misura $\sigma = p \cdot k_m \cdot k_a$
- Martinetto doppio:
 - Modulo di elasticità (E) in fase elastica
 - Tensione di **rottura** della muratura

Test singolo



Test doppio



test	tipologia muratura	tensione esistente [MPa]	tensione di prima fessurazione [MPa]	tensione di rottura [MPa]	Modulo di elasticità [MPa]
MP1	muratura mista in tufo e conci di pietra sbozzati	0,32	1,17	1,62	1242,3
MP2	muratura mista in tufo e conci di pietra sbozzati	0,23	1,13	1,44	1291,9

VALORI COMPARABILI CON INDICAZIONI CIRCOLARE 19

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 irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.,)	1,4-2,2	0,028-0,042	- -	900-1260	300-420	13 ÷ 16(**)



Presenza di blocchi di diversa tipologia, tra cui anche tufo

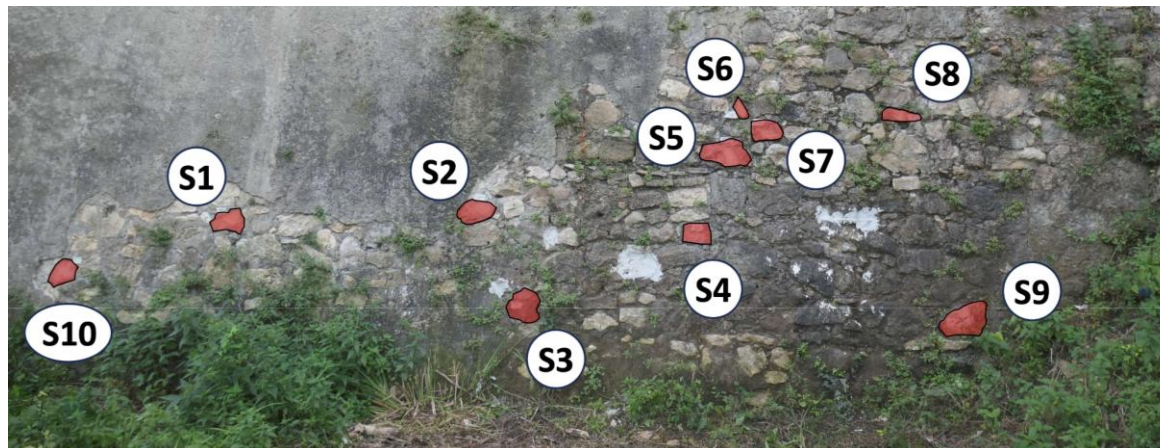
Prove di compressione sui blocchi

n. prova	Sigla	Massa volumica [kg/m ³]	Resistenza alla Compressione [N/mm ²]
1	BL1	2531	75.6
2	BL2	2886	71.0
3	BL3	2703	125.1





Area di indagine

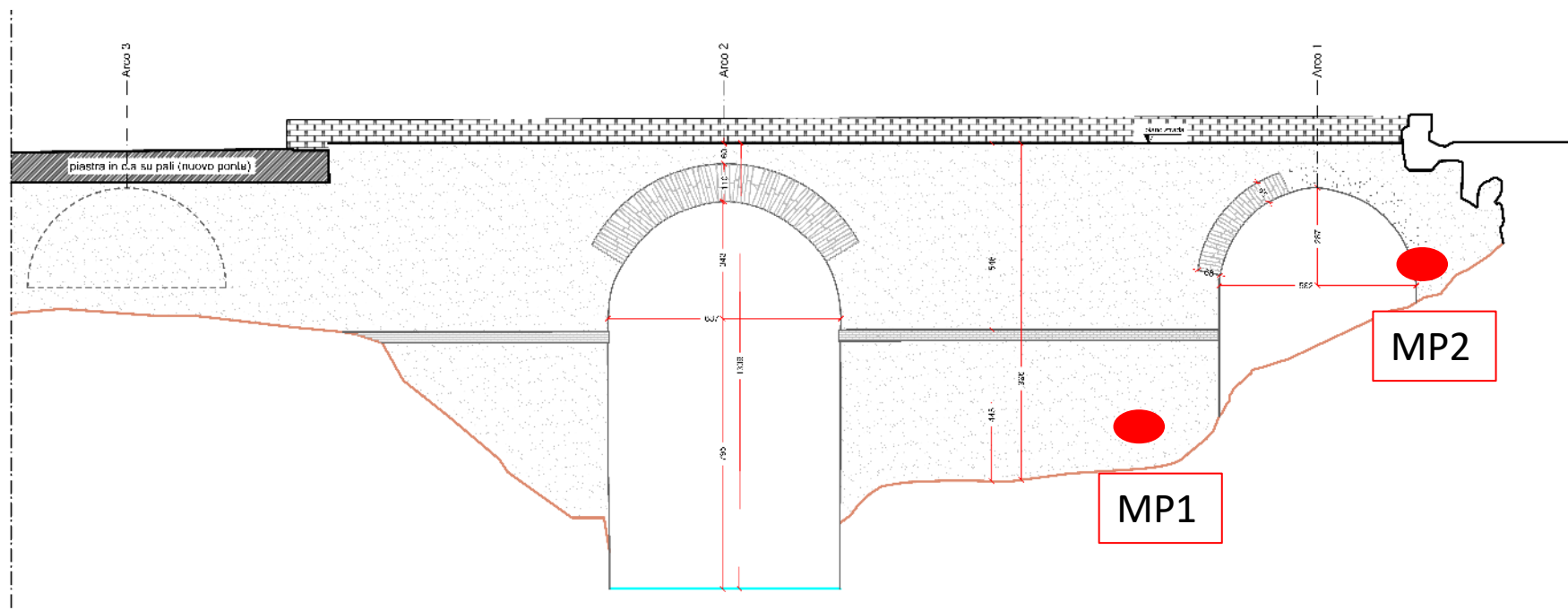


n. prova	R1	R2	R3	R4	R5	Rm
S2	62	70	73	69	-	68.5
S5	63	78	68	69	-	69.5
S9	64	68	82	63	78	71
S1	56	58	61	61	-	59
S4	60	62	60	56	-	59.5
S7	59	56	58	64	-	59.2
S8	58	60	49	65	63	59
S10	58	56	63	62	-	59.7
S6	44	47	51	50	-	48
S3	31	41	40	44	-	39

CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

Valutazioni da prove martinetti piatti



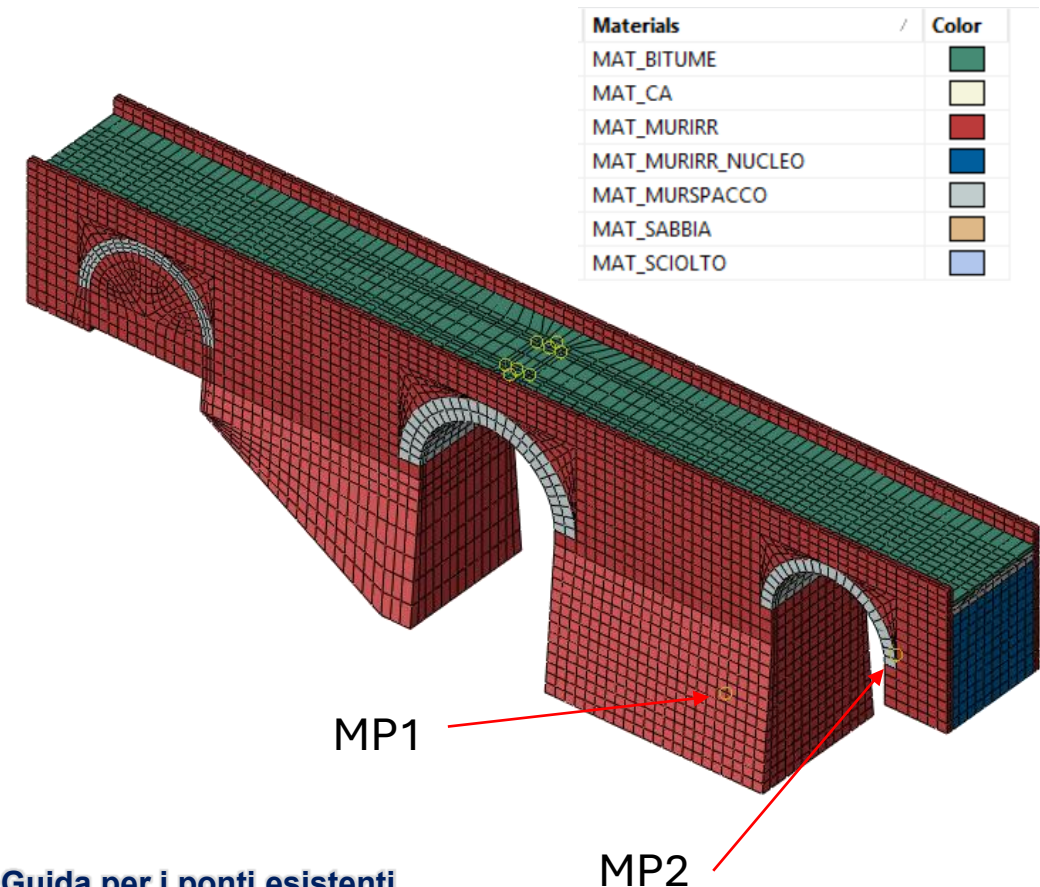
Dalle misure dei martinetti piatti MP1 e MP2 sono valutate le tensioni presenti sulla muratura

test	Tensione [MPa]
MP1	0,32
MP2	0,23

Modello 3D ad elementi solidi (software Abaqus)

- 20067 elementi (8 nodi – lato ≈ 0.5 m)
- 24088 nodi
- Spessori riempimento da carotaggi C3/C4/C5
- Moduli elastici muratura da martinetti piatti MP1/MP2

Elemento	Materiale	ρ [kg/m ³]	E [MPa]	ν [/]
Manto stradale	Bitume	2200	1500	0.35
Riempimento	Inerte sciolto	1500	100	0.4
Fondo	Sabbia	1500	100	0.4
Archi	Muratura pietra spacco	2100	1740	0.2
Pile (paramenti)	Muratura mista (tufo e conci sbozzati)	2000	1260	0.2
Pile (nucleo)	Muratura mista (tufo e conci sbozzati)	2000	900	0.2

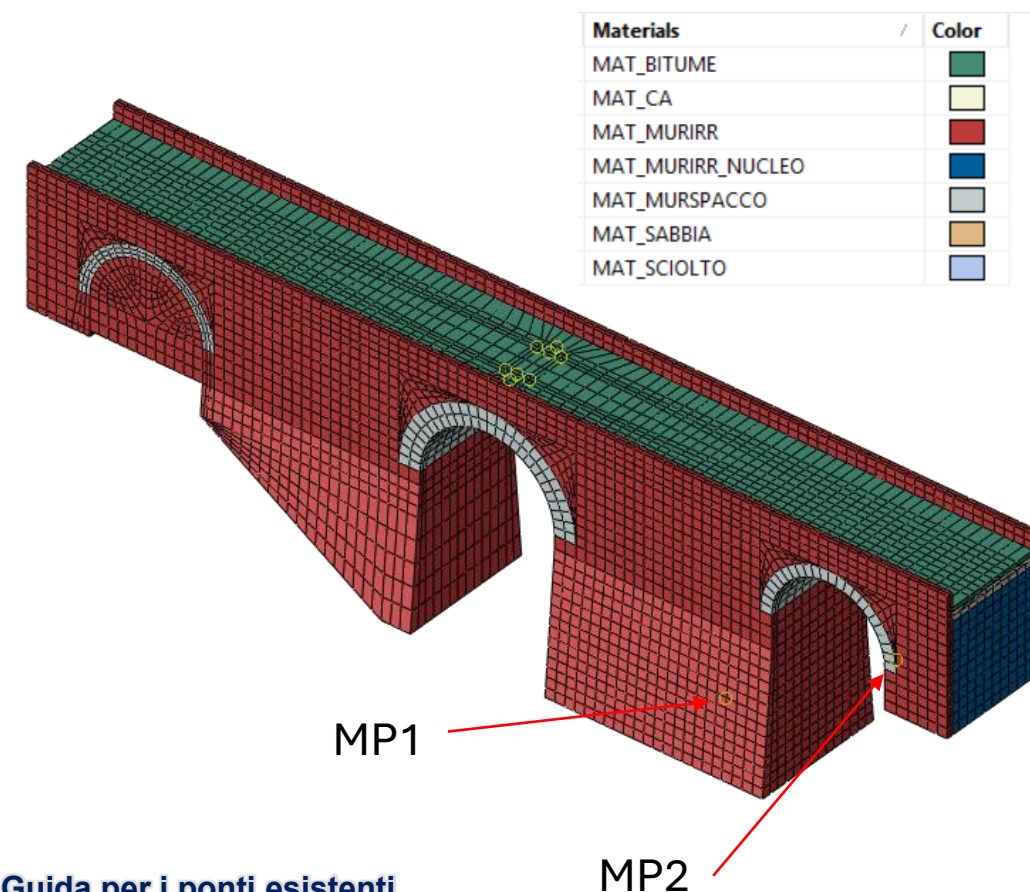
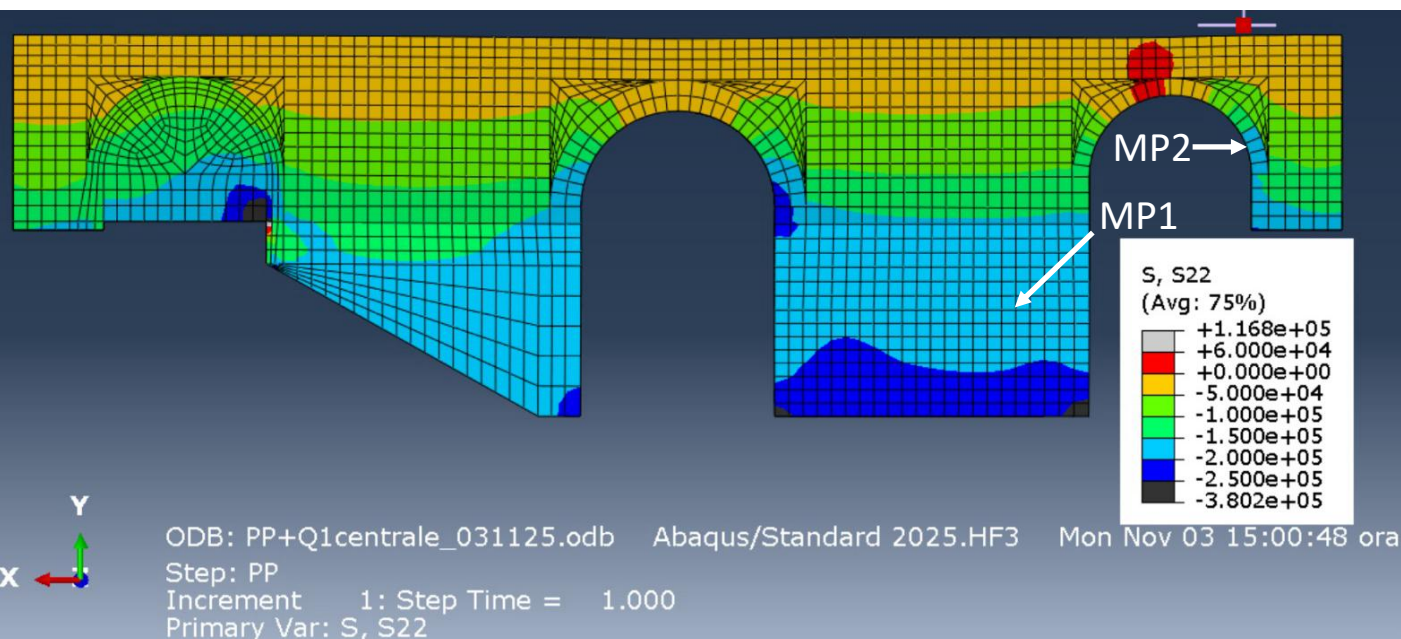


Modello 3D ad elementi solidi (software Abaqus)

- 20067 elementi (8 nodi – lato ≈ 0.5 m)
- 24088 nodi
- Spessori riempimento da carotaggi C3/C4/C5
- Moduli elastici muratura da martinetti piatti MP1/MP2

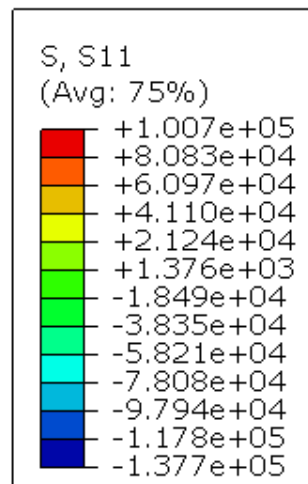
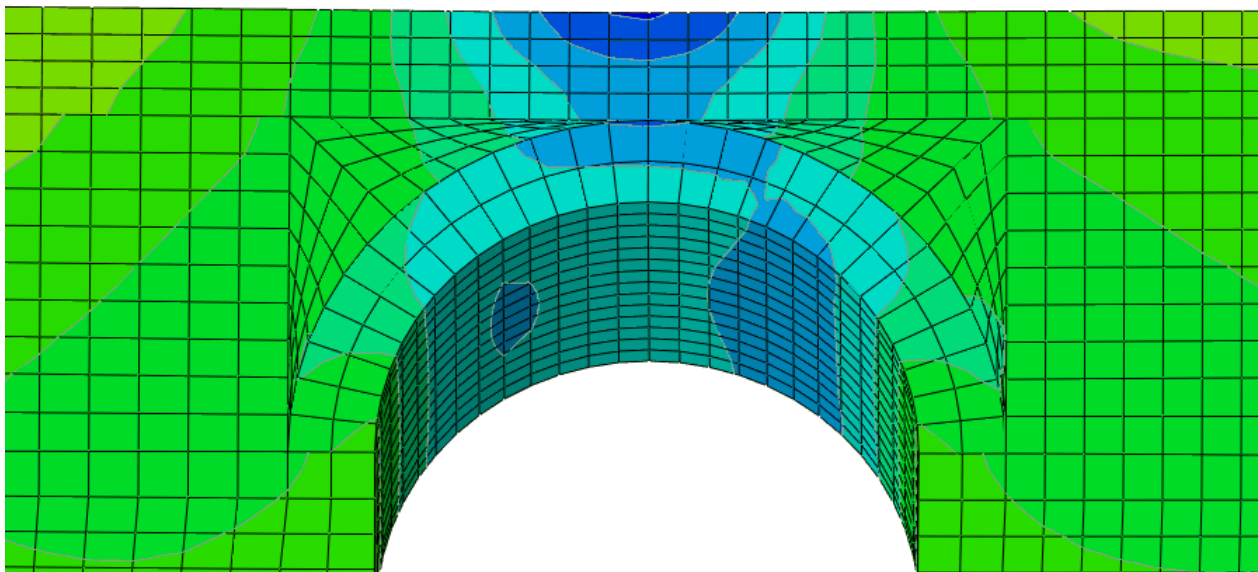
σ_y [MPa]	martinetto	modello
MP1	0.32	-0.20
MP2	0.23	-0.18

TENSIONI VERTICALI DOVUTE AL PESO PROPRIO



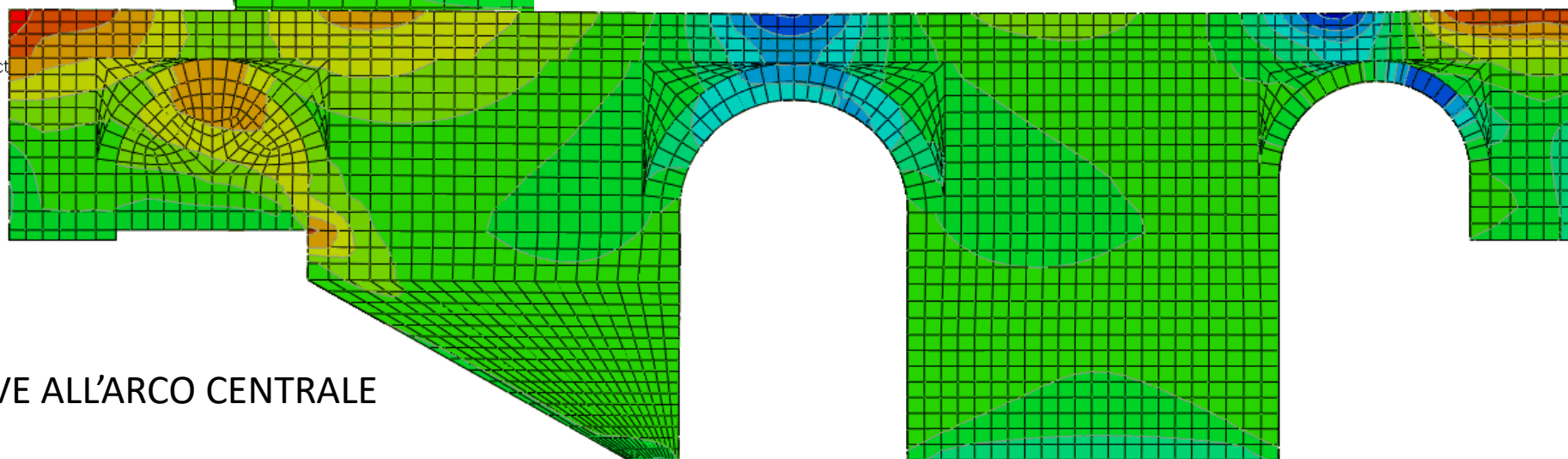
CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

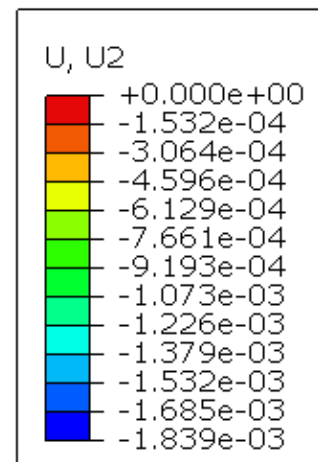
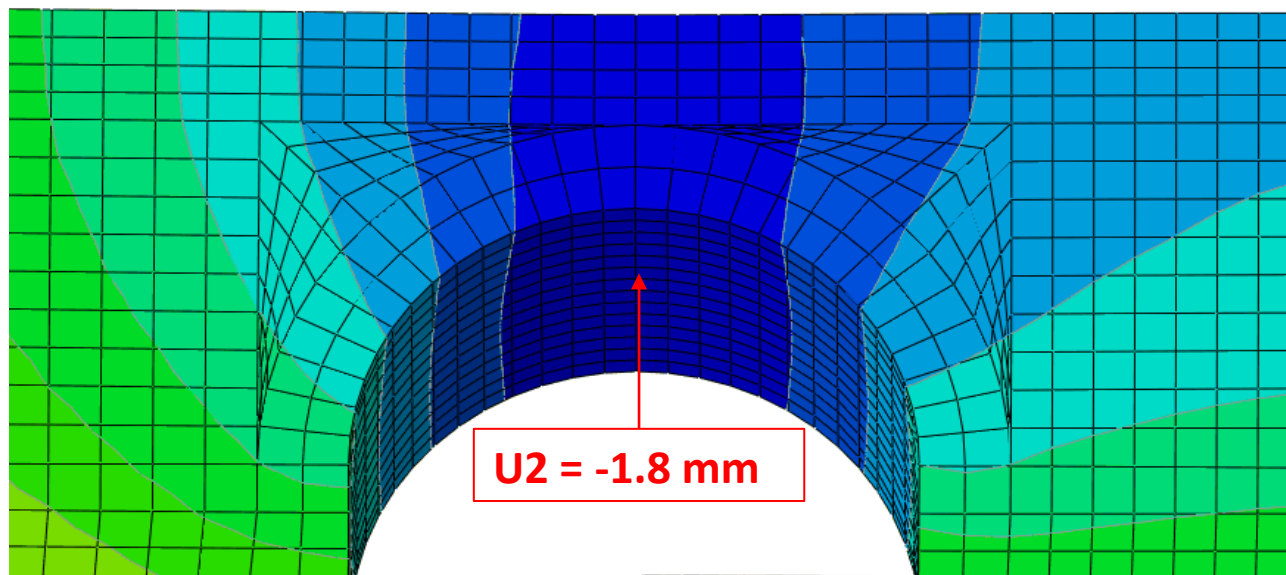


ARCO CENTRALE (chiave)		
	σ_{11} [MPa]	u_y [mm]
Peso proprio	-0.06	-1.8

DB: RP_231025.odb Abaqus/Standard 2025.HF3 Thu Oct 24 10:00:00
 Step: PP
 Increment: 1: Step Time = 1.000
 Primary Var: S, S11
 Deformed Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+02

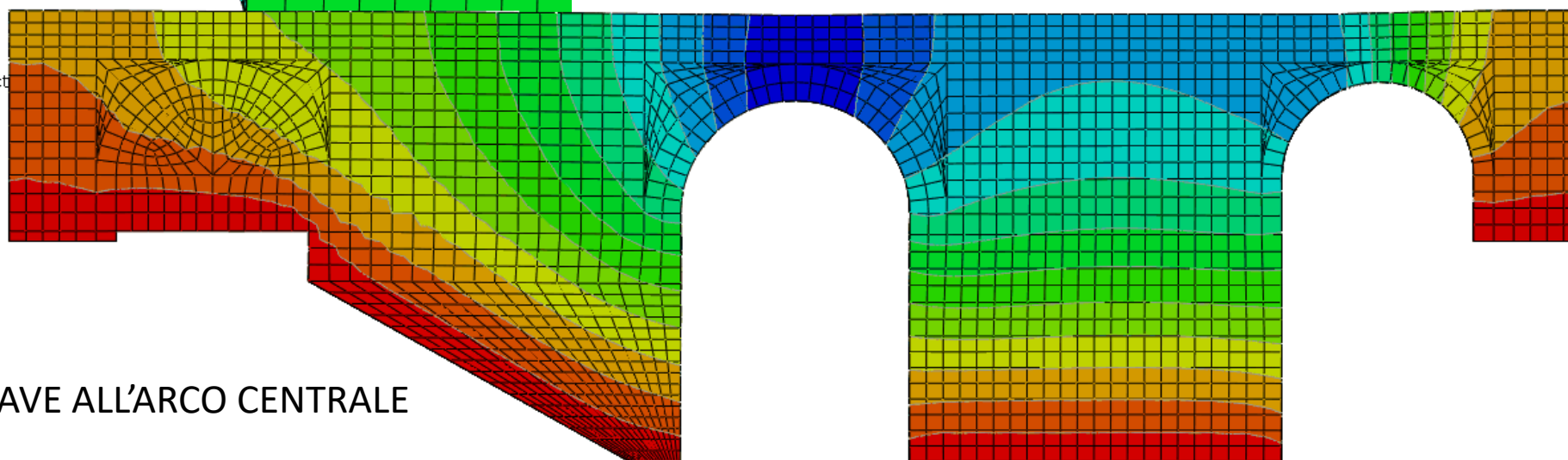


TENSIONI ORIZZONTALI IN CHIAVE ALL'ARCO CENTRALE



ARCO CENTRALE (chiave)		
	σ_{11} [MPa]	u_y [mm]
Peso proprio	-0.06	-1.8

RP_231025.odb Abaqus/Standard 2025.HF3 Thu Oct 24 10:00:00
 Step: 1: Step Time = 1.000
 Primary Var: U, U2
 Secondary Var: U, Deformation Scale Factor: +1.000e+02



SPOSTAMENTI VERTICALI IN CHIAVE ALL'ARCO CENTRALE

ANALISI MODALE

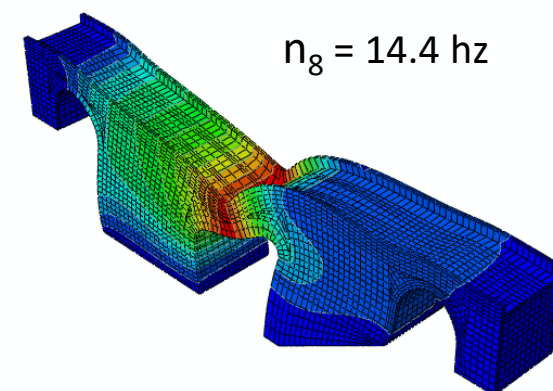
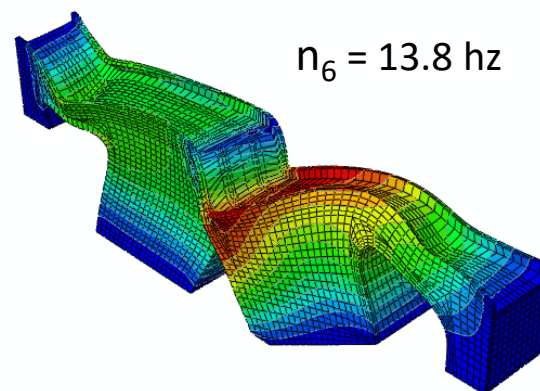
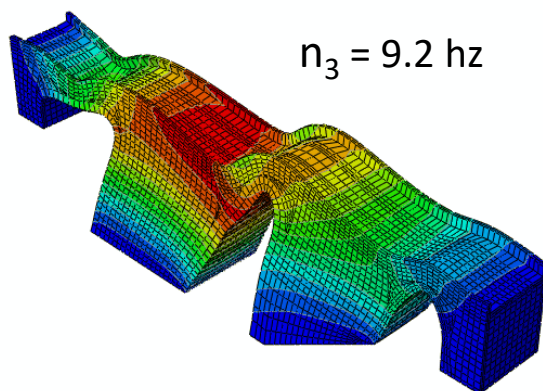
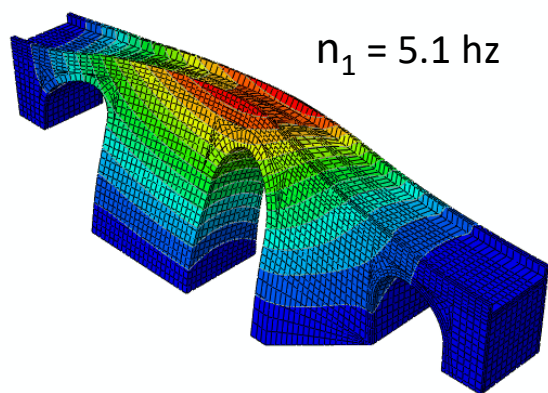
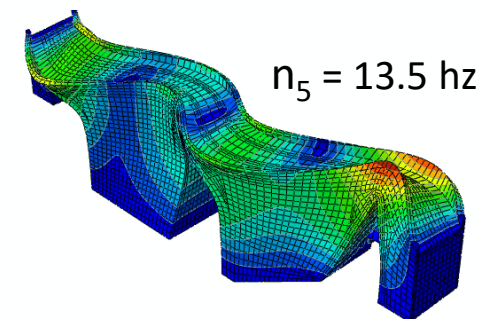
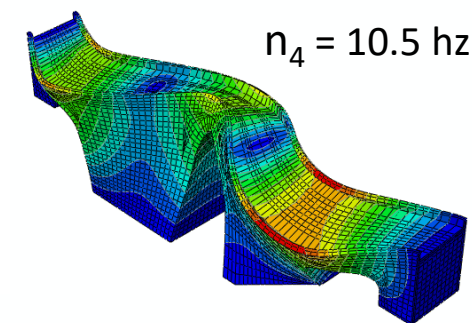
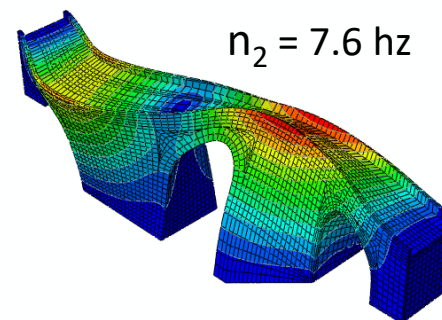
Massa totale: 3397 ton

Modo	n (Hz)	M _{long} (%)	M _{vert} (%)	M _{trasv} (%)
1	5.12	0.01%	0.00%	46.89%
2	7.56	0.12%	0.00%	0.94%
3	9.25	57.02%	0.44%	0.00%
4	10.47	0.03%	0.01%	8.80%
5	13.52	0.10%	0.71%	0.33%
6	13.85	1.37%	10.68%	0.01%
7	14.27	0.00%	0.00%	0.00%
8	14.39	0.21%	34.25%	0.00%
totale		66.69%	56.99%	72.78%

trasversale

longitudinale

verticali



Motivazioni

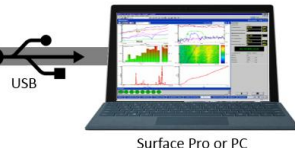
Necessità di calibrare il modello di calcolo fem con risultati di prove di carico statiche (misure di abbassamenti) e dinamiche (determinazione frequenze/modi).

Nella prova di carico statica, le misure degli abbassamenti vengono fatte con tecniche tradizionali ma anche con DIC (**Digital Image Correlation**) e **Laser Box**. Gli spostamenti attesi sono piccoli e quindi le misure potrebbero essere poco accurate. Per questa ragione, nel corso della prova di carico sarà misurata la variazione dello stato tensionale tramite **martinetto piatto singolo**, nei due punti già investigati nella fase diagnostica. L'automezzo sarà collocato in diverse posizioni per validare il modello attraverso la misura delle variazioni delle misure effettuate.

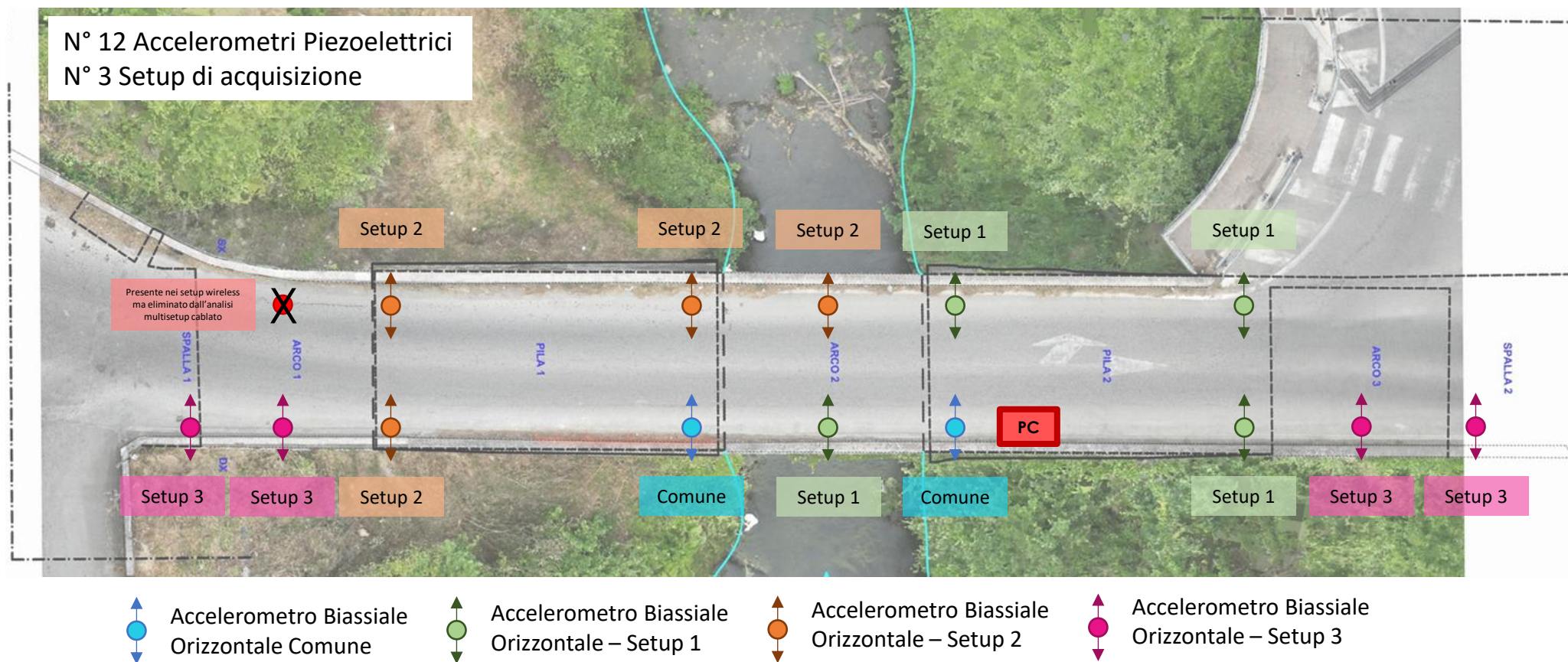
Per l'identificazione dinamica si useranno **accelerometri** piezoelettrici cablati e MEMS wireless, per confronto. Anche se il ponte è rigido si ritiene possibile l'identificazione dei modi fondamentali nelle tre direzioni. Saranno utilizzati sia il rumore ambientale, sia il passaggio dell'automezzo su un bumper, per indurre un impulso.

Infine si posizionano sonde per sperimentare le potenzialità delle misure di **emissione acustica**, che in questa tipologia strutturale saranno collocate in «zona tesa».

Layout accelerometri cablati



- Sensitivity: 10 V/g;
- Measurement Range: ± 0.5 g pk;
- Spectral Noise (1 Hz): $1.30 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$;
- Spectral Noise (10 Hz): $0.32 \mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$.



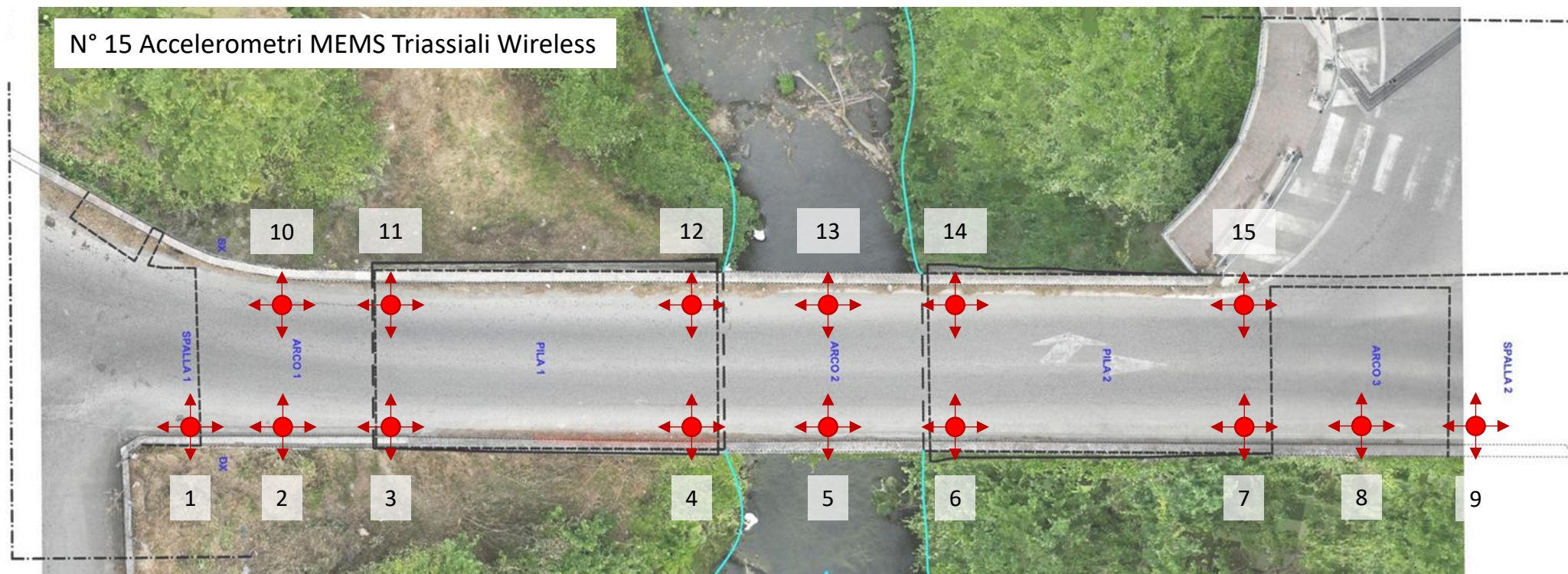
CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

Layout accelerometri wireless



- Dynamic Range: >85 dB;
- Self-Noise: $< 18\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$;
- Full-Scale Range: $\pm 2\text{g}$;
- A/D Conversion Resolution: 20bit.

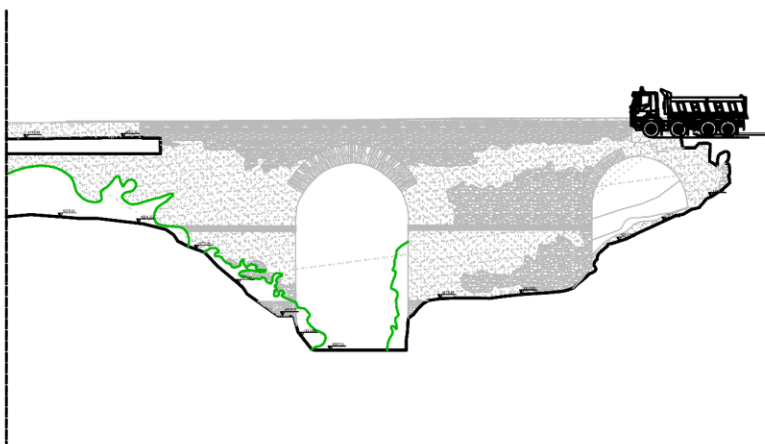


Accelerometro Triassiale

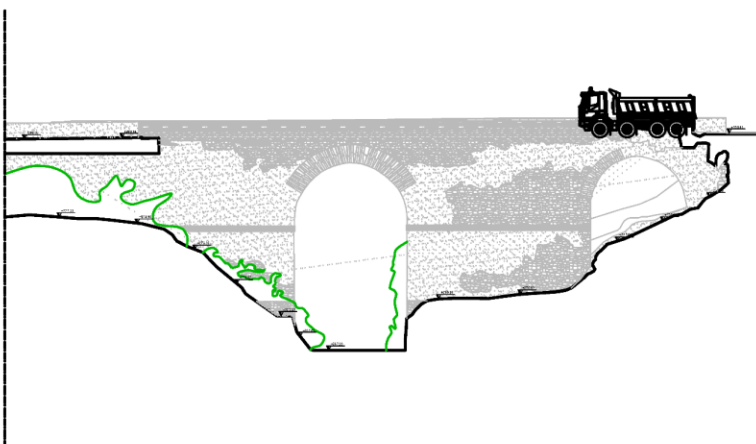
CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

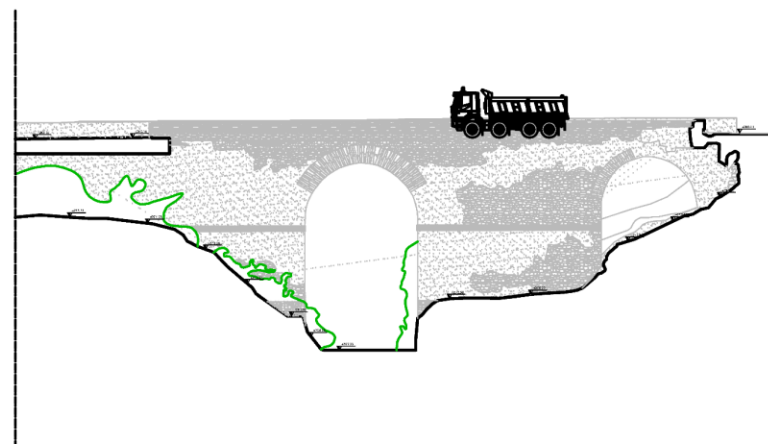
PROSPETTO A - Posizione 1



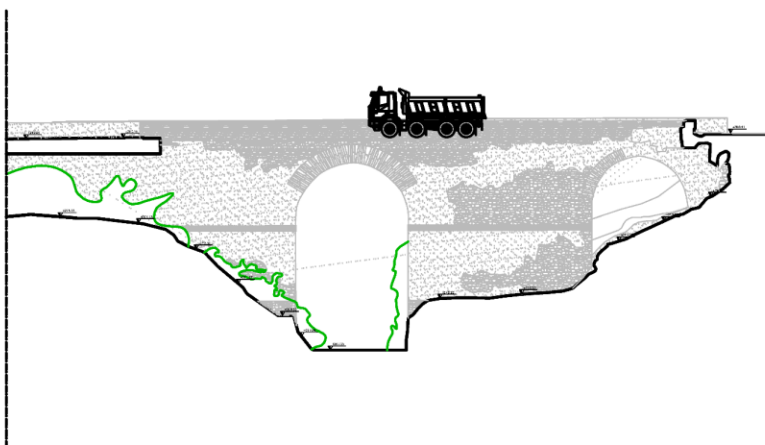
PROSPETTO A - Posizione 2



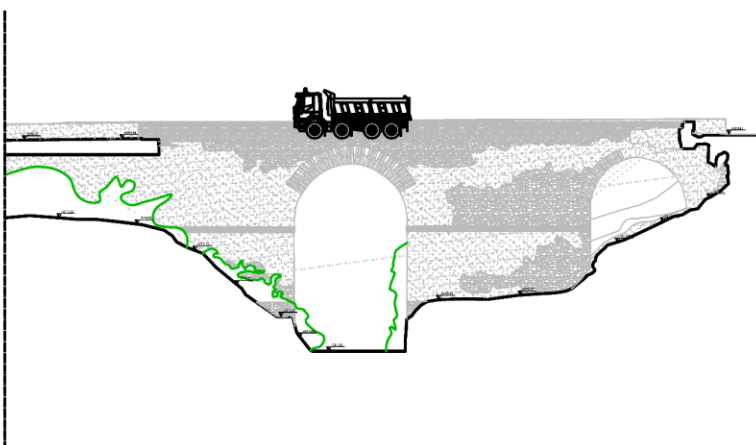
PROSPETTO A - Posizione 3



PROSPETTO A - Posizione 4

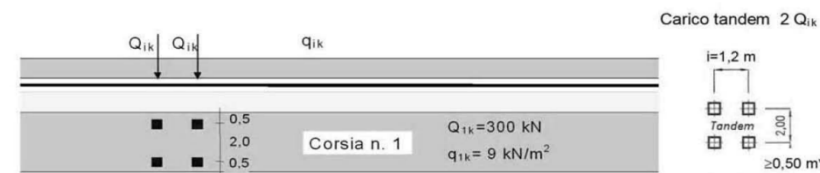


PROSPETTO A - Posizione 5

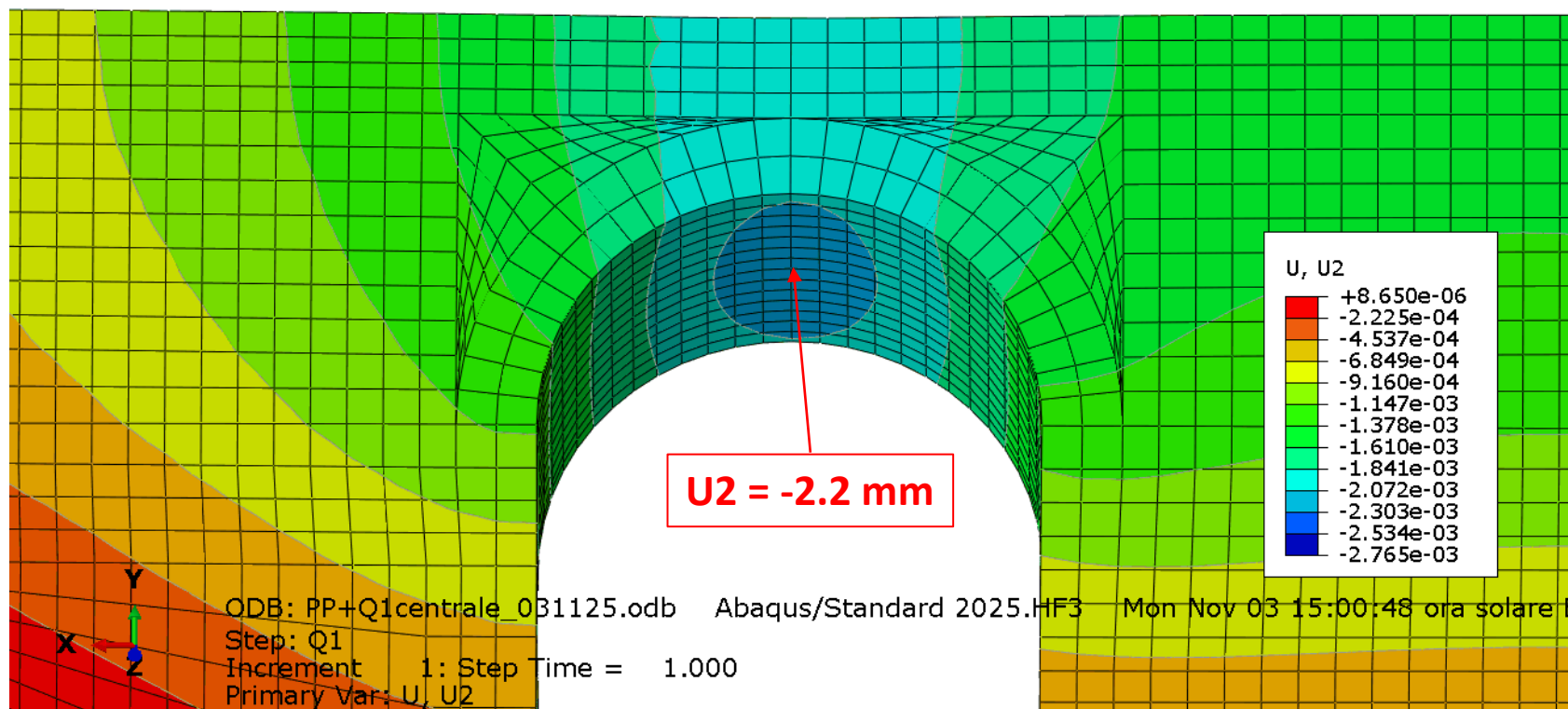


- Automezzo a 4 assi di 44 ton
- 5 posizioni di carico previste

INCREMENTO SOLLECITAZIONE CON CARICO NELLA POSIZIONE 5



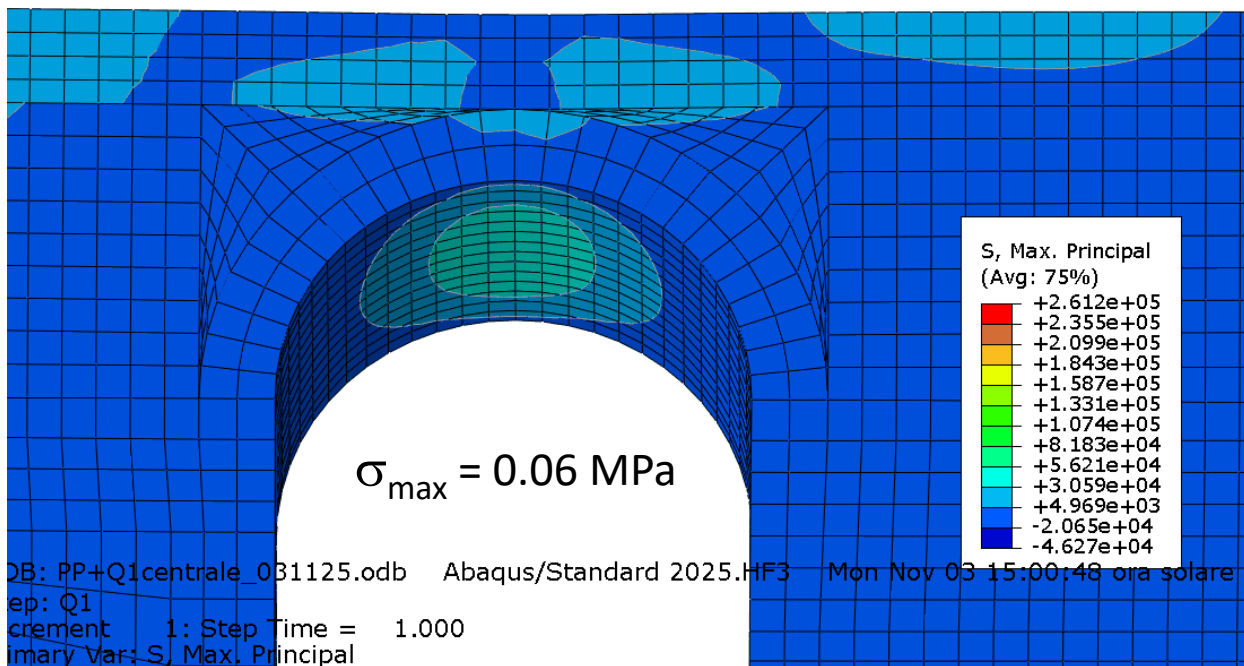
SPOSTAMENTI VERTICALI IN CHIAVE ALL'ARCO CENTRALE



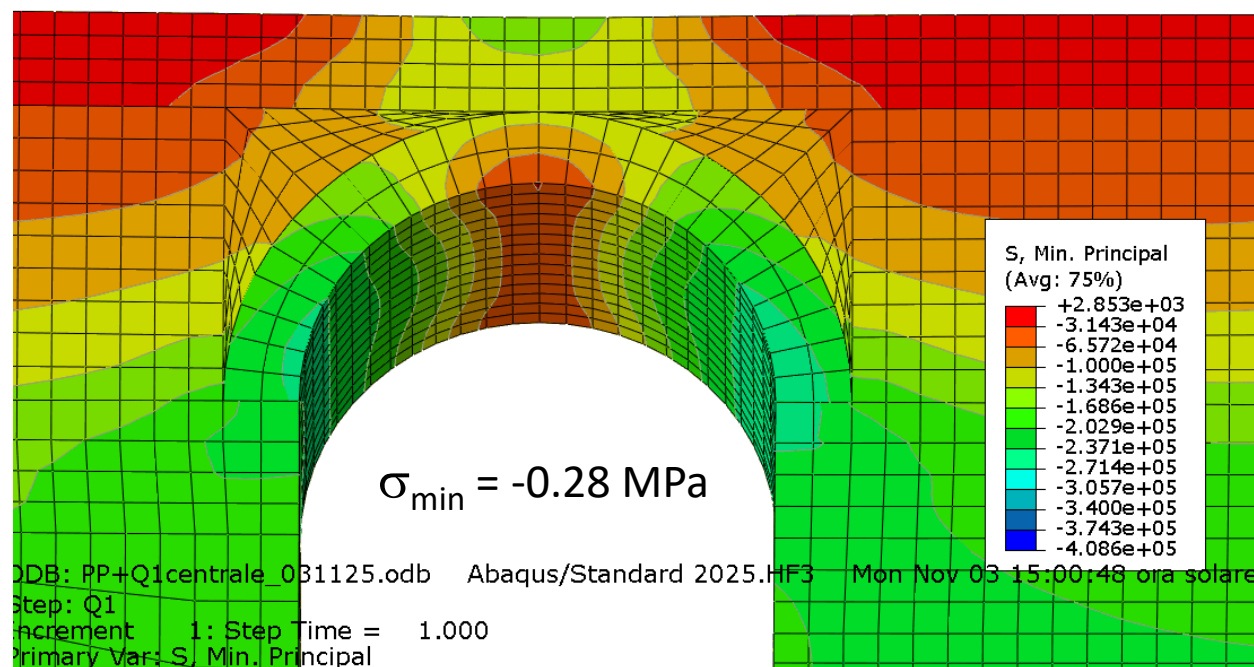
- Incremento spostamento verticale di soli 0.5 mm

INCREMENTO SOLLECITAZIONE
CON CARICO NELLA POSIZIONE 5

1° TENSIONE PRINCIPALI NELL'ARCO CENTRALE
(trazione in chiave)



3° TENSIONE PRINCIPALE NELL'ARCO CENTRALE
(compressione alle reni)

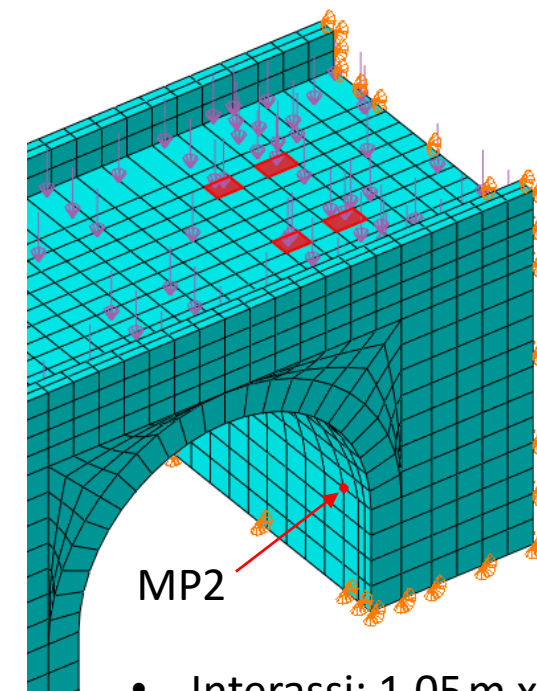
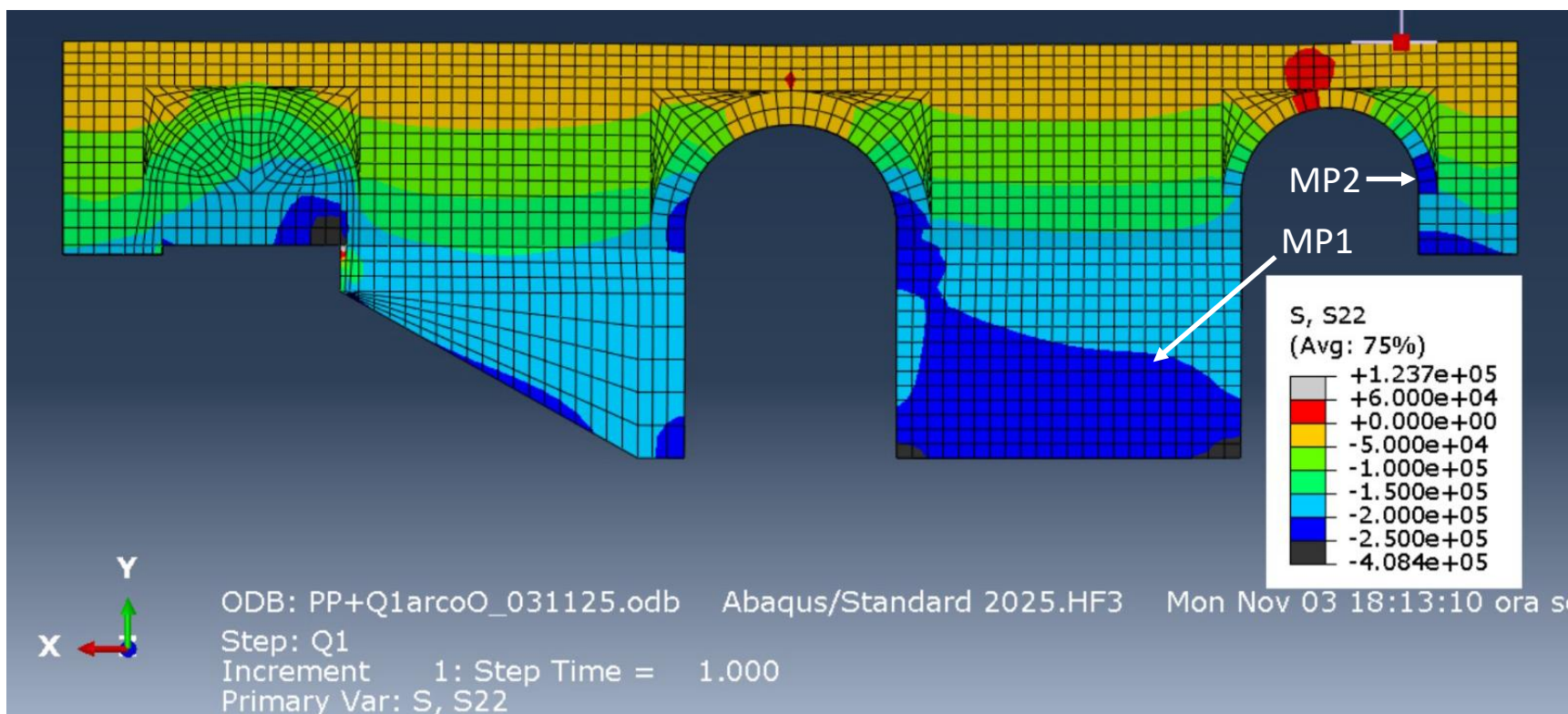


- Il modello stima modeste tensioni di trazione in chiave all'intradosso
- Incremento tensione alle reni di 0.06 MPa

INCREMENTO SOLLECITAZIONE CON CARICO NELLA POSIZIONE 1

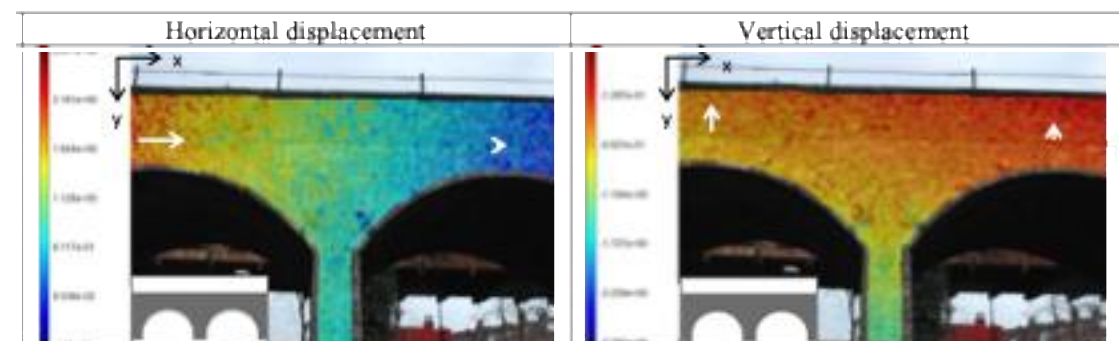
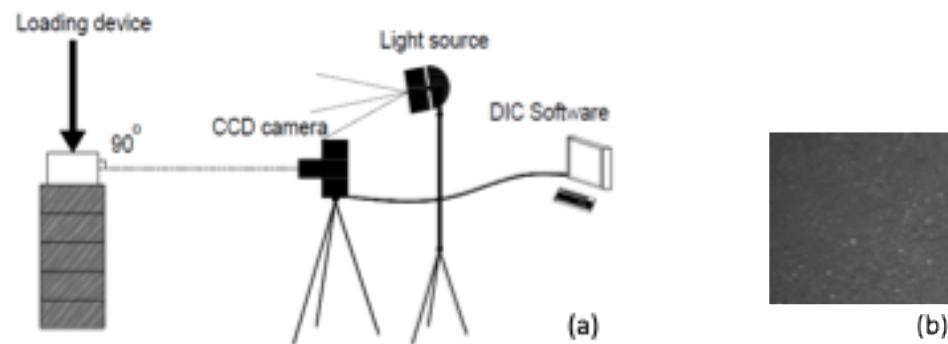
- Carico tandem ARCO OVEST (sopra a MP2)
- 300kN + 9kN/m² su corsia + 2.5kN/m² marciapiedi
- Tensioni verticali σ_y

σ_y	martinetto	peso proprio	posizione 1
MP1	0.32	-0.20	-0.21
MP2	0.23	-0.18	-0.23

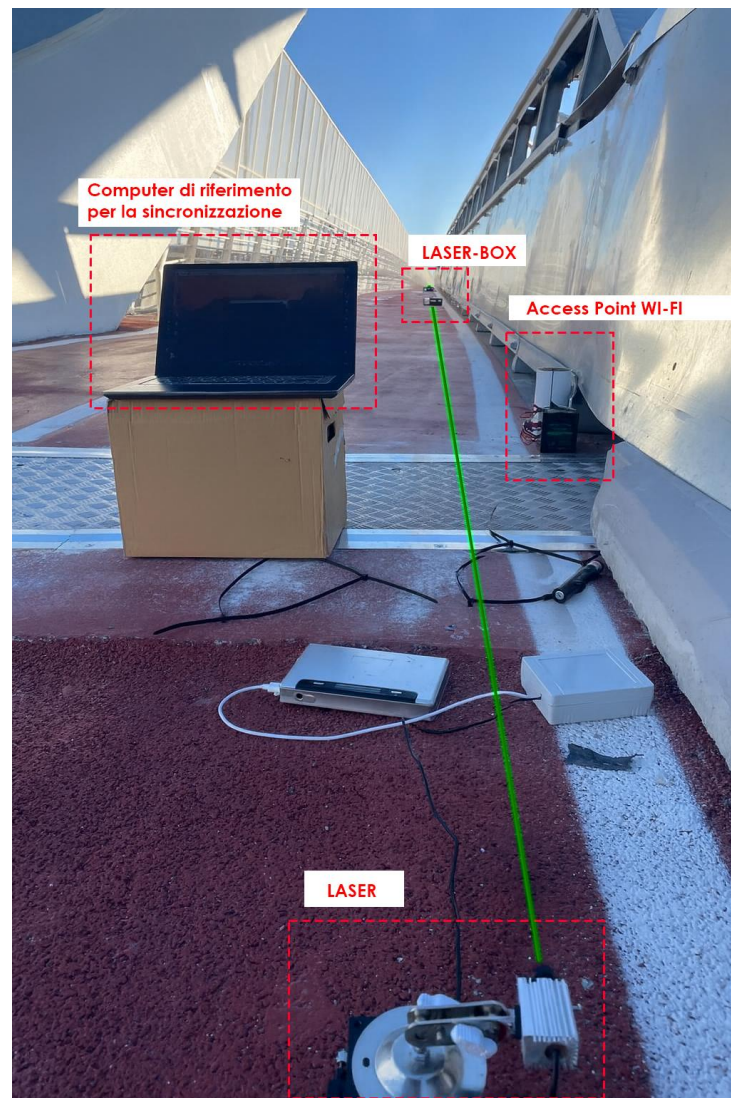


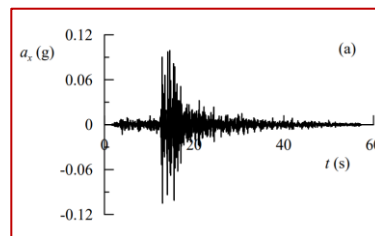
- Interassi: 1.05 m x 1.88 m
- Area: 0.824 m²

Sperimentazione con Digital Image Correlation (DIC)



I. S. Koltsida et al. The use of Digital Image Correlation Technique for Monitoring Masonry Arch Bridges

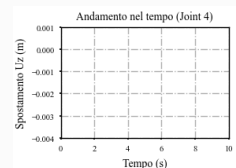




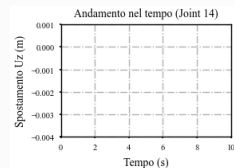
● Passaggio mezzo
Accelerometro



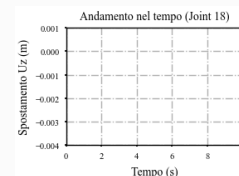
Laser BOX



Laser BOX



Laser BOX



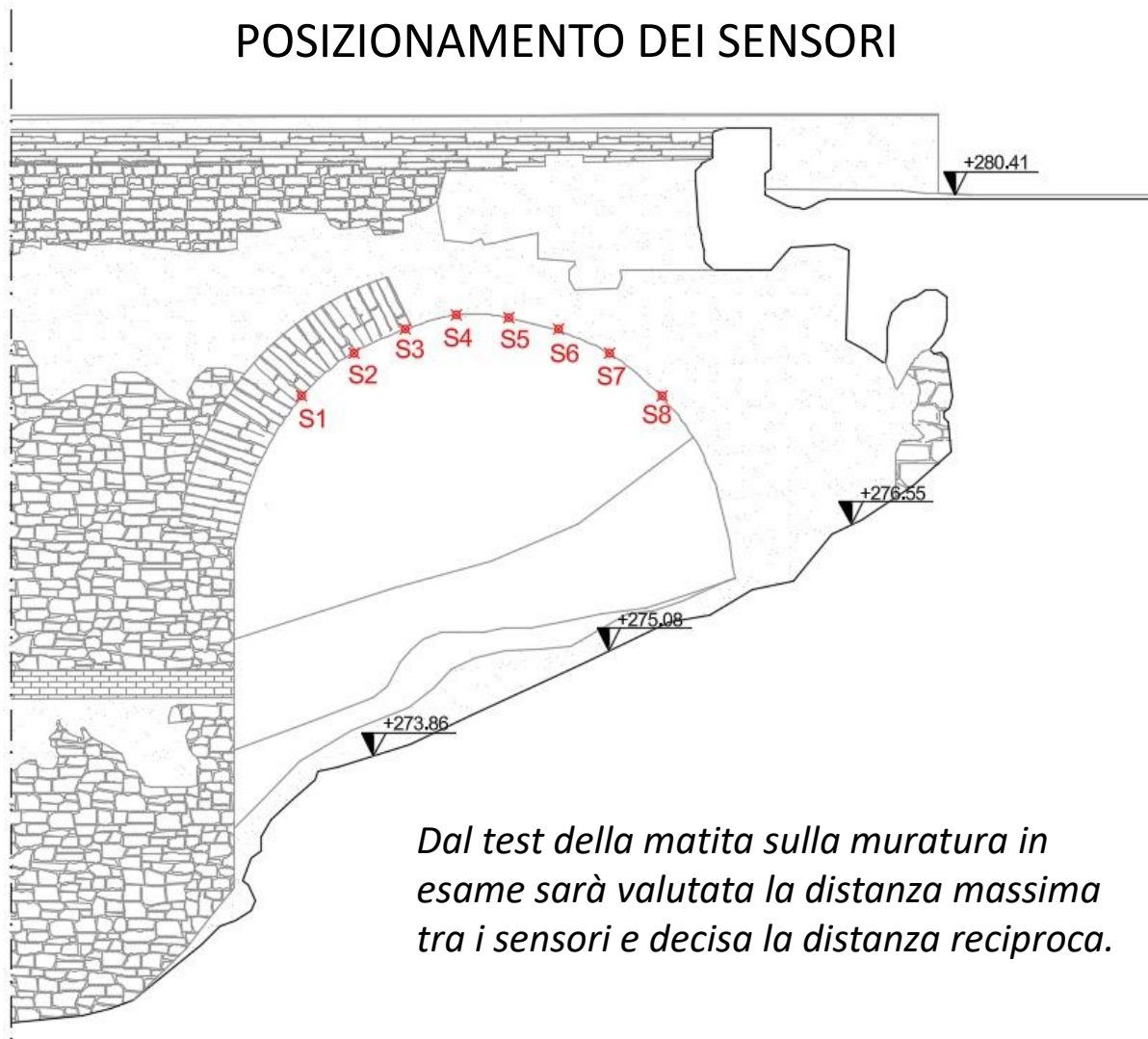
Laser

Access Point



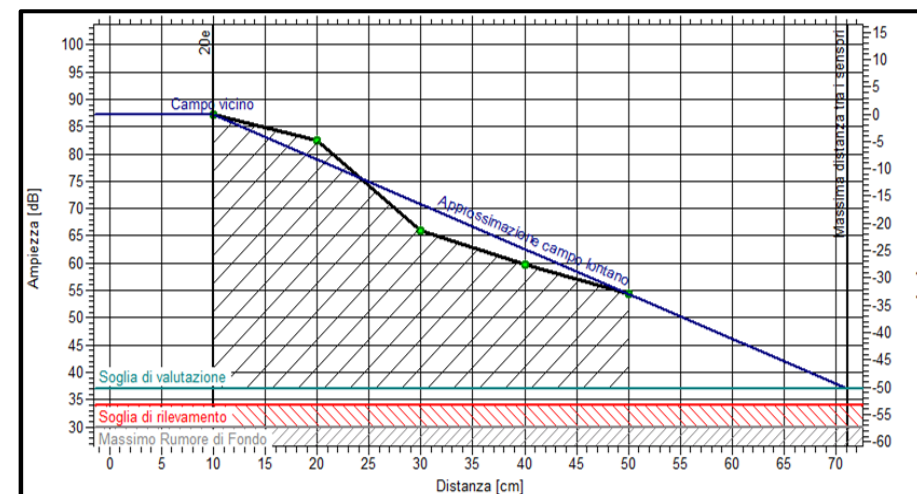
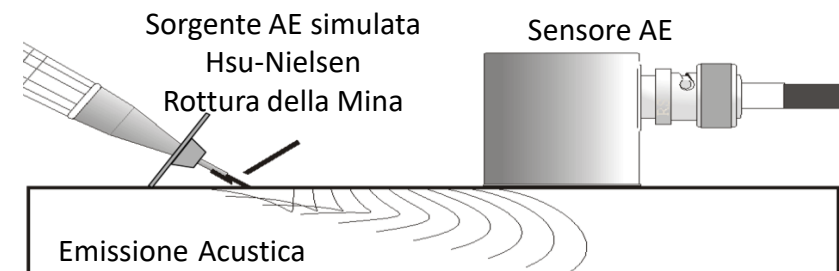
Computer di riferimento

POSIZIONAMENTO DEI SENSORI



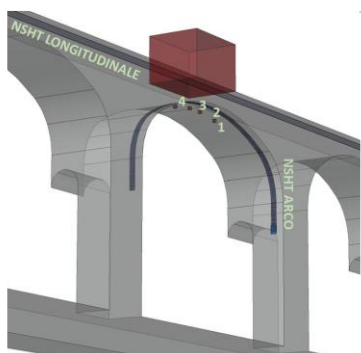
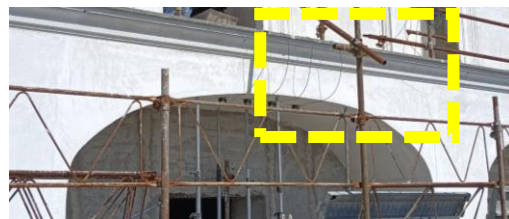
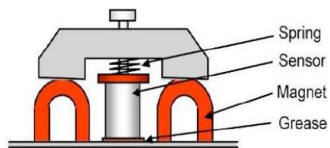
Hsu-Nielsen Pencil-Lead Breaks (PLB) test

Valutazione della legge di attenuazione (ASTM E976-15, 2021, Standard Guide for Determining the Reproducibility of Acoustic Emission Sensor Response)

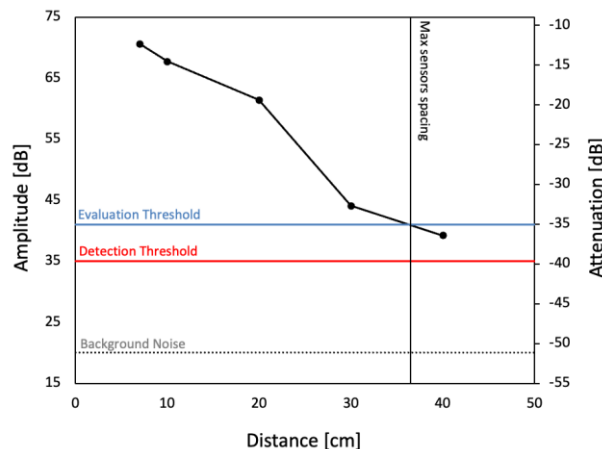


Esempio per trave in CA e sensori ad alta frequenza

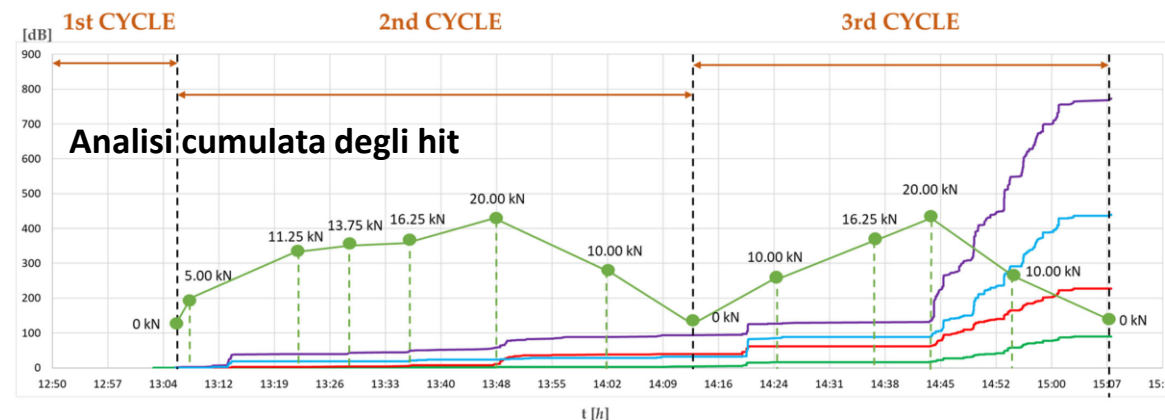
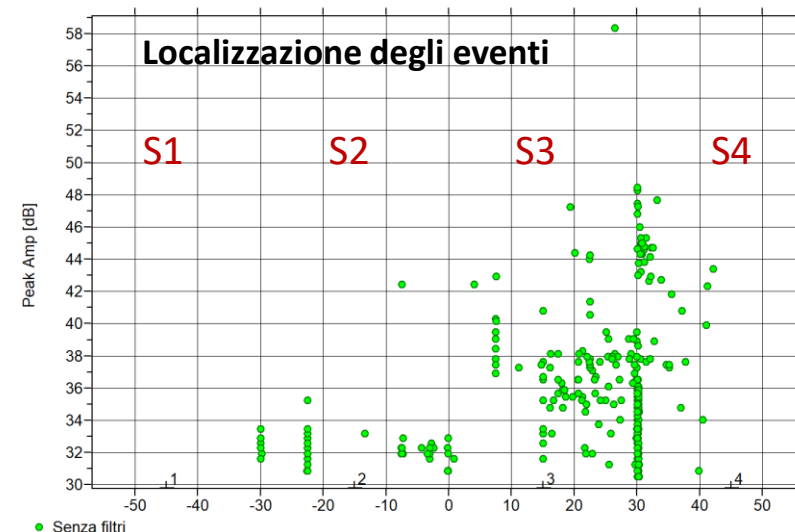
ESPERIENZE DI MONITORAGGIO SU STRUTTURE IN MURATURA



Sensori attaccati mediante supporti magnetici e placche metalliche



La legge di attenuazione ha determinato una distanza tra i sensori di massimo 37 cm.



Di Gennaro L, Loreto G, Frunzio G, Rizzano G, Guarnaccia C (2025). *Acoustic Emission for Structural Monitoring of Historical Masonry: An In-Field Application*. Applied Sciences, 15(13), 7111.

CONVEGNO FINALE - Sperimentazione delle Linee Guida per i ponti esistenti

Applicazioni su ponte in muratura

I ponti in muratura rappresentano una grossa fetta del patrimonio esistente in Italia. Sono strutture antiche, nella maggior parte dei casi realizzate senza una progettazione meccanica (al massimo basata su manualistica), potenzialmente soggette a degrado ma che hanno dimostrato nel tempo di avere buone prestazioni.

Il Ponte degli Arci, a Tivoli, è stata l'occasione per delineare un percorso di conoscenza, storico-critica e diagnostica, utile alla messa a punto di un modello per le verifiche L4.

La caratteristica massiva del ponte rende non appropriato l'utilizzo di modelli di analisi limite, che sarebbero invece molto informativi nel caso di viadotti con pile e arcate snelle.

Il modello 3D ad elementi finiti sarà identificato grazie alle misure dinamiche e calibrato sui risultati della prova di carico, previste la prossima settimana.