



Sistema di monitoraggio INtelligente per la Sicurezza delle InfraStrutture urbane

Codice Progetto: ARS01_00913 (CUP E64E18000110005)

Durata del progetto: n. 42 mesi. Dal 01/05/2019 al 31/10/2022

DELIVERABLE

OR 4

Partners

- Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"
- Università degli Studi di Napoli Federico II (Soggetto Capofila)
- Università degli Studi di Bergamo
- Politecnico di Torino
- Università degli Studi di Palermo
- MAPEI S.p.A.
- Università degli Studi di Bologna
- STMicroelectronics srl



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Informazioni del Deliverable		
Numero documento	D.4	
Diffusione documento	Privato	
Titolo del documento	Report delle attività	
Obiettivo Realizzativo	OR4	
Coordinatore OR	Università degli Studi di Roma "Tor Vergata"	
Stato del documento		
Verificato (Coordinatori OR)	20/12/2022	Prof. Ing. Alberto Meda Prof. Ing. Fulvio Parisi
Approvato (Coordinatore Progetto)	21/12/2022	Prof. Ing. Edoardo Cosenza

PREMESSA

Il presente documento costituisce il prodotto atteso dell'OR4 – Validazione dei sistemi di monitoraggio attraverso prove per ciascuna tipologia strutturale.

L'obiettivo realizzativo 4 (OR4) si pone come obiettivo quello di eseguire prove sperimentali su ciascuna delle tipologie strutturali considerate nel progetto di ricerca, al fine di validare i modelli strutturali-predittivi e i sistemi di monitoraggio con i loro relativi protocolli progettati e proposti nell'OR3. Tale attività risulta necessaria per valutare l'adeguatezza dei modelli proposti e, sulla base di possibili criticità riscontrate nella realizzazione ed esecuzione delle prove sperimentali, può fornire "intelligenza" ai modelli precedentemente messi a punto, al fine di consentirgli di interpretare le cause di tali criticità e poter quindi ottimizzare la risposta numerica degli algoritmi genetici impiegati.

Il presente deliverable è stato realizzato a partire da ciascun contributo dei singoli partner coinvolti nella validazione dei modelli dell'OR3 attraverso prove sperimentali relativamente a ciascuna tipologia strutturale che li ha visti responsabili. Nella tabella che segue vengono sintetizzati i partner coinvolti con i relativi responsabili e le attività sperimentali che hanno svolto.

Partner	Responsabile	Prova sperimentale
Università degli Studi di ROMA Tor Vergata	Prof. Ing. Alberto Meda	Attività X.2 – Prove su Gallerie
Università degli Studi di NAPOLI Federico II	Prof. Ing. Fulvio Parisi	Attività X.1 – Prove su Ponti Attività X.3 – Prove su Edifici
Università degli Studi di BERGAMO	Prof. Ing. Paolo Riva	Attività X.3 – Prove su Edifici
Politecnico di TORINO	Prof. Ing. Gabriele Bertagnoli	Attività X.3 – Prove su Edifici
Università degli Studi di PALERMO	Prof. Ing. Lidia La Mendola	Attività X.3 – Prove su Edifici
MAPEI s.p.a.	Ing. Simone Barile	Attività X.3 – Prove su Edifici
Università degli Studi di BOLOGNA	Prof. Ing. Nicola Buratti	Attività X.1 – Prove su Ponti
STMicroelectronics s.r.l.	Ing. Agatino Pennisi	Attività X.1 – Prove su Ponti Attività X.2 – Prove su Gallerie Attività X.3 – Prove su Edifici

Tutte le informazioni e le analisi contenute nel documento hanno finalità di ricerca e la loro citazione può essere ricondotta al Progetto INSIST – Sistema di monitoraggio INtelligente per la Sicurezza delle InfraStrutture urbane (ARS01_00913).

Le opinioni e le conclusioni presentate non rispecchiano necessariamente quelle degli enti finanziatori.

SOMMARIO

1	DESCRIZIONE DELL’OBIETTIVO REALIZZATIVO E DELLE ATTIVITÀ	5
2	ATTIVITÀ X.1: Prove su ponti	7
2.1	Descrizione dell’attività n.1 (Partner UniBO).....	7
2.2	Risultati dell’attività n.1 (Partner UniBO).....	7
2.2.1	Monitoraggio di un viadotto ferroviario.....	7
2.2.2	Tecniche di identificazione dinamica	14
2.2.3	Validazione delle misure dei nodi sensore MEMS.....	18
2.3	Descrizione dell’attività n.2 (Partners UniNA, Mapei, STMicroelectronics)	21
2.4	Risultati dell’attività n.2 (Partners UniNA, Mapei, STMicroelectronics).....	24
2.4.1	Risposta ciclica dei provini testati	24
2.4.2	Risposta monotona dei provini testati.....	26
2.4.3	Configurazioni deformate.....	27
3	ATTIVITÀ X.2: Prove su gallerie.....	29
3.1	Descrizione dell’attività (Partners UniRM2, STMicroelectronics)	29
3.2	Risultati dell’attività (Partners UniRM2, STMicroelectronics).....	39
3.2.1	Prova I: Configurazione idrostatica (spinta membranale)	41
3.2.2	Prova II: Configurazione di ovalizzazione (pressoflessione)	46
4	ATTIVITÀ X.3: Prove su edifici	52
4.1	Descrizione dell’attività n.1 (Partners PoliTo, UniNA, UniPA, Mapei, STMicroelectronics)	52
4.1.1	Indagine sperimentale.....	52
4.1.2	Materiali e campioni.....	52
4.1.3	Sistema di misurazione.....	53
4.1.4	Pre-installazione e post-installazione di sensori ceramici e capacitivi in elementi in muratura 55	
4.1.5	Sistema di monitoraggio basato sui sensori STMicroelectronics per i test di carico sui provini in muratura.....	62
4.1.6	Configurazione del test.....	65

4.2	Risultati dell'attività n.1 (Partners UniPA, UniNA, Mapei, STMicroelectronics).....	66
4.2.1	Risultati test provini con sensori pre-installati	66
4.2.2	Risultati primo test provini con sensori post-installati	68
4.2.3	Risultati secondo test provini con sensori post-installati.....	70
4.2.4	Risultati test su parete in muratura con sensori pre e post-installati.....	72
4.2.5	Confronti e commenti.....	74
4.3	Descrizione dell'attività n.2 (Partner UniBG).....	76
4.3.1	Sensori MEMS testati su tavola vibrante.....	76
4.3.2	Test su sensori di sforzo post-installati.....	83
4.4	Descrizione dell'attività n.3 (Partner PoliTO).....	85
4.4.1	Modellazione f.e.m. di un sensore capacitivo immerso in un solido continuo.....	85
4.4.2	Risultati dell'attività n.3 (PoliTO).....	87
4.5	Descrizione dell'attività n.4 (Partners UniNA, STMicroelectronics, Mapei)	91
4.5.1	Prove pseudo-dinamiche su telai in cemento armato in scala reale.....	91
4.5.2	Prove di compressione centrata ed eccentrica su pilastri in cemento armato.....	98
5	IMPATTO ATTESO.....	107
5.1	Impatto dell'attività X.1: Prove su ponti	107
5.2	Impatto dell'attività X.2: Prove su gallerie.....	107
5.3	Impatto dell'attività X.3: Prove su edifici	107
6	CONCLUSIONI.....	109
6.1	Attività X.1: Prove su ponti.....	109
6.2	Attività X.2: Prove su gallerie	109
6.3	Attività X.3: Prove su edifici	110
6.3.1	Edifici in muratura.....	110
6.3.2	Edifici con struttura intelaiata.....	110
6.3.3	Caratterizzazione della sensoristica MEMS	111

1 DESCRIZIONE DELL’OBIETTIVO REALIZZATIVO E DELLE ATTIVITÀ

I modelli proposti nell’Obiettivo Realizzativo OR3 (modello strutturale + sistema di monitoraggio) devono essere validati su alcune tipologie strutturali di riferimento. Quest’attività non solo è necessaria per valutare l’adeguatezza dei modelli proposti, ma può essere utilizzata per “fornire intelligenza” ai modelli e consentire ad essi di interpretare le cause di alcuni eventi mediante impiego di algoritmi, come quelli genetici, nella previsione ottimale della risposta numerica.

Per raggiungere tale obiettivo sono state prese in considerazione n.3 tipologie strutturali, tra le più rappresentative del patrimonio nazionale, ovvero Ponti (Attività X.1), Gallerie (Attività X.2) ed Edifici (Attività X.3).

L’attività X.1 sui ponti ha riguardato sia test di monitoraggio su strutture reali che prove sperimentali di laboratorio su elementi e sotto-assemblaggi rappresentativi dei ponti esistenti. Nello specifico, sono state realizzate le seguenti attività:

- (a) il monitoraggio strutturale di un viadotto ferroviario della linea Alta Velocità;
- (b) una campagna di prove cicliche di flessione su quattro punti su travi da ponte in c.a.p., in scala ridotta, con cavi post-tesi, per la valutazione del loro comportamento sia sotto carichi di esercizio che fino a rottura.

L’attività X.2 sulle gallerie ha riguardato l’esecuzione di una campagna sperimentale ad hoc presso il TERC (Tunnelling Engineering Research Centre) dell’Università di Roma Tor Vergata.

La prova consiste nell’assemblare un anello di galleria con dimensioni tipiche di un tunnel per metropolitana (6.4 m di diametro) e di applicare sistemi di azioni simulanti diverse tipologie di sollecitazioni del terreno. L’anello è stato strumentato con inclinometri e sensori di pressione. Più specificamente, l’attività si è articolata nelle seguenti fasi:

- (a) costruzione di un modello strutturale dell’anello;
- (b) applicazione di una serie di azioni simulanti la spinta del terreno, tipicamente per gallerie profonde (spinta prevalentemente membranale) e per gallerie superficiali (ovalizzazione dell’anello);
- (c) confronto tra i risultati ottenuti e quelli previsti dal modello.

Sono stati installati (mediante la tecnica della post-installazione) sensori capacitivi prodotti da STMicroelectronics, i cui risultati sono stati presi in esame nell’OR6, soprattutto con riferimento al caso studio atto a simulare un monitoraggio su una galleria esistente.

L’attività X.3 aveva come obiettivo quello di condurre sia prove quasi-statiche che prove dinamiche in modo da simulare possibili scenari di danno dovuti, ad esempio, al degrado continuo della struttura e allo scuotimento sismico. In particolare, sono state analizzate tre tipologie strutturali progettate per soli carichi gravitazionali, tipiche del patrimonio costruito esistente, ovvero:

- (a) edifici con struttura intelaiata in c.a.;
- (b) edifici con struttura intelaiata in acciaio;
- (c) edifici con struttura a pareti in muratura.

Relativamente agli edifici in c.a. sono stati condotti sia alcuni test sperimentali su pilastri tipici di strutture intelaiate esistenti, sia test pseudo-dinamici su telai in scala reale considerando anche la presenza delle tamponature. I test su pilastri hanno riguardato sia prove di compressione centrata ed eccentrica in controllo di spostamento su elementi disposti verticalmente, sia una prova di compressione costante su un pilastro in c.a. disposto orizzontalmente per simulare condizioni di carico assiale di esercizio negli edifici. I test pseudo-dinamici su un telaio tamponato hanno consentito di esaminare il comportamento sotto azioni sismiche orizzontali, anche attraverso la sensoristica di pressione oltre che con la strumentazione tradizionale.

Per le strutture intelaiate in acciaio sono state eseguite alcune campagne di monitoraggio su di un telaio in acciaio, per il quale erano stati anche sviluppati alcuni modelli strutturali e algoritmi di machine learning nell'OR3. È stata inoltre eseguita una prova su tavola vibrante per la caratterizzazione di sensori con tecnologia MEMS, sia in condizioni di vibrazioni ambientali che di scuotimento sismico.

Per quanto concerne gli edifici in muratura, sono state eseguite molteplici prove su muretti con sensori pre-installati e post-installati, in quest'ultimo caso (rappresentativo di ciò che si effettuerebbe su edifici esistenti) applicando una precompressione per simulare le sollecitazioni presenti nella fase di esercizio della struttura. Altri test sono stati eseguiti su due pareti in muratura, anch'esse con sensori pre-installati e post-installati, per esaminare il comportamento in seguito ad un danneggiamento localizzato in un maschio murario.

In generale per tutte e tre le attività riguardanti ponti, gallerie ed edifici, al fine di poter esaminare efficacemente il comportamento strutturale manifestato dai singoli provini, i set di strumentazione e più in generale i setup di prova sono stati definiti specificamente per ogni tipo di test eseguito. In tal modo, la strumentazione di misura è stata implementata nelle posizioni ottimali per ciascun tipo di prova e provino. Laddove possibile, i provini sono stati strumentati sia con sensori di pressione post-installati che con quelli pre-installati, in modo da confrontarne le misurazioni e validarne l'efficacia per le pratiche applicazioni su strutture reali.

Per gli obiettivi di progetto e le opportunità emerse sulla possibilità di lavorare a molteplici casi studio reali e dimostratori in collaborazione fra partner e gestori infrastrutturali, si è ritenuto utile sostituire alcune delle prove previste originariamente (come quelle su edifici in c.a. mediante tavola vibrante, in seguito a prime simulazioni) con attività maggiormente applicative e dunque ancora più finalizzate a conferire un TRL elevato all'intero progetto.

2 ATTIVITÀ X.1: Prove su ponti

2.1 Descrizione dell'attività n.1 (Partner UniBO)

Il presente paragrafo presenta i risultati delle attività di monitoraggio dinamico svolte allo scopo di validare le misure acquisite tramite sistema di monitoraggio basato su MEMS. Le strutture monitorate sono un telaio in acciaio ed un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità.

Il viadotto, ha uno sviluppo longitudinale pari a circa 2660 m, è caratterizzato da 105 campate realizzate con impalcati a cassone in calcestruzzo armato precompresso, con una lunghezza di circa 25 m ciascuna. Una porzione del viadotto, di lunghezza pari a circa 40 m comprensivo di n. 2 campate, si configura come zona di sovrappasso stradale ed il cui impalcato è costituito per ogni campata da otto travi ad "I" in calcestruzzo armato precompresso. Per quanto concerne gli elementi verticali, il viadotto è costituito da:

- 106 pile in calcestruzzo armato con altezza variabile e tipologie variabili;
- 2 spalle alle estremità di raccordo con il tratto di linea in rilevato.

Per valutare la risposta dinamica delle diverse campate costituite da travi a cassone del viadotto in oggetto durante il passaggio dei convogli commerciali, sono stati posizionati all'interno delle travi a cassone accelerometri piezoelettrici sia monoassiali che triassiali ed accelerometri basati su tecnologia MEMS triassiali. La porzione di viadotto strumentata con entrambe le tipologie di accelerometri, piezoelettrici e MEMS, è quella costituita da travi a cassone, nel presente elaborato si tratterà dunque solamente di tale porzione.

2.2 Risultati dell'attività n.1 (Partner UniBO)

2.2.1 Monitoraggio di un viadotto ferroviario

La disposizione degli accelerometri è progettata secondo due diversi schemi:

- *Schema base.* Sono state misurate accelerazioni verticali in nr. 2 punti e l'accelerazione orizzontale in nr. 1 punto in corrispondenza della mezzera di ciascuna campata;
- *Schemi di dettaglio.* Sono stati utilizzati due differenti schemi di dettaglio; nel primo sono state misurate nr.6 accelerazioni verticali, nr.5 accelerazioni orizzontali trasversali e nr. 2 accelerazioni orizzontali longitudinali su una singola campata; nel secondo schema di dettaglio sono state misurate nr. 4 accelerazioni verticali, nr. 3 accelerazioni trasversali e nr. 2 accelerazioni longitudinali su due campate adiacenti, inoltre sono state misurate nr. 2 accelerazioni longitudinali e nr. 1 accelerazione trasversale sulla testa della pila tra le due campate.

Il traffico transitante inoltre è stato caratterizzato in entrambe le direzioni di marcia analizzando sia la velocità di percorrenza tramite tre fotocellule a riflessione, sia la tipologia di treno transitante attraverso una videocamera.

Nel seguito sono descritte nel dettaglio le caratteristiche degli strumenti utilizzati, le modalità di misura adottate, e le tecniche di elaborazione dei segnali impiegate per identificare le principali caratteristiche modali della struttura in oggetto.

2.2.1.1 Strumentazione utilizzata

Per la misura delle accelerazioni sono stati impiegati:

- Accelerometri piezoelettrici monoassiali PCB 393A03, con sensitività 1.0V/g e fondoscala pari a $\pm 5g$ (Figura 2-1);
- Accelerometri piezoelettrici triassiali Dytran 3233A con sensitività 1.0V/g e fondoscala pari a $\pm 5g$ (Figura 2-1);
- sistema di acquisizione National Instruments cDAQ NI9185 con moduli per l'acquisizione di segnali accelerometrici National Instruments NI9230.

Nel caso di impiego di più sistemi cDAQ NI9185 questi sono stati collegati tra loro tramite cavi ethernet per garantirne la sincronizzazione dei segnali tramite protocollo Time Sensitive Networking (TSN).



Figura 2-1. Posizionamento accelerometri all'interno del cassone

La strumentazione di misura delle accelerazioni oggetto di validazione è costituita da:

- Accelerometri MEMS triassiali ST ISM330DHCX

Le misure sono state effettuate programmando gli strumenti in High-Performance e Low-Power mode.

2.2.1.2 Posizionamento degli strumenti nello schema base

Le misure dinamiche sulle campate costituite da travi a cassone sono state eseguite utilizzando lo schema di base rappresentato in Figura 2-2, secondo il quale, in corrispondenza della mezzeria di ciascuna campata, sono stati installati, all'interno della trave a cassone (Figura 2-2), n.2 accelerometri (ACC. V_A e ACC. V_B) per misurare le accelerazioni in direzione verticale ai lati della sezione di mezzeria e n.1 accelerometro per misurare l'accelerazione orizzontale in direzione trasversale (ACC H_t).

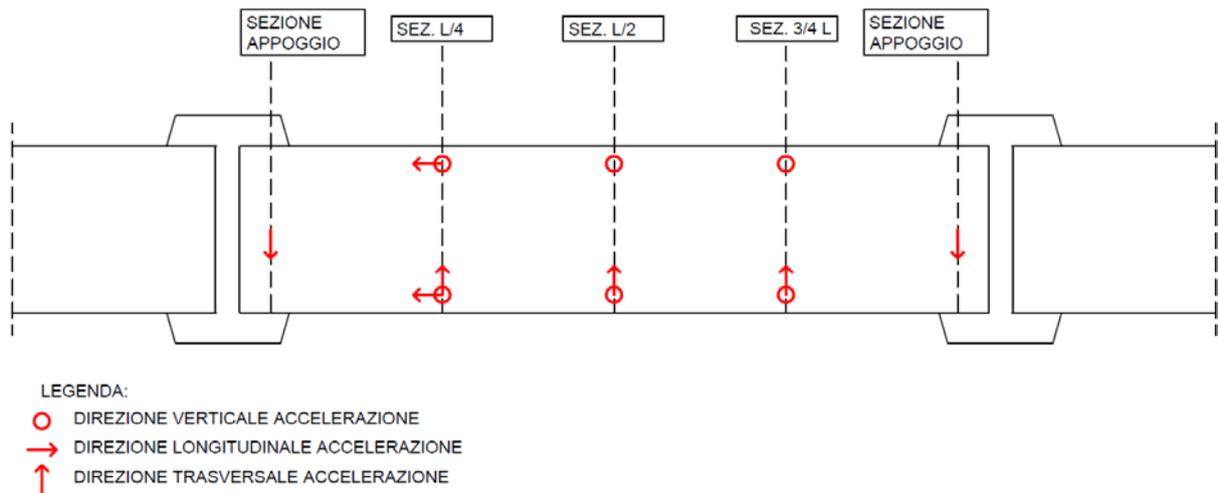


Figura 2-4. Vista in pianta degli strumenti con relative direzioni di misura

In ciascuna sezione, gli accelerometri sono stati posizionati all'interno dell'impalcato a cassone, a misurare le accelerazioni verticali e orizzontali in direzione sia longitudinale sia trasversale.

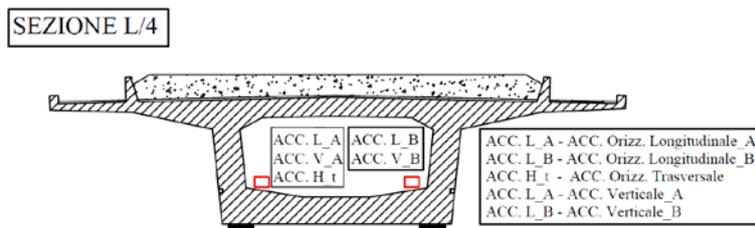


Figura 2-5. Posizione degli accelerometri nella sezione a 1/4 della luce

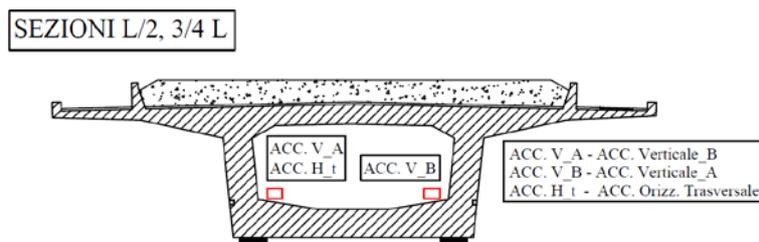


Figura 2-6. Posizione degli accelerometri nelle sezioni di mezzeria e a 3/4 della luce

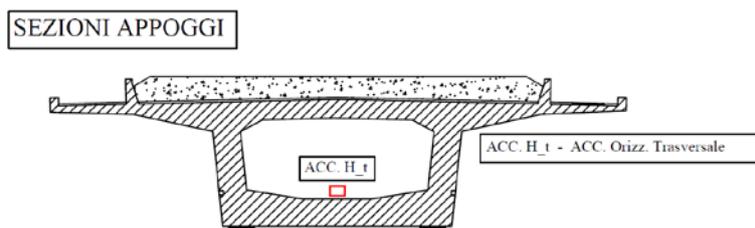


Figura 2-7. Posizione degli accelerometri nelle sezioni in corrispondenza degli appoggi

Tale schema di dettaglio corrisponde allo schema di monitoraggio adottato per disporre gli accelerometri MEMS. Nel caso ora introdotto, ogni accelerometro dà però la possibilità di misurare lungo tutti e tre gli assi essendo questi triassiali.

Schema di dettaglio per due campate adiacenti

Per valutare l’influenza della deformabilità delle pile sui modi di vibrare del viadotto e avere maggiori informazioni sull’eventuale interazione tra campate, sono state studiate le coppie di campate 25-26 e 32-33 e la pila presente tra esse (rispettivamente la pila 25 e la pila 32).

In particolare, gli accelerometri sono stati installati all’interno delle travi a cassone nelle sezioni in mezzeria, a ¼ della luce e in corrispondenza degli appoggi (Figura 2-8 e Figura 2-9). Nelle sezioni di mezzeria e in quelle a ¼ della luce sono stati posizionati nr. 2 accelerometri verticali e nr. 1 accelerometro orizzontale in direzione trasversale (Figura 2-10), nelle sezioni in corrispondenza degli appoggi, invece, sono stati installati n. 2 accelerometri orizzontali in direzione longitudinale e n. 1 accelerometro orizzontale in direzione trasversale (Figura 2-11).

Inoltre, n. 3 accelerometri monoassiali orizzontali sono stati installati sulla testa della pila come illustrato in Figura 2-9 e in Figura 2-10: due di questi strumenti sono stati utilizzati per registrare le accelerazioni orizzontali longitudinali e sono stati posizionati sui due denti di arresto laterali (Figura 2-13) mentre il terzo strumento ha misurato le accelerazioni orizzontali trasversali della testa della pila e è stato installato al centro della sezione del pulvino (Figura 2-12).

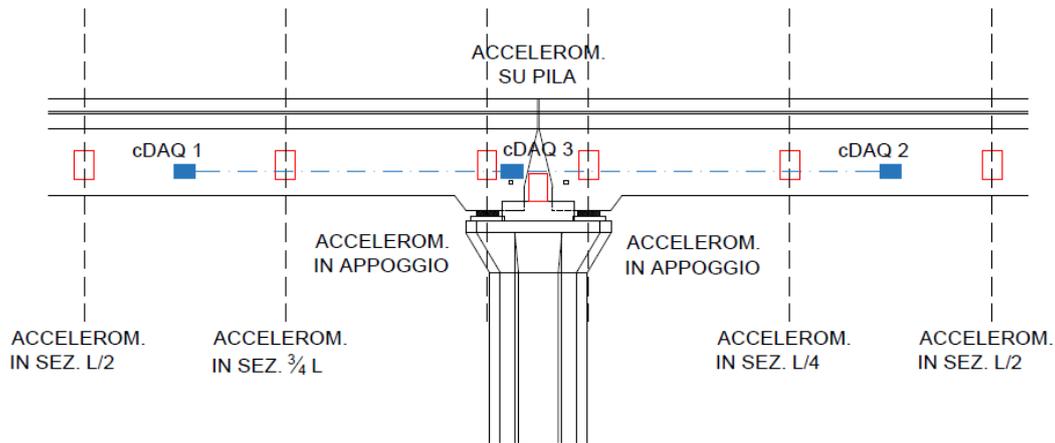


Figura 2-8. Prospetto longitudinale del ponte con le posizioni degli strumenti di misura

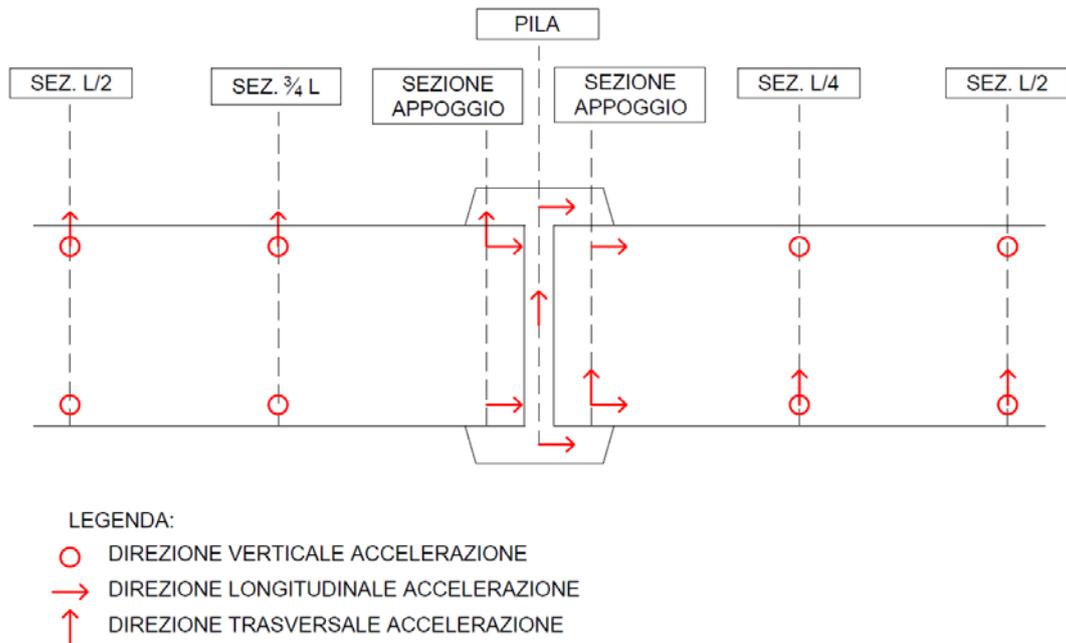


Figura 2-9. Vista in pianta degli strumenti con le relative direzioni di misura.

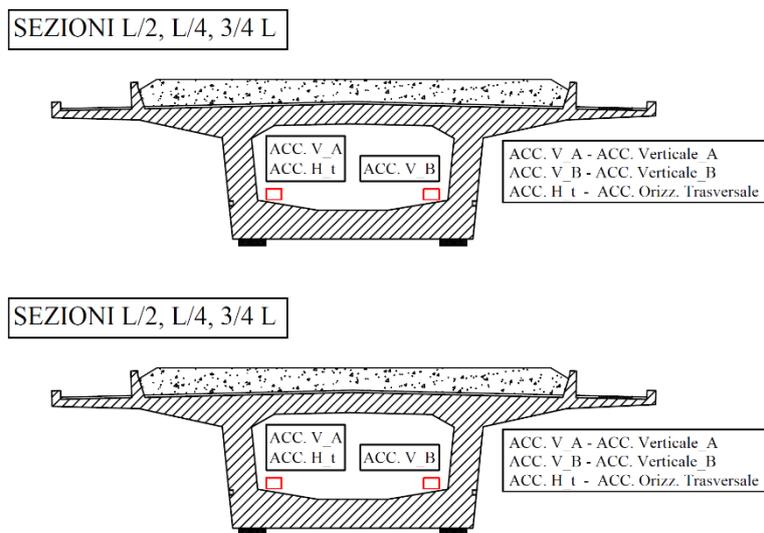


Figura 2-10. Posizione degli accelerometri nelle sezioni di mezzeria e a 1/4 della luce

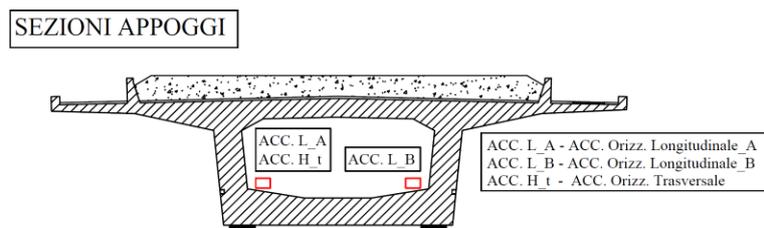


Figura 2-11. Posizione degli accelerometri nelle sezioni in corrispondenza degli appoggi

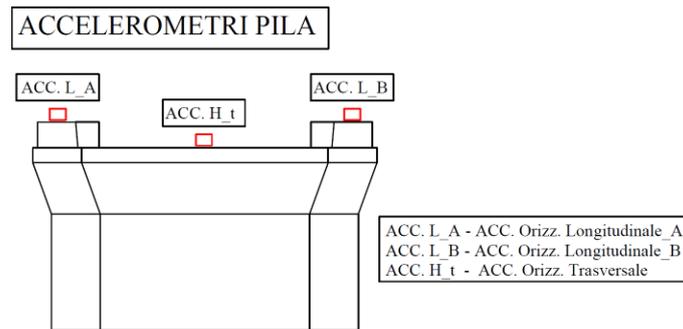


Figura 2-12. Posizione degli accelerometri sulla testa della pila



Figura 2-13. Posizione accelerometro orizzontale longitudinale sul dente di arresto presente sulla testa della pila

2.2.1.4 Elaborazione dei segnali registrati

Tutti i segnali accelerometrici registrati sono stati filtrati applicando un filtro FIR passabanda del sesto ordine, tra 2.0 Hz e i 100.0 Hz, in modo tale da ridurre al minimo gli effetti dei disturbi e identificare solamente le componenti strutturali della risposta dinamica.

L'identificazione dinamica del viadotto è stata eseguita sul segnale filtrato tra 2.0 Hz e 100.0 Hz, su una finestra di circa 5 secondi immediatamente successiva al passaggio di ciascun treno. Per caratterizzare tale intervallo in modo univoco si è utilizzato un criterio basato sul livello delle accelerazioni filtrate, in particolare, l'inizio della finestra è stato individuato cercando il punto in corrispondenza del quale il valore assoluto dell'accelerazione diventa inferiore a 0.025g.

Per ogni campata sono state stimate le frequenze e gli smorzamenti del primo modo flessionale e del primo modo torsionale.

2.2.2 Tecniche di identificazione dinamica

Le caratteristiche dinamiche delle due strutture sono state identificate attraverso due diversi metodi che operano uno nel dominio delle frequenze (EFDD) e l'altro nel dominio del tempo (SSI-COV).

Il primo metodo è l'Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD), che si basa sulla decomposizione a valori singolari della matrice di densità di potenza spettrale delle accelerazioni misurate e permette di separare il contributo dei singoli modi di vibrare. La metodologia EFDD consiste nel definire la matrice di densità spettrale di potenza del segnale acquisito e di introdurre una decomposizione ai valori singolari (Singular Value Decomposition, SVD) allo scopo di separare il contributo dei singoli modi. Come suggerisce il nome, l'EFDD è stato sviluppato originariamente per individuare e distinguere i modi presenti nelle misure effettuate. La determinazione delle frequenze proprie è ottenuta dalla frequenza corrispondente ai picchi del modulo della Funzione di Risposta in Frequenza. Data la sua semplicità, nel passato questo metodo è stato il più diffuso per la determinazione delle caratteristiche modali di strutture civili. Il risultato che si ottiene è esatto nel caso in cui la forzante sia rumore bianco, la struttura sia leggermente smorzata e le forme modali dei modi accoppiati siano ortogonali. Se queste ipotesi non sono soddisfatte, la decomposizione in sistemi ad un grado di libertà risulta approssimata, ma comunque il risultato che si ottiene è significativamente più accurato rispetto a quelli ottenuti dai metodi classici. Procedure definite da altri autori permettono di sostituire al PP metodi più evoluti per la determinazione delle caratteristiche modali, una volta ottenuta la decomposizione della matrice spettrale in singoli gradi di libertà.

Il secondo metodo impiegato, che opera nel dominio del tempo, è il Covariance-driven Stochastic Subspace Identification (SSI-COV) method. Esso impiega un modello stocastico a sotto-spazi, nella sua forma discreta, assumendo la forzante come un rumore bianco. In particolare, il metodo SSI-COV si basa sulle matrici di covarianza delle serie temporali della risposta strutturale misurata. L'algoritmo adottato si basa sulle proprietà dei sistemi stocastici e comporta una decomposizione a valori singolari e la soluzione di un'equazione dei minimi quadrati (risolta con la pseudo-inversa di Moore-Penrose). Dopo l'identificazione del modello a sottospazi, i parametri modali vengono facilmente estratti dalle matrici caratterizzanti il modello. L'identificazione del modello a sottospazi richiede la definizione dell'ordine del modello e per le strutture reali non è possibile predire l'ordine del modello che si adatta meglio ai dati sperimentali e caratterizza in modo realistico il comportamento dinamico della struttura. Pertanto, il modo migliore per superare questo ostacolo è stimare i parametri modali utilizzando modelli con ordini variabili in un intervallo fissato a priori in modo conservativo (il limite superiore è maggiore del numero di modi fisici del sistema). L'utilizzo di ordini del modello alti porta all'introduzione di modi numerici (chiamati spuri), che hanno poca rilevanza fisica ma servono per modellare il rumore che è sempre presente nei dati sperimentali. La separazione tra modi fisici e spuri è quindi un punto cruciale dell'algoritmo d'identificazione. L'approccio più diffuso per visualizzare i modi stabili è la costruzione di un diagramma di stabilizzazione in cui i parametri modali stimati per tutti i modelli sono rappresentati insieme (sull'asse delle ascisse le frequenze naturali stimate, sull'asse delle ordinate l'ordine del modello), permettendo l'identificazione dei parametri modali che sono stabili per modelli di ordine

crescente. I modi che vengono calcolati nella maggior parte di questi modelli con frequenza, deformata modale e smorzamento coerenti vengono classificati come stabili e possono essere quelli fisici. I modi che appaiono solo per determinati valori dell'ordine del modello sono considerati spuri. La classificazione di un modo come stabile dipende dalla definizione dei limiti massimi di variazione dei parametri modali. I modi stabili sono stati individuati impostando una variazione della frequenza naturale <1%, dello smorzamento <8%, della deformata modale <0.5%.

2.2.2.1 Parametri modali ottenuti - Esempi

Per ogni giornata di misura le fotocellule hanno permesso di rilevare il numero di treni transitanti sul viadotto. Si riportano ad esempio in Tabella 2-1 le caratteristiche (numero di carrozze, direzione, binario e velocità) delle diverse tipologie di treno rilevate nella giornata del 06/05/2021. Si riportano inoltre le accelerazioni massime misurate, sia con riferimento ai segnali grezzi (Acc. max) sia a quelli filtrati (Acc. max filt.) secondo le modalità descritte al § 2.2.1.4 del presente documento. In alcuni casi non è stato possibile misurare la velocità dei convogli a causa di movimenti eccessivi delle fotocellule.

Tabella 2-1. Passaggi rilevati con caratteristiche del treno e accelerazioni massime prodotte sulla campata 1

n° passaggio	Tipo treno	n° carrozze	Direzione	Binario	Velocità [km/h]	Data	Ora	Acc. max [g]	Acc. max filt. [g]
1	Frecciarossa	13	RO-FI	Pari	248.4	06/05/2021	11:42	1.045	0.159
2	Italo	11	FI-RO	Dispari	248.8	06/05/2021	12:08	1.194	0.117
3	Frecciarossa	13	FI-RO	Dispari	245.5	06/05/2021	12:18	1.288	0.081
4	Frecciarossa 1000	8	RO-FI	Pari	246.5	06/05/2021	14:10	1.348	0.163
5	\	\	\	\	247.8	06/05/2021	14:24	0.835	0.106
6	\	\	\	\	245.7	06/05/2021	14:29	1.345	0.128
7	Frecciarossa	13	FI-RO	Dispari	158.1	06/05/2021	14:52	0.683	0.120
8	Frecciarossa	13	RO-FI	Pari	211.0	06/05/2021	14:54	0.835	0.089
9	Italo	7	RO-FI	Pari	252.8	06/05/2021	14:59	1.090	0.087
10	Frecciaargento	7	FI-RO	Dispari	226.4	06/05/2021	15:09	1.204	0.110
11	Intercity	9	RO-FI	Pari	249.7	06/05/2021	15:10	1.054	0.105
12	Italo	11	RO-FI	Pari	247.5	06/05/2021	15:18	0.896	0.158
13	Frecciarossa	13	RO-FI	Pari	245.0	06/05/2021	15:30	0.591	0.099
14	Italo	7	FI-RO	Dispari	180.3	06/05/2021	16:00	1.016	0.138

A titolo di esempio, nella Figura 2-14 seguente si riportano gli accelerogrammi registrati nelle diverse direzioni, durante il passaggio n.11 e l'ampiezza delle loro trasformate di Fourier.

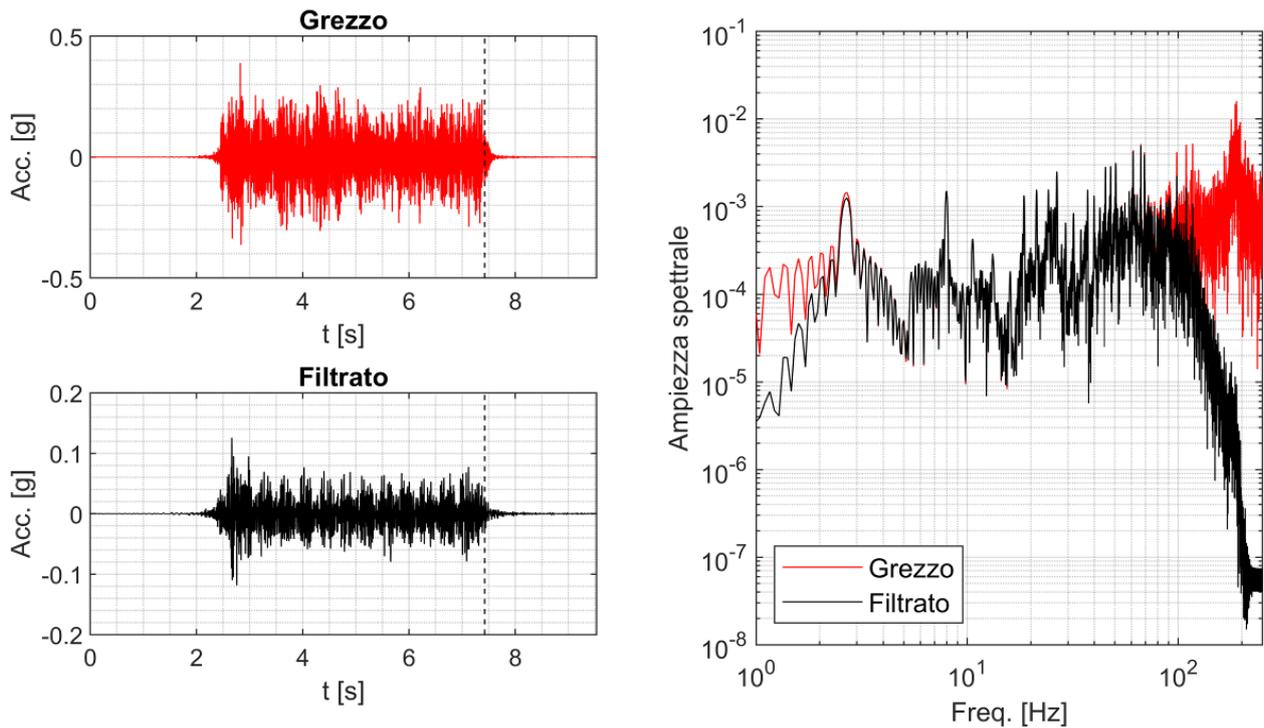


Figura 2-14. Rappresentazione del segnale nel dominio del tempo e delle frequenze per il passaggio n.11

Dagli andamenti della densità di potenza spettrale si è osservato che, nonostante i viadotti siano travi a cassone isostatiche in semplice appoggio, l'armamento ferroviario determina un'interazione tra le campate adiacenti; pertanto, sono stati individuati i primi modi longitudinali, trasversali, flessionali e torsionali in corrispondenza di diversi valori di frequenza. Di conseguenza, è stato necessario riportare più tabelle riassuntive per lo stesso tipo di modo di vibrare con i risultati ottenuti dall'identificazione su ciascun passaggio. Se ne riporta un esempio in Tabella 2-2 mentre in Figura 2-15 si riporta la deformata modale corrispondente.

Tabella 2-2. Frequenze e smorzamenti della prima serie di primi modi flessionali identificati sulla campata 1

Passaggio	Data	Metodo EFDD		Metodo SSI-COV 1		Metodo SSI-COV 2	
		f [Hz]	smorz [%]	f [Hz]	smorz [%]	f [Hz]	smorz [%]
1	06/05/2021	8.06	1.00%	8.05	0.72%	8.03	0.94%
2	06/05/2021	8.68	2.95%	\	\	\	\
3	06/05/2021	8.00	1.28%	\	\	\	\
4	06/05/2021	7.98	1.32%	\	\	\	\
5	06/05/2021	8.07	0.95%	8.03	2.29%	8.04	1.01%
6	06/05/2021	8.01	1.32%	\	\	\	\
7	06/05/2021	7.98	0.99%	7.97	0.68%	7.95	0.91%
8	06/05/2021	8.01	0.90%	8.01	0.57%	8.05	0.67%
9	06/05/2021	8.82	2.75%	\	\	\	\
10	06/05/2021	7.25	1.38%	\	\	\	\
11	06/05/2021	7.98	2.96%	\	\	8.93	13.62%
12	06/05/2021	8.06	0.91%	8.05	0.82%	8.04	0.59%
13	06/05/2021	7.96	1.04%	7.96	0.71%	7.93	0.94%
14	06/05/2021	8.09	0.95%	8.12	0.90%	\	\
Valori medi		8.07	1.48%	8.03	0.96%	8.14	2.67%
Dev. standard		0.36	0.78%	0.05	0.60%	0.35	4.83%
C.D.V.		4.4%	52.8%	0.7%	62.4%	4.3%	181.0%
Valori medi_inf		7.73	1.14%	7.96	0.71%	7.93	0.94%
Valori medi_sup		8.53	2.22%	8.12	0.90%	8.93	13.62%

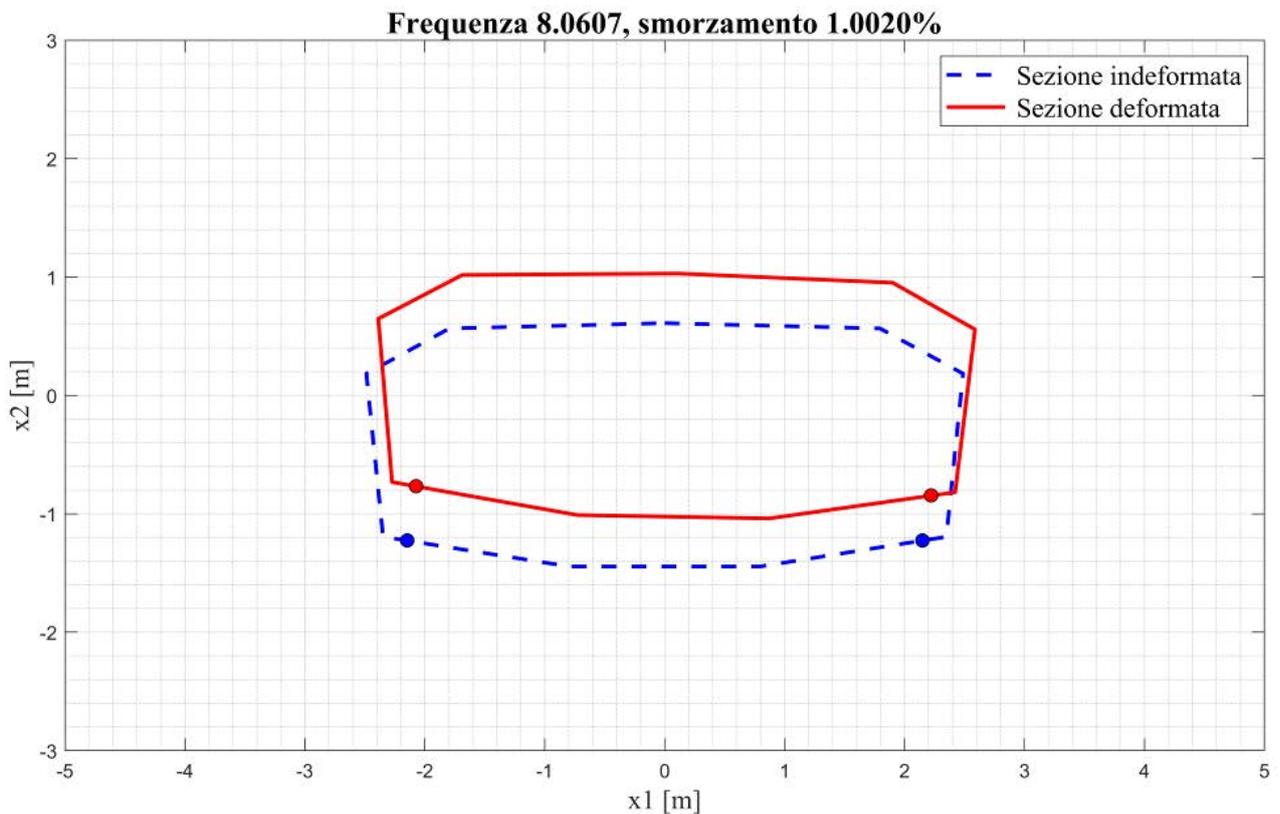


Figura 2-15. Deformata della prima serie di primi modi flessionali della campata 1, passaggio n.1

2.2.3 Validazione delle misure dei nodi sensore MEMS

I plot seguenti riportano le PSD ottenute mediando tutti i passaggi ferroviari rilevati durante l'esperimento. Le tracce rosse si riferiscono ai dati provenienti dal MEMS configurato in High-Performance mode, mentre le tracce blu si riferiscono ai dati provenienti dall'accelerometro piezoelettrico PCB393B12.

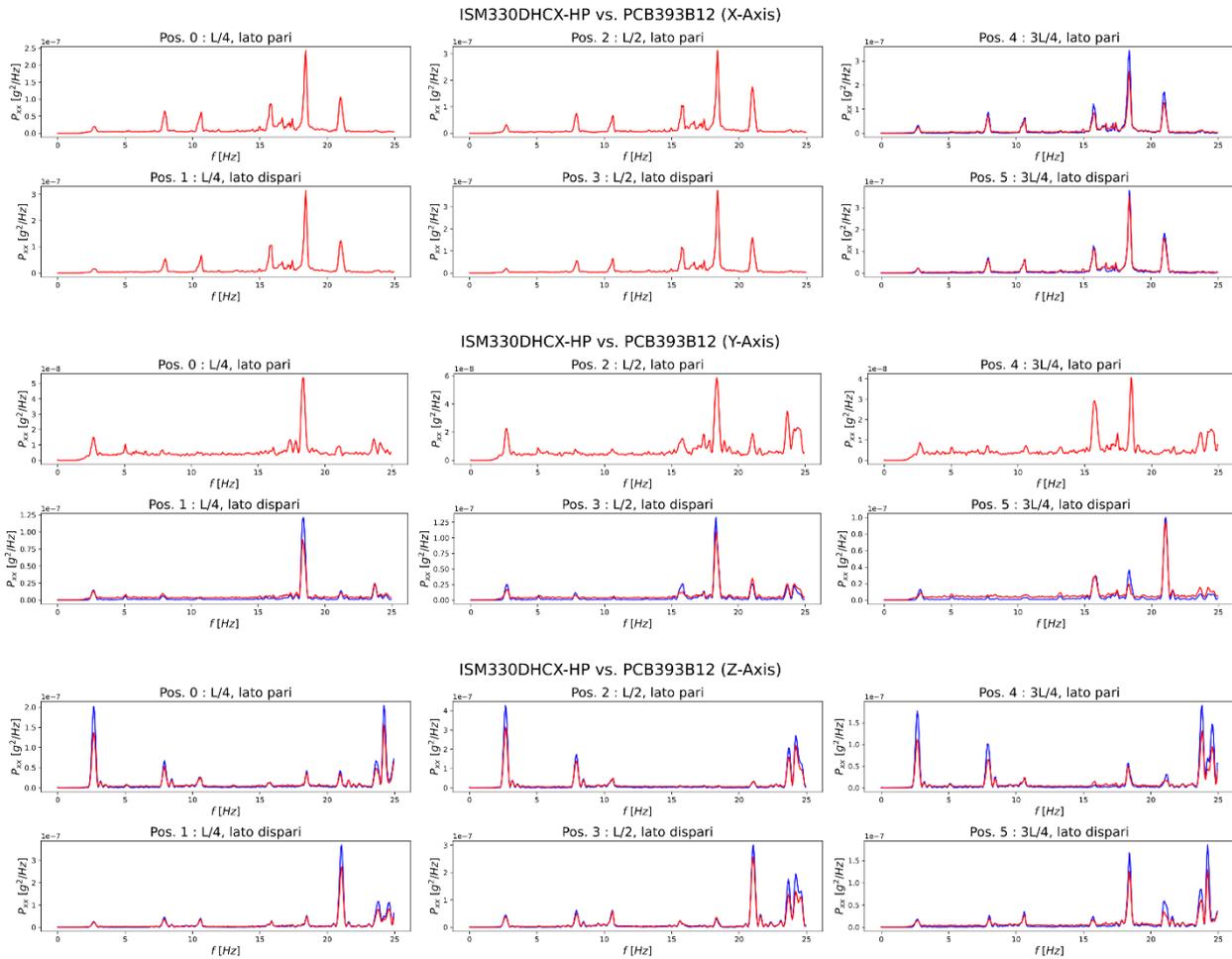


Figura 2-16. Confronto tra PSD calcolate dalle registrazioni ottenute da accelerometri MEMS e piezoelettrici

Dal punto di vista qualitativo, le tracce dell'accelerometro MEMS mostrano un'elevata similarità con i dati registrati dal sensore piezoelettrico. La Tabella 2-3 mostra un'analisi quantitativa delle differenze tra gli spettri calcolati dai due sistemi di acquisizione. I dati considerano solo l'asse Z, l'unico asse in cui è possibile un confronto puntuale tra i due sistemi di acquisizione.

Tabella 2-3. Analisi quantitativa delle differenze tra gli spettri calcolati dai due sistemi di acquisizione

Lato	Posizione	Frequency Range		PCB393B12		ISM330DHCX-HP		Error	
		F _{min} [Hz]	F _{max} [Hz]	F [Hz]	Peak [g ² /Hz]	F [Hz]	Peak [g ² /Hz]	F [%]	Peak [%]
PARI	L/4	0	5	2.67	2.02E-07	2.67	1.37E-07	0.0%	32.2%
		5	10	7.93	6.73E-08	7.93	5.23E-08	0.0%	22.2%
		10	15	10.53	2.63E-08	10.60	2.56E-08	0.6%	2.4%
		15	20	18.47	4.28E-08	18.47	3.67E-08	0.0%	14.3%
PARI	L/2	0	5	2.67	4.27E-07	2.67	3.15E-07	0.0%	26.2%
		5	10	7.93	1.73E-07	7.93	1.39E-07	0.0%	19.3%
		10	15	10.60	4.69E-08	10.67	5.02E-08	0.6%	-7.0%
		15	20	17.40	8.62E-09	17.40	1.29E-08	0.0%	-49.7%
PARI	3L/2	0	5	2.67	1.77E-07	2.67	1.13E-07	0.0%	36.4%
		5	10	7.87	1.01E-07	7.93	6.60E-08	0.8%	35.0%
		10	15	10.60	2.12E-08	10.60	2.39E-08	0.0%	-13.0%
		15	20	18.33	5.76E-08	18.33	4.98E-08	0.0%	13.6%
DISPARI	L/4	0	5	2.67	2.51E-08	2.67	2.15E-08	0.0%	14.3%
		5	10	7.93	4.55E-08	7.93	3.63E-08	0.0%	20.3%
		10	15	10.60	4.01E-08	10.60	3.52E-08	0.0%	12.2%
		15	20	18.47	5.31E-08	18.47	4.81E-08	0.0%	9.5%
DISPARI	L/2	0	5	2.67	4.46E-08	2.67	3.84E-08	0.0%	14.0%
		5	10	7.93	6.18E-08	7.93	4.86E-08	0.0%	21.4%
		10	15	10.60	6.29E-08	10.60	5.91E-08	0.0%	6.1%
		15	20	18.33	3.29E-08	18.33	3.62E-08	0.0%	-10.0%
DISPARI	3L/2	0	5	2.67	1.83E-08	2.67	1.49E-08	0.0%	18.8%
		5	10	8.00	2.66E-08	8.00	2.00E-08	0.0%	25.0%
		10	15	10.60	3.54E-08	10.60	2.81E-08	0.0%	20.5%
		15	20	18.40	1.68E-07	18.40	1.26E-07	0.0%	25.1%

Come si può osservare, il MEMS è efficace nel riconoscimento dei picchi frequenziali in tutte i punti di misura e per ogni fascia di frequenze considerata. L'errore percentuale tra la posizione del picco riconosciuta dal MEMS e quella, considerata corretta, riconosciuta dal sensore piezoelettrico è pressoché sempre nullo, con l'eccezione di tre punti, in cui l'errore è comunque inferiore all'1%. La differenza è invece più marcata per quanto riguarda la capacità del MEMS di misurare fedelmente l'ampiezza del picco di frequenza. Infatti, l'errore percentuale medio sull'identificazione della corretta ampiezza di picco è pari al 19.5%, con un minimo del 2.4% e un massimo del 49.7%.

Le stesse misurazioni, sono state effettuate anche con una seconda batteria di sensori MEMS ISM330DHCX, configurati in Low-Power mode. I grafici seguenti mostrano, in verde, un confronto degli spettri ottenuti da questi ultimi sensori quando confrontati con gli spettri dei sensori MEMS in High-Performance mode (in rosso). Come si può verificare l'eccessivo rumore di misurazione rende impossibile l'identificazione dei modi vibrazionali della struttura a partire dai dati di questi sensori. In ogni caso, questa particolare modalità di funzionamento dei sensori resta comunque di interesse, in virtù del loro basso consumo energetico, per applicazioni di triggering o di riconoscimento di stati di quiete opposti a momenti in cui si verifica il passaggio di un convoglio ferroviario.

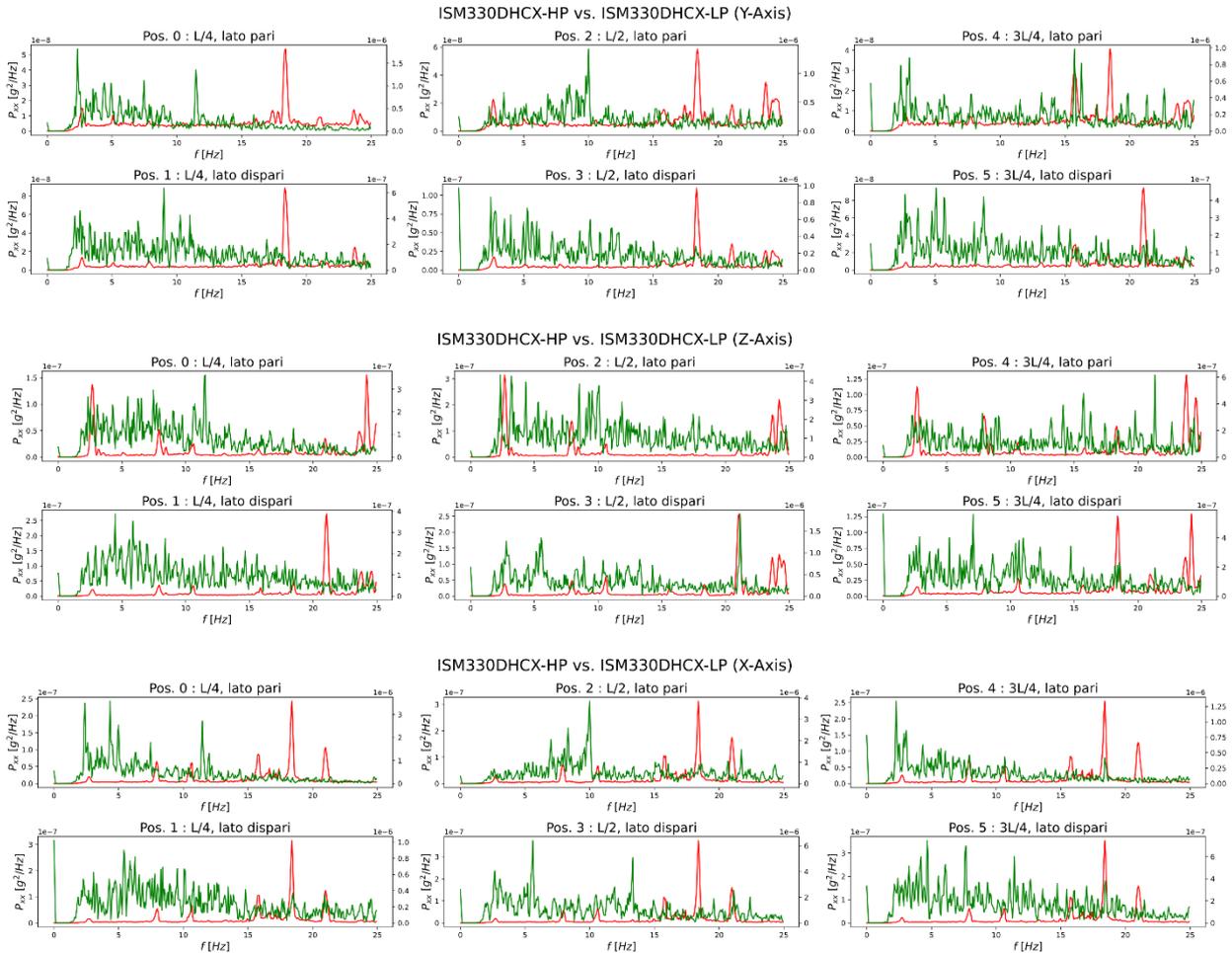


Figura 2-17. Confronto tra PSD calcolate dalle registrazioni ottenute da accelerometri MEMS in modalità low power e piezoelettrici

2.3 Descrizione dell'attività n.2 (Partners UniNA, Mapei, STMicroelectronics)

Nell'ambito delle prove riguardanti i ponti, il partner UniNA ha progettato una campagna sperimentale su travi da ponte in scala ridotta, realizzate in c.a.p. con cavi post-tesi in collaborazione con Mapei ed STMicroelectronics per l'applicazione delle strumentazioni di misura. La campagna sperimentale è stata ideata per studiare l'influenza di eventuali difetti di costruzione su strutture in c.a.p. in scala reale, includendo sia la variabilità nel livello di precompressione iniziale che la parziale o mancata iniezione delle guaine. Si è inoltre considerata la possibilità di applicare una rottura localizzata dell'armatura da precompressione.

Si è dunque voluta porre attenzione sull'effetto che una o più di queste condizioni possano produrre sulla risposta flessionale delle travi in oggetto.

La progettazione e realizzazione dei provini ha riguardato un numero totale di 15 travi in scala 1:5. La Tabella 2-4 mostra le principali caratteristiche di tali provini, che si distinguono in base ai seguenti aspetti:

- due livelli di precompressione, definiti come alto (HP) e basso (LP) e pari, rispettivamente, a 150 kN e 75 kN;
- tre condizioni di iniezione delle guaine, ovvero travi perfettamente iniettate, non iniettate e parzialmente iniettate;
- due condizioni di danneggiamento dei cavi, ossia cavi non danneggiati e cavi danneggiati in specifiche sezioni.

La Tabella 2-4 riporta anche le sequenze temporali di esecuzione delle gabbie strumentate e dei getti di calcestruzzo.

Tabella 2-4. Configurazione generale dei 15 provini realizzati

Provino	Condizione trefolo	Ancoraggio cavi	Iniezione	Precompressione	Data gabbia	Data getto
T1 (B-Hp)	Non Danneggiato	Si	Totale	Alta	13/07/2021	15/07/2021
T2 (U-Hp)	Non Danneggiato	Si	Assente	Alta	14/07/2021	20/10/2021
T3 (B-Lp)	Non Danneggiato	Si	Totale	Bassa	13/07/2021	15/07/2021
T4 (U-Lp)	Non Danneggiato	Si	Assente	Bassa	14/07/2021	20/10/2021
T5 (B-Hp-Ld)	Danneggiato	Si	Totale	Alta	15/07/2021	19/10/2021
T6 (B-Lp-Ld)	Danneggiato	Si	Totale	Bassa	15/07/2021	19/10/2021
T7	Non Danneggiato	Si	Totale	Bassa	16/12/2021	17/12/2021
T8	Non Danneggiato	Si	Totale	Alta	16/12/2021	17/12/2021
T9 (Cu-Lp)	Non Danneggiato	Si	Parziale (centrale)	Alta	16/12/2021	07/02/2022
T10 (Cu-Hp)	Non Danneggiato	Si	Parziale (centrale)	Alta	16/12/2021	07/02/2022
T11 (Lu-Lp)	Non Danneggiato	Si	Parziale (laterale)	Alta	16/12/2021	21/02/2022
T12 (Lu-Hp)	Non Danneggiato	Si	Parziale (laterale)	Alta	16/12/2021	02/03/2022

T13	Non Danneggiato	Si	Totale	Bassa	16/12/2021	02/02/2022
T14 (B)	Non Danneggiato/ Danneggiato	Si	Totale	Alta	16/12/2021	02/02/2022
T15 (B)	Non Danneggiato/ Danneggiato	No	Totale	Bassa	16/12/2021	21/02/2022

Ognuno dei provini realizzati presenta una sezione trasversale a T e le seguenti caratteristiche geometriche:

- flangia di altezza pari a 60 mm e larghezza pari a 480 mm;
- anima di altezza pari a 380 mm e larghezza pari a 150 mm;
- lunghezza totale pari a 6600 mm e altezza totale pari a 440 mm.

Ogni provino è rinforzato con la seguente armatura ordinaria:

- n. 6 barre $\text{Ø}8$ con copriferro pari a 30 mm;
- staffe $\text{Ø}8$ a due bracci con passo pari a 200 mm.

L'armatura da precompressione è costituita da due trefoli a 7 fili da 0,6" con profilo parabolico lungo la singola trave, ad eccezione di un singolo tratto centrale rettilineo di lunghezza pari a 1 m. Lo schema geometrico della singola trave è riportato in Figura 2-18.

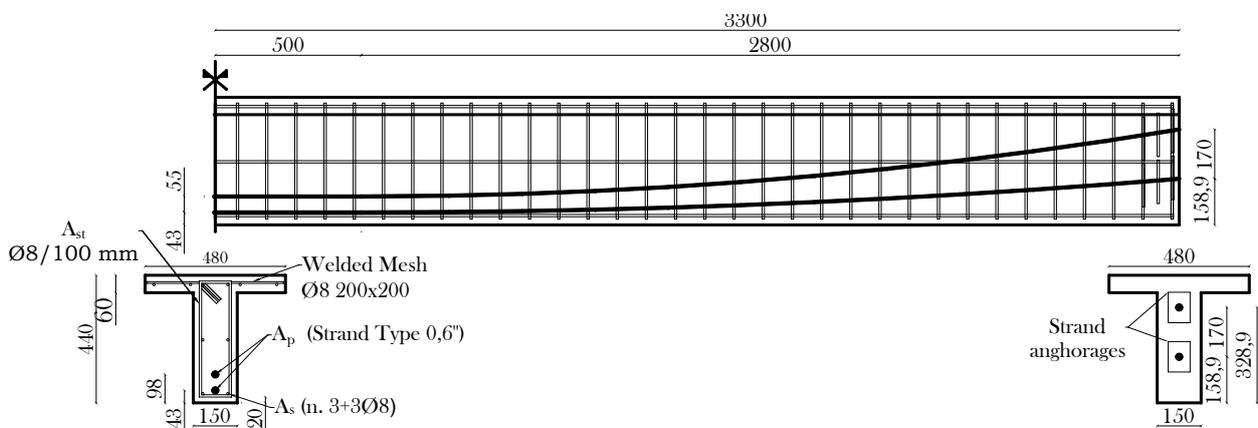


Figura 2-18. Geometria della generica trave con dettaglio delle sezioni di mezzera e di estremità

Dei 15 provini riportati in Tabella 2-4 sono stati selezionati i primi quattro per la successiva sperimentazione di laboratorio presso il Dipartimento di Strutture per l'Ingegneria e l'Architettura dell'Università degli Studi di Napoli Federico II. Coerentemente, i test sperimentali eseguiti hanno consentito di analizzare il comportamento delle travi in c.a.p. a cavi post-tesi al variare del livello di precompressione iniziale e in due condizioni di iniezione (guaine iniettate e non iniettate), come illustrato in Tabella 2-5. Pertanto, il presente documento relazione in merito ai risultati delle prove eseguite sulle travi da T1 a T4.

Tabella 2-5. Provini sottoposti a sperimentazione

Campione	Condizione guaina	Livello di precompressione iniziale
T1-B-HP	Iniettata (B)	Alto (HP)
T2-U-HP	Non iniettata (U)	Alto (HP)
T3-B-LP	Iniettata (B)	Basso (LP)
T4-U-LP	Non iniettata (U)	Basso (LP)

Ciascun provino è stato sottoposto ad un test quasi-statico di flessione su quattro punti. Il setup di prova è riportato in Figura 2-19. Il macchinario di prova consiste di un basamento rigido, quattro colonne fissate alla base ed un attuatore mobile lungo le colonne. L'apparecchiatura permette test sia in controllo di forza (carico massimo a compressione pari a 3000 kN, carico massimo a trazione pari a 2400 kN) che di spostamento (massima corsa pari a 150 mm).

Per misurare l'abbassamento in mezzeria è stato utilizzato un LVDT, mentre una cella di carico è stata impiegata per misurare il carico verticale effettivamente impresso dall'attuatore al provino.

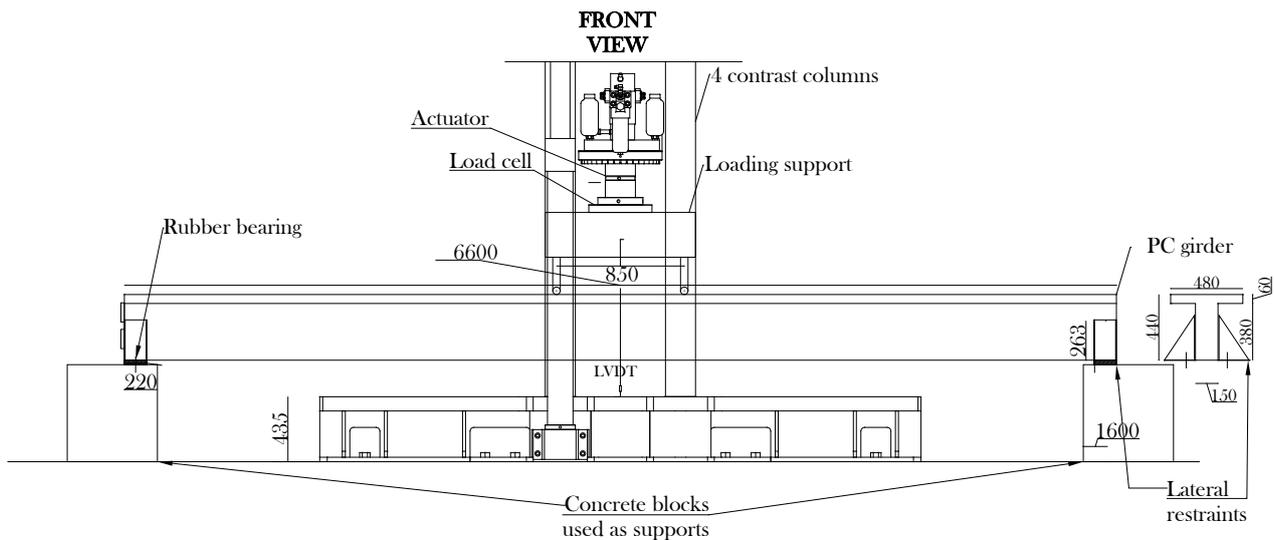


Figura 2-19. Configurazione di test

Il comportamento ciclico di ogni trave è stato valutato attraverso due protocolli di carico.

Il primo protocollo (P1, Figura 2-20) è stato definito in controllo di forza e si è composto di 6 cicli di ampiezza crescente sino ad un massimo livello di forza verticale applicata alla trave. Sono stati considerati tre differenti livelli massimi di forza: $F_1 = 33.1$ kN; $F_2 = 48.3$ kN; $F_3 = 72.4$ kN. Questi valori di forza corrispondono, rispettivamente, al carico di esercizio, al carico di progetto e ad 1.5 volte il carico di progetto previsto dalle norme tecniche in condizioni gravitazionali.

Il secondo protocollo (P2) è stato definito in controllo di spostamento e si è composto di una rampa di carico a velocità costante (0.05 mm/s) fino alla rottura flessionale del provino.

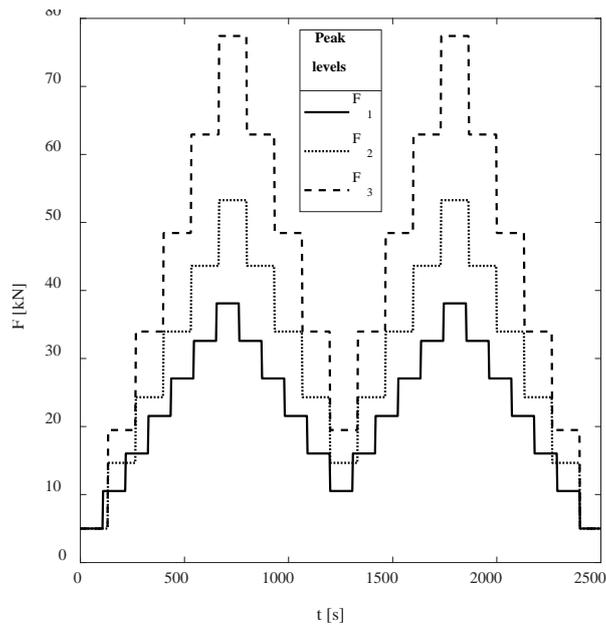


Figura 2-20. Rampe di carico del protocollo P1

2.4 Risultati dell'attività n.2 (Partners UniNA, Mapei, STMicroelectronics)

2.4.1 Risposta ciclica dei provini testati

La risposta ciclica dei primi quattro provini testati è mostrata in Figura 2-21 in un piano cartesiano avente in ascisse la freccia della trave (d) e in ordinate la forza verticale applicata (F). In ogni plot sono evidenziati i valori relativi alle forze di picco imposte dal protocollo ed i residui in termini di spostamento a prova terminata. I risultati sperimentali mostrano come i provini con basso livello di precompressione (Figura 2-21c e Figura 2-21d) fessurino già a partire dal primo livello di carico, ovvero al di sotto del valore massimo imposto dalla prima rampa del protocollo P1 (33.1 kN); viceversa, i provini con alto livello di precompressione (Figura 2-21a e Figura 2-21b) fessurano solo a partire dal secondo livello di P1 (ovvero oltre 48.3 kN).

L'influenza dell'iniezione delle guaine diventa evidente nella fase fessurata del comportamento strutturale: la deformabilità delle travi con guaine non iniettate, infatti, è nettamente maggiore rispetto a quelle con guaine iniettate. Questo risultato è visibile in dettaglio in Figura 2-22, che mostra il massimo valore di freccia (d_{max}) raggiunto all'aumentare della forza verticale. Comparando la Figura 2-21c con la Figura 2-21d, si nota anche come un più alto livello di precompressione iniziale permetta una maggiore capacità elastica della trave, con un valore minore di freccia residua e dunque di danneggiamento permanente.

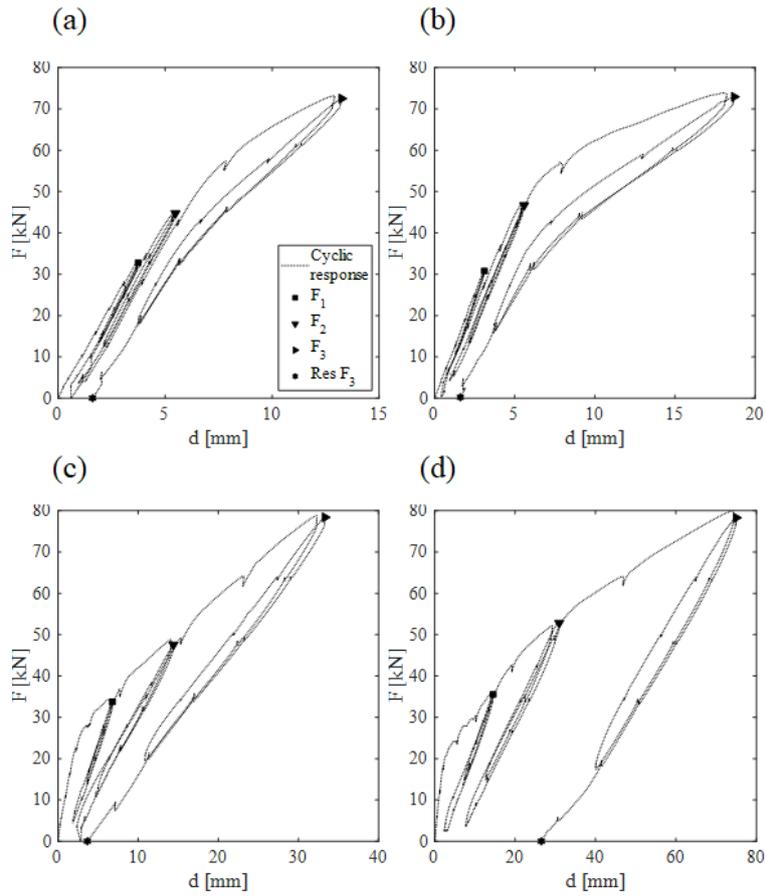


Figura 2-21. Risposta ciclica dei primi quattro provini: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4

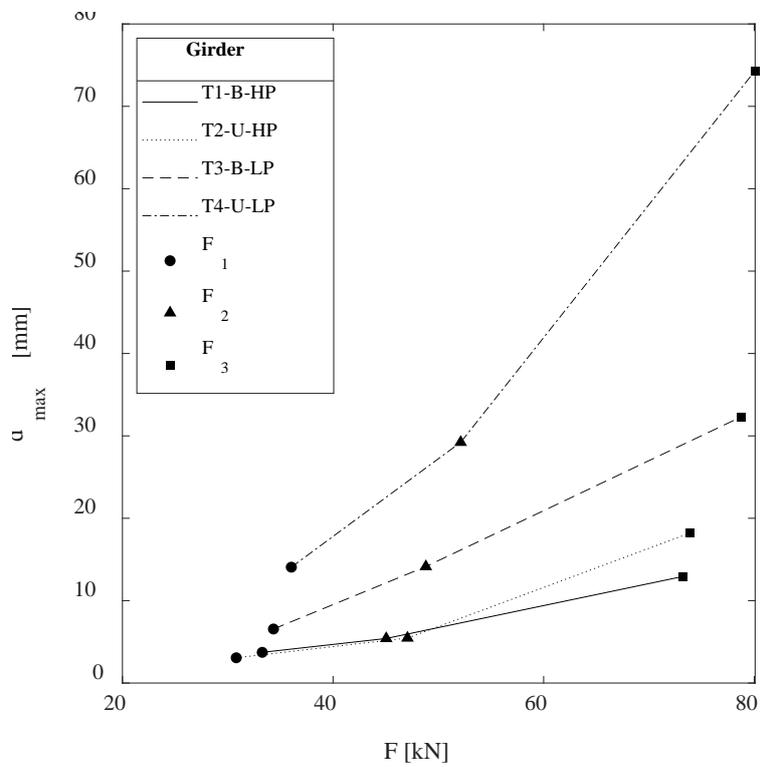


Figura 2-22. Freccia massima al variare della forza nel protocollo di carico P1

2.4.2 Risposta monotona dei provini testati

Dopo l'applicazione del protocollo P1, ad ogni trave è stato applicato il protocollo P2. La Figura 2-23 mostra l'inviluppo delle curve cicliche forza–spostamento dei quattro provini testati. Osservando tale figura si nota come le travi mostrino la stessa rigidezza iniziale. Questo parametro è principalmente funzione della geometria della sezione in calcestruzzo (uguale per ogni provino) e non dipende, quindi, dal livello di precompressione o dalla condizione di iniezione delle guaine.

La soglia di prima fessurazione di ogni provino è indicata con differenti markers in Figura 2-23. Si nota come il livello di precompressione iniziale abbia una certa influenza su tali soglie, dacché ad una forza iniziale maggiore corrisponde una forza di fessurazione maggiore (come atteso, data la linearità del problema).

Oltre la soglia di prima fessurazione, la risposta dei provini è fortemente influenzata dalla condizione di iniezione delle guaine. Con lo stesso livello di precompressione iniziale, provini con guaine non iniettate mostrano una deformabilità marcatamente maggiore rispetto alla controparte con guaine iniettate.

La risposta allo stato limite ultimo delle travi è stata studiata solo parzialmente, essendo stata condizionata dalla corsa massima dell'attuatore del macchinario di prova. Tuttavia, i valori numerici ricavati in condizioni di picco sono significativi e sono sintetizzati in Tabella 2-6. Da tali valori si evince come in condizioni di picco le soglie di forza non dipendano dal livello di precompressione ed ulteriormente come la deformabilità dei provini con guaine non iniettate sia sensibilmente maggiore.

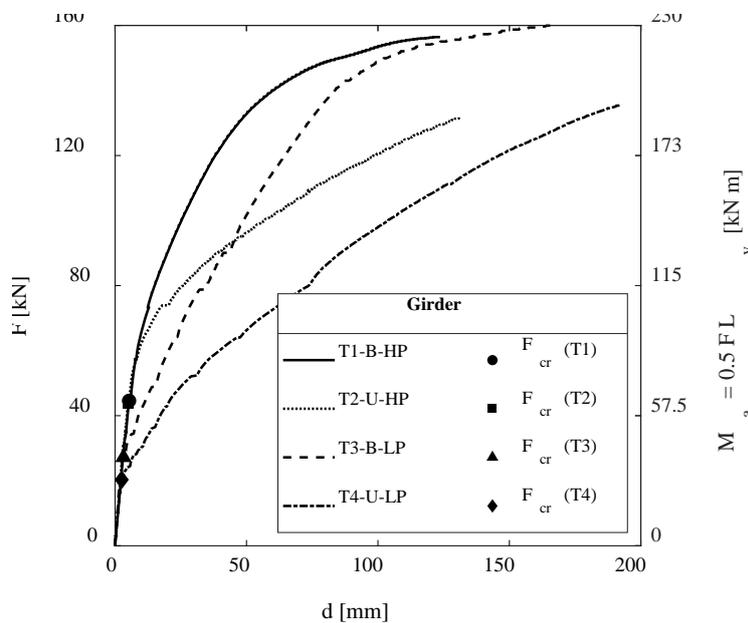


Figura 2-23. Inviluppo monotono delle curve forza–spostamento dei quattro provini testati

Tabella 2-6. Valori massimi di freccia, forza e momento flettente allo stato limite ultimo dei quattro provini testati

Campione	d_{\max} [mm]	F_{\max} [kN]	$M_{\max}^{exp.}$ [kNm]
T1-B-HP	124	156	237
T2-U-HP	131	137	209
T3-B-LP	167	161	243
T4-U-LP	184	137	210

2.4.3 Configurazioni deformate

Figura 2-24 ed Figura 2-25 mostrano le configurazioni deformate delle quattro travi testate, rispettivamente in condizioni di prima fessurazione e di picco (ovvero massima resistenza misurata).

Dalla Figura 2-24 si evince come, in ogni caso, le fessure in zona tesa si formino in corrispondenza della mezzeria o nella zona maggiormente caricata a momento costante. Nel caso delle travi con guaine non iniettate (Figura 2-24b e Figura 2-24d) si nota la formazione di più fessure simultaneamente, a differenza dei casi con guaine iniettate (Figura 2-24a e Figura 2-24c) ove si nota una singola e distinta fessura in corrispondenza della mezzeria.

Per quel che riguarda la risposta in condizioni di picco, nel caso di travi con guaine iniettate (Figura 2-25a e Figura 2-25c) le fessure sono quasi equamente spaziate in zona tesa e hanno un'ampiezza contenuta; viceversa, nel caso di guaine non iniettate (Figura 2-25b e Figura 2-25d) le fessure sono più ampie e visibili e hanno una spaziatura maggiore.

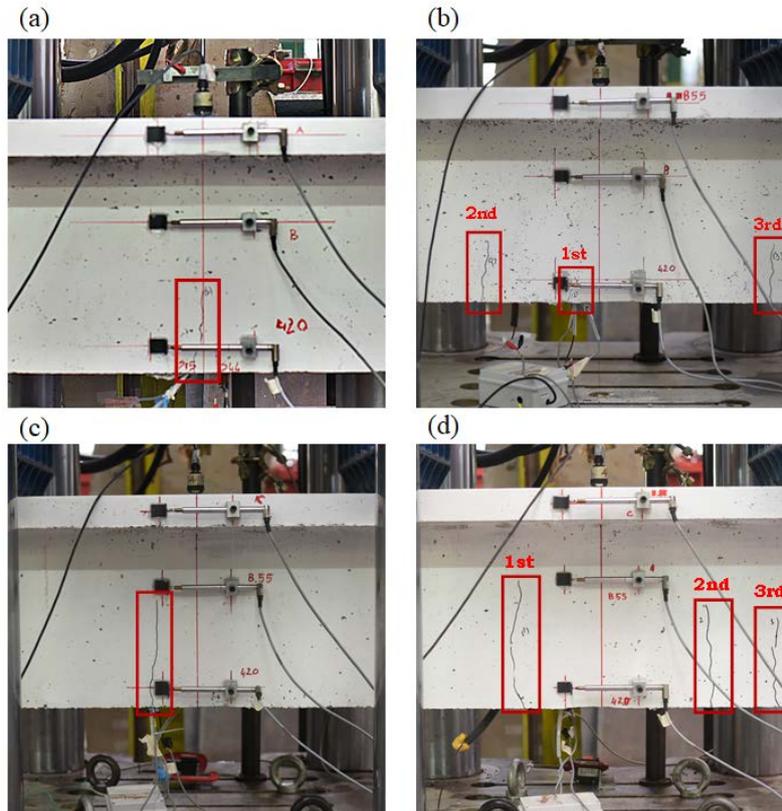


Figura 2-24. Configurazione deformata dei quattro provini alla prima fessurazione: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4

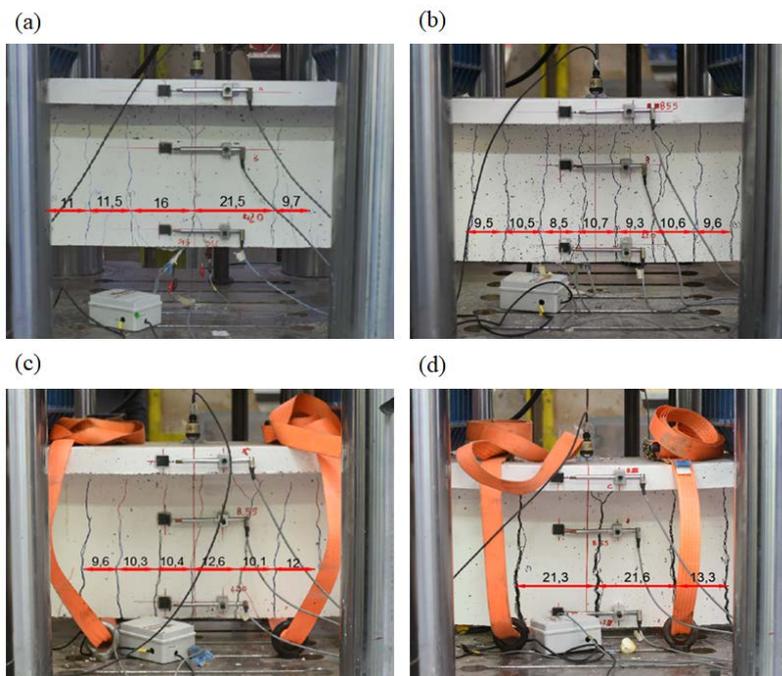


Figura 2-25. Configurazione deformata dei quattro provini in condizione di picco: (a) T1; (b) T2; (c) T3; (d) T4

3 ATTIVITÀ X.2: Prove su gallerie

3.1 Descrizione dell'attività (Partners UniRM2, STMicroelectronics)

Il lavoro svolto nelle prime fasi della presente attività ha avuto come obiettivo quello di studiare ed analizzare dei modelli per gallerie al fine di poter riprodurre delle configurazioni di carico da applicare successivamente su una prova sperimentale alla scala reale. I modelli così analizzati hanno permesso di determinare delle configurazioni di carico ritenute prossime a quelle reali cui potrebbe essere sottoposto il rivestimento della galleria durante la sua vita utile. Contestualmente è stato pensato un sistema di strumentazione da poter utilizzare sull'anello tale da restituire dati ritenuti idonei ad un confronto con i modelli analitici precedentemente sviluppati.

Per raggiungere gli obiettivi relativi alla prova sperimentale è stato studiato il comportamento del rivestimento di gallerie, realizzate tramite la tecnica dello scavo meccanizzato, sottoposte a sollecitazioni esterne.

Lo studio ha visto lo sviluppo di modelli e analisi numeriche volte a determinare possibili scenari di carico cui il rivestimento della galleria può essere sottoposto durante la sua messa in esercizio. Scelte le possibili configurazioni di carico, tali da riprodurre la reale condizione in esercizio della galleria, sono state eseguite quindi analisi numeriche al fine di prevedere configurazioni di deformazione del rivestimento e stati tensionali interni ad esso. I risultati ottenuti da tali analisi hanno permesso di definire livelli di carico ammissibili da utilizzare durante l'esecuzione di una prova alla scala reale. Nella modellazione sono state prese in considerazione diverse condizioni di carico cui è soggetta una galleria durante la sua fase di messa in esercizio.

I parametri e le geometrie alla base delle analisi numeriche condotte sono quelli tipici di una galleria metropolitana. In particolare è stato isolata una porzione "base" di galleria, ovvero è stata presa in esame un anello con un diametro esterno di 6.4 m, un diametro interno di 5.8 cm, uno spessore di 30 cm e un'altezza di circa 140 cm (Figura 3-1a) . L'anello è composto da sei conci prefabbricati più un concio di chiave più piccolo per un totale di sette conci, come mostrato in Figura 3-1b.

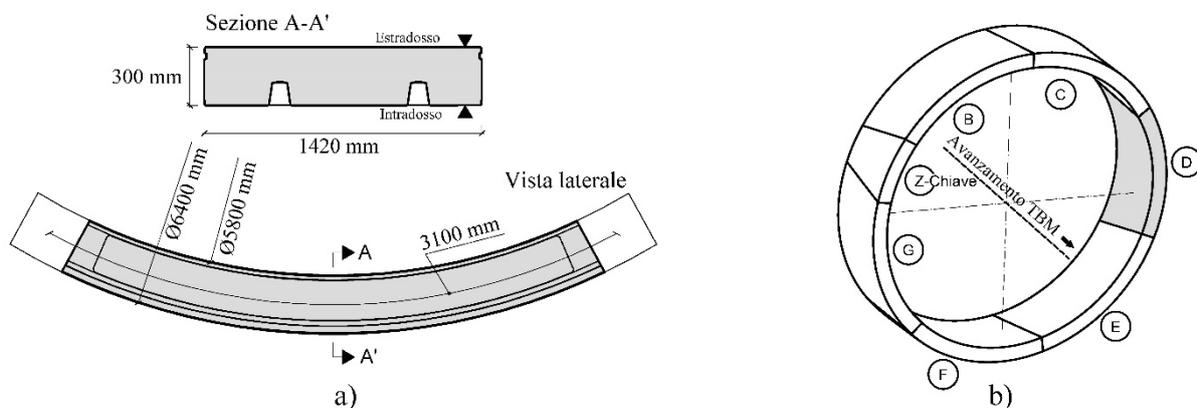


Figura 3-1. Geometria galleria: a) Singolo concio; b) Anello completo

Definita la geometria dell’anello si è proceduto a considerare e studiare le varie fasi di costruzione dell’anello per l’esecuzione della prova sperimentale e all’individuazione dell’esatta posizione della strumentazione interna (sensori di stress) ed esterna (trasduttori a filo e potenziometri). Queste ultime posizioni sono rese necessarie per fissare dei “punti di controllo” e permettere il confronto tra i risultati ottenuti sperimentalmente con quelli determinati dalle analisi numeriche relative alla modellazione. Risulta altresì importante l’individuazione di tali punti al fine di evitare possibili interferenze tra il loro posizionamento e quello delle armature progettate ed utilizzate per il rinforzo dei conci.

L’attività è successivamente avanzata attraverso la definizione di un sistema di prova atto a riprodurre la distribuzione delle spinte esercitate dal terreno circostante la galleria. Poiché non è possibile riprodurre tale condizione al contorno di carico uniformemente distribuito, è stato definito un sistema di carico discreto che consiste nell’applicare i diversi carichi puntuali per mezzo di traversi di ripartizione disposti sulla superficie estradossale (esterna) dell’anello (Figura 3-2).

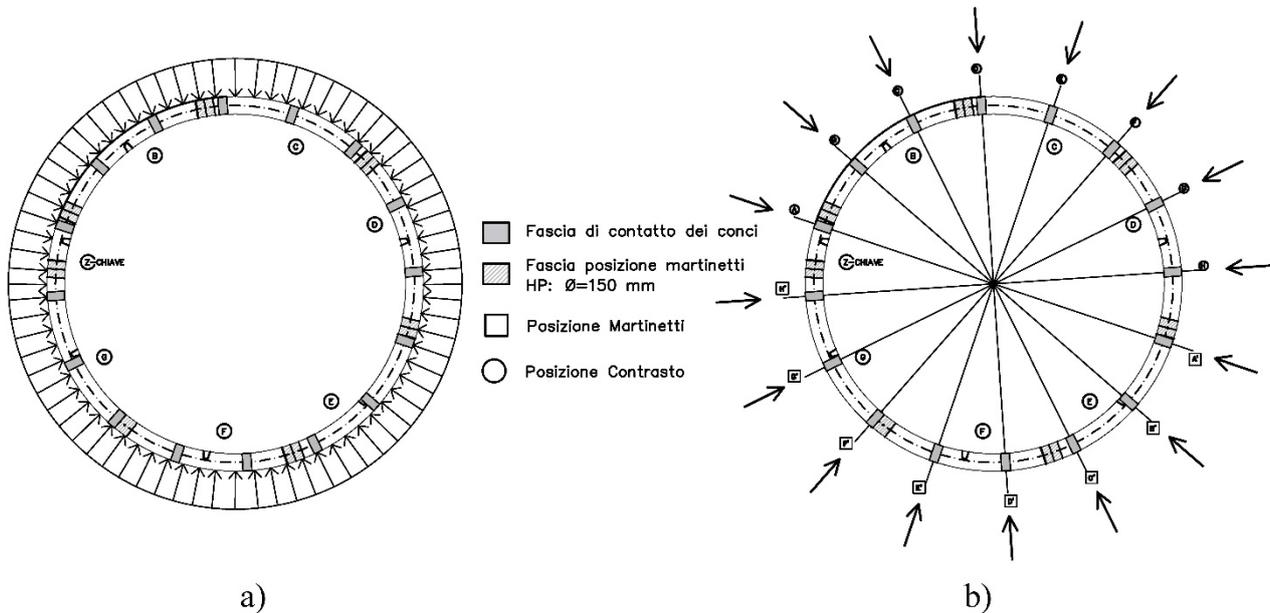


Figura 3-2. Discretizzazione spinta terreno: a) Carico uniformemente distribuito; b) Carico discretizzato

Definita la tipologia di applicazione del carico sull’anello da “continuo” a “discreto”, l’attività si è concentrata sulla progettazione della prova ad hoc alla scala reale. È stato quindi progettato il banco di prova per la prova sperimentale sull’anello interno.

Una volta definito il sistema di prova, si è proceduto alla definizione e al progetto delle varie componenti fisiche che compongono il banco per la prova.

L’obiettivo, a questo stato di avanzamento del progetto, è stato quello di studiare, progettare e successivamente realizzare un sistema di distribuzione del carico al fine di poter riprodurre e simulare le diverse sollecitazioni/spinte cui può essere soggetta una galleria (o porzione di essa come ad esempio un anello oggetto della presente prova sperimentale). Per fare ciò è stato dimensionato un sistema idraulico costituito da una

distribuzione radiale di martinetti idraulici forati da 1000 kN/cad. Il sistema di carico prevede l'utilizzo di n. 16 traverse in acciaio realizzare tramite profili UPN accoppiati. I martinetti agiscono a coppie di due su n.8 traverse mentre le ulteriori otto traverse sono collegate a quest'ultime tramite barre dywidag serrate da dati di contrasto. Il sistema così costituito permette di discretizzare la spinta esercitata dal terreno circostante, in direzione radiale, secondo n.16 linee di spinta e n. 32 punti di carico. Il sistema di carico dei martinetti viene alimentato da tubi ad olio ad alta pressione collegati a pompe idrauliche. Ciascuna pompa idraulica sarà in grado di gestire n.4 gruppi di carico per un totale di n. 16 martinetti idraulici (Figura 3-3). Alla luce di questa soluzione, nelle fasi successive di predisposizione del banco di prova sono stati eseguiti trentadue fori per il passaggio, in direzione radiale, delle barre dywidag di collegamento.

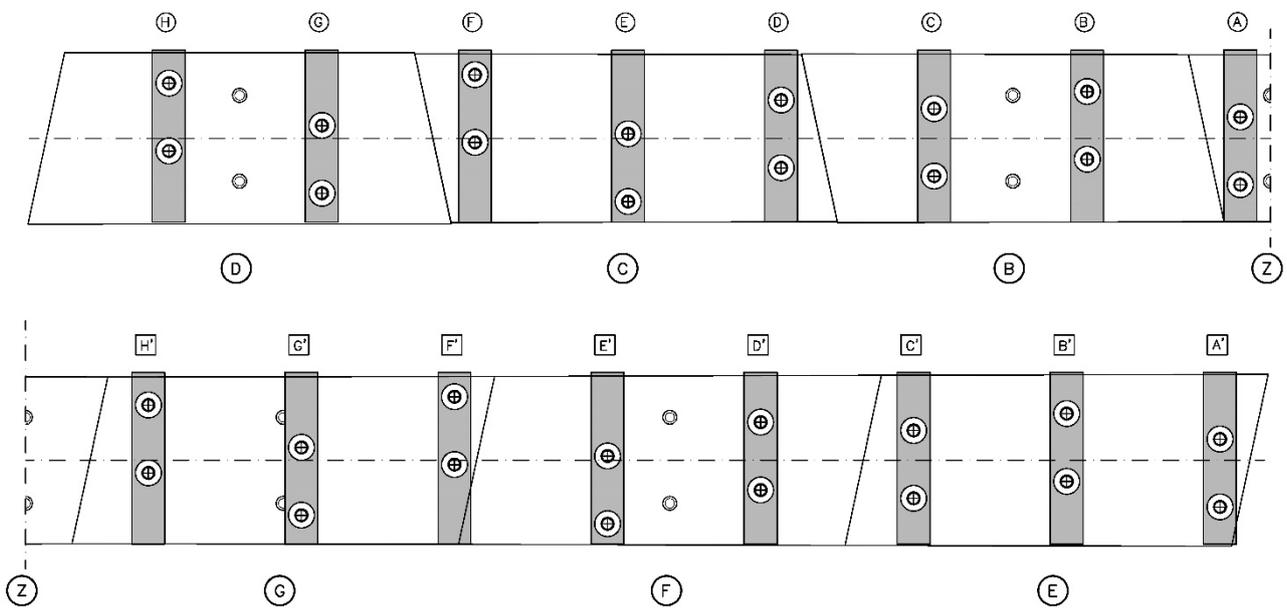


Figura 3-3. Distribuzione delle linee di carico (traverse) e dei relativi punti di carico lungo lo sviluppo dell'anello

Il sistema così progettato e dimensionato sarà in grado di riprodurre diversi scenari di carico simulanti la spinta del terreno, dando la possibilità di riprodurre diverse configurazioni di carico passando da una configurazione idrostatica (compressione uniforme sull'anello, ovvero una spinta prevalentemente membranale mostrata in Figura 3-4a) tipica delle gallerie profonde, a configurazioni di ovalizzazione dell'anello (Figura 3-4b), ovvero sotto azioni di pressoflessione tipiche di gallerie superficiali.

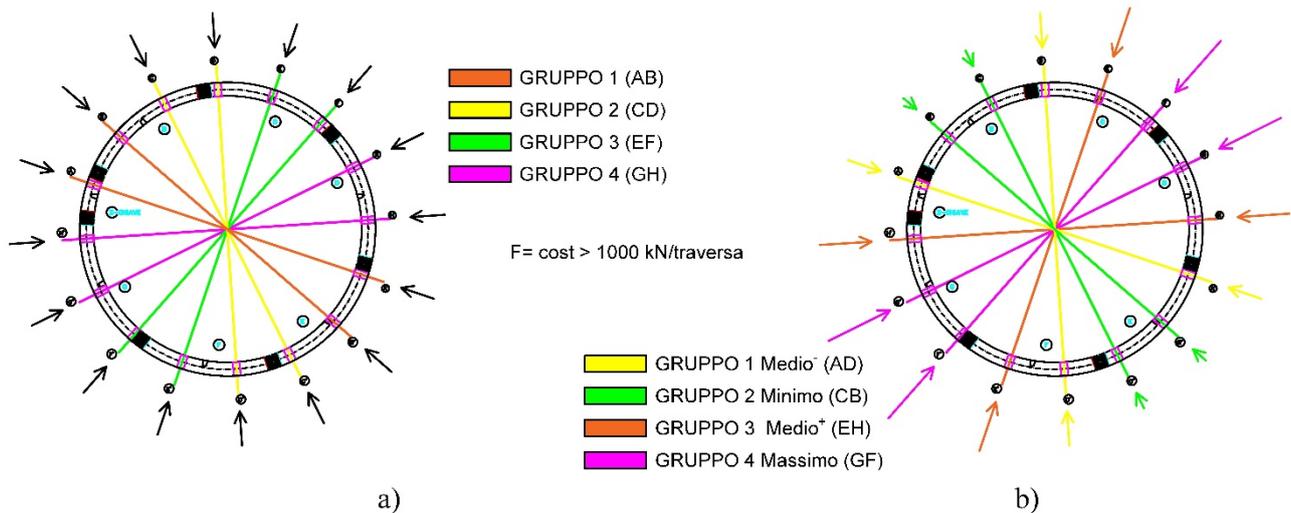


Figura 3-4. Schema scenari di carico: a) Compressione uniforme; b) Ovalizzazione

Per la realizzazione dell'anello in C.A., è stata studiata, dimensionata e successivamente adottata una soluzione di armatura ibrida, in sostituzione della tradizionale armatura in barre in acciaio B450C.

Tale soluzione di rinforzo ibrido consiste in un calcestruzzo fibrorinforzato (Fibre Reinforced Concrete – FRC) (in grande espansione da un punto di vista applicativo in queste tipologie di applicazione strutturale dove l'armatura lenta in barre di acciaio viene parzialmente o totalmente sostituita con fibre della stessa natura in dispersione nella matrice cementizia) e armatura lenta in barre di vetroresina (Glass Fiber Reinforced Polymer - GFRP). Queste ultime risultano possedere una duplice funzionalità, ovvero (I) permettono il posizionamento dei sensori capacitivi di stress pre-installati e, al contempo, (II) garantiscono l'eliminazione di qualsiasi disturbo elettromagnetico nell'intorno dei sensori ad esse fissati. Infatti, tra i principali vantaggi nell'utilizzo di armature in vetroresina, si ha la trasparenza elettromagnetica che queste ultime possiedono e che le rendono, di fatto, maggiormente idonee allo scopo del presente progetto e dell'OR4 e barra resistenza a taglio, quest'ultima proprietà utile per le fasi di installazione dei sensori capacitivi post-installati.

L'utilizzo di calcestruzzo FRC e armature in vetroresina risulta vantaggioso anche per la seconda fase della sperimentazione in cui viene sperimentata la post-installazione dei sensori di tensione per i quali si è reso necessario eseguire dei fori sui singoli conci di calcestruzzo. L'adozione di armatura in acciaio, avrebbe reso difficile l'esecuzione del foro in caso di intercettazione della barra.

Dapprima si è proceduto a definire il mix design del calcestruzzo fibrorinforzato conferendogli le giuste proprietà fisico meccaniche e di lavorabilità tali da renderlo idoneo agli standard prestazionali tipici di questo campo di applicazione. Successivamente si è passati alle armature lente in vetroresina.

La posizione delle armature, all'interno di ciascun cono, è stata ottimizzata al fine di annullare o minimizzare al massimo possibili interferenze con le successive fasi di foratura per il passaggio delle linee di carico e dell'installazione dei sensori capacitivi post-installati.

Una volta assemblate le armature, l'attività è continuata con lo studio di un sistema di fissaggio della strumentazione di monitoraggio interna all'elemento strutturale (sensori di stress pre-installati) (Figura 3-5). L'importanza di un corretto posizionamento della strumentazione durante le fasi di getto del concio risulta necessaria affinché sia possibile il monitoraggio dell'anello nelle fasi successive, sia nei riguardi della prova sperimentale oggetto del presente OR4, che in future applicazioni su progetti pilota, strutture di nuova realizzazione o esistenti già in esercizio. La strumentazione di monitoraggio interna, inoltre, è stata cablata ed installata attraverso l'utilizzo di appositi sistemi (box) progettati per rimanere in posizione durante il getto e consentire il loro ritrovamento, una volta assemblato l'anello presso il laboratorio del TERC (UniRM2).

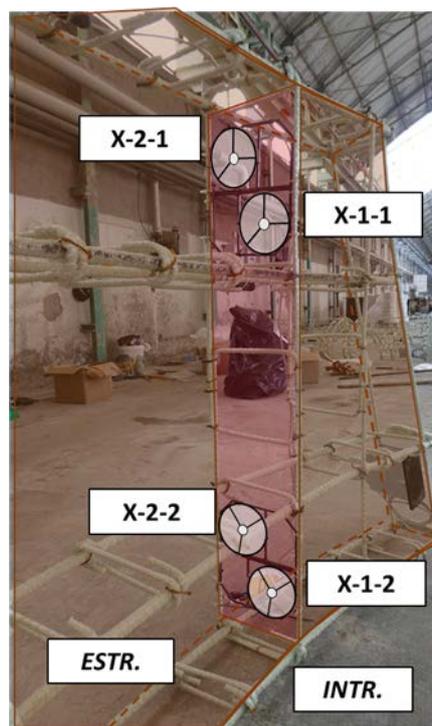


Figura 3-5. Schema posizionamento sensori di stress pre-installati

Si è passati successivamente allo studio definitivo e all'ottimizzazione della distribuzione della strumentazione interna (sensori di stress pre-installati e sensori capacitivi post-installati, questi ultimi forniti da STMicroelectronics) ed esterna da applicare lungo la superficie intradossale dell'anello oggetto di prova sperimentale. In particolar modo si è scelto di strumentare la superficie interna con trasduttori a filo [F] e trasduttori potenziometrici [P] al fine di poter registrare gli spostamenti in direzione radiale dell'anello (Figura 3-6) e confrontarli con quelli ottenuti dalla modellazione oggetto del precedente OR3, secondo le diverse configurazioni analizzate.

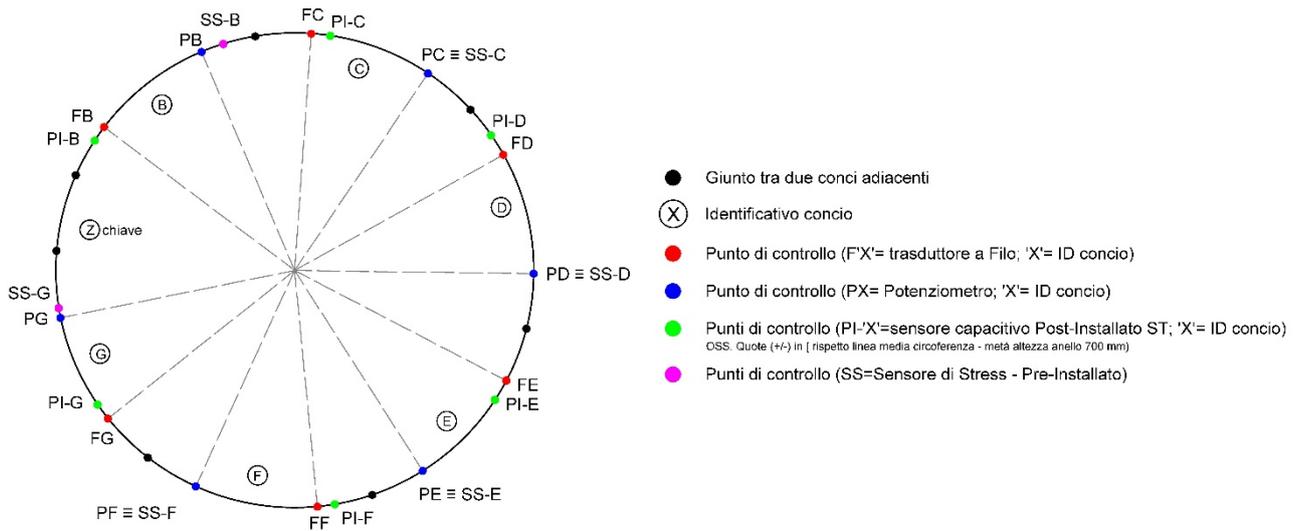


Figura 3-6. Schema strumentazione interna/esterna

Una volta stabilite e definite le specifiche di posizionamento dei sensori capacitivi tra UniRM2 e STMicroelectronics, i sensori STMicroelectronics installati sono stati 24, così posizionati (Figura 3-7):

- sensori per ogni concio;
- n. 2 sensori a 2 quote diverse, con n. 2 sensori all'intradosso e n. 2 all'estradosso.

CONCIO E		CONCIO F		CONCIO G		CONCIO B		CONCIO C		CONCIO D	
ESTRADOSSO	INTRADOSSO										
NY-18	NY-19	NY-22	NY-23	NY-26	NY-27	NX-12	NY-12	NX-14	NY-14	NX-16	NY-16
NY-20	NY-21	NY-24	NY-25	NY-28	NY-29	NX-13	NY-13	NX-15	NY-15	NX-17	NY-17

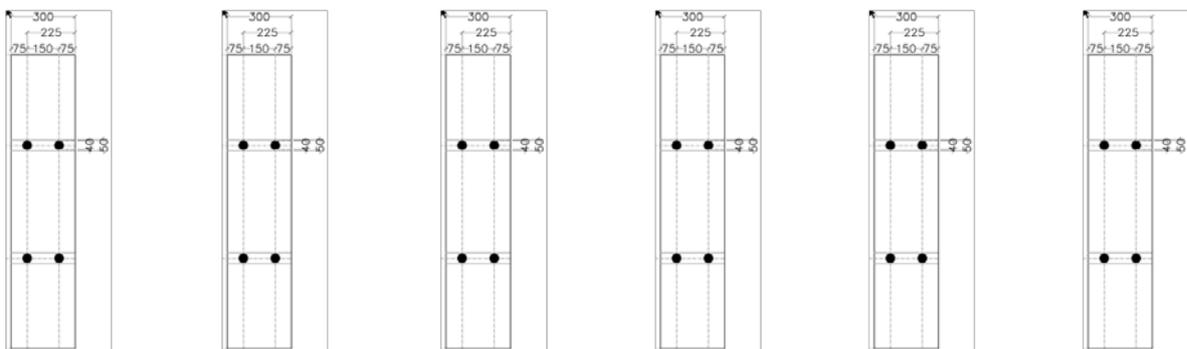


Figura 3-7. Schema di installazione dei sensori per l'anello di galleria presso UNiRM2-Tor Vergata.

Valutate le distanze fra i sensori, sia all'interno di uno stesso concio, sia fra concio e concio, si è deciso di utilizzare una cassetta con una board nodo stand-alone (vedasi documentazione OR1 per la descrizione dettagliata di questa scheda) per monitorare i 4 sensori di ogni concio.

Si sono poi valutate le distanze lungo l’anello fra le diverse sezioni in cui sono stati installati i sensori per valutare la lunghezza dei cavi di collegamento fra cassetta e cassetta, per la definizione della rete di cablaggi per il bus CAN (su cavo ethernet) che ha connesso tutte le schede. Vista la lunghezza totale dei cablaggi e dei nodi connessi alla rete CAN si è deciso di dotare il sistema, per sicurezza, di una power-supply USB di sostegno.

Il sistema di monitoraggio per l’anello è risultato, quindi, essere così costituito:

- n. 6 board nodo stand-alone (e relativa scatola di protezione);
- n. 1 board nodo/bridge;
- n. 1 Power-supply USB di sostegno

Prima di fornire il sistema a UniRM2 per l’installazione, sono state eseguiti tutti i test di routine nei laboratori di STMicroelectronics al fine di provare il sistema nella sua complessità, compresi collegamenti fra nodo e nodo, la comunicazione col bridge e fra il bridge e l’host PC su cui girava il software di acquisizione dati.

Una volta che il sistema ha superato tutti i test condotti da STMicroelectronics, il sistema (scatole con board e cablaggi) è stato inviato a UniRM2 per l’installazione (Figura 3-8).



Figura 3-8. Sistema di monitoraggio dell’anello presso UNiRM2-Tor Vergata in preparazione presso i laboratori STMicroelectronics.

Una volta realizzato quanto sopra descritto, l’attività si è spostata sulla messa in opera di quanto progettato al fine della realizzazione della prova presso i laboratori di UniRM2.

Le lavorazioni sono state condotte andando a risolvere possibili problematiche, non riscontrate durante la fase progettuale ma in campo, durante le fasi di assemblaggio delle varie componenti fisiche al fine di ottimizzare il sistema e, al contempo, ridurre le interferenze con gli spazi circostanti la prova.

Le lavorazioni, così come mostrate in Figura 3-9, sono state le seguenti:

- a) Assemblaggio delle armature;
- b) Installazione sensori di stress pre-installati;
- c) Getto dei conci;
- d) Tracciamento e livellamento dell'ingombro dell'anello sul piano di calpestio del laboratorio;
- e) Posizionamento dei conci (6+1) a formare l'anello chiuso;
- f) Tracciamento e realizzazione di n.32 fori dal diametro di 100 mm e n.12 fori dal diametro di 60 mm per inserimento linee di carico ed installazione sensori capacitivi post-installati;
- g) Installazione sensori capacitivi post-installati;
- h) Passaggio delle barre dywidag tra fori allineati e diametralmente opposti, secondo lo schema di montaggio progettato e posizionamento traverse UPN in adiacenza alla superficie estradossale (esterna) dell'anello;
- i) Installazione di n.16+16 martinetti idraulici cavi + piastre di contrasto su n. 8 traversi in acciaio;
- j) Installazione dei gruppi idraulici;
- k) Installazione della strumentazione esterna per l'acquisizione degli spostamenti radiali dell'anello durante le prove di carico;
- l) Installazione dei terminali di gestione ed acquisizione dati sia in situ che da remoto attraverso una rete cablata.



a)



b)



c)



d)



e)



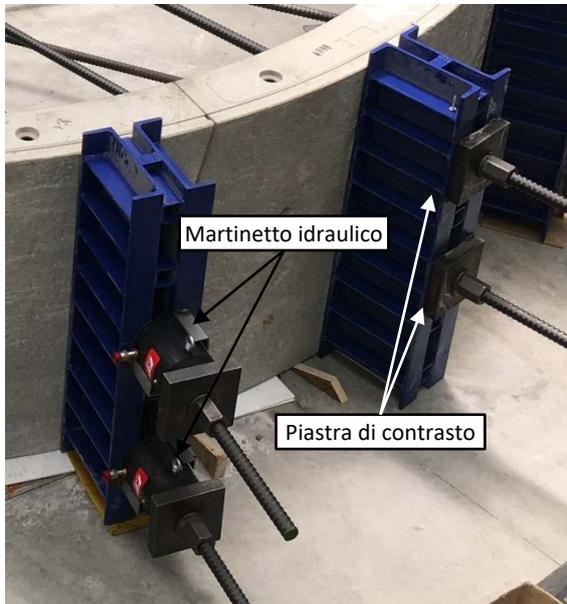
f)



g)



h)



i)



j)



k)



l)

Figura 3-9. Fasi realizzative prova anello di galleria alla scala reale

In Figura 3-10 viene illustrato il setup finale della prova, secondo quanto dichiarato all'interno del Disciplinare Tecnico di Progetto e la relativa targa apposta sul dimostratore per tutta la durata del progetto.



Figura 3-10. Setup finale di prova

3.2 Risultati dell'attività (Partners UniRM2, STMicroelectronics)

Per quanto concerne l'acquisizione dei dati prodotti dai sensori capacitivi post-installati forniti da STMicroelectronics, come mostrato nello schema di Figura 3-11, è stata utilizzata anche una postazione PC (fornita da UniRM2, Figura 3-91) al fine di utilizzare il software applicativo dotato di interfaccia grafica (GUI, fornito da STMicroelectronics e descritto nella documentazione dell'OR1, Figura 3-12 per le acquisizioni dei dati dei sensori durante le prove.

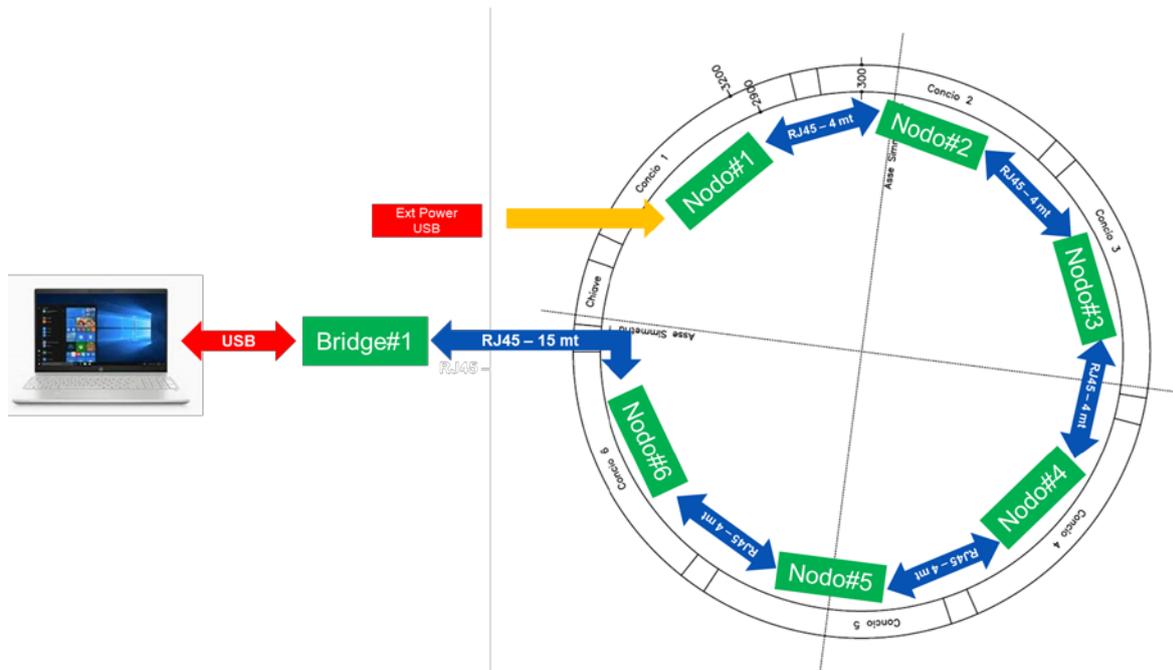


Figura 3-11. Schema del sistema di monitoraggio dell'anello presso UNiRM2-Tor Vergata.

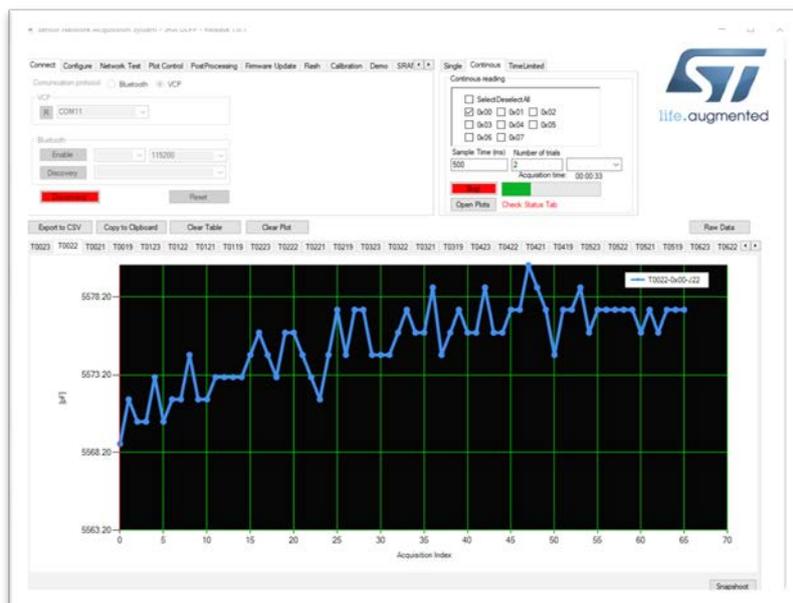


Figura 3-12. Interfaccia grafica del software di acquisizione del sistema di monitoraggio dell'anello.

Il monitoraggio si è svolto nel periodo che va da metà giugno 2021 a metà luglio 2021. Causa restrizioni viaggi dovuti all'emergenza COVID-19, sono state svolte delle sessioni di meeting da remoto fra STMicroelectronics e UniRM2 al fine di eseguire i dovuti test preliminari del sistema prima dell'avvio delle prove. Durante tutto il periodo delle prove, inoltre, STMicroelectronics ed UniRM2 si sono coordinati con delle sessioni di meeting da remoto, in particolare nei momenti di transizione fra le diverse sessioni di prove.

I sensori capacitivi forniti da STMicroelectronics sono stati installati sull'anello, una volta assemblato presso il Laboratorio dell'unità UniRM2. La loro installazione, appunto una "post-installazione", ha permesso di ricreare una situazione reale in cui una galleria esistente (o parte di essa) viene strumentata affinché possa essere monitorata nel tempo. In questo OR-4, sono quindi descritte le attività che hanno riguardato le fasi di post-installazione di tali sensori mentre i risultati verranno presentati nell'OR-6 in cui sono riportati i Dimostratori. Infatti, essendo l'anello di galleria (realizzato dall'unità UNiRM2) una porzione reale della stessa, è stato possibile utilizzarlo come Dimostratore per raggiungere l'Obiettivo Realizzativo 6.

I dati RAW acquisiti sono poi stati pre-elaborati da STMicroelectronics al fine di ricavare le informazioni sulle variazioni di capacità dei sensori. Queste informazioni, organizzate in file CSV (contenenti, per ogni sensore, timestamp e valore della capacità del sensore), sono stati poi condivise con UniRM2 al fine di permettere loro di eseguire le dovute analisi e conclusioni sulle prove effettuate.

Di seguito vengono illustrate le sequenze di carico applicate durante le 2 prove sperimentali condotte sull'anello di galleria secondo le modalità precedentemente descritte e richiamate all'interno del Capitolato Tecnico – Allegato 3 al paragrafo 4.2. Tale sequenza risulta necessaria alla successiva interpretazione dei dati forniti dalla strumentazione di misura adottata illustrata al precedente paragrafo § 3.1.

Per tutte le prove eseguite, i dati sono stati registrati in continuo ed organizzati in file XLSX (contenenti i valori di carico di ciascun gruppo di carico e degli spostamenti registrati dai potenziometri e dai trasduttori a filo posti lungo la linea media della superficie di intradosso dell'anello).

3.2.1 Prova I: Configurazione idrostatica (spinta membranale)

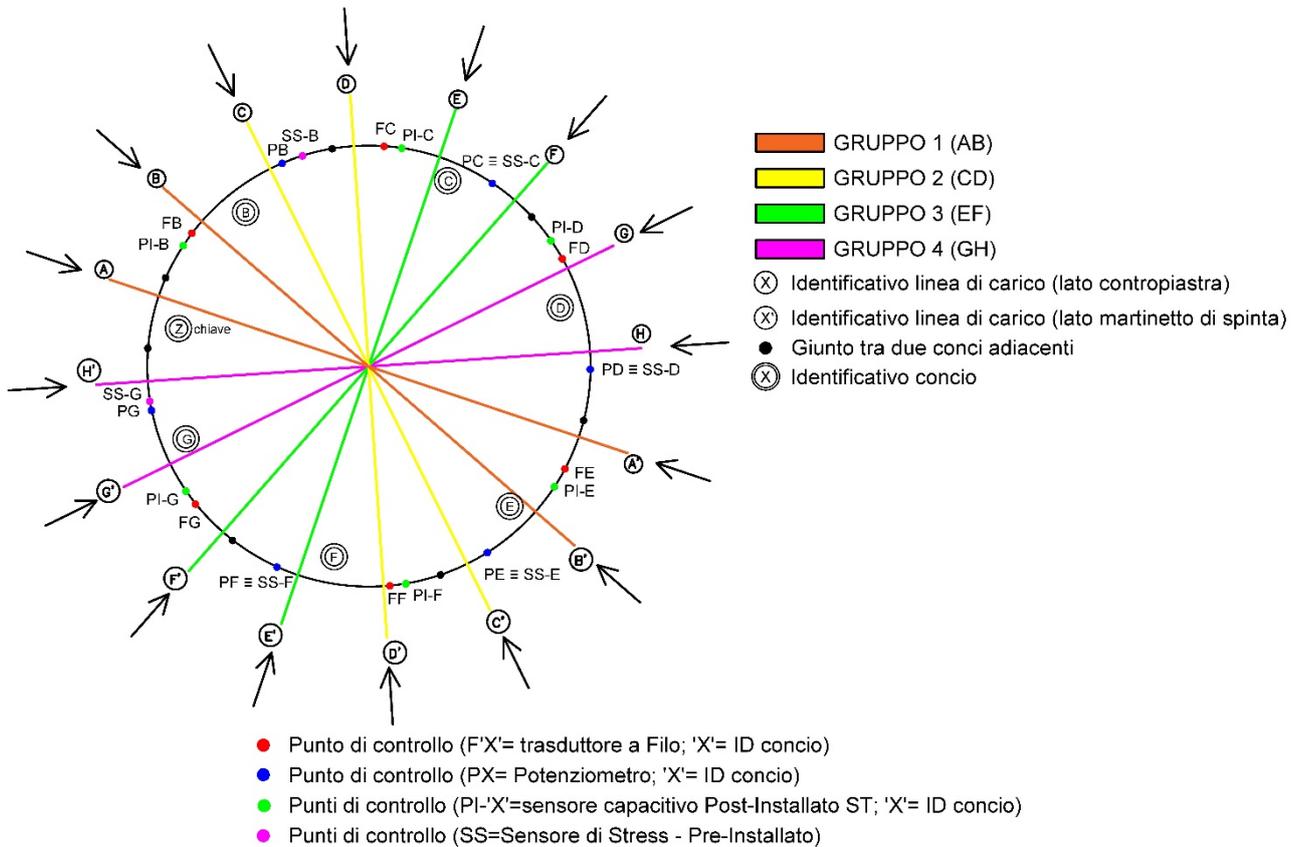


Figura 3-13. Schema prova di carico idrostatica/membranale

Il campionamento dei dati è avvenuto con frequenza pari a 2 dati/minuto per un periodo di 452 ore (circa 19 giorni). I dati così campionati comprendono una prima fase di carico dell’anello tale da portarlo dalla configurazione a riposo (0 kN) ad una configurazione di compressione membranale secondo il carico prestabilito dalla modellazione (1000 kN/traversa), quest’ultima illustrata nell’OR3.

Di seguito vengono riportati i principali step che hanno caratterizzato la prova:

- Data: 25/06/2021 → Inizio prova configurazione idrostatica STEP-1: (0 ÷ 200 kN/traversa)
 - Inizio carico ore: 18:50
 - Fine carico 200 kN/traversa ore: 19:26
 - Mantenimento del carico per circa 3 giorni

Nota: durante questa fase, il concio “G”, in prossimità del concio “Z-chiave” (ultimo installato per la completa chiusura dell’anello di prova), ha subito un piccolo spostamento di rototraslazione verso il centro dell’anello. Questo spostamento è dovuto al non perfetto contatto delle superfici circolari tra i conci G/Z-chiave (decimi di millimetro) riscontrato all’inizio della prova. Una volta ristabilito il contatto, all’aumentare del carico, la prova si è stabilizzata.

- Data: 28/06/2021 → STEP-2: (200 ÷ 1000 kN/traversa)

- Inizio ricarica, a partire da 200kN/traversa, ore 11:08;
- Fine carico 1000 kN/traversa ore 12:22.

In Tabella 3-1 sono riassunti gli step di carico adottati

Tabella 3-1. Step di carico

STEP	Gruppo →	1	2	3	4
0	Carico [kN/traversa]	0	0	0	0
1		200	200	200	200
2		1000	1000	1000	1000

- Data: 05/07/2021 → STEP-4: (5 giorni dopo) Scarico anello secondo limite superiore STEP-1 (200 kN/traversa)
 - Inizio scarico ore 10:40;
 - Fine manovra di scarico ore 10:54.
- Data: 14/07/2021 → STEP-5: (9 giorni dopo) Scarico completo per passaggio a configurazione per pressoflessione/ovalizzazione anello
 - Inizio scarico ore 17:30;
 - Fine prova configurazione membranale ore 17:48.

In Figura 3-14 è riportata la time history relativa alla prova di carico eseguita presso il laboratorio dell'unità UniRM2, relativamente alla prima configurazione idrostatica definita al §4.2 del Disciplinare Tecnico di Progetto.

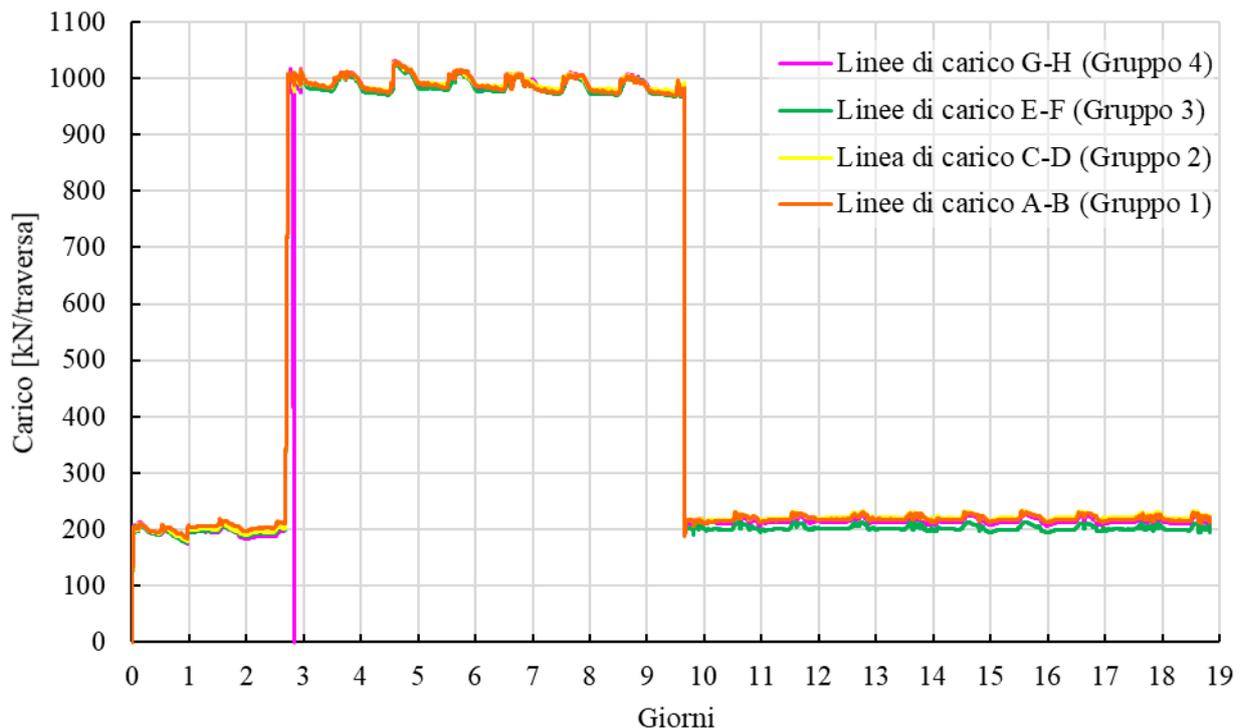


Figura 3-14. Time History configurazione idrostatica/spinta membranale

Durante il carico dell’anello, il concio G a ridosso del concio di chiave Z (ultimo elemento inserito a chiusura dell’anello) ha subito una leggera rototraslazione in seguito ad un gap di alcuni decimi di millimetro presente tra le superfici circolari di contatto tra i suddetti conci. Ciò ha portato l’anello ad assumere una nuova configurazione di equilibrio all’aumentare del carico applicato. Una volta ristabilito il perfetto contatto tra le superfici di conci contigui, la configurazione deformata è rimasta pressoché invariata fino alla fine della prova.

Il modesto ma non trascurabile gap tra l’ultimo concio installato (concio Z di chiave) e il concio G è dovuto al fatto che l’anello, geometricamente parlando, risulta avere una superficie laterale sviluppata secondo un tronco di cono e non cilindrica. Inoltre le superfici di contatto tra conci contigui sono oblique e non parallele alla generatrice della galleria. Questo aspetto, critico per una prova di laboratorio su un singolo anello di galleria, risulta del tutto trascurabile per le installazioni al vero in quanto, in quest’ultimo caso, i singoli anelli e i rispettivi conci che lo costituiscono sono bloccati solidalmente con connessioni puntuali.

I dati RAW acquisiti sono poi stati pre-elaborati da UniRM2 al fine di ricavare le informazioni sulle variazioni di spostamento subite dall’anello durante la prova. Queste informazioni sono state organizzate in file XLSX (contenenti, per ogni strumento installato, timestamp e valore dello spostamento e del carico associato).

In Tabella 3-2 sono riportati i massimi valori di spostamento registrati dalla strumentazione adottata e descritta al paragrafo precedente. Inoltre, in Figura 3-15 viene riportata una deformazione qualitativa assunta dall’anello al massimo carico idrostatico applicato, pari a 1000 kN/traversa. Dati gli esigui spostamenti indotti dal carico sui singoli conci dell’anello, i valori degli stessi sono stati amplificati di un fattore 100 per meglio comprendere la deformazione subita dall’anello.

Tabella 3-2. Valori di spostamento registrati alla massima spinta membranale

GRUPPO 1 (A-B)	FILO B		FILO E					
	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello				
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]				
0	0	0	0	0				
1000	-0.220	0.510	-0.047	0.450				
GRUPPO 2 (C-D)	POT B		FILO C		POT E		FILO F	
	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.210	0.510	0.545	0.520	-0.012	0.470	0.466	0.510
GRUPPO 3 (E-F)	POT C		POT F					
	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello				
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]				
0	0	0	0	0				
1000	0.660	0.500	1.260	0.510				
GRUPPO 4 (G-H)	FILO D		POT D		FILO G		POT G	
	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello	Sperimentale	Modello
[kN]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]
0	0	0	0	0	0	0	0	0
1000	0.610	0.490	0.150	0.480	1.113	0.510	0.339	0.490

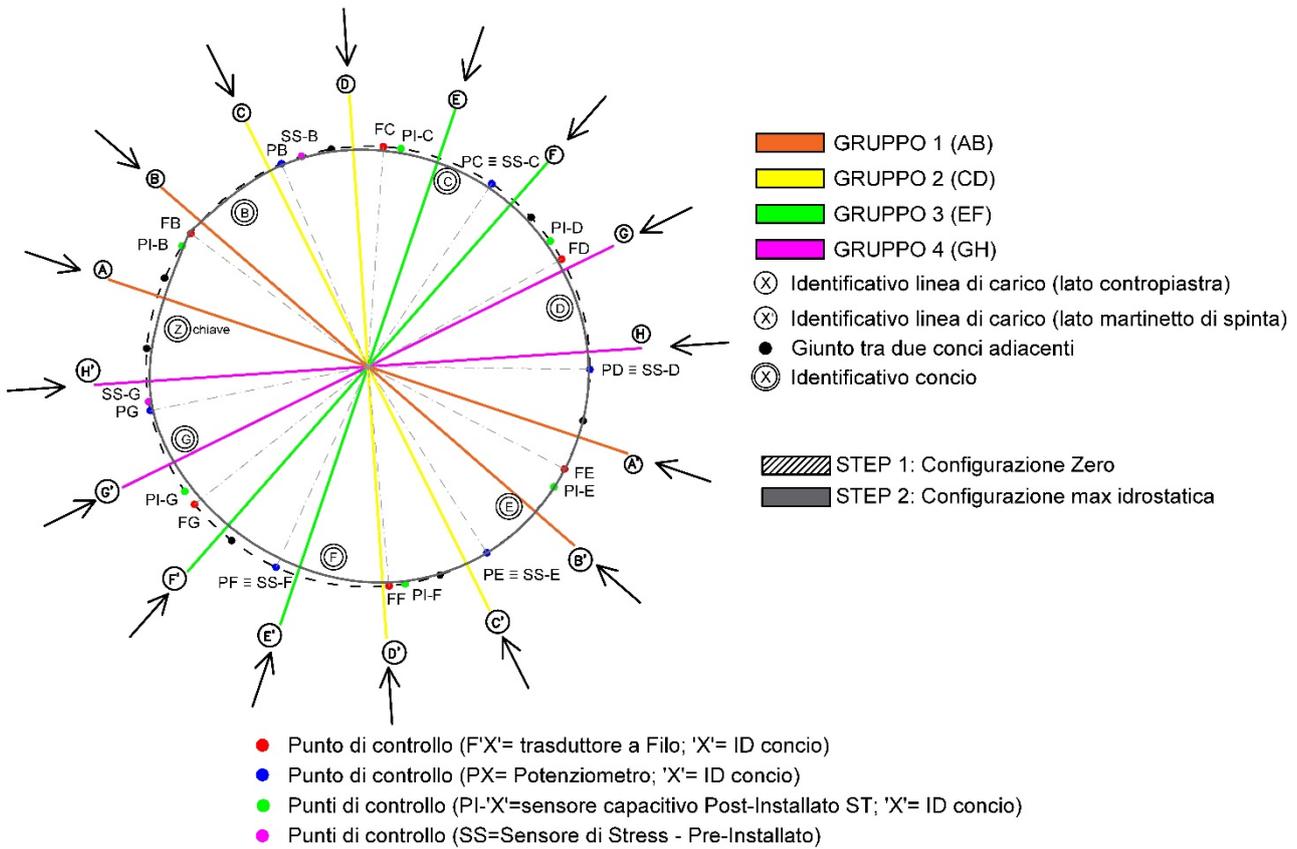


Figura 3-15. Configurazione deformata dell’anello alla massima spinta membranale

Analogamente a quanto fatto per i trasduttori di spostamento, i dati RAW acquisiti dai sensori di stress sono poi stati pre-elaborati da UniRM2 al fine di ricavare le informazioni sulle variazioni di tensione subite dall’anello durante la prova nelle prefissate posizioni in cui sono stati installati tali sensori. Queste informazioni sono state organizzate in file XLSX (contenenti, per ogni strumento installato, timestamp, valore dello stress e temperatura). In Figura 3-16, a titolo di esempio, viene riportato l’andamento della tensione, all’aumentare del carico applicato, per uno dei sensori di stress pre-installato nel concio C. In particolar modo, l’andamento tensionale è riferito alla manovra di carico eseguita il giorno 28 giugno 2021, secondo gli step di carico precedentemente descritti. La nomenclatura che identifica il sensore di stress e la sua posizione segue lo schema precedentemente illustrato al §3.1, Figura 3-5.

In Tabella 3-3 vengono riportati i principali confronti tra i risultati previsionali ottenuti dalla modellazione illustrata nell’OR-3 (relativamente al presente caso studio) e quelli ottenuti sperimentalmente dall’elaborazione dati dei sensori pre-installati. I valori analitici sono stati ricavati mediando i valori degli stress ottenuti su n.3 differenti layers (intradosso, mediano, estradosso) al fine di ottenere, in via semplificata, un valore di stress in corrispondenza della posizione di installazione dei sensori.

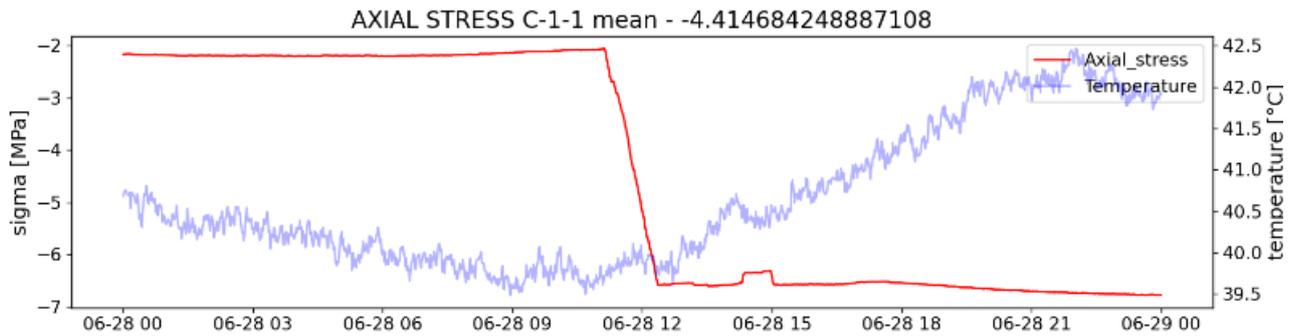


Figura 3-16. Letture sensori di Stress pre-installati: Concio C

Tabella 3-3. Confronto risultati di stress modellazione/sperimentale

Lato intradosso					Lato estradosso				
Modello		Sperimentale		Errore	Modello		Sperimentale		Errore
Sensore	Stress	Sensore	Stress		Sensore	Stress	Sensore	Stress	
ID	MPa	ID	MPa	[%]	ID	MPa	ID	MPa	[%]
SS-B-1	-7.08	B-1-1	n.d.	n.d	SS-B-1	-4.65	B-2-1	-5.53	-16
SS-B-2	-7.06	B-1-2	-5.50	28	SS-B-2	-4.67	B-2-2	-5.19	-10
SS-C-1	-6.49	C-1-1	-6.57	-1	SS-C-1	-5.26	C-2-1	-6.52	-19
SS-C-2	-6.49	C-1-2	-6.66	-3	SS-C-2	-5.26	C-2-2	n.d	n.d.
SS-D-1	-6.18	D-1-1	n.d.	n.d	SS-D-1	-5.57	D-2-1	-6.08	-8
SS-D-2	-6.15	D-1-2	n.d.	n.d	SS-D-2	-5.59	D-2-2	-4.14	35
SS-E-1	-6.21	E-1-1	-6.77	-8	SS-E-1	-5.56	E-2-1	-3.9	43
SS-E-2	-6.21	E-1-2	-6.87	-10	SS-E-2	-5.55	E-2-2	-7.03	-21
SS-F-1	-6.40	F-1-1	-7.40	-14	SS-F-1	-5.34	F-2-1	n.d	n.d.
SS-F-2	-6.49	F-1-2	-7.07	-8	SS-F-2	-5.26	F-2-2	-5.95	-12
SS-G-1	-5.91	G-1-1	-6.28	-6	SS-G-1	-5.87	G-2-1	-5.07	16
SS-G-2	-5.90	G-1-2	-6.26	-6	SS-G-2	-5.83	G-2-2	-4.47	30

Nota: n.d.=non disponibile; Valore di stress negativo= compressione

Si può notare come al massimo carico imposto, pari a 1000 kN/traversa, i sensori di stress restituiscono un valore di tensione di compressione medio di circa 6 MPa lungo l’anello della galleria.

3.2.2 Prova II: Configurazione di ovalizzazione (pressoflessione)

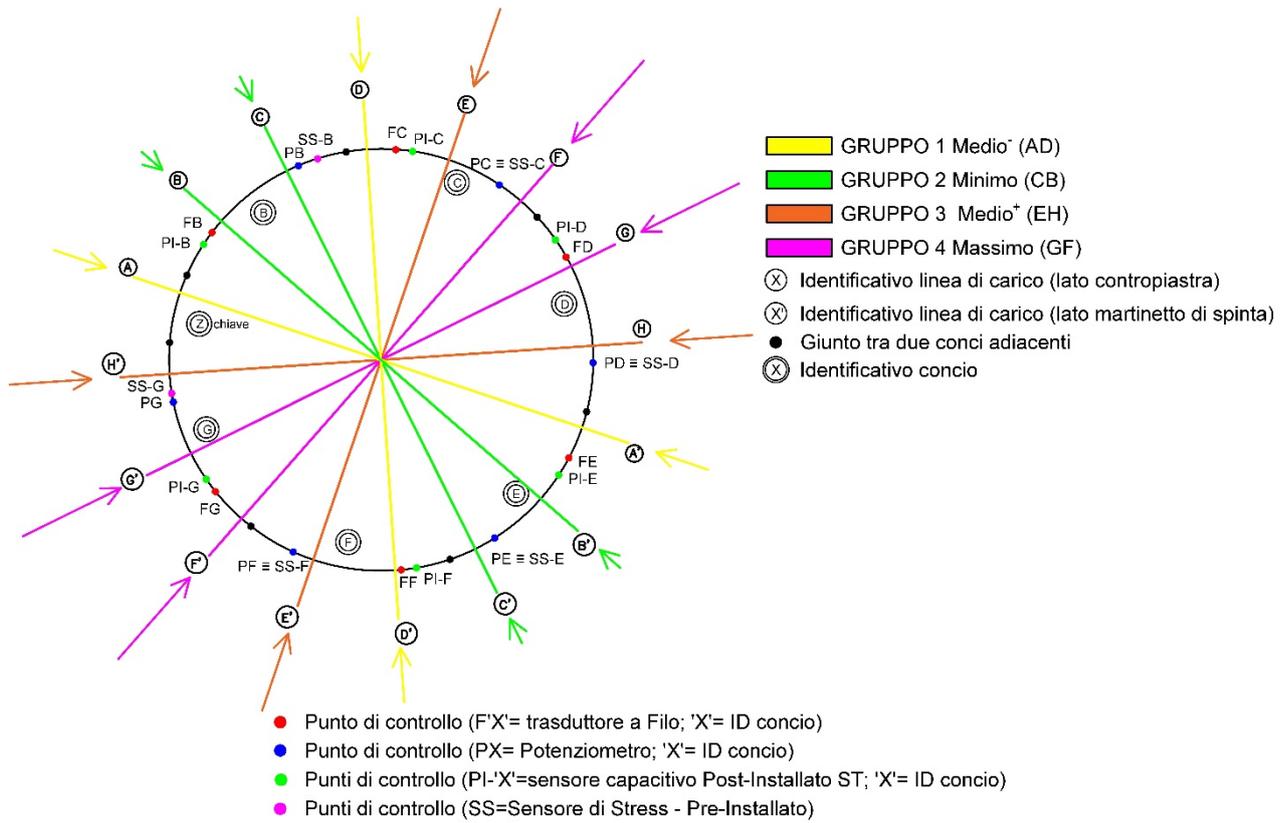


Figura 3-17. Schema prova di carico ovalizzazione/pressoflessione

Il campionamento dei dati è avvenuto con frequenza pari a 15 dati/minuto per un periodo di 8 ore. I dati così campionati comprendono una prima fase di carico dell'anello tale da portarlo dalla configurazione a riposo (200 kN/traversa) ad una configurazione ovalizzata, secondo diversi livelli di ovalizzazione via via crescenti secondo il carico prestabilito dalla modellazione, quest'ultima illustrata nell'OR3.

Il processo di carico ha previsto una prima fase in cui il carico è stato incrementato idrostaticamente fino a raggiungere quello della prima prova sperimentale pari a 1000 kN/traversa. Successivamente, si è proceduto ad imporre l'ovalizzazione, via via crescente, variando in aumento e in diminuzione il carico idrostatico lungo le differenti linee di carico, passando gradualmente dal gruppo di massima spinta a quello di minima spinta secondo linee di carico intermedie, così come illustrato in Figura 3-17.

Di seguito vengono riportati i principali step che hanno caratterizzato la prova:

- Data: 14/07/2021 →STEP-0: Cambio configurazione
 - Dalle ore 17:48 alle ore 19:11 operazioni di cambio configurazione da idrostatica ad ovalizzata secondo lo schema riportato in Tabella 3-4

Tabella 3-4. Schema cambio configurazione

Passaggio gruppi IDROSTATICO → OVALIZZAZIONE	
GRUPPO 1 (AB) →	GRUPPO 1 (AD) - Carico Intermedio ⁻
GRUPPO 2 (CD) →	GRUPPO 2 (CB) - Carico Minimo
GRUPPO 3 (EF) →	GRUPPO 3 (EH) - Carico Intermedio ⁺
GRUPPO 4 (GH) →	GRUPPO 4 (GF) - Carico Massimo

- Ore 19:11 fine ricarico sistema allo zero equivalente (200 kN/traversa) per iniziare l'ovalizzazione
- Dalle ore 19:23 inizio acquisizione: 2 dati/minuto
- Data: 15/07/2021 → Inizio ovalizzazione
 - STEP-1: Idrostatica (200÷1000 kN/traversa)
 - I. Inizio carico ore 11:38
 - II. Fine carico (1000 kN/traversa) ore 12:15 (tempo manovra circa 30 minuti)
 - STEP-2: Prima ovalizzazione secondo la tabella che segue. I livelli di carico nella tabella sono stati mantenuti per 2 ore dalle ore 14:20 alle ore 16:30

Tabella 3-5. Percentuale di ovalizzazione

Step	Gruppo	kN/traversa	% di 1000 kN/traversa
Idrostatico	4 (MAX)	1000	+0.0
	3 (Intermedio +)	1000	+0.0
	1 (Intermedio -)	1000	+0.0
	2 (MIN)	1000	+0.0
Ovalizzato 2.5%	4 (MAX)	1025	+2.5
	3 (Intermedio +)	1012.5	+1.25
	1 (Intermedio -)	987.5	-1.25
	2 (MIN)	975	-2.5
Ovalizzato 5%	4 (MAX)	1050	+5.0
	3 (Intermedio +)	1025	+2.5
	1 (Intermedio -)	975	-2.5
	2 (MIN)	950	-5.0
Ovalizzato 7.5%	4 (MAX)	1075	+7.5
	3 (Intermedio +)	1037.5	+3.75
	1 (Intermedio -)	962.5	-3.75
	2 (MIN)	925	-7.5

- STEP-3: Seconda ovalizzazione mantenuta per 1 ora e 15 minuti dalle ore 16:40 alle ore 17:54

In Figura 3-18. Time History configurazione ovalizzata è riportata la time history relativa alla prova di carico eseguita presso il laboratorio dell'unità UniRM2, relativamente alla seconda configurazione, ovvero l'ovalizzazione dell'anello definita al §4.2 del Disciplinare Tecnico di Progetto.

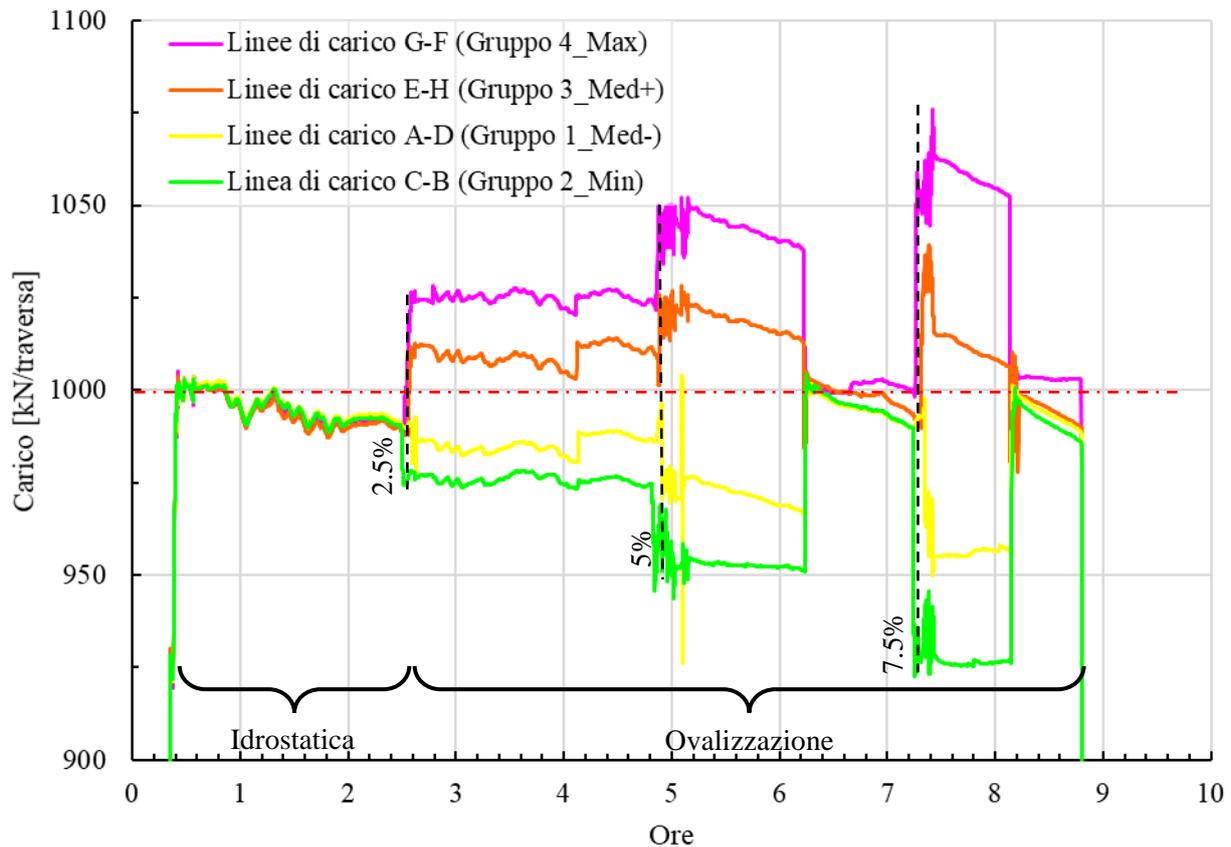


Figura 3-18. Time History configurazione ovalizzata

Analogamente a quanto svolto per la prima prova, i dati RAW acquisiti sono poi stati pre-elaborati da UniRM2 al fine di ricavare le informazioni sulle variazioni di spostamento subite dall'anello durante la prova. Queste informazioni sono state organizzate in file XLSX (contenenti, per ogni strumento installato, timestamp e valore dello spostamento e del carico associato). In Figura 3-19, a titolo di esempio, viene riportato l'andamento della tensione, all'aumentare della percentuale di ovalizzazione dell'anello, per due dei sensori di stress pre-installati. Per entrambi i sensori di stress è stata scelta la medesima posizione all'interno del concio, ovvero quella in prossimità della superficie di intradosso dell'anello (superficie interna). I sensori in questione sono, rispettivamente, il sensore di stress definito SS-C (ovvero C-1-2) per il concio C in prossimità del Gruppo 4, ovvero della massima linea di carico "F" e il sensore SS-B (ovvero B-1-2) per il concio B in prossimità del Gruppo 2, ovvero della minima linea di carico "B". Come ci si aspettava, all'aumentare della percentuale di ovalizzazione a partire dalla condizione idrostatica (1000 kN/traversa), per le posizioni dei sensori scelte si ha:

- Una diminuzione dello stress in prossimità del sensore SS-C/C-1-2 (massima compressione lato estradosso → scarico con trend verso la trazione lato intradosso in cui si trova il sensore);
- Un aumento dello stress in prossimità del sensore SS-B/B-1-2 (minima compressione lato estradosso con trend verso la trazione → aumento della compressione lato intradosso in cui si trova il sensore).

Quanto appena descritto può essere intuito ed apprezzato osservando le deformate qualitative mostrate in Figura 3-20.

L'andamento tensionale è riferito alla manovra di carico eseguita il giorno 15 luglio 2021, secondo gli step di carico ovalizzanti precedentemente descritti. La nomenclatura che identifica il sensore di stress e la sua posizione segue lo schema precedentemente illustrato al §3.1, Figura 3-5.

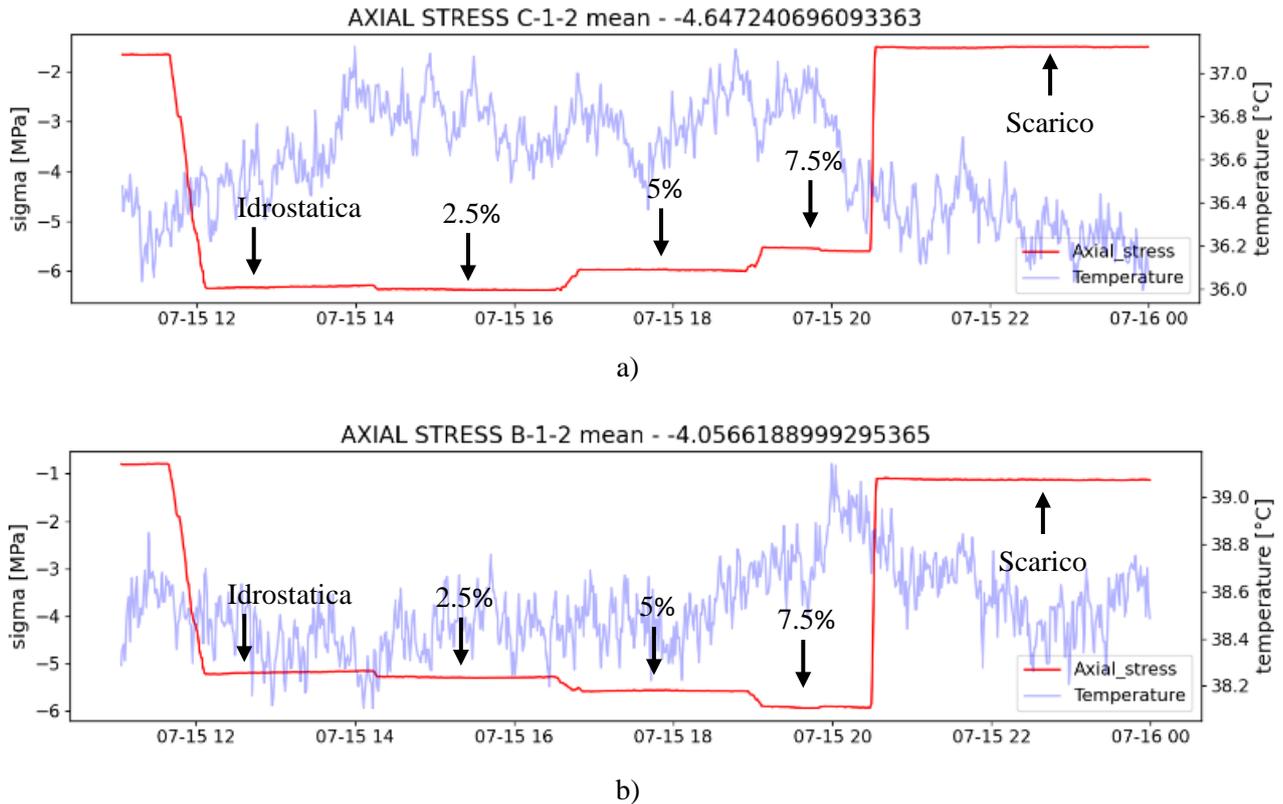


Figura 3-19. Letture sensori di stress pre-installati: a) Sensore (zona intradosso) concio C in prossimità della massima spinta ovalizzante, Gruppo 4 – Linea di carico “F”; b) Sensore (zona intradosso) concio B in prossimità della minima spinta ovalizzante, Gruppo 2- Lina di carico “C”.

In Figura 3-20 vengono riportate le deformate qualitative assunte dall’anello al variare del carico ovalizzante in percentuale rispetto al massimo carico idrostatico applicato, quest’ultimo pari a 1000 kN/traversa. Anche qui, dati gli esigui spostamenti indotti dal carico sui singoli conci dell’anello, i valori degli stessi sono stati amplificati di un fattore 100 per meglio comprendere la deformazione subita dall’anello.

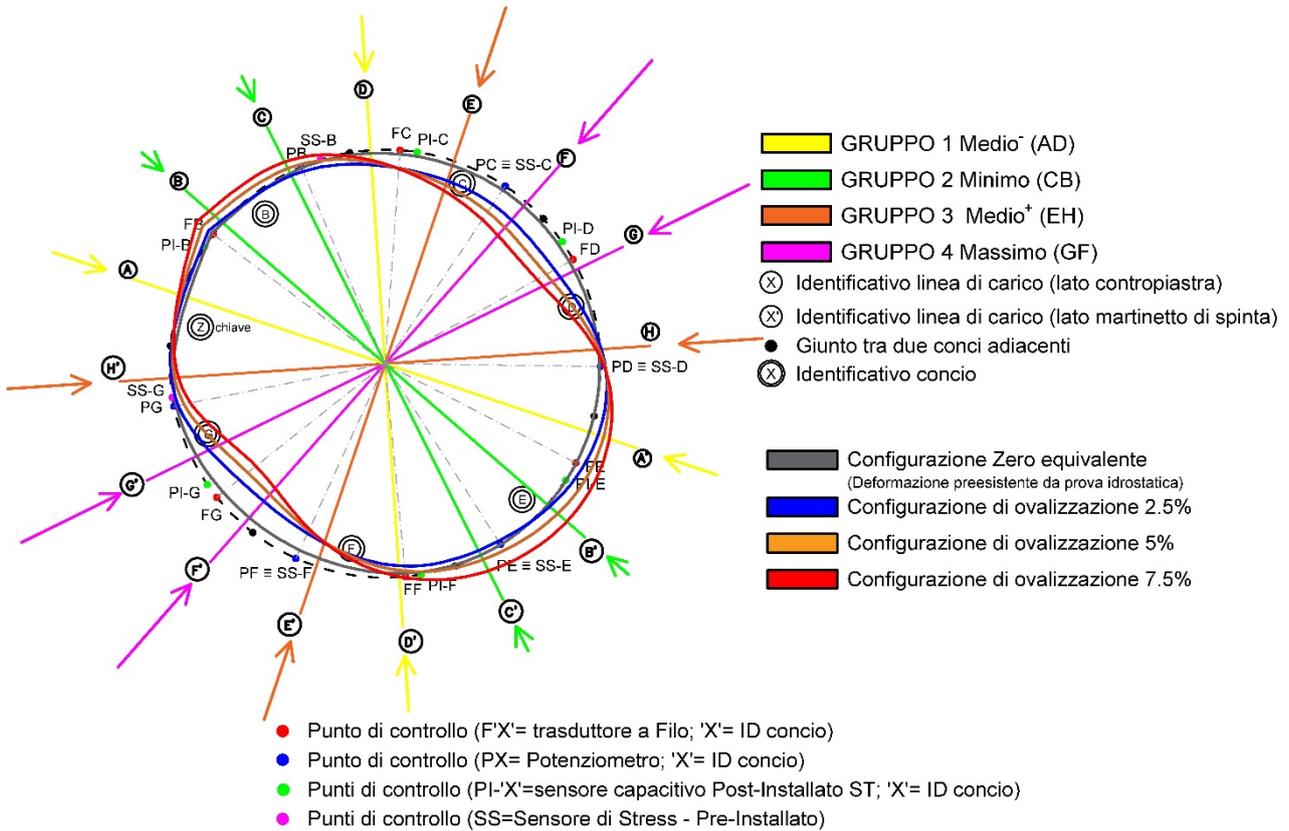


Figura 3-20. Configurazioni deformate dell'anello a diverse percentuali di ovalizzazione

Analogamente a quanto fatto per gli spostamenti registrati dai potenziometri e dai trasduttori, i dati RAW acquisiti dai sensori di stress sono poi stati pre-elaborati da UniRM2 al fine di ricavare le informazioni sulle variazioni di tensione subite dall'anello durante la prova nelle prefissate posizioni in cui sono stati installati tali sensori. Queste informazioni sono state organizzate in file XLSX (contenenti, per ogni strumento installato, timestamp, valore dello stress e temperatura).

In Tabella 3-6 vengono riportati i principali confronti tra i risultati previsionali ottenuti dalla modellazione illustrata nell'OR-3 (relativamente al presente caso studio) e quelli ottenuti sperimentalmente dall'elaborazione dati dei sensori pre-installati. I valori analitici sono stati ricavati mediando i valori degli stress ottenuti su n.3 differenti layers (intradosso, mediano, estradosso) al fine di ottenere, in via semplificata, un valore di stress in corrispondenza della posizione di installazione dei sensori.

Tabella 3-6. Confronto risultati di stress modellazione/sperimentale per le diverse percentuali di ovalizzazione

Condizione di carico	Lato intradosso				
	Modello		Sperimentale		Errore
	Sensore	Stress	Sensore	Stress	
	ID	MPa	ID	MPa	[%]
Idrostatica	SS-B-2	-7.06	B-1-2	-5.50	28
	SS-C-2	-6.49	C-1-2	-6.31	3
2.5% Ovalizzazione	SS-B-2	-8.32	B-1-2	-5.56	50
	SS-C-2	-5.11	C-1-2	-6.00	-15
5.0% Ovalizzazione	SS-B-2	-9.57	B-1-2	-5.66	69
	SS-C-2	-3.78	C-1-2	-5.92	-36
7.5% Ovalizzazione	SS-B-2	-10.82	B-1-2	-5.90	83
	SS-C-2	-3.03	C-1-2	-5.60	-46

Crescente



Nota: Valore di stress negativo= compressione

In Tabella 3-6 si può osservare come, al crescere della percentuale di ovalizzazione impressa sull'anello, l'errore che si ha tra i valori calcolati dal modello presentato nell'OR3 e quelli sperimentali ottenuti dai sensori tende ad aumentare. Ciò è dovuto alle ipotesi semplificative adottate nel modello predittivo agli elementi finiti nel quale il giunto tra conci adiacenti, data la complessità geometrica di tale superficie di contatto, ha portato all'inserimento di molle distribuite in grado di reagire a trazione, cosa che nella realtà non avviene. Tale condizione porta rispettivamente ad una sottostima della tensione nelle zone meno compresse (Sensore SS-C-2/C-1-2 su concio C) ed una sovrastima della tensione nelle zone più compresse (Sensore SS-B-2/B-1-2 su concio B) dell'anello, via via crescente con l'incremento percentuale di ovalizzazione. Si ritiene, infine, che le letture ottenute dalla prova sperimentale, sulla base di quanto osservato nella precedente prova idrostatica, risultino essere più attendibili di quelle ottenute dalla modellazione a questi livelli di carico.

Il confronto tra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli predittivi da modellazione ha permesso di verificare la bontà di questi ultimi. In futuro, sarà quindi necessario affinare e calibrare ulteriormente i modelli utilizzati per la validazione dei risultati ottenuti sperimentalmente.

4 ATTIVITÀ X.3: Prove su edifici

4.1 Descrizione dell'attività n.1 (Partners PoliTo, UniNA, UniPA, Mapei, STMicroelectronics)

Gli edifici dell'edilizia storico-monumentale spesso sono interessati da gradualmente fenomeni di degrado che in molti casi possono compromettere i livelli di sicurezza e le condizioni operative degli edifici. La ricerca si colloca esattamente in questo contesto utilizzando efficaci strumenti per la previsione del comportamento strutturale come il monitoraggio strutturale, riconosciuto nella letteratura scientifica con l'acronimo SHM (Structural Health Monitoring). In collaborazione con la STMicroelectronics e la MAPEI è stata effettuata una indagine sperimentale basata sull'uso di due sensori di tensione, in particolare un sensore di tipo capacitivo e un sensore ceramico per il monitoraggio di elementi di strutture in muratura. UniNA ha collaborato inoltre specificamente sulla prima parte della campagna sperimentale, ovvero quella relativa a singoli muretti, contribuendo all'interpretazione dei risultati mediante confronti con modelli di letteratura.

4.1.1 Indagine sperimentale

Con l'obiettivo di valutare l'efficacia dei due tipi di sensori per il monitoraggio di strutture in muratura, sono state effettuate delle prove di laboratorio su due tipologie di muretti. In particolare, in una prima serie di muretti i sensori sono stati installati durante il confezionamento e in una seconda serie di muretti, al fine di studiare l'efficacia di tali dispositivi applicati alle strutture esistenti, i sensori sono stati installati dopo aver sottoposto i provini ad uno stato di precompressione fino al valore di una prefissata tensione di esercizio.

4.1.2 Materiali e campioni

Sono state indagate due tipologie di muratura per cui sono state confezionate due serie di muretti a sette filari delle dimensioni di 510x430x120 mm e giunti di malta di 1 cm; in particolare una prima serie formata da mattoni di calcarenite e una seconda serie formata da mattoni di argilla, in entrambi i casi le dimensioni dei mattoni erano di 250x120x50 mm (Figura 4-1).

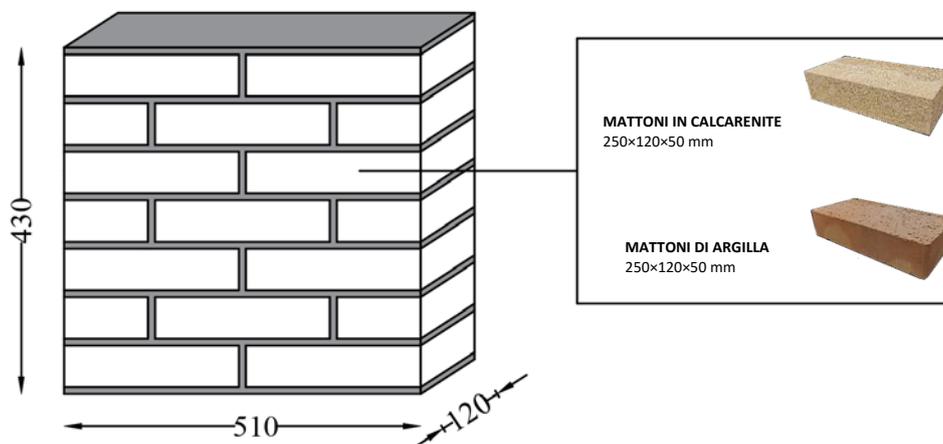


Figura 4-1. Geometria del campione

Dopo un periodo di stagionatura di 28 giorni, alcuni dei provini sono stati precompressi applicando un valore di carico corrispondente al 20% della resistenza media a compressione rispettivamente della muratura per i mattoni di argilla e in calcarenite. Il carico è stato applicato attraverso un sistema di contrasto in acciaio costituito da due profili HEA200, uno nella parte superiore e l'altro nella parte inferiore dei pannelli, collegati tra loro con quattro aste a vite (due per lato) come mostrato in Figura 4-2.

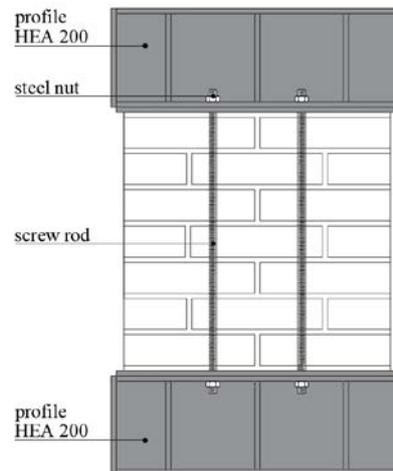


Figura 4-2. Sistema di contrasto in acciaio

Per maggiori dettagli sul montaggio dei sensori si rimanda al successivo § 4.1.4

4.1.3 Sistema di misurazione

Per entrambi i tipi di muratura, i sensori capacitivi e ceramici sono stati in una parte dei campioni pre-installati e per un'altra parte dei campioni post-installati nei pannelli secondo tre modelli di monitoraggio. Nelle Figura 4-3 e Figura 4-4 è mostrata la disposizione dei sensori. Sono state condotte 12 prove su muretti con sensori pre-installati e 20 prove su muretti precompressi con sensori post-installati (di cui 10 con il sistema di post-installazione P1 e 10 con il sistema di post-installazione P2), presso il Laboratorio di Strutture del Dipartimento di Ingegneria dell'Università di Palermo.

Per i dettagli sul sistema pre-installato si rinvia, inoltre, alle due pubblicazioni:

- L. La Mendola, M. C. Oddo, M. Papia, F. Pappalardo, A. Pennisi, G. Bertagnoli, F. Di Trapani, A. Monaco, F. Parisi, S. Barile Performance of two innovative stress sensors imbedded in mortar joints of new masonry elements. Construction and Building Materials 297 (2021) 123764;
- A. Monaco, G. Bertagnoli, L. La Mendola, M. C. Oddo, A. Pennisi Preliminary validation of an innovative stress sensor for the Structural Health Monitoring of masonry buildings. XIX ANIDIS Conference, Seismic Engineering in Italy Torino 2022.

Per quanto riguarda il sistema di post-installazione P1 e P2 (Figura 4-4) i cui risultati sono ancora in fase di elaborazione si riporta di seguito una breve descrizione.

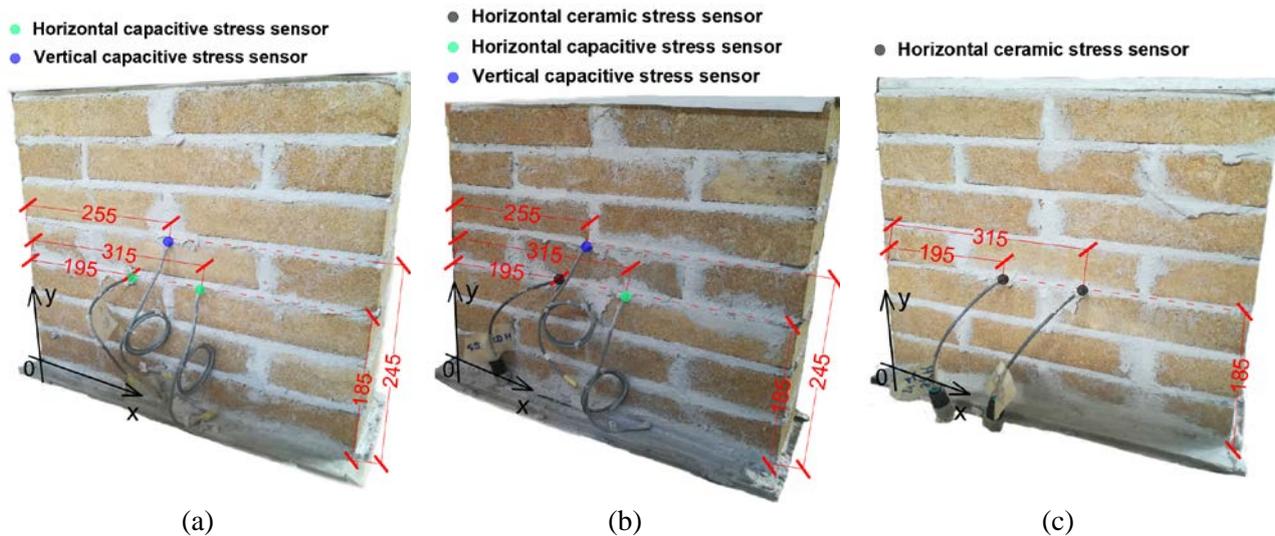


Figura 4-3. Posizionamento dei sensori (dimensioni in mm) per i sistemi di pre-installazione per la muratura di calcarenite: (a) schema con due sensori capacitivi posizionati orizzontalmente e uno verticalmente; (b) schema con due sensori posizionati orizzontalmente, di cui uno capacitivo e uno ceramico, e un sensore capacitivo posizionato verticalmente; (c) schema con due sensori ceramici

I sensori sono stati post-installati in posizione orizzontale, nei giunti del letto di malta, vicino alla metà altezza di ciascun campione; in dettaglio: due sensori di tensione ceramici in campioni SP1 e SP2, due sensori di tensione capacitivi in campioni SP3 e SP4, un sensore di tensione ceramico e un sensore di tensione capacitivo in campione SP5.

Per tutta la sperimentazione condotta l'installazione sei sensori è stata effettuata da Mapei (descritta in dettaglio al § 4.1.4) e l'acquisizione dei dati dei sensori a cura della STMicroelectronics (descritta in dettaglio al § 4.1.5).



Figura 4-4. Posizionamento dei sensori (dimensioni in mm) per i due sistemi di post-installazione per la muratura di calcarenite (a, b, c) e per la muratura di mattoni (d, e, f): (a, d) schema con due sensori ceramici; (b, e) schema con due sensori capacitivi; (c, f) schema con un sensore ceramico e uno capacitivo

4.1.4 Pre-installazione e post-installazione di sensori ceramici e capacitivi in elementi in muratura

Nel corso dello svolgimento dell'OR4 del progetto INSIST, Mapei ha collaborato con UNIPA e STMicroelectronics nella attività di monitoraggio di elementi muratura e in calcarenite strumentati con sensori di pressione ceramici e capacitivi. Mapei si è occupata in particolar modo della posa in opera della sensoristica e quindi di tutte le attività di pre e post-installazione dei sensori sopracitati e del confezionamento dei muretti in laterizio e in calcarenite.

Per quanto riguarda le attività di pre-installazione è stata studiata un'apposita procedura che si descrive come segue:

1) Posizionamento dei conci mediante l'impiego di intonaco di fondo a base di calce aerea e leganti idraulici (Figura 4-5).



Figura 4-5. Posizionamento conci

2) Posizionamento dei sensori ceramici e capacitivi nei giunti di malta tra due filari di conci successivi (Figura 4-6). In questo caso specifico, sono stati realizzati provini in muratura e calcarenite aventi differenti configurazioni della sensoristica. Alcuni elementi sono stati realizzati con l'impiego di soli sensori ceramici, altri con l'impiego di soli sensori capacitivi e altri misti con sensori ceramici e sensori capacitivi in contemporanea. I sensori sono stati posizionati al centro dell'elemento murario sia per quanto riguarda la profondità sia per quanto riguarda lo sviluppo in altezza dell'elemento.

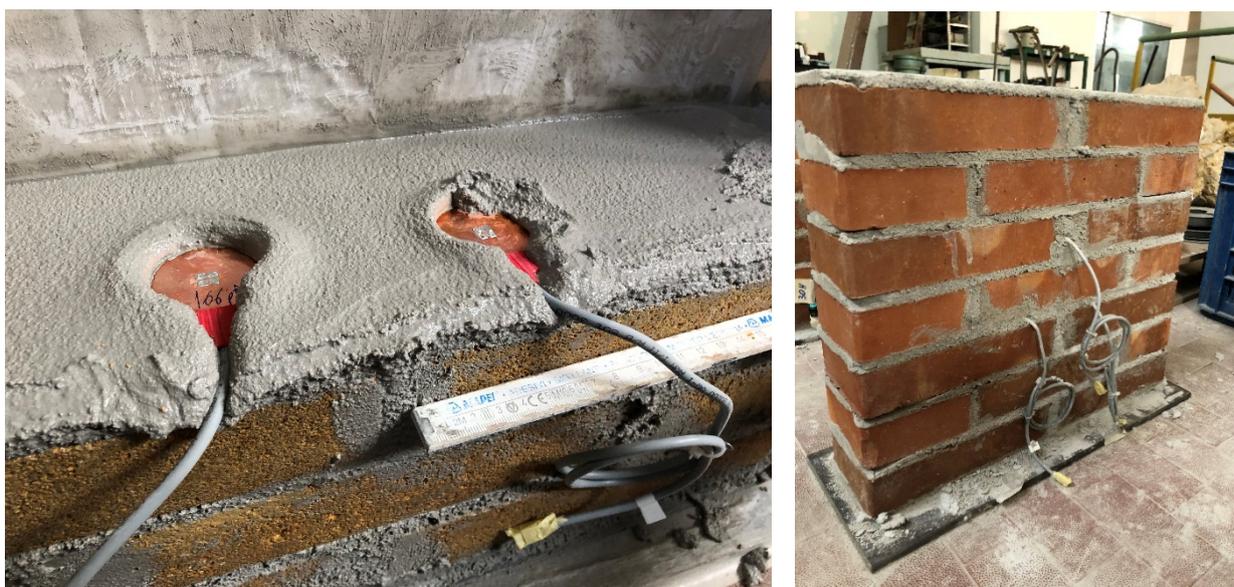


Figura 4-6. Posizionamento sensori (ceramici e capacitivi) nei giunti di malta (pre-installazione)

Nel complesso sono stati confezionati 20 muretti, tra laterizio e calcarenite, di cui 12 con sensori pre-installati e 8 con sensori post-installati.

Di seguito si descrive la procedura operativa utilizzata per la post-installazione della sensoristica.

1) Realizzazione dei fori di alloggiamento dei sensori mediante l'ausilio di un trapano e successiva rimozione della polvere creata durante l'esecuzione dei fori mediante l'impiego di aria compressa (Figura 4-7).



Figura 4-7. Esecuzione fori per post-inserimento sensori

2) Posizionamento della sensoristica all'interno dei fori eseguiti in precedenza. Anche in questo caso i sensori sono stati posizionati all'interno dei giunti di malta e collocati in posizione baricentrica (Figura 4-8).



Figura 4-8. Posizionamento sensori all'interno dei fori

3) Iniezione di boiaccia a base di Legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali, a base di calce ed eco-pozzolana (Figura 4-9).



Figura 4-9. Iniezione di boiaccia

La procedura utilizzata per la pre-installazione della sensoristica è risultata idonea a differenza della metodologia utilizzata per la post-installazione dei sensori che ha presentato alcune difettosità che è stato necessario considerare. La problematica principale ha riguardato essenzialmente il posizionamento del sensore. Con questa tipologia di sistema non è stato possibile evitare movimenti o rotazioni del sensore dopo l'iniezione della boiaccia.

A causa di tali problematiche riscontrate, si è deciso con STMicroelectronics e UniPA di ripetere la procedura di post-installazione della sensoristica sulla medesima tipologia di muretti impiegati nella prima parte della sperimentazione e su un maschio murario confezionato presso l'Università di Palermo. La procedura di post-installazione è stata quindi rivista e può essere descritta come segue.

1) Esecuzione dei fori di alloggiamento della sensoristica mediante carotaggio con l'impiego di corona diamantata di diametro compreso tra 4 e 6 cm e successiva aspirazione con aria compressa della polvere generata dalle precedenti operazioni (Figura 4-10).

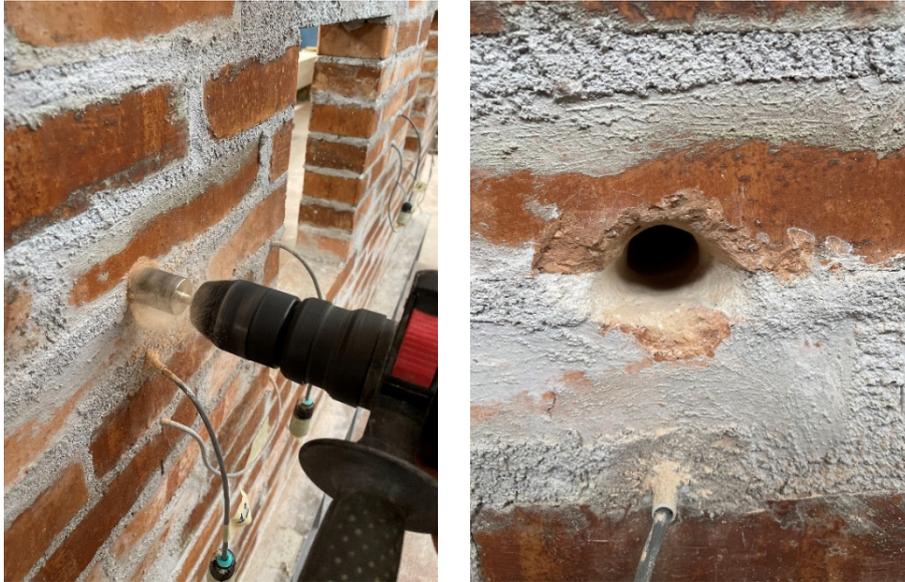


Figura 4-10. Esecuzione fori mediante carotaggio

2) Posizionamento e incollaggio del sensore su un supporto in plastica rigida (Figura 4-11) e successiva realizzazione di una mascherina in plexiglass, dotata di un foro centrale di dimensione idonea per permettere il passaggio del sensore e del suo cavo di alimentazione. La piastra era inoltre dotata di due piccole asole, collocate ai lati del foro, che permettessero la realizzazione di un incastro perfetto con il supporto in plastica su cui era vincolato il sensore. Questa tipologia di sistema è stata appositamente studiata per far sì che il sensore si trovasse in posizione perfettamente orizzontale evitando così eventuali movimenti o rotazioni durante la posa in opera della boiaccia.

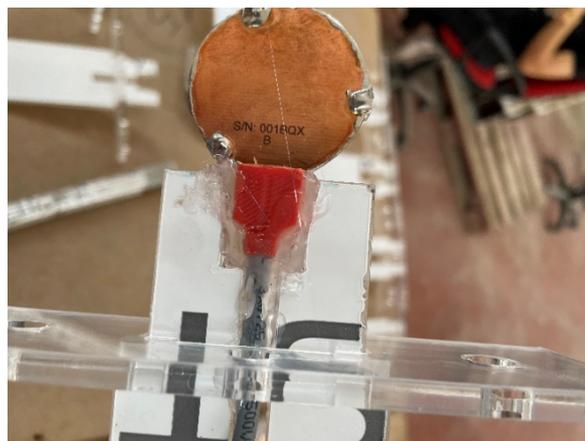


Figura 4-11. Posizionamento ed incollaggio del sensore su supporto in plastica

3) Esecuzione di 2 fori, mediante l'ausilio di un trapano, ai lati del carotaggio precedentemente eseguito e successivo fissaggio del sistema sul supporto mediante l'impiego di viti e tasselli di idonea dimensione in funzione della dimensione dei fori eseguiti nello step precedente e conseguente alloggiamento del sensore nella cavità realizzata durante la fase 1.



Figura 4-12. Fissaggio del sistema sul supporto

4) Posizionamento di due tubicini, uno inferiore e uno superiore, all'interno della cavità necessari per l'iniezione della boiaccia all'interno del foro di alloggiamento del sensore. Successiva iniezione della boiaccia mediante l'utilizzo del tubicino collocato più in basso. Il tubicino collocato superiormente fungeva invece da tubo di sfiato della boiaccia. Tale operazione è risultata necessaria al fine di evitare inglobamento d'aria all'interno della cavità durante la posa in opera della boiaccia. L'iniezione è terminata nel momento in cui la boiaccia è fuoriuscita dal tubicino posto superiormente (Figura 4-13).



Figura 4-13. Iniezione di boiaccia con sistemi di tubicini con sistema di fuoriuscita di aria

Per l'estrusione della boiaccia, si è impiegata un'ideale pistola per l'iniezione di malte e siliconi come rappresentato in Figura 4-13.

4.1.4.1 Caratteristiche meccaniche dei prodotti impiegati per la posa in opera dei sensori in elementi in muratura

Per quanto riguarda l'esecuzione dei muretti in laterizio e dei muretti in calcarenite realizzati nella sperimentazione condotta con STMicroelectronics e UniPA si è impiegato un intonaco di fondo a base di calce aerea e leganti idraulici le cui caratteristiche sono riportate in Tabella 4-1.

Per la post-installazione della sensoristica all'interno degli elementi in muratura è stata impiegata una boiaccia a base di legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali, a base di calce ed ECO-POZZOLANA. Le caratteristiche meccaniche della boiaccia sono riportate in Tabella 4-2.

Tabella 4-1. Caratteristiche intonaco di fondo a base di calce aerea e leganti idraulici adottato per i giunti di malta delle murature

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Requisiti in accordo alla EN 998-1	Prestazione prodotto
Resistenza a compressione a 28 gg (N/mm ²):	EN 1015-11	CS I (da 0,4 a 2,5)	Categoria CS II
		CS II (da 1,5 a 5,0)	
		CS III (da 3,5 a 7,5)	
		CS IV (≥ 6)	
Adesione al supporto (laterizio) (N/mm ²):	EN 1015-12	Valore dichiarato e modo di rottura (FP)	≥ 0,3 Modo di rottura (FP) = B
Assorbimento d'acqua per capillarità [kg/(m ² ·min ^{0,5}):	EN 1015-18	da Categoria W _c 0 a Categoria W _c 2	Categoria W _c 0
Coefficiente di permeabilità al vapore acqueo (μ):	EN 1015-19	Valore dichiarato	≤ 12
Conducibilità termica (λ _{10,dry}) (W/m·K):	EN 1745	Valore tabulato	0,57 (P = 50%)
Reazione al fuoco:	EN 13501-1	Euroclasse	A1

Tabella 4-2. Caratteristiche meccaniche della boiaccia utilizzata nella post-installazione

Caratteristica prestazionale	Metodo di prova	Prestazione prodotto
Resistenza a compressione a 28 gg (N/mm ²):	EN 196-1	15
Reazione al fuoco:	EN 13501-1	Classe A1
Resistenza ai solfati:	Saggio di Anstett	elevata
Efflorescenze saline (dopo semi-immersione in acqua):	/	assenti

4.1.5 Sistema di monitoraggio basato sui sensori STMicroelectronics per i test di carico sui provini in muratura

Presso il laboratorio del dipartimento DICAM dell'Università di Palermo si sono svolte le attività sperimentali di monitoraggio su strutture in muratura mediante i sensori ed i sistemi di acquisizione dati di STMicroelectronics.

Le sessioni di misura sono state diverse e articolate in funzione dei provini da testare; hanno interessato strutture di mattoni pieni di laterizio o calcarenite, sia pre-installati che post-installati, ed hanno riguardato il funzionamento di due tipologie di sensori sottoposti a compressione semplice. In particolare, sono stati testati i sensori di tipo ceramico (indicati come CSS, Ceramic Stress Sensor) e quelli di tipo capacitivo (indicati come CPS, Capacitive Pressure Sensor).

Durante il periodo del progetto INSIST, nonostante tutti i disagi causati dalle restrizioni sui viaggi dovuti all'emergenza COVID-19, sono state effettuate tre campagne di test.

- Gennaio 2020 – Test di rottura su 10 muretti con sensori pre-installati;
- Luglio 2020 – Test di rottura su 10 muretti con sensori post-installati;
- Luglio 2021 – Test di rottura su 10 muretti con sensori post-installati;
- Luglio 2021 – Test di tenuta su due pareti in muratura;
- Luglio 2021 – Caratterizzazione dei sensori capacitivi pre-installati in cilindri di malta.

La sperimentazione è stata condotta su muratura di mattoni pieni in laterizio di dimensioni 250x120x50 mm e opportuni corsi di malta e su muratura di calcarenite siciliana (proveniente dalla cava di Sabucina in provincia di Caltanissetta), con blocchi delle stesse dimensioni dei mattoni ottenendo così uguale apparecchio murario, con due differenti elementi resistenti: mattone e pietra di calcarenite.

I muretti sottoposti a compressione hanno dimensioni 510x500x120 mm circa (con un minimo di variabilità sullo spessore del giunto di malta), confezionati con 7 corsi di elementi (laterizio o calcarenite) di dimensioni 250x120x50 mm e opportuni corsi di malta di circa 1 cm (Figura 4-14).

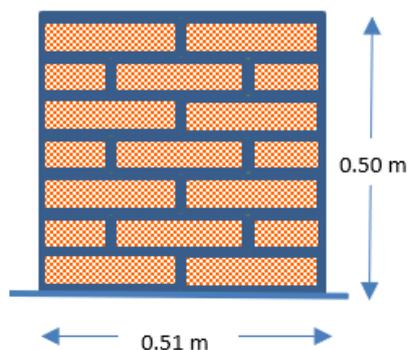


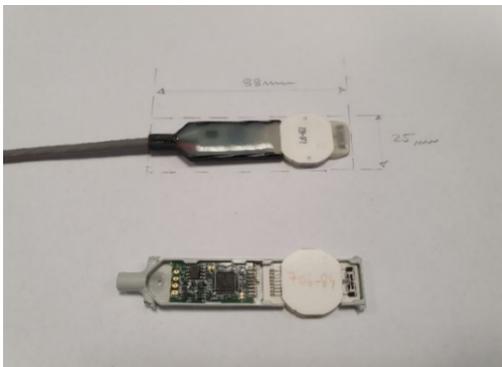
Figura 4-14. Tipologia e geometria del muretto

Sono stati confezionati n. 11 provini in muratura di laterizio (tipologia A) e n. 11 provini in muratura di calcarenite (tipologia B), nel modo seguente:

- n. 6 provini di tipologia A con sensori pre-installati;
- n. 4 provini di tipologia A con sensori post-installati;
- n. 6 provini di tipologia B con sensori pre-installati;
- n. 4 provini di tipologia B con sensori post-installati;
- n. 2 provini (uno per tipologia) saranno utilizzati per testare il sistema di prova nei muretti con sensori post-installati (precompressione).

I sensori installati, mostrati in Figura 4-15, sono stati disposti come indicato in Figura 4-16 (in rosso i CSS e in blu i CPS). Si noti che nei sensori CPS disposti nei giunti orizzontali non saranno presenti le staffe che si vedono in Figura 4-15b), lateralmente al sensore stesso, necessarie in trazione.

Oltre ai sensori, è stata utilizzata una strumentazione classica di rilievo: le deformazioni (accorciamenti specifici) si otterranno a partire dalle letture di quattro comparatori millesimali, disposti a coppie su ciascuna faccia del provino su una base di misura pari ad $1/3$ dell'altezza dello stesso. Inoltre, saranno disposti due comparatori orizzontali (uno per faccia) a cavallo di un giunto di malta. La posizione dei suddetti comparatori, uguale sulle due facce, è indicata in figura Figura 4-16d).



a)



b)

Figura 4-15. Tipologie di sensori impiegati per i test sui provini in muratura presso UniPA: a) CSS (Ceramic Stress Sensor); b) CPS (Capacitive Pressure Sensor)

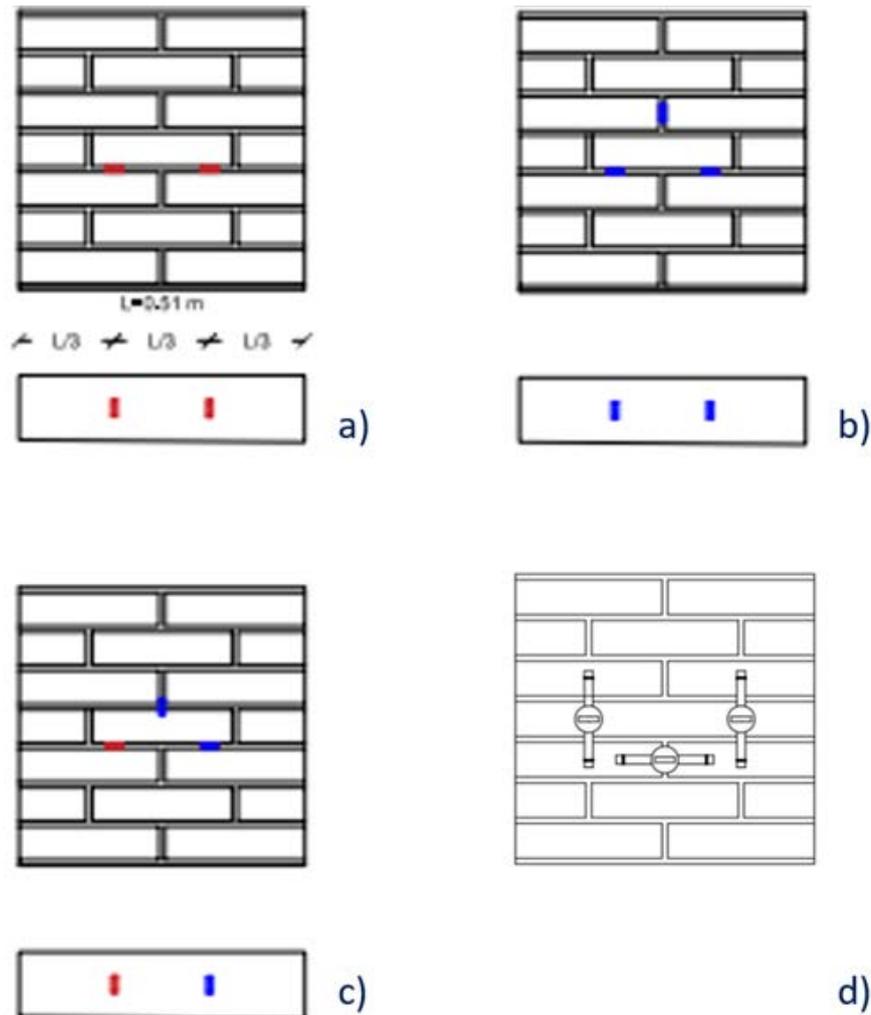


Figura 4-16. Sistema di rilievo della risposta: a) b) c) disposizione dei sensori; d) disposizione nei comparatori (uguale fronte e retro).

In particolare, i 12 muretti con i sensori pre-installati sono stati così suddivisi:

- n. 2 provini di tipologia A e n. 2 provini di tipologia B con disposizione in Figura 4-16a);
- n. 2 provini di tipologia A e n. 2 provini di tipologia B con disposizione in Figura 4-16b).

Per la collocazione del sensore CPS (munito di staffe) nel giunto verticale è stato necessario effettuare un piccolo scasso nei due mattoni a ridosso del giunto per consentire l'alloggiamento delle staffe del sensore;

- n. 2 provini di tipologia A e n. 2 provini di tipologia B con disposizione in Figura 4-16c) (per la collocazione del sensore CPS nel giunto verticale, munito di staffe, è stato necessario effettuare un piccolo intaglio nel mattone sottostante, per consentire l'alloggiamento di parte del sensore).

4.1.6 Configurazione del test

I campioni sono stati sottoposti a prove di compressione utilizzando una macchina di prova Zwick-Roell con capacità di 4000 kN (Figura 4-17). Le prove sono state eseguite in modalità di controllo di spostamento, adottando una velocità pari a 0,2 mm/min.



Figura 4-17. Campione sotto la pressa pronto per la prova

Inoltre, i campioni sono stati strumentati con strumentazione classica: per la misura delle deformazioni sono stati collocati quattro comparatori millesimali, due su ciascuna faccia del campione, come mostrato in Figura 4-18. I comparatori sono fissati sulla superficie nella parte centrale della zona di prova, vicino ai sensori, con una base di misura di circa 120 mm.

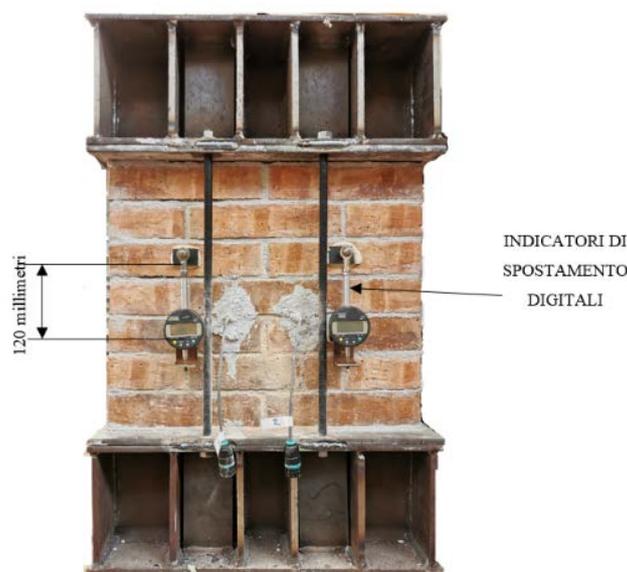


Figura 4-18. Posizionamento dei comparatori sul muretto

4.2 Risultati dell'attività n.1 (Partners UniPA, UniNA, Mapei, STMicroelectronics)

4.2.1 Risultati test provini con sensori pre-installati

Di seguito vengono presentati i risultati dei test eseguiti dal 27 al 29 gennaio 2020 presso il DICAM dell'Università di Palermo sui provini con sensori pre-installati.

Nella prova sono stati impiegati 20 sensori capacitivi e 10 sensori ceramici disposti come mostrato in Figura 4-19.

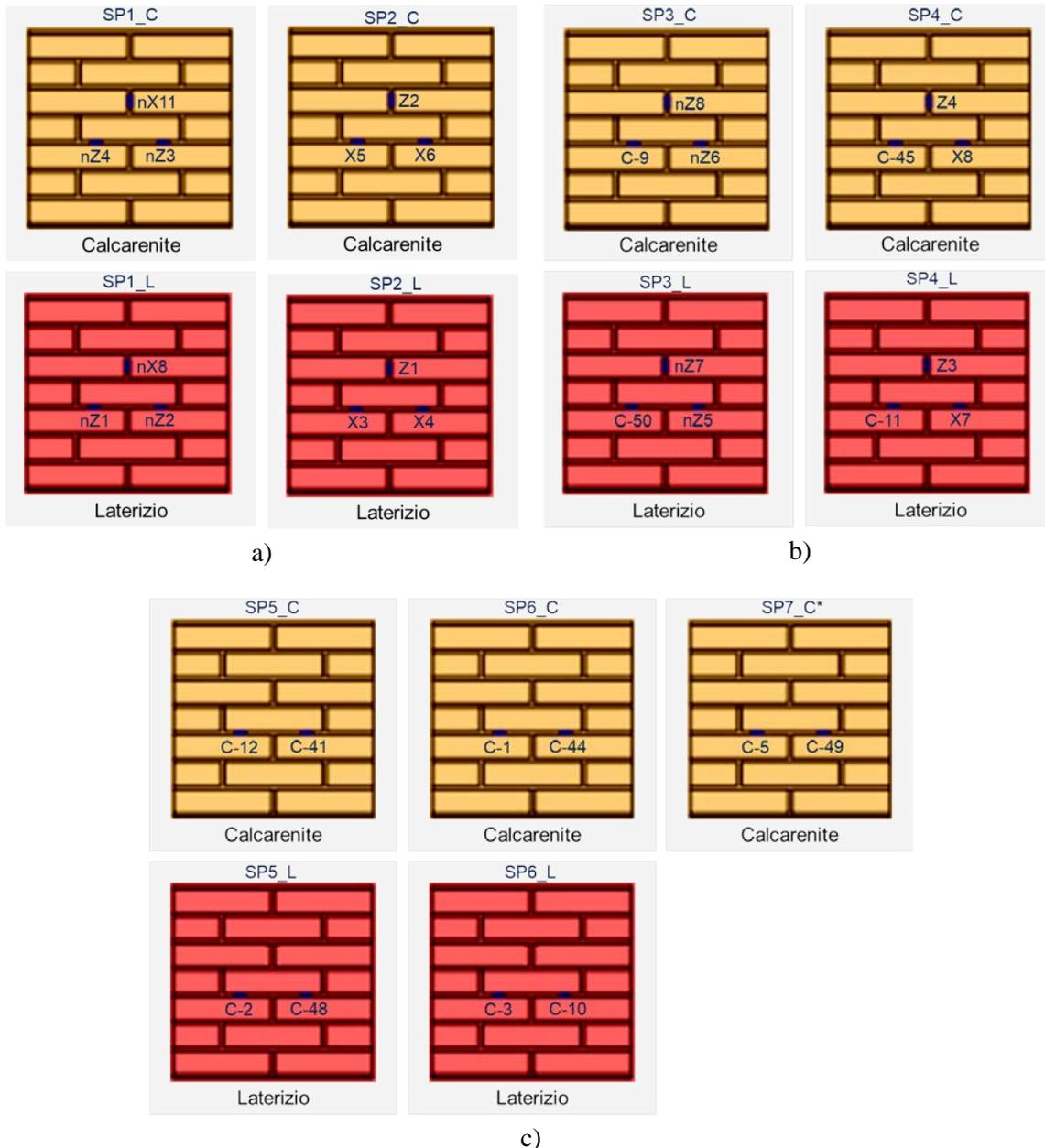


Figura 4-19. Tipologie di provini impiegati (Calcarenite e Laterizio) con: a) Solo sensori CPS; b) Sia sensori CPS che CSS; c) Solo sensori CSS (*, provino "spare")

Il provino SP7_C, indicato come "spare", è stato ugualmente testato, sebbene un po' più alto (~50 cm) rispetto a tutti gli altri.

In Figura 4-19 sono mostrati gli schemi dei provini con i relativi sensori installati, mentre in Figura 4-20 sono mostrate alcune immagini delle fasi di installazione del sistema di acquisizione dei sensori capacitivi.

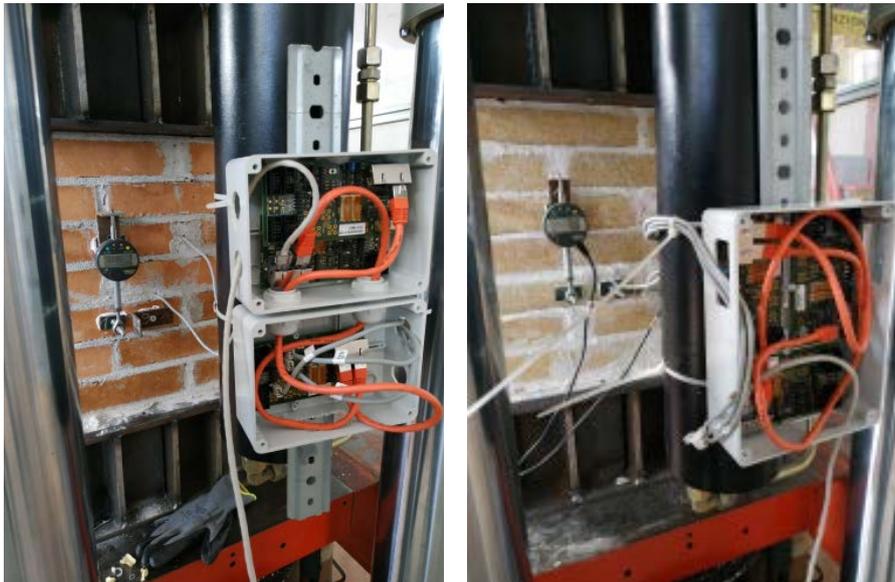


Figura 4-20. Sistema di acquisizione sensori capacitivi

I test sono stati eseguiti secondo lo schema mostrato in Tabella 4-3.

Tabella 4-3. Schema esecuzione delle prove di carico

Schema di esecuzione delle prove	
1	Preparazione del provino con installazione dei comparatori da parte di UniPA
2	Movimentazione del provino e suo posizionamento all'interno della pressa
3	Collegamento dei sensori ai sistemi di acquisizione
4	Avvio della prova con start sincronizzato dei sistemi di acquisizione
5	Fine prova: stop sincronizzato dei sistemi di acquisizione

Nell'arco dei tre giorni di prove i test sui provini sono stati distribuiti secondo la Tabella 4-4.

Tabella 4-4. Schema di esecuzione delle prove di carico (*, provino "spare")

Suddivisione dei provini nei giorni di prove	
27/01/2020	SP1_C, SP1_L, SP5_C
28/01/2020	SP5_L, SP2_C, SP2_L, SP6_C, SP3_C
29/01/2020	SP3_L, SP4_C, SP4_L, SP6_L, SP7_C*

In ogni fase di test, le letture dei sensori acquisite dai sistemi STMicroelectronics e da UniPA sono state memorizzate come file di testo e/o CSV; questi file, opportunamente denominati per mantenere traccia del provino e dei sensori, sono poi stati condivisi per effettuare le opportune analisi.

Tutti i sensori installati nei provini e testati durante le prove sono stati recuperati mediante rottura manuale del provino. In Figura 4-21 alcune foto dei sensori capacitivi recuperati.

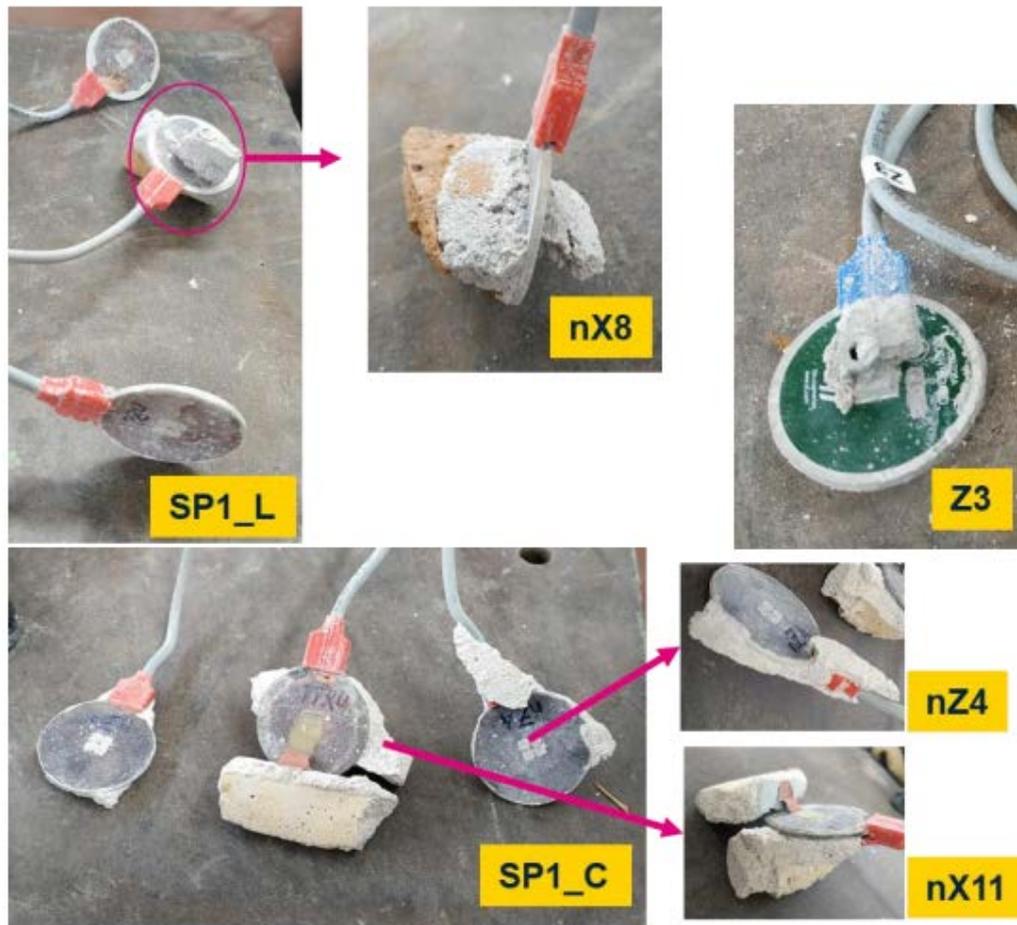


Figura 4-21. Sensori capacitivi pre-installati recuperati dai provini dopo i test

Questa analisi post test ha permesso di verificare la corretta installazione dei sensori (inclinazione rispetto alla verticale di carico, aderenza della malta alle superfici del sensore, ecc.) in modo da poter avere più informazioni possibili in fase di analisi dei dati, al fine di valutare eventuali correlazioni fra anomalie nei dati acquisiti e, ad esempio, una scarsa planarità di installazione del sensore e/o dalla tipo di adesione fra la malta e il sensore.

4.2.2 Risultati primo test provini con sensori post-installati

Di seguito vengono presentati i risultati dei test eseguiti dal 7 al 9 luglio 2020 presso il DICAM dell'Università di Palermo sui provini con sensori post-installati.

Come per la precedente sessione di test, che ha riguardato i sensori pre-installati, sono stati impiegati 10 muretti in cui, dopo l'asciugatura, sono stati post-installati i sensori ceramici e capacitivi.

Anche in questa prova sono stati impiegati 20 sensori capacitivi e 10 sensori ceramici disposti nello stesso modo del precedente test, identiche anche le modalità di esecuzioni delle prove come da schema mostrato precedentemente in Figura 4-16.

Nell'arco dei tre giorni di prove i test sono stati distribuiti secondo quanto riportato in Tabella 4-5.

Tabella 4-5. Schema di esecuzione delle prove di carico

Suddivisione dei provini nei giorni di prove	
7/7/2020	SP1_P_L, SP2_P_L, SP5_P_L
8/7/2020	SP1_P_C, SP2_P_C, SP3_P_C, SP3_P_L, SP4_P_L
9/7/2020	SP4_P_C, SP5_P_C

In Figura 4-22 alcune foto dei test effettuati sul campione SP3_P_L.



Figura 4-22. Provini in muratura con sensori post-installati sottoposti ai test di compressione fino a rottura

Anche per questi test, i dati dei sensori acquisiti dai sistemi STMicronics e quelli acquisiti dalla strumentazione di UniPA, sono stati memorizzati come file di testo e/o CSV e opportunamente denominati per effettuare le opportune analisi.

Anche in questa campagna di acquisizioni sono stati recuperati tutti i sensori impiegati mediante rottura manuale del provino. Questa analisi si è rivelata interessante in quanto sono emerse diverse criticità derivate dalla post-installazione, a loro volta confermate anche durante la lettura dei dati.

Le criticità hanno riguardato sostanzialmente la planarità di installazione del sensore rispetto al piano dei mattoni e la presenza di aria all'interno del buco fatto per ospitare i sensori.

In Figura 4-23 vengono alcune immagini dei sensori recuperati sul provino SP3_P_C (nZ16) e SP5_P_C (nZ18) dove si evincono le criticità elencate.



Figura 4-23. Sensori capacitivi post-installati recuperati dai provini dopo i test

In Figura 4-24, invece, vengono mostrati alcuni dettagli dei sensori ceramici installati sul provino SP5_P_C e SP2_P_L.



Figura 4-24. Sensori ceramici post-installati recuperati dai provini dopo i test

Queste prove hanno messo in luce questa le principali criticità di questo tipo di installazioni in elementi in muratura, ovvero di dover garantire la massima planarità delle superfici dei sensori rispetto alla verticale di carico e la presenza di vuoti nella malta di riempimento dei fori di installazioni dei sensori: esse, infatti, possono influenzare anche pesantemente la sensibilità dei sensori. Questo tipo di analisi è stata fondamentale per orientare e migliorare la metodologia di post-installazione non solo sulle strutture in muratura ma anche su strutture in cemento armato.

4.2.3 Risultati secondo test provini con sensori post-installati

Dal 6 al 7 luglio 2021 sono stati ripetuti i test sui provini con sensori post-installati presso i laboratori del DICAM dell'Università di Palermo.

La prova è stata ripetuta esattamente come fatto l'anno precedente ma questa volta i sensori sono stati post-installati in maniera del tutto differente, variando sia la tipologia di fori fatti nei provini per installare i sensori sia la metodologia di iniezione della malta.

Sono quindi rimasti invariati sia in numero di sensori impiegati e sia la loro disposizione (20 sensori capacitivi e 10 sensori ceramici), così come le modalità di esecuzioni delle prove come da schema mostrato precedentemente in Figura 4-16.

La post-installazione dei sensori è stata effettuata con una dima in plexiglass che ha permesso di orientare l'inserimento del sensore all'interno del buco ed ha tappato il buco permettendo di non far uscire la malta una volta compressa all'interno:



Figura 4-25. Tipologia di post-installazione adottata nella seconda campagna di test

Nell'arco dei due giorni di prove, i test sono stati distribuiti secondo quanto riportato in Tabella 4-6.

Tabella 4-6. Schema di esecuzione delle prove di carico

Suddivisione dei provini nei giorni di prove	
6/7/2021	SP1_P_C, SP1_P_L, SP2_P_C, SP2_P_L, SP3_P_C, SP3_P_L
7/7/2020	SP4_P_L, SP4_P_C, SP5_P_C, SP5_P_L

In Figura 4-26 sono mostrate alcune foto dei test effettuati.



Figura 4-26. Provini in muratura con sensori post-installati sottoposti ai test di compressione fino a rottura (seconda campagna di test)

Anche per questa seconda campagna di test, i dati dei sensori acquisiti dai sistemi STMicroelectronics e quelli acquisiti dalla strumentazione di UniPA, sono stati memorizzati come file di testo e/o CSV e opportunamente denominati per effettuare le opportune analisi.



Figura 4-27. Sensori post-installati recuperati dai provini dopo i test della seconda campagna

Come fatto nei test precedenti, anche in questa seconda campagna di test i sensori sono stati recuperati dopo il test e si è riscontrato come la nuova metodologia di installazione ha portato a dei miglioramenti rispetto alle criticità emerse nella precedente campagna di post-installazione, come mostrato in Figura 4-27. Ciò trova ulteriore conferma dai dati acquisiti.

4.2.4 Risultati test su parete in muratura con sensori pre e post-installati

Dall'8 al 9 luglio 2021 sono stati eseguiti dei test sui due pareti in muratura con sensori pre e post-installati presso i laboratori del DICAM dell'Università di Palermo.

La prova ha interessato due pareti identiche realizzate con mattoni pieni, una in laterizio e una in calcarenite, con tre maschi murati, così come evidenziato in Figura 4-28.

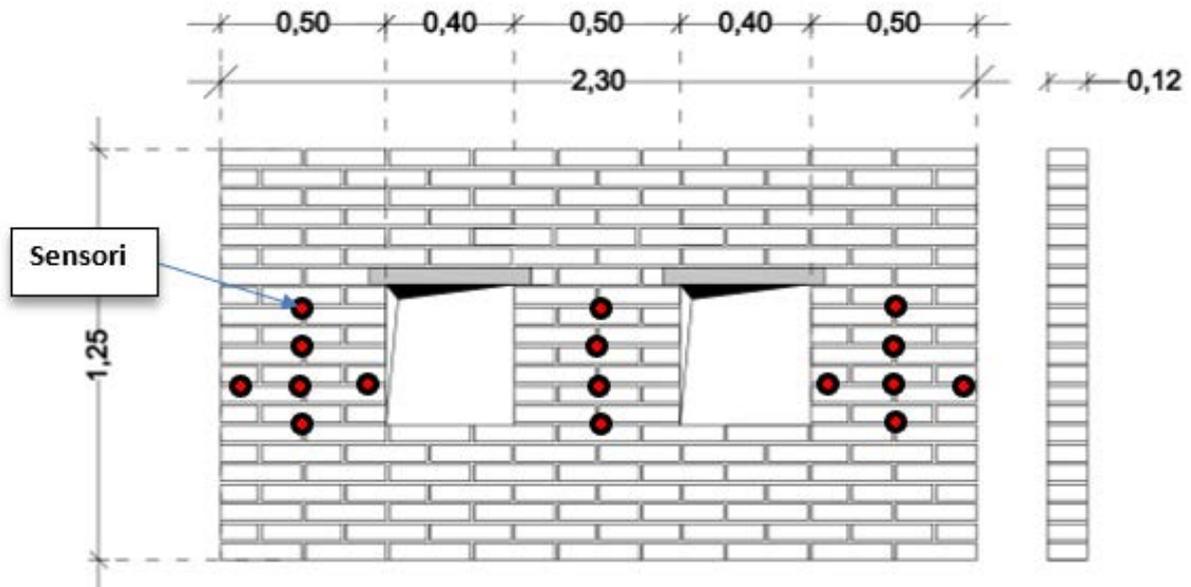


Figura 4-28. Schema dei sensori installati sulle murature per i test di redistribuzione del carico in seguito a danneggiamento (simulato con la rimozione graduale del maschio murario centrale)

Per questi test sono stati impiegati i seguenti sensori:

- n. 10 sensori ceramici pre-installati;
- n. 10 capacitivi pre-installati;
- n. 6 sensori ceramici post-installati;
- n. 6 sensori capacitivi post-installati.

Nell'arco dei due giorni di prove i test sono stati distribuiti secondo quanto riportato in Tabella 4-7.

Tabella 4-7. Schema di esecuzione delle prove di carico

Suddivisione dei test su murature	
8/7/2020	Muratura 1 - Calcarenite
9/7/2020	Muratura 2 - Laterizio

Il test prevedeva di sottoporre a carico verticale le strutture, privarle gradualmente del maschio centrale e verificare le variazioni dei carichi sui maschi laterali e su quello centrale (sino a quando non è stato completamente rimosso, come mostrato in Figura 4-29).



Figura 4-29. Schema di monitoraggio delle pareti in muratura durante le fasi di test

Nella struttura sono stati posti sia sensori pre che post-installati in modo da poter confrontare i dati e mettere a confronto le due tipologie di posa in opera.

Le letture dei sensori acquisite dai sistemi STMicroelectronics e da UniPA sono state memorizzate come file di testo e/o CSV e opportunamente denominati per effettuare le opportune analisi.

4.2.5 Confronti e commenti

I risultati delle prove sperimentali, condotte sui campioni con i sensori pre-istallati, hanno evidenziato una buona corrispondenza tra le letture dei sensori ceramici e le tensioni di riferimento della cella di carico, sia durante i cicli di pre-carico che durante la fase di carico monotonica fino al picco di resistenza. I risultati hanno confermato l'idoneità dei sensori ceramici ad essere installati in strutture in muratura, senza la necessità di ulteriori calibrazioni rispetto a quelle eseguite per gli stessi sensori applicati a strutture in calcestruzzo. Mentre, per quanto riguarda i sensori capacitivi, poiché la loro calibrazione è ancora in corso, i risultati sono stati confrontati solo da un punto di vista qualitativo con le tensioni di riferimento della cella di carico. L'andamento globale registrato dai sensori capacitivi, in termini di valori di capacità, risulta in buon accordo con quello della cella di carico in termini di tensioni, sia durante i due cicli di pre-carico, che nel ramo di carico ascendente e al picco. In alcuni casi, i sensori sono stati anche in grado di registrare il comportamento post-picco.

Per quanto riguarda la sperimentazione relativa ai muretti con i sensori post-installati, i risultati mostrano una significativa influenza della metodologia post-posa in opera, nonché della rigidità della malta post-iniettata e del sensore rispetto ai materiali costituenti la muratura. Il metodo post-installazione P1 ha il vantaggio di essere semplice ma ha presentato molti inconvenienti perché non è in grado di garantire un adeguato riempimento del foro e quindi una distribuzione omogenea delle pressioni sul sensore che risulta quindi parzialmente inefficace. Ciò è particolarmente vero per i sensori ceramici, mentre le prestazioni dei sensori capacitivi sembrano essere buone nei punti di misura. Il metodo post-posa P2, invece, ha lo svantaggio di essere più complesso, ma garantisce un posizionamento più preciso e un riempimento efficace del foro. In questo caso, però, le variazioni di rigidità dovute alla malta iniettata e al sistema post-installazione hanno mostrato una migliore risposta dei sensori ceramici ma una peggiore prestazione dei sensori capacitivi, che perdono sensibilità e non sono in

grado di percepire lievi variazioni di tensione. Le fasi di picco durante la prova sono generalmente ben rilevate da entrambi i tipi di sensori anche se una calibrazione di precisione dei sensori che mira a stimare un intervallo di allerta per le variazioni di tensione registrate non è ancora possibile in questa fase. È infatti necessario indagare ulteriormente sui materiali da utilizzare per l'iniezione del sensore post-installato per migliorare la compatibilità con la malta esistente e per ottimizzare la ridistribuzione delle pressioni sul giunto con il sensore installato. Questo è il punto fondamentale che garantisce le migliori prestazioni dei sensori. La maggiore sensibilità dei sensori capacitivi alle variazioni di pressione registrate con il primo sistema post-installazione, fornisce l'indicazione che il sensore capacitivo è abbastanza sensibile purché non vi sia una variazione improvvisa di rigidità tra la malta del giunto e quella iniettata.

Quindi, dalla suddetta sperimentazione, si può affermare che:

- I migliori risultati sono stati ottenuti nel caso dei sensori pre-installati per gli intervalli di sollecitazione più bassi. Ciò dimostra che l'impiego dei sensori ceramici e capacitivi costituisce un valido strumento per il monitoraggio delle strutture murarie di nuova costruzione;
- Sono state studiate due diverse metodologie di post-installazione, due tipi di sensori e due tipi di muratura. I risultati mostrano che entrambi i sensori utilizzati consentono la registrazione della variazione dello stato di sollecitazione, senza differenze significative per i due tipi di muratura;
- Il primo sistema di post-installazione era più semplice ma non garantiva la corretta iniezione del foro, in alcuni casi, con una risposta meno affidabile dei sensori ceramici e una buona resa dei sensori capacitivi. Il secondo sistema, invece, consentiva una migliore iniezione e installazione dei sensori ma implicava alcuni inconvenienti riguardanti le variazioni di rigidità tra la malta esistente e la malta iniettata nel giunto, con una conseguente riduzione della sensibilità per i sensori capacitivi. È quindi necessario ottimizzare i rapporti di rigidità in post-installazione, sulla base dello studio dei materiali esistenti in loco e finalizzato all'ottimizzazione delle tecniche e dei materiali utilizzati per l'iniezione, nonché un'attenta calibrazione dei sensori capacitivi alle variazioni di stato di sollecitazione nei punti di misura.

4.3 Descrizione dell'attività n.2 (Partner UniBG)

4.3.1 Sensori MEMS testati su tavola vibrante

Viene descritta in forma preliminare la prova svolta nel laboratorio di prove materiali dell'Università degli studi di Bergamo, nello specifico su tavola vibrante, con l'obiettivo di caratterizzare sensori a tecnologia MEMS sia in condizioni di vibrazioni ambientali che di input sismico. Le prove sono state condotte con una frequenza di acquisizione pari a 200 Hz.

4.3.1.1 Setup di prova

Nel setup è stato posizionato un sensore piezoelettrico sulla tavola vibrante con funzione di riferimento. Inoltre, sono stati posizionati un sensore MEMS Unibg, un MEMS sBB ed un MEMS ST rispettivamente sia sulla tavola che su modello a un grado di libertà, come riportato in Figura 4-30.

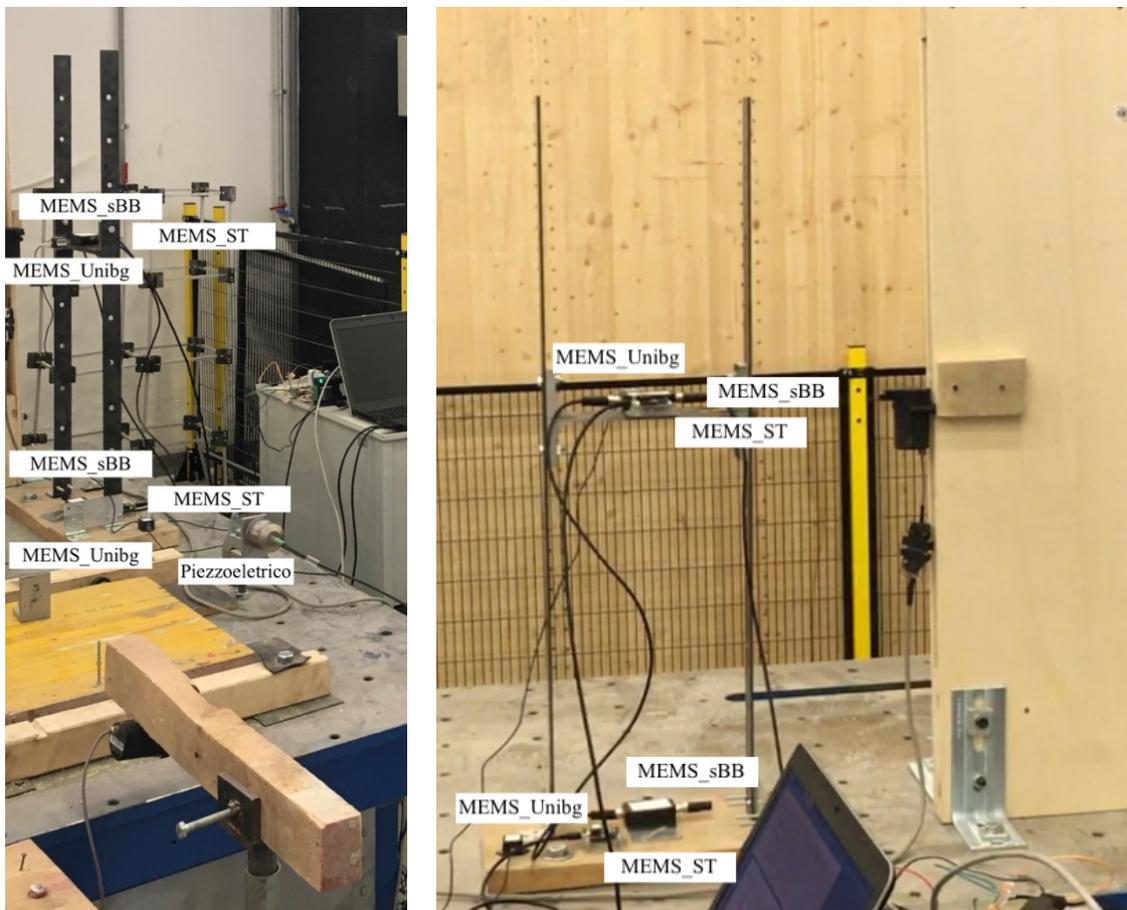


Figura 4-30. Setup di prova

4.3.1.2 Dati registrati

Vengono riportati ora i risultati principali per input sismico e vibrazione ambientale. I risultati presentati sono stati filtrati digitalmente con filtro passa basso nel range di frequenze 0 – 40Hz.

Input sismico

Per entrambi i sensori ST si nota come le accelerazioni analizzate siano fuori scala rispetto agli altri sensori e come da un'analisi in frequenza siano evidenti bande di rumore pseudo-stazionario in corrispondenza di una frequenza pari a 35 Hz. Il sensore sBB risulta meno problematico pur mantenendo in maniera meno evidente le stesse criticità appena discusse per il sensore ST.

Le problematiche emerse per il sensore ST sono dovute probabilmente alla sua elevata sensibilità a disturbi introdotti dal regolare funzionamento della tavola vibrante (dithering) che pare avere influenzato in modo particolare questo tipo di sensore. Ciò può essere associato alle micro-vibrazioni introdotte dalla servovalvola della tavola vibrante durante il suo regolare utilizzo. Micro-vibrazioni che, in una situazione reale di monitoraggio di una struttura edile o civile, non sono presenti. Per ovviare a questo inconveniente, si è deciso di installare una tavola smorzata al di sopra della tavola vibrante, la quale ha il compito di filtrare queste vibrazioni.

Quindi, sono state effettuate altre prove montando i sensori sulla tavola smorzata. Di seguito vengono riportati i plot nel dominio del tempo e delle frequenze dei segnali registrati.

I sensori hanno registrato correttamente il segnale senza riscontrare i problemi avuti nel test precedente. È anche possibile considerare come, in tutte le registrazioni, il sensore piezoelettrico (chiamato Tri_Unibg) risulti il più preciso, con rumore inferiore e di conseguenza con il segnale più pulito; perciò, da ora in avanti verrà utilizzato come riferimento di confronto con gli altri sensori, tutti MEMS. Inoltre, si evidenzia un problema con il sensore sBB_0 che presenta, in tutte le registrazioni, una componente di disturbo armonica non riconducibile ad aspetti provocati dal setup di prova bensì ad aspetti legati al sensore stesso. Infine, confrontando i sensori sBB e ST si riscontra un maggior rumore di fondo di quest'ultimi, anche se nell'ordine di pochi decibel.

Analisi dei segnali ed estrazione di indicatori

I segnali, già precedentemente filtrati con un filtro passo-basso e dopo avere eseguito un detrend, vengono allineati e tagliati per ottenere la parte significativa del segnale sismico.

L'allineamento viene eseguito utilizzando la cross-correlazione di due segnali; in pratica si utilizza la cross-correlazione tra ciascuna coppia di segnali per determinare tutti i possibili ritardi. Viene quindi calcolata la cross-correlazione incrociata normalizzata tra ciascuna coppia di segnali ed il ritardo stimato è dato dal ritardo per il quale la cross-correlazione normalizzata ha il valore assoluto più grande [1][2][3].

In Figura 4-31 viene riportata la differenza tra i segnali del primo test non allineati e allineati tramite la cross-correlazione; è importante sottolineare come l’allineamento sia stato effettuato senza ricorrere all’impulso iniziale e finale inseriti in precedenza nel segnale. Infine, pensando ad un eventuale applicazione reale, la presente tecnica risulta completamente automatizzabile.

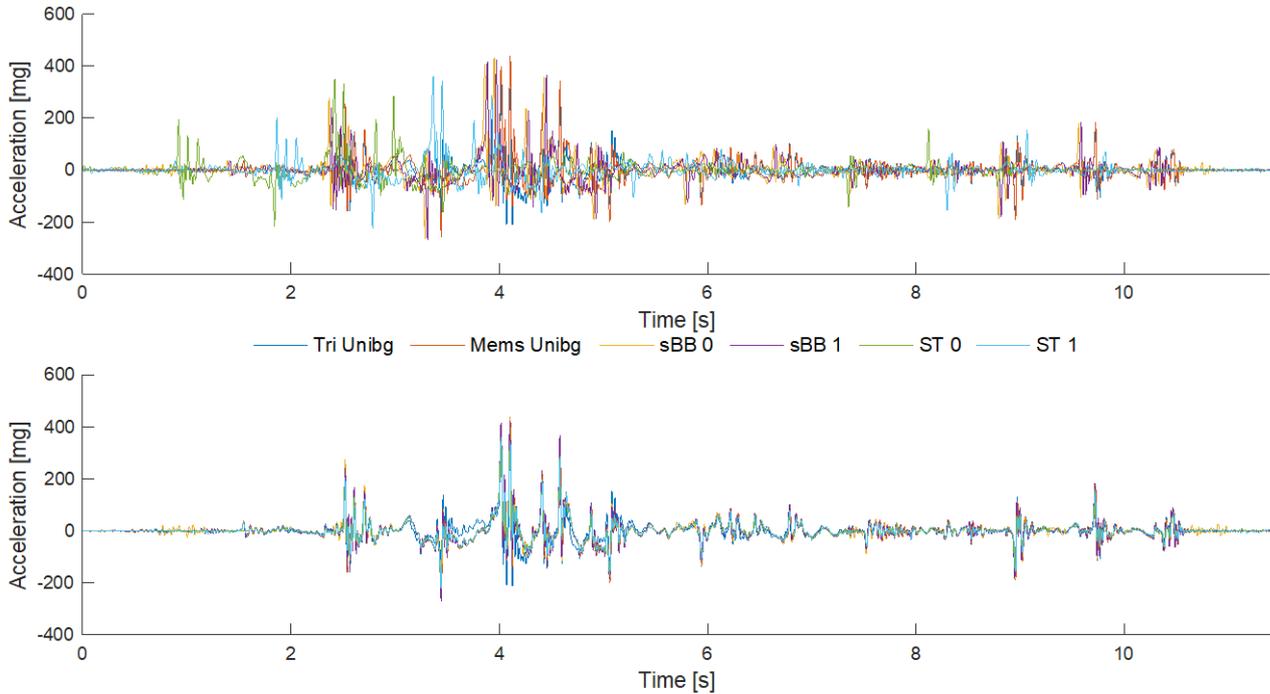


Figura 4-31. Segnali non allineati (sopra), segnali allineati (sotto) per il test 1

Ora si riportano le varie registrazione tagliate per ottenere il tratto utile di segnale sismico. Essendo riusciti ad allineare i segnali è stato possibile anche procedere ad una differenza step-by-step in cui è possibile apprezzare l’errore commesso dai vari sensori rispetto all’accelerometro piezoelettrico.

In Figura 4-32, Figura 4-33, Figura 4-34 sono riportati i rapporti tra le PGA registrate dai sensori normalizzate rispetto alla PGA registrata dal sensore Tri_Unibg. Possiamo notare come i sensori Mems_Unibg e sBB sovrastimino l’accelerazione di picco in tutte le registrazioni mentre i sensori ST la sottostimano per la registrazione a bassa entità e risultano i più precisi per quelle ad intensità maggiore. Tale risultato parrebbe opposto a quanto rilevato in Figura 4-35, Figura 4-36 e Figura 4-37, in cui i sensori ST erano i meno precisi sulla differenza step-by-step; in realtà entrambe le osservazioni possono coesistere, significa che i sensori hanno ottenuto una buona precisione per l’accelerazione di picco ma differiscono maggiormente nel corso dell’intera registrazione.

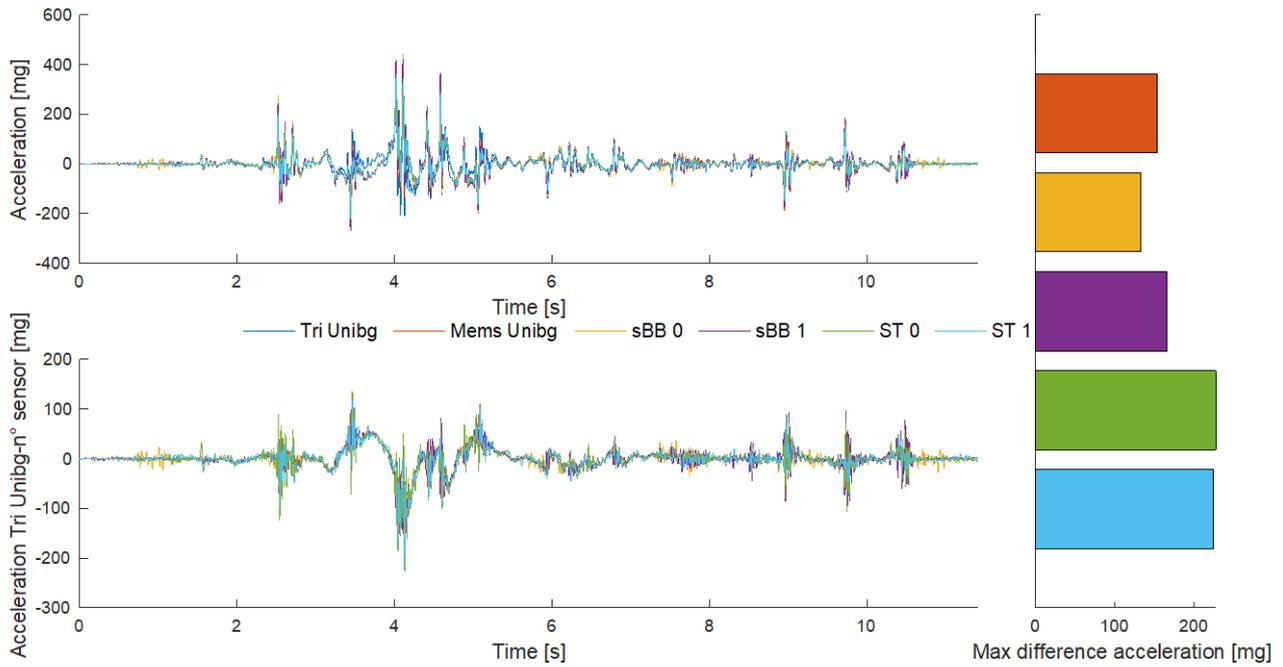


Figura 4-32. Segnali allineati (sopra) e loro differenza (sotto) per il test 1

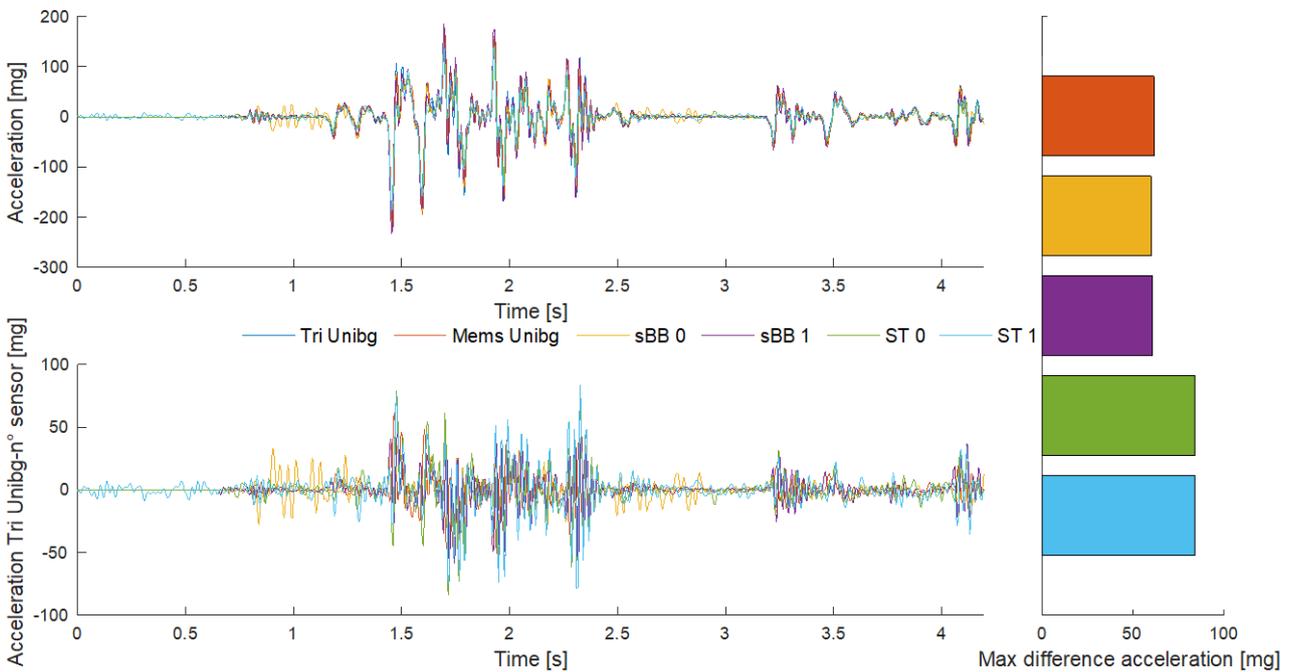


Figura 4-33. Segnali allineati (sopra) e loro differenza (sotto) per il test 2

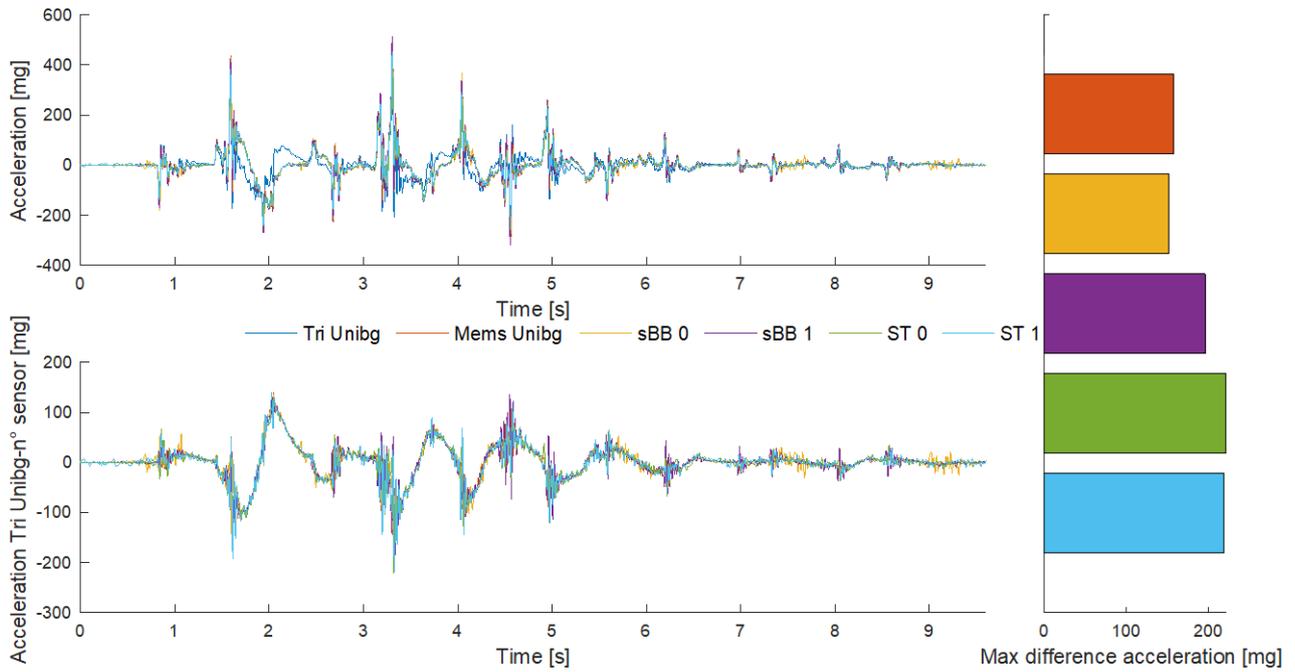


Figura 4-34. Segnali allineati (sopra) e loro differenza (sotto) per il test 3

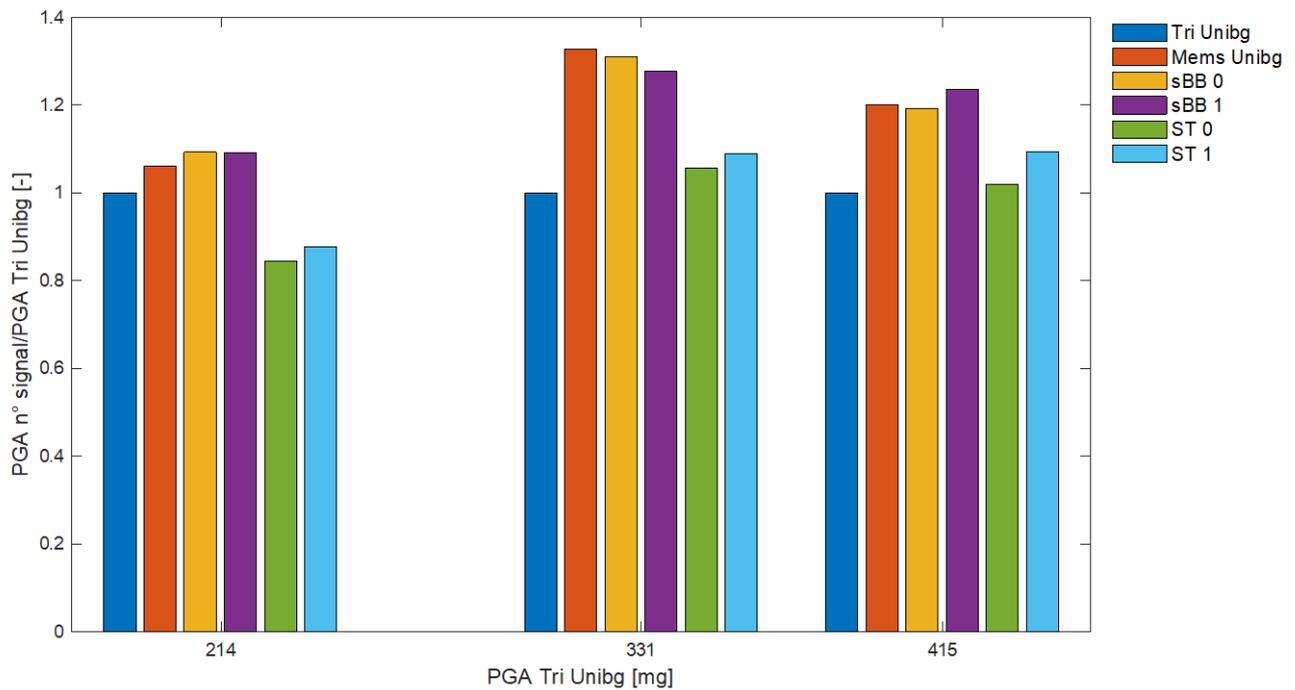


Figura 4-35. Rapporto rispetto al sensore Tri_Unibg per tutte le registrazioni

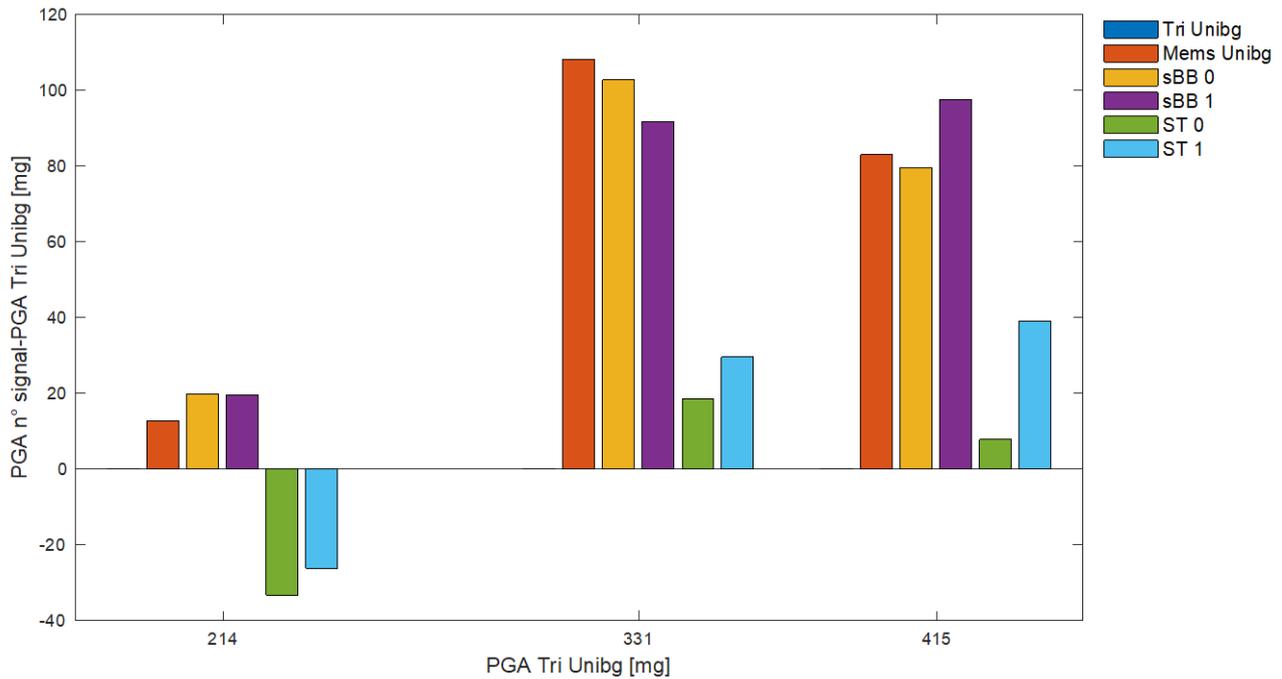


Figura 4-36. Errore assoluto rispetto al sensore Tri_Unibg per tutte le registrazioni

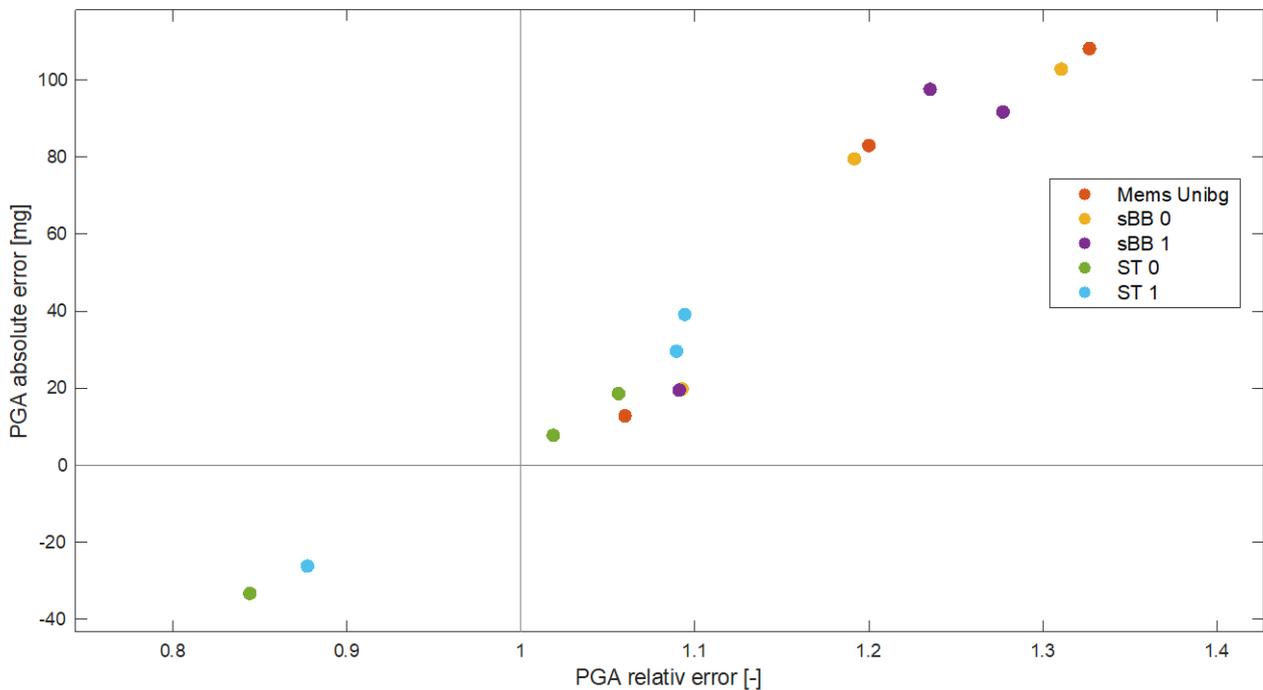


Figura 4-37. Errore assoluto in funzione dell'errore relativo rispetto al sensore Tri_Unibg per tutte le registrazioni

I grafici mostrano una corretta registrazione del segnale per tutti i sensori (va sottolineato ancora una volta il disturbo armonico presente nel sBB_0). A livello quantitativo, tutti i sensori con tecnologia MEMS testati differiscono dal piezoelettrico in maniera abbastanza simile, la differenza oscilla dai 220mg ai 70mg. Le

differenze maggiori si registrano per i test 1 e 3, segnali a più alta intensità, mentre diminuiscono per il test 2 ad intensità minore. È inoltre importante evidenziare come i sensori ST risultino i meno precisi. Con i dati attualmente in nostro possesso possiamo affermare che questo errore non sembra influenzare in maniera significativa un eventuale processo di identificazione dinamica modale sia nel dominio del tempo che delle frequenze (infatti gli spettrogrammi appaiono corretti) mentre risulta significativo nell'improntare la diagnosi strutturale tramite soglie di accelerazione in cui si potrebbe incorrere in falsi allarmi o in allarmi mancati.

È stato analizzato anche l'indice Root Mean Square (RMS) il quale si calcola nel seguente modo [4]:

$$x_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |x_n|^2} \tag{1}$$

L'indice RMS è stato calcolato per ogni sensore e per tutte le registrazioni effettuate. In Figura 4-38 è riportato normalizzato al valore calcolato per il sensore Tri_Unibg, in ascissa è riportata la PGA registrata nella specifica prova dal sensore Tri_Unibg. Si nota, in accordo a quanto visto precedentemente, come i MEMS Unibg e sBB sovrastimino mentre gli ST sottostimino soprattutto per basse PGA.

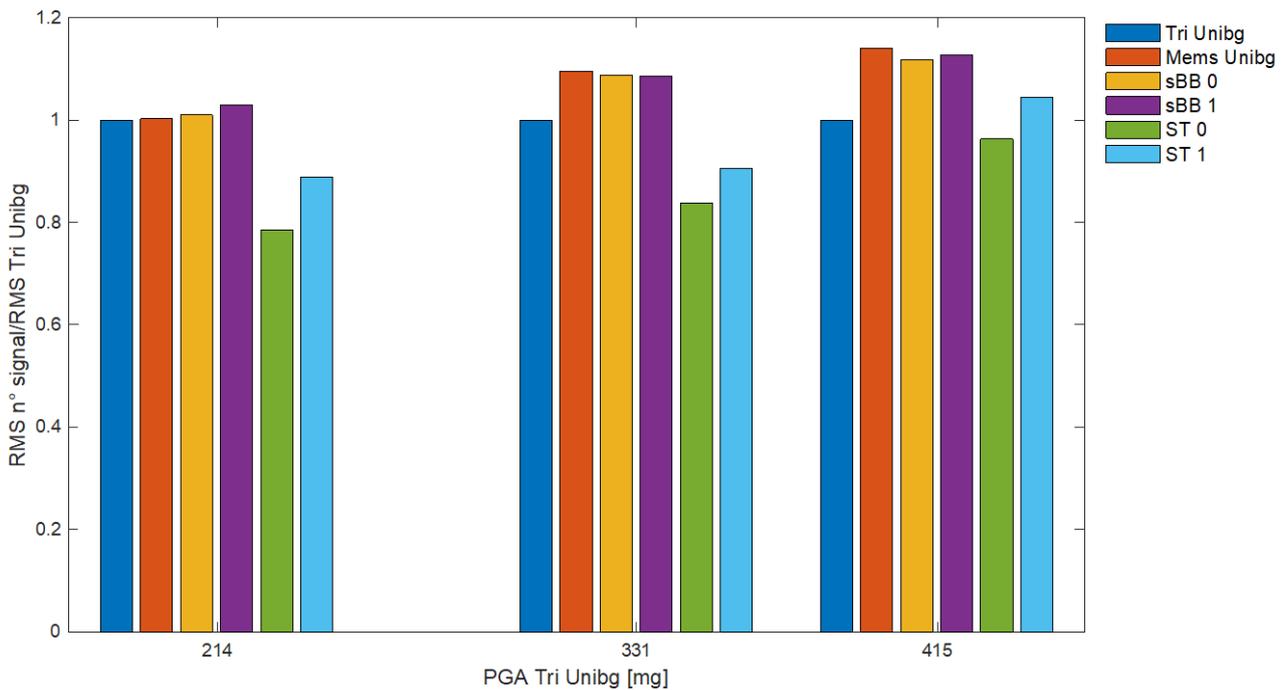


Figura 4-38. Rapporto rispetto al sensore Tri_Unibg per tutte le registrazioni

Bibliografia

[1] Orfanidis, Sophocles J. Optimum Signal Processing. An Introduction. 2nd Ed. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1996.

- [2] Buck, John R., Michael M. Daniel, Andrew C. Singer. Computer Explorations in Signals and Systems Using MATLAB. 2nd Ed. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2002.
- [3] Stoica, Petre, and Randolph Moses. Spectral Analysis of Signals. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall, 2005.
- [4] IEEE Std 181. IEEE Standard on Transitions, Pulse and Related Waveforms, 2003.

4.3.2 Test su sensori di sforzo post-installati

L'obiettivo del seguente lavoro ha riguardato i test sperimentali di sensori di pressione ceramici. L'idea è post-installarli su una trave in c.a. sottoposta a compressione costante al fine di simulare un elemento strutturale a cui viene applicato un carico assiale. L'elemento in calcestruzzo armato ha dimensioni 250x300x2500 mm.

La trave è stata ingabbiata tramite un telaio esterno in acciaio con martinetti e dadi per applicare e mantenere il carico (Figura 4-39). È stata applicata una forza di compressione baricentrica di intensità finale pari a 415.6 kN ed equivalente ad uno sforzo di compressione pari a 5.54 MPa.



Figura 4-39. Trave di prova con carico applicato

L'installazione è avvenuta tramite carotaggio di un cilindretto e successivo alloggiamento del sensore annegato in una malta a ritiro compensato specifica per ancoraggi (Figura 4-40).



Figura 4-40. Sensori post-installati

In Figura 4-41 è riportato un grafico delle letture effettuate su uno dei tre sensori nelle prime ore dopo l'installazione, in cui, si può notare l'incremento di sforzo dovuto al processo di maturazione e della fase espansiva della malta così come una successiva fase di riduzione dello sforzo dovuto al processo fisiologico di ritiro. I Risultati fin qui ottenuti, anche se preliminari, confermano la capacità del sensore nel leggere gli sforzi e di riuscire a ottenere una compressione anche se post-installato. Quest'ultima osservazione risulta di particolare importanza in quanto in questo modo sarebbe possibile leggere anche riduzioni di compressioni oltre che incrementi.

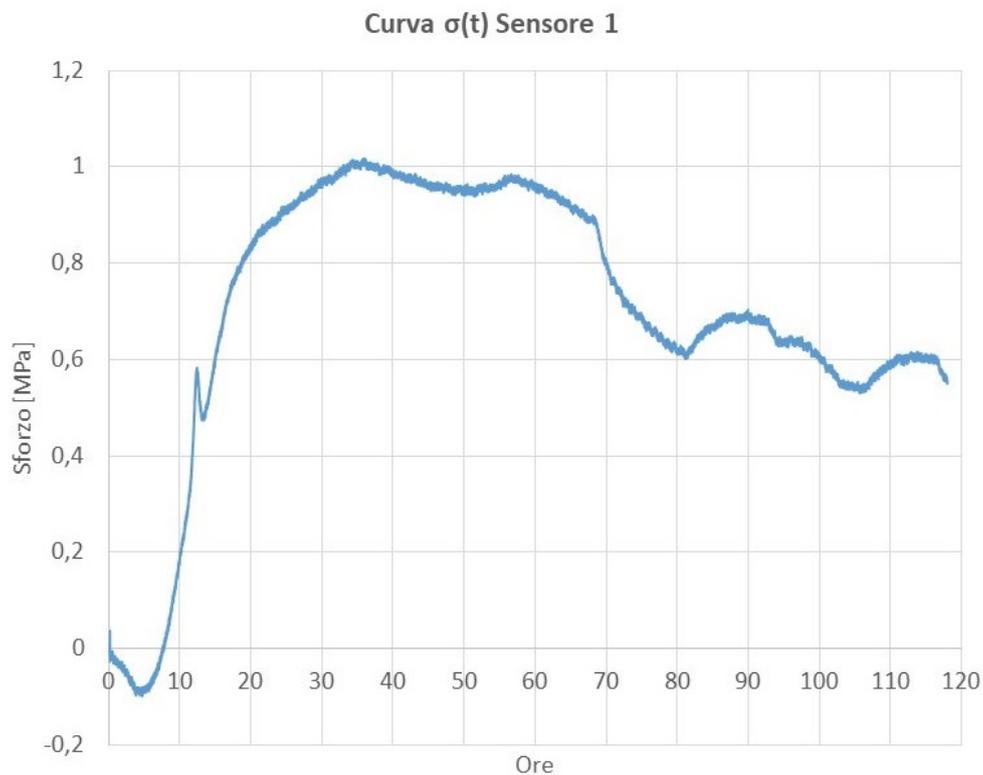


Figura 4-41. Grafico sforzo-tempo di un sensore post-installato

4.4 Descrizione dell'attività n.3 (Partner PoliTO)

4.4.1 Modellazione f.e.m. di un sensore capacitivo immerso in un solido continuo

Si è svolta una attività di modellazione f.e.m. non lineare di dettaglio di un sensore capacitivo che è stato progettato da ST Microelectronics con lo scopo di leggere le tensioni di compressione (e di debole trazione) all'interno di getti monolitici di calcestruzzo o elementi in muratura.

Tale modellazione serve ad avere predizioni numeriche su cui convalidare i risultati delle prove di carico eseguite presso l'Università di Palermo e L'Università di Napoli.

Per l'utilizzo in strutture di cemento armato, il sensore viene collocato all'interno dei casseri, prima del getto delle strutture in calcestruzzo vincolandolo opportunamente alla gabbia di armatura.

Nelle strutture in muratura il sensore è collocato all'interno dei corsi di malta tra un mattone e l'altro, durante la costruzione.

Il sensore è costituito da un disco di diametro di 40 mm costituito da più strati di materiali diversi (si veda Figura 4-42), i cui spessori sono elencati di seguito:

- Una board di FR4:
 - Rame - 35 μm
 - FR-4 - 800 μm
 - Rame - 35 μm
- Un foglio di Kapton- 25 μm
- Una seconda board di FR4:
 - Rame- 35 μm
 - FR-4- 800 μm
 - Rame- 35 μm

A partire dall'asse di rotazione e andando in direzione radiale si trova una zona di discontinuità tra 10.5 mm e 15.5 mm in cui è assente il rame che costituisce l'armatura interna della board (si veda Figura 4-42). Tale zona divide la parte sensibile del sensore (interna) dalla parte esterna non usata per le misure in quanto soggetta a effetti di perturbazione dovuti alla discontinuità tra sensore e materiale ospitante.

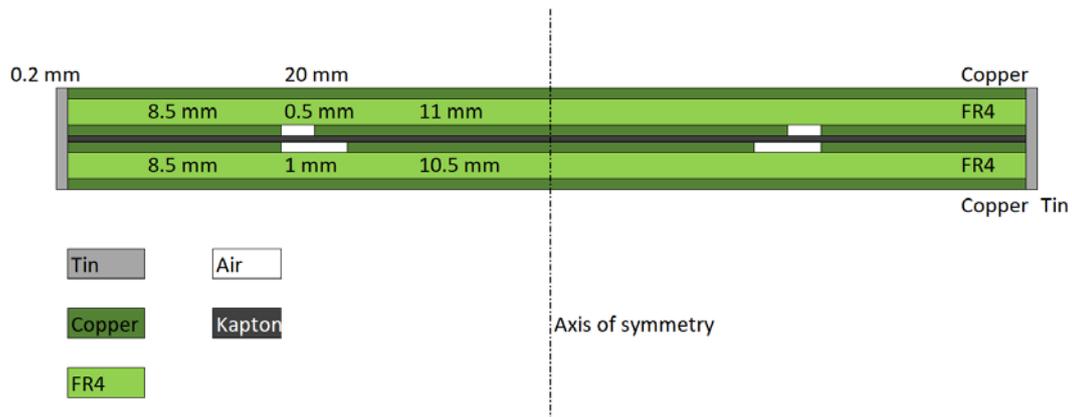


Figura 4-42. Geometria sensore capacitivo

Nel modello agli elementi finiti, il sensore è considerato immerso in un cilindro di malta (o di calcestruzzo) con diametro di 15 cm e altezza di 30 cm. Il modello è stato creato utilizzando una geometria assialsimmetrica la cui mesh è mostrata in Figura 4-43.

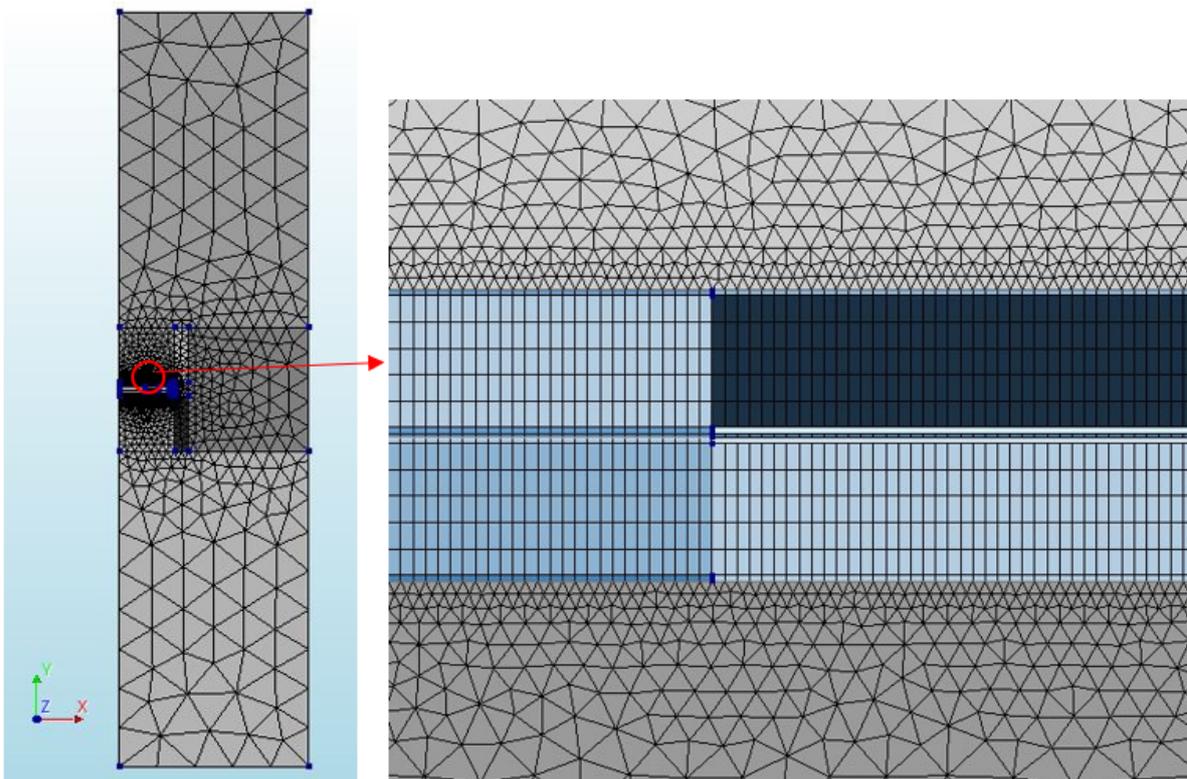


Figura 4-43. Mesh sensore capacitivo all'interno di un cilindro di malta (o calcestruzzo)

Si sono svolte numerose simulazioni f.e.m., a partire dalle più semplici per arrivare alle più complesse, per testare la risposta del sensore e fornire un background teorico all'interpretazione dei dati ricavati in laboratorio:

1. Modello con proprietà elastiche di tutti i materiali (modulo elastico del cls = 20 GPa)

2. Modello con proprietà elastiche di tutti i materiali (modulo elastico del cls = 30 GPa). Dal confronto con i risultati del primo modello si può apprezzare l'effetto della rigidità del materiale ospitante sulle letture del sensore.
3. Modello con proprietà elastiche di tutti i materiali (modulo elastico del cls = 30 GPa) ma con malta (cls) in grado di fessurare. Dal confronto con i risultati del secondo modello si può apprezzare l'effetto della fessurazione del materiale ospitante sulle letture del sensore.
4. Modello con proprietà elastiche di tutti i materiali costituenti il sensore, con modulo elastico del cls = 30 GPa, con malta (cls) in grado di fessurare e comportamento viscoso (creep). Dal confronto con i risultati del terzo modello si può apprezzare l'effetto della viscosità (creep) del materiale ospitante sulle letture del sensore.
5. Modello analogo al 4°, ma con l'introduzione del ritiro del calcestruzzo.

Il carico applicato alle facce superiore e inferiore del cilindro di malta (cls) è variabile da 0 a 10 MPa in compressione per tutti i modelli.

4.4.2 Risultati dell'attività n.3 (PoliTO)

Modello 1

La parte sensente del sensore, evidenziata nell'ellisse rosso in Figura 4-44, è soggetta a tensioni di compressione quasi uniformi e pari a quelle applicate sul provino in calcestruzzo. La misura della compressione del Kapton può quindi risultare essere un parametro affidabile per stimare il carico applicato sul provino.

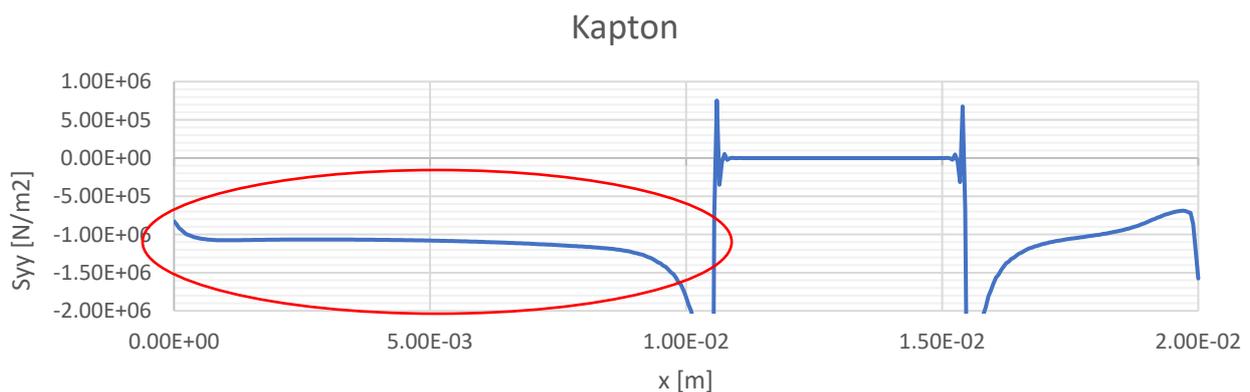


Figura 4-44. Tensioni ortogonali alla faccia del sensore

Modello 2

Al variare della rigidità del calcestruzzo, la parte sensente del sensore, evidenziata nell'ellisse rosso in Figura 4-45, è soggetta a tensioni di compressione quasi uniformi, pari a quelle applicate sul provino in calcestruzzo. La risposta del sensore sembra rispondere soltanto al carico e non alla rigidità del materiale ospitante, come richiesto in progetto al sensore.

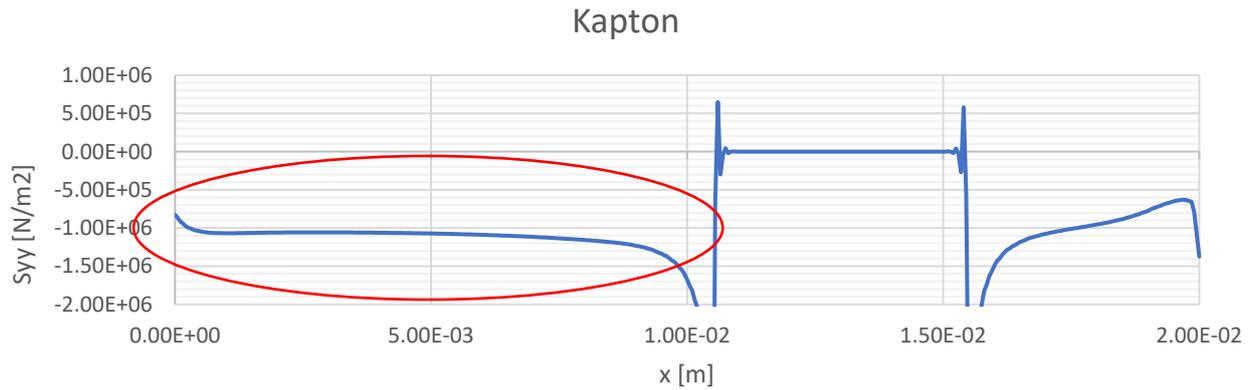


Figura 4-45. Tensioni ortogonali alla faccia del sensore

Modello 3

Quando il carico ortogonale alle facce del sensore supera i 4 MPa si formano delle micro-fessure, che a 10MPa di carico ortogonale hanno la forma mostrata in Figura 4-46.

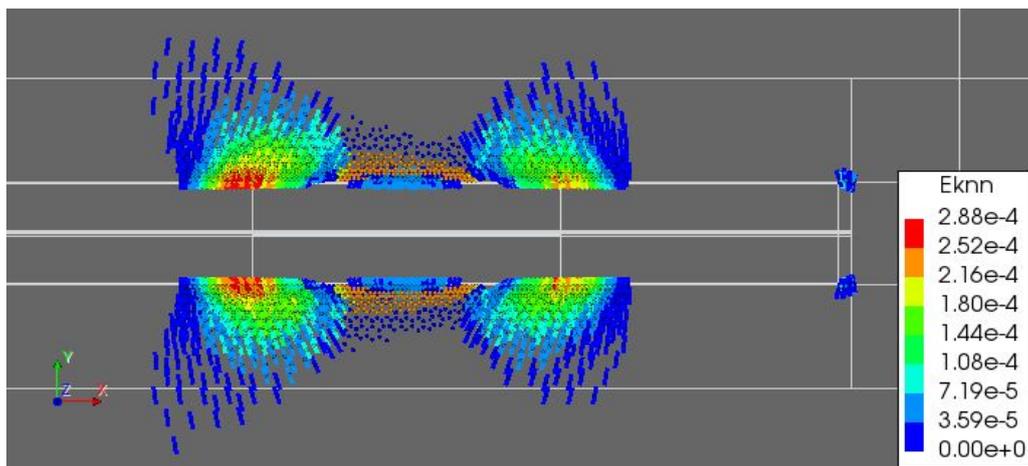


Figura 4-46. Stato fessurativo a 10 MPa

Le micro fessure si concentrano in prossimità delle zone di discontinuità del rame visibili in Figura 4-42 e ingrandite in figura Figura 4-46. La presenza di queste micro-fessure interessa un intorno molto piccolo del sensore (circa un millimetro quadrato di calcestruzzo) e non altera la misura.

La nascita di queste micro-fessure riduce le trazioni radiali presenti nella malta in prossimità dell'asse del sensore, come mostrato in Figura 4-47, ma non cambia le tensioni ortogonali già mostrate in Figura 4-45. La fessurazione non sembra quindi costituire un problema per le misure.

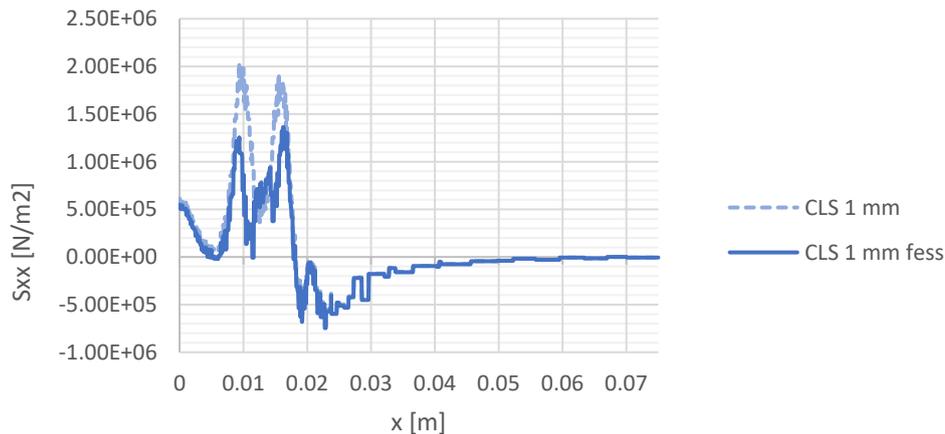


Figura 4-47. Tensioni radiali a 1 mm di distanza dalle facce del sensore

Modello 4

Il materiale ospitante il sensore, sia esso calcestruzzo o malta, ha un comportamento reologico, ovvero le sue deformazioni crescono a carico costante, se il carico rimane applicato per lungo tempo.

La lettura del sensore deve invece rimanere costante se il carico rimane costante. La variazione della capacità del sensore dipende dall'avvicinarsi delle armature e quindi dalla deformazione del kapton in direzione ortogonale alle armature, che deve rimanere costante nel tempo.

In Figura 4-48 e in Figura 4-49 si mostrano le deformazioni del Kapton sotto un carico applicato al provino di 10 MPa, a tempo zero e dopo 4 anni. Si può osservare che nella zona senziante (evidenziata in rosso) le deformazioni non cambino in modo rilevante a causa della viscosità.

Si può quindi ritenere che il comportamento viscoso del calcestruzzo o della malta costituisca solo un lieve disturbo alla misura. Si noti che la viscosità applicata sul provino in 4 anni è pari a quella riscontrabile sulle strutture reali in più di 25 anni di vita.

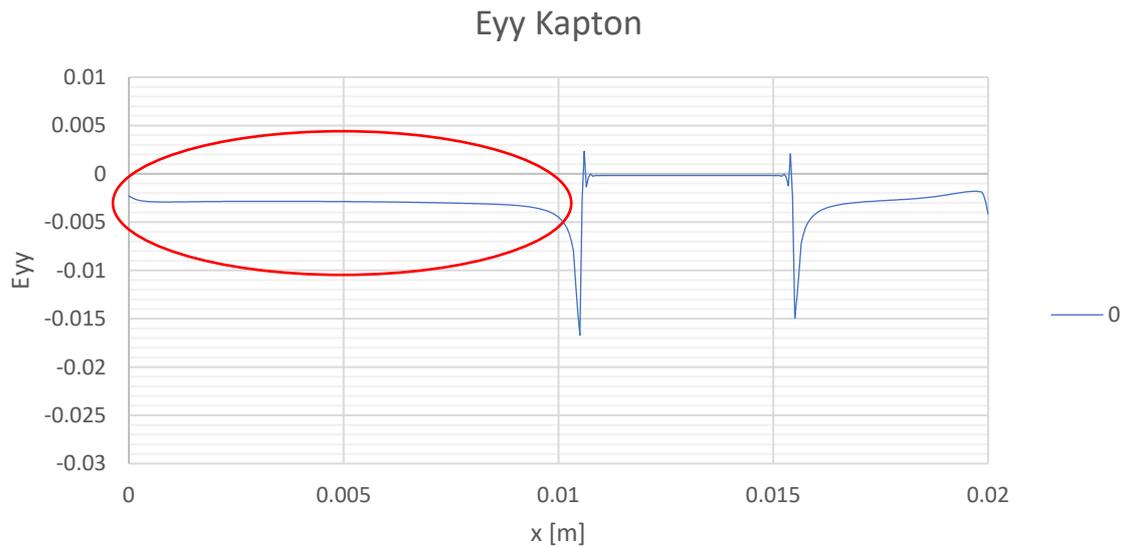


Figura 4-48. Deformazioni ortogonali alla faccia del sensore immediatamente successive all'applicazione del carico

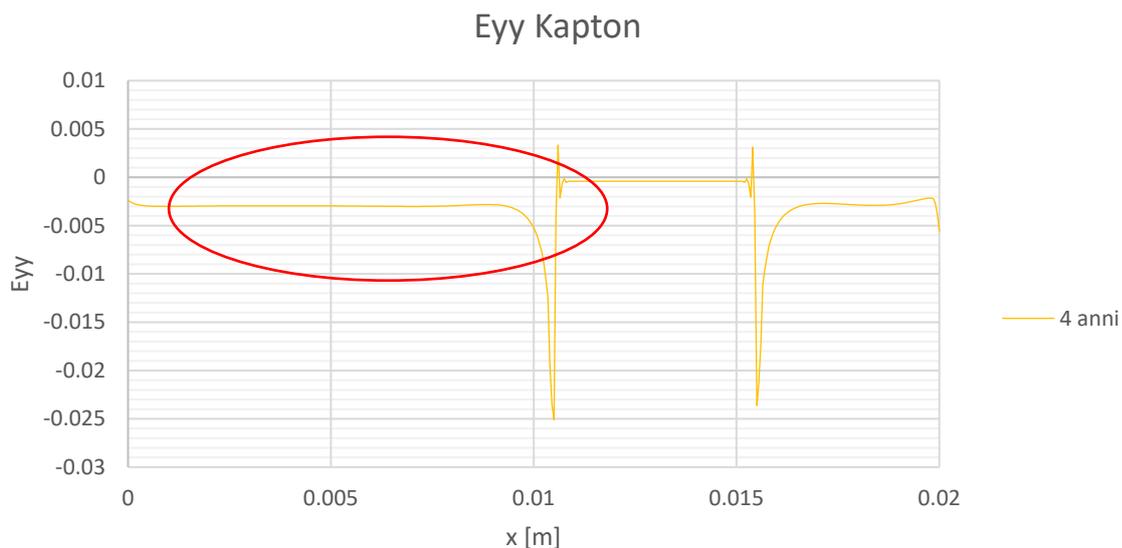


Figura 4-49. Deformazioni ortogonali alla faccia del sensore dopo 4 anni

Modello 5

Il ritiro del calcestruzzo genera sul sensore principalmente uno stato di compressione in direzione radiale. Tale coazione riduce di circa il 10% le deformazioni ortogonali alle facce del sensore nel Kapton, che governano la misura del sensore stesso (come visibile in Figura 4-50 nell'area evidenziata in rosso).

Si può quindi concludere che sia il fluage che il ritiro possono alterare la misura del sensore di una quantità pari all'effetto di 1 MPa di pressione applicata, che potrebbe essere una tolleranza accettabile per l'utilizzo dello strumento.

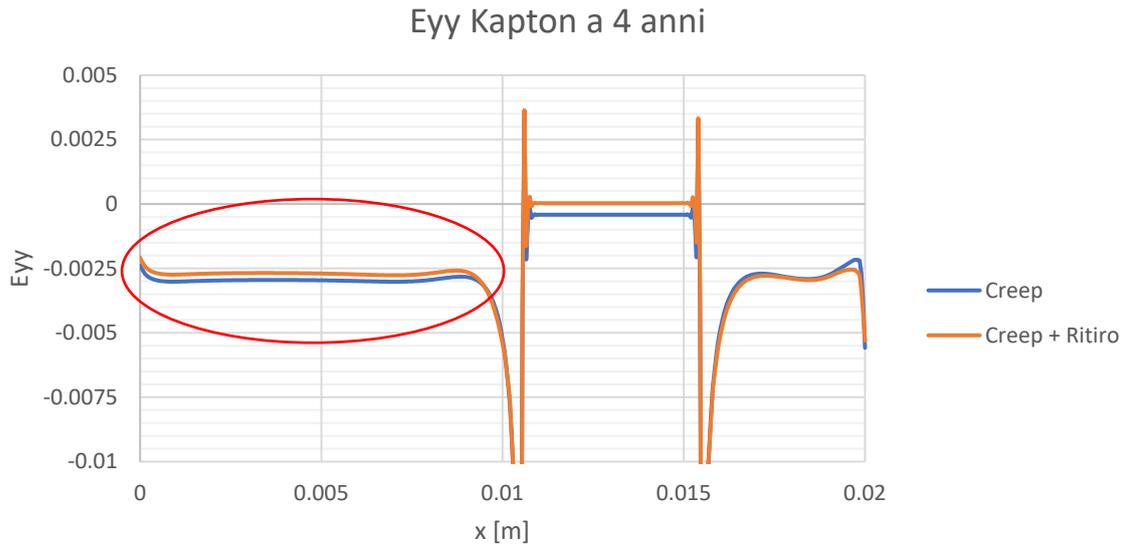


Figura 4-50. Deformazioni ortogonali alla faccia del sensore dopo 4 anni, effetto del ritiro

4.5 Descrizione dell'attività n.4 (Partners UniNA, STMicroelectronics, Mapei)

In collaborazione tra UniNA, STMicroelectronics e Mapei, si sono svolte alcune attività di monitoraggio su strutture in cemento armato presso i laboratori dell'Università di Napoli Federico II ubicati nelle sedi di Fuorigrotta e di San Giovanni a Teduccio.

Le sessioni di misura sono state diverse e articolate in funzione dei provini da testare, ovvero telai e pilastri in c.a. I test hanno riguardato il funzionamento di due tipologie di sensori: i sensori di tipo ceramico (indicati come CSS, Ceramic Stress Sensor) e quelli di tipo capacitivo (indicati come CPS, Capacitive Pressure Sensor).

Durante il periodo del progetto INSIST sono state effettuate le seguenti campagne di acquisizioni:

- settembre 2020 – Test pseudo-dinamico su telaio in c.a. con sensori pre-installati;
- gennaio-febbraio 2021 – Test pseudo-dinamico su telaio in c.a. con sensori pre-installati;
- aprile-maggio 2021 – Test di compressione centrata ed eccentrica su 2 pilastri in c.a.

4.5.1 Prove pseudo-dinamiche su telai in cemento armato in scala reale

Tra settembre 2020 e febbraio 2021, presso il laboratorio di San Giovanni a Teduccio di UniNA sono stati eseguiti dei test su due telai in c.a. con tamponatura in mattoni forati. L'obiettivo di tali test è stato quello di simulare gli effetti del terremoto dell'Aquila del 2009. Ciascuna delle due pilastrate del telaio è stata sottoposta ad un carico assiale in sommità pari a 300 kN, mediante l'impiego di martinetti idraulici; due attuatori servo-controllati e montati orizzontalmente fra la parete di contrasto ed il telaio hanno simulato, invece, le azioni inerziali prodotte dallo scuotimento sismico. Il sistema di monitoraggio realizzato da STMicroelectronics ha

previsto l'installazione, su ciascun telaio, di 12 sensori di pressione collegati a 5 nodi ed è stato monitorato il comportamento della struttura come mostrato in Figura 4-51.

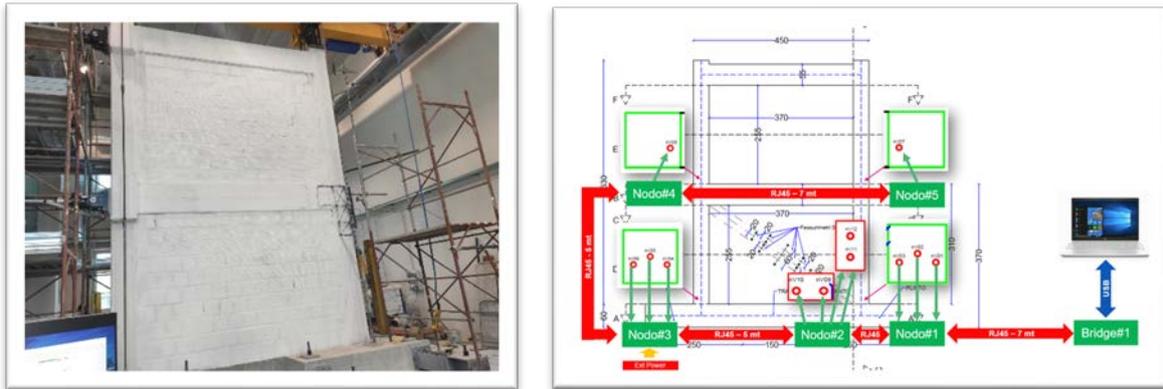


Figura 4-51. Telaio in c.a. in scala reale sottoposto a prova pseudo-dinamica e schema di monitoraggio

Anche in questo caso l'acquisizione dei valori capacitivi è stata effettuata attraverso il software di acquisizione basato su GUI dedicata (sviluppato da STMicroelectronics e descritto nel report dell'OR1) tramite PC collegato al bridge.

Il personale STMicroelectronics ha seguito le attività di settembre (primo telaio) in presenza mentre, a causa delle restrizioni Covid-19, le attività svolte a gennaio/febbraio 2021 (secondo telaio) sono state supervisionate da remoto inviando ad UniNA tutto l'occorrente, hardware e software, per acquisire i dati, dando supporto con meeting da remoto per tutta la durata delle prove.

Il telaio realizzato è l'esatta copia di una porzione di edificio di L'Aquila danneggiato dal sisma del 2009. La prova è stata svolta in modo da simulare gli effetti del terremoto dell'Aquila. Su ciascun telaio sono state eseguite diverse prove facendo amplificando di volta in volta gli spostamenti imposti, da valori che simulano il 10% del sisma fino al 150%.

Oltre alla strumentazione tradizionale sul telaio sono stati installati 12 sensori capacitivi, di cui 3 alla base di uno dei due pilastri del primo ordine e 3 sensori alla base dei pilastri del secondo ordine. Altri 6 sensori sono stati installati in corrispondenza dell'interfaccia tra il cemento armato e la tamponatura come mostrato in Figura 4-51.

4.5.1.1 Installazione sensori

I sensori capacitivi disposti sono dotati di una staffetta in posizione centrale su entrambe le facce, esse servono a migliorare l'aderenza con il calcestruzzo in modo da consentire al sensore di misurare anche deformazioni di tensione. La presenza della staffetta se da un lato fornisce al sensore la capacità di essere efficace anche in trazione dell'altro crea qualche problema in fase di installazione. Poter poterli installare alla base dei pilastri, è stato necessario realizzare un foro sulla fondazione in modo da creare una sede per la staffetta, quindi, prima di mettere in opera il sensore è stata posata della malta di allettamento e successivamente è stato alloggiato il sensore facendo attenzione a far entrare la staffetta nel foro realizzato, che al momento della posa del sensore

non risulta più visibile per la presenza della malta di allettamento. Una volta alloggiati, i sensori sono stati fissati disponendo dei piccoli tasselli in corrispondenza degli anellini presenti sul bordo dei sensori, questo per evitare che in fase di getto si possano spostare. Il cavo di collegamento resta annegato nel calcestruzzo così com'è, solamente per la parte che attraversa il cassero è stata predisposta una guaina di protezione in modo che al momento del disarmo non ci sia il rischio che il cavo venga strappato via dal cassero.

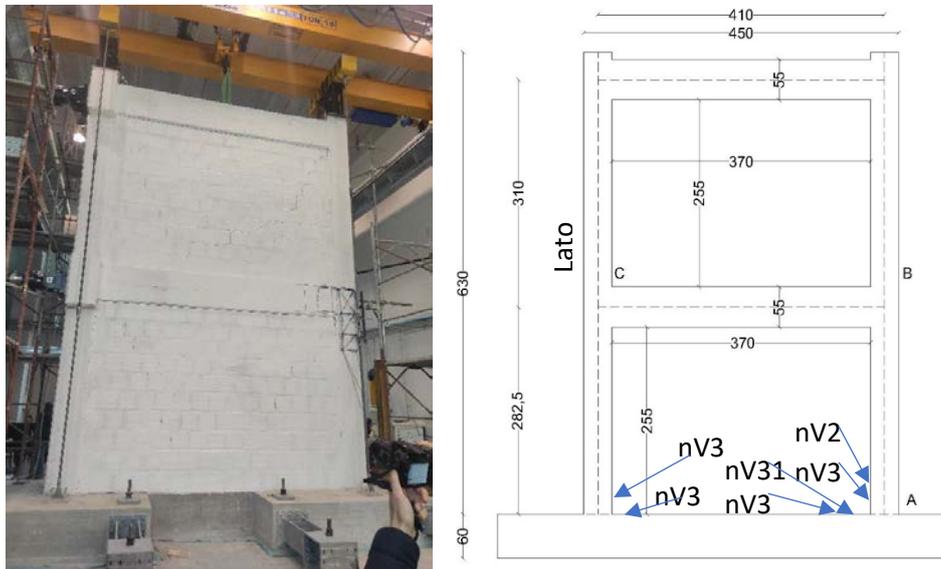


Figura 4-52. Setup di prova

L'installazione dei sensori sull'interfaccia cemento – tamponatura è stata leggermente più complicata. Una delle due staffette di ciascun sensore è stata alloggiata in un foro realizzato sulla fondazione per i sensori disposti orizzontalmente e sul pilastro per quelli disposti verticalmente, la staffetta sulla faccia opposta, invece, è stata alloggiata nel laterizio della tamponatura. Anche nel laterizio sono stati realizzati i fori per ospitare le staffette e, in questo caso, prevedere l'esatta posizione della staffetta è stata un'operazione che ha richiesto un po' di attenzione.

Sono stati realizzati 2 telai gemelli, il primo è stato realizzato nel mese di Luglio 2020 ed è stato sottoposto a prova nel mese di Ottobre 2020. Subito dopo la prova di Ottobre il telaio è stato demolito e ricostruito sempre nel mese di Ottobre 2020, nei giorni 21, 26 Ottobre e 3 Novembre sono stati installati i sensori.



Figura 4-53. Installazione sensori alla base dei pilastri

4.5.1.2 *Acquisizione segnali*

Per l'acquisizione dei segnali è fatta attraverso un software che si occupa di registrare i valori della capacità (pF) al passare del tempo, ogni acquisizione viene fuori dalla media di 4 segnali campionati con una frequenza di 16 acquisizioni al secondo. La frequenza di campionamento risulta quindi di 4 acquisizioni al secondo. Per connettere i sensori al computer essi sono stati collegati ad una scheda di acquisizione che può ospitare fino a 4 sensori, le diverse schede che sono state necessarie per collegare tutti i sensori sono state a loro volta collegate ad una centralina che comunica con il computer attraverso un collegamento USB.

Il primo telaio è stato sottoposto a prova nei primi giorni di Ottobre 2020, per il secondo telaio sono state acquisite le prove al 100% e al 125% svoltesi il 18/12/2020. Successivamente è stata demolita la tamponatura ormai completamente danneggiata dalle prove e ricostruita, in questa fase i sensori nella tamponatura sono andati distrutti dalle operazioni di demolizione.

Dal 26/01/2021 al 29/01/2021 è stato eseguito un altro ciclo di prove, in questo caso sono stati acquisiti dati dei sensori rimasti, che sono solamente quelli alla base dei pilastri.

4.5.1.3 *Conversione segnali*

Il sensore capacitivo è in sostanza un condensatore composto da due piastre parallele tra le quali è presente un materiale dielettrico. La cui capacità del condensatore è inversamente proporzionale alla distanza tra le piastre e direttamente proporzionale all'area delle piastre come suggerito dall'equazione 1.

Il software di acquisizione permette di acquisire la capacità del sensore con una frequenza di 4 acquisizioni al secondo. (Figura 4)

Attesa la proporzionalità della capacità misurata dal sensore con la distanza tra le piastre, la grandezza ingegneristica più facilmente correlabile con i dati acquisiti è certamente la deformazione (ϵ).

Per poter stabilire una correlazione tra i dati acquisiti e la deformazione subita dal calcestruzzo nei punti dove sono disposti i sensori sono state messe a confronto le misure registrate con la strumentazione tradizionale (Figura 5) ed è stata eseguita una regressione ai minimi quadrati adottando quale modello di regressione un polinomio di 5° grado (Equazione 2) i cui coefficienti sono indicati in Tabella 4-8.

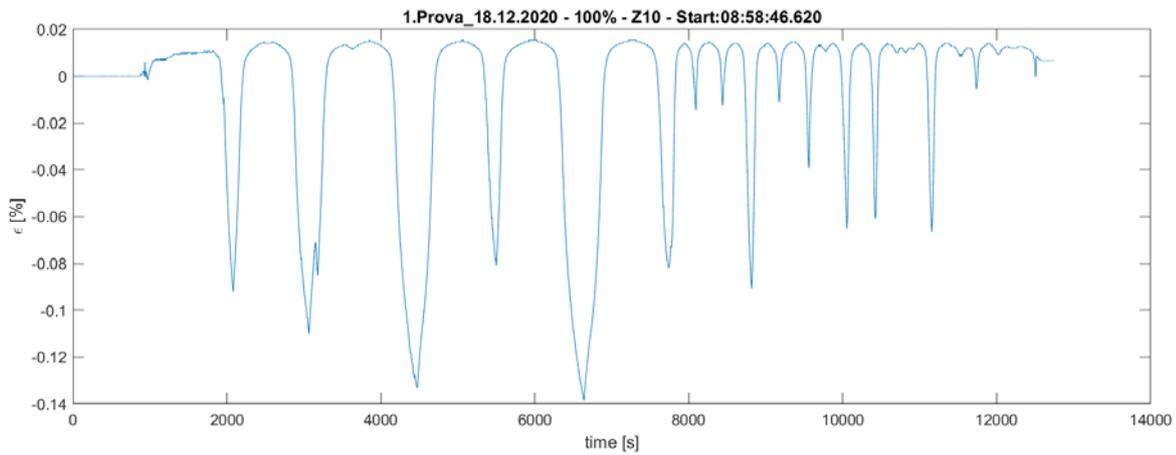


Figura 4-54. Segnale acquisito

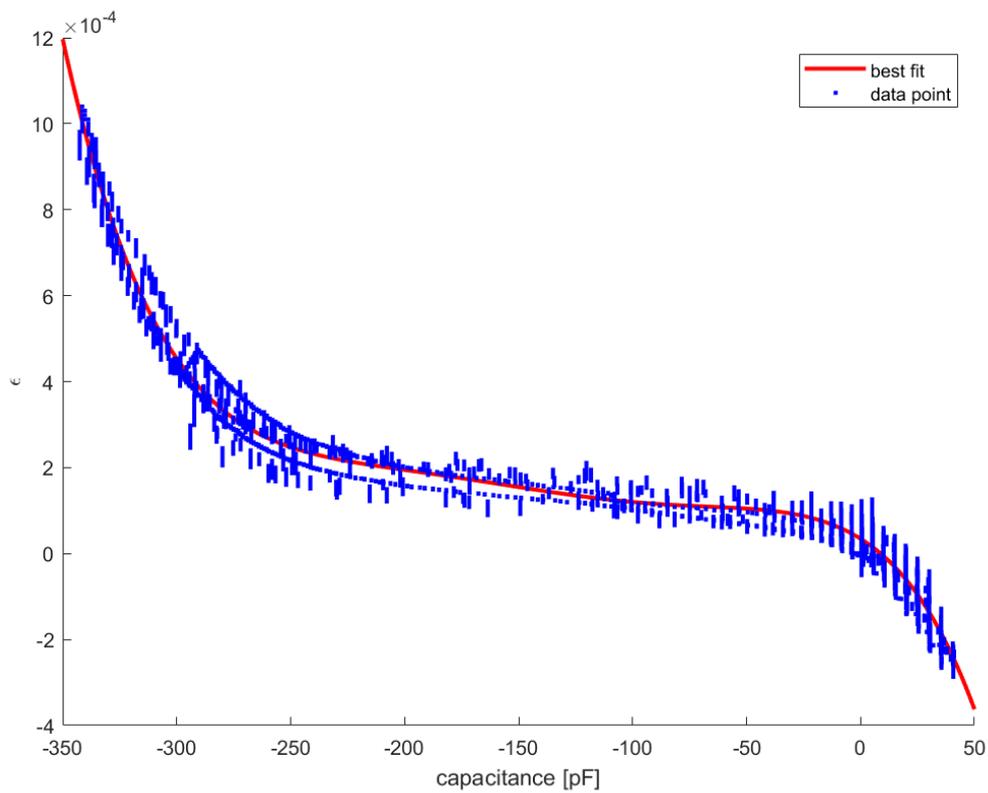


Figura 4-55. Correlazione tra segnale e deformazione

$$\epsilon = p_1 \cdot C^5 + p_2 \cdot C^4 + p_3 \cdot C^3 + p_4 \cdot C^2 + p_5 \cdot C + p_6 \quad (2)$$

Tabella 4-8. Coefficienti del polinomio

p_1	p_2	p_3	p_4	p_5	p_6
-2.94e-15	-2.06e-12	-5.32e-10	-6.02e-08	-3.32e-06	3.44e-05

Dalla regressione è risultato un coefficiente di determinazione (R^2) pari a 0.975, infatti la sovrapposizione del diagramma tempo-epsilon misurato dalla strumentazione tradizionale e quello tempo-epsilon ottenuto convertendo i segnali acquisiti dai sensori capacitivi mostra una somiglianza quasi perfetta (Figura 4-56).

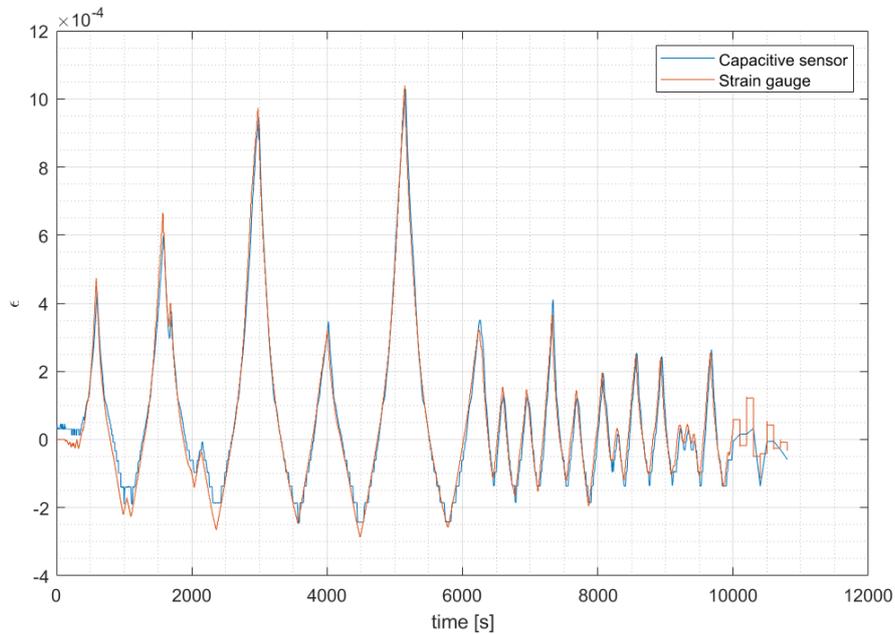


Figura 4-56. Confronto sensori capacitivi con tradizionali

4.5.1.4 Sensori nella tamponatura

Sfruttando la versatilità dei sensori capacitivi si è cercato di misurare l'entità dell'azione di compressione presente nel puntone diagonale che si crea nella tamponatura in presenza di azioni orizzontali.

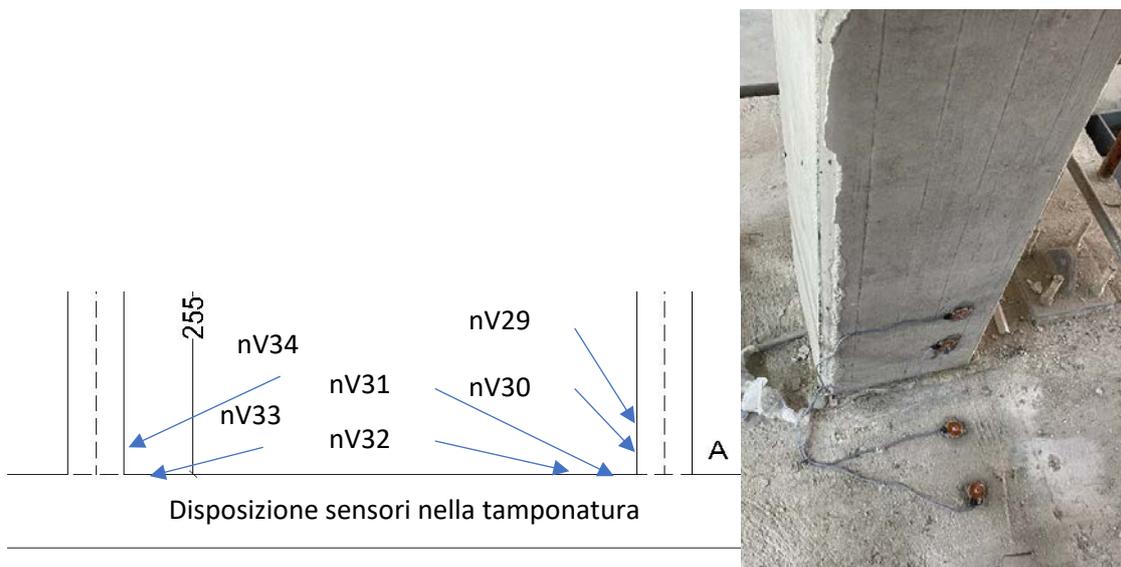


Figura 4-57. Installazione sensori nella tamponatura

I segnali acquisiti dai sensori disposti all'interfaccia tra il cemento armato e la muratura sono stati convertiti in deformazioni adottando la correlazione illustrata in precedenza. Successivamente per ognuno dei due lati del telaio delle deformazioni acquisite da ogni sensore è stata valutata la componente in direzione della diagonale del pannello murario e ne è stata valutata la risultante. La deformazione risultante è stata poi convertita in tensione adottando il modulo di Young della muratura e le tensioni che ne sono derivate sono poi state integrate sull'area interessata dai puntoni.(Figura 8)

Il risultato è stato un diagramma tempo-sforzo normale che indica come si evolve nel tempo lo sforzo normale dei due puntoni diagonali nella muratura (Figura 9).

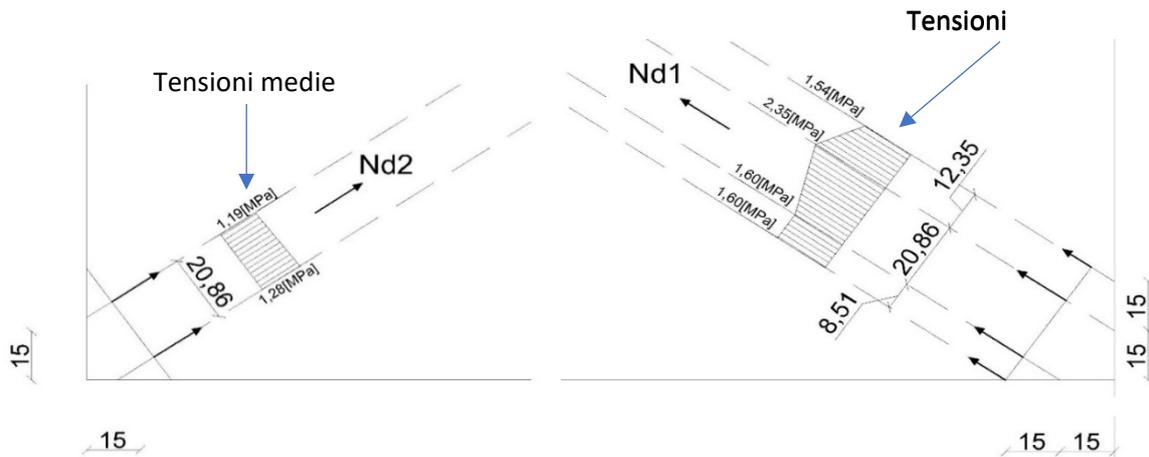


Figura 4-58. Schema delle tensioni nella tamponatura

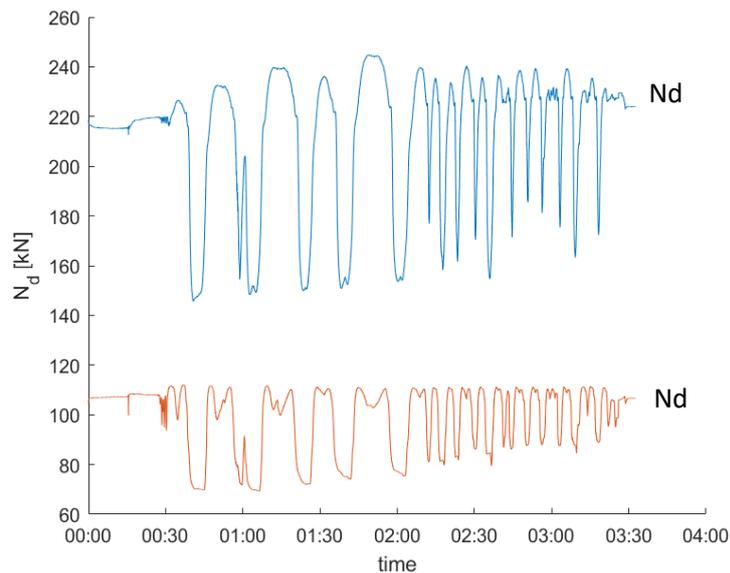


Figura 4-59. Andamento temporale dello sforzo normale nei puntoni

4.5.2 Prove di compressione centrata ed eccentrica su pilastri in cemento armato

Nel periodo aprile/maggio 2021 presso i laboratori di UniNA sono stati eseguiti dei test su due pilastri in c.a., ciascuno dei quali aveva pre-installato due tipologie di sensori sottoposti a compressione semplice. In particolare, sono stati testati i sensori di tipo ceramico (SC) e quelli di tipo capacitivo (SP). I pilastri sono stati identificati come “Provino 1” e “Provino 3”, e in ognuno sono stati pre-installati 4 sensori di pressione ceramici (Sez.1 – Figura 4.60) e 4 capacitivi (Sez.2 – Figura 4.60).

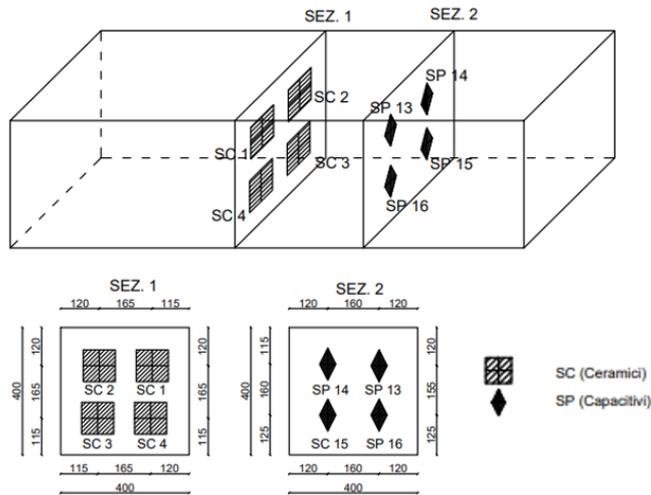


Figura 4-60. Pilastri testati presso UniNA, con schema in sezione dell’installazione dei sensori

I sensori, prima del getto, sono stati fissati in fase di sistemazione dell’armatura e sono stati posti nelle due sezioni, come mostrato in Figura 4.61.



Figura 4-61. Armatura del “Provino 3” e vista delle due tipologie di sensori installati

La sezione relativa ai sensori capacitivi è stata acquisita con una scheda nodo stand-alone (descritta nel report dell’OR1) collegata tramite bus-can ad una scheda nodo in configurazione bridge che acquisiva e inviava i dati al PC tramite porta USB. I dati sono stati memorizzati tramite la GUI dedicata sviluppata da STMicroelectronics.

Nella Figura 4-62 è riportato, invece, lo schema di acquisizione relativo al provino 3 effettuato a maggio 2021.

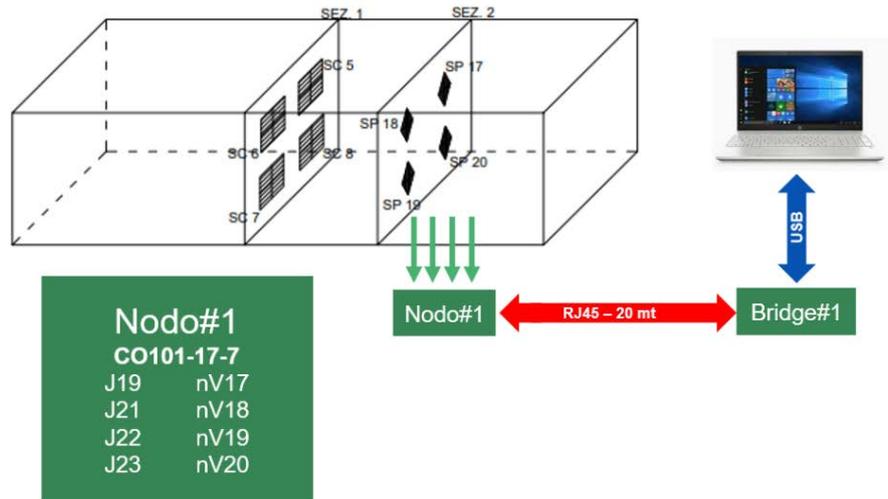


Figura 4-62. Schema di acquisizione “Provino 3”

In Figura 4-63, infine, sono mostrati alcuni screenshot catturati durante le fasi di acquisizione dei dati, grazie alla modalità di real-time plot della GUI.

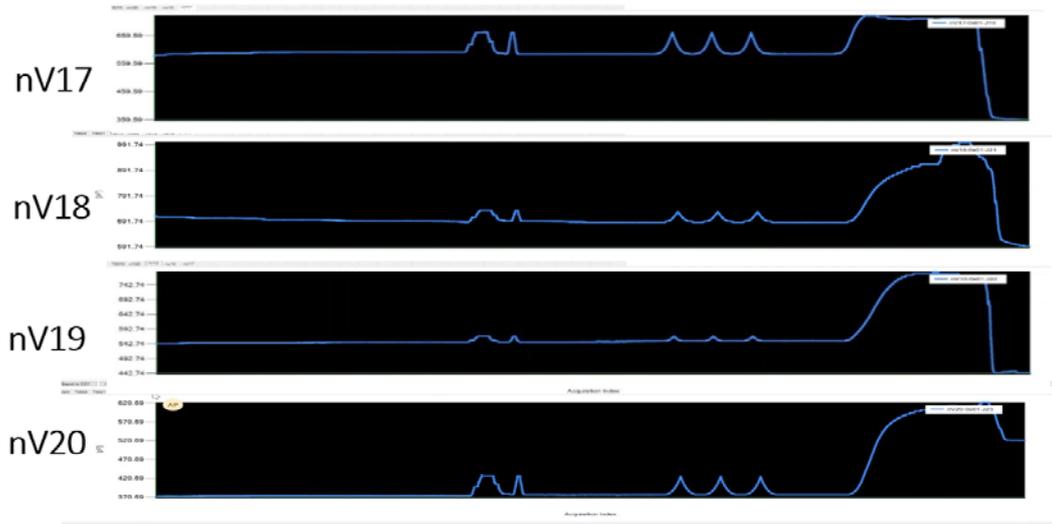


Figura 4-63. Comportamento dei sensori durante il test su “Provino 3”

I sensori ceramici e capacitivi sono stati utilizzati per monitorare delle prove di compressione semplice ed eccentrica su pilastri in cemento armato. L’obiettivo della prova è stato quello di confrontare i segnali acquisiti utilizzando i sensori innovativi con quelli ottenuti dalla sensoristica tradizionale. Sono stati preparati 4 provini, 2 dei quali sono stati sottoposti a prova, uno a compressione centrata e l’altro a compressione eccentrica. I restanti 2 provini saranno sottoposti a prove di compressione di lunga durata.

Per la realizzazione dei provini sono stati utilizzati i seguenti materiali:

- piastre metalliche in acciaio S275;
- provini in calcestruzzo C25/30 e acciaio d’armatura B450C;

- zanche di collegamento in acciaio d'armatura B450C.

Ai fini del perseguimento degli obiettivi del test, è stata predisposta:

- sensoristica di tipo tradizionale (strain gauges, LVDT, potenziometri);
- sensoristica di tipo innovativa (SP e SC).

Per quest'ultima, per ogni provino, sono stati considerati 8 sensori innovativi per provino, di cui:

- n.4 piezoresistivi (SP);
- n.4 capacitivi (SC).

disposti in due sezioni simmetriche e parallele alla sezione di mezzeria del provino ($a \pm 10$ cm).

Invece per quella di tipo tradizionale, sono stati considerati, in riferimento sempre alle medesime sezioni precedentemente individuate:

- n.8 strain gauges (SG) posizionati sulle barre di armatura (n.4 per sezione);
- n.8 LVDT posizionati esternamente al provino (n.4 per sezione).

4.5.2.1 Progettazione dei provini

La parte iniziale dei test è stata caratterizzata dalla progettazione dei provini, in considerazione sia delle condizioni di vincolo, definite dal set up utilizzato, che delle condizioni di carico ipotizzate, ai fini degli obiettivi della prova (test delle letture dei sensori innovativi sia in campo elastico e inelastico).

Pertanto, sono state considerate:

- soglia elastica, relativa ai cicli di carico/scarico in compressione eccentrica, ed eccentricità e (N=650 kN, $e = 60$ mm);
- soglia elastica, relativa ai cicli di carico/scarico in compressione centrata, ed eccentricità e (N=650 kN, $e = 0$ mm).

Di seguito si riportano i risultati, derivanti dalla progettazione dei provini, nelle condizioni di carico e vincolo specificate (con le relative sezioni) con disposizione dei sensori innovativi (SC e SP) e tradizionali.

4.5.2.2 Installazione dei sensori

La fase di installazione dei sensori è stata molto delicata, in quanto i sensori dovevano essere installati in una posizione centrale della sezione, lontani dal supporto che avrebbe potuto fornire la gabbia di armatura.

I sensori capacitivi sono dotati, lungo la circonferenza, di 3 anelli metallici che possono essere utilizzati per fissare i sensori. Il problema principale è stato quello di dover garantire la complanarità dei sensori tra loro e con la sezione retta. Dopo numerosi tentativi il metodo utilizzato è stato quello di fissare i sensori su una rete

in fibra di vetro lavorando all'esterno della sezione e successivamente fissare la rete con i sensori all'interno della sezione ancorandola alla gabbia di armatura (Figura 4-64b).

I sensori ceramici pur essendo più piccoli di quelli capacitivi hanno dei componenti elettronici all'interno del sensore. Tali componenti elettronici possono essere influenzati dalla vicinanza delle armature metalliche, per questo motivo sono posti al centro di una protezione circolare del diametro di circa 10 cm. La protezione circolare facilita il posizionamento dei sensori, ma pone problemi di spazio, in pratica i 4 sensori installati in una sezione la occupano quasi interamente.

Anche per i sensori ceramici si è utilizzata la reti in fibra per il posizionamento (Figura 4-64a).

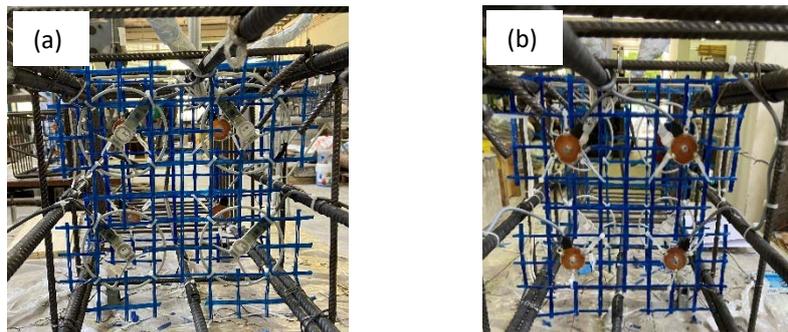


Figura 4-64. Posizione in sezione dei sensori: (a) ceramici; (b) capacitivi

I pilastri sono stati gettati in orizzontale, per tale motivo non si è posto il problema di dove forare il cassero per il passaggio dei cavi. Tuttavia, i cavi sono stati inguainati e protetti (Figura 4-65). La Figura 4-66 mostra un provino prima dell'esecuzione del test di laboratorio.



Figura 4-65. Fissaggio dei cavi

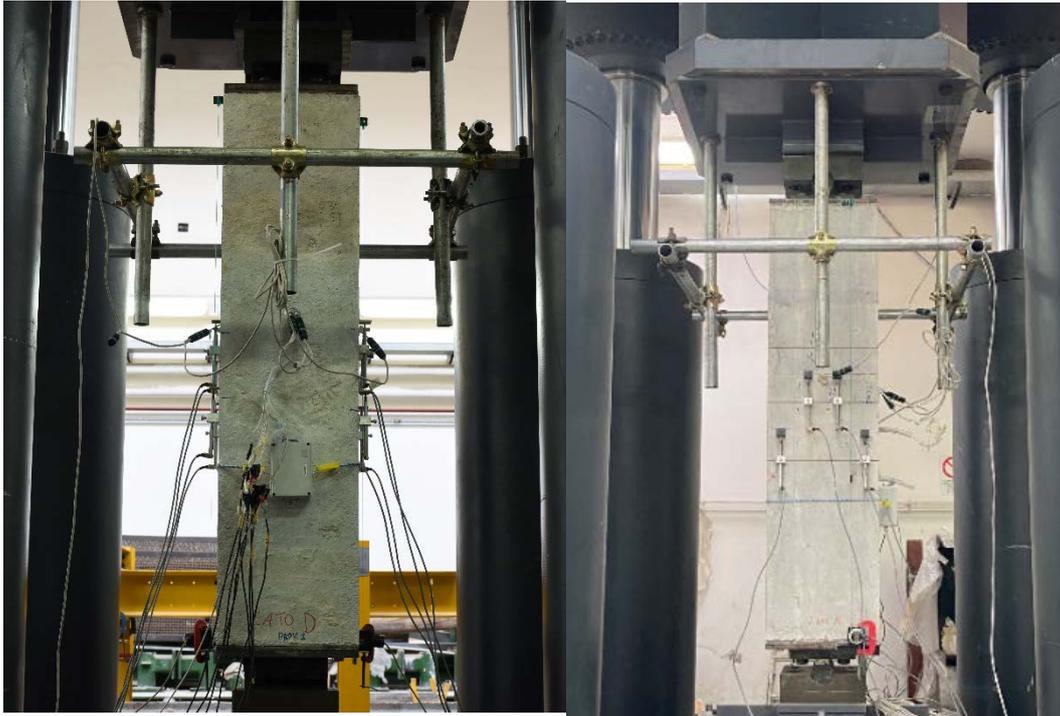


Figura 4-66. Setup prova

4.5.2.3 Acquisizione prova

Le prove sono state svolte il 26/04/2021 e il 07/05/2021 durante le prove sono stati acquisiti i segnali dei sensori tradizionali e di quelli innovativi.

La prova eccentrica è consistita in 3 cicli di carico scarico in compressione semplice seguiti da 3 cicli di carico scarico in compressione eccentrica e successivamente il provino è stato portato a rottura in compressione centrata (Figura 4-67).

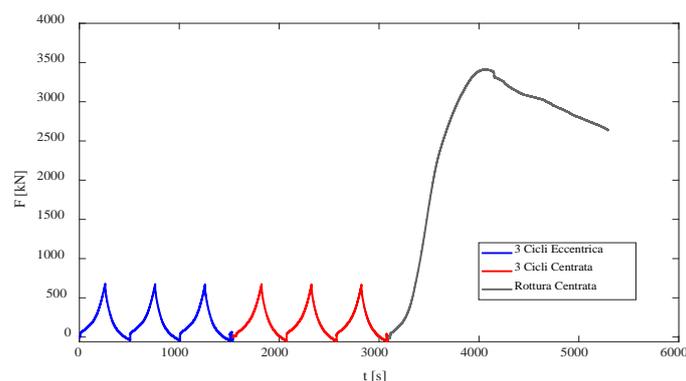


Figura 4-67. Storia temporale del carico

I segnali acquisiti dai sensori di STMicroelectronics sono stati convertiti in deformazione attraverso l'equazione 2 messa a punti sui dati acquisiti con la prova del telaio tamponato descritta in precedenza.

Confrontando i valori delle deformazioni rilevate dalla sensoristica tradizionale con quelli dei sensori capacitivi si è riscontrata una buona corrispondenza per bassi valori di deformazione, durante i cicli di carico e scarico i sensori innovativo hanno seguito perfettamente quanto rilevato dai sensori tradizionali (Figura 4-68). Per valori più alti della deformazione i sensori innovativi hanno registrato valori abbastanza più bassi di quelli della sensoristica tradizionale.

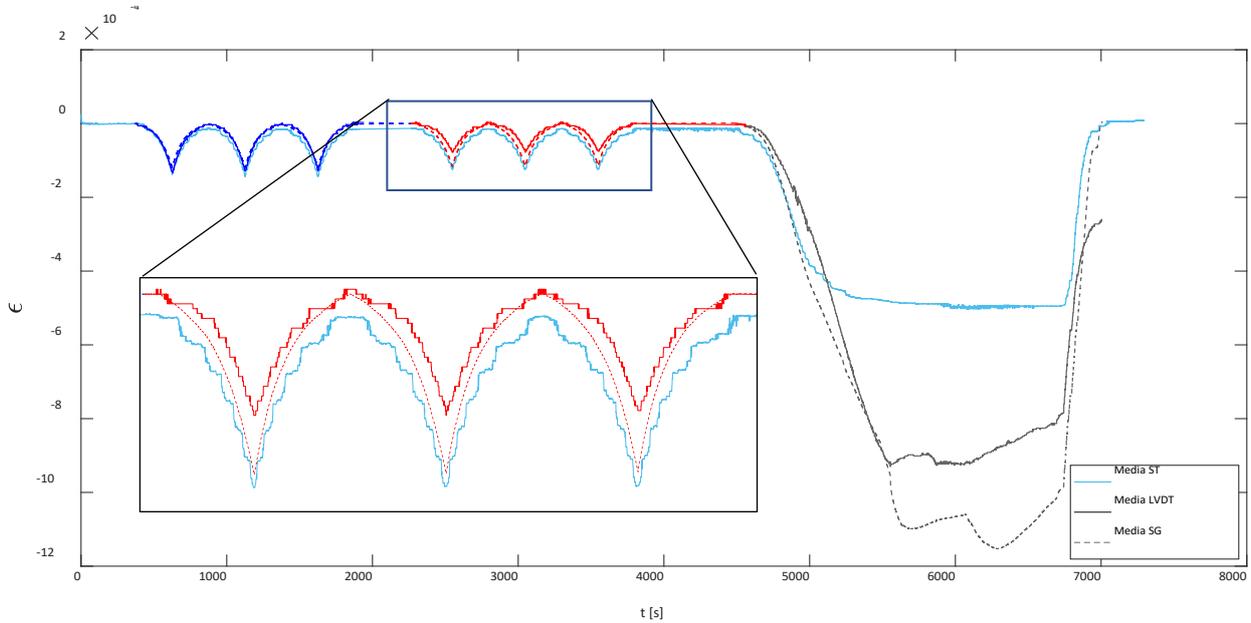


Figura 4-68. Storia temporale delle deformazioni estensionali ottenute mediante sensori di pressione, LVDT e strain gauges

Ulteriori pilastri in c.a. sono stati confezionati per l'esecuzione di test di monitoraggio, con il fine ultimo di valutare il comportamento nel lungo periodo dei sensori di pressione. In particolare, sono stati realizzati n.4 pilastri all'interno dei quali è stata installata la sensoristica. In tutti i pilastri oggetto di studio sono stati collocati in serie sensori ceramici e sensori capacitivi. I pilastri sono stati realizzati per eseguire dunque delle prove di carico a lungo termine. La procedura di confezionamento dei pilastri può essere sintetizzata come segue.

1) Predisposizione delle cassature e della gabbia di armatura. La geometria delle armature presenti è stata fornita da UniNA (Figura 4-69).



Figura 4-69. Predisposizione delle cassature e della gabbia di armatura

2) Disposizione e collocamento dei sensori ceramici e capacitivi. Il fissaggio dei sensori capacitivi e dei sensori ceramici è risultato complesso. Entrambe le tipologie di sensori sono state posizionate all'interno della gabbia di armatura mediante l'ausilio di una rete in fibra di vetro, opportunamente riprofilata in funzione della sezione del pilastro, la quale è stata vincolata con legature metalliche alla gabbia. Su suddetta rete si è poi proceduto con il fissaggio dei sensori nelle sezioni preliminarmente individuate sempre mediante legature metalliche come mostrato in Figura 4-70.

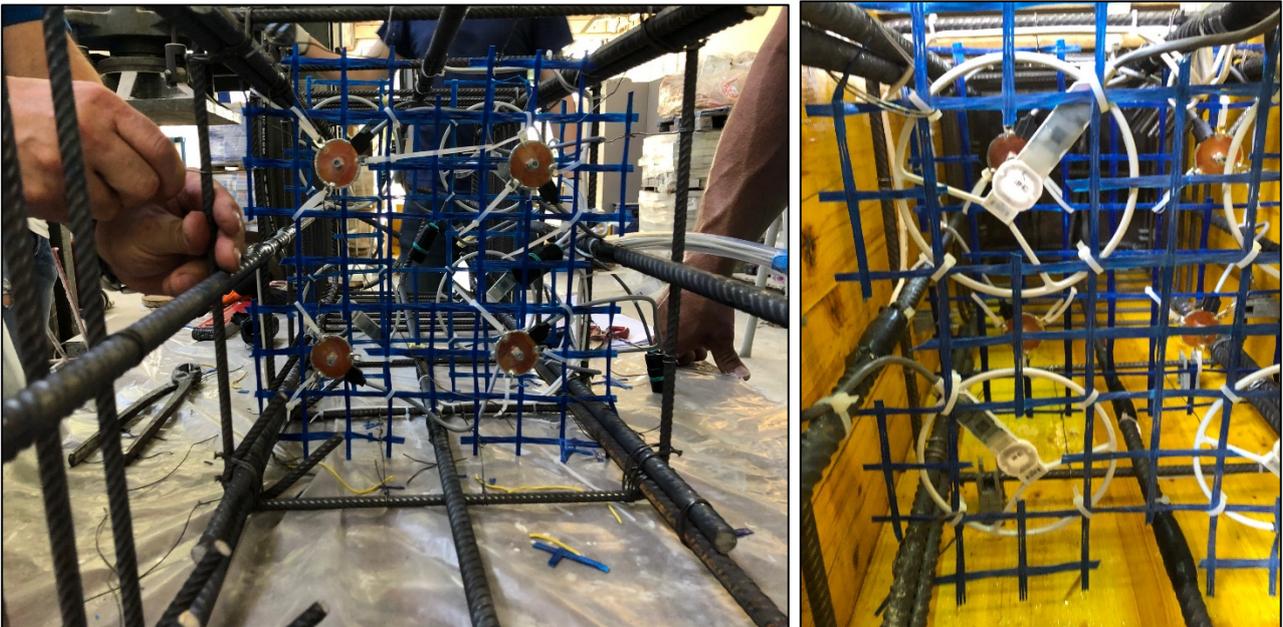


Figura 4-70. Fissaggio della sensoristica sulle armature

3) Posizionamento della guaina di alloggiamento della barra post-testa nella sezione mediana del pilastro. Tale operazione è stata eseguita solo per i pilastri soggetti a prove di carico a lungo termine (Figura 4-71).



Figura 4-71. Posizionamento guaina

4) Esecuzione del getto in calcestruzzo mediante l'impiego di calcestruzzo preadato avente $R_{ck} = 30$ MPa. Dopo l'esecuzione del getto, è stata predisposta una stagionatura umida dei pilastri per evitare la rapida evaporazione dell'acqua di impasto e la conseguente formazione di fessurazioni. La stagionatura umida è stata resa possibile mediante l'impiego di tessuto plastico posto a copertura del getto precedentemente eseguito (Figura 4-72).



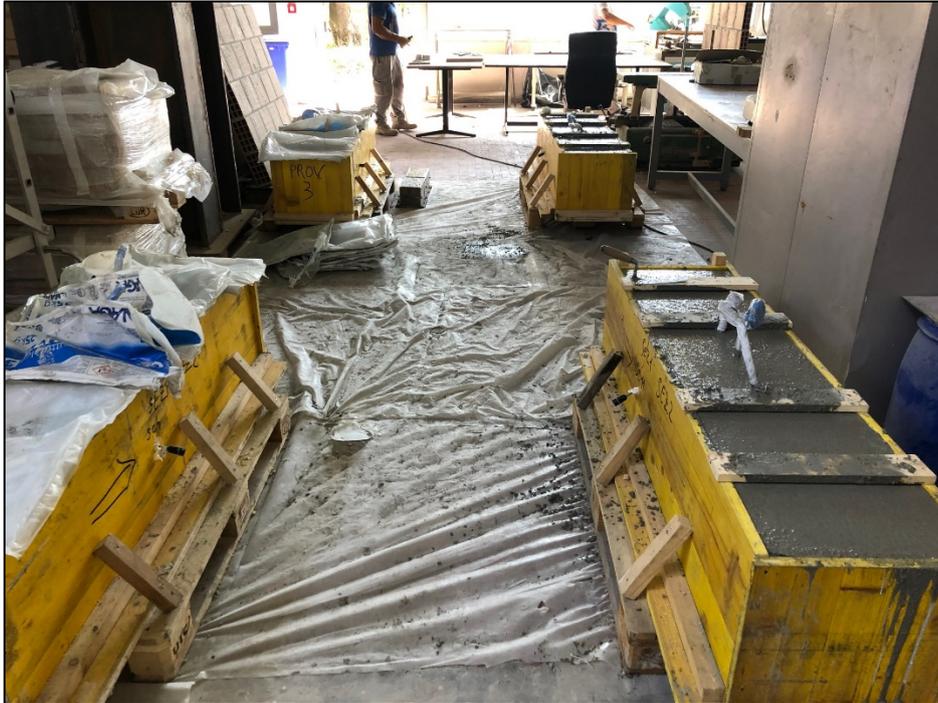


Figura 4-72. Esecuzione del getto di cls

Il calcestruzzo è stato miscelato, con l'ausilio di una betoniera, impiegando un quantitativo di acqua pari a 2 l per ogni sacco da 25 kg di calcestruzzo predosato. Per ragioni puramente organizzative e pratiche, i pilastri sono stati gettati in orizzontale. La Tabella 4-9 mostra le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato.

Tabella 4-9. Caratteristiche meccaniche del calcestruzzo impiegato

Nome commerciale	CALCESTRUZZO RCK30 VAGA FIBRO-rinforzato
Composizione	Cemento; FIBRE; Aggregato siliceo 0/15 mm; Superfluidificante acrilico
Massa volumica	2300 - 2400 Kg/m³
Classe di consistenza	S4 - Fluido (da 160 mm a 210 mm di slump)
Classe di esposizione	XC1 / XC2
Classe di resistenza a compressione	C 25/30
Resistenza a compressione a 24h	> 15 N/mm²
Resistenza a compressione a 7 gg	> 20 N/mm²
Resistenza a compressione (R _{cm}) 28 gg	> 33,5 N/mm²
Resistenza caratteristica (R _{ck})	30 N/mm²
Rapporto a/c	≤ 0,60

5 IMPATTO ATTESO

5.1 Impatto dell'attività X.1: Prove su ponti

L'attività sui ponti è consistita sia in test di monitoraggio su di un viadotto ferroviario, sia prove di flessione su travi da ponte in c.a.p. rappresentative di viadotti stradali. Entrambe le campagne di prova si ritiene che abbiano un impatto significativo sulla sicurezza delle infrastrutture di trasporto.

Il monitoraggio strutturale del viadotto ferroviario fornisce indicazioni molto importanti sui dati e sulla procedura di elaborazione degli stessi per le finalità di valutazione delle condizioni di esercizio.

Le prove di laboratorio eseguite sulle travi in c.a.p. con cavi scorrevoli possono supportare lo sviluppo e la validazione di modelli strutturali e algoritmi predittivi per la valutazione comportamento strutturale, particolarmente in presenza di difetti di costruzione. Attraverso i risultati del progetto in esame, sarà possibile fornire strumenti di valutazione della capacità portante di tali strutture in funzione del difetto specifico, in particolare tenendo conto dei seguenti aspetti: livello di precompressione imposto in fase di tiro; condizione di iniezione delle guaine, considerando i due casi limite (guaine iniettate e non iniettate) ed uno intermedio (guaine parzialmente iniettate). È evidente come la conoscenza del comportamento strutturale e della capacità di sopportare i carichi gravitazionali, in particolare quelli riconducibili al traffico veicolare, sia di particolare interesse e impatto per la comunità scientifica, per la comunità tecnica e più in generale per la società.

5.2 Impatto dell'attività X.2: Prove su gallerie

La campagna sperimentale eseguita su anelli di galleria in scala reale ha permesso di confrontare i risultati ottenuti con i valori predittivi ottenuti mediante modelli agli elementi finiti sviluppati e descritti in dettaglio nell'OR3. Tale confronto è stato necessario al fine di proporre, in futuro, modelli di valutazione della risposta membranale e presso-flessionale di gallerie (profonde e superficiali) realizzate tramite scavo meccanizzato operato dalle più moderne Tunnel Boring Machine.

L'utilizzo di sensoristica pre-installata (nel caso di nuove gallerie) e/o post-installata (nel caso di gallerie esistenti) diffusa all'interno del rivestimento, permetterà di monitorare e valutare, in tempo reale, il comportamento di tali strutture.

Monitorare, anticipare e programmare un possibile intervento, qualora i livelli di stress o deformazione nel rivestimento definitivo della galleria eccedano valori di soglia, permetterà di garantire funzionalità strutturale dell'opera durante la sua vita utile e sicurezza nei confronti dell'utente finale.

5.3 Impatto dell'attività X.3: Prove su edifici

L'attività sugli edifici è stata molto articolata, con carattere multi-scala. Riguardo gli edifici in c.a. le prove eseguite su pilastri sollecitati a compressione centrata o eccentrica consentiranno di valutare, mediante sensoristica innovativa, il comportamento e la sicurezza sia in condizioni di esercizio che prossime a quelle ultime che precedono il collasso. I test pseudo-dinamici su telai in c.a. in scala reale, dotati di tamponature in

muratura di laterizio forato come spesso riscontrato negli edifici esistenti, permetteranno di prevedere anche il danneggiamento sotto azioni sismiche orizzontali combinando i dati della sensoristica di pressione con modelli predittivi.

Lo studio e l'analisi svolta su tavola vibrante presso l'Università di Bergamo hanno permesso di ottenere dati strumentali in ambiente controllato. Lo studio aiuterà a capirne la possibilità di applicazione su strutture reali per svolgere una verifica speditiva delle condizioni di salute strutturale in caso di evento sismico.

I sensori di pressione permettono il rilevamento puntuale dello stato di sforzo. Tale informazione risulta essere fondamentale nell'ottica di un sistema di monitoraggio permanente robusto e affidabile in quanto necessitano di poca interpretazione ed elaborazione una volta raccolti. Possono essere utilizzati in simbiosi con altri tipi di sensori così come da soli per evidenziare criticità che, ad esempio, un monitoraggio dinamico non può osservare.

Tali possibilità sono state accertate anche nella sperimentazione condotta su elementi e pareti di edifici in muratura ordinaria, che costituiscono una percentuale elevata del patrimonio costruito. I test eseguiti consentiranno di prevedere il comportamento sia sotto carichi di esercizio che in presenza di danneggiamenti localizzati come quelli prodotti da cedimenti differenziali in fondazione.

6 CONCLUSIONI

6.1 Attività X.1: Prove su ponti

La sperimentazione condotta ha fornito risultati incoraggianti, portando alla luce diverse caratteristiche della risposta delle travi da ponte in calcestruzzo armato precompresso con cavi post-tesi in presenza di alcuni difetti di costruzione. Le prove cicliche di flessione su travi in scala ridotta sono state eseguite al variare del livello di precompressione iniziale e della condizione di iniezione delle guaine. I provini realizzati consentiranno ulteriori approfondimenti e i risultati fin qui ottenuti potranno essere estesi con informazioni aggiuntive relative alla risposta flessionale di travi con trefoli danneggiati, alla risposta a taglio e all'eventuale rinforzo delle travi danneggiate. I dati sperimentali raccolti possono costituire la base per la calibrazione di modelli strutturali e di algoritmi di machine learning per valutazioni in tempo quasi-reale della sicurezza strutturale.

I test di monitoraggio sul viadotto ferroviario hanno dimostrato la possibilità di controllare in continuo lo stato di salute della struttura. Pertanto, i risultati ottenuti nell'ambito del progetto forniscono un supporto importante alla valutazione della sicurezza e al monitoraggio delle infrastrutture stradali e ferroviarie esistenti.

6.2 Attività X.2: Prove su gallerie

I risultati ottenuti dalla sperimentazione hanno dimostrato l'efficacia della strumentazione e della sensoristica adottata, necessaria per la messa in opera dei futuri sistemi di monitoraggio.

I risultati ricavati dai sensori di stress pre-installati hanno restituito valori confrontabili con quelli ricavati dai modelli predittivi sia nella prova atta a simulare una condizione di spinta membranale tipica di gallerie profonde che nei confronti di un'azione di presso-flessione (ovalizzazione dell'anello), tipica di gallerie superficiali. Rispetto a questa seconda configurazione di prova, si è osservato come, al crescere della percentuale di ovalizzazione impressa sull'anello, l'errore che si ha tra i valori calcolati dal modello predittivo e quelli sperimentali ottenuti dai sensori tende ad aumentare. Ciò è dovuto alle ipotesi semplificative adottate nel modello predittivo agli elementi finiti nel quale il giunto tra conci adiacenti, data la complessità geometrica di tale superficie di contatto, ha portato all'inserimento di molle distribuite in grado di reagire a trazione, cosa che nella realtà non avviene. Tale condizione ha portato rispettivamente ad una sottostima della tensione nelle zone meno compresse della porzione di rivestimento della galleria ed una sovrastima della tensione nelle zone più compresse dell'anello, via via crescente con l'incremento percentuale di ovalizzazione. Sulla base di quanto osservato nella prima prova idrostatica, si ritiene che le letture ottenute dalla prova sperimentale risultino essere più attendibili di quelle ottenute dalla modellazione a questi livelli di carico.

Infine, il confronto tra i risultati ottenuti sperimentalmente e quelli predittivi da modellazione ha permesso di verificare la bontà di questi ultimi. In futuro, sarà quindi necessario affinare e calibrare ulteriormente i modelli utilizzati per la validazione dei risultati ottenuti sperimentalmente.

6.3 Attività X.3: Prove su edifici

6.3.1 Edifici in muratura

È stata presentata una campagna sperimentale sull'utilizzo di sensori ceramici e capacitivi per il monitoraggio dello stato tensionale di tre diverse tipologie di edifici: quelli con struttura in muratura, quelli con struttura intelaiata in c.a. e quelli con struttura in acciaio.

La sperimentazione più significativa sulle strutture in muratura ha riguardato prove di carico a compressione su alcuni muretti in mattoni di calcarenite e di argilla, al fine di simulare la pre-installazione di sensori in muratura di nuova costruzione e la post-installazione in muratura esistente già caricata, nonché la successiva variazione dello stato di sollecitazione durante il monitoraggio della vita nominale.

I migliori risultati sono stati ottenuti nel caso dei sensori pre-installati per gli intervalli di sollecitazione più bassi. Ciò dimostra che l'impiego dei sensori ceramici e capacitivi costituisce un valido strumento per il monitoraggio delle strutture murarie di nuova costruzione.

Sono state studiate due diverse metodologie di post-installazione, due tipi di sensori e due tipi di muratura. I risultati mostrano che entrambi i sensori utilizzati consentono la registrazione della variazione dello stato di sollecitazione, senza differenze significative per i due tipi di muratura.

Il primo sistema di post-installazione era più semplice ma non garantiva la corretta iniezione del foro, in alcuni casi, con una risposta meno affidabile dei sensori ceramici e una buona resa dei sensori capacitivi. Il secondo sistema, invece, consentiva una migliore iniezione e installazione dei sensori ma implicava alcuni inconvenienti riguardanti le variazioni di rigidità tra la malta esistente e la malta iniettata nel giunto, con una conseguente riduzione della sensibilità per i sensori capacitivi. È quindi necessario ottimizzare i rapporti di rigidità in post-installazione, sulla base dello studio dei materiali esistenti in loco e finalizzato all'ottimizzazione delle tecniche e dei materiali utilizzati per l'iniezione, nonché un'attenta calibrazione dei sensori capacitivi alle variazioni di stato di sollecitazione nei punti di misura.

6.3.2 Edifici con struttura intelaiata

Le prove eseguite su edifici con struttura intelaiata in c.a. o in acciaio hanno seguito un approccio multi-scala, procedendo sia al livello di singoli elementi strutturali, sia al livello di sistemi strutturali. Nel primo caso è stato analizzato il comportamento di singoli pilastri in c.a. soggetti a compressione centrata o eccentrica, focalizzando l'attenzione sulla capacità della sensoristica innovativa sviluppata nel progetto di fornire supporto al monitoraggio del comportamento strutturale non solo sotto carichi di esercizio ma anche fino a rottura.

Le prove alla scala di sistemi strutturali hanno consentito di indagare il comportamento in condizioni di esercizio, ma anche sotto scuotimento sismico, in quest'ultimo caso ottenendo dati di interesse per il monitoraggio e la previsione del danneggiamento di pilastri e di tamponature tipiche degli edifici esistenti in c.a. Tutti i dati della sensoristica sviluppata nel progetto sono stati confrontati con quelli derivanti da sensoristica tradizionale, dimostrando la possibilità di impiego dei sensori di pressione negli edifici esistenti.

6.3.3 Caratterizzazione della sensoristica MEMS

Le sperimentazioni eseguite su tavola vibrante hanno permesso di approfondire la conoscenza e le caratteristiche di sensoristica MEMS a bassissimo costo in relazione a strumentazione ad alte prestazioni. Le analisi effettuate sui segnali registrati mostrano un'ottima corrispondenza tra MEMS economici e MEMS prestazionali così come risulta positivo il confronto tra MEMS economici e sensori piezoelettrici.

La sperimentazione sui sensori di pressione, seppur non ancora conclusa, ha permesso di testare la capacità di quest'ultimi nel registrare lo sforzo puntuale in un'opera in calcestruzzo armato. L'obiettivo, già in parte raggiunto, consiste nell'introdurre, in sensori post-installati, una componente di compressione in modo da poter leggere le variazioni dello stato tensionale sia in una direzione positiva, aumento di compressione, sia negativa, ossia scarico o diminuzione della stessa.