



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 6 parte 1

Dimostratori

Partners

- Università di Napoli Federico II (Soggetto Capofila)
- CNR ITC (socio di STRESS scarl)
- Consorzio Integra (socio di STRESS scarl)
- IOTSAFE
- MAPEI
- Politecnico di Torino
- STMicroelectronics
- STRESS scarl
- Tecno In (socio di STRESS scarl)
- Tecnosistem (socio di STRESS scarl)
- Università di Bergamo
- Università di Bologna
- Università di Palermo
- Università di Roma Tor Vergata



UNIONE EUROPEA
Fondo Sociale Europeo
Fondo Europeo di Sviluppo Regionale

Informazioni del Deliverable

Numero documento	D.6.1-2	
Diffusione documento	Privato	
Titolo del documento	Dimostratori	
Obiettivo Realizzativo	OR6 parte 1 Attività 6.1- Attività 6.2	
Coordinatore OR	STRESS scarl	

Stato del documento

Verificato (Coordinatore OR)	31/10/2022	Ing. Esposito Marilena
Approvato (Coordinatore Progetto)	31/10/2022	Prof. Ing. Edoardo Cosenza

PREMESSA

Il presente documento costituisce un prodotto atteso dell'*OR6-Dimostrazione e valorizzazione dei risultati*, con riferimento alle seguenti attività:

- A.6.1 Rete di trasporto
- A.6.2 Edifici in ambito urbano

Il presente deliverable raccoglie le attività dimostrative attivate dai partner con lo scopo di:

- ✓ verificare la capacità dei sistemi di monitoraggio di alimentare una piattaforma di gestione dati che implementi le tecniche di controllo elaborate nell'OR2 e i modelli strutturali avanzati elaborati nell'OR3;
- ✓ verificare la capacità dei sistemi nel loro complesso di supportare la gestione avanzata delle performance strutturali della singola struttura e di sistemi di strutture, al fine di verificare la possibilità di implementare azioni automatiche intraprese dal sistema di controllo e supportare i decisori nel gestire iniziative per la mitigazione dei rischi

Tutti i soggetti attuatori coinvolti nelle attività OR.6.1 ed OR.6.2 del progetto hanno contribuito alla realizzazione del deliverable e sono responsabili per le informazioni contenute, ciascuno per le parti di propria competenza. Più nel dettaglio:

Università di Napoli Federico II (UNINA), STMicroelectronics, Mapei, STRESS e soggetti attuatori TecnoIN, Tecnosistem, CNR-ITC, hanno contribuito in maniera prevalente al CAP.4 – Viadotto Canalone.

Università di Palermo (UniPA), STMicroelectronics, Mapei, hanno contribuito in maniera prevalente al CAP.5 – Edificio ex ospedale Agrigento.

Università di Roma Tor Vergata (UniRM2), STMicroelectronics hanno contribuito in maniera prevalente al CAP.6.1 - Caso studio n.1: Esecuzione di prove sperimentali su una porzione di galleria in scala reale.

STRESS, TecnoIN e Tecnosistem hanno contribuito in maniera prevalente al CAP.6.2 – Caso studio n.2 - Supporto operativo attività di sperimentazione Travi precomprese da ponte.

Università di Bologna (UniBO) ha contribuito in maniera prevalente al CAP.6.3 - Caso studio n.3: Monitoraggio dinamico di un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità

IOTSAFE SRL ha contribuito in maniera prevalente al CAP.6.4 - Caso studio n.4: Palazzo in cemento armato sito in Berlino e CAP.6.5 Caso studio n.5: Monitoraggio Edificio storico sito in Bergamo.

Università di Bergamo (UNIBG) ha contribuito in maniera prevalente al CAP.6.6- Caso studio n.6: Analisi di segnali accelerometrici su edifici in calcestruzzo armato.

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.....	7
2	ATTIVITÀ 6.1.....	7
2.1	Descrizione attività 6.1- Rete di trasporto.....	7
2.2	Risultati attività	7
3	ATTIVITÀ 6.2.....	8
3.1	Descrizione attività 6.2 – Edifici in ambito urbano.....	8
3.2	Risultati attività	8
4	VIADOTTO CANALONE	9
4.1	Descrizione Viadotto.....	9
4.2	Modellazione numerica del viadotto	10
4.3	Progettazione sistema di monitoraggio	15
4.4	Applicazione in campo.....	26
4.5	Qualificazione sistema di monitoraggio installato	30
4.5.1	Inquadramento della procedura di qualificazione	30
4.5.2	Applicazione della procedura di qualificazione al dimostratore.....	31
4.5.3	Impatto atteso.....	36
4.5.4	Conclusioni	36
4.6	Sistemi di gestione ed elaborazione dati in cloud	38
4.7	Analisi di scenario	41
5	EDIFICIO EX OSPEDALE AGRIGENTO	48
5.1	Descrizione Edificio.....	48
5.1.1	Corpi di fabbrica	48
5.1.2	Tipologie murarie riscontrate.....	50
5.1.3	Interventi in itinere: il cantiere.....	52
5.1.4	Modellazione della parete	52
5.1.5	Scelta del maschio murario da monitorare.....	54

5.2	Progettazione, realizzazione e test del sistema di monitoraggio basato sui sensori di pressione (StM) per il monitoraggio di due maschi murari presso l'ex ospedale di Agrigento	56
5.2.1	Descrizione dell'attività	56
5.3	Risultati attività	58
5.4	Attività di post-installazione della sensoristica	59
5.4.1	Procedura di post-installazione dei sensori capacitivi	59
5.4.2	Scelta del materiale di intasamento dei fori di alloggiamento dei sensori.....	61
5.5	Impatto atteso	62
5.6	Conclusioni.....	62
6	CASI STUDIO	63
6.1	Caso studio n.1: Esecuzione di prove su una porzione di galleria in scala reale.	63
6.1.1	Descrizione attività	63
6.1.2	Risultati attività.....	67
6.2	Caso studio n.2: Supporto operativo attività di sperimentazione Travi precomprese da ponte	72
6.2.1	Modello numerico per la calibrazione delle prove sperimentali.....	72
6.2.2	Progettazione e strumentazione finalizzata alla esecuzione di prove statiche su trave da ponte in scala in cap a cavi scorrevoli.....	74
6.3	Caso studio n.3: Monitoraggio dinamico di un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità	78
6.3.1	Misure delle accelerazioni e identificazione dinamica	78
6.3.2	Parametri modali per l'impalcato a cassone strumentato – esempi	81
6.4	Caso studio n.4: Palazzo in cemento armato sito in Berlino	88
6.5	Caso studio n.5: Monitoraggio Edificio storico sito in Bergamo.....	90
6.6	Caso studio n.6: Analisi di segnali accelerometrici su edifici in calcestruzzo armato.....	96
6.6.1	Analisi di segnali accelerometrici su edificio in calcestruzzo armato	96
6.6.2	Analisi dati accelerometrici di un edificio investito da evento sismico.....	99
6.6.3	Impatto atteso	110
6.6.4	Conclusioni	110

7	CONCLUSIONI.....	111
	Elenco Allegati.....	112

1 DESCRIZIONE DELL'OBIETTIVO REALIZZATIVO E DELLE ATTIVITÀ

Coerentemente al capitolato tecnico di progetto l'OR6 (con riferimento all'OR6.1 ed OR6.2) ha visto l'installazione dei sensori sviluppati nell'OR1 ad alcuni casi studio, ovvero per una infrastruttura viaria e per edifici civili. Per alcuni casi studio individuati sono stati elaborati modelli strutturali predittivi delle performance in esercizio, che sono stati aggiornati sulla base dei dati letti dai sensori, come descritto nell'OR3. Per alcuni casi inoltre sono stati sviluppati sistemi di gestione ed elaborazione dati in cloud, come descritto nell'OR2. Infine, talvolta è affrontata la verifica delle procedure di qualifica sviluppate e proposte nell'OR5 ed implementato il sistema di monitoraggio su piattaforma Building Information Modelling.

2 ATTIVITÀ 6.1

2.1 Descrizione attività 6.1- Rete di trasporto

L'attività rappresenta una validazione propositiva e fattiva degli OR precedenti con oggetto le infrastrutture viarie. Più nel dettaglio risulta:

- Dimostratore reale viadotto Canalone, nell'ambito del quale risulta applicato e validato un innovativo sistema di monitoraggio basato su sensori di pressione e sensori dinamici.
- Esecuzione di una prova alla scala reale presso il laboratorio dell'unità UniRN2 su una porzione di galleria, sulla quale sono stati post-installati i sensori capacitivi (forniti dalla STMicroelectronics)
- Applicazione e modellazione su travi da ponte in cemento armato precompresso in scala 1:5 con sistema a cavi post-tesi, finalizzata ad investigare l'effetto della precompressione sul comportamento strutturale.
- Monitoraggio dinamico di un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità svolte allo scopo di dimostrare e valorizzare i risultati ottenuti da un sistema accelerometrico basato su tecnologia MEMS.

2.2 Risultati attività

- Viadotto Canalone.
- Caso studio n.1: Esecuzione di prove su una porzione di galleria in scala reale.
- Caso studio n.2: Supporto operativo attività di sperimentazione Travi precomprese da ponte.

- Caso studio n.3: Monitoraggio dinamico di un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità

3 ATTIVITÀ 6.2

3.1 Descrizione attività 6.2 – Edifici in ambito urbano

L'attività rappresenta una validazione propositiva e fattiva degli OR precedenti con oggetto edifici in ambito urbano. Più nel dettaglio risulta:

- Edificio Ex ospedale Agrigento, nell'ambito del quale si è verificata l'efficacia dei dispositivi nel rilevare variazioni di tensione nella parete oggetto di sperimentazione al variare del tempo.
- Palazzo in cemento armato sito in Berlino, dove è stato installato un sistema per poter calibrare e validare algoritmi per il monitoraggio continuo dell'edificio.
- Palazzo storico in centro a Bologna, dove risulta installato nel vano ascensore, sulle guide, dei sensori per il monitoraggio statico e dinamico dell'edificio.
- Analisi di segnali provenienti da misurazioni sperimentali basati su misurazioni di accelerazioni da sensori a basso costo

3.2 Risultati attività

- Ex ospedale Agrigento
- Caso studio n.4: Palazzo in cemento armato sito in Berlino
- Caso studio n.5: Monitoraggio Edificio storico sito in Bergamo
- Caso studio n.6: Analisi di segnali accelerometrici su edifici in calcestruzzo armato.

4 VIADOTTO CANALONE

4.1 Descrizione Viadotto

Il viadotto “Canalone” interessato dall’attività del progetto di installazione e gestione di un sistema di monitoraggio strutturale è collocato in un tratto dell’autostrada Napoli-Salerno, nei pressi dello svincolo per Salerno.



Figura 1 – Viadotto Canalone

Si tratta di una tipologia strutturale di arco a via superiore in cemento armato e possiede una luce complessiva di circa 120m ripartita attraverso 11 campate; ciascuna campata, è composta da pilastrate con 6 pilastri collegati di dimensioni 50x40cm e 44x40cm per pilastri esterni e 50x30cm e 44x30cm per pilastri interni.

Le pilastrate dalla terza all’ottava campata trasmettono i carichi ad un sistema di 6 archi trasversali connessi tra loro attraverso pareti. Gli archi sono costituiti da un insieme di spezzate di spessore 35 cm per archi esterni e 20 cm per gli archi interni.

Infine, l’impalcato da ponte è costituito da 6 travi longitudinali di dimensioni 35x152cm per le travi esterne e 20x152cm per le travi interne. Dalla nona campata alla undicesima si è in presenza di un restringimento dell’impalcato tale per cui si ha la presenza di 5 travi longitudinali con le stesse dimensioni. Si sottolinea la presenza di travi trasversali per garantire l’irrigidimento dell’impalcato.

4.2 Modellazione numerica del viadotto

E' stata effettuata una modellazione agli elementi finiti del viadotto Canalone, modellazione finalizzata principalmente ad una analisi dinamica per la verifica delle frequenze proprie della struttura considerando le condizioni di vincolo della struttura reale. Il modello agli elementi finiti è realizzato con il software MSC/Patran, mentre le analisi sono svolte con il risolutore MSC/Nastran.

La conoscenza dell'interazione fra ambiente e parametri meccanici di una struttura costituisce un passaggio indispensabile nel processo conoscitivo che accompagna l'ingegnere dalla diagnosi di eventuali anomalie fino alla definizione e allo sviluppo di efficaci strategie per la salvaguardia dei manufatti stessi. Test dinamici sono degli strumenti molto efficaci attraverso i quali è possibile raggiungere un buon livello di conoscenza sul comportamento globale della struttura soprattutto sia in campo dinamico che sismico. L'identificazione strutturale è intesa come metodo per la caratterizzazione del comportamento dinamico delle strutture in termini di frequenze di vibrazione, forme modali e coefficienti di smorzamento (analisi modale sperimentale). L'analisi modale preliminare consente, a partire dalla realizzazione di un modello predittivo, di ipotizzare il comportamento dinamico di una struttura al fine di definire un'architettura del monitoraggio che sia in grado di fornire informazioni utili sul manufatto.

Obiettivo dell'analisi modale è la definizione del comportamento dinamico di una struttura che viene a dipendere da: Frequenze proprie; Modi di vibrazione; Coefficienti di smorzamento.

Il modello agli elementi finiti è stato realizzato con il software MSC/Patran, mentre le analisi sono svolte con il risolutore MSC/Nastran. La soluzione dedicata per questo tipo di analisi è la SOL103 che permette di ricavare frequenze proprie e modi di vibrare del sistema. Tale soluzione utilizza l'Algoritmo Lanczos per l'Estrazione degli Autovalori ed Autovettori che è il più indicato per problemi complessi e di grandi dimensioni. Questo algoritmo di estrazione è un algoritmo ricorsivo, la sua iterativa applicazione porta alla costruzione degli autovettori di Lanczos e alla costruzione di una matrice triangolare. Questo riduce il costo computazionale dovendo lavorare con una matrice triangolare rispetto ad una matrice iniziale sparsa di dimensione $N \times N$.

La struttura del viadotto è stata divisa in quattro tipologie di elementi: arco, pilastri, travi (longitudinali e trasversi) e soletta. L'impalcato e l'arco sono stati modellati mediante un graticcio di elementi *frame* (*CBAR element*); i pilastri sono stati modellati con elementi *frame* (*CBAR element*) e sono stati tra loro collegati tramite elementi bidimensionali tipo *shell* (*CQUAD element*) che simulano la presenza ed il comportamento reale delle paretine. A tutti gli elementi sono state assegnate le sezioni reali della struttura, ricavate dai disegni progettuali del viadotto, e le caratteristiche meccaniche dei materiali dichiarati nel documento del rapporto di Prove

Sperimentali. Nella realizzazione del modello agli elementi finiti sono stati considerati i carichi permanenti strutturali e non strutturali (ossia G_1 e G_2) in accordo alla norma NTC2018.

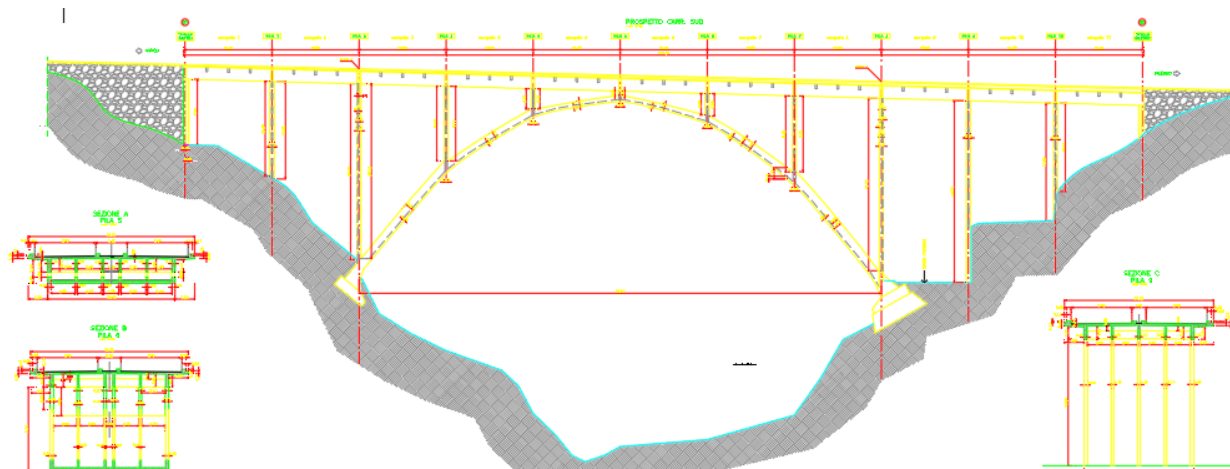


Figura – Sezione del Viadotto

Nella modellazione agli elementi finiti, la qualità dei risultati dipende direttamente dalla qualità della mesh. Uno degli errori più comuni che si fa nella modellazione è semplicemente simulare la geometria piuttosto che simulare sia la geometria che il comportamento fisico della struttura reale. Quindi sul modello agli elementi finiti del viadotto così modellato, sono stati effettuati tutti i check e le verifiche necessarie per la validazione del modello agli elementi finiti. Tali check hanno riguardato non solo la correttezza e la bontà degli elementi e della mesh stessa, ad esempio che tutti gli elementi della struttura in esame siano rigidamente connessi nel modo corretto secondo la rappresentazione del comportamento del modello reale, ma anche la coerenza dell'intero modello attraverso delle analisi in grado di mostrare indirettamente la presenza di elementi non connessi e mettere in luce le frequenze naturali della struttura in esame. Questa fase di check del modello è stata strettamente necessaria alla successiva analisi dinamica per la ricerca delle frequenze dei modi di vibrare della intera struttura in esame ed una sua correlazione con i risultati sperimentali.

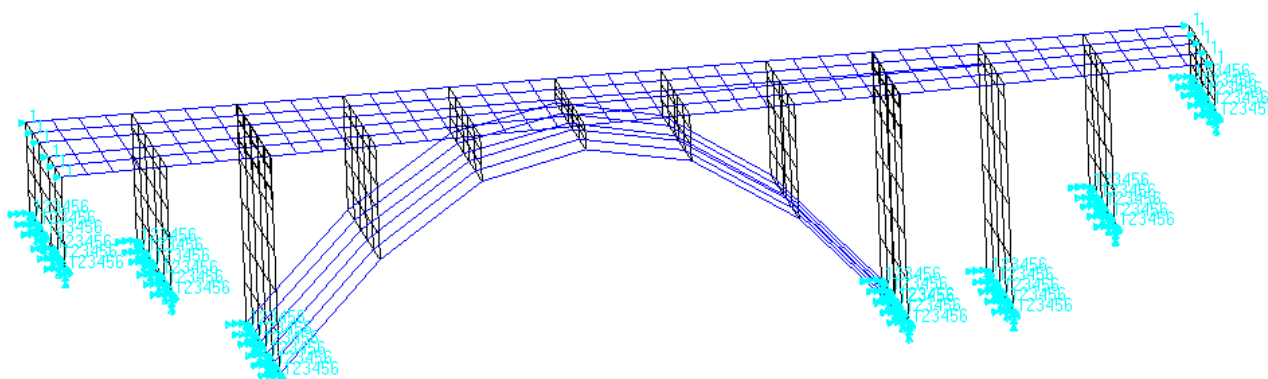


Figura – Modello del Viadotto

Inoltre poiché i modi di vibrare di una struttura non partecipano con la stessa efficacia alla sua deformazione, sono state effettuate delle ulteriori analisi, che contribuiscono a capire il reale

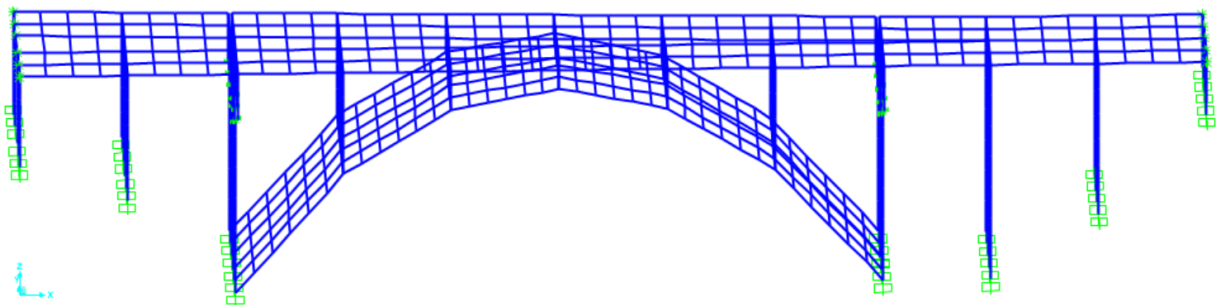
comportamento della struttura, sia per valutare come la massa della struttura partecipa ad ogni modo, e sia la relativa energia di deformazione di ogni elemento per ciascun modo.

Terminata, quindi, l'analisi dinamica, come ultimo step è stato effettuato una correlazione tra le frequenze numeriche così calcolate e le frequenze sperimentali riportate nel documento del "Rapporto prove dinamiche in condizioni operative Viadotto Canalone - Autostrada A3" e condotte in data 29 Novembre 2018 presso il Viadotto Canalone dell'Autostrada A3. Dai risultati ottenuti si evince una buona correlazione tra il modello numerico realizzato e quello sperimentale sia per il valore delle frequenze e sia per le rispettive forme modali, e quindi una consecutiva validazione del modello numerico realizzato con i software MSC/ Patran e MSC/ Nastran.

Per ogni dettaglio si rimanda all' *All.1 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TS-Dimostratore Viario-Modellazione Numerica Canalone*

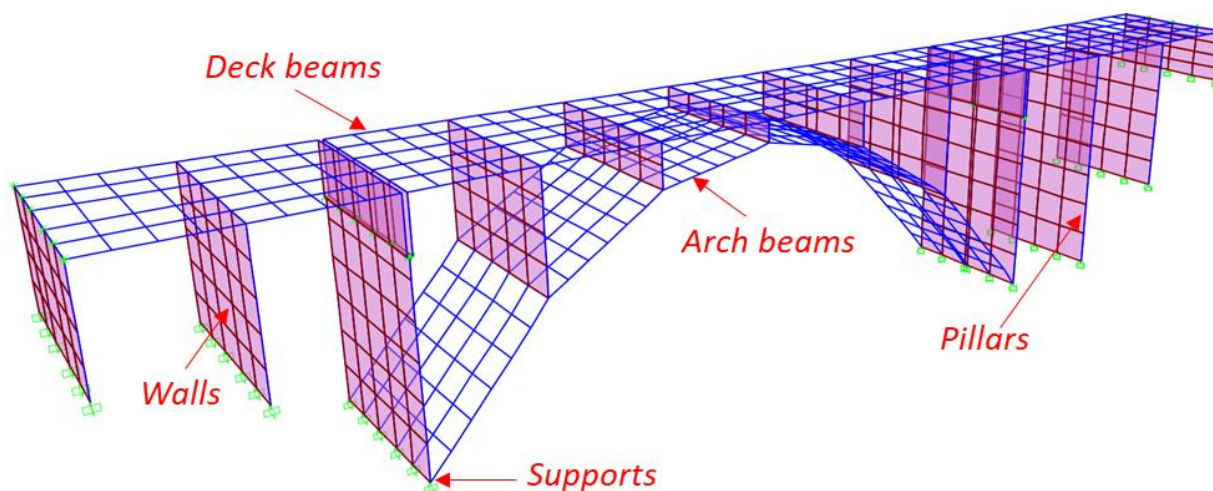
L'attività ha quindi avuto l'obiettivo di elaborare un modello numerico in grado di rappresentare il comportamento della struttura al fine di ottenere parametri dinamici fondamentali per il confronto con parametri basati sul monitoraggio della struttura.

Il modello del Viadotto è stato ottenuto tramite il programma di calcolo SAP2000, come riportato nella immagine di seguito.

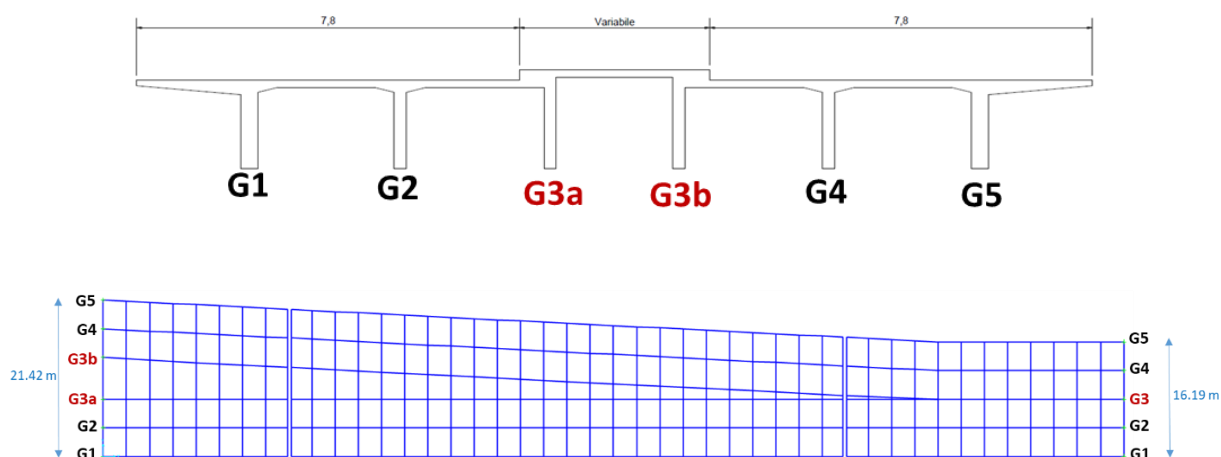


Per quanto riguarda la modellazione degli elementi, nello specifico:

- Travi, pilastri ed arco sono stati modellati come elementi frame;
- Pareti di collegamento RC sono state modellate come elementi shell spessi;
- Ssupporti dei pilastri sono modellati come giunti rigidi.



Le travi longitudinali sono state modellate come travi a T: (i) Travi a T standard e (ii) Travi a T rastremate.



Dimensions

Outside stem (t3)
Outside flange (t2)
Flange thickness (tf)
Stem thickness (tw)

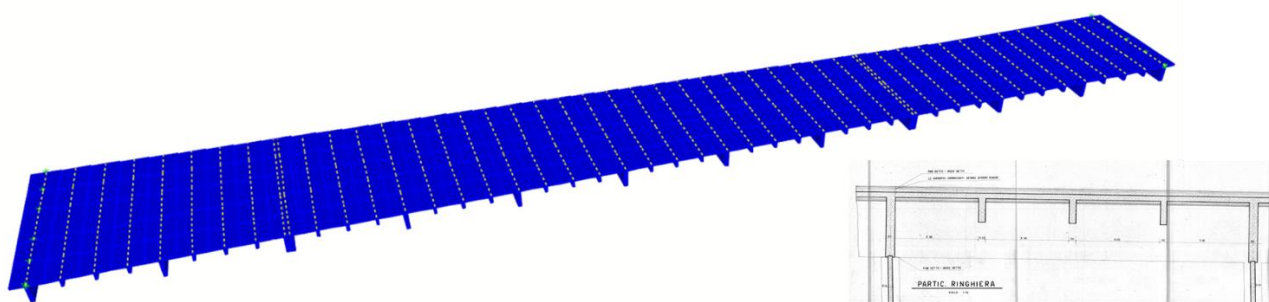
Section

Nonprismatic Section Name **Display Color** ☒

Section Notes

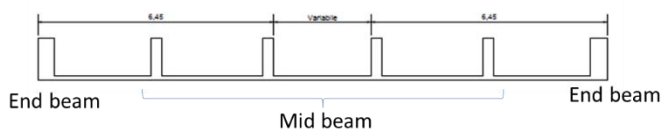
Start Section	End Section	Length	Length Type	EI33 Variation	EI22 Variation
GBT1A	GBT2A	10.	Variable	Linear	Linear
GBT1A	GBT2A	10.	Variable	Linear	Linear

Le travi trasversali sono modellate come travi a T: (i) Travi intermedie e (ii) Travi terminali



Dimensions		Section	Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Outside stem (t3)	0.8		Cross-section (axial) Area	1
Outside flange (t2)	2.5		Shear Area in 2 direction	1
Flange thickness (tf)	0.2		Shear Area in 3 direction	1
Stem thickness (tw)	0.2		Torsional Constant	0.01
			Moment of Inertia about 2 axis	0.01
			Moment of Inertia about 3 axis	1
			Mass	0
			Weight	0

Le travi ad arco sono state modellate come travi a T e travi a L: (i) Travi a T rovesciate (intermedie) e (ii) Travi di estremità (travi a L).



Section Name		Display Color
Arch-A(mid)		
Section Notes		Modify/Show Notes...
Dimensions		Section
Outside stem (t3)	1.15	
Outside flange (t2)	3.	
Flange thickness (tf)	0.12	
Stem thickness (tw)	0.3	

Section Name		Display Color
Arch-TransverseA,F		
Section Notes		Modify/Show Notes...
Dimensions		Section
Depth (t3)	0.12	
Width (t2)	2.55	

Section Name		Display Color
Arch-A,F(End)		
Section Notes		Modify/Show Notes...
Dimensions		Section
Outside vertical leg (t3)	1.15	
Outside horizontal leg (t2)	1.43	
Horizontal leg thickness (tf)	0.12	
Vertical leg thickness (tw)	0.45	

Property/Stiffness Modifiers for Analysis	
Cross-section (axial) Area	1
Shear Area in 2 direction	1
Shear Area in 3 direction	1
Torsional Constant	1
Moment of Inertia about 2 axis	1
Moment of Inertia about 3 axis	1
Mass	0
Weight	0

Le proprietà dei materiali utilizzati sono le seguenti. Ai fini dell'analisi modale, necessaria per confrontare i dati sperimentali con l'identificazione dinamica, è stato utilizzato il valore del modulo elastico pari a 42272 MPa.

General Data

Material Name and Display Color	C28/35
Material Type	Concrete
Material Grade	C28/35
Material Notes	Modify/Show Notes...

Weight and Mass

Weight per Unit Volume	24992.618
Mass per Unit Volume	2548.5377

Units

N, m, C

Isotropic Property Data

Modulus Of Elasticity, E	4.227E+10
Poisson, U	0.2
Coefficient Of Thermal Expansion, A	1.000E-05
Shear Modulus, G	1.761E+10

Other Properties For Concrete Materials

Specified Concrete Compressive Strength, f _c	28000000.
Expected Concrete Compressive Strength	28000000.
☐ Lightweight Concrete	
Shear Strength Reduction Factor	

4.3 Progettazione sistema di monitoraggio

L'attività in questione ha interessato la progettazione di un sistema di monitoraggio relativo al viadotto Canalone, che si è riusciti ad ottenere a valle di uno studio riguardante differenti soluzioni di sensoristica ed in relazione al dato dinamico che si aveva l'obiettivo di monitorare.

Il sistema in questione è basato su un approccio multi-obiettivo in grado di rilevare la presenza di carichi superiori ad una soglia di riferimento oltre che rilevare, localizzare e quantificare un eventuale danneggiamento strutturale.

Il processo di messa in opera del progetto è stato svolto in collaborazione con Mapei, STMicroelectronics, STRESS Scarl e TECNO IN S.p.A. Prima dell'esecuzione sono stati effettuati diversi sopralluoghi per valutare la fattibilità dell'intervento e per definire nel dettaglio la procedura operativa da attuare. Inoltre, al fine di facilitare la posa in opera del sistema sul luogo, l'assemblaggio dei supporti e della sensoristica è avvenuto all'interno dei Laboratori di Ricerca&Sviluppo Mapei e in collaborazione con STMicroelectronics.

L'obiettivo della progettazione è stato raggiunto attraverso due fasi:

- 1) Fase di studio della geometria degli elementi da monitorare;
- 2) Fase di installazione dei sensori.

La prima fase si è conclusa con la decisione di collocare, all'interno dei pilastri, delle coppie di sensori in corrispondenza della medesima sezione; mentre nell'arco, a causa dell'esiguo spessore dell'elemento, è stato possibile posizionare un solo sensore capacitivo per sezione individuata.

La seconda fase si è conclusa con la disposizione di tre termocoppie (due delle quali installate internamente agli elementi al fine di restituirne la temperatura reale), sei accelerometri installati sull'impalcato, quaranta sensori di pressione così ripartiti:

- 8 sensori di pressione installati nell'arco;
- 32 sensori di pressioni installati nella pilastrata che sorregge l'impalcato.

L'impianto della sensoristica si completa di centraline ad alta o bassa velocità a cui afferiscono più sensori; in particolare, si hanno 8 nodi per sensori di pressione, 2 nodi per accelerometri. Inoltre, per la trasmissione dei dati è installato un Router 4G ed è utilizzata connessione su fibra.

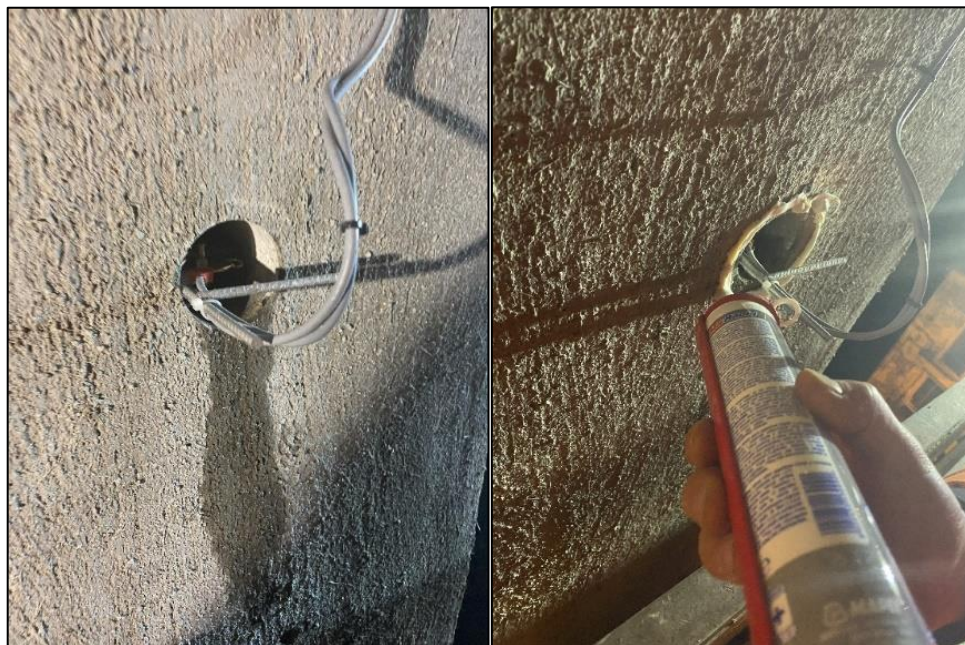
Entrando nello specifico del processo di installazione della sensoristica per l'attività in esame, il partner Mapei si è occupato della post-installazione dei sensori capacitivi nei pilastri e negli archi. In particolare, trattandosi di un'infrastruttura di altezza considerevole, ossia di un lavoro in quota, si sono serviti di un by-bridge per la posa in opera degli stessi.

Di seguito si riporta la procedura applicativa impiegata dal partner per la post-installazione:

- 1) Realizzazione di fori con profondità di circa 19-20 cm in corrispondenza delle pile mediante l'impiego di carotatrice con diametro esterno della sonda di 62 mm e di fori di profondità 8-10 cm in corrispondenza degli archi, con stesso diametro esterno della sonda;
- 2) Pulizia del foro mediante l'ausilio di aria compressa per la rimozione della polvere formatasi nell'operazione precedente;
- 3) Posa in opera del sistema di monitoraggio già assemblato. In particolare, la post-installazione ha previsto l'uso di una porzione di maglia di armatura filettata su cui sono stati fissati i sensori capacitivi come mostrato in figura.



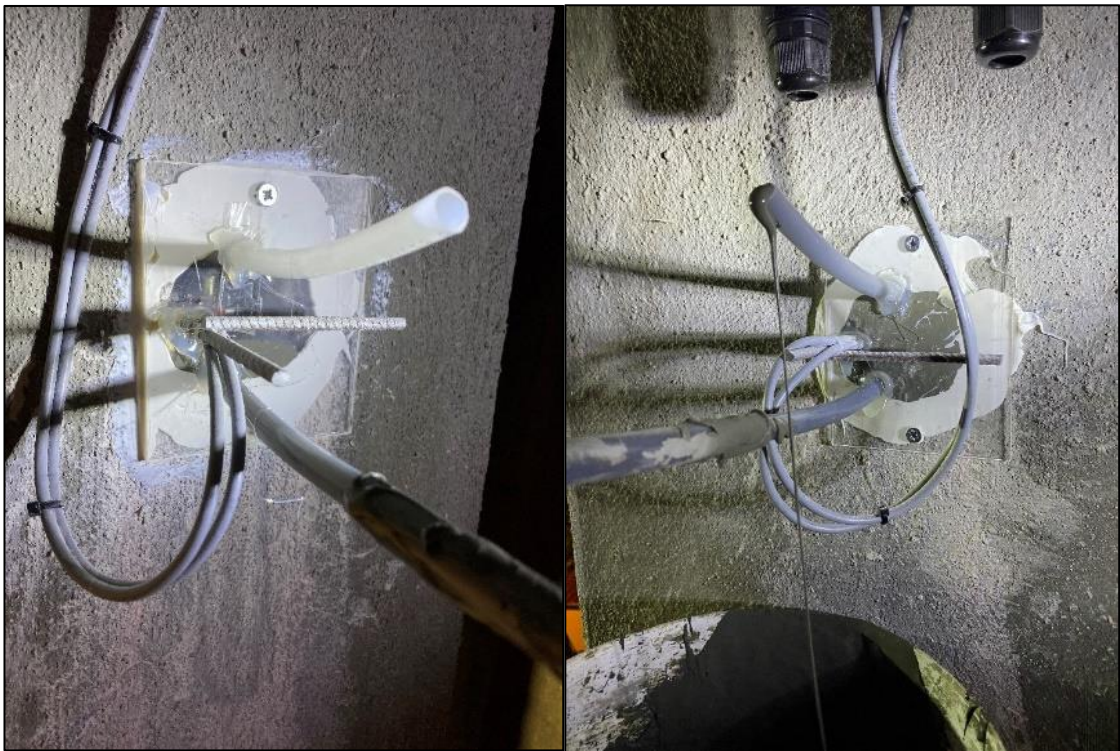
Il sistema barra-sensore è stato poi posizionato all'interno del foro. La barra filettata, fuoriuscita dal foro precedentemente effettuato, è stata innestata all'interno di una piastra di chiusura rettangolare in plexiglass di dimensione idonea per la chiusura del foro.



La piastra è stata dotata di 2 fori, uno superiore e uno inferiore, nei quali sono stati posizionati dei tubicini di iniezione per la posa in opera della malta all'interno della cavità. Inoltre, è stata prevista la presenza di un'asola laterale dove si è innestata la barra filettata. La piastra è stata successivamente fissata al supporto mediante l'impiego di viti e tasselli. Prima di posizionare la piastra è stato necessario sigillare tutta la superficie esterna della piastra e del foro mediante l'utilizzo di un adesivo ad alto modulo elastico, monocomponente, tissotropico, a base di polimeri sililati.



- 4) Riempimento del foro mediante l'iniezione di legante cementizio espansivo superfluido. L'iniezione è stata eseguita in continuo mediante l'impiego di un'adeguata pistola per l'iniezione di boiacche e siliconi. Dopo aver miscelato il materiale, è stato iniettato in continuo all'interno della cavità, partendo dal tubicino più in basso, pompando la boiaccia fino a quando questa non ha iniziato a fuoriuscire dal tubicino posto più in alto.



Infine, per quanto riguarda il materiale da iniezione, è stata impiegata una boiaccia cementizia costituita da un legante cementizio espansivo superfluido. Tale legante cementizio, contiene al suo interno degli agenti espansivi che permettono di ottenere delle boiacche prive di bleeding e di ritiro. L'assenza di ritiro, in interventi di questo tipo, risulta fondamentale poiché garantisce il completo riempimento della sezione in cui viene post-installato il sensore. La boiaccia in questione è stata preparata miscelando il legante con il 32% di acqua con una resa di circa $1,5 \text{ kg/dm}^3$ di cavità da riempire. Di seguito vengono riportate le caratteristiche meccaniche della boiaccia cementizia.

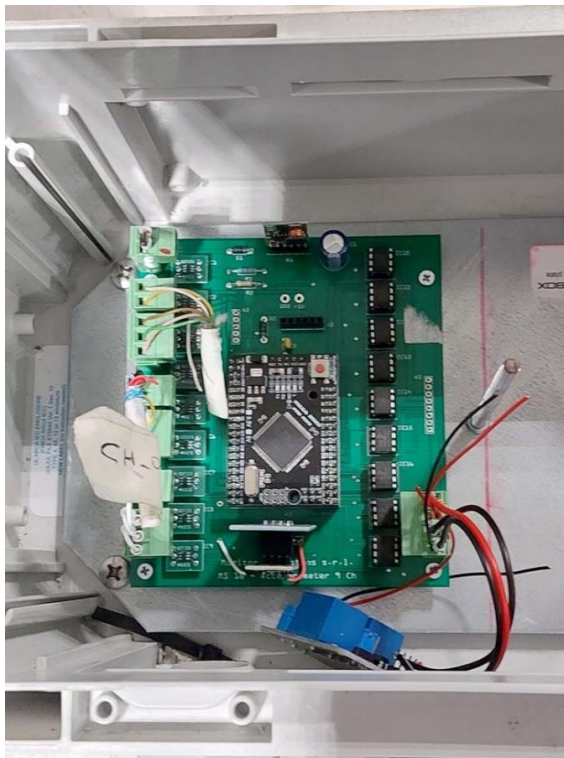
Caratteristiche prestazionali	Metodo di prova	Requisiti in accordo alla EN 1504-6	Prestazione prodotto
Fluidità al cono (secondi): – dopo miscelazione: – dopo 30 minuti:	EN 445	non richiesto	13 20
Massa volumica dell'impasto (kg/m ³):	EN 1015-6	non richiesto	2040
Acqua essudata (bleeding):	UNI 8998	non richiesto	assente
Tempo di presa (ore): – inizio presa: – fine presa:	EN 196-3	non richiesto	> 4 < 8
Resistenza a compressione (MPa):	EN 12190	> dell'80% del valore dichiarato dal produttore	30 (dopo 1 g) 60 (dopo 7 gg) 75 (dopo 28 gg)
Resistenza a flessione (MPa):	EN 196-1	non richiesto	4 (dopo 1 g) 7 (dopo 7 gg) 8 (dopo 28 gg)
Adesione su calcestruzzo (supporto di tipo MC 0,40 – rapporto a/c = 0,40) secondo EN 1766 (MPa):	EN 1542	non richiesto	> 2,5 (rottura supporto)
Espansione in fase plastica (%):	UNI 8996-89	non richiesto	≥ 0,3
Espansione contrastata dopo 24 h (µm/m):	UNI 8147 metodo A	non richiesto	> 300

Dettaglio progetto strumentazione di monitoraggio dinamico

E' stato progettato un apposito sistema di acquisizione dati vibrometrico in base alle desiderate di poter acquisire dati per un esteso intervallo temporale pari al almeno 1 ora di registrazione senza soluzione di continuità. Il sistema progettato è in grado di poter sviluppare un sistema hardware / software customizzato con i seguenti requisiti:

- hardware con elevati standard costruttivi ma a basso costo;
- possibilità di scrivere un software dedicato;
- acquisizione dati senza soluzione di continuità per un periodo di tempo pari ad almeno 1 ora;
- possibilità di collegare almeno n.2 accelerometri triassiali;
- alimentazione con corrente di rete 220V;
- resistenza alle intemperie data l'installazione all'aperto ovvero presso la struttura monitorata;
- invio dei dati in automatico su piattaforma Cloud AWS con protocollo FTPS.

Il progetto ha previsto la realizzazione di un'apparecchiatura composta da una scheda di acquisizione dati, appositamente progettata, e da un software di gestione scritto in linguaggio C++. I dati acquisiti sono inviati ad un mini-pc, con a bordo software sia LINUX sia codici scritti in linguaggio C++, progettati per la memorizzazione e l'invio dei dati ad un Cloud AWS.

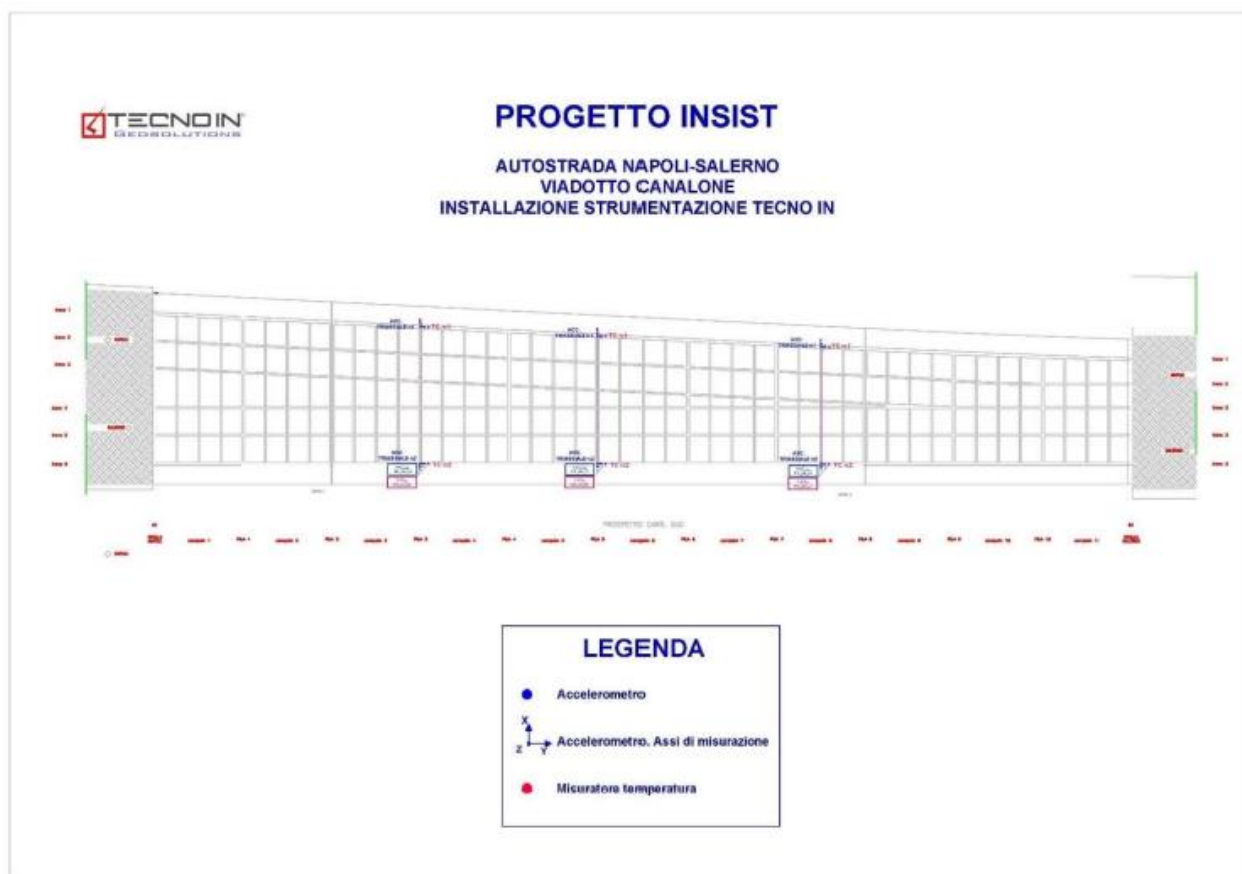


Scheda di acquisizione



Scheda tecnica accelerometro TE 4030

Il monitoraggio implementato presso il viadotto Canalone, consiste in n.3 unità di acquisizione, in grado di effettuare misurazioni con un periodo di campionamento pari a 100 S/s, a ciascuna delle quali sono stati connessi n.2 accelerometri triassiali, per un totale di n.6 accelerometri. In prossimità di ciascun accelerometro, è stato installato un trasduttore di temperatura connesso ad un'unità di acquisizione dedicata. Di seguito, si riporta l'ubicazione dei singoli trasduttori.



I trasduttori sono connessi, alle rispettive UAD, mediante cavi di segnale di tipo schermato. Ciascuna UAD è equipaggiata con un mini-pc che funge da tramite tra la motherboard ed un router equipaggiato con una SIM dati 4G+. Il collegamento tra motherboard e mini-pc è stabilito mediante connessione USB mentre il collegamento tra mini-pc e router avviene tramite cavo LAN. I dati sono inviati, tramite il provider Vodafone, al cloud della Tecno In S.p.A. powered by Amazon AWS. Le misurazioni della temperatura sono effettuate avvalendosi di n.3 unità di acquisizione denominate “statiche” in quanto capaci di rilevare i dati a partire da un intervallo pari a 2 minuti. Attualmente le periferiche sono impostate per un campionamento ogni 30 minuti. Tale valore è configurabile dalla Tecno In variando i parametri via FTP. A ciascuna unità sono connessi due trasduttori di temperatura PT100 ed altrettanti condizionatori di segnale 4-20 mA, connessi mediante cavi di segnale di tipo schermato. I dati statici sono inviati al cloud mediante, modem integrato 2G, equipaggiato con SIM multiprovider agganciate al provider Vodafone. Il sistema di trasmissione dati è, quindi, separato per le unità dinamiche (accelerometriche) e quelle statiche (termometri).

- Per le unità dinamiche, la trasmissione avviene tramite router equipaggiato con SIM dati XL con velocità della rete 4G+ pari, in upload a circa 30 Mbps

- Per le unità statica, considerate le dimensioni del singolo dato inviato (pari ad 1 kb), la trasmissione avviene tramite modem 2G integrato, con velocità che in upload è pari a 20 kpbs

La sincronizzazione dei dati avviene mediante server NTP (Network Time Protocol). Inoltre, le UAD dinamiche, effettuano automaticamente una regolazione ogni notte alle 03:00.

Al fine di memorizzare i dati acquisiti, è stato predisposto un Cloud ospitato da Amazon Web Service (AWS) definito Amazon Simple Storage Service (Amazon S3).



I dati possono essere scaricati accedendo al Cloud mediante credenziali personalizzate.

Per ogni dettaglio si rimanda all'*All.2 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TIN-Dimostratore Viario-Strumentazione Viadotto Canalone*

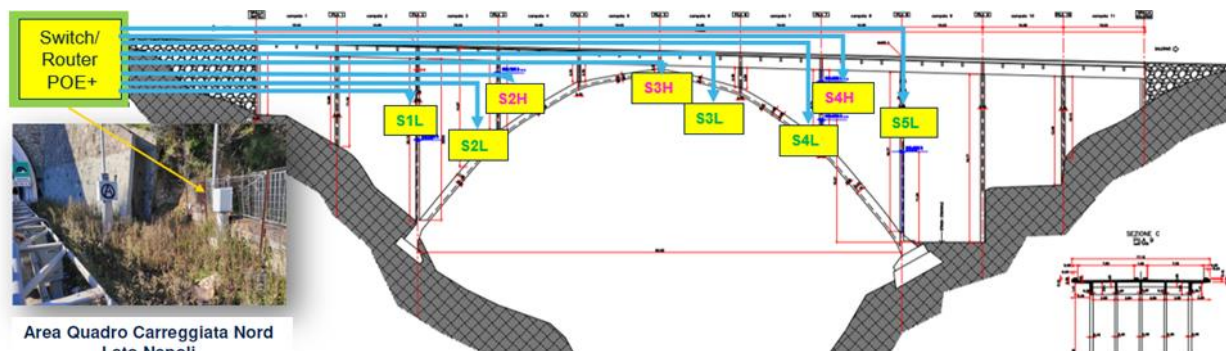
Dettaglio progetto strumentazione di monitoraggio basato su sensori di pressione

L'obiettivo di questa attività è stato quello di realizzare un sistema di monitoraggio al fine di valutare la variazione di massima delle tensioni normali attese sui pilastri e sull'arco del viadotto durante le normali condizioni di traffico veicolare. Il viadotto Canalone si trova sull'A3 nel tratto autostradale tra Napoli e Salerno, un'arteria molto trafficata ed attraversata da molti mezzi pesanti.

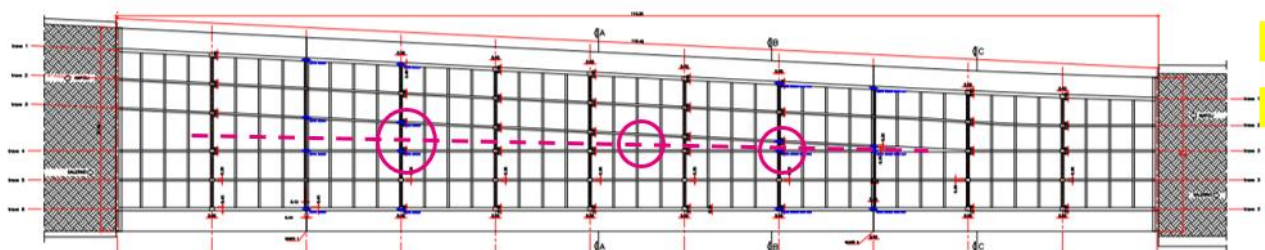
In collaborazione con UNINA-Dist è stato progettato il posizionamento dei sensori, di seguito schematizzato. Il monitoraggio prevede l'uso di 40 sensori capacitivi distribuiti su tutto il viadotto, di questi 32 sono stati posti su 16 pilastri (2 per pilastro) e 8 sono stati posti sull'arco. I sensori di ogni singola installazione sono stati collegati una scheda di acquisizione denominata **nodo** ed i nodi a loro volta collegati tra loro in gruppo fino a formare 8 sistemi distinti.

Ogni singolo sistema è formato da centraline nodo connesse tra loro tramite un cavo tipo ethernet POE+ su cui viaggia sia l'alimentazione che la comunicazione dati (basata su protocollo CAN). Le centraline nodo di ogni singolo gruppo vengono collegate ad una centralina principale denominata **centralina di sistema**, quest'ultima è stata alimentata attraverso un cavo dati tipo LAN POE+ proveniente dal modem/router (dotato di scheda dati SIM 4G) che si trovano nell'armadio stradale posto sulla piazzola lato Nord del viadotto.

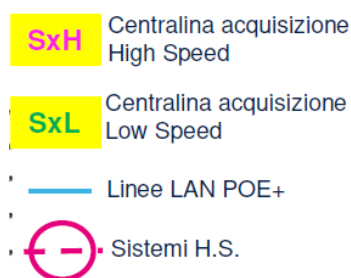
Lo schema del sistema di monitoraggio è mostrato in figura.



(a)

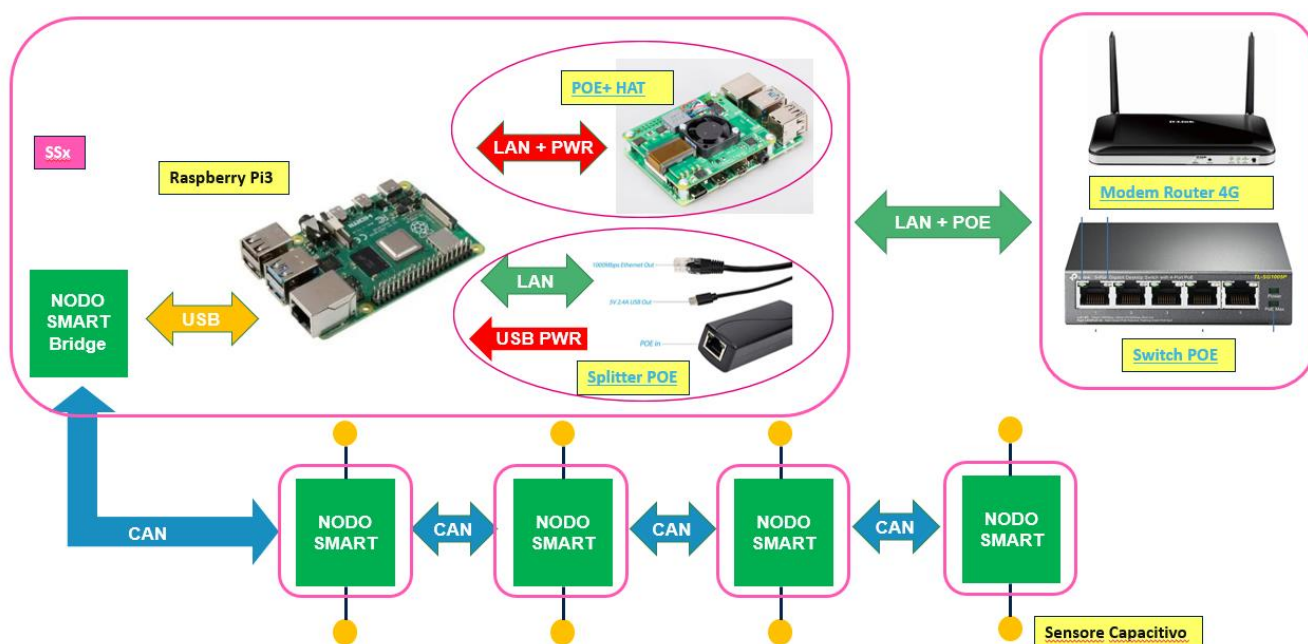


(b)



(c)

(a) Schema sistemi di acquisizione vista lato mare. (b) Schema sistema di acquisizione vista dall'alto.
(c) Legenda dei simboli.



Schema complessivo del singolo sistema di acquisizione progettato per il viadotto Canalone

Degli otto sistemi impiegati cinque sono stati utilizzati per acquisizioni low-speed, (denominati SxL) e tre per acquisizioni di tipo high-speed (denominati SxH).

I sistemi SxL sono basati su tecnologia di acquisizione TSC e acquisiscono con una frequenza di 1Hz mentre i sistemi SxH sono basati su tecnologia di acquisizione CVC e acquisiscono con una frequenza di circa 10Hz.

In figura di seguito è riportata la lista dei sistemi e la loro disposizione sul viadotto:

- S1L – Centralina Acquisizione LOW speed Pilastrì Pila 2 T0+T2-T3-T5 (4X2)
 S2H – Centralina Acquisizione HIGH speed Pilastrì Pila 3 T2-T3 (2X2)
 S2L – Centralina Acquisizione LOW speed Pilastrì Pila 3 T0-T5 (2X2) + Arco Campata 4 T0-T5 (2X2)
 S3H – Centralina Acquisizione HIGH speed Arco Campata 6 T2-T3 (2X2)
 S3L – Centralina Acquisizione LOW speed Arco Campata 6 T0-T5 (2X2)
 S4H – Centralina Acquisizione HIGH speed Pilastrì Pila 7 T3-T3 (2X2)
 S4L – Centralina Acquisizione LOW speed Pilastrì Pila 7 T0-T5 (2X2) + Arco Campata 8 T0-T5 (2X2)
 S5L – Centralina Acquisizione LOW speed Pilastrì Pila 8 (4X2)

Il sistema di acquisizione è composto da una centralina di acquisizione posta in scatola plastica stagna (200x90x50mm) a cui sono collegati due sensori capacitivi (lunghezza del cavo di circa 50cm), come mostrato in figura di seguito. STMicroelectronics ha optato per una soluzione già assemblata, ovvero l'elettronica di acquisizione in scatola stagna, i connettori per i collegamenti POE+/CAN e i sensori capacitivi, allo scopo di favorire il più possibile il processo di installazione. Nel caso del viadotto Canalone, infatti, essendo stati fatti dei lavori in quota mediante l'utilizzo di

By-bridge (lavori fatti prevalentemente in notturna) è stato molto importante avere un sistema che fosse relativamente facile e rapido da installare.

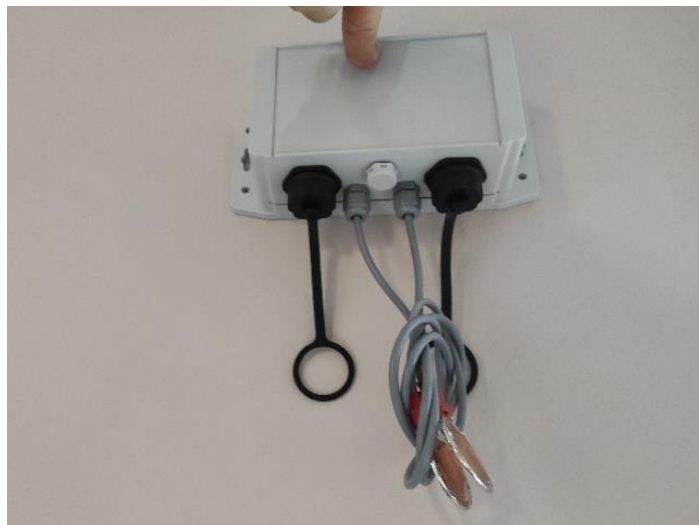
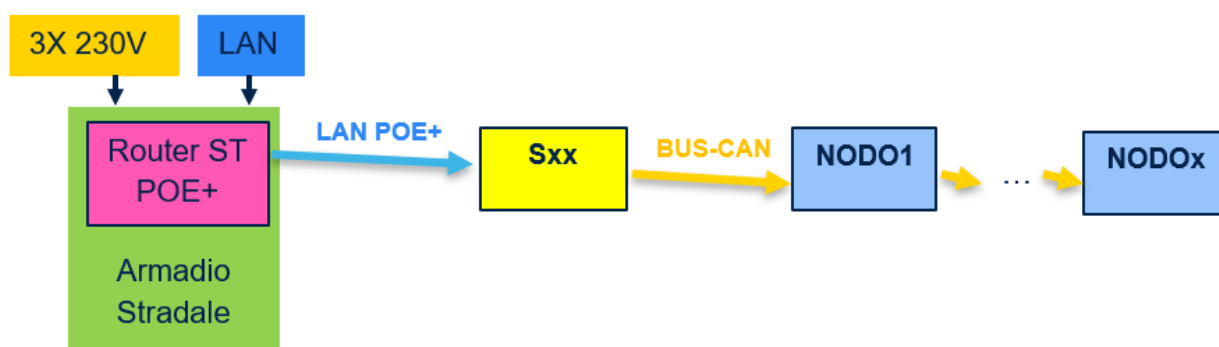


Foto del nodo di acquisizione assemblato.

Queste centraline sono collegate, a gruppi di massimo 4 unità, a delle centraline principali sempre poste in scatola plastica stagna (240x120x50mm) denominate centraline SxH e SxL, attraverso un collegamento BUS-CAN su linea dati (cavo Rj45-cat6).

Ogni centralina è stata infine collegata al router POE+ che si trova nell'armadio posto a quota strada attraverso una linea dati POE+ dedicata (cavo Rj45-cat6).

Schema del sistema di acquisizione dal router al singolo nodo. uò essere sintetizzato come di seguito illustrato:



Schema del sistema di acquisizione dal router al singolo nodo.

Le connessioni tra le diverse unità sono state tutte indicate nel file DXF fornito da UniNA e riportate nella versione dello stesso disegno CAD con i layer di seguito schematizzati:

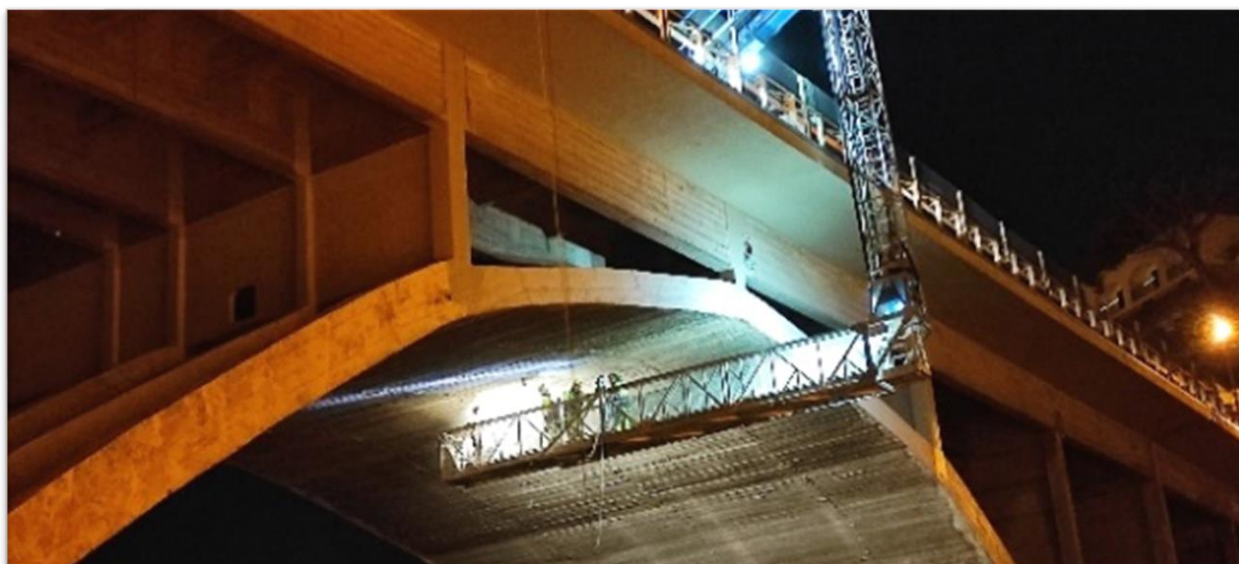
					ST_Centraline
					ST_Linee_Bus_CAN
					ST_Linee_PoE+
					ST_Nodi
					ST_Router_PoE+

Layer delle linee e dei sistemi installati sul viadotto Canalone riportati su disegno CAD.

4.4 Applicazione in campo

Il progetto di monitoraggio, è stato installato sul viadotto Canalone, grazie alla collaborazione attiva del Consorzio Stabile SIS Scpa, concessionario nell'attività di gestione del tracciato dell'A3, in cui ricade il viadotto in oggetto.

L'attività di installazione è stata eseguita dal gestore dell'infrastruttura con la supervisione costante dei partner industriali coinvolti. L'attività è risultata complessa e articolata sia per numero di sensori e centraline sia per tipologia di installazione, ed ha rappresentato un'importante sfida per il progetto.



Strumentazione di monitoraggio dinamico

Per quanto concerne le unità di acquisizione accelerometriche, queste, coerentemente con il progetto hanno previsto l'installazione di n. 3 unità accelerometriche triassiali lato monte e n. 3 unità accelerometriche triassiali lato mare con rispettive UAD_{ACC} ed UAD_{TC} . Di seguito si riporta



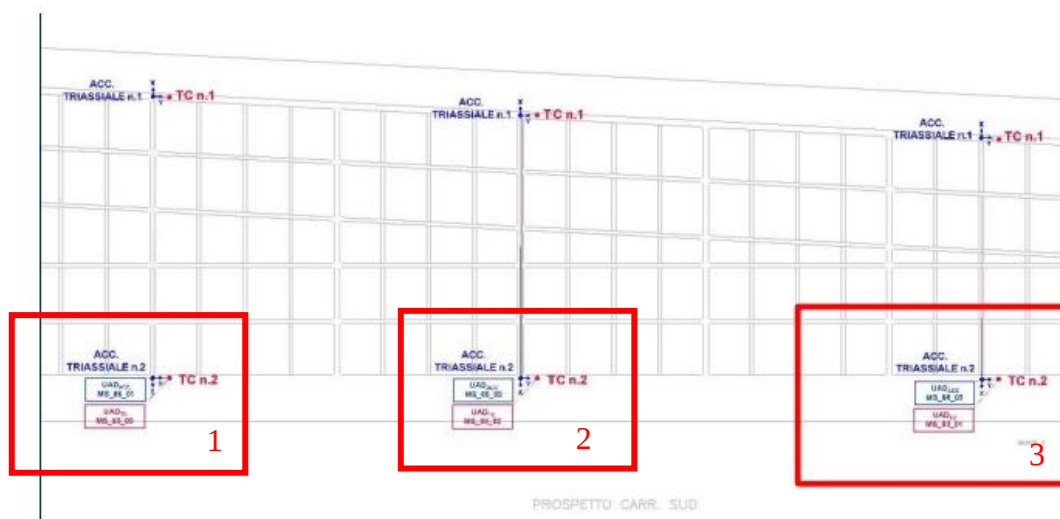
1



2



3

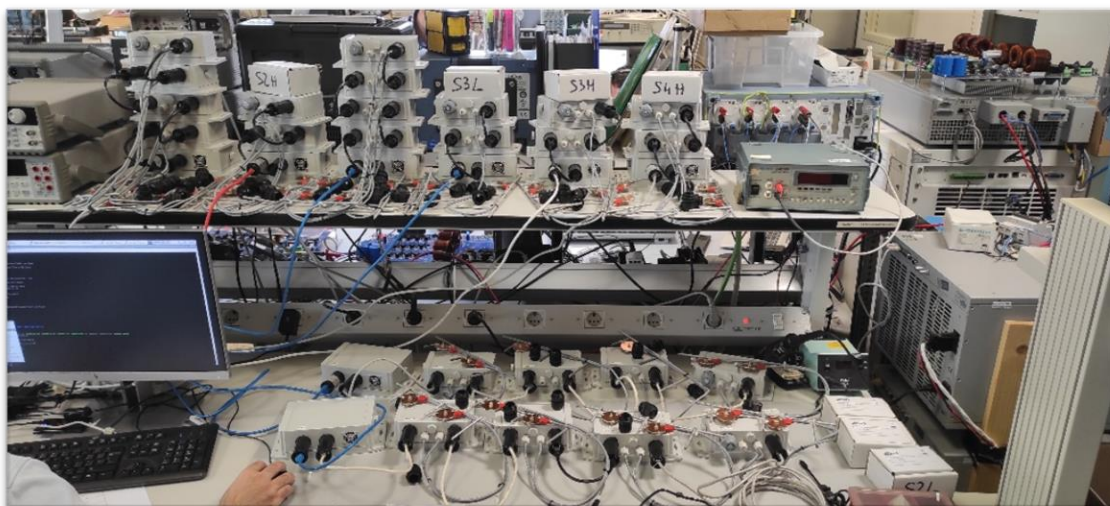


La TecnoIn ha supervisionato le fasi di installazione in campo.

Nel cloud predisposto è stata creata un'apposita directory dove sono copiati i dati provenienti dalle singole unità di acquisizione in formato .txt, dove, accedendo con apposite credenziali è possibile scaricarle.

Strumentazione di monitoraggio basato su sensori di pressione

Il sistema, che risulta di elevata complessità visto il numero di sensori e di centraline, è stato testato in laboratorio per diverse settimane al fine di verificare il funzionamento di tutte le parti visto che una volta installato sarebbe risultato parecchio difficile ed oneroso intervenire.



Sistema di acquisizione per il viadotto Canalone durante le fasi di test presso i laboratori STMicroelectronics.

Lo scopo del monitoraggio di questa struttura è quello di acquisire i dati di 40 sensori posti su pilastri e arco al fine di monitorare il contributo, in termini di carico, che il traffico veicolare dà alla struttura stessa.

L'installazione dei sensori e dell'elettronica è durata alcune settimane. Durante le fasi iniziali dell'installazione il personale STMicroelectronics, insieme al personale Mapei, ha supervisionato le procedure di installazione dei sensori e dei sistemi, in particolare fornendo indicazioni ai tecnici installatori come approcciare all'installazione delle centraline e come connettere tra loro i sistemi trasferendo il know-how necessario per poter procedere senza problemi all'installazione di tutti i sistemi. Di seguito alcune immagini:



Installazione dei sensori e delle centraline effettuati in notturna



Struttura con i sistemi già installati

Personale STMicroelectronics, insieme all'impresa installatrice, ed UniNA, ha collaudato il sistema di acquisizione. E' quindi messa in servizio la piattaforma permettendo l'acquisizione dei dati sulle centraline di sistema di ogni gruppo di acquisizione. Inoltre, è stata effettuata temporaneamente, con dei sistemi 4G portatili messi a disposizione da STMicroelectronics, la registrazione dei dati su cloud permettendo così di testare anche la funzionalità real-time dei sistemi attraverso la dashboard sviluppata da STMicroelectronics.



Foto dei sistemi installati e del sistema in fase di collaudo.



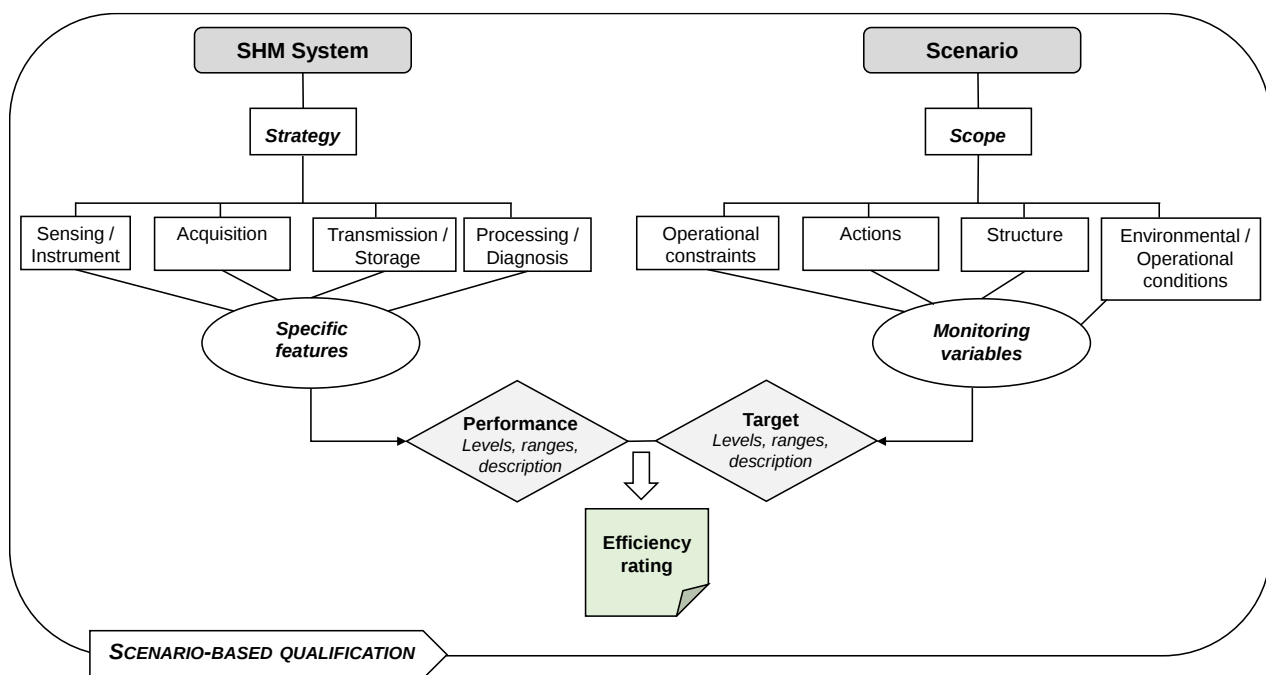
Esempio di acquisizione dati in real-time mediante dashboard STMicroelectronics su cloud Amazon AWS.

4.5 Qualificazione sistema di monitoraggio installato

Le attività hanno avuto come scopo principale l'applicazione della procedura di qualificazione formulata e proposta nell'ambito dell'OR5 al caso dimostratore del viadotto “Canalone”, al fine di ottenere una valutazione dell'efficienza del sistema di monitoraggio rispetto allo scenario. A tal fine, le attività hanno previsto, innanzitutto, un'analisi approfondita dello scenario di monitoraggio, andando a caratterizzare i parametri salienti rispetto ai vari aspetti dello stesso fino a definire le variabili del monitoraggio. È stato successivamente condotto uno studio dettagliato del sistema di monitoraggio installato sul caso dimostratore finalizzato all'identificazione delle caratteristiche specifiche del sistema stesso e alla sua qualificazione rispetto allo scenario di riferimento attraverso la valutazione dell'“efficiency rating” (ER).

4.5.1 Inquadramento della procedura di qualificazione

La procedura di qualificazione proposta quindi, così come dettagliatamente descritta nella Relazione Finale relativa all'OR5 e qui applicata al caso dimostratore, riconosce le peculiarità del caso e si fonda su un approccio di tipo “scenario-based”, come sintetizzato nel flowchart di seguito.



Schema dell'approccio di qualificazione “scenario-based” di un sistema di monitoraggio strutturale in ambito civile

Il principale obiettivo della qualificazione è la valutazione della rispondenza di una strategia di monitoraggio rispetto ad un dato scenario applicativo. Per raggiungere tale obiettivo occorre, innanzitutto, caratterizzare in maniera sistematica e completa lo scenario all'interno del quale il sistema di monitoraggio deve operare, definendo gli scopi del monitoraggio ed il suo ambito applicativo, e analizzando in dettaglio tutte le componenti che contribuiscono alla definizione dello

scenario (caratteristiche della struttura oggetto di monitoraggio, azioni agenti su di essa, vincoli operativi, condizioni operative e/o ambientali).

La definizione puntuale dello scenario è funzionale all'identificazione delle variabili di monitoraggio, ossia dei parametri di risposta strutturale rilevanti ai fini della valutazione delle prestazioni e/o dello stato di salute della struttura.

La procedura di qualificazione prevede, parallelamente, l'analisi della strategia di monitoraggio e l'individuazione delle caratteristiche specifiche del sistema SHM e delle sue componenti che, nel complesso, contribuiscono alla determinazione delle performance del sistema stesso.

Il confronto delle performance attese del sistema SHM con i target associati allo scenario di riferimento (individuati e quantificati sulla base, ad esempio, di evidenze consolidate di letteratura) consente di qualificare la rispondenza del sistema stesso allo scenario di interesse.

La rispondenza della strategia di monitoraggio allo scenario di riferimento si traduce quantitativamente nella valutazione di un "efficiency rating" del sistema di monitoraggio.

4.5.2 Applicazione della procedura di qualificazione al dimostratore

Al fine di assicurare la corretta applicazione della procedura di qualificazione descritta brevemente nel paragrafo precedente, è necessario definire in maniera esaustiva lo scenario all'interno del quale il sistema di monitoraggio deve operare. Occorre, pertanto, procedere innanzitutto all'identificazione degli scopi del monitoraggio. Quindi, è fondamentale definire in dettaglio gli aspetti fondamentali che contraddistinguono lo scenario, come di seguito elencati:

- caratteristiche della struttura oggetto del monitoraggio (tipologia strutturale, dettagli costruttivi, etc.);
- azioni agenti sulla struttura rilevanti rispetto allo scopo del monitoraggio stesso (terremoto, carichi da traffico, vento, etc.)
- vincoli di tipo operativo che possono influenzare direttamente o indirettamente la definizione del sistema SHM (limitazioni sull'accessibilità in determinati punti, limiti di budget, etc.);
- condizioni operative e/o ambientali che possono influire sui dati strumentali del sistema SHM (temperatura, umidità, etc.).

Per tutti i dettagli si rimanda all'All.3.INSIST_OR6-Att6.1-STR_CNR- Dimostratore viario- Applicazione della procedura di qualificazione al dimostratore.

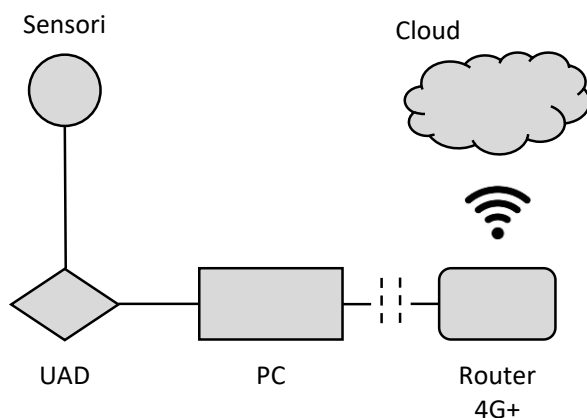
Il sistema SHM

Il sistema di monitoraggio progettato per il caso dimostratore ed installato sul viadotto “Canalone” è costituito da due sottosistemi SHM:

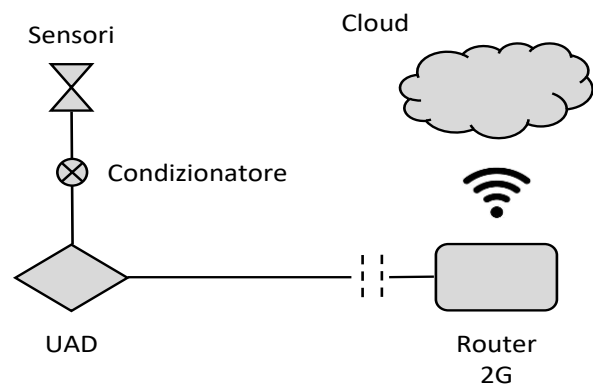
- un sistema di monitoraggio statico, caratterizzato da sensori di pressione capacitivi innovativi (sviluppati nell’ambito del presente progetto di ricerca);
- un sistema di monitoraggio dinamico, caratterizzato da sensori di vibrazione commerciali (accelerometri) accoppiati a sensori per la misura della temperatura.

Dati la natura altamente innovativa e lo stato prototipale del sistema di monitoraggio basato sull’utilizzo dei sensori di pressione capacitivi sviluppati nell’ambito del presente progetto, la procedura di qualificazione è stata applicata esclusivamente con riferimento al sistema SHM dinamico basato su hardware commerciale.

Di seguito sono mostrati le architetture dei sottosistemi di misura dinamico (per l’acquisizione dei dati accelerometrici) e statico (per l’acquisizione dei dati di temperatura).



Architettura del sistema di misura dinamica (schema per il singolo array di sensori)



Architettura del sistema statico di misura della temperatura (schema per il singolo array di sensori)

Efficiency rating del sistema

La procedura di qualificazione proposta ha come obiettivo principale la valutazione della rispondenza del sistema di monitoraggio rispetto allo scenario identificato. A tal fine, la prima fase è la definizione dei cosiddetti target di performance richiesta. Questi ultimi rappresentano i requisiti minimi che il sistema SHM deve soddisfare per essere considerato compatibile con lo scenario di applicazione. Nel caso in esame, sulla base di un approfondito studio di letteratura riportato nella Relazione Finale relativa all’OR5, sono stati definiti i target per il caso del dimostratore, così come riportati in dettaglio nelle Tabelle di seguito riportate.

A valle della definizione dei target, si procede alla valutazione dell'efficiency rating (ER), per confronto tra le performance del sistema SHM e i target di monitoraggio. La procedura proposta prevede l'applicazione di due approcci distinti per la valutazione dell'ER, come di seguito definite.

- A. *Approccio Checklist*: la metodologia controlla quanti dei target legati allo scenario sono soddisfatti dalla strategia di monitoraggio e fornisce un risultato globale espresso in termini percentuali. Il risultato ottenuto è dato dal rapporto tra il numero di caratteristiche specifiche la cui performance soddisfa il target e il numero delle caratteristiche specifiche ritenute critiche per lo scenario esaminato.
- B. *Valutazione quantitativa*: per ciascuna delle componenti del sistema SHM, la metodologia valuta in che percentuale i target legati allo scenario sono soddisfatti dalle prestazioni (ER parziale) e consente una valutazione disaggregata rispetto alle componenti del sistema espressa mediante un diagramma di Kiviat. Tale approccio fornisce un livello di informazione aggiuntiva, rispetto alla metodologia "A", che può consentire l'identificazione di eventuali punti deboli della strategia di monitoraggio proposta e agevolare l'implementazione di eventuali azioni correttive.

Sensori accelerometrici: target ed ER (* N.C.: non critico, ** C.: critico)

Caratteristica	Target	ER (%)
Sensibilità [V/g]	10	10
Range di misura [g]	± 0.5	100
Risoluzione [g]	$\leq 10^{-5}$	-
Risposta in frequenza [Hz]	0 - 50	100
Non linearità [%]	≤ 1	100
Sensibilità trasversale [V/g]	$\leq 2\%$	-
Range dinamico [dB]	≥ 100	-
Self noise [$\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$]	≤ 1	2
Shock [g]	N. C.*	-
Offset [V]	N. C.	-
Excitation [V]	N. C.	-
Tempo di risposta [ms]	N. C.	-
Temperatura operativa [$^{\circ}\text{C}$]	2 / 35	100
Effetti termici [-]	N. C.	-
Range umidità relativa [%]	N. C.	-
Interferenza elettromagnetica [-]	C. **	-
IP [grado]	65	100
Alimentazione [-]	N. C.	-
Installazione [-]	Meccanica	100
Media (%)		76.5

Sensori di temperatura: target ed ER

Caratteristica	Target	ER (%)
Sensibilità [° C]	-	-
Range di misura [° C]	2 / 35	100
Risoluzione [° C]	0.1	100
Temperatura operativa [° C]	2 / 35	100
Effetti termici [-]	N. C.	-
Range umidità relativa [%]	N. C.	-
Interferenza elettromagnetica [-]	N. C.	-
IP [grado]	N. C.	-
Alimentazione [-]	N. C.	-
Installazione [-]	Meccanica	100
Media (%)		100.0

Unità di acquisizione: target ed ER

Caratteristica	Target UAD Accelerometri	ER (%)	Target UAD Termocoppie	ER (%)
Layout [-]	Osservabilità modi flessionali e torsionali	100	Supporto compensazione EOVS	100
Numero unità [-]				
Modalità [-]	N. C.	-	N. C.	-
Frequenza di campionamento [Hz]	≥ 100	100	Statica	100
Sincronizzazione [-]	Sì	100	N. C.	-
Risoluzione [bit]	24	66	N. C.	-
Consumo [W]	N. C.	-	N. C.	-
Alimentazione [-]	N. C.	-	N. C.	-
IP [-]	65	100	65	100
Modalità di acquisizione [-]	Continua	100	Continua	100
Media (%)		94.3	Media (%)	100.0

Sistema di trasmissione: target ed ER

Caratteristica	Target	ER (%)
Modalità [-]	N. C.	100
Massima distanza di trasmissione [-]	N. C.	100
Massima velocità di trasmissione [Mbps]	≥ 0.2 (Sistema dinamico) N. C. (Sistema statico)	100 100
Throughput [Hz]	N. C.	-
Consumo [W]	N. C.	-
Alimentazione [-]	N. C.	-
Media (%)		100.0

Sistema di storage: target ed ER

Caratteristica	Target	ER (%)
Modalità [-]	N. C.	100
Memorizzazione [-]	N. C.	100
Capacità [GB]	due settimane	100
Tempo di accesso [ms]	N. C.	-
Ridondanza [-]	Backup locale	100
Formato dati [-]	N. C.	-
Media (%)		100.0

Sistema di elaborazione: target ed ER

Caratteristica	Target	ER (%)
Approccio [-]	Data Driven	100
Livello Damage Detection [classe]	I	100
Damage feature [-]	Frequenze naturali	100
EOV [Sì/No]	Sì	0
Damage detection [-]	SPR	100
Check malfunzionamenti [Sì/No]	Sì	100
Recovery [-]	N. C.	-
Metodi di analisi [-]	OMA automatica	0
Allarmi [-]	Allarme basato su SPR	0
Sorgente dati [-]	Analisi risposta globale	100
Media (%)		66.7

Applicando la metodologia “A” si ottiene per il caso dimostratore un ER globale pari al 74%.

La metodologia “B” prevede la valutazione dei valori di ER parziali, cioè per la singola caratteristica specifica. Tali valori sono riportati nelle Tabelle da 7 a 12, espressi in termini percentuali. Per ciascun componente del sistema SHM è quindi possibile ricavare un valore medio degli ER parziali che ne descrive sinteticamente l’efficienza rispetto allo scenario. La figura a pagina seguente **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** mostra il diagramma di Kiviat ottenuto per il caso dimostratore. Osservando il diagramma appare evidente come globalmente la strategia di monitoraggio applicata per il dimostratore appaia rispondente ai target di monitoraggio. Tuttavia, alcune modifiche per quanto concerne in particolare le caratteristiche dei sensori di vibrazione e delle procedure di elaborazione potrebbero migliorare ulteriormente l’efficienza della strategia di monitoraggio.

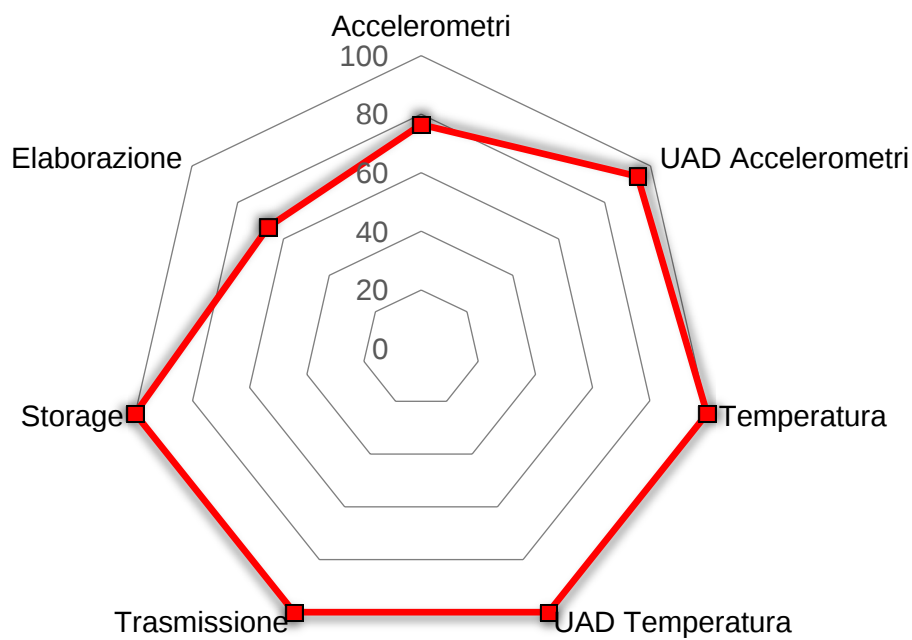


Diagramma di Kiviat per la valutazione dell'efficiency rating del sistema SHM applicato al caso dimostratore

4.5.3 Impatto atteso

La procedura di qualificazione proposta e applicata al caso dimostratore si configura come una possibile risposta alla crescente richiesta di qualificazione e/o validazione di sistemi di monitoraggio in ambito civile, stante la scarsa standardizzazione in tale contesto. Pertanto, essa può costituire un punto di partenza per lo sviluppo normativo di un approccio razionale alla qualificazione di sistemi SHM che potrebbe avere un impatto rilevante anche in ambito economico, stante l'esigenza degli stakeholders pubblici e privati di avere strumenti di supporto decisionale nella valutazione di soluzioni alternative o comunque competitive di monitoraggio strutturale.

4.5.4 Conclusioni

L'intrinseca unicità dei sistemi SHM civili, progettati "case-by-case", rende estremamente difficoltoso il processo di standardizzazione che è alla base dei più consolidati approcci di certificazione. È stato, pertanto, sviluppata nell'OR5 una possibile procedura di qualificazione che tenga conto delle specificità applicative dei sistemi SHM.

Le attività sviluppate da ITC-CNR nell'ambito dell'OR6 hanno riguardato l'applicazione di detto approccio di qualificazione al caso dimostratore del viadotto "Canalone", valutando le caratteristiche dello scenario e quelle della strategia di monitoraggio implementata. Il loro confronto ha permesso di quantificare la rispondenza del sistema SHM allo scenario di riferimento attraverso l'ER.

I risultati ottenuti, in particolare, consentono di concludere che la strategia di monitoraggio prevista per il caso dimostratore è globalmente di buon livello, sebbene possa essere ulteriormente migliorata in alcuni aspetti.

La procedura di qualificazione applicata è da considerarsi ancora in fase di sviluppo. Infatti, sebbene i risultati ottenuti dalle applicazioni preliminari risultino promettenti, importanti approfondimenti appaiono necessari con particolare riferimento a: (i) la definizione sistematica di tutte le caratteristiche specifiche per le varie possibili componenti di un sistema di monitoraggio; (ii) l'applicazione della procedura ad una pluralità di casi studio caratterizzati da differenti livelli di complessità. Tali aspetti potranno essere oggetto di indagine nell'ambito di future attività di ricerca.

4.6 Sistemi di gestione ed elaborazione dati in cloud

L'attività ha avuto il duplice obiettivo di creare un sistema di gestione dati, tramite l'utilizzo di server cloud e piattaforme digitali, e di elaborare le rilevazioni acquisite attraverso lo studio e l'applicazione di tecniche avanzate.

A valle dell'attività di progettazione descritta sopra e dell'applicazione del sistema di monitoraggio così realizzato, si è passati all'acquisizione di dati di differente natura archiviati in server cloud che rappresentava.

Tramite codici informatici, realizzati con linguaggio di programmazione Python, ci si è collegati ai server utilizzati dai suppliers del progetto, in particolare:

- Server con protocolli FTP (File Transfer Protocol) utilizzato da Tecnoin per l'acquisizione di dati accelerometrici e di temperatura;
- Server AWS (Amazon Web Service) utilizzato da STMicroelectronics per l'acquisizione di dati di pressione;

in entrambi i casi si tratta di servizi basati su sistemi server-client che consentono di caricare, spostare e scaricare file in una o più directory attraverso l'autenticazione preliminare del client.

Il secondo obiettivo dell'attività si è concretizzato nell'elaborazione dei dati ottenuti attraverso differenti tecniche.

Nel viadotto in esame, sono presenti sensori di pressione su pilastri ed archi. Per questo motivo, si è deciso di delineare un flusso di lavoro relativo all'elaborazione di dati provenienti da queste tipologie di sensori, con lo scopo di individuare delle anomalie nelle rilevazioni mediante tecniche di Novelty Detection.

Le misure acquisite nel corso dell'ultima parte di progetto, andranno a realizzare quello che è la reference box del comportamento strutturale. Più nello specifico i valori acquisiti in condizioni di ponte integra, o meglio nella condizione di stato iniziale, vengono utilizzati per costruire della distribuzione di riferimento. Al fine di adimensionalizzare rispetto al carico le misure vengono prima normalizzate rispetto al loro massimo, in modo tale, da ottenere le forme di distribuzione delle tensioni normali. Tali forme vengono rappresentate da una singola istanza in uno spazio delle forme di tensioni. Ottenendo le varie forme corrispondenti ai carichi si è operato attraverso l'applicazione della distanza di Mahalanobis, questo perché si ha la necessità di capire quanto un elemento appartenga o meno ad una distribuzione di probabilità e quanto sia, quindi, un inlier,

ovvero appartenga alla distribuzione, o un outlier, ovvero sia esterno. La distanza così calcolata permette di ottenere la misura di una osservazione normalizzata rispetto alla varianza della stessa.

La distanza di Mahalanobis (Mahalanobis P.C 1936) di un vettore $\mathbf{x}$ rispetto a una distribuzione di valor medio μ e matrice di covarianza Σ è definita come:

$$d(\mathbf{x}) = \sqrt{(\mathbf{x} - \mu)^\top \Sigma^{-1} (\mathbf{x} - \mu)}$$

Attraverso questo processo è stato possibile definire un istogramma con le distanze di Mahalanobis in ascissa e le osservazioni in ordinata, che riporta anche la distribuzione di probabilità alla Weibull applicata. (Fig. X)

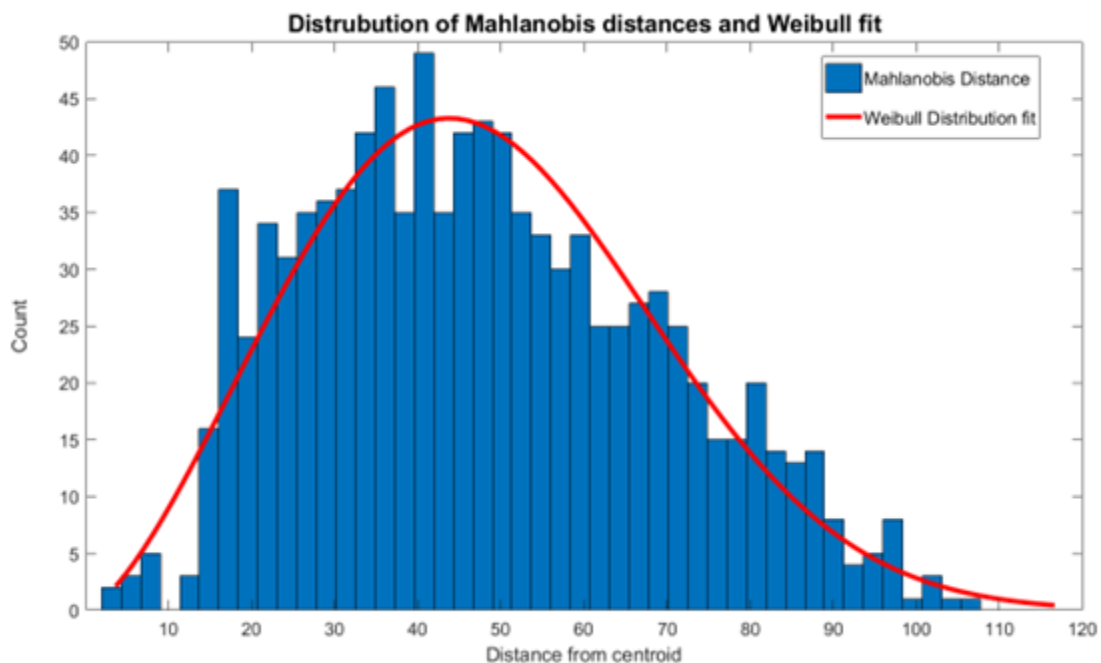


Figura X Distribuzione delle distanze di Mahalanobis

Attraverso la distribuzione di probabilità si sono ricavati i parametri caratteristici quali, il valor medio μ e la deviazione standard σ .

Questi parametri sono necessari al fine di poter applicare la Disuguaglianza di [Chebyshev](#), un teorema che fornisce un intervallo di confidenza della probabilità che una variabile casuale, si trovi ad una certa distanza dalla sua aspettativa matematica o dalla sua media.

$$\Pr(|X - \mu| \leq \lambda \cdot \sigma) \geq 1 - \frac{1}{\lambda^2}$$

In altre parole, la probabilità che una variabile casuale assuma valori distanti dalla media più di λ volte la deviazione standard è al massimo $1/\lambda^2$.

In questo modo, si stimano sia le probabilità di essere al di fuori di un determinato intervallo sia le distanze di Mahalanobis corrispondenti.

Lo scopo è che, quando verrà effettuata una nuova osservazione dei valori, questa potrebbe essere inferiore o eccedere il valore della distanza di Mahalanobis limite dell'intervallo determinato dai parametri di media e deviazione standard.

Nel caso in cui si eccedano i valori di distanza di Mahalanobis limite, bisogna attribuire un determinato alert che dalla piattaforma ci indichi di controllare la struttura.

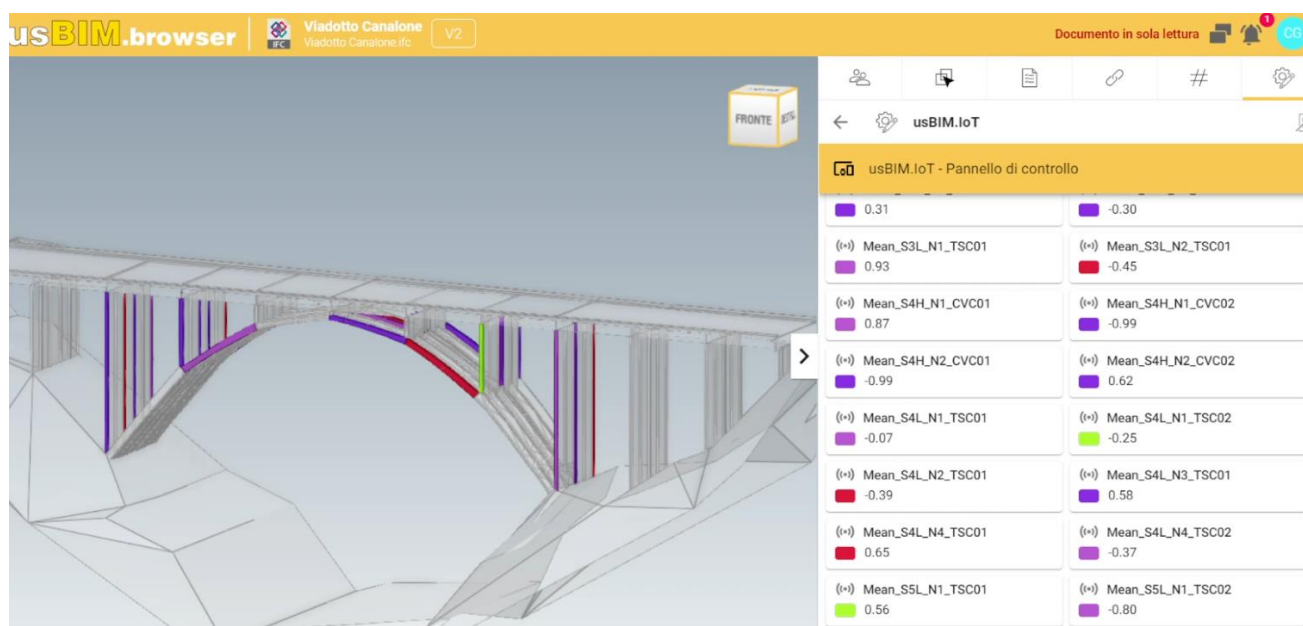
A completamento dell'attività di ottimizzazione del sistema di gestione in esame, si è operato affinché i dati elaborati attraverso modellazione matematica ed i dati registrati in tempo reale dalla sensoristica rendessero il modello digitale dell'opera "dinamico", ossia in grado di restituire le condizioni reali della struttura e degli alert strutturali.

Infine, per contribuire al miglioramento dell'utilizzo e della visione di tutte le informazioni ottenute dal monitoraggio diretto e dall'elaborazione del dato si è utilizzata una piattaforma di interoperabilità.

Le piattaforme consentono l'accesso, la tracciabilità e la conservazione dei dati a disposizione per l'opera, inoltre possono essere sviluppate al fine di dare l'opportunità di visualizzare, in tempo reale, i dati di monitoraggio e ricevere notifiche degli stessi alert.

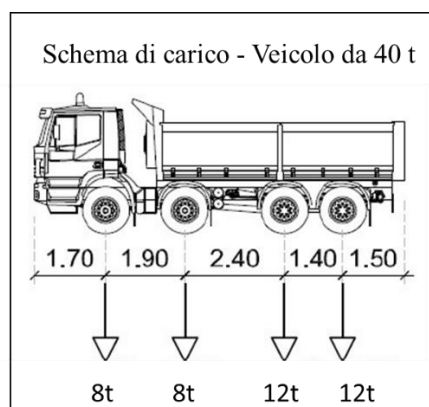
Per il caso in esame la scelta è ricaduta sulla piattaforma usBIM di AccaSoftware che presentava un livello di sviluppo affine alle attività preposte. In particolare, è stata utilizzata l'applicazione online usBIM.IoT che consente di integrare modelli BIM e sistemi IoT.

All'interno della piattaforma, è stato collocato il modello digitale dell'opera realizzato attraverso il software authoring Revit di Autodesk, in cui è stata modellata anche la sensoristica. Tra le funzionalità ed i widget presenti, è stato implementato quello relativo alla visualizzazione dei dati in tempo reale trasmessi dai sistemi cloud e che possono essere visualizzati sul modello attraverso l'utilizzo di una scala cromatica associata agli elementi su cui è presente la sensoristica.

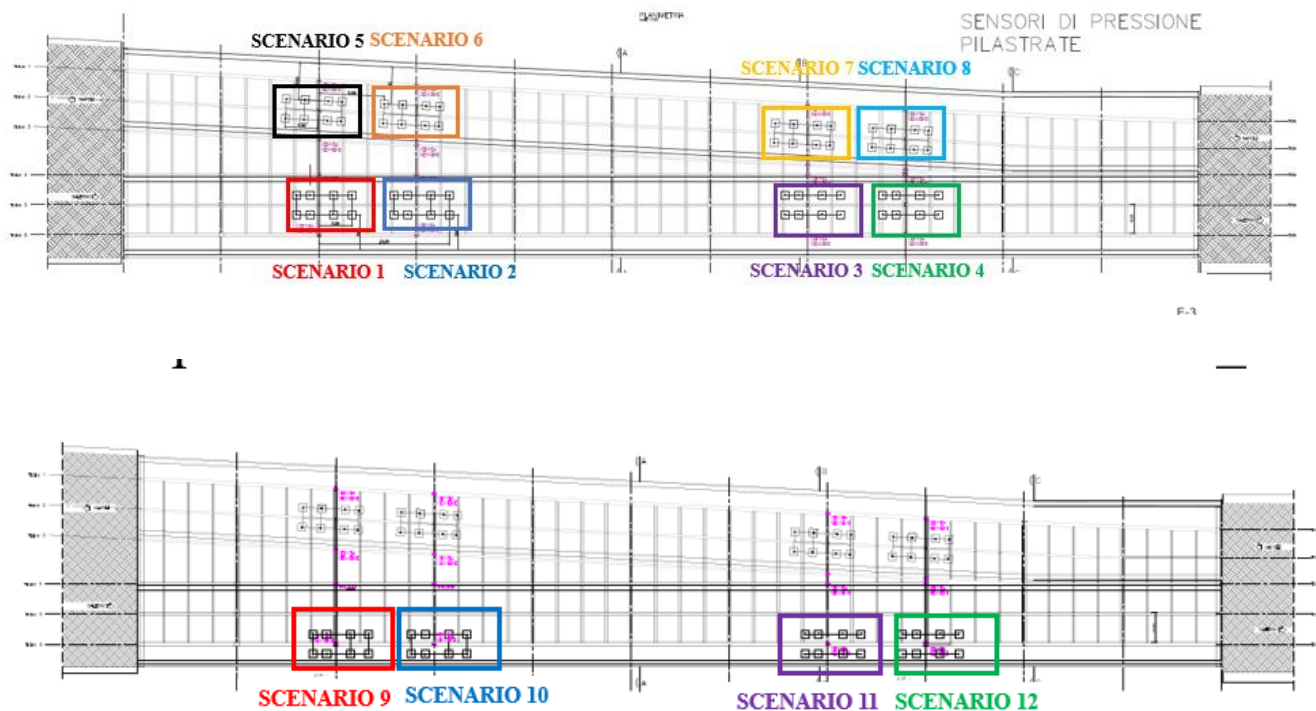


4.7 Analisi di scenario

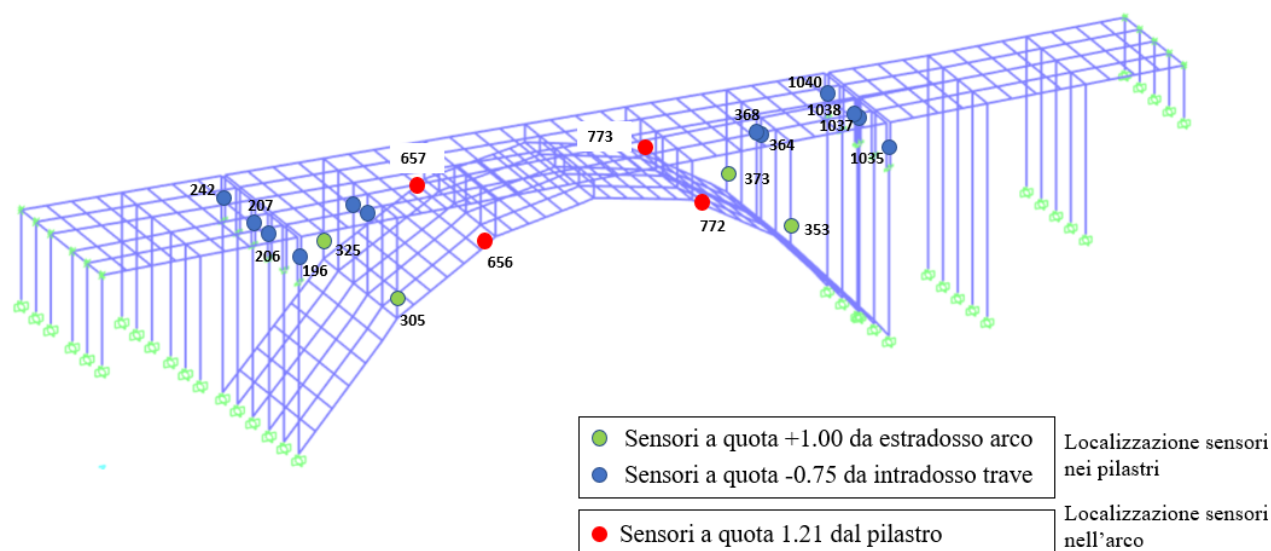
Al fine di individuare le tensioni potenzialmente lette dal sistema di monitoraggio, sono state effettuate delle analisi di scenario del Viadotto soggetto ad un carico di 40t, al fine di simulare il passaggio di un camion. Lo schema di carico è illustrato nella immagine seguente.



Sono stati ipotizzati 12 scenari, al variare della posizione del carico, come riportato nelle immagini successive.



Per ogni scenario i risultati sono stati estratti in termini di tensioni calcolate nei sensori presenti sia nelle pilastrate che nell'arco. Nell'immagine di seguito sono illustrate le posizioni dei sensori e sono denominati gli elementi in cui sono stati estratti i risultati.



Si riportano, di seguito, i risultati ottenuti per ogni scenario al variare dei sensori considerati dapprima in forma tabellare, e successivamente in forma grafica.

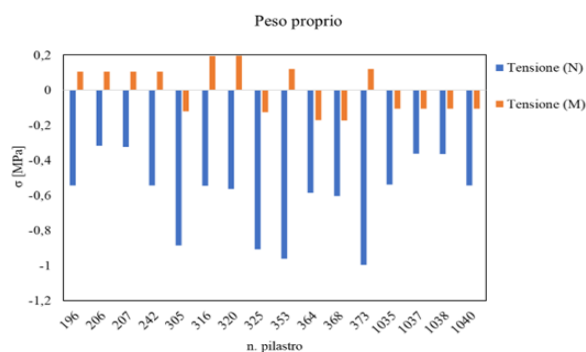
Sensori pilastri	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5		Scenario 6	
Elemento	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$
196	-0,062	0,020	-0,093	0,039	0,020	-0,023	0,002	-0,003	0,003	0,004	-0,035	0,030
206	-0,046	0,015	-0,038	0,038	0,009	-0,022	0,001	-0,002	-0,016	0,004	-0,035	0,034
207	-0,011	0,010	-0,031	0,034	0,009	-0,022	0,001	-0,002	-0,054	0,002	-0,035	0,035
242	0,001	0,005	-0,035	0,031	0,017	-0,020	0,001	-0,002	-0,085	0,002	-0,094	0,038
305	-0,024	-0,013	-0,161	-0,110	-0,003	0,060	0,000	0,005	0,006	-0,011	0,023	-0,078
316	-0,019	0,008	-0,067	0,090	-0,004	-0,052	0,000	-0,005	-0,004	0,008	0,038	0,080
320	0,006	0,010	0,048	0,083	-0,005	-0,051	0,000	-0,005	-0,001	0,012	-0,042	0,091
325	0,005	-0,010	0,024	-0,079	-0,002	0,056	0,000	0,005	-0,026	-0,014	-0,159	-0,107
353	0,000	-0,006	-0,002	-0,060	-0,160	0,115	-0,021	0,012	0,000	-0,006	-0,003	-0,053
364	0,000	0,005	-0,005	0,050	-0,052	-0,088	-0,014	-0,006	0,000	0,005	-0,006	0,048
368	0,000	0,005	-0,006	0,050	0,011	-0,087	-0,003	-0,009	0,000	0,006	-0,005	0,049
373	0,000	-0,005	-0,003	-0,046	0,010	0,073	0,004	0,008	0,000	-0,006	-0,003	-0,050
1035	0,002	0,003	0,020	0,022	-0,103	-0,040	-0,087	-0,001	0,002	0,002	0,017	0,019
1037	0,001	0,002	0,012	0,022	-0,052	-0,040	-0,069	-0,002	0,001	0,002	0,012	0,021
1038	0,001	0,002	0,012	0,022	-0,049	-0,038	-0,053	-0,002	0,001	0,003	0,012	0,021
1040	0,001	0,002	0,017	0,020	-0,039	-0,033	0,007	-0,003	0,002	0,003	0,020	0,021
	Scenario 7		Scenario 8		Scenario 9		Scenario 10		Scenario 11		Scenario 12	
Elemento	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$
196	0,018	-0,021	0,001	-0,002	-0,281	0,030	-0,15	0,04	0,02	-0,02	0,00	0,00
206	0,009	-0,022	0,001	-0,002	-0,008	0,013	-0,03	0,03	0,01	-0,02	0,00	0,00
207	0,010	-0,023	0,001	-0,002	-0,002	0,008	-0,02	0,03	0,01	-0,02	0,00	0,00
242	0,020	-0,023	0,002	-0,003	0,003	0,002	-0,01	0,02	0,02	-0,02	0,00	0,00
305	-0,001	0,057	0,000	0,006	-0,044	-0,011	-0,21	-0,07	0,00	0,05	0,00	0,01
316	-0,005	-0,053	0,000	-0,005	0,017	0,014	0,07	0,07	0,00	-0,05	0,00	-0,01
320	-0,005	-0,053	0,000	-0,005	0,013	0,011	0,05	0,06	-0,01	-0,05	0,00	-0,01
325	-0,004	0,062	0,000	0,006	0,013	-0,010	0,05	-0,05	0,00	0,04	0,00	0,00
353	0,010	0,087	0,004	0,010	0,000	-0,007	0,00	-0,04	-0,27	0,11	-0,04	0,01
364	0,006	-0,086	-0,009	-0,007	0,000	0,006	0,00	0,04	0,09	-0,09	0,01	-0,01
368	-0,033	-0,093	-0,006	-0,010	0,000	0,006	0,00	0,04	0,09	-0,09	0,01	-0,01
373	-0,162	0,100	-0,023	0,011	0,000	-0,005	0,00	-0,03	0,06	0,06	0,01	0,01
1035	-0,040	-0,034	0,004	-0,006	0,003	0,003	0,02	0,02	-0,16	-0,05	-0,50	0,00
1037	-0,050	-0,040	-0,038	-0,012	0,001	0,003	0,01	0,02	-0,04	-0,04	-0,01	0,00
1038	-0,047	-0,040	-0,043	-0,013	0,001	0,003	0,01	0,02	-0,04	-0,04	-0,01	0,00
1040	-0,099	-0,041	-0,063	-0,019	0,001	0,002	0,01	0,01	-0,02	-0,03	0,02	0,00

Elementi in cui viene raggiunta una tensione in valore assoluto >0.05 Mpa

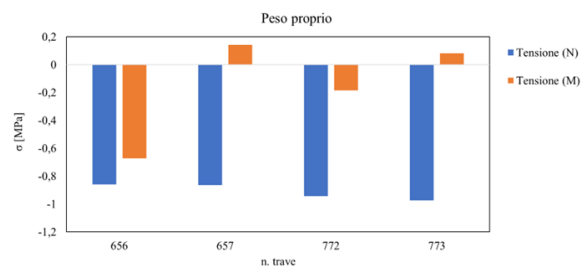
Sensori arco	Scenario 1		Scenario 2		Scenario 3		Scenario 4		Scenario 5		Scenario 6	
Elemento	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$
656	-0,003	-0,014	-0,036	0,102	-0,020	-0,168	-0,002	-0,016	0,000	0,005	0,008	0,063
657	0,000	0,008	0,009	0,083	-0,013	-0,131	-0,001	-0,012	-0,003	-0,007	-0,035	0,135
772	-0,002	-0,017	-0,021	-0,154	-0,036	0,119	-0,002	-0,010	-0,001	-0,014	-0,014	-0,120
773	-0,001	-0,014	-0,015	-0,128	0,005	0,091	0,000	0,006	-0,002	-0,018	-0,021	-0,152
	Scenario 7		Scenario 8		Scenario 9		Scenario 10		Scenario 11		Scenario 12	
Elemento	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$	$\sigma(N)$	$\sigma(M)$
656	-0,014	-0,136	-0,001	-0,013	-0,004	-0,023	-0,03	0,04	-0,02	-0,18	0,00	-0,02
657	-0,020	-0,164	-0,002	-0,017	0,002	0,011	0,01	0,05	-0,01	-0,12	0,00	-0,01
772	0,006	0,075	0,000	0,004	-0,002	-0,021	-0,02	-0,12	-0,06	0,15	0,00	-0,02
773	-0,037	0,152	-0,003	-0,004	-0,001	-0,015	-0,01	-0,09	0,02	0,07	0,00	0,01

Elementi in cui viene raggiunta una tensione in valore assoluto >0.05 Mpa

- **Tensioni dovute al peso proprio del viadotto calcolate nei pilastri e nelle travi dell'arco**

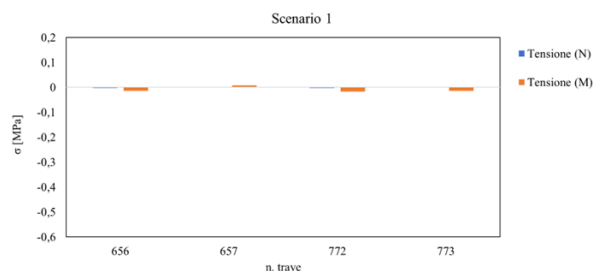
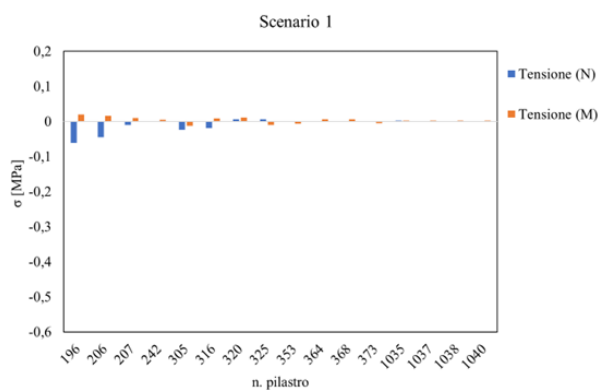


Tensioni dovute al peso proprio calcolate nei pilastri

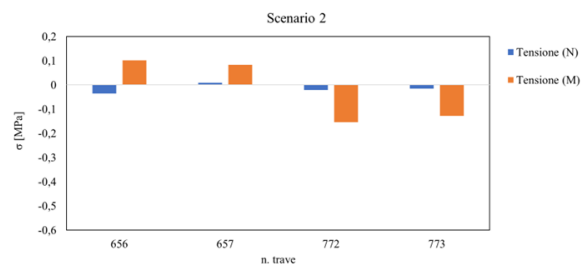
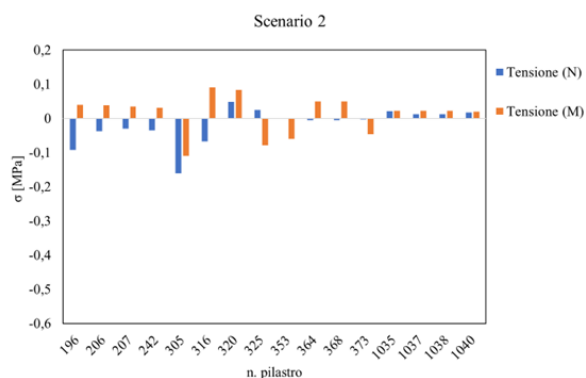


Tensioni dovute al peso proprio calcolate nelle travi dell'arco

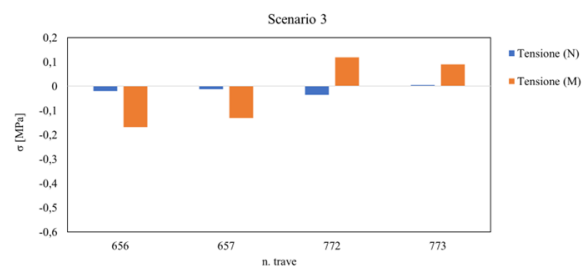
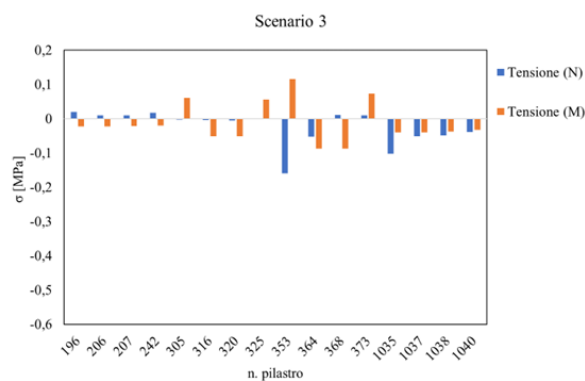
- **Scenario 1_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



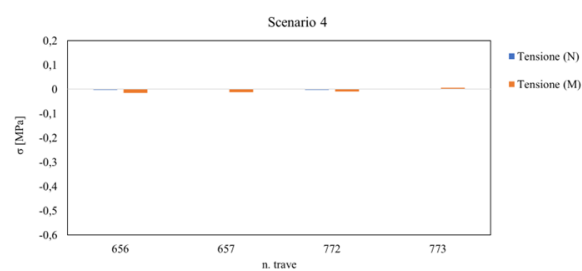
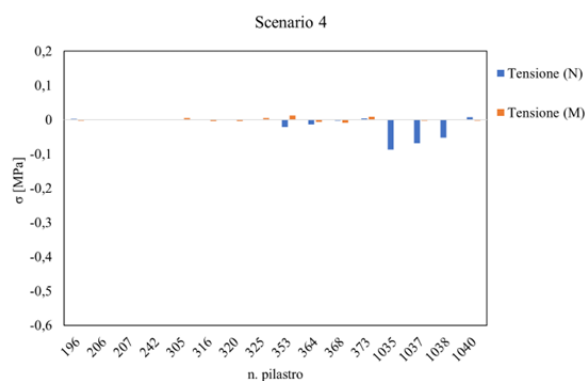
- **Scenario 2_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



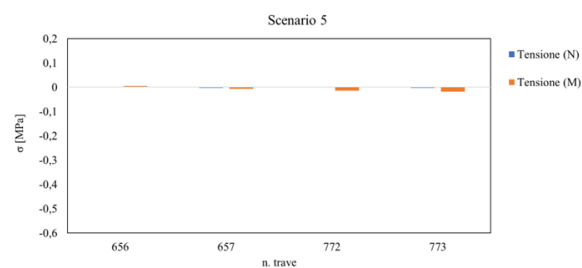
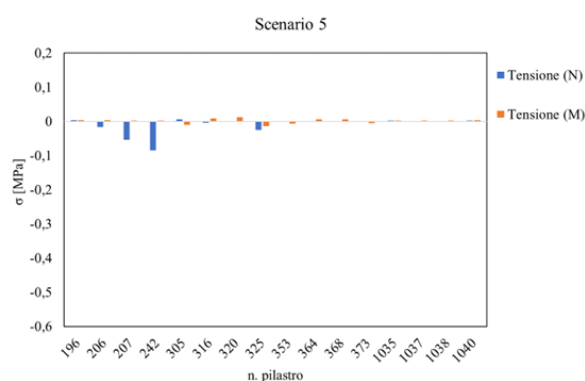
- **Scenario 3_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



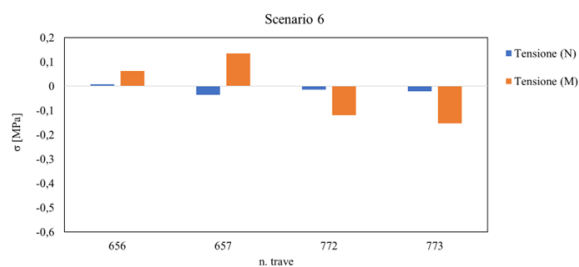
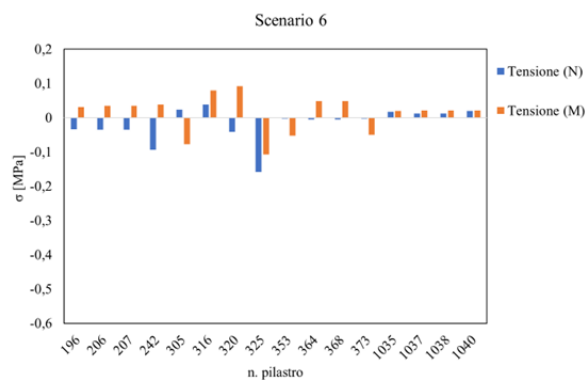
- Scenario 4_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco



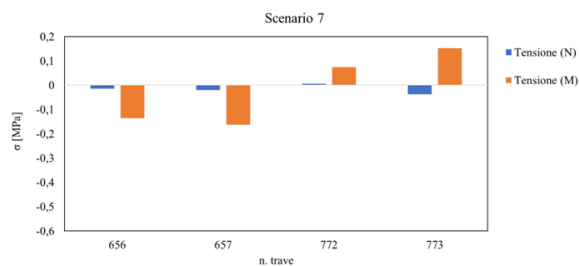
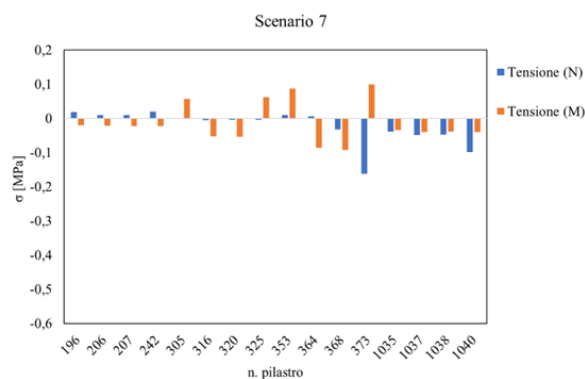
- Scenario 5_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco



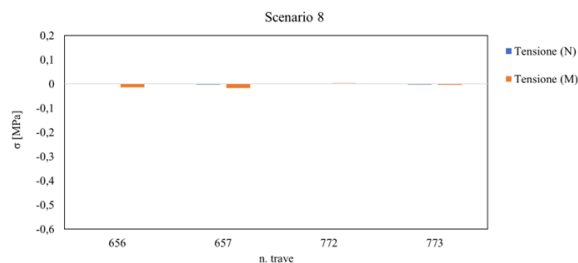
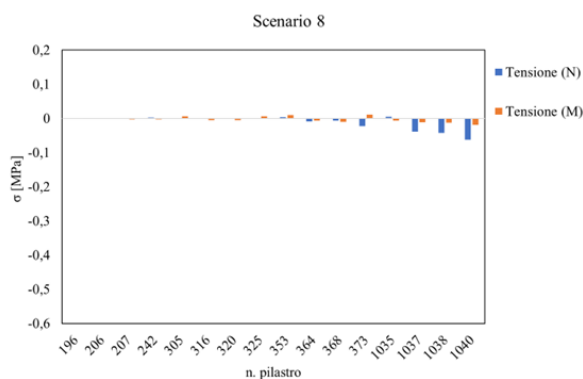
- Scenario 6_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco



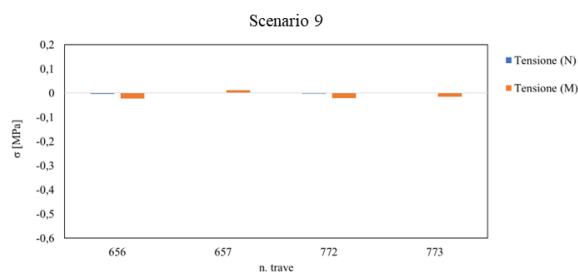
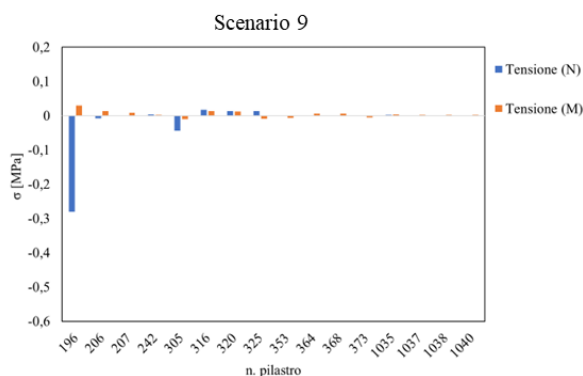
- Scenario 7_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco



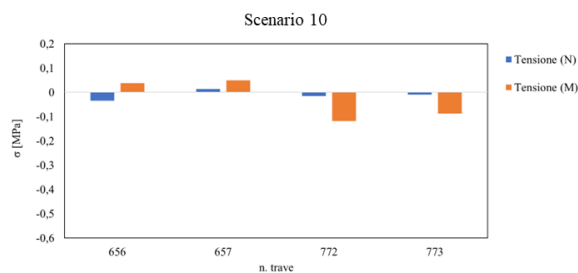
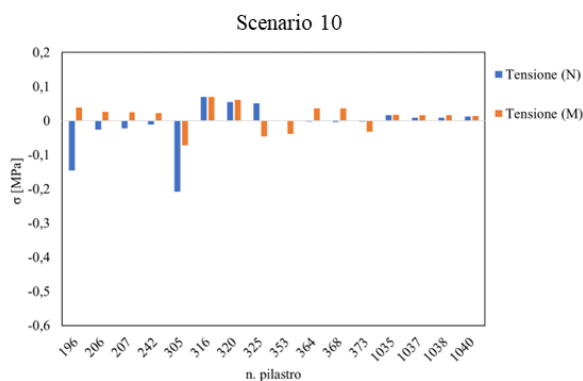
- **Scenario 8_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



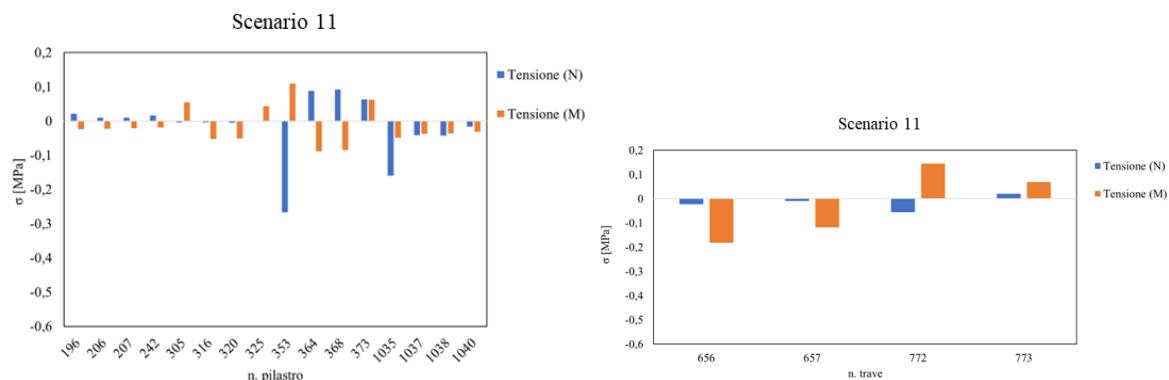
- **Scenario 9_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



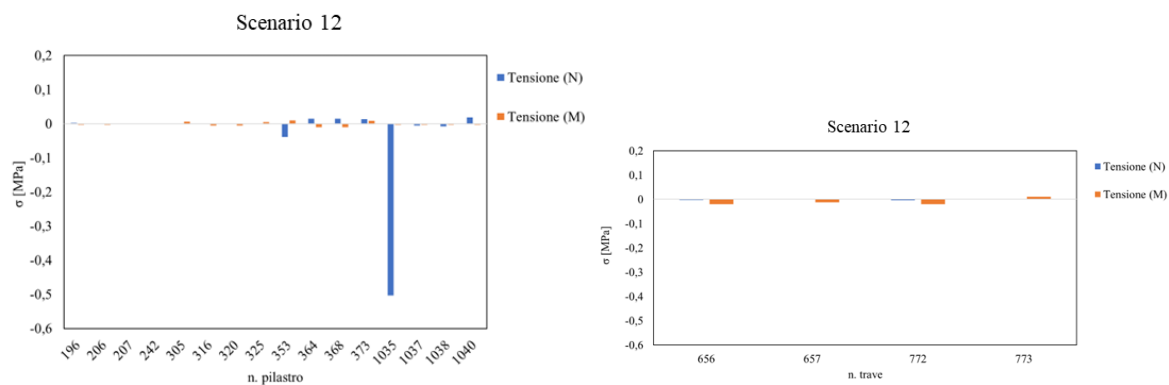
- **Scenario 10_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



- **Scenario 11_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**



- **Scenario 12_ Tensioni calcolate nei sensori dei pilastri e nelle travi dell'arco**

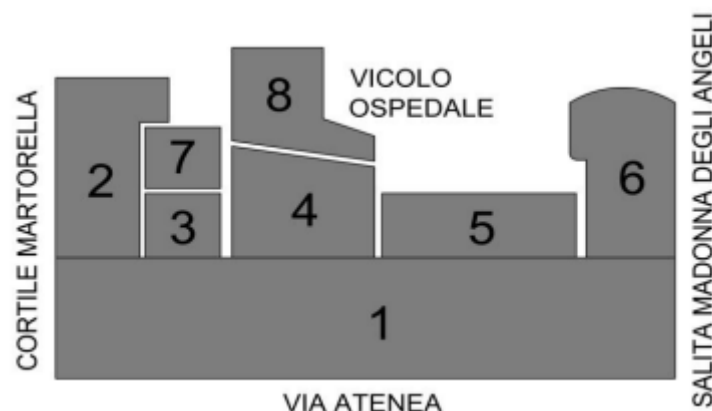


5 EDIFICIO EX OSPEDALE AGRIGENTO

5.1 Descrizione Edificio

5.1.1 Corpi di fabbrica

L'edificio, scelto ai fini del monitoraggio strutturale, è l'ex ospedale di Agrigento sito in via Atenea, a circa 70 m dall'ingresso di Porta di Ponte. Strutturalmente esso è parte di un aggregato edilizio composto da otto corpi di fabbrica (Figura di seguito) e sorge su un versante collinare che è quello del *colle di Girgenti*, la cui la pendenza decresce progressivamente dalla quota media di 320 metri s.l.m. della zona alta del Seminario, nel quartiere Barbato, alla zona della stazione ferroviaria a quota 227 metri s.l.m.



Schema dell'aggregato edilizio dell'ex Ospedale di Agrigento

Il periodo storico-culturale che vede la nascita dell'ex ospedale di Agrigento è il medioevo. L'ospedale fu fondato nel 1339 da Giovanni I conte di Chiaramonte e sorge accanto all'ospizio di S. Giovanni realizzato nel 1235 dai cavalieri Teutonici e prese il nome di *Ospedale di S. Maria Maddalena*. Il complesso inizialmente era costituito da un corpo longitudinale e un corpo disposto trasversalmente, la cui facciata corta si affacciava sulla via Atenea; di quell'epoca nel complesso rimangono visibili due archi Chiaramontani, uno nel cortile Martorella e l'altro nella corte superiore del complesso. Nel 1397 la fabbrica fu concessa ai cavalieri Teutonici e rimase sotto la loro gestione fino al 1541 quando venne istituita la confraternita del SS. Crocifisso, da cui prese il nome l'ospedale, che gestì la struttura fino alla metà dell'ottocento.

L'ospedale in stile neoclassico per come si presenta oggi sulla via Atenea, fu costruito alla fine dell'Ottocento, in sostituzione della fabbrica Chiaramontana e della Chiesa di S. Giovanni dei Teutonici, demoliti nel 1867; il piano di imposta in quell'anno fu abbassato di circa 4 metri. L'ospedale restò in funzione fino al 1961, quando poi fu convertito in sede del Liceo Scientifico "Leonardo" ed infine abbandonato negli anni ottanta. Fu necessaria una messa in sicurezza nel

1987, il corpo longitudinale da doppio diventò singolo, furono realizzati i solai, demolite le ripartizioni interne e rifatta la copertura. Oggi il complesso è dell'Università di Palermo, Polo di Agrigento e il progetto di rifunzionalizzazione che è in fase di realizzazione prevede un riadattamento degli spazi ad aule, uffici, ecc.

È possibile distinguere otto ambienti costituenti la fabbrica dell'ex-ospedale.

Il **corpo 1**, oggetto del monitoraggio (Figura di seguito), si sviluppa longitudinalmente e si affaccia sulla via Atenea, dove presenta il suo prospetto principale; il corpo si sviluppa su tre livelli.



Prospetto principale corpo 1

Il prospetto mostra una scansione spaziale regolare costruita dalle aperture e dagli elementi decorativi neoclassici, erosi e talvolta parzialmente asportati dagli agenti atmosferici; non vi è traccia degli infissi originari e il muro dall'interno è privo d'intonaco ed i conci in calcarenite sono a vista. Si differenziano due portali monumentali, uno occidentale che conduce attraverso una scalinata al cortile Martorella ed il portico orientale, unico ingresso alla fabbrica sulla via Atenea.

Al piano terra, sono presenti otto ambienti, larghi in media 4,50 metri e con profondità che variano da 5,50m a 19,90m. Tali ambienti ospitano attività commerciali, divisi da muri trasversali collegati nella maggior parte dei casi da archi trasversali o da volte a botte.

Il primo livello si presenta degradato e costituito da due locali, di cui uno molto ampio ottenuto con l'interruzione dei muri di spina presenti al livello del piano terra.

Il secondo livello anch'esso privo di infissi è costituito da un unico locale senza muri di spina. La copertura a doppia falda, che presenta grossi segni di degrado, con assenza di tegole in molte sue parti, è realizzata con capriate metalliche e sono presenti dei cordoli sommitali di appoggio delle capriate, realizzati in calcestruzzo armato in entrambi i lati lunghi della copertura. Sono presenti due portali monumentali disposti alle estremità.

I **corpi 2, 3 e 7** costituiscono assieme un elemento molto articolato sia planimetricamente che altimetricamente: in pianta occupano una superficie di $18 \times 24 \text{ m}^2$, mentre in altezza si sviluppano su due, tre e quattro elevazioni. Il corpo scala (corpo 3), presumibilmente di impianto settecentesco, serve i vari piani. Le coperture ad unica falda sono costituite da solai inclinati realizzati con profilati in acciaio con laterizi interposti, soletta in c.a. e rivestimento esterno con tegole marsigliesi. La copertura si presenta fortemente ammalorata, priva di tegole, nella parte ad un'unica elevazione prospiciente il giardino interno.

La **corte 4** costituisce un elemento di forma trapezoidale, chiuso sui quattro lati.

Il **corpo 5** è soprastante la rampa di accesso al cortile interno e si sviluppa in altezza comprendendo quattro elevazioni sul lato ex chiesa e tre elevazioni sul lato del cortile interno. Il livello superiore a quota 9 m risale ad un'epoca di costruzione successiva, come si desume dalla muratura realizzata in conci di calcarenite dello spessore di 30 cm.

La **corte 6** (ex chiesa) è ciò che rimane della vecchia chiesa, navata ed abside, e costituisce probabilmente la parte più antica dell'intero complesso. Si estende in altezza senza soluzione di continuità per circa 20 m ed è racchiusa da tre corpi di fabbrica. Il muro dell'abside è formato da una parete curva controterra in conci sbazzati di calcarenite e non è presente alcuna copertura.

Il **corpo 8** si configura come un elemento a due elevazioni prospiciente il cortile interno, con copertura piana a terrazza. È un edificio di recente costruzione di forma prismatica a pianta poligonale, avente un'altezza di 8.90 m rispetto al cortile interno su tre elevazioni fuori terra. È possibile accedere al primo piano tramite il cortile interno, attraverso una scala in calcestruzzo armato. L'edificio è stato probabilmente realizzato in un'epoca successiva, come testimoniato dalle murature realizzate in conci di calcarenite dello spessore di 40 cm (piano terra) e 30 cm (primo piano).

5.1.2 Tipologie murarie riscontrate

L'aggregato edilizio dell'ex ospedale di Agrigento presenta struttura portante in muratura e orizzontamenti piani che certamente sono stati realizzati in tempi successivi al primo impianto. Con riferimento al corpo 1 in particolare, i piani terra, adibiti a negozi, erano originariamente coperti da volte a botte reali e, con un intervento di ristrutturazione risalente a circa vent'anni fa, alcune di queste sono state eliminate e sostituite da orizzontamenti piani, come negli altri livelli. Attraverso indagini endoscopiche è stata rivelata la presenza di altre volte a botte in muratura e alcune di esse sono state svuotate creando una intercapedine tra l'estradosso della volta e il solaio.

Gli elementi portanti verticali sono costituiti da paramenti murari realizzati con blocchi di calcarenite, le cui tipologie, di seguito descritte, sono state individuate con prove effettuate in situ e come esito di indagini visive. Sono state individuati nei paramenti murari le quattro tipologie murarie di seguito riportate in figura.



Tipologia 1



Tipologia 2



Tipologia 3



Tipologia 4

Tipologie murarie

Tipologia 1 = muratura con tessitura regolare costituita da blocchi di calcarenite di dimensioni variabili tra 90x50 a 50x40 e giunti di malta di colore nocciola. La calcarenite dei blocchi è in prevalenza di colore giallastro, da consistente a mediamente consistente, a grana molto fina. I giunti hanno andamento regolare con spessori variabili tra i 5 e i 7 mm;

Tipologia 2 - muratura a tessitura irregolare o caotica costituita da blocchi spesso informi di calcarenite e da giunti di malta di calce di colore nocciola o biancastra. Spesso tale muratura assume forma caotica in quanto realizzata in tempi diversi, riempiendo originari vuoti con materiale di diversa tipologia. In questa muratura sono presenti vuoti e zone molto ricche di malta. I blocchi sono di calcarenite di colore giallastro-ocra e giallo-rossastro. Le dimensioni sono assai variabili fra i 40x30 cm ai 10x10 cm. I giunti hanno andamento irregolare e spessore anche di qualche centimetro. Questa muratura in genere si presenta a doppio paramento;

Tipologia 3 - muratura con tessitura regolare realizzata con blocchi di calcarenite e giunti di malta cementizia. I blocchi sono delle dimensioni tipiche di 40x30x14 cm e sono costituiti da calcarenite di colore grigio-giallastro, mediamente compatta a grana molto grossa. I giunti di malta di cemento hanno spessore alquanto costante di 1 cm;

Tipologia 4 - muratura con tessitura irregolare realizzata con blocchi di calcarenite che sui paramenti visibili appaiono in assenza di malta. I blocchi sono di varie dimensioni e sono costituiti da calcarenite di colore giallorossastro, mediamente compatta a grana molto grossa con inclusioni conchiliari.

5.1.3 Interventi in itinere: il cantiere

Allo stato attuale l'edificio è oggetto di un intervento di restauro e rifunzionalizzazione la cui destinazione d'uso finale sarà la sede del Polo Didattico Universitario di Agrigento. L'edificio è stato pertanto oggetto di valutazione della vulnerabilità sismica che ha consentito la programmazione di opportuni interventi di miglioramento strutturale al fine di conseguire la soglia minima di sicurezza prevista dalle attuali norme.

In particolare, gli interventi che hanno interessato il corpo 1 e che hanno reso interessante l'applicazione dei sensori hanno riguardato:

- l'incatenamento dei paramenti murari longitudinali attraverso l'inserimento di controventi murari opportunamente ammorsati;
- il rifacimento degli orizzontamenti della prima e della seconda elevazione utilizzando le attuali travi; in acciaio opportunamente trattate;
- il miglioramento delle connessioni tra la soletta e le putrelle dei solai;
- la sostituzione delle capriate in acciaio costituenti la copertura con capriate in legno;
- il miglioramento delle connessioni dei paramenti verticali.

5.1.4 Modellazione della parete

La scelta della parete oggetto del monitoraggio, di tipologia 3, è stata effettuata principalmente sulla base delle fasi costruttive del cantiere che, prevedendo la dismissione parziale dei solai esistenti, il loro rifacimento e la demolizione e ricostruzione della copertura, offre l'opportunità di registrare le variazioni dello stato di tensione che subiranno le pareti dell'edificio.

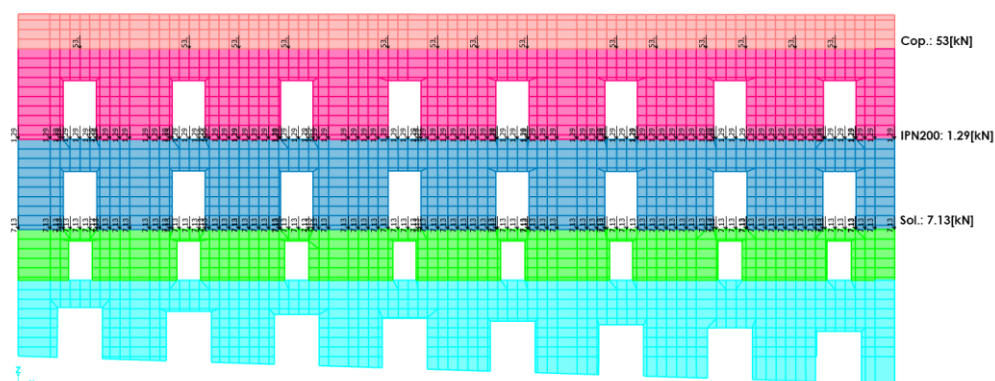
Sulla base di tali considerazioni è stata scelta la parete di facciata prospiciente la via Atenea del corpo 1 che, oltre ad essere una parete portante dell'edificio, è quella che risulta più vulnerabile a causa della sua elevata snellezza da cui gli interventi di incatenamento trasversali realizzati tramite pareti di controvento in muratura.

La fase di installazione dei sensori è stata preceduta da uno studio preliminare finalizzato alla stima delle variazioni tensionali sulla parete scelta al fine di posizionare i sensori in corrispondenza delle zone più sollecitate.

Lo studio è stato condotto discretizzando la parete con Elementi Finiti bidimensionali a 4 nodi, con spessori variabili, in funzione dello spessore del maschio murario di riferimento alle varie quote. In particolare, sono stati individuati 3 spessori principali della muratura che variano tra:

- Piano 1 – 2, spessore 1 m;
- Piano 3 – 4, spessore 0.8 m;
- Piano 5, spessore 0.75 m.

In Figura di seguito è riportata la discretizzazione cromatica di modello della parete muraria ai vari piani.



Discretizzazione cromatica della muratura ai vari piani; forze nodali applicate in FASE 1

Per quanto riguarda i carichi agenti, sono stati considerati tre casi di carico, corrispondenti in ordine cronologico, al reale cronoprogramma dei lavori previsti. In ciascuno dei tre casi di carico è stato considerato il peso proprio.

Nel primo caso di carico, definito *prima fase* viene considerata sull'edificio l'azione del peso proprio della muratura, del solaio del secondo piano e del solaio del terzo piano, quest'ultimo considerando solo il peso dei travetti (IPN200), in quanto il solaio è stato dismesso. In Figura 4 sono riportate le forze in [kN] che sono state considerate, applicate puntualmente nei nodi e facenti riferimento all'azione considerata secondo l'area d'influenza e la Tabella 1 riporta i carichi considerati applicati ai nodi nelle Fasi 1, 2, 3. Nel secondo caso di carico, definito *seconda fase* viene considerata l'azione del nuovo solaio alleggerito realizzato al terzo piano, che è della stessa tipologia del solaio del piano sottostante (7.13 kN). Nel terzo caso di carico, definito, *terza fase*, viene considerata la dismissione della vecchia copertura in acciaio e la nuova copertura in capriata lignea, onduline porta coppo e coppi in laterizio. In questo caso i carichi dei solai sono gli stessi della seconda fase mentre le forze nodali della copertura sono state ricalcolate. In particolare, a seconda dell'area d'influenza, i valori delle nuove azioni oscillano tra 19 e 22 kN.

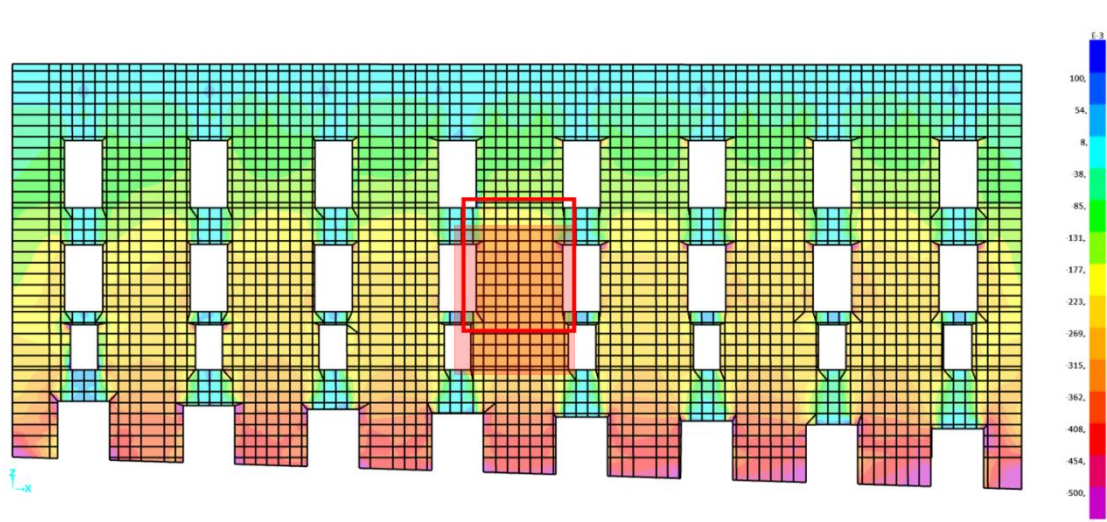
Fase di carico	Carichi nodi [kN]		
	1	2	3
2° Piano	7,13	7,13	7,13
3° Piano	1,29	7,13	7,13
Piano Copertura	53	53	19÷22

Carichi nodali ai piani suddivisi per fasi di carico

Le analisi eseguite, quindi, considerano l'applicazione del solo carico gravitazionale tenendo conto del peso proprio della muratura e delle forze applicate ai nodi che corrispondono all'interasse dei travetti dei solai e dei punti di appoggio delle capriate.

5.1.5 Scelta del maschio murario da monitorare

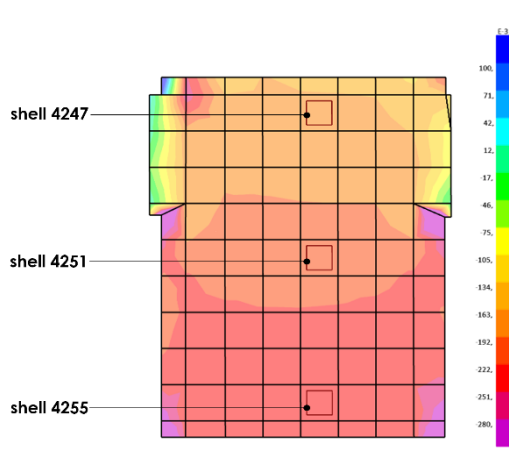
L'analisi svolta sulla parete è stata utile ai fini della scelta del maschio murario da monitorare in base alle entità delle sollecitazioni in esso presenti. In Figura successiva è riportato un esempio di stato tensionale agente sull'intera parete in esame. In particolare, viene evidenziato il maschio murario scelto del quale verranno illustrati i risultati dell'andamento delle tensioni normali in dettaglio.



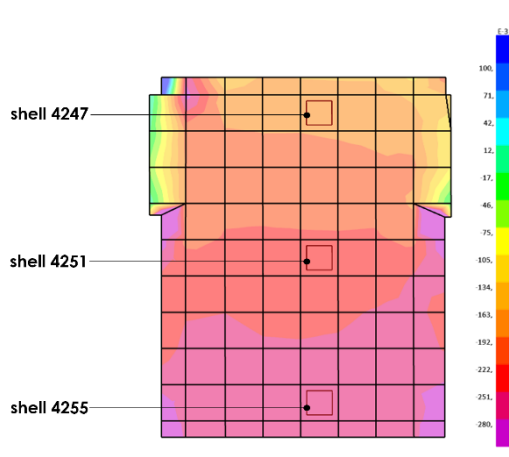
Stato tensionale della parete, il rettangolo in rosso evidenzia il maschio murario di riferimento per il dettaglio dei risultati

I valori di tensione normale ricavati non sono molto significativi, così come le variazioni ottenute dalle varie fasi; i risultati sono comunque di seguito riportati.

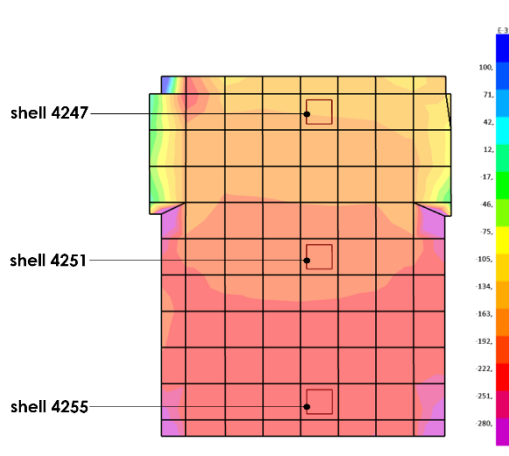
Il maschio di riferimento è evidenziato in rosso in Figura sopra; di questo sono evidenziati, nelle tre figure a pagina successiva gli elementi shell 4247, 4251, e 4255, così come numerati dalla discretizzazione in elementi finiti. Nelle stesse figure sono riportati gli andamenti delle tensioni normali rispettivamente nella prima, seconda e terza fase.



Tensioni normali su maschio di riferimento FASE 1



Tensioni normali su maschio di riferimento FASE 2



Tensioni normali su maschio di riferimento FASE 3

Dall'analisi delle tre fasi, è possibile notare un incremento di carico nel passaggio dalla prima alla seconda fase, mentre nel passaggio alla terza fase i valori delle tensioni normali sono simili ai valori

della prima fase. In Tabella di seguito, sono riportati i valori medi delle tensioni ai quattro nodi di ogni elemento evidenziato nelle Figure precedenti.

Elemento	Fase	Tensione media assiale [MPa]
4247	1	-0.16775
4251	1	-0.20875
4255	1	-0.2405
4247	2	-0.1855
4251	2	-0.23025
4255	2	-0.26275
4247	3	-0.1645
4251	3	-0.20875
4255	3	-0.2425

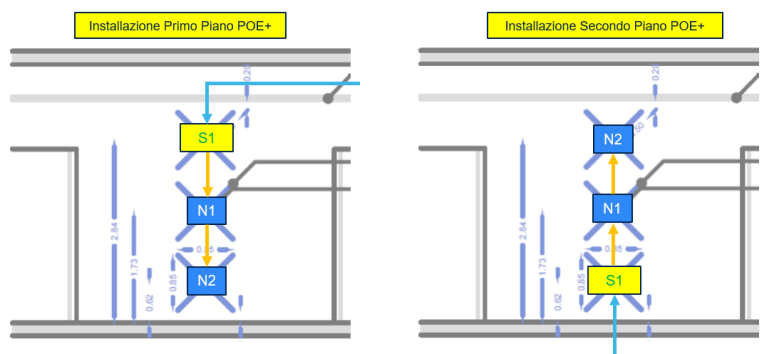
Tensione normale media dei quattro nodi degli elementi shell di riferimento, suddivisi per fasi di carico.

Com'è possibile notare al variare delle fasi, gli incrementi e i decrementi delle tensioni sono dell'ordine di $10e-3$ MPa. In particolare, sull'elemento 4247, la differenza di tensione tra prima e seconda fase, in valore assoluto, è di 0.0177 MPa, mentre tra la seconda e la terza si ha una differenza di 0.021 MPa. Anche considerando gli altri elementi shell le variazioni rimangono dello stesso ordine di grandezza. Nell'ipotesi di lasciare i sensori attivi ed installati sul maschio murario, nonostante le piccole variazioni attese nelle fasi di realizzazione dei nuovi elementi tecnici, ci sono da considerare i carichi che agiranno durante il collaudo dei solai sicuramente più elevati di quelli considerati nella presente analisi ma al momento non quantificabili. Rimane comunque interessante notare quali potranno essere le variazioni dello stato tensionale durante lo stato di esercizio della struttura e validare i risultati numerici ottenuti con quelli sperimentali dei sensori.

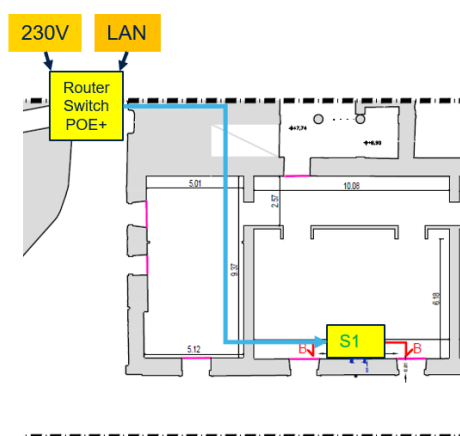
5.2 Progettazione, realizzazione e test del sistema di monitoraggio basato sui sensori di pressione (StM) per il monitoraggio di due maschi murari presso l'ex ospedale di Agrigento

5.2.1 Descrizione dell'attività

L'obiettivo di questa attività è stato quello di realizzare un sistema di monitoraggio al fine di valutare la variazione di massima delle tensioni normali attese sui maschi murari, che si verificano per variazione di carichi da dismissione e realizzazione di nuovi solai e copertura, interventi eseguiti sulla parete sud dell'ex ospedale civico, oggi proprietà dell'Università degli Studi di Palermo, di via Atenea ad Agrigento. Su indicazione di UniPA sul posizionamento dei sensori, abbiamo progettato il sistema schematizzato come di seguito.



(a)



(b)

- S1** Sistema di acquisizione + Bridge – Scatola Plastica 240X120X50mm
 — Collegamento LAN POE – Cavo RJ45 CAT6 (40mt circa)
N1 NODO – Scatola Plastica 200X80X50mm
 — Collegamento BUS CAN – Cavo RJ45 CAT6 (2X2mt)

(c)

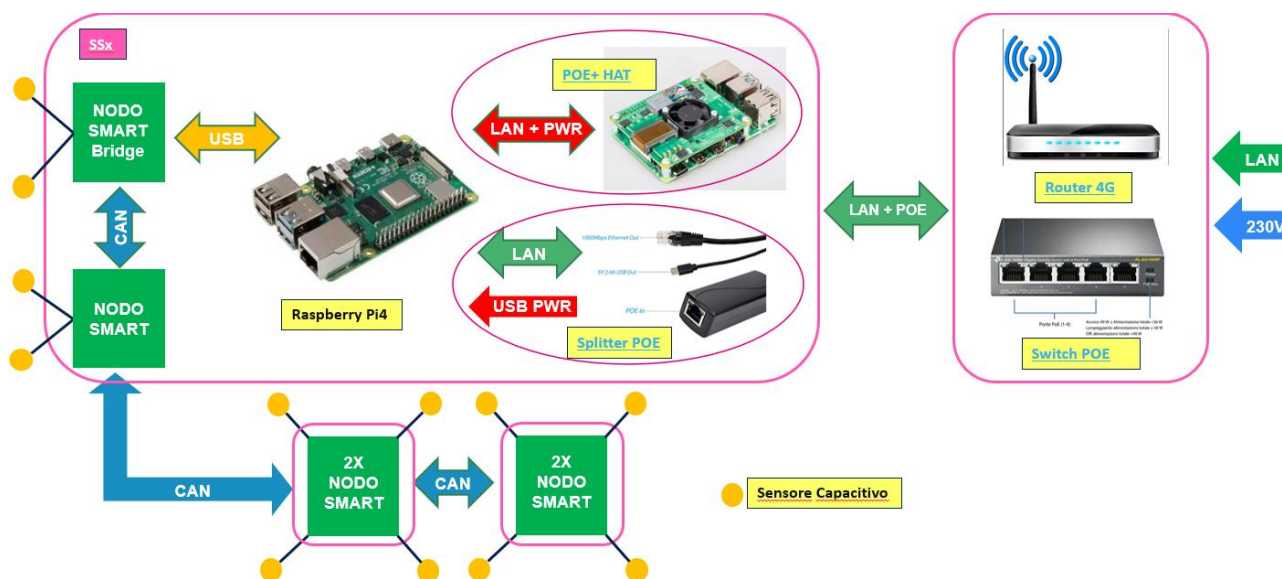
Figura (a) Schema sistemi di acquisizione per ogni piano. (b) Schema sistema di comunicazione dati. (c) Legenda dei simboli.

I sensori sono stati collegati a gruppi di quattro (4) unità ad una scheda di acquisizione denominata **nodo** e sono stati collocati a diverse altezze in modo da monitorare l'intero maschio murario.

Le centraline nodo sono state connesse tra loro tramite un cavo tipo ethernet su cui viaggia sia l'alimentazione che la comunicazione dati (basata su protocollo CAN). Queste schede nodo sono state alimentate attraverso un cavo dati tipo LAN POE+ proveniente dal modem/router (dotato di scheda dati SIM 4G) posta in uno dei locali della struttura, adibito a locale tecnico durante i lavori di ristrutturazione.

L'installazione è identica in entrambi i piani, quindi sono state installate due linee di cavo POE+ che arrivano fino al modem/router.

Uno schema complessivo di tutto il sistema è mostrato di seguito.



(a) Schema complessivo del sistema di acquisizione progettato per l'ex-ospedale dei Agrigento.

5.3 Risultati attività

Questo caso studio interessa una struttura in muratura sita in Agrigento che ha ospitato in passato anche un ospedale civico, attualmente oggetto di una massiva ristrutturazione in futuro sarà sede della vicina università degli studi di Palermo.

Lo scopo del monitoraggio su questa struttura è quello di acquisire i dati di 24 sensori posti su due maschi murari (12 al primo piano e 12 al secondo piano) al fine di monitorare le varie fasi di ristrutturazione che prevedono tra l'altro la realizzazione di un impalcato in CA tra i due piani interessati.

L'installazione dei sensori e dell'elettronica del primo piano è avvenuta a luglio 2022 ed attualmente il sistema è in acquisizione come da immagine successiva.



(a) Schema complessivo del sistema di acquisizione progettato per l'ex-ospedale dei Agrigento.

5.4 Attività di post-installazione della sensoristica

5.4.1 Procedura di post-installazione dei sensori capacitivi

La procedura di post-installazione dei sensori capacitivi all'interno del maschio murario è stata validata a seguito di numerose prove di laboratorio eseguite nell'ambito dell'OR1. Le operazioni possono essere così sintetizzate

1) Realizzazione di un foro mediante l'impiego di carotatrice con diametro esterno della sonda di 62 mm. I fori sono stati realizzati con una profondità di circa 20 cm. Tale dimensione è stata scelta in modo tale da poter posizionare i sensori il più al centro possibile del maschio murario.

2) Fissaggio della sensoristica su supporto metallico. Il supporto metallico in questione è costituito da una porzione di maglia di armatura su cui sono fissati i sensori capacitivi, come mostrato in figura. Il sistema barra-sensore è stato poi posizionato all'interno del foro.



Le porzioni laterali delle barre di armatura sono state realizzate in modo tale da avere una lunghezza pari al diametro del foro realizzato in precedenza. Ciò permette al sistema barra-sensore di essere collocato in battuta all'interno del foro evitando qualsiasi tipo di movimento, garantendo inoltre la perfetta orizzontalità del sistema. La barra filettata su cui è stata fissata la sensoristica, fuoriusciva dal foro precedentemente effettuato andandosi così ad innestare all'interno di una piastra di chiusura rettangolare in plexiglass di dimensione idonea per la chiusura del foro.

3) Predisposizione della piastra in plexiglass di chiusura del foro e sua sigillatura. La piastra è stata dotata di 2 fori, uno superiore e uno inferiore, nei quali sono stati posizionati dei tubicini di iniezione che sono serviti per la posa in opera della malta all'interno della cavità. La piastra era inoltre dotata di un'asola laterale dove si è andata ad innestare la barra filettata su cui erano fissati i sensori. La piastra è stata poi fissata al supporto mediante l'impiego di due viti e due tasselli. Prima di posizionare la piastra è stato necessario sigillare tutta la superficie esterna mediante l'utilizzo di un adesivo ad alto modulo elastico, monocomponente, tissotropico, a base di polimeri sililati.



4) Posizionamento dei tubicini di iniezione e sigillatura del foro con boiaccia cementizia costituita da legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali, a base di calce ed ECO-POZZOLANA. L'iniezione è stata eseguita mediante l'impiego di una pompa peristaltica tipo Umiblock P80. L'iniezione è stata eseguita partendo dal tubicino posto più in basso. Il materiale è stato iniettato in continuo all'interno della cavità. Il pompaggio è stato realizzato fino a quando il prodotto non ha iniziato a defluire dal tubicino posto più in alto.



È stata utilizzata la medesima procedura per l'installazione dei 12 sensori utilizzati.

5.4.2 Scelta del materiale di intasamento dei fori di alloggiamento dei sensori

Il processo di individuazione del materiale da impiegare per l'intasamento dei fori di alloggiamento della sensoristica era vincolato a soddisfare un requisito fondamentale che era quello di utilizzare un prodotto che risultasse compatibile con il supporto in muratura esistente, su cui sono stati post-installati i sensori capacitivi.

A valle delle prove eseguite, è stato validato l'impiego di una boiaccia costituita da un legante idraulico fillerizzato, resistente ai sali. Tale legante è a base di calce ed Eco-Pozzolana ed è quindi esente da cemento. La totale assenza di cemento permette a tale prodotto di poter essere applicato anche per interventi di post-installazione da eseguire su strutture in muratura di pregio storico come l'EX Ospedale di Agrigento. La boiaccia realizzata con questa tipologia di legante risulta volumetricamente stabile e una volta indurita, possiede caratteristiche meccaniche molto simili, in termini di resistenza meccanica, modulo elastico, porosità, a quelle della malta impiegata originariamente nella costruzione della struttura in questione. La boiaccia possiede inoltre delle proprietà che la rendono resistente alle diverse aggressioni chimico-fisiche come, ad esempio, alla

presenza di Sali solubili, cicli di gelo-disgelo e reazioni alcali-aggregato. La boiaccia è stata preparata miscelando il legante con il 30% di acqua. Di seguito si riportano le caratteristiche meccaniche della boiaccia utilizzata.

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

5.5 Impatto atteso

Un riscontro immediato circa dell'efficacia dei sensori si avrà nel corso dei lavori interessanti l'edificio in oggetto. Pur tuttavia trattandosi di variazioni di carico limitate, su una muratura di elevato spessore, ci si attende che una variazione dello stato tensionale che risulti rilevabile con chiarezza, si potrà avere probabilmente durante la fase di collaudo che prevede l'applicazione una stesa di carico sul solaio di 4 kN/m². È utile inoltre precisare che i sensori rimarranno installati nella parete e in questo modo riuscendo a garantire nel tempo un monitoraggio continuo della stessa. In questo modo i sensori installati potranno assolvere la funzione principale del monitoraggio strutturale che è quella di far scattare un'allerta in caso di variazioni anomale dello stato tensionale che potrebbero verificarsi nel tempo per cause di diversa natura.

5.6 Conclusioni

L'installazione dei sensori sulla parete Sud dell'edificio 1 ha come obbiettivo la verifica dell'efficacia dei dispositivi nel rilevare variazioni di tensione nella parete medesima al variare del tempo. Tale operazione si è resa fattibile grazie ai lavori relativi al progetto di riuso dello stabile ed in particolare grazie alle fasi degli interventi sull'edificio 1 che prevedono la demolizione e la successiva ricostruzione di due orizzontamenti e della copertura. Per cui al proseguo dei lavori le letture effettuate ci consentiranno un riscontro circa l'efficacia dei sensori.

6 CASI STUDIO

Si riportano di seguito i casi studio applicativi su infrastrutture (o parti di esse) ed edifici, attuate nell'ambito delle attività progettuali previste dai diversi gruppi di ricerca attivi nel progetto.

6.1 Caso studio n.1: Esecuzione di prove su una porzione di galleria in scala reale.

6.1.1 Descrizione attività

Il lavoro svolto dall'unità UniRM2, relativamente al dimostratore oggetto dell'OR-6 ha riguardato l'esecuzione di una prova alla scala reale su una porzione di galleria.

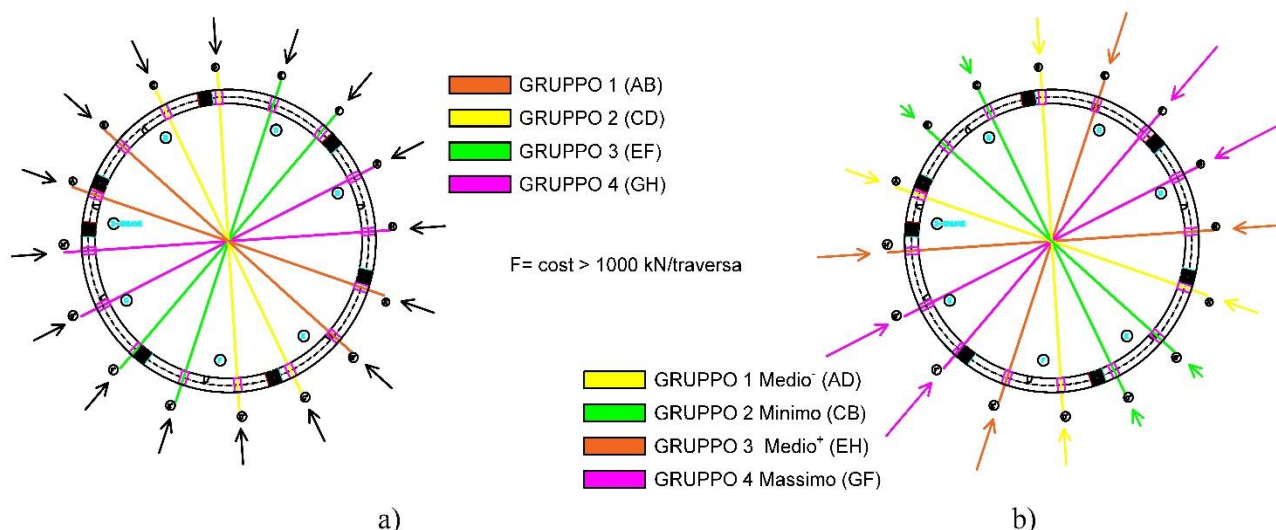
Per quanto concerne tutte le fasi di progettazione e realizzazione della porzione (anello) della galleria metropolitana e di quanto non espressamente riportato nella presente descrizione di attività, si rimanda all'OR-3 per la modellazione strutturale e all'OR-4 per la validazione dei sistemi di monitoraggio.

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. Infatti, come già espressamente dichiarato, 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.

La geometria dell'anello (quest'ultimo assimilabile ad una porzione di galleria esistente) utilizzato come dimostratore per la post-installazione presenta 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. L'anello è composto da sei conci prefabbricati più un concio di chiave più piccolo per un totale di sette conci.

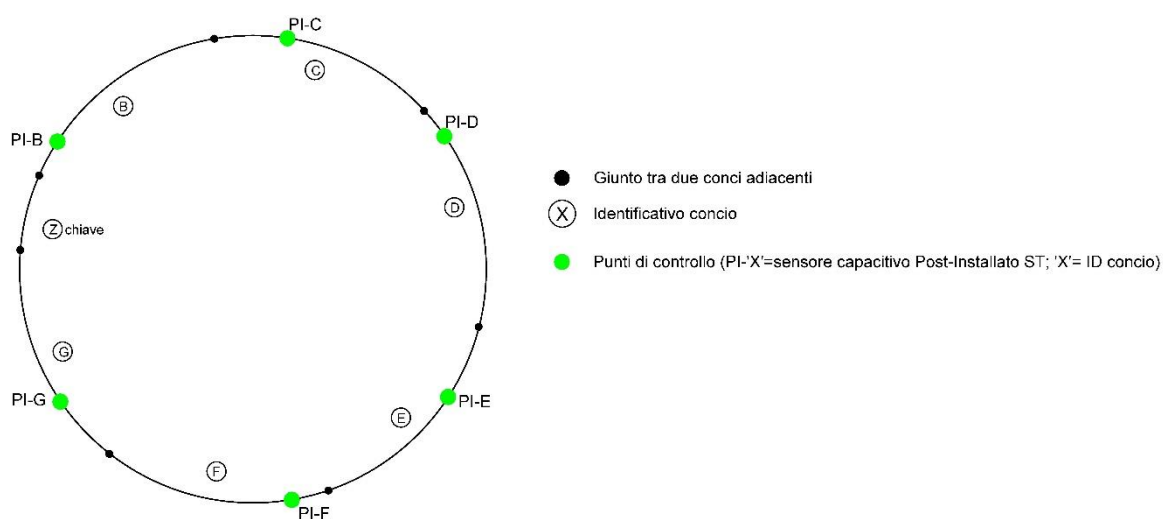
Nel dimostratore sono state prese in considerazione diverse condizioni di carico cui è soggetta una galleria durante la sua fase di messa in esercizio.

Il sistema progettato e descritto in dettaglio nell'OR-4 è stato in grado di riprodurre due diversi scenari di carico simulanti la spinta del terreno in due diverse condizioni: galleria profonda (spinta membranale) e galleria superficiale (spinta ovalizzante/pressoflessione) come mostrato nella figura di seguito.



Scenari di carico: a) Galleria profonda (azione membranale); b) Galleria superficiale (azione ovalizzante)

Nella figura di seguito viene riportato lo schema e relativa identificazione della strumentazione adottata, comprensiva della posizione dei sensori capacitivi post-installati forniti da STMicroelectronics, evidenziati in verde.

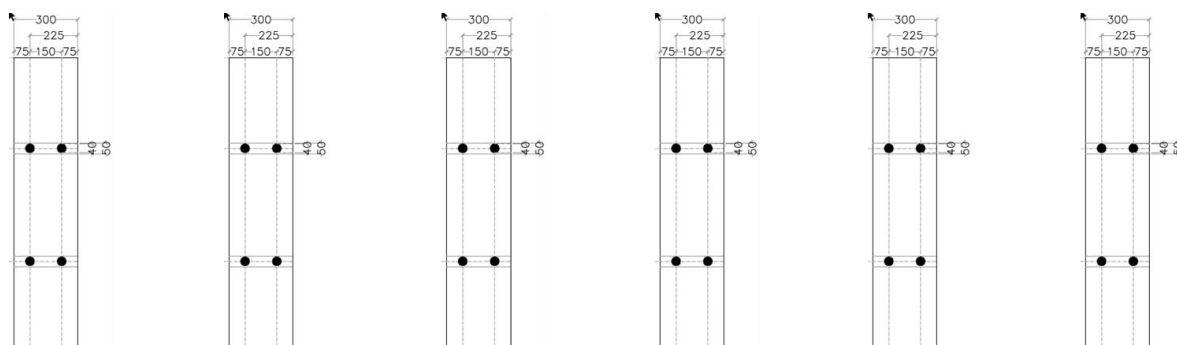


Schema posizione sensori capacitivi post-installati ST Microelectronics

Una volta stabilite e definite le specifiche di posizionamento dei sensori capacitivi tra UniRM2 e STMicroelectronics, i sensori STMicroelectronics post-installati sono stati 24, posizionati secondo quanto riportato nello schema successivo e quanto di seguito elencato:

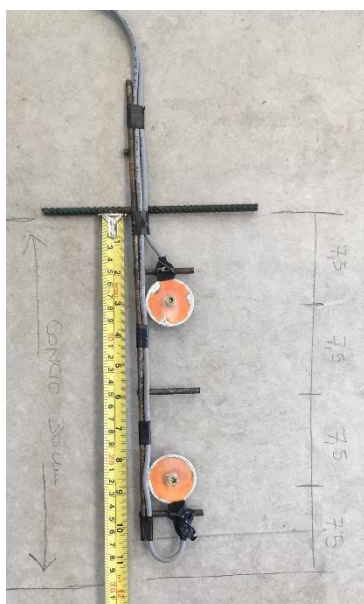
- 4 sensori per ogni concio;
- 2 sensori a 2 quote diverse, con 2 sensori all'intradosso e 2 all'estradosso.

CONCIO E		CONCIO F		CONCIO G		CONCIO B		CONCIO C		CONCIO D	
ESTRADOSSO	INTRADOSSO	ESTRADOSSO	INTRADOSSO	ESTRADOSSO	INTRADOSSO	ESTRADOSSO	INTRADOSSO	ESTRADOSSO	INTRADOSSO	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



Schema di installazione sensori capacitivi post-installati sulle diverse sezioni dei conci dell'anello.

Valutate le distanze fra i sensori, sia all'interno di uno stesso concio, sia fra concio e concio, si è passati all'installazione dei sensori secondo le lavorazioni di seguito riportate ed illustrate di seguito.



a)



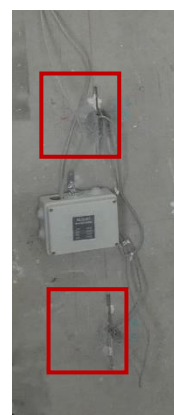
b)



c)



d)



Post-Installazione dei sensori capacitivi forniti da STMicroelectronics

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. Nella figura di sopra sono riportate alcune immagini relative alla post-installazione dei sensori capacitivi da STMicroelectronics.

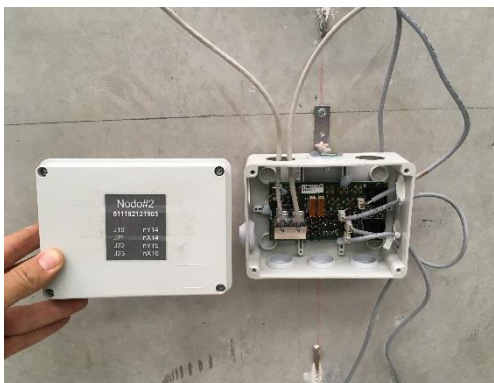
Per il monitoraggio dei 4 sensori di ogni concio si è deciso di utilizzare una cassetta con un board nodo stand-alone (vedasi documentazione OR1 per la descrizione dettagliata di questa scheda).

Sono state successivamente 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.

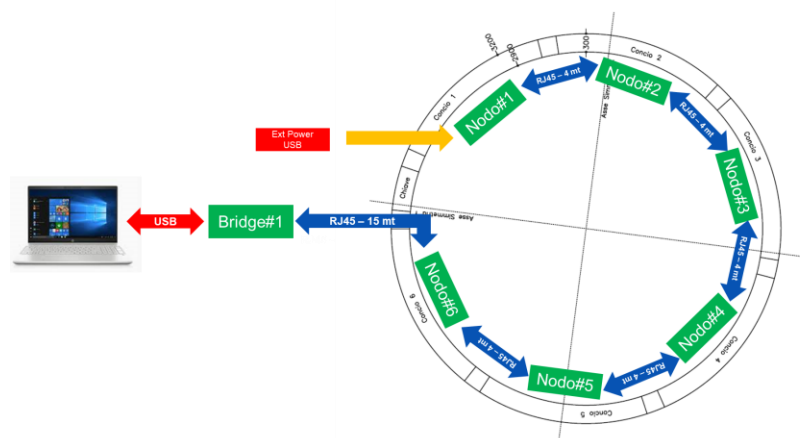
Il sistema di monitoraggio per l'anello è risultato, quindi, essere così costituito:

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

In Figura 5 viene riportato un dettaglio delle scatole contenenti il cablaggio (Figura 5a), lo schema del sistema di monitoraggio (Figura 5b) e il sistema di monitoraggio nella sua installazione al vero lungo la superficie di intradosso dell'anello (Figura 5c) presso il laboratorio di UniRM2.



a)



b)



c)

Installazione sistema di monitoraggio: a) Scatola con all'interno 1 nodo board/bridge + 1 power-supply USB di sostegno; b) Schema di installazione del sistema di monitoraggio; c) Installazione al vero del sistema di monitoraggio lungo l'intradosso dell'anello di galleria.

6.1.2 Risultati attività

Per quanto concerne l'acquisizione dei dati prodotti dai sensori capacitivi post-installati forniti da STMicroelectronics, questi sono stati registrati in continuo e acquisiti da STMicroelectronics tramite un software applicativo dotato di interfaccia grafica descritto nell'OR1 e trasmessi in tempo reale ai server della medesima società, la quale ha successivamente pre-elaborato i dati grezzi, organizzandoli in file CSV (contenenti, per ogni sensore, timestamp e valore della capacità del sensore).

Il lavoro congiunto è stato svolto a distanza (ciascuno nella propria sede di appartenenza) a causa delle restrizioni COVID-19. A tal riguardo, 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.

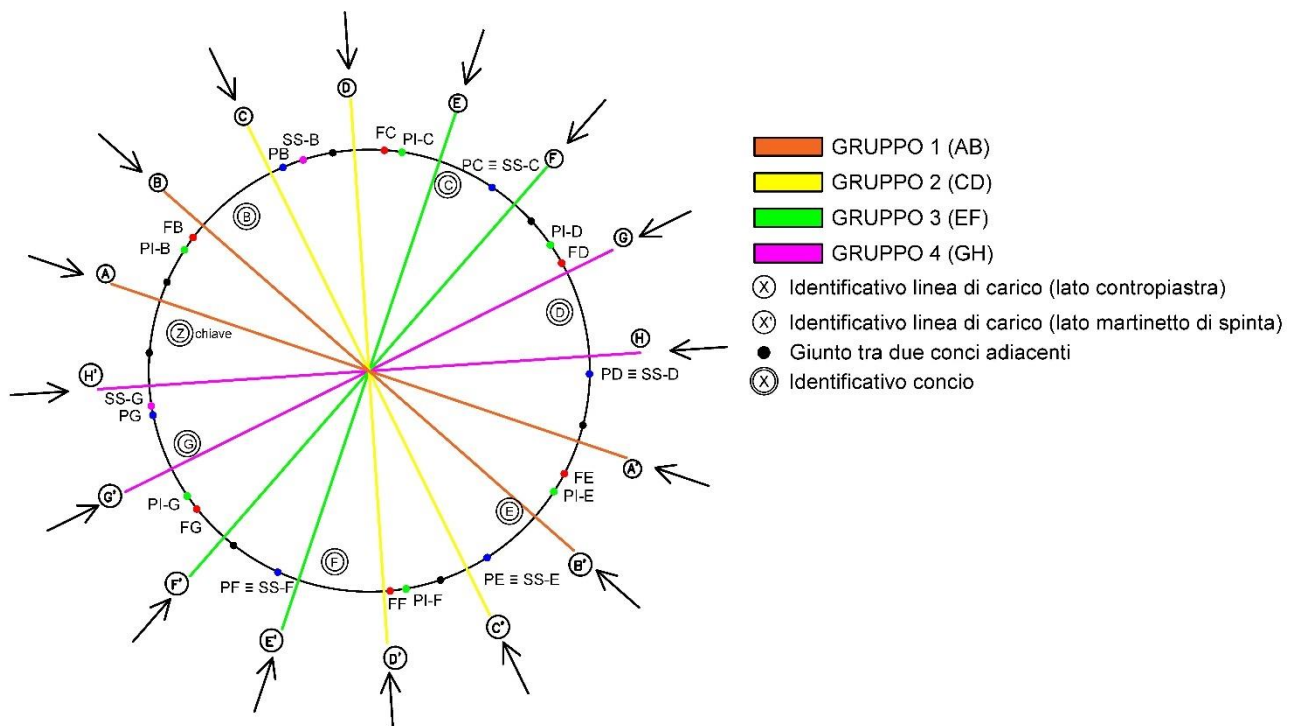
I dati pre-elaborati da STMicroelectronics, al fine di ricavare le informazioni sulle variazioni di capacità dei sensori, sono stati poi messi in relazione con i dati acquisiti da UniRM2 relativi ai carichi applicati sull'anello.

Le sequenze di carico applicate durante le due prove di laboratorio, secondo le due diverse configurazioni precedentemente richiamate sono le medesime adottate e descritte in dettaglio nell'OR4.

Per tutte le prove eseguite, i dati raccolti da STMicroelectronics (variazioni di capacità) e UniRM2 (carichi applicati) sono stati organizzati in file XLSX (contenenti i valori di carico di ciascun gruppo di carico, dei conci a cui questi gruppi afferiscono e delle variazioni di capacità registrate da ciascun sensore capacitivo pre installato all'interno di ciascun concio).

Di seguito vengono riportati i risultati associati alle due configurazioni di prova adottate

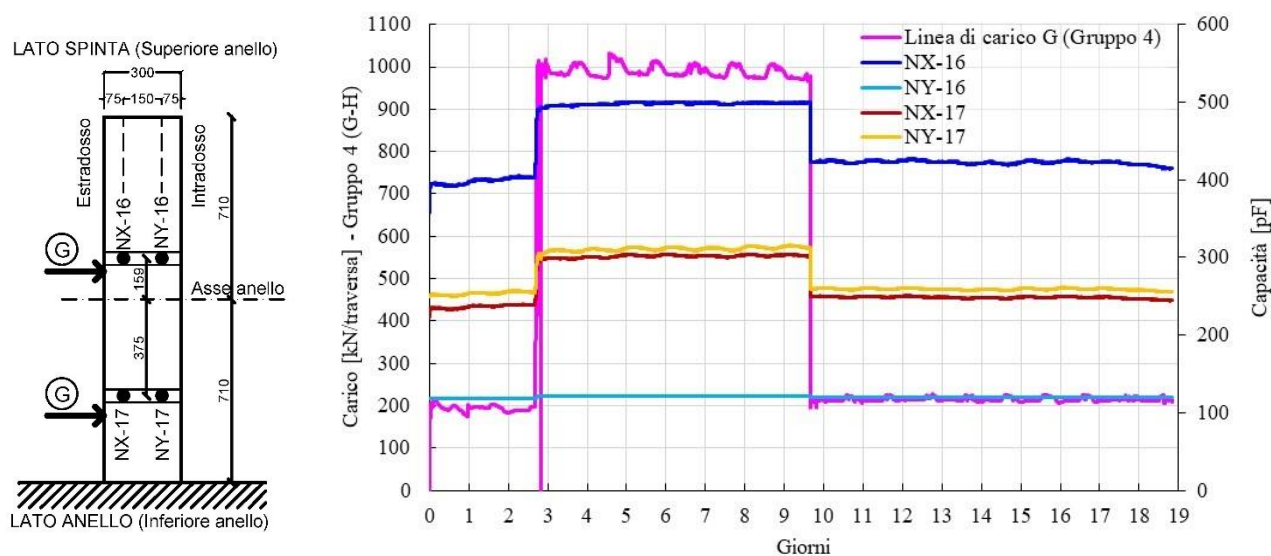
PROVA I: CONFIGURAZIONE IDROSTATICA (SPINTA MEMBRANALE)



Configurazione di carico associata ad una galleria profonda (spinta membranale)

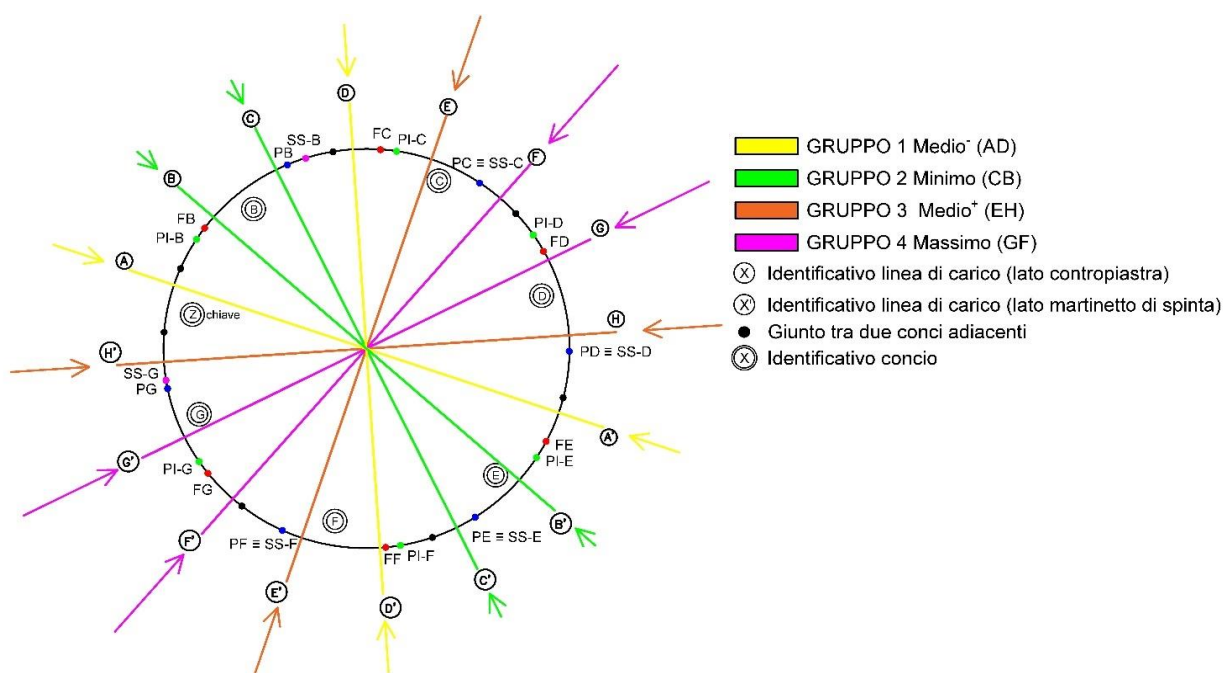
Il campionamento dei dati è avvenuto con frequenza pari a 1 dato/secondo per un periodo di 452 ore (circa 19 giorni). I dati campionati seguono un incremento di carico, lungo la superficie di estradosso dell'anello, tale da apportare su quest'ultimo una spinta (compressione) membranale secondo quanto prestabilito nell'OR3 e riprodotto nell'OR4 fino ad arrivare ad una spinta massima pari a 1000 kN/traversa.

Nella figura di seguito, a titolo di esempio, relativamente a quanto ottenuto ed elaborato per ciascun sensore installato su ogni concio dell'anello (ad eccezione del concio "Z" di chiave che non è stato strumentato), vengono riportati i risultati in termini di curve capacità-tempo e carico-tempo associate ai sensori installati sul concio D le cui posizioni, rispetto alle linee di carico, possono essere dedotte dallo schema in Figura 6. Come si può osservare, le variazioni di capacità, a meno di quella relativa al sensore NY-16 che sembra non aver funzionato durante la prova, seguono perfettamente l'evoluzione del carico. La capacità registrata dai sensori risulta essere costante fin quando si esegue la manovra di carico per raggiungere la condizione di massima spinta membranale (1000 kN/traversa). Durante la manovra di carico, l'andamento della variazione di capacità coincide con quella della manovra stessa. Raggiunto il carico massimo fissato per la prova idrostatica, questo viene mantenuto costante per circa 7 giorni per poi procedere al successivo scarico. Tale comportamento viene seguito perfettamente dai sensori, a dimostrazione del fatto che hanno svolto bene il loro compito. La prova ha dato dimostrazione dell'efficacia dei sensori capacitivi post-installati. In futuro sarà necessario eseguire una calibrazione dei sensori al fine di associare tali variazioni di capacità a grandezze fisiche, quali le deformazioni indotte nella struttura da carichi esterni.



Risultati configurazione galleria profonda (spinta membranale): sovrapposizione curve carico-tempo e capacità-tempo

PROVA II: CONFIGURAZIONE DI OVALIZZAZIONE (PRESSOFLESSIONE)



Configurazione di carico associata ad una galleria profonda (ovalizzazione)

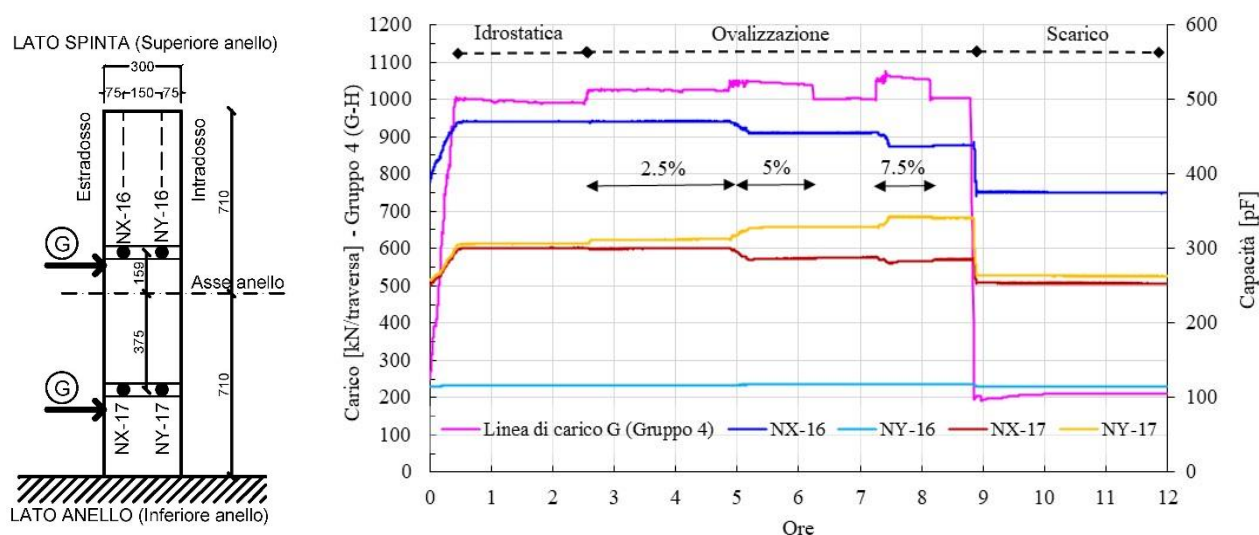
Il processo di carico ha previsto una prima fase in cui il carico è stato incrementato idrostaticamente fino a raggiungere quello della prima prova sperimentale pari a 1000 kN/traversa. Successivamente, si è proceduto ad imporre l'ovalizzazione, via via crescente secondo quanto riportato in Tabella 1, 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 sopra.

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

Tabella Percentuali di ovalizzazione

Il campionamento dei dati è avvenuto con frequenza pari a 1 dato/secondo per un periodo di circa 9 ore nella giornata del 15 luglio 2021. I dati campionati seguono un incremento di carico, lungo la superficie di estradosso dell'anello, tale da apportare su quest'ultimo una spinta dapprima idrostatica seguita da un'ovalizzazione graduale secondo quanto prestabilito nell'OR3 e riprodotto nell'OR4.

In Figura di seguito, in linea con quanto illustrato per la precedente prova idrostatica, vengono riportati i risultati in termini di curve capacità-tempo e carico-tempo associate ai sensori installati sul concio. I risultati mostrano, ancora una volta, come le variazioni di capacità, a meno di quella relativa al sensore NY-16 che sembra non aver funzionato durante la prova, seguono l'evoluzione del carico. Anche la seconda prova, relativa ad una configurazione di carico cui potrebbe essere soggetta una galleria superficiale ha confermato quanto già evidenziato nella precedente prova in termini di efficacia nella risposta dei sensori capacitivi post-installati.



Risultati configurazione galleria superficiale (ovalizzazione per pressoflessione): sovrapposizione curve carico-tempo e capacità-tempo

6.2 Caso studio n.2: Supporto operativo attività di sperimentazione Travi precomprese da ponte

La presente applicazione, è stata eseguita in collaborazione ed a supporto delle attività di sperimentazione previste nell'ambito dell'OR4, su travi da ponte in cemento armato precompresso in scala 1:5 con sistema a cavi post-tesi, finalizzata ad investigare l'effetto della precompressione sul comportamento strutturale, considerando sia casi in cui i sensori sono stati installati in fase di realizzazione dell'elemento strutturale (preinstallati) che successivamente (post-installati).

Tale caso studio ha rappresentato un'attività propedeutica alla modellazione del viadotto Canalone ed un indispensabile occasione per la definizione dei protocolli operativi standard e di applicazione della sensoristica innovativa sviluppata nell'ambito del progetto, nonché un'occasione di training del personale operativo per le installazioni previste sul viadotto dimostratore del "Canalone".

6.2.1 Modello numerico per la calibrazione delle prove sperimentali.

L'attività ha avuto il duplice scopo di supportare le attività di modellazione sperimentale su travi da precomprese da ponte svolte dall'Università di Napoli Federico II nell'ambito dell'OR4, e quella di individuare la più idonea modellazione funzionale alle attività di modellazione del viadotto Canalone.

Lo studio ha quindi interessato l'individuazione dei software di modellazione agli elementi finiti più idonei alla realizzazione delle simulazioni numeriche e con maggiore potenzialità per il raggiungimento degli obiettivi del progetto e accuratezza dei risultati numerici. Tra tutti i vari software di modellazione fem, quelli più diffusi ed utilizzati nei diversi settori dell'industria e dell'edilizia civile sono SAP2000, MSC/Patran e MSC/Nastran, Hypermesh, Ansys, Simulia, Apm fem, Sismicad, Straus, WinStrand, Femap, CDS Win, Edilus CA, PROSAP, Midas Gen, Travilog, di cui è stata effettuata una approfondita indagine. Dopo un'attenta analisi e valutazione delle potenzialità, anche se a volte differenti, dei vari software analizzati, considerando la finalità, la tipologia di analisi da effettuare e l'accuratezza sia nella modellazione della struttura e sia nei risultati che si vogliono ottenere, l'attenzione è stata posta su due di questi: SAP2000 per la parte di modellazione ed analisi statica di parti singole costituenti il manufatto e di MSC/Patran/Nastran per la parte di modellazione ed analisi dinamica dell'intero viadotto, che costituisce il dimostratore di tale attività all'interno del progetto.

Con questi software è stata avviata, quindi la fase di simulazione numerica. Precisamente, con l'utilizzo del software SAP2000, sono stati realizzati dei primi modelli numerici di varie geometrie di travi tipiche costituenti il manufatto stesso. È stato studiato il funzionamento di

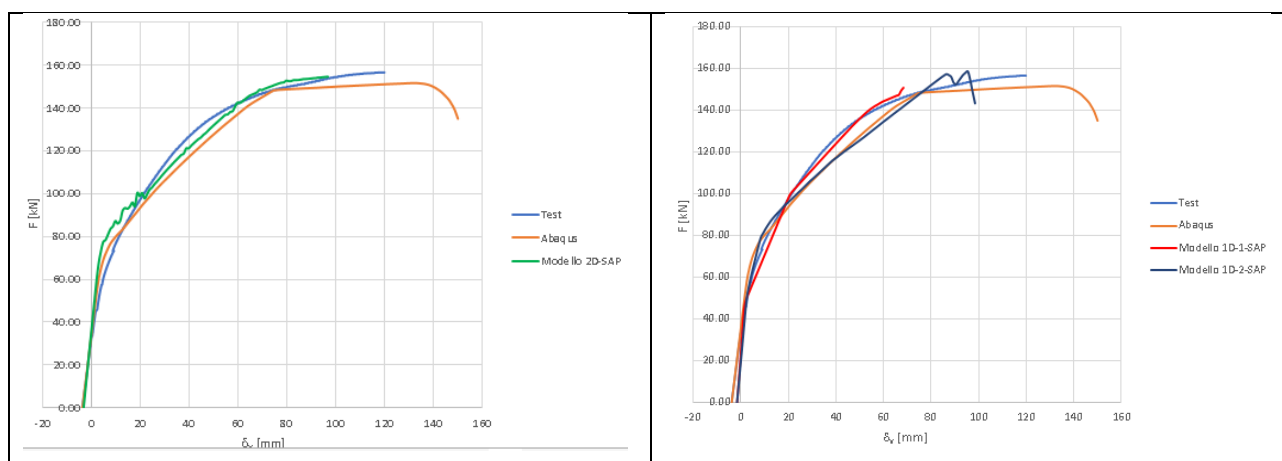
tali travi in cemento armato precompresso per meglio simularne numericamente il loro comportamento.

È stato realizzato un modello sia monodimensionale, con elementi frame, che tridimensionale, con elementi solidi, di varie geometrie di travi in cemento armato, con il software SAP2000, sulle quali è stato applicato sia un carico uniforme che un carico concentrato. Con i risultati ottenuti è stato effettuato un confronto in termini di freccia e tensione tra la formulazione analitica ed i risultati numerici ottenuti dai modelli 1D e 3D delle travi realizzate. Si è proseguito il lavoro di simulazione numerica della trave in c.a.p. andando a modellare i due trefoli di precompressione, ai quali è stata applicata da un solo lato una forza di tiro, a favore di sicurezza rispetto a quanto prescritto nell'Eurocodice 1, per la determinazione della massima tensione applicabile alle armature da precompressione, come elementi “tendon” con andamento parabolico, considerandoli, inizialmente perfettamente aderenti al calcestruzzo. Così facendo si sono ottenuti i primi risultati in termini di tensione e deformazione. Volendo però tenere in conto del comportamento reale della trave che risulta essere non lineare si è deciso di concentrarci, principalmente, sulla modellazione unidimensionale e bidimensionale. Infatti con un modello 1D in SAP2000 è possibile tenere in conto del comportamento non lineare di un frame rappresentando le proprietà di sezione che vengono calcolate con elevata accuratezza grazie alla precisione della sezione creata rispetto alla geometria, esatta posizione e dimensioni delle armature, e alle proprietà del materiale, confinato e non confinato. Mentre con un modello 2D, con la formulazione “Non layered shell”, è possibile definire le proprietà del calcestruzzo armato attraverso la definizione dei layer di cui è composto e precisamente distinguere gli strati di calcestruzzo e quelli di armature longitudinali e trasversali. I cavi da precompressione sono stati modellati con elementi frame, con andamento parabolico, per tenere in conto del loro comportamento non lineare, e collegati alla trave tramite elementi “link” ai quali è possibile assegnare i gradi di libertà desiderati. Su entrambi i modelli così realizzati è stata fatta un'analisi Statica Non Lineare di “Pushover” a controllo di spostamento partendo da una condizione iniziale deformata dovuta all'applicazione alla struttura prima del peso proprio e poi della compressione dei cavi stessi. Sono state effettuate numerose simulazioni numeriche al fine di effettuarne la calibratura per individuarne le capacità strutturali che meglio si avvicinino al comportamento reale. È stata ricavata la curva di capacità plottando il taglio al piede rispetto allo spostamento di un punto di controllo, scelto ad $1/3$, e tale curva è stata confrontata con quella ricevuta in input da altri partners all'interno del progetto, ottenuta da simulazioni numeriche fatte con altri software. Dal confronto delle curve si può concludere che con la calibratura fatta sui modelli numerici realizzati con SAP2000 si è ottenuta una buona correlazione numerica tra i modelli.

In fine è stata effettuata una correlazione numerico sperimentale, confrontando i risultati ottenuti dai modelli numerici calibrati precedentemente con i risultati di prove sperimentali effettuate presso l'università di Napoli Federico II.

L'obiettivo dell'attività è quindi riconducibile alla elaborazione di modelli numerici predittivi delle performance in esercizio di parti tipologiche di viadotto, costituente un caso studio del progetto. Per raggiungere tale obiettivo è stato svolto un lavoro di indagine sulla tipologia di modellazione numerica più idonea a rappresentare il fenomeno di interesse attraverso numerose simulazioni numeriche di varie geometrie di travi. Il modello così realizzato è stato calibrato attraverso un confronto con risultati ottenuti con altri software. In fine, su tale modello numerico è stata effettuata una correlazione numerico sperimentale, confrontando i risultati ottenuti con i risultati di prove sperimentali effettuate da altri partner di progetto. Da tal confronto si è evinto una buona correlazione e quindi un buon comportamento del modello numerico nella rappresentazione del fenomeno reale.

Si riporta di seguito un esempio di correlazione numerico-sperimentale per trave a T di cemento armato precompresso con alto livello di precompressione e trefoli perfettamente iniettati.



Per ulteriori dettagli si rimanda all'All.4 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TS-Caso Studio2-Modellazione Numerica Travi CAP

6.2.2 Progettazione e strumentazione finalizzata alla esecuzione di prove statiche su trave da ponte in scala in cap a cavi scorrevoli.

Il sistema di monitoraggio si basa sull'utilizzo di sensori innovativi a basso costo (inclinometri, accelerometri e sensori di sforzo) da inserire in maniera estesa nelle strutture. I dati registrati dai singoli sensori sono inviati a concentratori e da lì trasferiti in ambiente cloud. Potranno essere elaborati attraverso modelli strutturali direttamente nel cloud, in modo da avere una verifica della sicurezza strutturale in tempo reale.

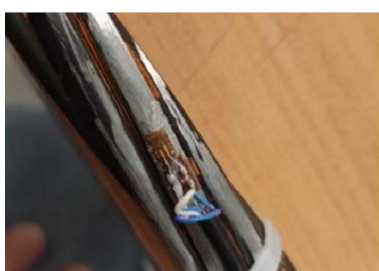
La sperimentazione ha previsto la installazione di appropriati sensori sulle armature di travi in C.A.P., ovvero estensimetri resistivi, denominati strain-gauge. Si elencano di seguito i passi seguiti nella procedura di installazione degli estensimetri sia su armature tese che lente:

1. pulizia grossolana, levigatura e rimozione impurità;
2. preparazione estensimetro e saldatura con il terminale di saldatura;
3. cablaggio (saldatura su terminali) con cavo schermato di una lunghezza pari a 20-25 cm;
4. incollaggio estensimetro su punto di misura tramite collante specifico (Z70);
5. protezione del punto di misura con opportuni strumenti;
6. foratura della guaina del trefolo con fuoriuscita dei cavi di misura e successiva sigillatura a
7. regola d'arte;
8. installazione, fissaggio e sigillatura di tubicini in gomma (pari a 15-20 cm) per non
9. compromettere il cablaggio durante il getto di cls,
10. incollaggio su cls di un ulteriore terminale di saldatura con collante specifico (X60) e saldatura
11. dei cavi in uscita dalla trave;
12. cablaggio (saldatura su terminale) esterno alla trave del cavo di misura per passaggio
13. configurazione da 2 a 3 fili;
14. connessione alla centralina di acquisizione.

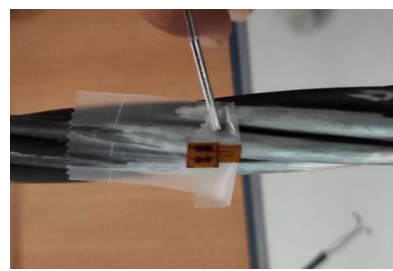
Si evidenzia che nel caso in esame è stato scelto, anche per motivi operativi, di effettuare una connessione a 2 fili dal terminale di saldatura con cavo schermato fino a permettere al cavo di uscire esternamente alla trave, posizionare un ulteriore basetta di saldatura e da lì effettuare il passaggio da 2 a 3 fili. Successivamente per semplificare e velocizzare le operazioni di saldatura, è stato scelto di effettuare le saldature e il cablaggio iniziale (con cavo in dotazione, già schermato e protetto), prima dell'incollaggio sull'elemento, onde evitare saldature in posizioni proibitive e garantire una migliore installazione. Si è scelta questa metodologia in modo tale che nell'azione di tesaggio del trefolo, in cui avvengono degli scorrimenti del fascio di cavi intrecciati, non ci siano azioni di tiro né sulla saldatura né su tutta la componentistica installata.



Piegatura cavi anti strappo con filo tip.1



Piegatura cavi anti strappo con filo tip.2

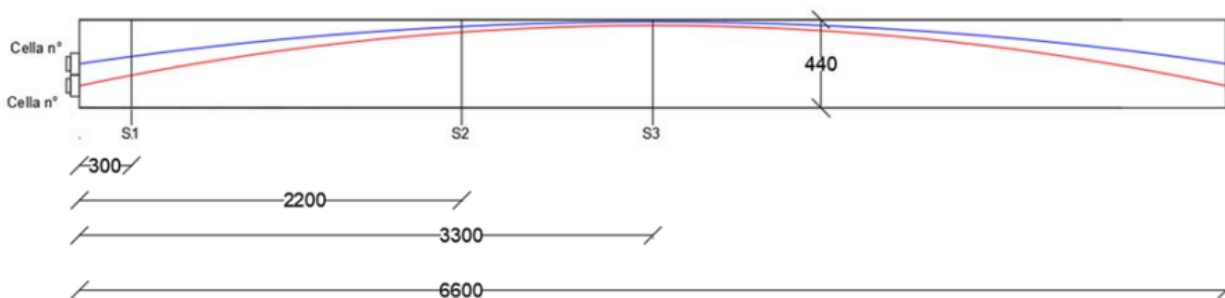


Effetto cerniera per incollaggio preciso

Si è poi scelto di effettuare la prima connessione con un cavo già schermato e abbastanza flessibile, tale da poter essere manipolato con facilità in spazi stretti. Ricordiamo che, una volta strumentata l'armatura della trave, essa sarà sottoposta ad un getto di calcestruzzo in pressione, quindi con notevoli forze in gioco che potrebbero danneggiare il sistema così creato. Prima del getto ed in corrispondenza dei punti di misura, è stato pensato di predisporre dei tubicini tali da permettere la fuoriuscita dei cavi di misura dalla trave in C.A.P. (la lunghezza dei tubicini sarà di circa 15 - 20 cm, con conseguente lunghezza del cavo di 20 – 25 cm). Questi tubicini possono essere di 2 tipologie, in gomma o corrugato come di seguito raffigurato. Per questa procedura, è necessario praticare dei fori sulla guaina protettiva del trefolo in modo da permettere la fuoriuscita del cavo di misura. Il foro sarà opportunamente chiuso con sigillanti idonei tale che sia impedito l'ingresso di acqua o cemento all'interno della guaina nella fase di getto. Anche la testa del tubicino rivolta verso l'esterno dovrà avere un tappo per poter evitare l'ingresso di sostanze indesiderate. All'interno di questi tubicini verrà inserito il cavo saldato al terminale di saldatura (e quindi connesso agli estensimetri) e, tramite l'ausilio di pinzette o mezzi idonei, permetterne la fuoriuscita per la successiva connessione alla centralina, previo ulteriore posizionamento di terminali di saldatura per il passaggio da 2 a 3 poli.

Presso il laboratorio autorizzato della Tecno In S.p.A. è stato condotto un test di funzionamento della procedura d'installazione. In particolare, su un trefolo tipo con cui verrà armata la trave da monitorare, sono state installate due diverse conformazioni del punto di misura. Il trefolo, tramite una macchina di trazione adatta, è stato messo in tensione con step di 20 kN, da 0 kN ad 80 kN, rimanendo sempre in campo elastico senza portare lo stesso a rottura; è stata misurata, in ogni step di carico, la distanza da un punto fisso ad un punto di misura appositamente installato.

Gli strumenti descritti sono stati applicati presso n.6 travi nel mese di luglio 2021. Successivamente, nel dicembre 2021, il giorno 14/12/2021 presso lo stabilimento C&P di Chiaromonte (PZ), si è proceduto alla tesatura dei cavi appartenenti a n° 6 travi già strumentate. Le travi in oggetto hanno lunghezza pari a 6600mm, altezza pari a 440mm e larghezza dell'anima pari a 150mm. Ogni trave è composta da 2 trefoli, uno superiore ed uno inferiore; in particolare, per semplicità di disegno, le travi sono state disegnate rovesciate, per conservare le informazioni acquisite in campo. Entrambi i cavi sono stati definiti con lo schema sottostante, in cui il cavo 1 è in blu e cavo 2 in rosso.



La tesatura dei cavi in oggetto è stata effettuata dal personale Diwidag, utilizzando le proprie attrezzature specifiche.

Per il monitoraggio del carico sono state utilizzate n°10 celle di carico SISGEO di portata massima pari a 500 kN ognuna, collegate alla centralina HBM mod MX1615B con cui si sono anche registrate le deformazioni. Si precisa che, per ogni trave, sono stati installati 10 estensimetri, di cui 4 sull'armatura (n.1 estensimetro a 45° in S1 e n.3 estensimetri sul corrente superiore rispettivamente in S1, S2, S3) oltre che n.3 estensimetri per cavo (per un totale di 6).



Le travi sono state poi sottoposte a sperimentazione nell'ambito dell'OR4.

Per ulteriori dettagli si rimanda all'All.5 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TIN-CasoStudio2-Strumentazione armature travi CAP.

6.3 Caso studio n.3: Monitoraggio dinamico di un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità

Il presente documento riporta le attività di monitoraggio dinamico di un viadotto adibito a linee ferroviarie di Alta Velocità svolte allo scopo di dimostrare e valorizzare i risultati ottenuti da un sistema accelerometrico basato su tecnologia MEMS. 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 nr. 2 campate (“86” e “87”), 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 (numerate da 1 a 8 a partire dal lato prospiciente il binario dispari) porzione non di interesse nella campagna di monitoraggio riportata nel presente documento. 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 basati su tecnologia MEMS triassiali.

6.3.1 Misure delle accelerazioni e identificazione dinamica

La disposizione degli accelerometri è progettata secondo lo schema seguente:

- *Schema di dettaglio.* sono state misurate nr.6 accelerazioni verticali, nr.6 accelerazioni orizzontali trasversali e nr. 6 accelerazioni orizzontali longitudinali su una singola campata.

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.

Strumentazione utilizzata

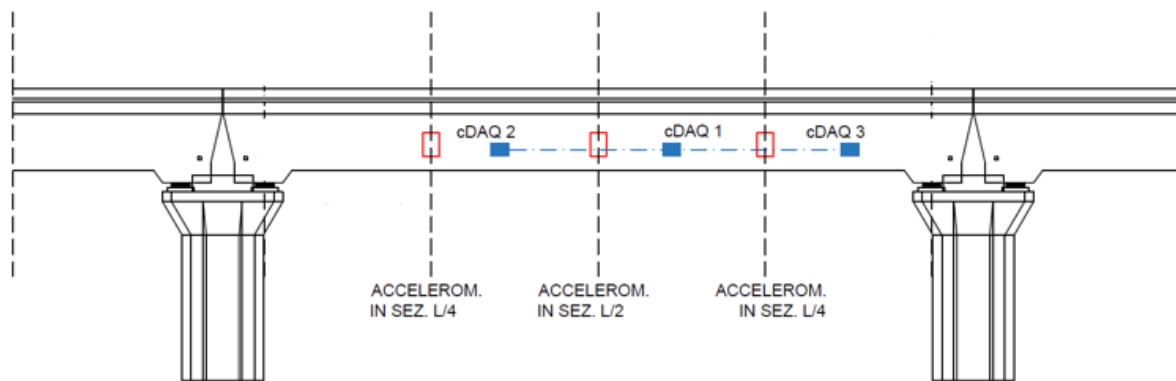
Per la misura delle accelerazioni sono stati impiegati:

- accelerometri MEMS triassiali ST ISM330DHCX

Le misure sono state effettuate programmando gli strumenti in High-Performance e Low-Power mode. I sensori sono stati utilizzati per campionare le accelerazioni del ponte ferroviario per 12 ore. A valle delle acquisizioni, le tracce accelerometriche sono state filtrate con un filtro passa-banda del 6 ordine con frequenze di taglio a 2Hz e 100Hz, e i passaggi dei treni sono stati segmentati in finestre di 15 secondi.

Posizionamento degli strumenti

Su una singola campata del viadotto, campata con sezione a cassone, sono state eseguite misure delle accelerazioni posizionando sei accelerometri MEMS triassiali, tre disposti sul lato pari e tre sul lato dispari dell'impalcato. In particolare, come illustrato in Figura 1, sono state strumentate nr.3 diverse sezioni, posizionate in corrispondenza degli appoggi, a $\frac{1}{4}$ della luce, a $\frac{1}{2}$ della luce e a $\frac{3}{4}$ della luce.



Prospetto longitudinale del ponte con le posizioni degli strumenti di misura

Elaborazione dei segnali registrati e tecniche d'identificazione dinamica

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.

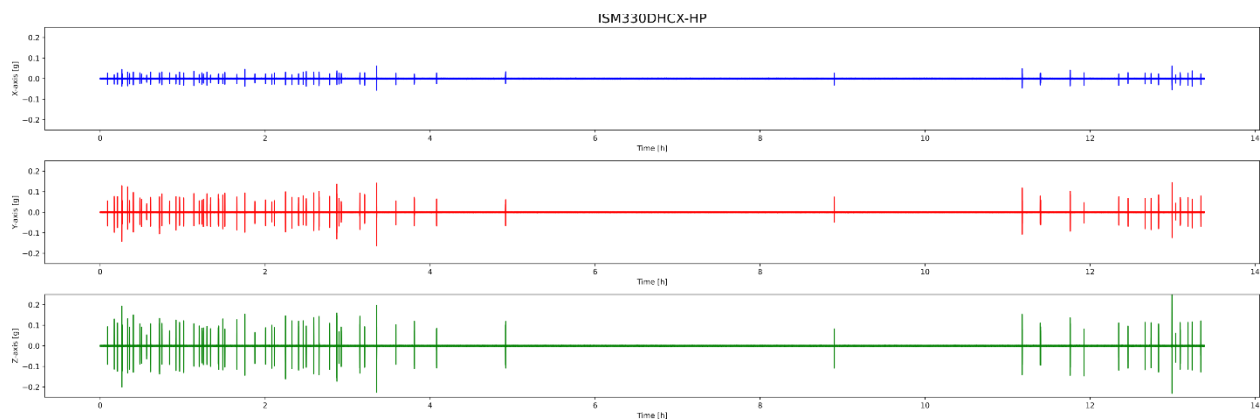
Le accelerazioni massime generate sull'infrastruttura dal passaggio del treno sono state calcolate sia sul segnale filtrato sia su quello non filtrato eliminando eventuali picchi concentrati che plausibilmente non riguardano fenomeni fisici.

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.

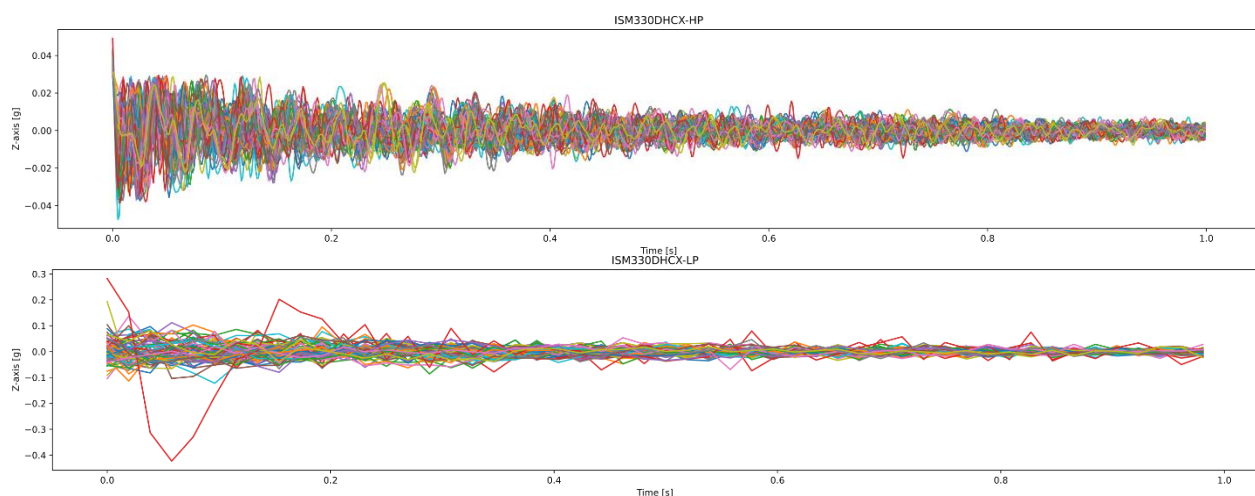
I sensori programmati in High-Performance mode campionano le accelerazioni a una frequenza di 833Hz, mentre la configurazione Low-Power produce dati ad una frequenza di 52Hz, la più alta possibile mantenendo il sensore in Low-Power mode. Tutti i sample prodotti hanno 16 bits di precisione.

Il grafico seguente mostra l'intera traccia accelerometrica, per tutti gli assi, misurata dagli accelerometri MEMS in High-Performance mode. Il sensore considerato è quello posto a centro campata, sul lato pari.



Traccia accelerometrica per i tre assi misurata dagli accelerometri MEMS

I seguenti due grafici mostrano, invece, il primo dei 15 secondi delle tracce segmentate di tutti i passaggi ferroviari registrati per entrambi i sensori MEMS configurati in High-Performance e Low-Power mode.



Tracce segmentate di tutti i passaggi ferroviari registrati per entrambi i sensori MEMS configurati rispettivamente in High-Performance e Low-Power mode

Per ogni campata sono state stimate le frequenze e gli smorzamenti del primo modo flessionale e del primo modo torsionale. Le caratteristiche dinamiche della struttura sono state identificate attraverso due diversi metodi che operano uno nel dominio delle frequenze (EFDD) e l'altro nel dominio del tempo (SSI-COV).

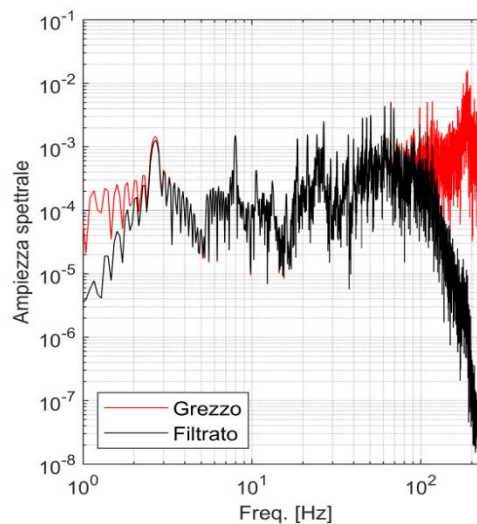
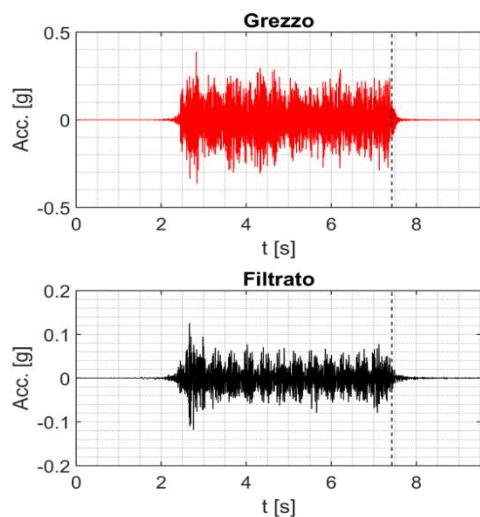
6.3.2 Parametri modali per l'impalcato a cassone strumentato – esempi

Per ogni giornata di misura le fotocellule hanno permesso di rilevare il numero di treni transitanti sul viadotto. Si riportano ad esempio in Tabella 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 precedentemente descritte. In alcuni casi non è stato possibile misurare la velocità dei convogli a causa di movimenti eccessivi delle fotocellule.

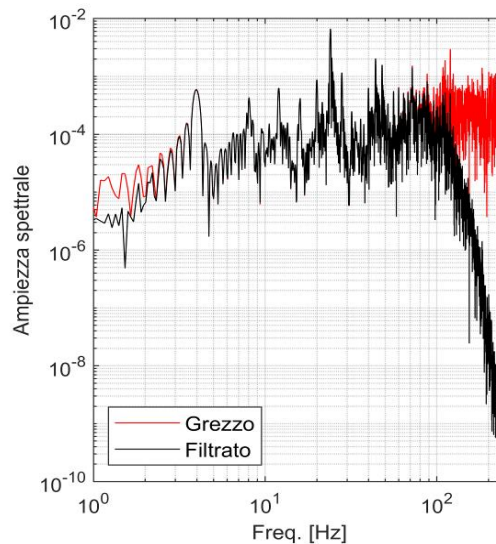
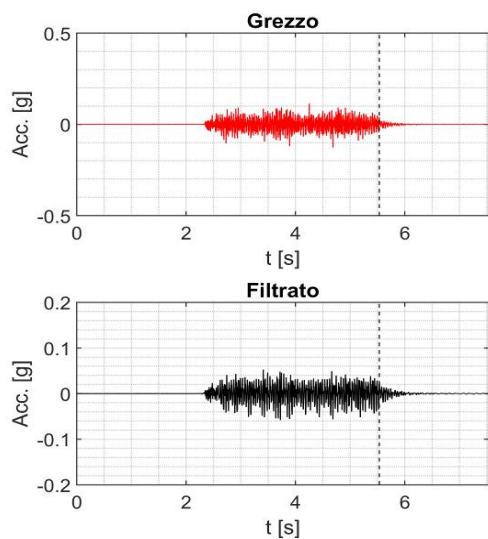
n° passaggio	Tipo treno	n° carrozze	Direzione	Binario	Velocità [km/h]	Data	Ora	Acc. max [g]	Acc. max filt. [g]
1	Frecciarossa	13	RO-FI	Pari	248.4	06/05/2021	11:42	1.045	0.159
2	Italo	11	FI-RO	Dispari	248.8	06/05/2021	12:08	1.194	0.117
3	Frecciarossa	13	FI-RO	Dispari	245.5	06/05/2021	12:18	1.288	0.081
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

Passaggi rilevati con caratteristiche del treno e accelerazioni massime prodotte sulla campata 1

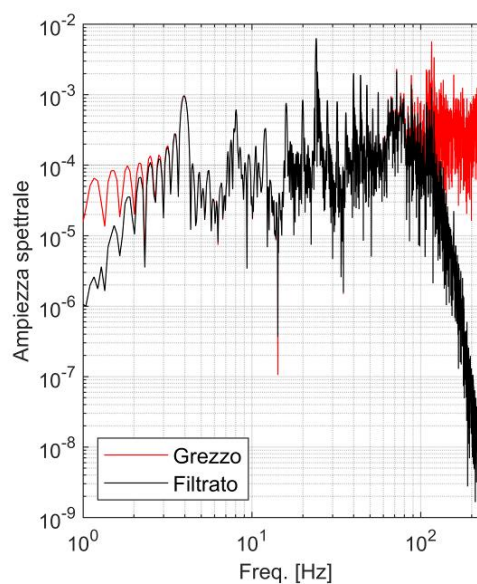
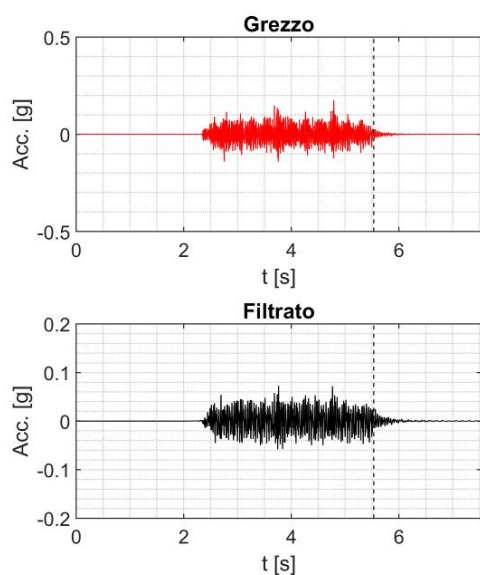
A titolo di esempio in figura 4 si riportano gli accelerogrammi registrati nelle diverse direzioni, durante il passaggio nr.11 e l'ampiezza delle loro trasformate di Fourier.



Canale 1 (orizzontale lato dispari)



Canale 2 (verticale lato dispari)



Canale 3 (verticale lato pari)

Rappresentazione del segnale nel dominio del tempo e delle frequenze per il passaggio nr.11

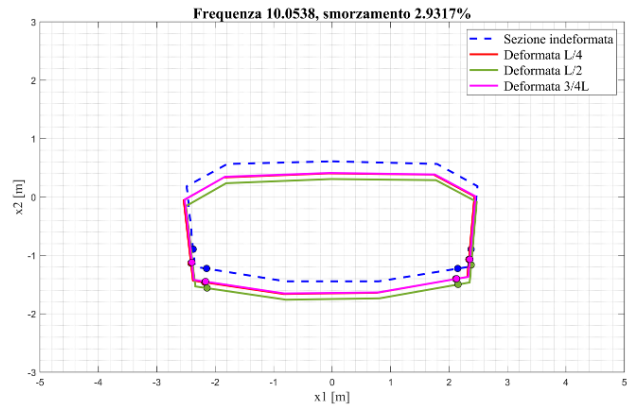
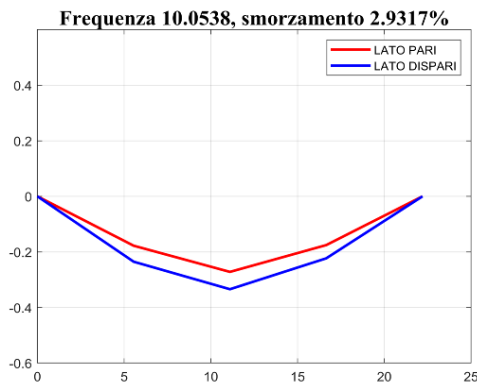
Dagli andamenti della densità di potenza spettrale si è osservato che, nonostante i viadotti siano travi a cassone isostatiche in semplice appoggio, l'armamento ferroviario determina un'interazione tra le campate adiacenti; pertanto, sono stati individuati i primi modi longitudinali, trasversali, flessionali e torsionali in corrispondenza di diversi valori di frequenza.

La Tabella di seguito mostra le stime delle frequenze del primo modo flessionale ottenute. In generale in sistema di monitoraggio installato ha consentito di identificare le principali caratteristiche modali del ponte.

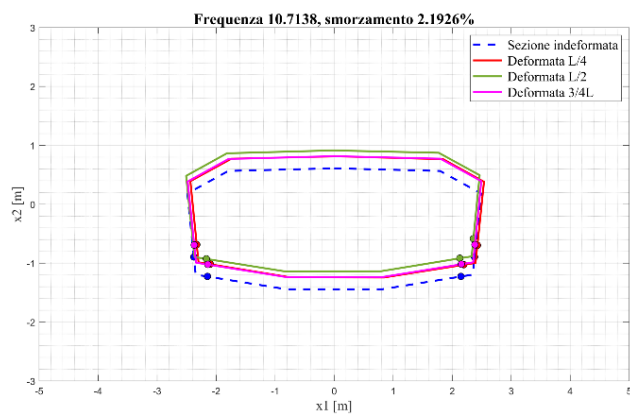
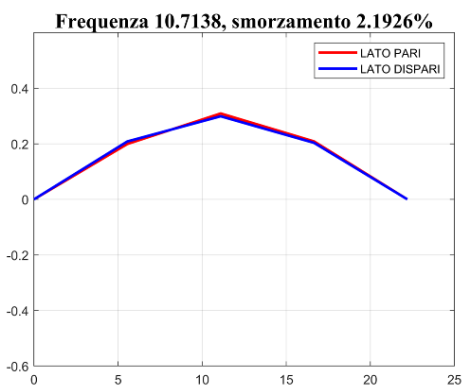
	Metodo EFDD		Metodo SSI-COV 1		Metodo SSI-COV 2	
	Primo modo flessionale		Primo modo flessionale		Primo modo flessionale	
n° registrazione	f [Hz]	smorz [%]	f [Hz]	smorz [%]	f [Hz]	smorz [%]
1	10.05	2.93%	10.71	2.19%	10.03	8.56%
2	9.93	2.92%	\	\	9.96	2.60%
3	9.21	2.94%	9.02	3.57%	9.12	4.33%
4	9.71	2.93%	\	\	9.94	6.92%
Valori medi	9.72	2.93%	9.87	2.88%	9.76	5.60%
Dev. standard	0.37	0.01%	1.20	0.98%	0.43	2.65%
C.D.V.	3.85%	0.30%	12.14%	33.85%	4.40%	47.37%

Caratteristiche modali della campata 23 stimate in condizioni di vibrazioni ambientali.

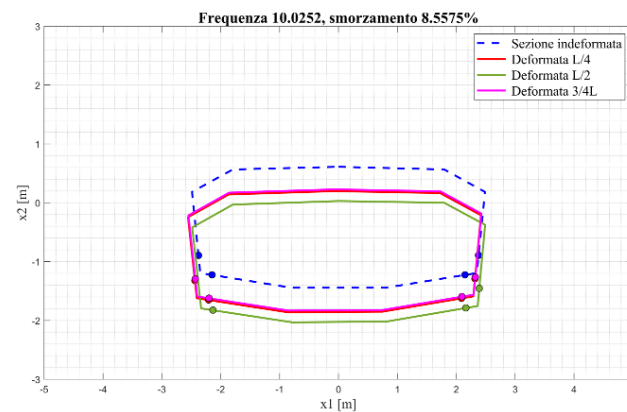
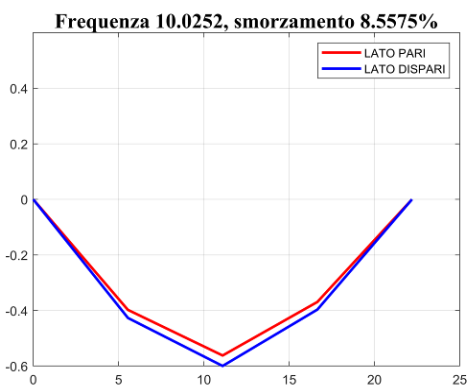
Nel seguito si riportano ad esempio le deformate modali ottenute tramite i procedimenti d'identificazione precedentemente introdotti per ciascuna registrazione, relativamente al primo modo flessionale.



Metodo EFDD

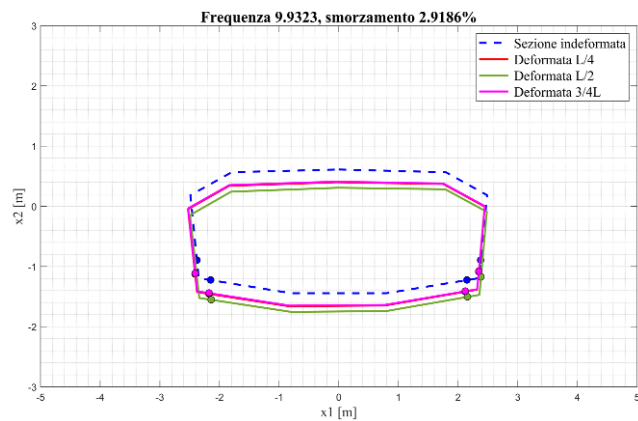
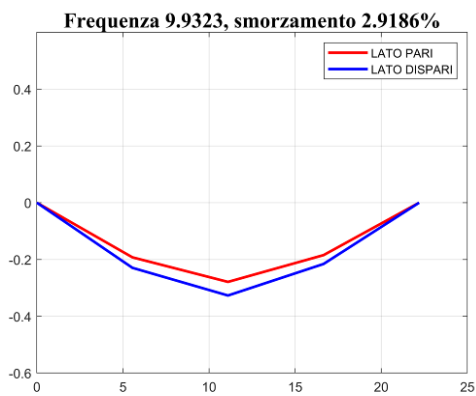


Metodo SSI-COV 1

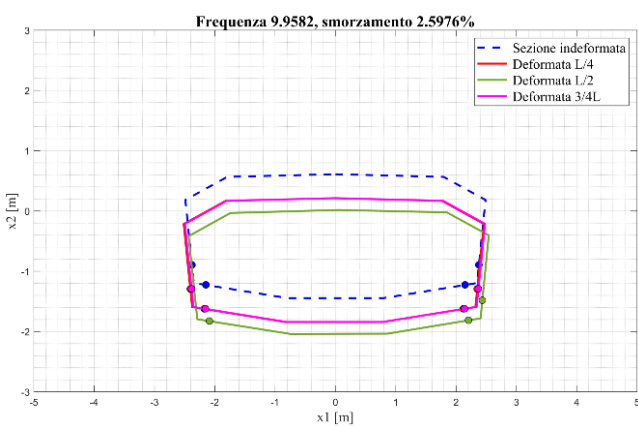
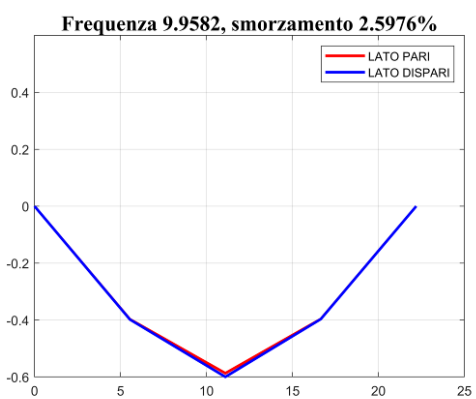


Metodo SSI-COV 2

Deformate modali del primo modo flessionale della campata 23 per la registrazione nr.1

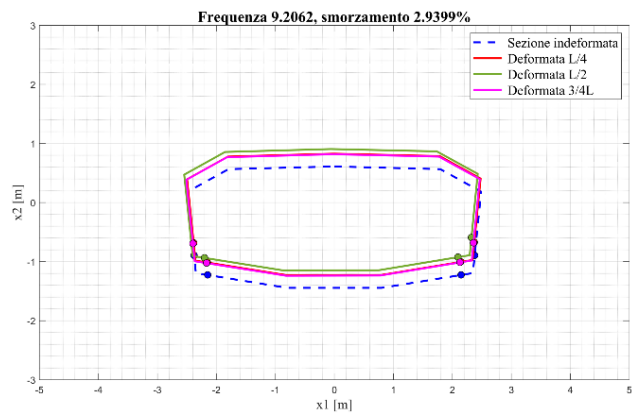
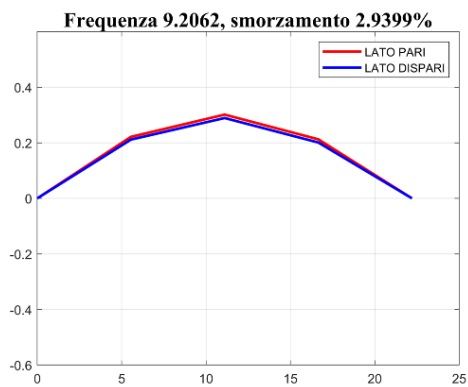


Metodo EFDD

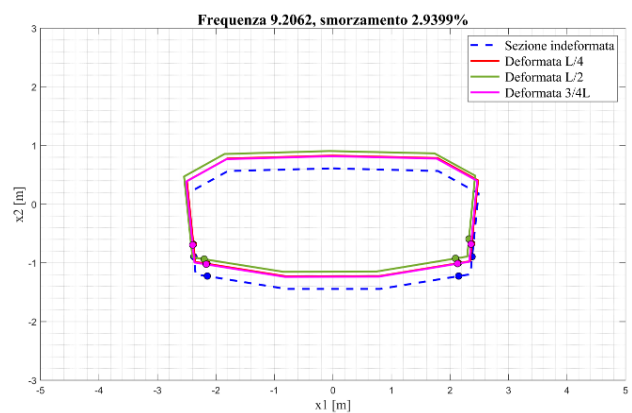
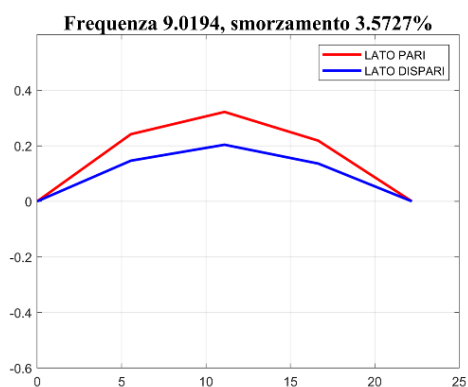


Metodo SSI-COV 2

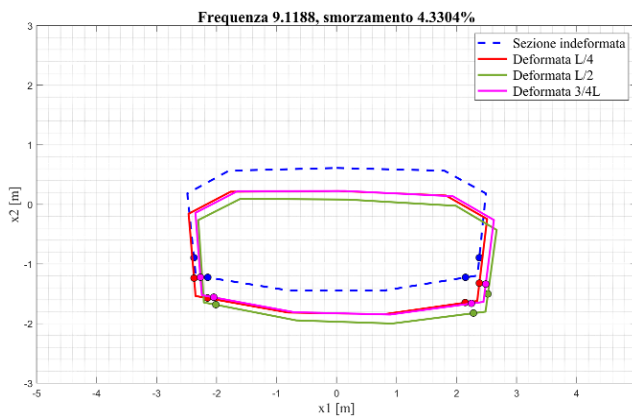
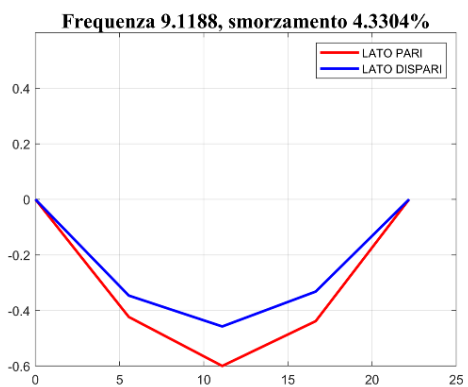
Deformate modali del primo modo flessionale della campata 23 per la registrazione nr.2



Metodo EFDD

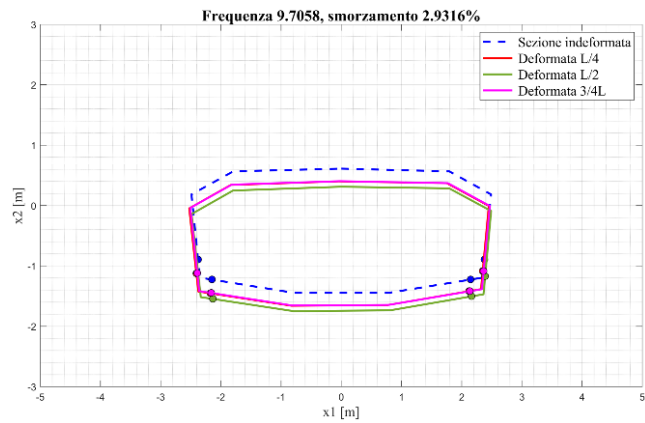
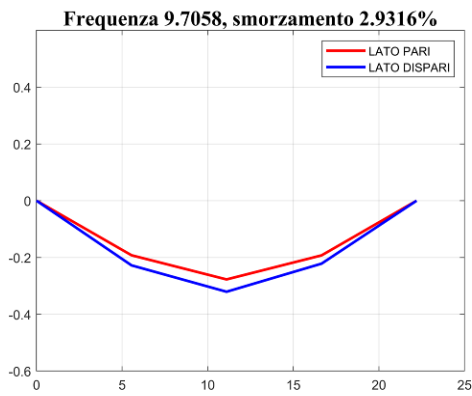


Metodo SSI-COV 1

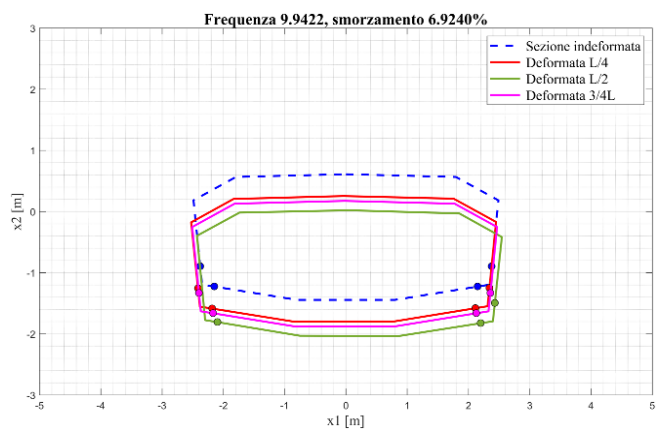
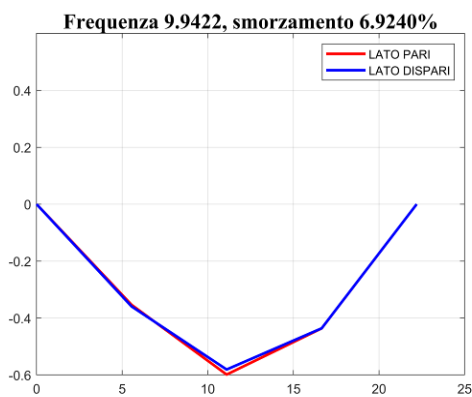


Metodo SSI-COV 2

Deformate modali del primo modo flessionale della campata 23 per la registrazione nr.3



Metodo EFDD

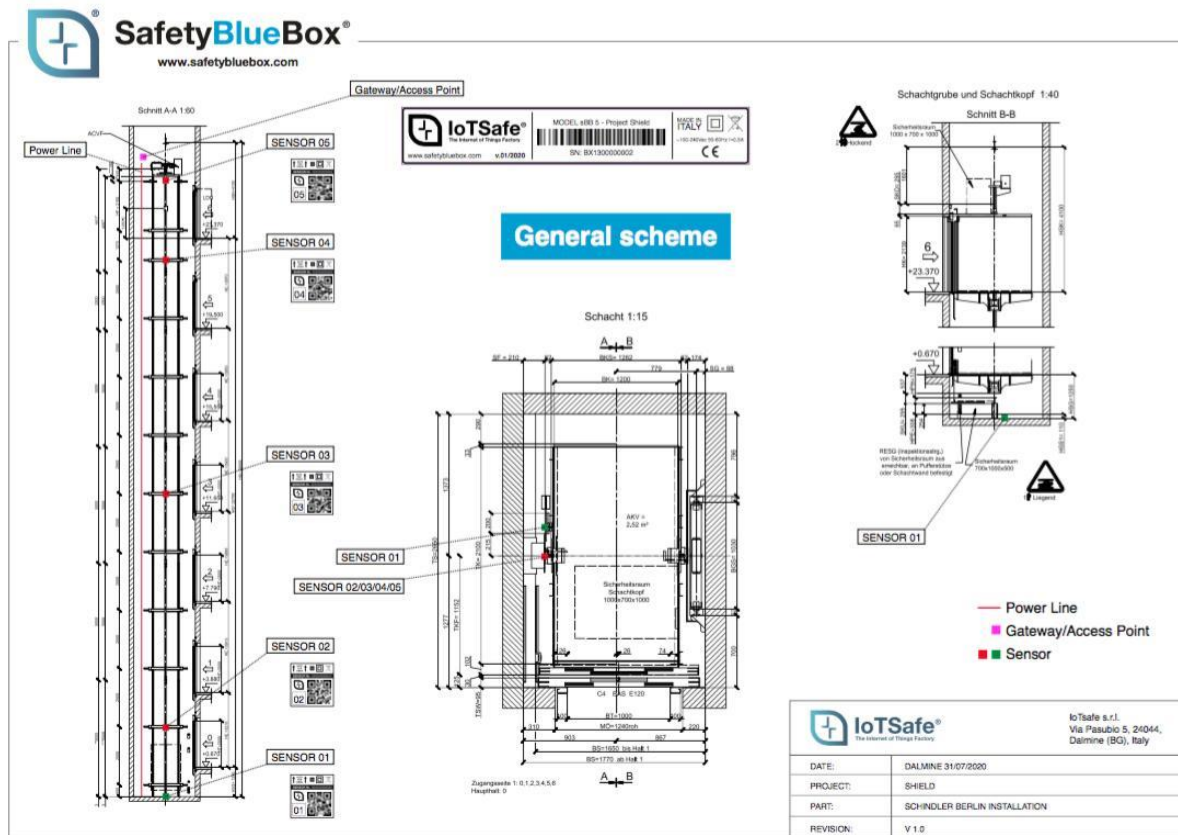


Metodo SSI-COV 2

Deformate modali del primo modo flessionale della campata 23 per la registrazione nr.4

6.4 Caso studio n.4: Palazzo in cemento armato sito in Berlino

Struttura: Edificio in cemento armato “nome OMISSIS” in Berlino.



Fonte dati: Dati raccolti tramite accelerometri MEMS

Obiettivo: La finalità è raccogliere dati in modo continuativo (24 ore al giorno per 7 giorni a settimana) per poter calibrare e validare algoritmi per il monitoraggio continuo dell'edificio.

Strumenti e tecniche adoperate: L'edificio è equipaggiato di diverse sensor board, posizionate nel vano ascensore (alcuni sulle guide, uno in fossa). Ciascuna sensor board è dotata di un accelerometro MEMS triassiale, un giroscopio MEMS triassiale e un termometro. Le sensor board dialogano tramite WiFi con un collettore (gateway), il quale riceve i dati, li bufferizza ed esegue una serie di analisi (“on edge”). L'informazione così opportunamente compressa viene inviata a un cloud, dove lo storico dei dati viene memorizzato al fine di essere visualizzato o per eventuali ulteriori analisi. È poi possibile instaurare una connessione SSH dall'esterno verso il gateway, per poter prelevare quando lo si desidera sequenze di dati “raw” al fine di calibrare o testare in modalità “offline” gli algoritmi in corso di sviluppo.

Metodologia applicata: Il gateway effettua diverse tipologie di analisi. In campo statico, viene calcolata l'inclinazione dei vari sensori (attraverso una media del vettore accelerazione su tempi sufficientemente lunghi). Questo permette di valutare l'inclinazione residua fra i diversi piani dell'edificio e il suo andamento temporale. In campo dinamico, invece, viene valutata l'energia delle accelerazioni misurate in fossa, allo scopo di individuare eventuali sismi o disturbi ambientali di diversa natura che possono causare danno all'edificio. In secondo luogo, tramite opportuno filtraggio e integrazione del segnale accelerometrico, viene valutata la velocità di picco lungo le tre componenti cartesiane (pcpv, peak component particle velocity) e la frequenza a maggior energia associata alla pcpv. La coppia (pcpv, frequenza) permette di dare una valutazione del rischio di danno cosmetico ("cosmetic damage"), secondo la filosofia della norma UNI 9916. Oltre a queste analisi, altri algoritmi sono attualmente in corso di sviluppo.

Strategie di validazione: Parte degli algoritmi ad ora utilizzati sono stati validati. Nello specifico, mediante test su tavola vibrante (dove lo spostamento della tavola è noto) si è validata la capacità degli algoritmi sviluppati di ricostruire lo spostamento stesso partendo dal segnale in accelerazione. A questo scopo si sono messi a confronto diverse tecniche di filtraggio e integrazione in tempo dei segnali, al fine di trovare la metodologia maggiormente accurata e robusta.

Risultati previsti: Accesso continuo a dati reali in condizioni differenti (giorno vs notte, giorni lavorativi vs weekend, etc); in caso di scossa sismica, possibilità di registrare la risposta dell'edificio; possibilità di testare rapidamente e validare algoritmi in corso di sviluppo.

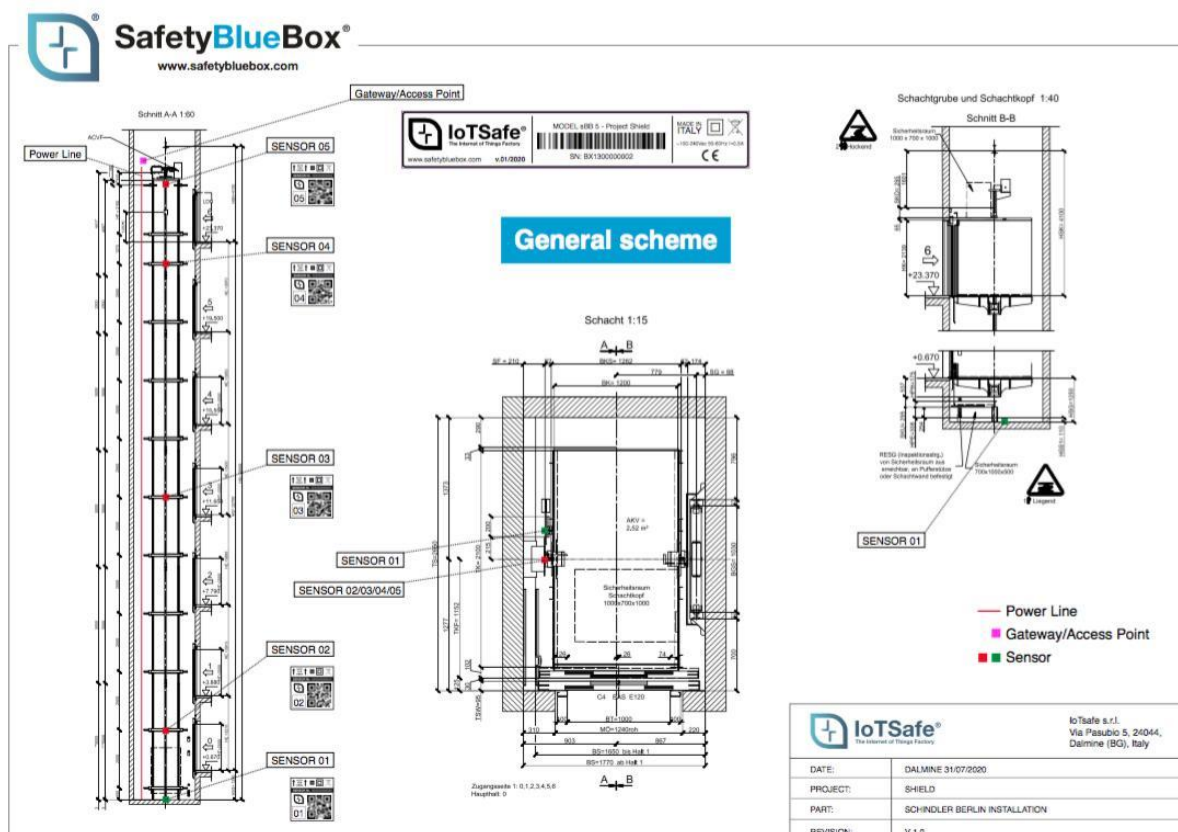
6.5 Caso studio n.5: Monitoraggio Edificio storico sito in Bergamo

Struttura: Edificio storico in cemento armato misto mattoni/pietre sito a Bergamo città

Descrizione dell'oggetto: Edificio storico sito a Bergamo città. Convento edificato nel 1730, oggetto di una ristrutturazione completa da parte di un proprietario privato tra il 2004 e il 2009. L'edificio è stato consolidato strutturalmente, dotato di un piano inferiore in cemento armato e di un ascensore che serve tutto l'edificio (dal piano interrato al secondo piano).

Descrizione della sperimentazione: Nel vano ascensore, sulle guide, sono stati installati dei sensori per il monitoraggio statico e dinamico dell'edificio. L'applicazione completa prevede anche il monitoraggio dell'ascensore.

Descrizione dell'innovatività del risultato: Essere in grado di sviluppare algoritmi in grado di elaborare i dati provenienti da sensori installati all'interno del vano ascensore (sulle guide dell'ascensore) e fornire informazioni utili sullo stato di salute strutturale dell'edificio.



Fonte dati: Dati raccolti tramite accelerometri MEMS

Obiettivo: La finalità è raccogliere dati in modo continuativo (24 ore al giorno per 7 giorni a settimana) per poter calibrare e validare algoritmi per il monitoraggio continuo dell'edificio.

Strumenti e tecniche adoperate: L'edificio è equipaggiato di diverse sensor board, posizionate nel vano ascensore (alcuni sulle guide, uno in fossa). Ciascuna sensor board è dotata di un accelerometro MEMS triassiale, un giroscopio MEMS triassiale e un termometro. Le sensor board dialogano tramite WiFi con un collettore (gateway), il quale riceve i dati, li bufferizza ed esegue una serie di analisi ("on edge"). L'informazione così opportunamente compressa viene inviata a un cloud, dove lo storico dei dati viene memorizzato al fine di essere visualizzato o per eventuali ulteriori analisi. È poi possibile instaurare una connessione SSH dall'esterno verso il gateway, per poter prelevare quando lo si desidera sequenze di dati "raw" al fine di calibrare o testare in modalità "offline" gli algoritmi in corso di sviluppo.

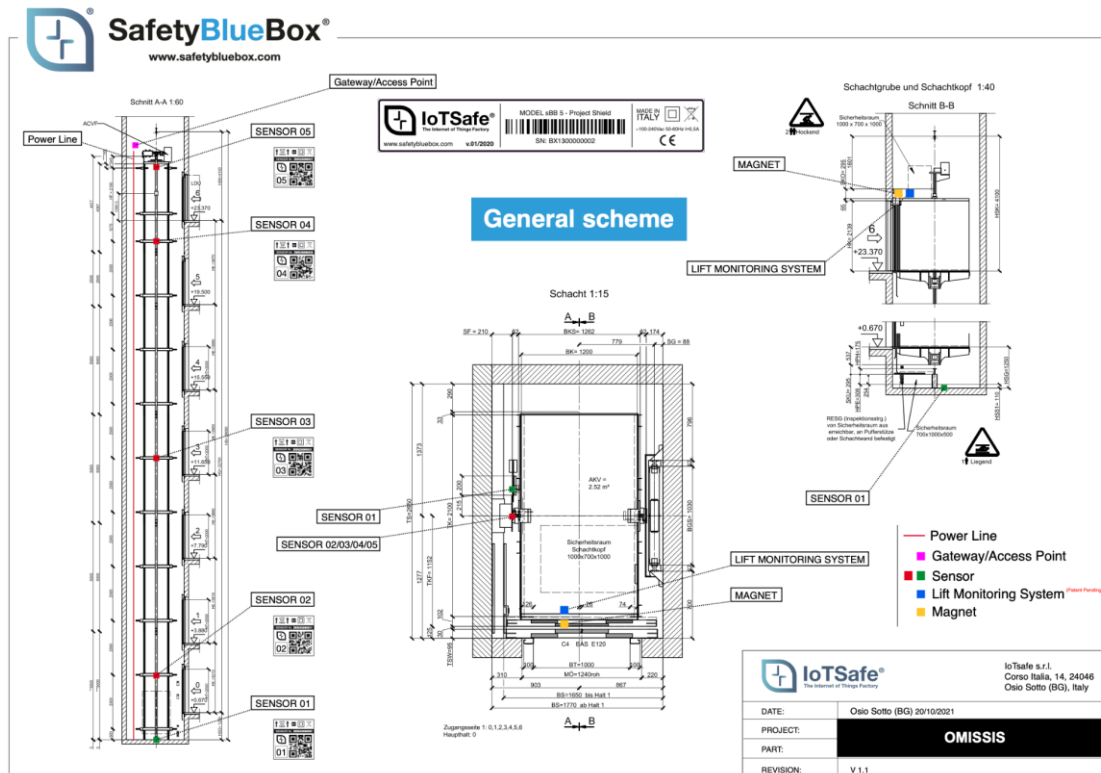
Metodologia applicata: Il gateway effettua diverse tipologie di analisi. In campo statico, viene calcolata l'inclinazione dei vari sensori (attraverso una media del vettore accelerazione su tempi sufficientemente lunghi). Questo permette di valutare l'inclinazione residua fra i diversi piani dell'edificio e il suo andamento temporale. In campo dinamico, invece, viene valutata l'energia delle accelerazioni misurate in fossa, allo scopo di individuare eventuali sismi o disturbi ambientali di diversa natura che possono causare danno all'edificio. In secondo luogo, tramite opportuno filtraggio e integrazione del segnale accelerometrico, viene valutata la velocità di picco lungo le tre componenti cartesiane (pcpv, peak component particle velocity) e la frequenza a maggior energia associata alla pcpv. La coppia (pcpv, frequenza) permette di dare una valutazione del rischio di danno cosmetico ("cosmetic damage"), secondo la filosofia della norma UNI 9916. Oltre a queste analisi, altri algoritmi sono attualmente in corso di sviluppo.

Strategie di validazione: Parte degli algoritmi ad ora utilizzati sono stati validati. Nello specifico, mediante test su tavola vibrante (dove lo spostamento della tavola è noto) si è validata la capacità degli algoritmi sviluppati di ricostruire lo spostamento stesso partendo dal segnale in accelerazione. A questo scopo si sono messi a confronto diverse tecniche di filtraggio e integrazione in tempo dei segnali, al fine di trovare la metodologia maggiormente accurata e robusta.

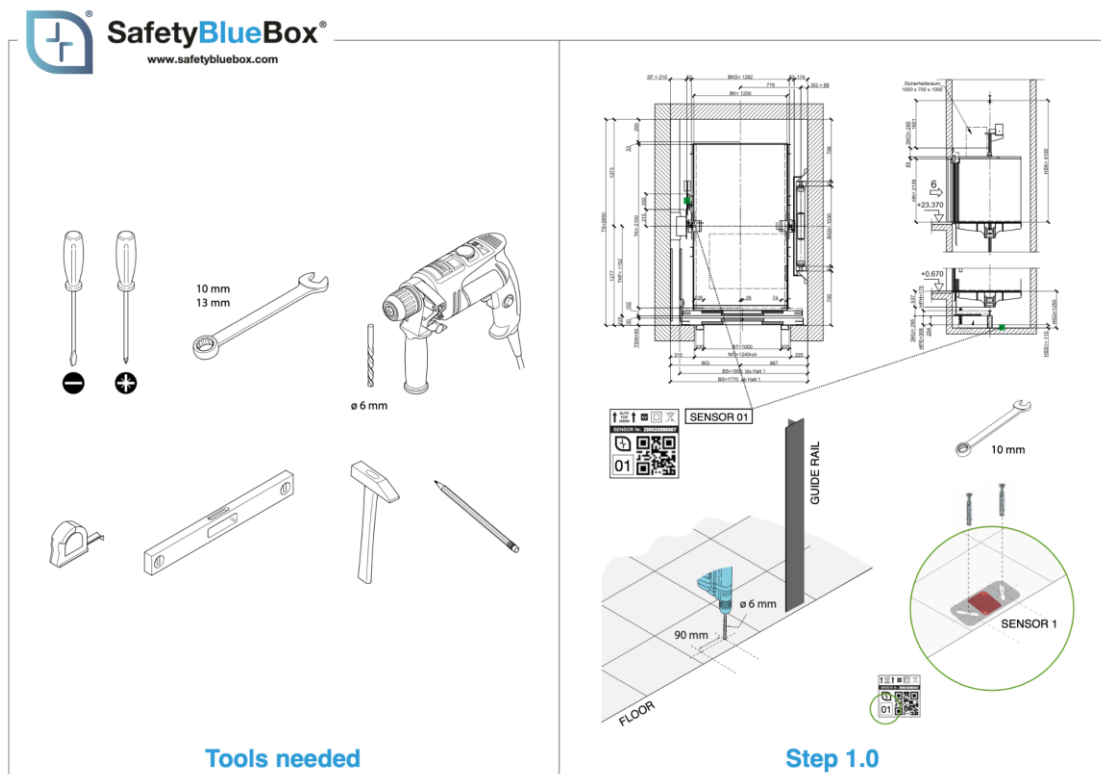
Risultati previsti: Accesso continuo a dati reali in condizioni differenti (giorno vs notte, giorni lavorativi vs weekend, etc); in caso di scossa sismica, possibilità di registrare la risposta dell'edificio; possibilità di testare rapidamente e validare algoritmi in corso di sviluppo.

Istruzioni montaggio hardware:

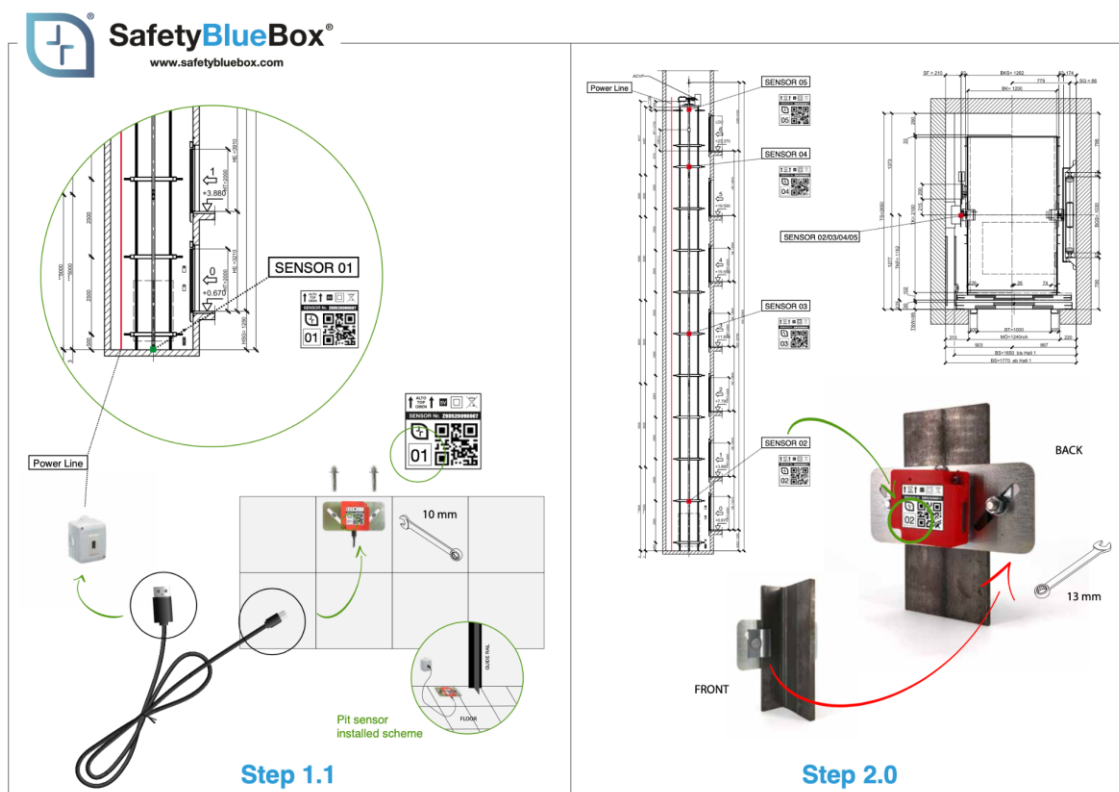
Schema generale



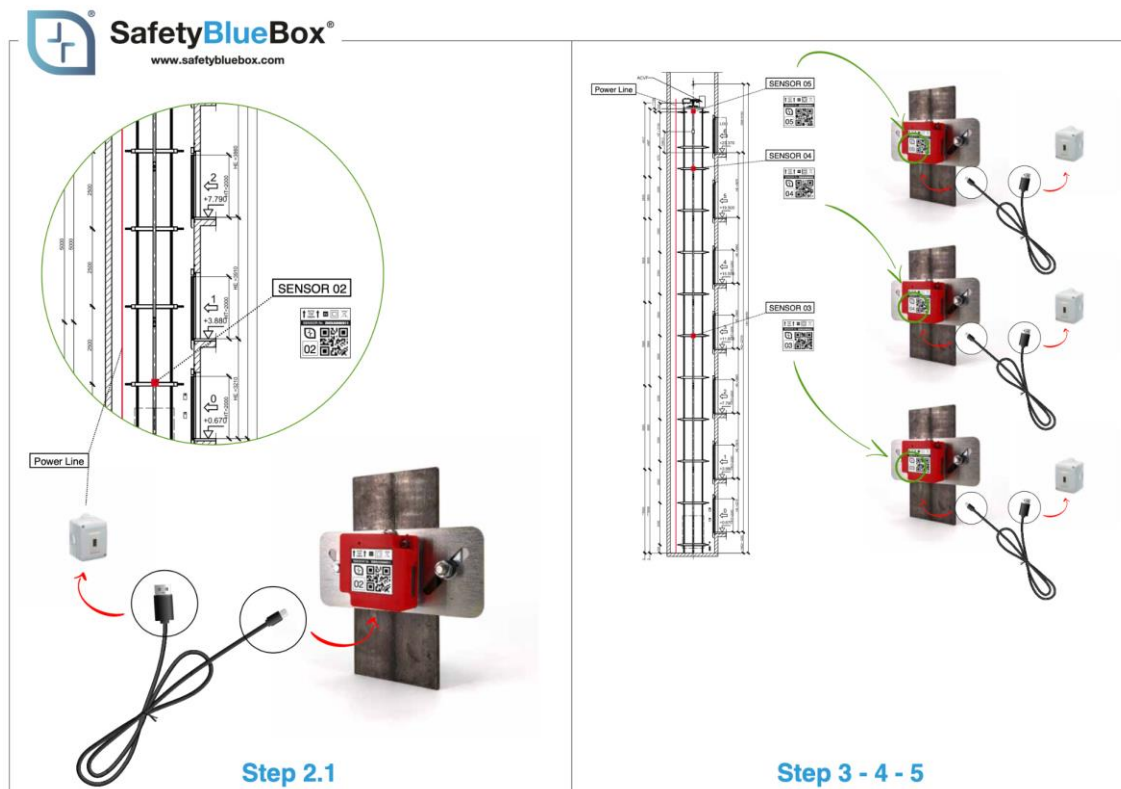
Strumenti per assemblaggio



Posizionamento sensore in fossa



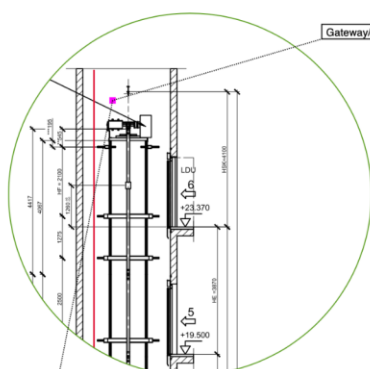
Posizionamento sensori sulle guide



Installazione gateway



SafetyBlueBox®
www.safetybluebox.com



IMPORTANT:
network connection with rj45
ethernet socket

INSTALL THE ANTENNAS

Step 6.0



Access-Point / Router 4G / LTE e WiFi
WAN IP: ETH network with internet access
to be determined

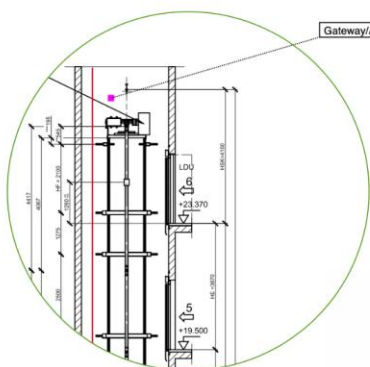


REVISION V.1.1 - 20100201

Alimentazione gateway e corretto posizionamento



SafetyBlueBox®
www.safetybluebox.com

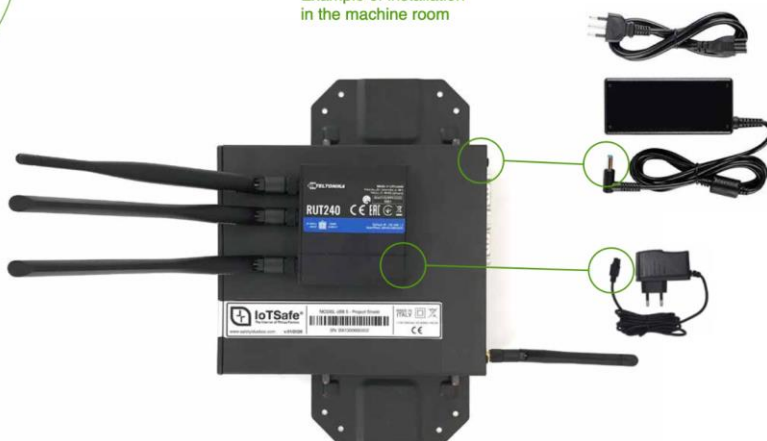


POWER SUPPLY INSTALLATION

Step 6.1



Example of installation
in the machine room

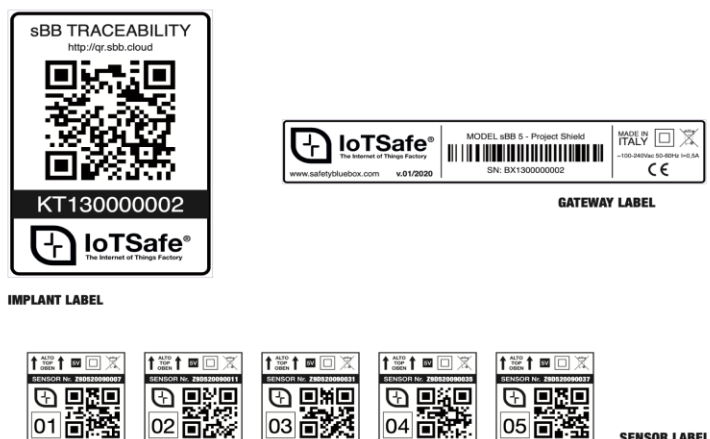


REVISION V.1.1 - 20100201

Etichetta riconoscimento dell'impianto:



Etichette singoli sensori e gateway



6.6 Caso studio n.6: Analisi di segnali accelerometrici su edifici in calcestruzzo armato.

In ambito di monitoraggio strutturale, l'analisi di segnali di risposta provenienti da misurazioni sperimentali, effettuate su costruzioni e infrastrutture, si pone l'obiettivo di identificare alcune caratteristiche strutturali tipiche, sia nel caso di proprietà meccaniche costitutive sia nel caso di proprietà strutturali globali, quali quelle dinamiche e modali (ovvero legate alle vibrazioni strutturali visibili macroscopicamente). Questo tipo di analisi manifesta scopi diagnostici per la stima di caratteristiche incognite e dell'eventuale loro variazione nel tempo, possibilmente associabile a stati di danneggiamento o degrado, che possano giungere a minare la solidità della costruzione.

Le misurazioni sperimentali, sorgente di informazione per le metodologie di analisi del segnale e di identificazione, possono essere di vario tipo (eventualmente combinabili con approcci di tipo "Heterogenous Data Fusion") e devono garantire una sufficiente sensibilità di acquisizione rispetto al comportamento strutturale in analisi. Nella presente sezione del rapporto si presentano principalmente casi di applicazioni basati su misurazioni di accelerazioni da sensori a basso costo.

6.6.1 Analisi di segnali accelerometrici su edificio in calcestruzzo armato

I casi di studio presentati in questa sezione si riferiscono principalmente a misurazioni accelerometriche di edifici per vibrazioni dovute a eventi ambientali o sismici. Nel testo sono mostrati solo alcuni risultati di esempio.

Le misurazioni registrate vengono qui analizzate, con finalità ultime di identificazione strutturale, con due metodi di rimozione del rumore ("denoising"): una metodologia basata su "Discrete Wavelet Transform" (DWT) e una tecnica basata su "Singular Value Decomposition" (SVD).

In particolare, rispetto a quelle che sono state sviluppate e proposte come tecniche analitiche, l'approccio della 'trasformata wavelet discreta' suddivide il segnale in componenti a bassa e ad alta frequenza introducendo una serie di 'wavelet' ortonormali e può essere interpretato come un processo di decomposizione. Una funzione che costituisce la base generata dalla "wavelet madre" grazie alle operazioni di scalatura e trasformazione determinate dai "parametri di scalatura e trasformazione". Tra le famiglie di wavelet utilizzate possiamo citare le wavelet Symlet, Coiflet, Daubechies, Biorthogonal, Reverse Biorthogonal e Discrete Meyer. Il segnale ricostruito dopo l'analisi DWT può essere visto come una famiglia di operazioni di filtraggio "wavelet" che

ricostruisce le principali componenti di frequenza riducendo o rimuovendo le componenti di rumore.

Al contrario, l'approccio “singular value decomposition”, si basa sulla scomposizione spettrale di matrici ottenute da dati numerici del segnale di risposta in analisi, presenta vantaggi specifici e importanti con robustezza e limitato numeri di parametri da settare.

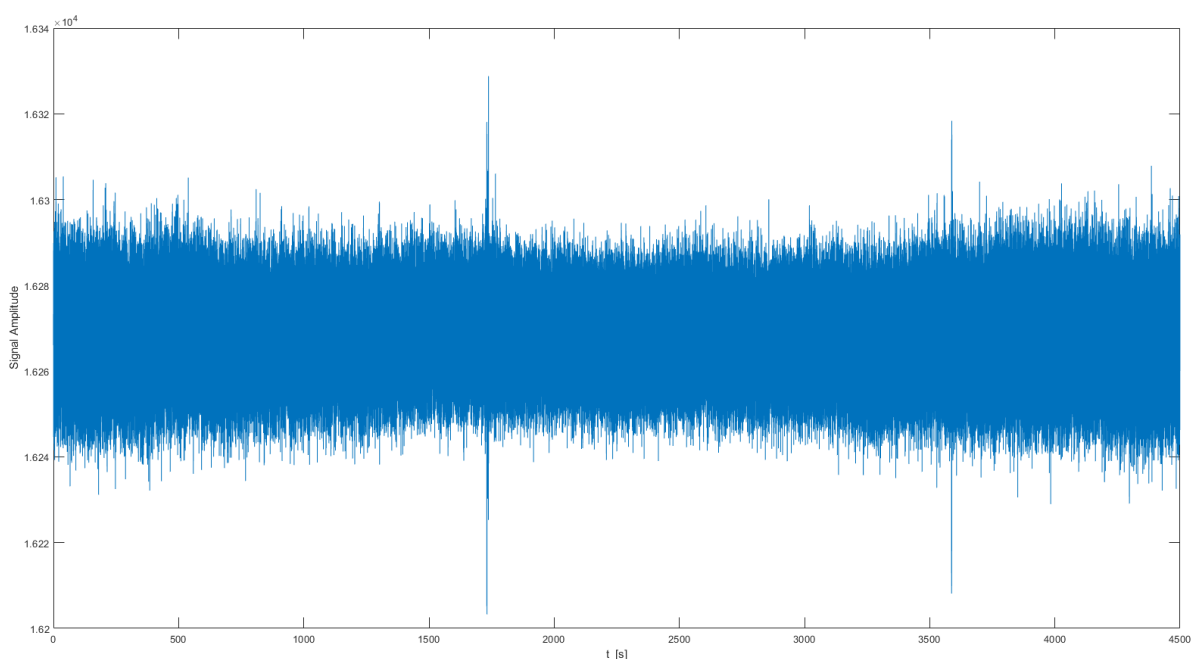
Tra gli obiettivi del lavoro svolto nella presente ricerca si evidenziano le seguenti azioni:

verificare l'impiego ottimale di differenti tecniche di rimozione del rumore (DWT e SVD), per trattare risposte di segnali per effetto sia di vibrazioni ambientali sia di vibrazioni di natura sismica;

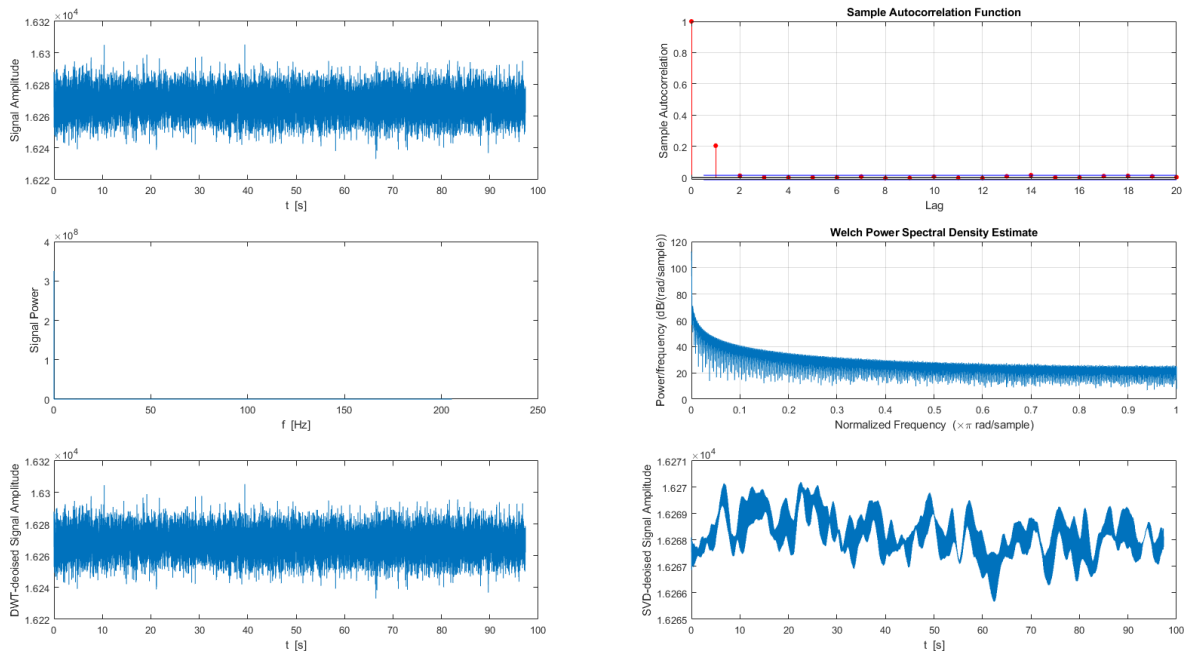
ottenere un confronto critico dei punti di forza e di debolezza di ciascun metodo di “denoising”, per investigarne l'efficacia, in particolare in contesti vibrazionali di edifici;

valutare l'efficacia delle tecniche di “denoising” a supporto dell'impiego di sensori a basso costo verso lo sviluppo di un approccio di monitoraggio strutturale integrato e automatico, con strumenti di agile applicazione.

I risultati vengono riportati nelle figure di seguito, in termini di rappresentazione del segnale (completo o in finestra di campionamento), funzione di autocorrelazione, trasformata di Fourier, spettro di Welch, segnale analizzato con denoising DWT e segnale analizzato con denoising SVD.



Rappresentazione di una registrazione completa di segnale accelerometrico.



Analisi di un segnale secondo tecniche di denoising DWT e SVD.

Dal confronto dei risultati, si osserva come la scelta della finestra di campionamento del segnale influenza l'efficacia della riduzione del rumore mediante vari algoritmi (principalmente per l'approccio SVD). È quindi consigliabile operare su una quantità di tempo limitata rispetto alla durata dell'intera registrazione. L'analisi tecnica dei segnali disponibili permette di individuare e discutere alcuni punti di osservazione, come elencati di seguito:

- innanzitutto, le registrazioni appaiono subito molto rumorose;
- le registrazioni dei segnali di risposta processate mediante tecnica “Discrete Wavelet Transform” per la rimozione del rumore appaiono di qualità migliorata rispetto a quella dei dati originari, grazie alla rimozione di alcune componenti di frequenze associabili a rumore, ma non di qualità significativamente superiore a fini di monitoraggio e identificazione strutturale;
- l'elaborazione dei segnali disponibili mediante la tecnica di rimozione del rumore “Singular Value Decomposition” presenta dei risultati più efficaci garantendo un filtraggio più evidente del segnale, senza tuttavia permettere una più chiara lettura delle frequenze strutturali da identificare secondo gli obiettivi preposti in un'analisi SHM;

Dalle analisi complessivamente svolte, alcuni commenti di validità generale possono essere così di seguito delineati:

- l'approccio DWT, costantemente meno efficace nella rimozione del rumore dai segnali disponibili, presenta però maggiore velocità di calcolo e risultati mediamente più affidabili, in senso globale, confermando l'utilità del metodo per un impiego speditivo e pratico;

- Nonostante l'applicabilità del metodo, l'iniziale buona qualità del segnale ai fini strutturali risulta necessario per un'affidabilità accettabile nell'identificazione dello stato di salute strutturale

Pertanto, pur confermando l'efficacia d'uso e la fattibilità del metodo sviluppato, molti dei segnali disponibili studiati hanno in definitiva un limitato potenziale di identificazione a fini strutturali.

Dall'analisi completa del segnale elaborato, prima utilizzando approcci convenzionali di analisi del segnale, poi utilizzando il supporto di tecniche di denoising, è possibile trarre alcune considerazioni riportate di seguito:

- Le tecniche di “denoising” applicate, pur confermando la validità generale delle metodologie, richiedono comunque una buona capacità dell'operatore nel valutare alcuni parametri rendendole ad oggi difficilmente automatizzabili.
- La differenza tra sensori convenzionali e quelli a basso costo può diventare molto pronunciata nel campo del monitoraggio strutturale, soprattutto in relazione alla registrazione dei segnali di vibrazione ambientale. Un metodo specifico per la rimozione del rumore, necessaria è, d'altra parte, di fondamentale importanza per una successiva identificazione affidabile nel campo del monitoraggio strutturale.
- L'utilizzo di sensori a basso costo supportati da tecniche di riduzione del rumore può essere proposto come prima forma di rilevamento del danno.

6.6.2 Analisi dati accelerometrici di un edificio investito da evento sismico

Vengono analizzati i dati registrati durante il terremoto avvenuto il 17 Dicembre 2020 ore 16:59:22 con epicentro a 4 km da Pero (MI) magnitudo ML 3.9.

Sono disponibili i dati di 8 sensori che coprono un intervallo di 75 minuti.

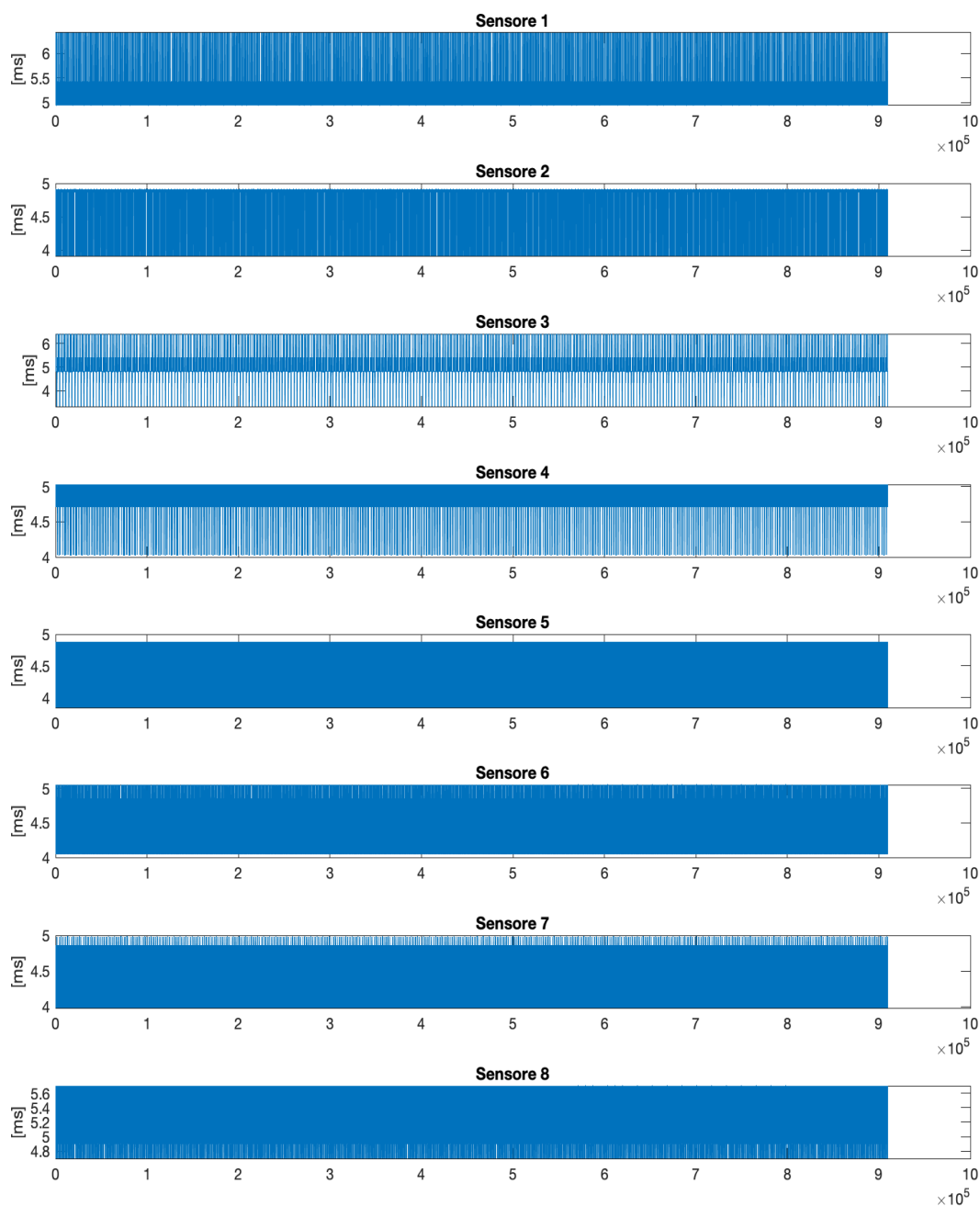
Dati accelerometrici

Vengono analizzati indipendentemente i dati provenienti dai sensori accelerometrici.

Innanzitutto, viene analizzata la variabilità del clock dei vari sensori.

- **Clock**

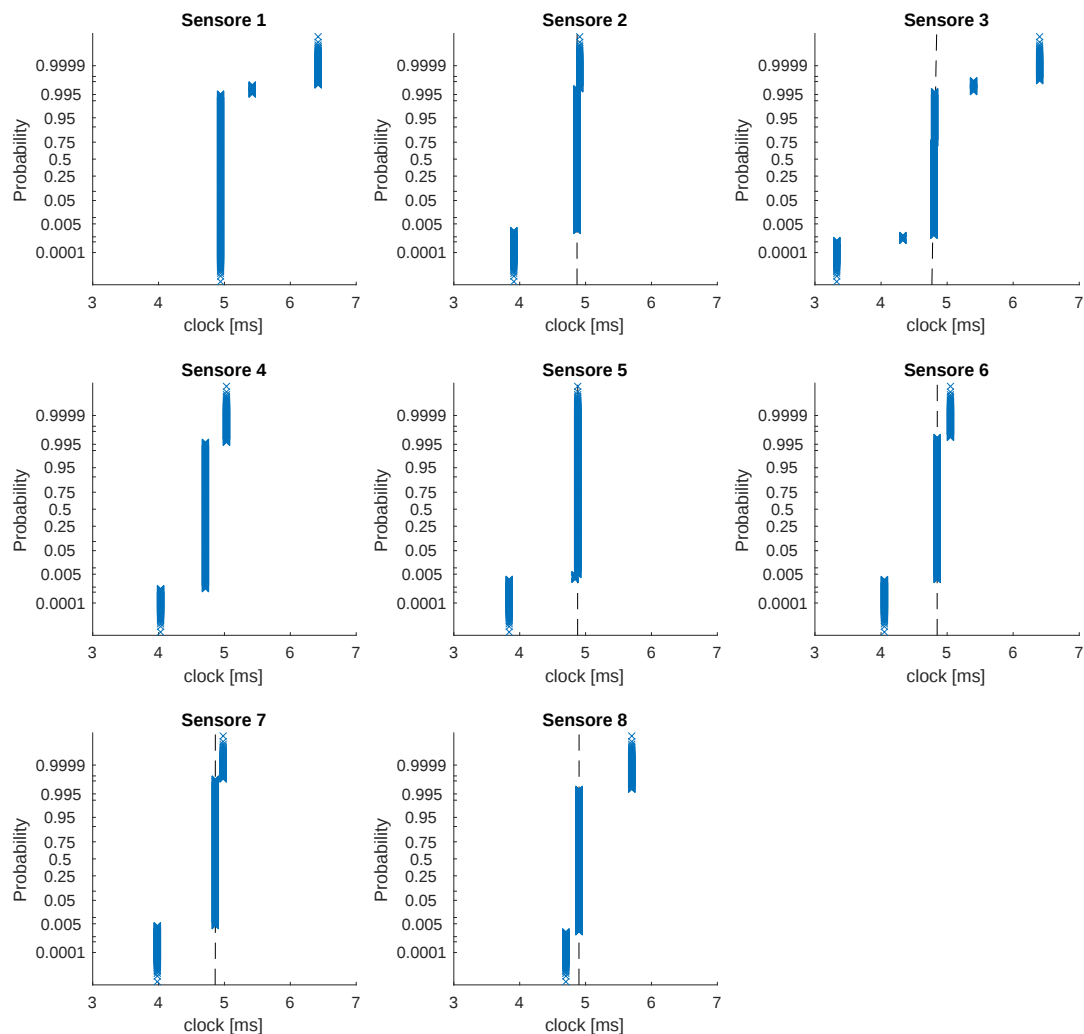
Vengono proposti dei grafici inerenti ad analisi di tipo statistico sulla variabilità del clock per i vari sensori.



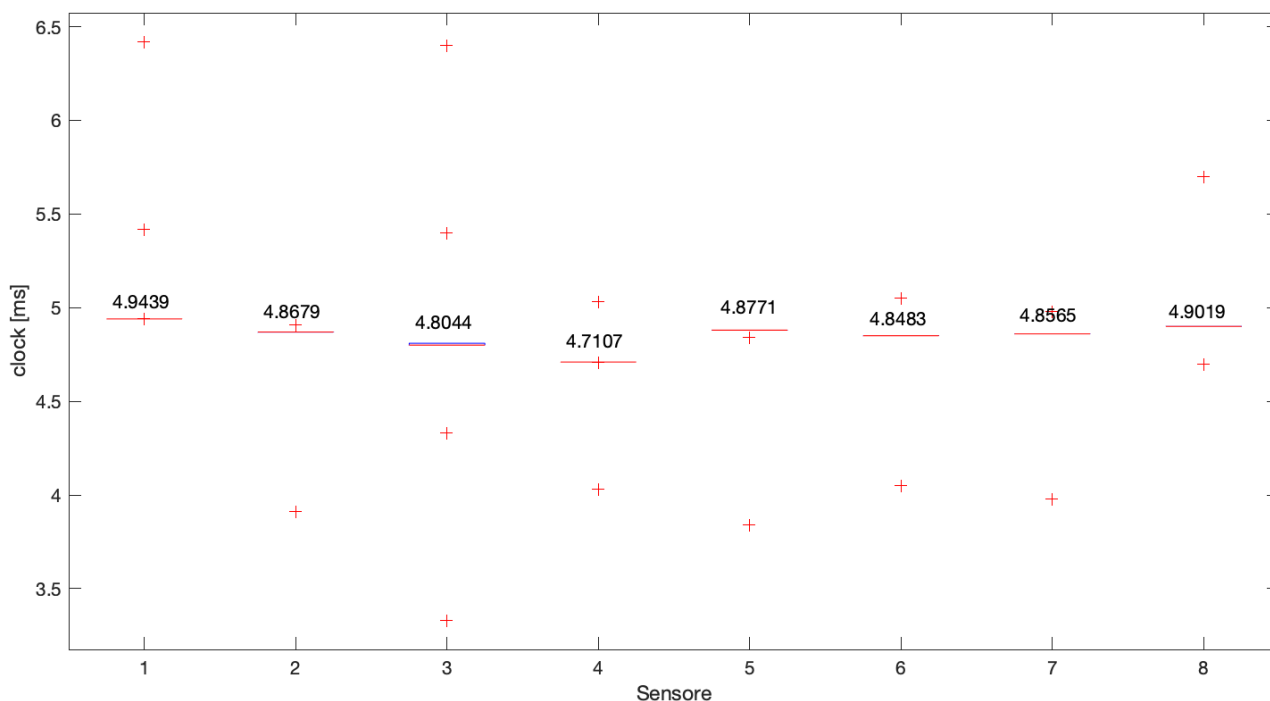
Andamento dei clock nel dominio del tempo per ogni sensore.

Si nota come il clock non rimane costante durante la registrazione.

È evidente inoltre come la distribuzione dei clock varia per ogni sensore. Inoltre, si può notare come non sia normale ma discreta e con una media che si mantiene per tutti leggermente inferiore ai 5 ms.



Normal plot dei clock per ogni sensore.



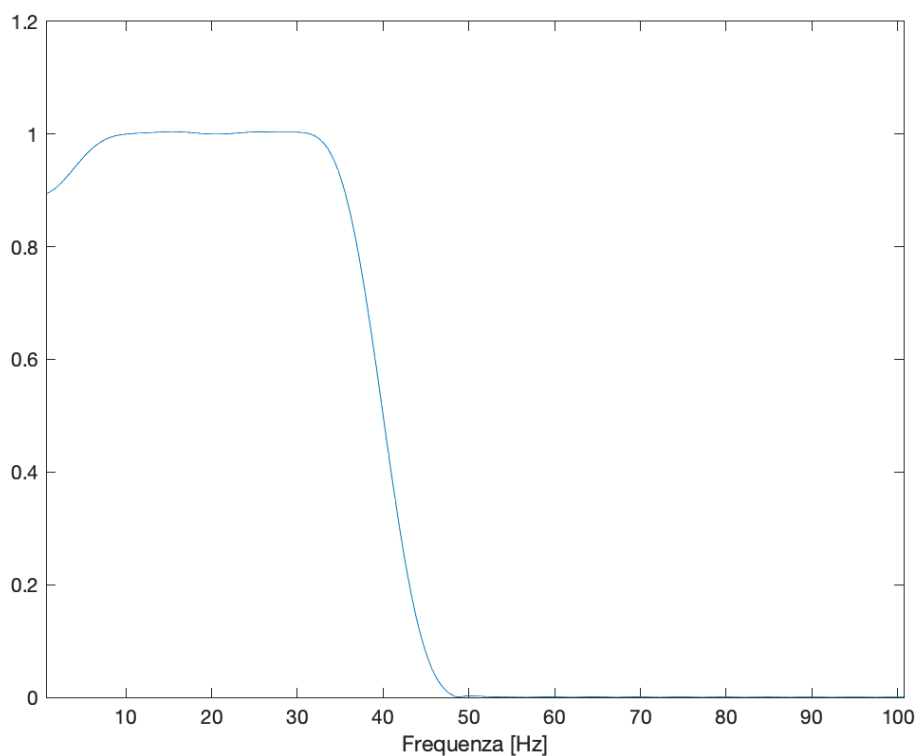
Box plot dei clock per ogni sensore (i valori riportati sono le medie).

Dal box plot precedente si nota come la distribuzione dei clock è estremamente stretta con una serie di valori anomali (croci rosse) al di fuori degli intervalli di confidenza. È estremamente importante riportare come le medie non siano uguali per ogni sensore; tale fenomeno porta, a lungo andare, ad uno sfasamento delle registrazioni con le note conseguenze per quanto riguarda l'affidabilità delle grandezze estratte dai segnali, soprattutto nel dominio delle frequenze. Per limitare il fenomeno, si potrebbe pensare ad un ripetuto restart degli orologi dei sensori.

Accelerazioni

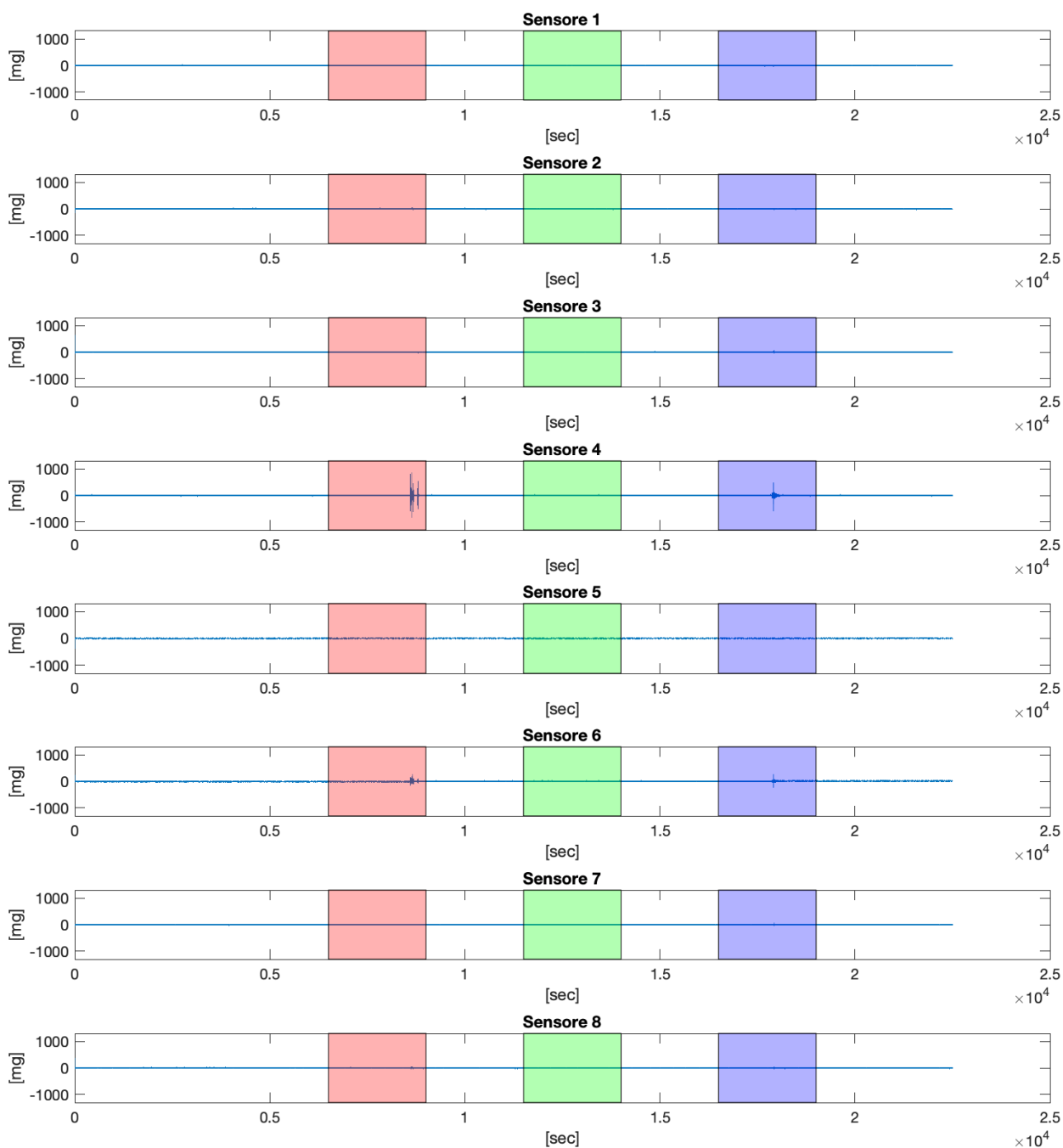
Vengono ora riportati i segnali accelerometrici già filtrati. È stato applicato un filtro FIR passa-banda (0.5-40 Hz) di ordine 40.

1	Fossa a terra
2	Guida piano terra
3	Guida in alto
4	Cabina vicino al motore
5	Guida in fossa
6	Arcata cabina
7	Muro piano terra
8	Guida piano terra

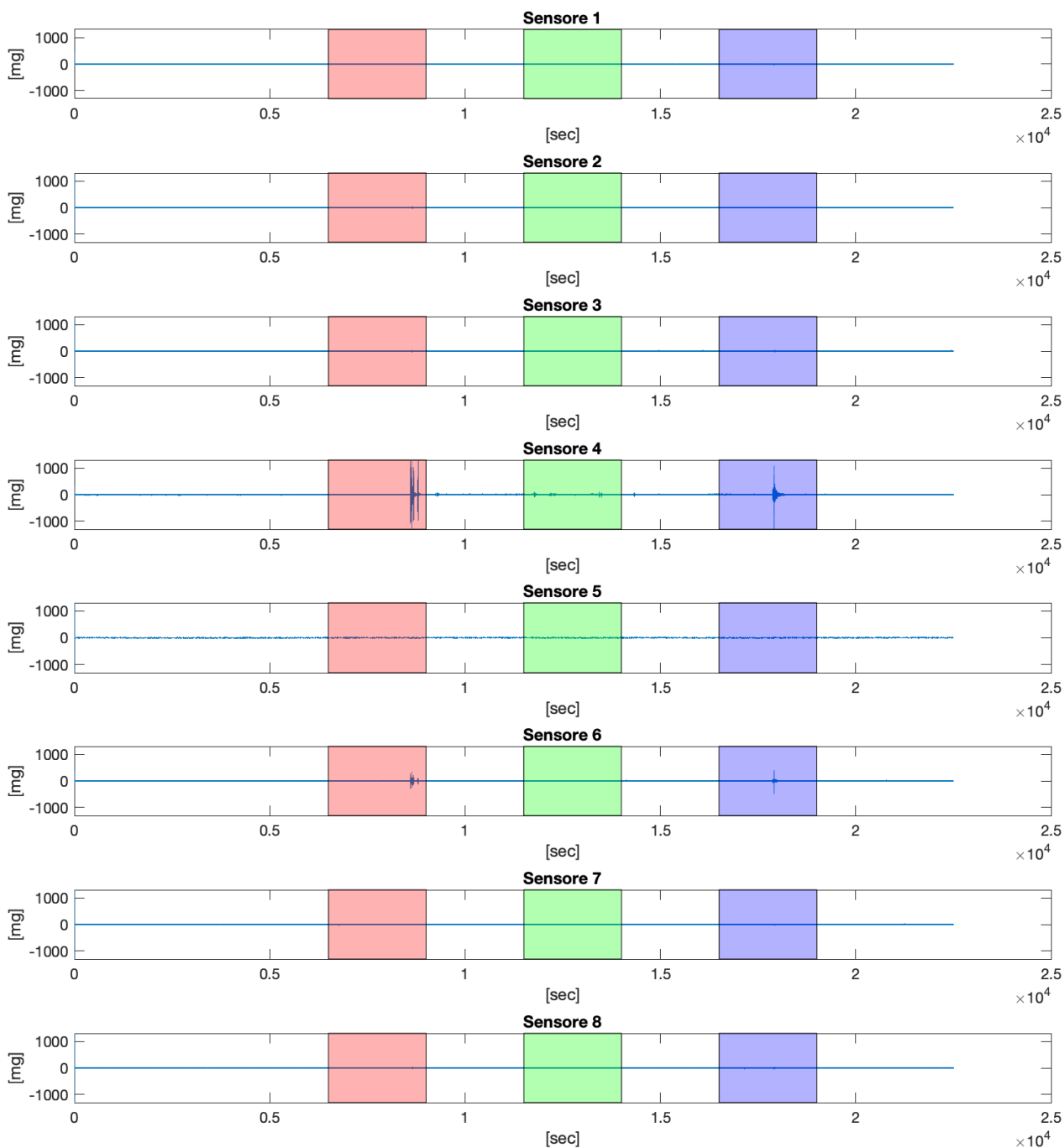


Filtro utilizzato

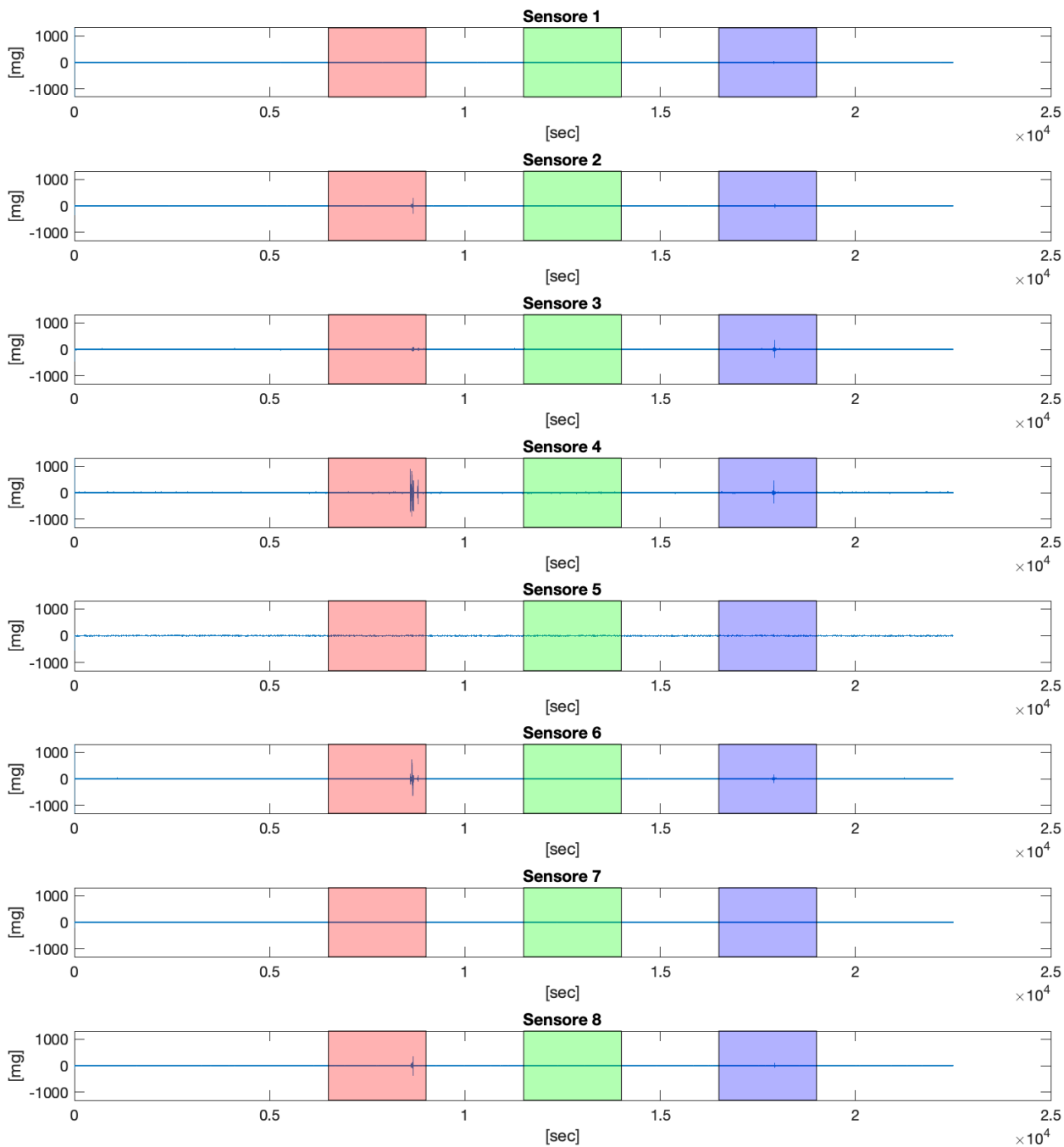
Nelle figure successive vengono riportati i segnali nel dominio del tempo. Con la patch rossa viene identificato il segnale estratto per analizzare il segnale sismico, con quella verde un segnale ambientale e con quella blu le condizioni di esercizio della cabina ascensore.



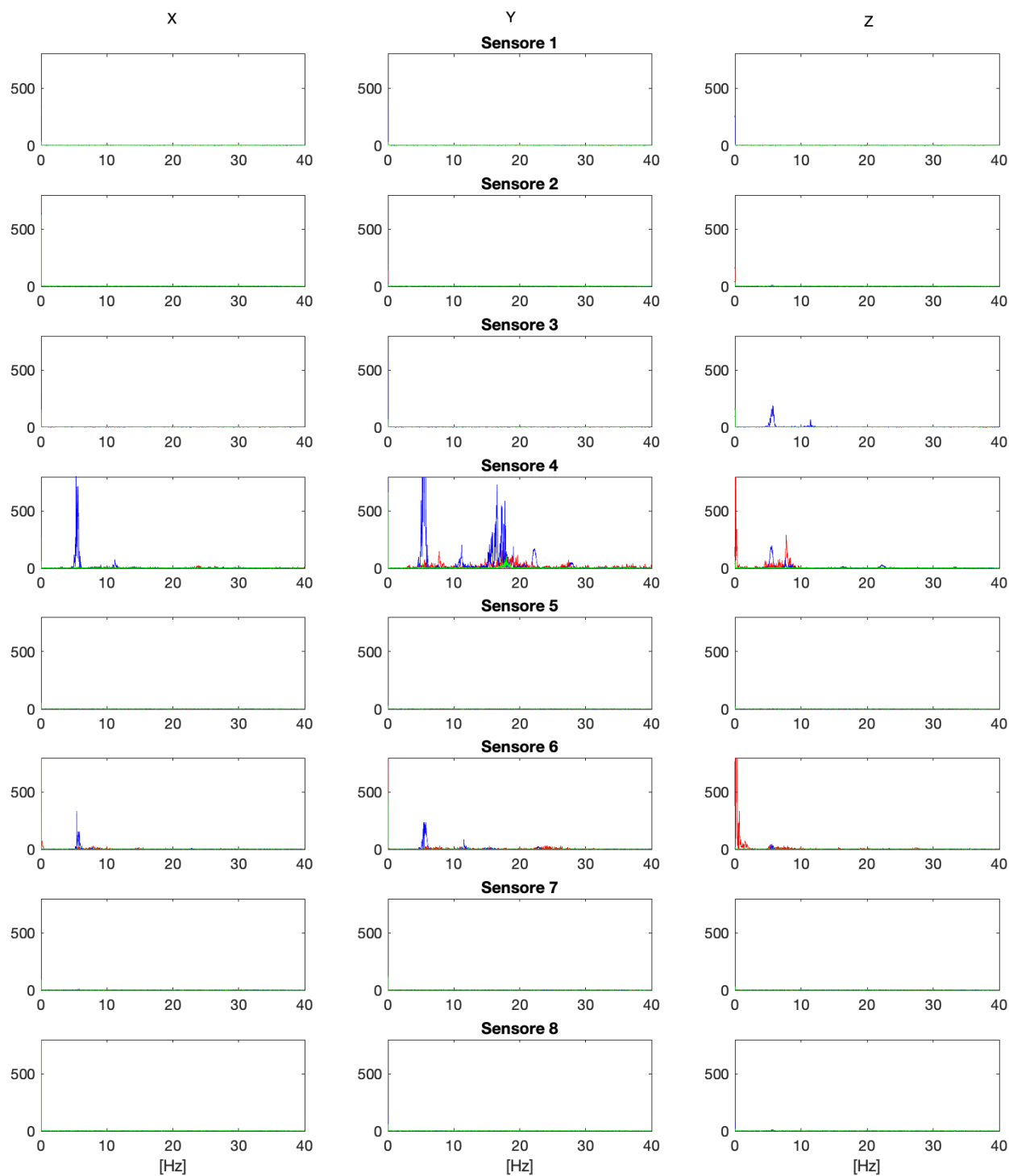
Accelerazioni dei vari sensori in direzione X.



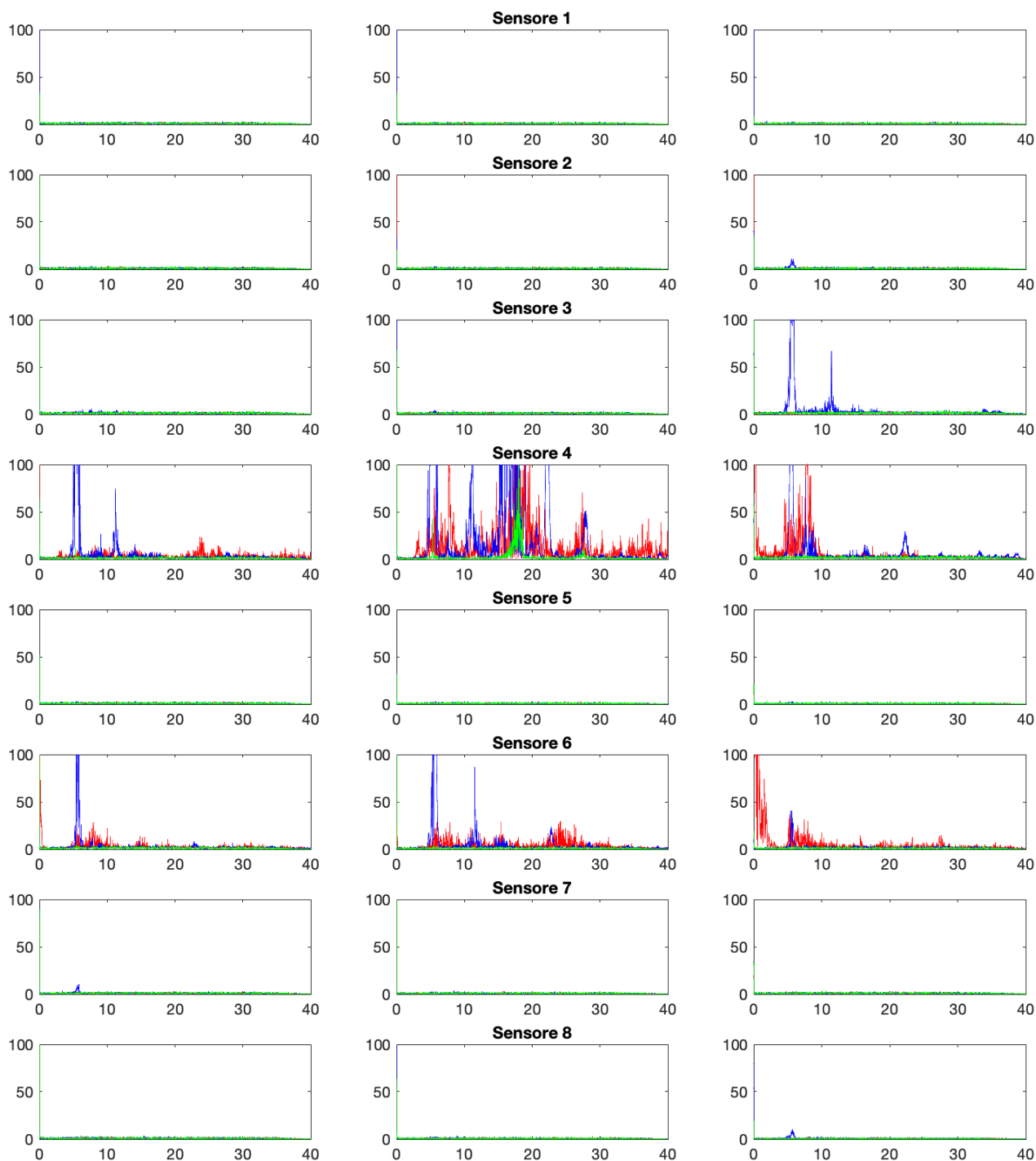
Accelerazioni dei vari sensori in direzione Y.



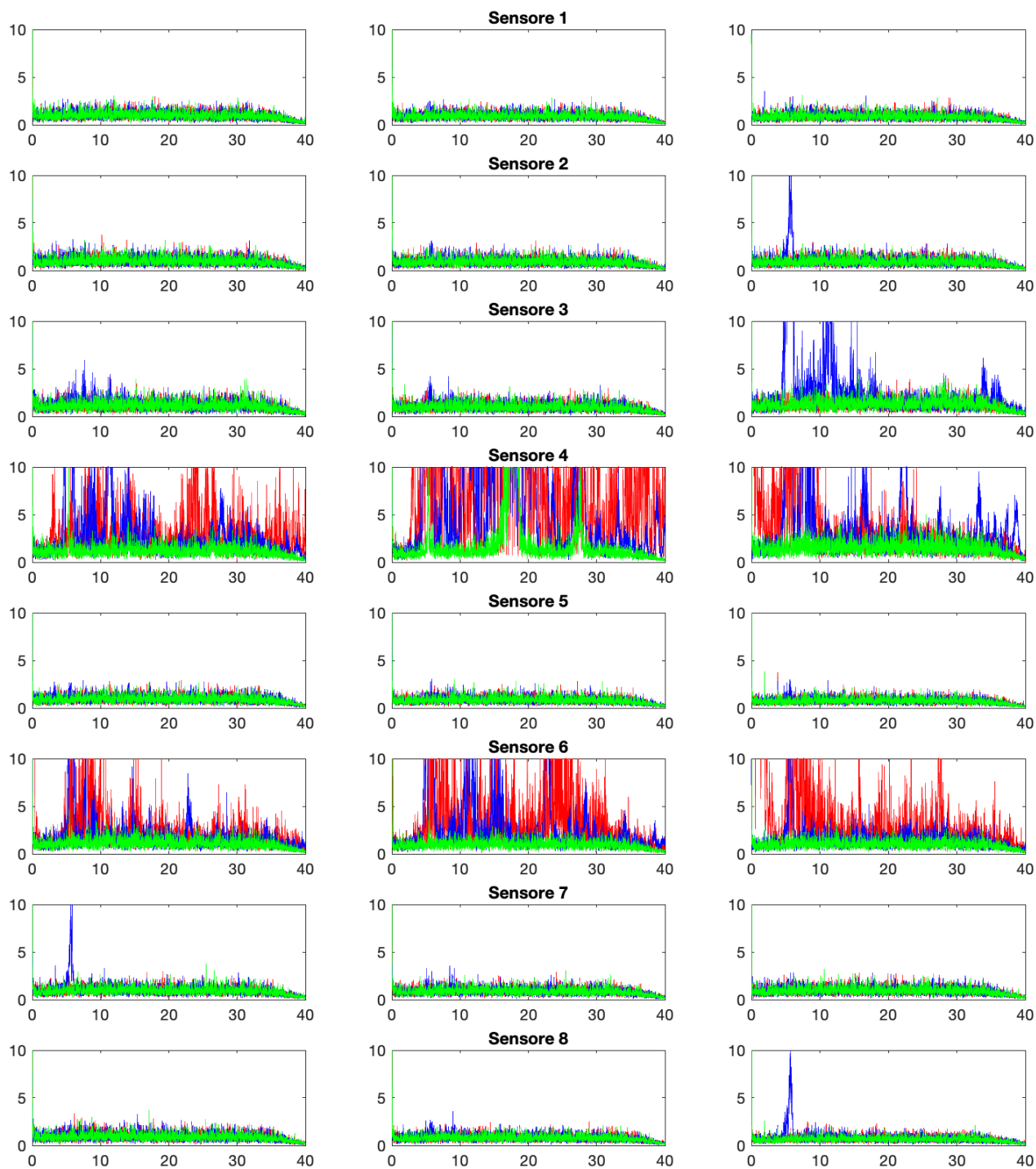
Accelerazioni dei vari sensori in direzione Z.



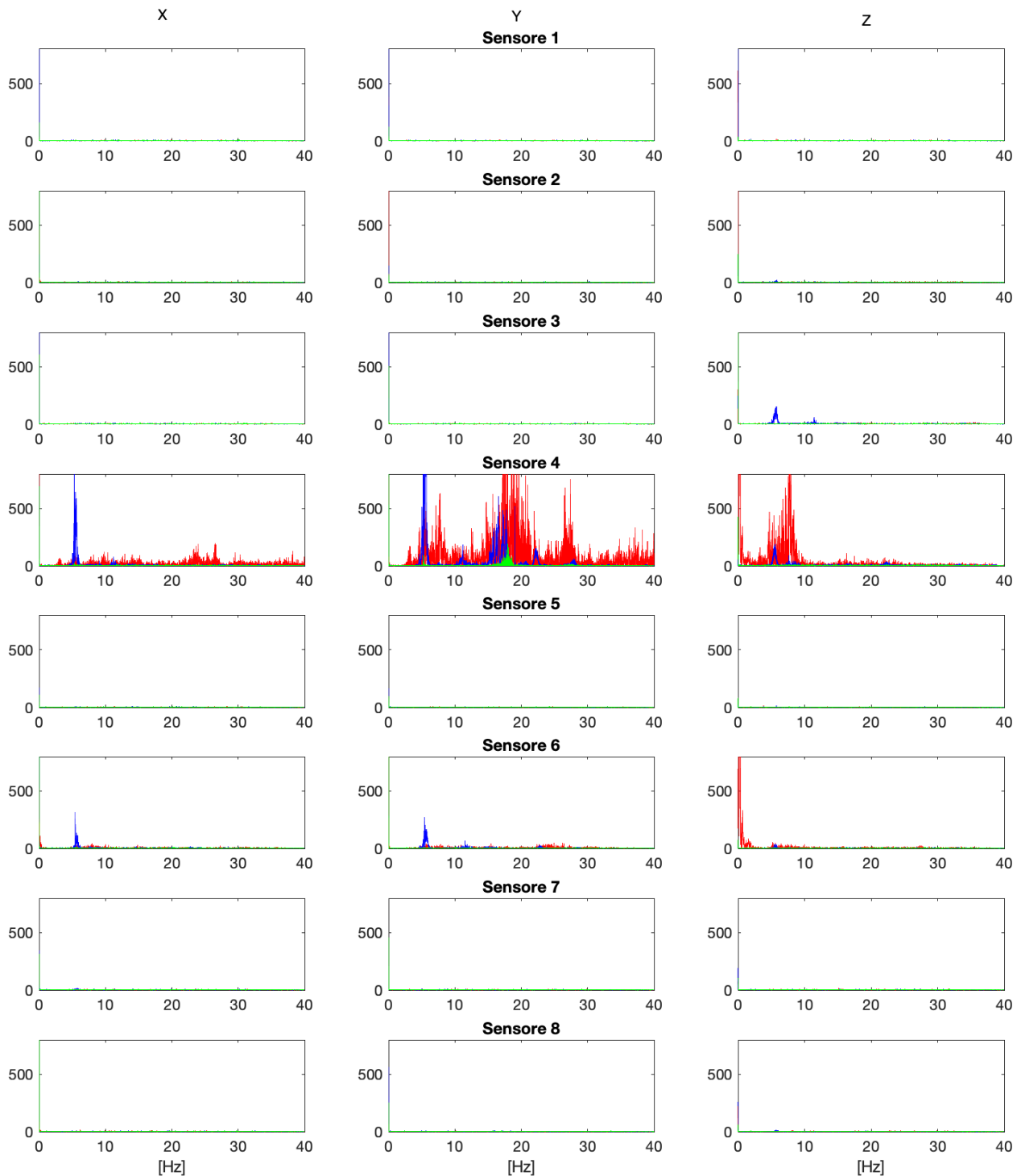
PSD Welch per ogni sensore in tutte le direzioni (in rosso il segnale sismico, in blu il segnale prodotto dal movimento cabina e in verde le condizioni ambientali).



PSD Welch per ogni sensore in tutte le direzioni (in rosso il segnale sismico, in blu il segnale prodotto dal movimento cabina e in verde le condizioni ambientali).



PSD Welch per ogni sensore in tutte le direzioni (in rosso il segnale sismico, in blu il segnale prodotto dal movimento cabina e in verde le condizioni ambientali).



PSD Periodogramma per ogni sensore in tutte le direzioni (in rosso il segnale sismico, in blu il segnale prodotto dal movimento cabina e in verde le condizioni ambientali).

6.6.3 Impatto atteso

Il lavoro svolto ha previsto l'analisi su segnali reali registrati per il caso studio, in particolare ci si è concentrati sullo sviluppo e testing di tecniche avanzate di denoising con le quale poter “pulire” segnali derivanti da sensori MEMS a basso costo. La buona riuscita dell'operazione di denoising permetterebbe l'utilizzo massivo di questi dati per l'analisi dello stato di salute strutturale nonché una mass adoption capillare considerando il costo limitato e quindi alla portata, non solamente di istituzioni o concessionari, ma anche e soprattutto del singolo cittadino.

6.6.4 Conclusioni

Nel presente report si riportano i risultati dell'applicazione di algoritmi innovativi per il denoising su dati provenienti da edifici reali. In particolare, sono state testate due tecniche: una che prevede l'utilizzo della DWT e una SVD. La tecnica SVD sembra ottenere la miglior qualità del dato a seguito del processamento del dato accelerometrico grezzo rispetto alla DWT. Ciononostante, entrambe presentano ancora difficoltà nel riuscire a rimuovere il rumore di fondo.

7 CONCLUSIONI

Il presente deliverable raccoglie una sintesi dei risultati dimostrativi svolti nell'ambito del progetto dai diversi partner, con lo scopo di validare le attività di ricerca dei precedenti OR. I dimostratori hanno concretizzato un percorso di ricerca e sviluppo che, partendo dalla progettazione dei sistemi di acquisizione e gestione cognitiva dei dati, è passato attraverso lo sviluppo di modelli strutturali intelligenti che, in tempo reale, consentono di quantificare il livello di sicurezza rispetto ad eventi critici e di supportare le decisioni dei gestori per la mitigazione dei rischi. L'utilità è stata quindi ulteriormente incrementata dalla grande quantità di dati connessa alla gestione delle importanti strutture e infrastrutture selezionate come dimostratori, rendendo così efficace e robusta la validazione delle metodologie e delle tecnologie sviluppate nel progetto prima della loro immissione sul mercato nazionale e internazionale.

Elenco Allegati

Al fine di consentire una lettura ordinata delle attività dimostrative, per tutti i dettagli si rimanda ai seguenti allegati:

Allegati viadotto Canalone

- All.1 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TS-Dimostratore viario-Modellazione Numerica Canalone
- All.2 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TIN-Dimostratore viario-Strumentazione Viadotto Canalone
- All.3 – INSIST_OR6-Att6.1-STR_CNR- Dimostratore viario- Applicazione della procedura di qualificazione al dimostratore.

Allegati Caso Studio 2:

- All.4 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TS-Caso Studio2-Modellazione Numerica Travi CAP
- All.5 -INSIST_OR6-Att6.1-STR_TIN-CasoStudio2-Strumentazione armature travi CAP