



---

## *Special Issue*

---

### *Progetto SIS.MO.CO*

*“Un sistema di monitoraggio autodiagnosticante per il controllo di ponti, opere in c.a. ed in acciaio”  
Year 2022*

A cura della SISMLab S.r.l.

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.  
Spin-Off University of Calabria  
Rende (CS), Italy  
N.15 – III – 2023  
ISBN: 979-12-80280-14-5

## EDIZIONI SISMLAB

Scientific Publications by Sismlab s.r.l.  
Spin-Off University of Calabria  
Rende (CS), Italy

N.15 - March 2023  
ISBN: 979-12-80280-14-5  
( *Year III* )

Available online at [www.sismlab.com](http://www.sismlab.com)  
[info@sismlab.it](mailto:info@sismlab.it) - [sismlab@pec.it](mailto:sismlab@pec.it)

*Via Ponte Pietro Bucci - Università della Calabria - Rende (CS) P.Iva: 02730000789  
- Tel./Fax.:+390984-447093*

*Special Issue*

*Progetto SIS.MO.CO*

*“Un sistema di monitoraggio autodiagnosticante per il controllo di ponti,  
opere in c.a. ed in acciaio”*

*Year 2022*

## **PREFAZIONE**

Le edizioni SISMLab Spin Off dell'Università della Calabria, con focus riguardanti l'analisi e la discussione di problemi nel campo dell'Ingegneria, propongono sia la classica forma isolata della pubblicazione scientifica sia la forma Special Issue del volume, inteso come raccolta di più articoli scientifici, che la Sismlab sviluppa autonomamente o con altri partner. La distribuzione e divulgazione in forma di volume si riferisce a contenuti di settore recuperati a valle di progetti di ricerca, convegni, seminari ed eventi su temi specifici.

Il presente volume è inteso come atto di disseminazione riferito al Progetto di Ricerca e Sviluppo denominato "*Progetto R&S Sis.Mo.Co. - Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell'ingegneria civile*". Nel volume sono raccolte e illustrate tutte le attività svolte all'interno del progetto, partendo da quelle di ricerca bibliografica fino a quelle di carattere sperimentale, il tutto finalizzato all'individuazione di un sistema di monitoraggio strutturale autodiagnosticante intelligente con uso di sensori wireless per la sorveglianza in continuo e per la verifica in ambito manutentivo e a valle di eventi singolari di ponti ed in generale di opere civili.

Il progetto nasce grazie ad un'attività di privati e ha visto la collaborazione dei partners TOD System S.r.l, ICARO S.r.l, AGESP S.r.l.s, NOITECH S.r.l, SISMLAB S.r.l Spin-Off dell'Università della Calabria. Alcuni partner oltre a costituire parte attiva sono stati anche finanziatori del progetto, mentre altri si sono occupati della parte tecnologica, scientifica e fornitura di servizi.

Le attività della SISMLAB seguiranno con altri volumi speciali dedicati a futuri progetti di ricerca o ad attività singolari, in particolare il volume corrente è relativo a quanto svolto nell'anno 2022.

**Responsabile Scientifico**

**Prof. Ing. Giacinto Porco**

**Sismlab S.r.l. Spin-off dell'Università della Calabria**

## PRESENTAZIONE PROGETTO

Il Progetto di Ricerca Sis.Mo.Co. nasce dalle esigenze degli operatori del settore in relazione alla possibilità di mitigare le criticità attuali in tema di controllo e monitoraggio su opere di ingegneria civile, con particolare riguardo ai ponti. Più specificatamente il campo d'applicazione è quello relativo al monitoraggio strutturale per garantire il controllo di membrature resistenti step by step sia in ambito manutentivo e sia a valle di eventi singolari, quali il sisma o condizioni di carico non previste e non prevedibili. È altresì previsto l'impiego del monitoraggio strutturale, per verificare l'efficacia degli interventi di consolidamento eseguite su strutture non rispondenti alle richieste normative.

Attualmente le metodologie di analisi e controllo dinamico, presenti in letteratura e in commercio, e la strumentazione di monitoraggio disponibile, presentano forti limitazioni e carenze. Prima tra tutte è la richiesta di una conoscenza multidisciplinare nel processo di controllo che limita fortemente l'impiego pratico di questi sistemi confinandolo solo a casi specifici. Le procedure attuali infatti non prevedono una guida di supporto alla gestione delle varie fasi, quali analisi preliminare, sperimentazione, elaborazione dati e diagnosi, demandando l'assunzione di decisioni a carico esclusivo di una o più figure tecniche professionali altamente specializzate e con esperienza. Il tecnico specializzato, o generalmente il pool di tecnici che fanno uso di tali sistemi di controllo devono essere figure professionali esperte e altamente specializzate in più campi quali: analisi delle strutture, analisi dei materiali, analisi delle procedure per la verifica di vita utile di una struttura, analisi delle applicazioni sperimentali, fino a conoscere problematiche di tipo informatico e di trasmissione dei dati. La bassa diffusione di tali sistemi è dovuta quindi al fatto che questi offrono la sola possibilità di acquisire i dati della struttura osservata, mentre per quanto riguarda l'ottenimento di una opportuna diagnosi sullo stato di sicurezza è necessario che tali dati acquisiti, siano analizzati da soggetti altamente specializzati e con grande esperienza in settori multidisciplinari. L'alta specializzazione è richiesta non solo per l'emissione di una diagnosi, ma anche per la verifica dell'affidabilità dei dati acquisiti, che molto spesso per carenze nel settaggio delle frequenze di campionamento o per scarso allineamento temporale dei sensori in acquisizione forniscono dati che inficiano il successivo trattamento numerico.

Altre importanti carenze sono legate proprio ai dispositivi per il monitoraggio, ossia i sensori accelerometrici collocati nei diversi punti di osservazione dell'opera. Nei sistemi attuali è previsto l'impiego di sensori periferici sincronizzati collegati tramite cavi ad una o più centraline di acquisizione dati. La presenza di cavi fisici di collegamento comporta reali problemi di logistica in fase di installazione, con perturbazione il più delle volte a quello che è l'esercizio dell'opera.

È utile sottolineare che i sensori tradizionali non presentano la flessibilità di settaggio in termini di frequenza di campionamento, precludendo così la possibilità di effettuare uno studio del comportamento dinamico della struttura a livello locale. Le unità di monitoraggio dislocate sulle diverse parti della struttura dovrebbero eseguire acquisizioni con frequenze di campionamento modulate in relazione alla zona oggetto di osservazione. Questo perché, ai fini di una corretta e dettagliata autodiagnosi, è necessario acquisire su ciascuna zona di interesse con a una frequenza dedicata (o range di frequenze).

Altro aspetto da considerare è che all'aumentare del numero di sensori e delle misure convergenti verso il sistema di acquisizione, questo può risultare sovraccaricato, in termini di elaborazione dei dati, comportando così importanti oneri da un punto di vista computazionale.

È per mitigare le criticità esposte che i proponenti hanno pensato di avviare un progetto di ricerca finalizzato ad individuare un prototipo di sistema autodiagnosticante intelligente con utilizzo di sensori wireless per il controllo dinamico in continuo e a valle di eventi singolari rivolto ad opere di ingegneria civile, ed in particolare ai ponti.

**Finanziatore del progetto ICARO S.r.l.**

**Roberto Calbi**

## INDICE

- [1] – G. Porco, L. Bonanno; *“Il controllo dinamico delle opere in c.a. in campo civile: lo stato dell’arte”*.
- [2] - G. Porco, L. Bonanno, F. Forestieri, R. Calbi; *“Proposta di sistema autodiagnosticante intelligente”*.
- [3] - Domenico Colacino, Vincenzo Gualtieri, Antonio Oliverio, Roberto Calbi e Salvatore Tucci; *“Definizione di una rete di sensori wireless sincronizzati per il monitoraggio strutturale di opere dell’ingegneria civile”*.
- [4] - Domenico Colacino, Vincenzo Gualtieri, Antonio Oliverio, Roberto Calbi e Salvatore Tucci; *“Test sperimentale e validazione dei risultati di una rete di dispositivi wireless sincronizzati da impiegare per il monitoraggio strutturale di opere dell’ingegneria civile”*.
- [5] - G Porco, F. Forestieri, D. De Vita, F. De Bartolo, A. Iorfida, L. Bonanno; *“Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile: campagne sperimentali”*.

# IL CONTROLLO DINAMICO DELLE OPERE IN C.A. IN CAMPO CIVILE: LO STATO DELL'ARTE

G. Porco \* - L. Bonanno \*\*

\*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria

[giacinto.porco@unical.it](mailto:giacinto.porco@unical.it)

\*\*Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria.

[info@sismlab.it](mailto:info@sismlab.it)

[l.bonanno@sismlab.it](mailto:l.bonanno@sismlab.it)

## SOMMARIO

Il presente articolo si inquadra nel contesto del Progetto di Ricerca *Sis.Mo.Co.* ed in particolare restituisce le attività di carattere bibliografico sviluppate all'interno dello stesso. Il documento è finalizzato a illustrare lo stato dell'arte sulle attività di monitoraggio dinamico di opere di ingegneria civile, con particolare riguardo ai ponti.

La ricerca bibliografica ha restituito innanzitutto un panorama di quelle che sono le attuali procedure di monitoraggio e controllo strutturale, evidenziando anche un altro ambito che è quello del trattamento del dato sperimentale per l'identificazione automatica dei parametri modali rappresentativi del comportamento dinamico di una struttura.

L'analisi dello stato dell'arte ha incluso anche lo studio di alcuni casi applicativi presenti in letteratura, i quali hanno permesso di restituire importanti informazioni su quelli che sono i potenziali punti di sviluppo dei sistemi attualmente disponibili, nell'ottica di giungere ad un controllo completamente automatizzato.

## 1. INTRODUZIONE

L'elevata sismicità del territorio nazionale rende sempre più necessaria l'adozione di misure efficaci in grado di mitigare gli effetti dei terremoti sul vasto patrimonio edilizio. I recenti crolli e i malfunzionamenti di opere infrastrutturali, quali ponti e viadotti, hanno minacciato le condizioni di servizio delle reti stradali e sottolineato la necessità di mettere a punto procedure di monitoraggio solide per garantire il controllo delle membrature resistenti sia ai fini manutentivi sia in seguito ad eventi sismici o a situazioni di sovraccarico non prevedibili.

I tradizionali metodi di controllo strutturale, che sono stati eseguiti in passato, prevedevano sostanzialmente la verifica dei parametri meccanici della struttura, l'analisi delle sollecitazioni in base ai regimi di carico e l'identificazione dei regimi di sicurezza in funzione della resistenza offerta dai materiali, principalmente acciaio e calcestruzzo. Tuttavia, questo tipo di controllo non ha tenuto conto in alcun modo del comportamento dinamico della struttura, dimostrandosi essere poco affidabile.

A livello nazionale l'input è stato dato per la prima volta con la Normativa Tecnica sulle Costruzioni NTC08 e poi confermato dalla NTC18, secondo cui, per individuare un'adeguata protezione nei riguardi del rischio sismico risulta necessario effettuare controlli in opera ed eseguire analisi strutturali accurate per la valutazione dei parametri rappresentativi del comportamento dinamico dell'opera.

Nel frattempo, il notevole sforzo di ricerca da parte della comunità scientifica in questa direzione, il progresso dei metodi di analisi modale sperimentale per l'identificazione dei parametri dinamici di una struttura e l'ottimizzazione delle prestazioni hardware per ciascuna specifica applicazione, hanno svolto un ruolo fondamentale per lo sviluppo e la diffusione dei sistemi di monitoraggio strutturale in aree a elevato rischio sismico. Numerose applicazioni infatti sono state effettuate in varie parti del mondo e documentate in letteratura. Queste attività sperimentali hanno previsto sostanzialmente acquisizioni dinamiche di campo in continuo (time history) con successivo trattamento numerico del dato sperimentale per la determinazione dei parametri modali caratteristici del comportamento dinamico della struttura. L'intento è stato quello di valutare le prestazioni in condizioni operative di una costruzione, mediante il controllo delle variazioni della risposta strutturale in servizio direttamente o indirettamente legate alle caratteristiche modali (frequenze naturali, forme modali...) e, soprattutto, a seguito di danni causati da eventi eccezionali.

Tuttavia, uno dei principali limiti emerso dalle applicazioni è stato quello di far necessariamente intervenire tecnici esperti durante tutto il processo. La richiesta di una conoscenza multidisciplinare è un aspetto penalizzante, non in linea con gli standard richiesti ad un sistema di monitoraggio completamente automatizzato, che ha limitato fortemente l'impiego pratico di tali sistemi. Attualmente infatti nel monitoraggio dinamico sperimentale non è prevista una guida di supporto alla gestione delle varie fasi del processo, quali analisi preliminare, sperimentazione, elaborazione dati e diagnosi, demandando l'assunzione di decisioni a carico esclusivo di una o più figure tecniche professionali altamente specializzate e con esperienza. Il tecnico specializzato, o generalmente il pool di tecnici che fanno uso degli attuali sistemi di controllo dinamici devono essere figure professionali esperte in più campi quali: analisi delle strutture, analisi dei materiali, analisi delle procedure per la verifica di vita utile di una struttura, analisi delle applicazioni sperimentali, fino a conoscere problematiche di tipo informatico e di trasmissione dei dati. La bassa diffusione di tali sistemi è dovuta quindi al fatto che questi offrono la sola possibilità di acquisire i dati della struttura osservata, mentre per quanto riguarda l'ottenimento di una opportuna diagnosi sullo stato di sicurezza è necessario che i dati acquisiti, siano analizzati da soggetti con grande esperienza in settori multidisciplinari. L'alta specializzazione richiesta riguarda non solo per l'emissione di una diagnosi, ma anche la verifica dell'affidabilità dei dati acquisiti, che molto spesso per carenze nel settaggio delle frequenze di campionamento o per scarso allineamento temporale dei sensori in acquisizione forniscono dati che inficiano il successivo trattamento numerico.

Altro aspetto limitativo è legato proprio ai dispositivi per il monitoraggio, ovvero ai sensori accelerometrici periferici collocati nei diversi punti di osservazione dell'opera e collegati tramite cavi ad una o più centraline di acquisizione dati. È emerso inoltre che la quasi totalità dei sistemi disponibili prevede l'impiego di sensori periferici sincronizzati collegati tramite cavi ad una o più centraline di acquisizione dati. L'utilizzo di cavi fisici di collegamento comporta problemi di logistica in fase di installazione e costi di manutenzione.

Ulteriore carenza funzionale dei sistemi in commercio è dovuta al fatto che i sensori accelerometrici non presentano flessibilità di settaggio in termini di frequenza di campionamento, precludendo così la possibilità di effettuare uno studio locale del comportamento dinamico di parti di struttura. Per monitorare le oscillazioni delle vibrazioni di elementi strutturali differenti, occorre che ciascuna delle unità di monitoraggio, dislocate nelle diverse parti della struttura, acquisisca i segnali accelerometrici con una specifica frequenza di campionamento (o range di frequenze) modulata in relazione alla zona oggetto di osservazione su cui il dispositivo è posizionato. Questo

perché nel monitorare, ad esempio, le oscillazioni dell'impalcato di un ponte che vibra sarà necessario considerare frequenze di acquisizioni più basse rispetto ad un elemento singolo della struttura, che vibra più velocemente e richiede valori più alti di frequenza di campionamento.

Si ricorda inoltre che all'aumentare del numero dei sensori e delle misure convergenti verso il sistema di acquisizione, questo può risultare sovraccaricato, in termini di elaborazione dei dati, comportando così importanti oneri da un punto di vista computazionale.

Per superare tali limitazioni i partners I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab s.r.l., TOD System s.r.l. sulla base della loro esperienza hanno pensato di avviare un programma di ricerca finalizzato ad individuare un sistema di monitoraggio autodiagnosticante intelligente per il controllo dinamico di opere dell'ingegneria civile, con particolare riguardo ai ponti. Il progetto di ricerca, denominato "*Progetto R&S Sis.Mo.Co. - Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell'ingegneria civile*", ha avuto come obiettivo quello di mettere a punto un sistema di monitoraggio per cui sia possibile studiare in maniera automatizzata il comportamento dinamico globale e/o locale di un'opera ed effettuare la verifica delle membrature in condizioni di esercizio o a valle di eventi singolari, quali sisma o condizioni di carico non previste e non prevedibili. È altresì previsto l'impiego del monitoraggio strutturale, per verificare l'efficacia degli interventi di consolidamento eseguiti su strutture non rispondenti alle richieste normative.

Di seguito, si espone brevemente quanto previsto in letteratura in riferimento ai macro-approcci di trattamento numerico del dato sperimentale per l'identificazione automatica dei parametri modali di una struttura. In particolare si attenzionerà l'approccio che segue l'analisi modale operativa *OMA (Operational Modal Analysis)* con tecnica di decomposizione del dominio della frequenza *FDD (Frequency Domain Decomposition)*, tecnica di *identificazione dinamica di tipo output-only*, che misura la risposta strutturale ad un input non noto costituito dalla vibrazione ambientale del rumore bianco.

Si passa poi all'esamina di alcuni casi applicativi su edifici in c.a. e su opere infrastrutturali come i ponti, il cui studio ha fornito utili informazioni sul comportamento dinamico globale di tali sistemi strutturali sia in termini di frequenza di campionamento che di estensione temporale di acquisizione.

## **2. METODI DI TRATTAMENTO NUMERICO DEL DATO SPERIMENTALE PER L'IDENTIFICAZIONE DEL COMPORTAMENTO DINAMICO DI UN'OPERA**

I metodi di trattamento numerico del dato sperimentale per l'identificazione dinamica di una struttura consistono in elaborazioni numeriche dei dati accelerometrici acquisiti a valle di una campagna sperimentale. Con l'espressione "*identificazione dinamica*" si intende una serie di tecniche sia analitiche che sperimentali, attraverso le quali è possibile determinare in maniera automatica i parametri rappresentativi del comportamento dinamico di una struttura, ovvero i modi di vibrare e i periodi fondamentali, a fronte di un qualsiasi impulso con caratteristiche note.

L'approccio al problema dell'identificazione automatica dei parametri modali è assai recente, infatti il rapido sviluppo e la comprovata affidabilità delle tecniche di analisi modale sperimentale in condizioni operative ha portato ad una crescente attenzione nei riguardi di questo tema, spingendo la ricerca alla formulazione di una serie di proposte per il monitoraggio e l'identificazione automatica dei parametri modali. La conoscenza dei modi di vibrare e delle frequenze proprie delle

strutture esistenti risulta di grande utilità ai fini della valutazione delle prestazioni sotto sisma. In accordo con quanto proposto da Fabbrocino, si possono distinguere due differenti approcci mediante i quali determinare le suddette caratteristiche: *approccio analitico* e *approccio sperimentale* [176].

L'approccio analitico, detto anche approccio diretto, attraverso la risoluzione di un problema agli autovalori, permette di determinare i parametri modali di una struttura, ipotizzando di conoscere a priori le caratteristiche della struttura, quali geometria, distribuzione di masse e rigidezze, tipologia di materiali presenti e smorzamento. Al contrario, l'approccio sperimentale, chiamato anche problema inverso o indiretto, si propone di determinare le caratteristiche modali della struttura a partire da un input dinamico noto, caso di eccitazione artificiale, oppure da un input sconosciuto, caso di eccitazione ambientale data da azioni naturali e umane, ad esempio vento, microtremiti, traffico. Il primo caso prende il nome di metodo *EMA (Experimental Modal Analysis)*; mentre il secondo caso prende il nome di metodo *OMA (Operational Modal Analysis)*. La procedura di identificazione richiede un insieme coerente di misure di accelerazione grezze eseguite sulla struttura e fornisce, per entrambi i metodi, le frequenze naturali della struttura e i rapporti di smorzamento. Si sottolinea che il comportamento dinamico di una struttura dipende solamente dalle sue caratteristiche intrinseche, come massa, rigidezza e grado di vincolo e non dall'entità e/o dal tipo di carico applicato, motivo per cui entrambi i metodi permettono di determinare le caratteristiche modali tramite la sola risposta strutturale, nonostante le differenze di carico dinamico.

La differenza tra le tecniche di identificazione dinamica nei due metodi EMA e OMA scaturisce dalla diversa tipologia di input considerato: Nello specifico, è possibile distinguere l'eccitazione ambientale (rumore bianco) dall'eccitazione artificiale. L'eccitazione ambientale si riferisce a tutte le vibrazioni dovute ai cosiddetti carichi ambientali come il traffico veicolare, stradale e ferroviario, sia in superficie che in sottoterraneo; rientrano in questi carichi anche le attività industriali, il vento ed i terremoti. Di fatto, le suddette eccitazioni causano delle vibrazioni nel sottosuolo, che, in funzione della tipologia e stratigrafia del terreno possono essere rifratte, riflesse o filtrate. Quando tali vibrazioni arrivano alla struttura, producono in essa una vibrazione fissa di ampiezza variabile. Il più grande vantaggio dell'eccitazione ambientale risiede nel fatto che questa tipologia di eccitazione non richiede alcun costo.

L'eccitazione artificiale, come lascia intendere il nome, è un'eccitazione realizzabile necessariamente mediante l'utilizzo di particolari dispositivi, anche di grosse dimensioni per cui non sempre è possibile farne uso. Si ricorre all'eccitazione artificiale quando l'eccitazione ambientale è assente oppure poco consistente per ottenere risultati significativi. Tra gli strumenti maggiormente utilizzati in questo ambito c'è la vibrodina, dispositivo che permette l'erogazione di forze dinamiche rigorosamente sinusoidali unidirezionali. L'utilizzo di queste eccitazioni comporta chiaramente dei costi più o meno elevati, tuttavia, conoscere e stabilire l'input dinamico permette di poter indagare sulla banda delle frequenze di interesse.

Nel caso in cui non sia possibile ricorrere alle vibrodine, come spesso succede nelle strutture in muratura, possono essere utilizzati altri strumenti in grado di garantire una buona efficienza. Il martello strumentato è sicuramente tra questi, esso non è altro che un martello che genera eccitazione in ragione di un impatto diretto con la struttura. La magnitudo e la durata dell'impulso dipendono dal peso del martello, dal materiale della parte battente (acciaio, plastica o gomma), dalle caratteristiche dinamiche della superficie e chiaramente dalla velocità al momento dell'impatto. A

differenza della vibrodina, un martello vibrante oltre ad essere semplice e veloce da realizzarsi, è sicuramente meno dispendioso dal punto di vista economico, ma talvolta, in caso di grandi strutture non è semplice generare sufficienti vibrazioni [174].

Il metodo EMA si riferisce a test di vibrazione artificiale con input dinamico noto. I test con input noto garantiscono un migliore controllo del moto della struttura, ma presentano alcuni aspetti negativi, quali interruzione dell'esercizio, maggiori costi e spesso impraticabilità, soprattutto nel caso di strutture molto grandi. Ecco perché generalmente nei monitoraggi dinamici sperimentali delle strutture civili si preferisce misurare la risposta strutturale alla vibrazione ambientale, avendo comunque la possibilità di determinare i parametri dinamici della struttura come frequenze naturali, modi naturali e rapporti di smorzamento; tuttavia, essendo incognito l'input, non è possibile calcolare i fattori di partecipazione modale [174].

I vantaggi delle tecniche OMA derivano sostanzialmente dall'utilizzo di test di vibrazione ambientale più economici e rapidi in ragione del fatto che non è richiesta strumentazione e interferenza con l'esercizio della struttura. La risposta ottenuta con metodo OMA è rappresentativa dell'effettivo comportamento della struttura in fase di esercizio, non essendo essa soggetta a vibrazioni straordinarie. Tuttavia, possono esservi degli errori nell'analisi nel caso in cui al rumore bianco si sovrapponga un'eccitazione non casuale.

## 2.1 METODO OMA PER L'IDENTIFICAZIONE MODALE AUTOMATICA

Una volta acquisiti i valori accelerometrici a valle di una campagna dinamica si procede con il trattamento numerico di questi dati e all'identificazione dei parametri modali della struttura, riferendosi il più delle volte al dominio delle frequenze. È possibile affermare che, nonostante la molteplicità dei metodi di identificazione, tutti partono dalle medesime ipotesi, vale a dire che ognuno di essi si basa sul fatto che in prossimità della frequenza di risonanza, il modo prevalente è proprio quello che provoca la risonanza, mentre tutti gli altri modi possono considerarsi trascurabili. Questa assunzione permette di semplificare enormemente il problema, difatti, una generica struttura ad  $n$  gradi di libertà, in ragione di quanto affermato, può essere studiata come  $n$  strutture semplici ad un solo grado di libertà.

Le tecniche su citate sono state utilizzate con successo per l'identificazione modale di numerose strutture civili, come ponti o edifici in c.a., ma meno frequentemente applicate a strutture e monumenti storici. Attualmente il metodo dell'analisi modale sperimentale *OMA* con tecnica di *identificazione dinamica* della decomposizione del dominio della frequenza *FDD Frequency Domain Decomposition*, risulta essere l'approccio più utilizzato. Secondo tale approccio i dati accelerometrici acquisiti in opera dal monitoraggio dinamico su una struttura sottoposta alla sola eccitazione ambientale sono successivamente trattati e riportati nel dominio della frequenza grazie all'algoritmo della *Fast Fourier Transform FFT* e trasformati per successive integrazioni in andamenti di velocità e spostamenti sempre nel dominio delle frequenze. Si procede poi tramite una procedura di integrazione seminversa a determinare i parametri rappresentativi del comportamento dinamico globale dell'opera, quali frequenze proprie, forme dei modi di vibrare e rapporti di smorzamento. La tecnica di identificazione *FDD* è una tecnica di identificazione modale *output-only*, che misura cioè solo l'output costituito dalla risposta strutturale alla vibrazione ambientale. Ci sono diverse tecniche di identificazione modale della vibrazione ambientale, tra le quali la *peak picking* dalle densità spettrali di potenza (PP), la scomposizione del valore singolare (SVD) e la identificazione stocastica del sottospazio (SSI) [28].

La metodologia operativa, che segue i test di vibrazione ambientale con l'analisi modale operativa per l'individuazione dei parametri dinamici, permette di effettuare un monitoraggio in continuo al fine di valutare l'influenza dei fattori ambientali su tali parametri [29].

Altre molteplici applicazioni sono previste per tale approccio in ambito di monitoraggio strutturale, quali calibrazione dei modelli FEM, manutenzione e rinforzo di strutture esistenti, validazione di interventi strutturali con possibilità di confronto dei risultati ante e post intervento, ricerca del danno e valutazione dello stato di salute strutturale con controllo delle prestazioni esistenti nelle condizioni di esercizio o durante particolari condizioni ambientali quali i terremoti.

Generalmente il confronto tra i parametri modali ottenuti sperimentalmente e quelli di tipo numerico risulta essere un aspetto di grande utilità nelle diverse applicazioni. Si possono ottenere informazioni utili, ad esempio, nell'ottica di valutare lo stato attuale di salute della struttura. La presenza, in tal caso, di discrepanze tra i valori delle frequenze sperimentali e quelle previste dal modello agli elementi finiti può indicare un deterioramento in termini di rigidezza strutturale.

Il confronto dei parametri modali riferiti a due epoche di monitoraggio differenti risulta utile per la ricerca del danneggiamento. La presenza di forme modali anomale e di eventuali variazioni nelle frequenze di vibrazione, per esempio, si può associare a movimenti indipendenti di parti strutturali, dovuti alla possibile formazione di grandi crepe. In questi casi l'esame dei dati forniti dalla sperimentazione dinamica, accoppiata alla modellazione numerica, può consentire inoltre di formulare un giudizio di integrità strutturale, quantificando l'eventuale degrado in atto.

Il confronto tra i parametri numerici e quelli sperimentali permette, inoltre, di calibrare un modello a elementi finiti FEM per renderlo più aderente al comportamento reale in termini di frequenze e di modi di vibrare. Ad oggi i software disponibili consentono di realizzare modelli anche molto complessi, tuttavia, la risposta che si ottiene da un'analisi FEM può differire sensibilmente dall'effettiva risposta della struttura. Questo è dovuto sostanzialmente al fatto che si va a discretizzare una struttura che nella realtà si presenta continua; e alla possibilità di errori nella rappresentazione geometrica della struttura e di errori sulle valutazioni di inerzie e rigidezze degli elementi.

È bene inoltre far presente, che il monitoraggio dinamico può essere utilizzato anche in forma comparativa. Esso infatti rientra tra le tecniche non distruttive, cui una delle finalità è quella di confrontare informazioni di sistemi strutturali simili, al fine di coglierne le differenze e risalire alle cause generatrici.

Accertate le attuali metodologie sperimentali e numeriche per l'individuazione dei parametri rappresentativi del comportamento dinamico di una struttura e le numerose applicazioni in ambito di controllo strutturale, si passa ora ad esaminare alcuni casi studio di monitoraggio dinamico su edifici in c.a. e su ponti.

### **3. ATTIVITÀ DI CONTROLLO DINAMICO SULLE OPERE DI INGEGNERIA CIVILE**

L'analisi dello stato dell'arte ha riguardato anche lo studio di alcune attività di controllo già eseguite in Italia e all'estero sia con finalità di carattere manutentivo sia con finalità specifiche di controllo. Per le attività di controllo di tipo routinario che si svolgono sugli edifici e sui ponti sono già disponibili sistemi di monitoraggio e di controllo con successivo trattamento numerico del dato sperimentale dinamico. Attualmente queste attività vengono svolte per verificare principalmente il

comportamento globale delle strutture, impiegando principalmente sensori periferici collegati tramite cavi ad un'unità digitale di acquisizione dati. La gestione delle acquisizioni e la loro registrazione viene eseguita da un apposito software, il quale esegue automaticamente la conversione del segnale elettrico in formato digitale e memorizza i segnali registrati nel disco rigido del computer, collegato alla centralina di acquisizione dati.

Le architetture di monitoraggio si differenziano tra di loro per numero, tipologia e frequenza di campionamento dei sensori, nonché per capacità in termini di canali e di modalità di acquisizione delle centrali di gestione.

Nella presente sezione, a valle di un'estesa analisi nella letteratura tecnica specialistica, si riportano alcuni casi applicativi di test di vibrazione ambientale su edifici in c.a. e su ponti, finalizzati alla caratterizzazione dinamica dell'opera.

### 3.1 ALCUNE ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO ESEGUITE SUGLI EDIFICI IN C.A.

In letteratura tra le attività di controllo e monitoraggio eseguite su edifici presenti sul territorio nazionale sono presenti diversi casi, tuttavia le attività effettuate dall'Università di Napoli hanno rappresentato un elemento guida e di seguito ne sono citati alcuni:

- a. La struttura monumentale in cemento armato della Torre delle Nazioni a Napoli, caratterizzata da modi ben separati sulla quale sono state effettuate anche valutazioni finalizzate all'identificazione dei modi fondamentali di una volta in muratura.
- b. Il Campanile di S. Maria del Carmine a Napoli, caratterizzato da due modi flessionali vicini ma non accoppiati.
- c. L'Edificio Principale della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Napoli.

Le caratteristiche dell'hardware di misura e dei sensori accelerometrici utilizzati nelle sperimentazioni e le frequenze di campionamento assunte sono riportati nella seguente Tabella.

Struttura	Sensori	DAQ hw	Registrazioni	Durate [s]	Frequenza di campionamento [Hz]
Torre delle Nazioni (Napoli)	Epi-Sensor FBA ESU2 (Kinematics Inc.)	K2 (Kinematics Inc.)	TdN1	1500	100
			TdN2	2400	100
Volta a stella (Lecce)	PCB 393B31 (PCB Piezotronics Inc.)	Compact DAQ NI9233 (National Instruments)	Setup A	1500	100
			Setup B	1800	200
Campanile di S. Maria del Carmine (Napoli)	Epi-Sensor FBA ESU2 (Kinematics Inc.)	PXI-4472 (National Instruments)	Single record	1800	100
Torre della Facoltà di Ingegneria (Napoli)	Epi-Sensor FBA ESU2 (Kinematics Inc.)	K2 (Kinematics Inc.)	RC1	1200	100
			RC2	3300	100
			RC3	3800	100

Tabella 1 – Caratteristiche tecniche assunte.

### 3.2 ALCUNE ATTIVITÀ DI MONITORAGGIO ESEGUITE SUI PONTI

Anche sui ponti in letteratura sono presenti alcune applicazioni che possono essere assunte come riferimento guida per il controllo di tali opere infrastrutturali tra queste vi sono:

- a. Attività condotte su cinque ponti ad arco RC autostradali analizzati attraverso test OMA, sui quali sono stati rilevati i seguenti parametri caratterizzanti.

Bridge Number	Total Length (m)	Span Length (m)	Rise Until the Crown (m)	$f_1$ (Hz)	Modo I	$f_2$ (Hz)	Modo II
<i>I</i>	76.4	60.8	15.4	2.78	<i>V</i>	3.62	<i>H</i>
<i>II</i>	76	76	1903	2.95	<i>H</i>	3.04	<i>V</i>
<i>III</i>	60.8	60.8	18	2.85	<i>V</i>	3.82	<i>H</i>
<i>IV</i>	140	120	32.5	1.32	<i>H</i>	1.45	<i>V</i>
<i>V</i>	60	60	20.8	2.53	<i>V</i>	3.38	<i>H</i>

Tabella 2 - Proprietà modali fondamentali di un insieme di ponti autostradali in c.a. nel Sud Italia

(*V* è per la flessione verticale, *H* è per la flessione orizzontale).

- b. Attività condotta sul ponte ubicato sul fiume Ufita, in territorio di Apice. Si tratta di una struttura composita acciaio-calcestruzzo, con travi longitudinali in acciaio collegate da profili in acciaio trasversali e diagonali che formano una struttura a traliccio. Il ponte in c.a. è alto 0,3 m e largo 8.8 m. La risposta del ponte alle vibrazioni ambientali è stata registrata per 1 ora ad una frequenza di campionamento di 100 Hz. Si riportano di seguito le proprietà modali fondamentali dedotte a seguito del trattamento del dato sperimentale.

Modo	$f$ (Hz)	Smorzamento $\xi$ (%)	Descrizione forma modale
<i>I</i>	3.75	0.7	Sbandamento fuori piano
<i>II</i>	4.39	2.4	Sbandamento nel piano
<i>III</i>	5.40	1.2	Torsione
<i>IV</i>	5.90	2.0	Sbandamento fuori piano

Tabella 3 - Ponte Ufita: risultati di identificazione modale.

- c. Attività condotta sul ponte pedonale presso "Ospedale del Mare" a Napoli, si tratta di un ponte ad arco in acciaio con una passerella in acciaio-cemento larga 5,0 m. La lunghezza della campata è di 66,0 m. Si riportano di seguito le proprietà modali fondamentali dedotte a seguito del trattamento del dato sperimentale.

Modo	f (Hz)	Smorzamento $\xi$ (%)	Descrizione forma modale
I	1.34	0.2	Sbandamento orizzontale
II	1.54	0.4	Sbandamento verticale
III	2.16	0.2	Sbandamento verticale
IV	2.40	0.3	Torsione

Tabella 4 - Passerella "Ospedale del Mare": risultati di identificazione modale.

- d. Attività condotta sul ponte "Sungai Raia bridge" nel nord-ovest della Malaysia (Asia sudorientale) con struttura costituita da impalcato largo 11,50 m, spessore di 22,50 cm, supportato da tre travi prefabbricate con una profondità di 1,75 m e un'area sezionale di 15,24 mm<sup>2</sup>.

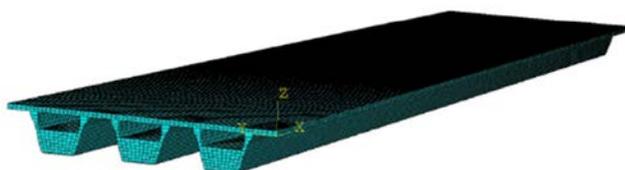


Fig. 1. Modello ad elementi finiti del ponte.

Si riportano di seguito le proprietà modali fondamentali dedotte a seguito del trattamento del dato sperimentale.

Modi		Tecnica di identificazione modale			
		FDD (Hz)	EFDD (Hz)	SSI-PC (Hz)	SSI-CVA (Hz)
1	1 <sup>a</sup> flessione verticale	3.235	3.235	3.268	3.273
2	1 <sup>a</sup> torsione	6.548	6.548	6.505	6.535
3	2 <sup>a</sup> piegatura verticale	8.415	8.415	8.477	8.484
4	2 <sup>a</sup> torsione	13.336	13.336	13.285	13.301
5	3 <sup>a</sup> piegatura verticale	16.852	16.852	16.873	16.889

Tabella 5 - Parametri modali basati su varie tecniche di identificazione modale.

Modi		Finite Element Model (FEM)	Operational modal analysis (OMA)
1	1 <sup>a</sup> flessione verticale	3.478 Hz	3.235 Hz
2	2 <sup>a</sup> piegatura verticale	9.2011 Hz	8.415 Hz
3	3 <sup>a</sup> piegatura verticale	17.135 Hz	16.852 Hz
4	1 <sup>a</sup> torsione	6.0169 Hz	6.548 Hz
5	2 <sup>a</sup> torsione	12.160 Hz	13.336 Hz

Tabella 6 - Confronto frequenze naturali delle forme modali da analisi FEM e analisi OMA.

#### 4. CONCLUSIONI

La ricerca bibliografica in ambito del Progetto di Ricerca *Sis.Mo.Co.* ha riguardato le attività di monitoraggio e controllo strutturale in campo dinamico, restituendo lo stato dell'arte sulle metodologie e sui sistemi attualmente adottati dagli operatori del settore. Lo studio ha interessato i principali metodi di trattamento numerico del dato acquisito a valle di una campagna dinamica e le principali tecniche di identificazione dei parametri modali caratterizzanti il comportamento dinamico di una struttura. In particolare è emerso che l'approccio più diffuso risulta essere quello dei test di vibrazione ambientale con trattamento numerico del dato sperimentale secondo il metodo *OMA (Operational Modal Analysis)*. La ricerca bibliografica ha restituito anche i risultati di alcuni casi applicativi di test di vibrazione ambientale, presenti in letteratura, eseguiti su edifici in c.a. e su ponti.

Da un'analisi critica degli elementi oggetto di ricerca si è giunti ad individuare le limitazioni e le carenze dei sistemi di controllo attuali. Aspetto che limita fortemente l'impiego pratico di tali sistemi è la richiesta di una conoscenza multidisciplinare nel processo di controllo. Attualmente nello stato dell'arte non sono previsti sistemi *intelligenti* che possano fungere da guida e supporto alla gestione delle varie fasi, quali analisi preliminare, acquisizione dei dati sperimentali relativi alle accelerazioni di parti della struttura osservata, elaborazione dei dati con determinazione dei parametri modali in termini di frequenza, fino al confronto con le frequenze proprie del ponte e alla localizzazione delle zone con problemi strutturali con emissione di diagnosi, demandando l'assunzione di decisioni a carico esclusivo di una o più figure tecniche professionali altamente specializzate in campi multidisciplinari. I sistemi attuali offrono la sola possibilità di acquisire i dati della struttura osservata, mentre per quanto riguarda l'ottenimento di una opportuna diagnosi sullo stato di sicurezza è necessario che tali dati acquisiti, siano analizzati da soggetti con grande esperienza in settori multidisciplinari, quali analisi delle strutture, analisi dei materiali, analisi delle procedure per la verifica di vita utile di una struttura, analisi delle applicazioni sperimentali, fino a conoscere problematiche di tipo informatico e di trasmissione dei dati. L'alta specializzazione è richiesta non solo per l'emissione di una diagnosi, ma anche per la verifica dell'affidabilità dei dati acquisiti, che molto spesso per carenze nel settaggio delle frequenze di campionamento o per scarso allineamento temporale dei sensori in acquisizione forniscono dati che inficiano il successivo trattamento numerico.

Non esistono software intelligenti di tipo autodiagnosticante, ovvero programmi ad hoc in grado di fornire, in maniera automatizzata, utili indicazioni decisionali quali, la scelta dei punti da osservare, i punti di installazione dei sensori, e di interpretare i dati opportunamente elaborati che consentiranno di individuare potenziali condizioni di rischio, su cui successivamente intraprendere azioni di rinforzo o anche semplicemente di limitazione all'uso della struttura monitorata..

Altre importanti limitazioni riscontrate sono di tipo funzionale e interessano proprio la strumentazione votata al monitoraggio, ovvero i sensori accelerometrici. I sistemi ad oggi utilizzati non prevedono sensori a frequenza modulabile, ovvero non è ammessa la possibilità di settare ciascun sensore con valori di frequenza di campionamento dedicati. L'individuazione dei modi propri di vibrare dell'intera struttura e di quelli riferiti a parti di essa può richiedere un'impostazione diversificata in termini di frequenza di campionamento. Dall'esamina sui monitoraggi dinamici già eseguiti è emerso infatti che si è trattato di attività destinate quasi esclusivamente a controlli globali, ossia per individuare grandezze dinamiche proprie dell'intera struttura, escludendo pertanto l'analisi dei modi locali. La mancata flessibilità di settaggio della

frequenza di campionamento costituisce nota fortemente negativa, inquanto, preclude la possibilità di effettuare lo studio del comportamento dinamico della struttura a livello locale. Si ricorda che, è necessario porre particolare attenzione allo studio locale del comportamento dinamico, poiché, questo consente di individuare la presenza di danni su parti dell'opera e/o la perdita di prestazionalità nelle singole sezioni resistenti. Allo stesso tempo, una volta ripristinate le rigidzze e le resistenze, lo studio dei modi locali consente di validare l'esecuzione di un intervento strutturale.

Si riscontra infine la mancanza di unità di memoria di supporto al sistema di acquisizione, il quale data la grande mole di dati da elaborare può risultare sovraccaricato, comportando così importanti oneri da un punto di vista computazionale.

Considerate le criticità suddette, si diffonde tra i tecnici del settore la richiesta di dispositivi per il controllo strutturale, che siano affidabili e di facile utilizzo. Nasce così l'idea, da parte di un team composto sia da tecnici che da aziende fornitrici, di avviare un progetto di ricerca, denominato Progetto Sis.Mo.Co. e finalizzato ad individuare un'architettura innovativa per il monitoraggio dinamico, che sia dotata di software autodiagnosticante intelligente e di sensori di tipo wireless a frequenza modulabile. Il software intelligente dovrà essere votato alla gestione di tutte le fasi del processo di controllo, a partire da quella di analisi preliminare conoscitiva, a quella di settaggio e collocazione dei sensori, alla fase di osservazione ed acquisizione in continuo con sincronizzazione temporale dei sensori, fino all'osservazione routinaria, dove il programma ad hoc consentirà l'autodiagnosi, sia in forma comparativa, sia in forma oggettiva, mediante l'impiego di opportuni parametri di soglia, e fornirà indicazioni di corretto funzionamento dell'opera in presenza di anomalie classificate come evidenze di allerta o di allarme. L'utilizzo dei sensori wireless, con la possibilità di settare la frequenza di campionamento a valori dedicati per le specifiche parti di struttura da osservare, consentirà lo studio locale dei modi con tutte le applicazioni del caso. Il tutto dovrà essere concepito nell'ottica di una futura richiesta di brevetto per la proposta sia del software intelligente e sia del sensore wireless settabile in frequenza.

## BIBLIOGRAFIA

### IDENTIFICAZIONE COMPORTAMENTO DINAMICO

- [1] - Alemdar Bayraktar, Temel Türker, Barı,s Sevim, Ahmet Can Altuni,sik, Faruk Yildirim “*Modal Parameter Identification of Hagia Sophia Bell-Tower via Ambient Vibration Test*”. 14 March 2009.
- [2] - L.F. Ramos, L.Marques, P.B.Lourenc-o, G.DeRoeck, A.Campos-Costa, J.Roque “*Monitoring historical masonry structures with operational modal analysis: Two case studies*”. Elsevie. Mechanical Systems and Signal Processing. 4February2010.
- [3] - F. Aras, L. Krstevska, G. Altay, L. Tashkov “*Experimental and numerical modal analyses of a historical masonry palace*”. Elsevie. Construction and Building Materials. Civil Engineering Department, Anadolu University. Turkey. 2010.
- [4] - A.A. Mosavi, D.Dickey, R.Seracino, S.Rizkalla “*Identifying damage locations under ambient vibrations utilizing vector autoregressive models and Mahalanobis distances*”. Elsevie. Mechanical Systems and Signal Processing. 5June2011.
- [5] - Meng MA, Valéri MARKINE, Wei-ning LIU, Yang YUAN, Feng ZHANG “*Metro train-induced vibrations on historic buildings in Chengdu, China*”. Journal of Zhejiang University-SCIENCE A (Applied Physics & Engineering). 2011.
- [6] - L M Miller, E Halvorsen, T Dong and P KWright “*Modeling and experimental verification of low-frequency MEMS energy harvesting from ambient vibrations*”. Journal Of Micromechanics And Microengineering . 24 March 2011.
- [7] - W.H. Chen, Z.R. Lu, W. Lin, S.H. Chen, Y.Q. Ni, Y. Xia, W.Y. Liao “*Theoretical and experimental modal analysis of the Guangzhou New TV Tower*”. Elsevie. Engineering Structures. 25 August 2011.
- [8] - Renos A. Votsis, Nicholas Kyriakides, Christis Z. Chrysostomou, Elia Tantele, Themis Demetriou “*Ambient vibration testing of two masonry monuments in Cyprus*”. Elsevie. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 9August2012.
- [9] - Dora Foti, Mariella Diaferio, Nicola Ivan Giannoccaro, Michele Mongelli “*Ambient vibration testing, dynamic identification and model updating of a historic tower*”. Elsevie. NDT&E International. 29 December2011.
- [10] - Mario Di Paola, Francesco Lo Iacono, Giacomo Navarra e Antonina Pirrotta “*L’identificazione dinamica delle caratteristiche modali e meccaniche della struttura della cupola del teatro massimo*”. Università degli Studi di Palermo. 5 Aprile 2012.
- [11] - Weixing Shi, Jiazeng Shan, Xilin Lu “*Modal identification of Shanghai World Financial Center both from free and ambient vibration response*”. Elsevie. Engineering Structures. Tongji University. China. 2012.
- [12] - Rocco Ditommaso, Marco Mucciarelli, Stefano Parolai, Matteo Picozzi “*Monitoring the structural dynamic response of a masonry tower: comparing classical and time-frequency analyses*”. Original Research Paper. 25 March 2012.
- [13] - Paulo Antunes, Hugo Lima, Humberto Varum, Paulo André “*Optical fiber sensors for static and dynamic health monitoring of civil engineering infrastructures: Abode wall case study*”. Elsevie. Measurement. Portugal. 3 May 2012.

- [14] - Y.L. Guo, A.Kareem, Y.Q.Ni, W.Y.Liao “*Performance evaluation of Canton Tower under winds based on full-scale data*”. Elsevier. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics. 20April2012.
- [15] - G. Tondreau, A.Deraemaeker “*Local modal filters for automated data-based damage localization using ambient vibrations*”. Elsevier. Mechanical Systems and Signal Processing. Belgium. 22March2013.
- [16] - Antonella Saisi, Carmelo Gentile, and Lorenzo Cantini “*POST-EARTHQUAKE ASSESSMENT OF A MASONRY TOWER BY ON-SITE INSPECTION AND OPERATIONAL MODAL TESTING*”. COMPDYN 2013. 4th ECCOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering. Kos Island, Greece, 12–14 June 2013.
- [17] - Anna Karatzetzou · Caterina Negulescu · Maria Manakou · Benjamin François · Darius M. Seyedi · Dimitris Ptilakis · Kyriazis Ptilakis “*Ambient vibration measurements on monuments in the Medieval City of Rhodes, Greece*”. Original Research Paper. 12 July 2014.
- [18] - Jun Li, Hong Hao and Hong-Ping Zhu “*Dynamic Assessment of Shear Connectors in Composite Bridges with Ambient Vibration Measurements*”. Curtin University. 14 January 2014.
- [19] - Jesús Valdés-González, Jaime De-la-Colina and Carlos Alberto González-Pérez “*Experiments for seismic damage detection of a RC frame using ambient and forced vibration records*”. Ciudad Universitaria, Toluca, México. 29 May 2014.
- [20] - Fatima Nasser, Zhong-Yang Li, Nadine Martin, Philippe Gueguen “*Non-biased estimation of modal parameters of multi-component ambient vibrations in high-rise buildings using a self-governed random decrement technique*”. HAL. 23 Jul 2014.
- [21] - W. C. Su, C. S. Huang, C. H. Chen, C. Y. Liu, H. C. Huang & Q. T. Le “*Identifying the Modal Parameters of a Structure from Ambient Vibration Data via the Stationary Wavelet Packet*”. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2014.
- [22] - Mauro Caldon<sup>1</sup>, Kleidi Islami<sup>1</sup>, Filippo Lorenzoni<sup>1</sup>, Claudio Modena “*Sistema integrato per il monitoraggio dinamico continuo: Ponte “Ponte Nuovo Del Popolo”*”. HAL. 8 Jul 2014.
- [23] - Chien-Chou Chen, Wen-Hwa Wu, Fong Shih, Shen-Wei Wang “*Scour evaluation for foundation of a cable-stayed bridge based on ambient vibration measurements of superstructure*”. *NDT&E International*. Department of Construction Engineering, National Yunlin University of Science and Technology, Yunlin640, Taiwan. 24April2014.
- [24] - Jin Zhu and Wei Zhang “*Coupled analysis of multi-impact energy harvesting from low-frequency wind induced vibrations*”. University of Connecticut, Storrs, Connecticut 06269, USA. 24 February 2015.
- [25] - Charles Schallhorn and Salam Rahmatalla “*Crack detection and health monitoring of highway steel-girder bridges*”. Structural Health Monitoring. 2015.
- [26] - J. P. Singh, Pankaj Agarwal, Ashok Kumar & S. K. Thakkar “*Identification of Modal Parameters of a Multistoried RC Building Using Ambient Vibration and Strong Vibration Records of Bhuj Earthquake, 2001*”. Journal of Earthquake Engineering. Department of Earthquake Engineering, Indian Institute of Technology, Roorkee, India. 19 Mar 2014.
- [27] - Mario Alberto Chiorino, Rosario Ceravolo, Alberto Spadafor, Luca Zanotti Fragonara & Giuseppe Abbiati “*Dynamic Characterization of Complex Masonry Structures: The Sanctuary of Vicoforte*”. International Journal of Architectural Heritage: Conservation, Analysis, and Restoration. Politecnico di Torino. 08 Apr 2011.

- [28] - Annamaria Pau and Fabrizio Vestroni “*Dynamic Characterization of Ancient Masonry Structures*”. *Università di Roma La Sapienza. Italy*.
- [29] - Carmelo Gentile, Antonella Saisi, Alessandro Cabboi “*Dynamic monitoring of a masonry tower*”. SAHC. 2012.
- [30] - F A. Pau, A. De Sortis, R. Marzellotta & F. Vestroni “*Health monitoring of cultural heritage using ambient and forced vibrations*”. Dipartimento di Ingegneria Strutturale e Geotecnica. Università di Roma La Sapienza, Italy.
- [31] - Alessandro De Stefano, Rosario Ceravolo, Emiliano Matta, Antonino Quattrone, Luca Zanotti Fragonara “*Identificazione dinamica sperimentale di edifici strategici sotto sisma*”. Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica. C. Duca degli Abruzzi 24, 10129 Torino.
- [32] - G. Boscato, L. Marchetti, D. Rocchi, S. Russo, E. Sperotto “*Primi Esiti Del Monitoraggio Della Chiesa Di Santa Maria Del Suffragio All’aquila*”. Unità di Ricerca “Controllo delle Strutture Monumentali”, Università IUAV di Venezia.

#### CONTROLLO DINAMICO DEGLI EDIFICI

- [33] - Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li, Gang-Bing Song “*Recent applications of fiber optic sensors to health monitoring in civil engineering*”. Elsevier. *Engineering Structures* 26 (2004).
- [34] - A. Masi, M. Vona “*Vulnerabilità sismica di edifici in c.a. realizzati negli anni ‘70*”. Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata all’ingegneria, Università della Basilicata, Potenza, Italia. XI Congresso Nazionale “L’ingegneria Sismica in Italia”, Genova 25-29 gennaio 2004.
- [35] - M. Ussorio, H. Wang, S.L. Ogin, A.M. Thorne, G.T. Reed, S.C. Tjin, R. Suresh “*Modifications to FBG sensor spectra due to matrix cracking in a GFRP composite*”. Elsevier. *Construction and Building Materials* 20 (2006).
- [36] - Filippo Bastianini, Marco Corradi, Antonio Borri, Angelo di Tommaso “*Retrofit and monitoring of an historical building using “Smart”CFRP with embedded fibre optic Brillouin sensors*”. Elsevier. *Construction and Building Materials* 19 (2005).
- [37] - G. Kister, D. Winter, J. Tetlow, R. Barnes, G. Mays, G.F. Fernando “*Structural integrity monitoring of reinforced concrete structures. Part 1: evaluation of protection systems for extrinsic fibre Fabry–Perot sensors*”. Elsevier. *Engineering Structures* 27 (2005).
- [38] - Nicola Caterino “*Analisi decisionale multicriterio per l’adeguamento sismico di edifici in c.a.*”. Università Degli Studi Di Napoli Federico II. 2003/2006.
- [39] - Zhishen Wu, Bin Xu, Keiji Hayashi, Atsuhiko Machida “*Distributed optic fiber sensing for a full-scale PC girder strengthened with prestressed PBO sheets*”. Elsevier. *Engineering Structures* 28 (2006).
- [40] - Rosamaria Iaccino, Alfonso Vulcano, Fabio Mazza “*Modellazione e analisi non lineare di pareti strutturali in calcestruzzo armato*”. Università Della Calabria. Novembre 2006.
- [41] - Krishna Chintalapudi, Tat Fu, Jeongyeup Paek, Nupur Kothari, Sumit Rangwala, John Caffrey, Ramesh Govindan, Erik Johnson, and Sami Masri “*Monitoring Civil Structures with a Wireless Sensor Network*”. University of Southern California. Sensor-Network Applications. April 2006.
- [42] - G. Kistera, D. Winter, R.A. Badcocka, Y.M. Gebremichael, W.J.O. Boyle, B.T. Meggitt, K.T.V. Grattanb, G.F. Fernando “*Structural health monitoring of a composite bridge using Bragg*

- grating sensors. Part 1: Evaluation of adhesives and protection systems for the optical sensors*". Elsevier. Engineering Structures 29 (2007).
- [43] - Guo-Qiang Li, Jin-Jun Li "Advanced Analysis and Design of Steel Frames". John Wiley & Sons Ltd. England.
- [44] - Hong-Nan Li, Dong-Sheng Li, Gang-Bing Song "Prove e controlli non distruttivi per la verifica degli edifici esistenti secondo la normativa sismica e le norme tecniche per le costruzioni". Giovanni Ingegneri Bresciani. Brescia 15 giugno 2007.
- [45] - Shao-wei Lu, Huai-qin Xie "Strengthen and real-time monitoring of RC beam using "intelligent" CFRP with embedded FBG sensors". Elsevier. Construction and Building Materials 21 (2007).
- [46] - Cristiano Mariniello "Una procedura meccanica nella valutazione della vulnerabilità sismica di edifici in c.a.". Università Degli Studi Di Napoli Federico II. 2004/2007.
- [47] - Francesco Clementi, Stefano Lenci, Francesco Monni, Alessio Pierdicca "Tecniche di identificazione modale per l'analisi strutturale - L'evoluzione del comportamento dinamico di un edificio scolastico in cemento armato soggetto a miglioramento sismico". Università Politecnica delle Marche, Ancona. April 2017.
- [48] - Eleonora Bersano "Ricerca degli schemi strutturali di edifici storici e analisi del loro comportamento statico e dinamico". Università Di Bologna. 2009.
- [49] - Bo Wang, J.G. Teng, Laura De Lorenzis, Li-Min Zhou, Jinping Ou, Wei Jin f, K.T. Lau "Strain monitoring of RC members strengthened with smart NSM FRP bars". Elsevier. Construction and Building Materials 23 (2009).
- [50] - L.C. Hollaway "A review of the present and future utilisation of FRP composites in the civil infrastructure with reference to their important in-service properties". Elsevier. Construction and Building Materials 24 (2010).
- [51] - Carlo Rainieri, Giovanni Fabbrocino, Edoardo Cosenza "Identificazione dinamica automatica, problemi e prospettive di applicazione al monitoraggio strutturale in zona sismica". ResearchGate. Conference Paper · January 2009.
- [52] - Benjamin Torres, Ignacio Payá-Zaforteza, Pedro A. Calderón, Jose M. Adam "Analysis of the strain transfer in a new FBG sensor for Structural Health Monitoring". Elsevier. Engineering Structures 33 (2011).
- [53] - Andrea Ostinelli "Materiali fibrorinforzati per il consolidamento di strutture in calcestruzzo armato e per la realizzazione di giunti in strutture lignee". Politecnico Di Milano. 2011.
- [54] - Luca Facchini, Michele Betti, Luciano Galano, Lucia Sciarma, Andrea Vignoli "Sull'impiego dell'analisi dinamica in campo non lineare per lo studio degli edifici in muratura ordinaria soggetti ad azione sismica. Il confronto con una sperimentazione al vero". Bollettino ingegneri N.7 - 2011.
- [55] - X. Chapeleau, T. Sedran, L.-M. Cottineau, J. Cailliau, F. Taillade, I. Gueguen, J.-M. Henault "Study of ballastless track structure monitoring by distributed optical fiber sensors on a real-scale mockup in laboratory". Elsevier. Engineering Structures 56 (2013).
- [56] - Giulia Trabacchin "Tecniche di adeguamento sismico di elementi in cemento armato in fase di restauro". Università Degli Studi Di Padova. 2013.
- [57] - Damien Kinet, Patrice Mégret, Keith W. Goossen, Liang Qiu, Dirk Heider and Christophe Caucheteur "Fiber Bragg Grating Sensors toward Structural Health Monitoring in Composite Materials: Challenges and Solutions". Sensors. 23 April 2014.

- [58] - Nikos Pnevmatikos and Charis J. Gantes “*Actively and Semi-actively Controlled Structures Under Seismic Actions: Modeling and Analysis*”. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2015. M. Beer et al. (eds.), Encyclopedia of Earthquake Engineering, DOI 10.1007/978-3-642-35344-4.
- [59] - Alessandra Marini “*Il comportamento delle strutture in muratura sotto sisma - meccanismi di danno*”. Università degli Studi di Bergamo. Bergamo, giugno 2015.
- [60] - C. Rainieri, G. Fabbrocino, G. Manfredi, E. Cosenza “*L’analisi modale operativa per il monitoraggio strutturale in zona sismica: la torre della facoltà di ingegneria di Napoli*”. Università di Napoli Federico II. Università degli Studi del Molise.
- [61] - M. Demetgul, V.Y. Senyurek, R. Uyandik, I.N. Tansel, O. Yazicioglu “*Evaluation of the health of riveted joints with active and passive structural health monitoring techniques*”. Elsevier. Measurement 69 (2015).
- [62] - Raffaella Di Sante “*Fibre Optic Sensors for Structural Health Monitoring of Aircraft Composite Structures: Recent Advances and Applications*”. Department of Industrial Engineering - DIN, University of Bologna, Forlì 47121, Italy. Sensors. Published: 30 July 2015
- [63] - Albicini Laura “*Materiali compositi avanzati (frp - frg) classificazione e applicazioni nel restauro e ricostruzione post-sisma*”. Università Di Bologna. 2016.
- [64] - “*Indagine sperimentale sul consolidamento di solai a travetti tipo SAP*”. Politecnico di Torino. Leca – soluzioni leggere e isolanti.
- [65] - L. Binda, L. Gambarotta & S. Lagomarsino, C. Modena “*A multilevel approach to the damage assessment and the seismic improvement of masonry buildings in Italy*”.
- [66] - C. Rainieri, G. M. Verderame, Giovanni Fabbrocino, E. Cosenza, G. Manfredi “*La valutazione della risposta dinamica nel progetto di rinforzo sismico della Torre delle Nazioni, Mostra d’Oltremare*”. Università degli Studi Federico II di Napoli.
- [67] - Yonatan Stern, Yosef London, Eyal Preter, Yair Antman, Hilel Hagai Diamandi, Maayan Silbiger, Gadi Adler, Eyal Levenberg ID, Doron Shalev and Avi Zadok “*Brillouin Optical Correlation Domain Analysis in Composite Material Beams*”. sensor. 2 October 2017
- [68] - Rita B. Figueira “*Electrochemical Sensors for Monitoring the Corrosion Conditions of Reinforced Concrete Structures: A Review*”. Applied sciences. 10 November 2017.
- [69] - Monssef Drissi-Habti, Venkadesh Raman, Aghiad Khadour and Safiullah Timorian “*Fiber Optic Sensor Embedment Study for Multi-Parameter Strain Sensing*”. sensor. 23 March 2017.
- [70] - J.E. Woods, D.T. Lau, X. Bao, W. Li “*Measuring strain fields in FRP strengthened RC shear walls using a distributed fiber optic sensor*”. Elsevier. Engineering Structures 152 (2017).
- [71] - V. Memmoloa, N. Pasquinob, F. Riccia “*Experimental characterization of a damage detection and localization system for composite structures*”. Elsevier. Measurement 129 (2018).
- [72] - Wan Hong, Yuchen Jiang, Bing Li, Zheng Qin, Xiamin Hu “*Nonlinear parameter identification of timber-concrete composite beams using long-gauge fiber optic sensors*”. Elsevier. Construction and Building Materials 164 (2018).
- [73] - Alfredo Güemes, Antonio Fernández-López, Patricia F. Díaz-Maroto, Angel Lozano and Julian Sierra-Perez “*Structural Health Monitoring in Composite Structures by Fiber-Optic Sensors*”. sensor. 4 April 2018.
- [74] - Nilanjan Mitraa, AlakKumar Patraa, Shyamal Mondalb, Prasanta Kumar Dattab “*Interfacial delamination crack profile estimation in polymer foam-cored sandwich composites*”. Elsevier. Engineering Structures 189 (2019).

- [75] - JYung William Sasy Chan, Zhi Zhou, Wanqiu Liu and Jinping Ou “*OFBG-Based Smart Double-Skin Tubular Confined-Concrete Column with Basalt FRP-Steel Composite*”. sensor. 16 August 2019.
- [76] - Yi Bao, Ying Huang, Matthew S. Hoehler and Genda Chen “*Review of Fiber Optic Sensors for Structural Fire Engineering*”. sensor. 20 February 2019.
- [77] - Seon Yeol Lee, Huy Viet Le, Dong Joo Kim “*Self-stress sensing smart concrete containing fine steel slag aggregates and steel fibers under high compressive stress*”. Elsevier. Construction and Building Materials 220 (2019).
- [78] - José Trinidad Guillen Bonilla, Héctor Guillen Bonilla, Verónica María Rodríguez Betancourt, Antonio Casillas Zamora, María Eugenia Sánchez Morales, Lorenzo Gildo Ortiz and Alex Guillen Bonilla “*Signal Analysis, Signal Demodulation and Numerical Simulation of a Quasi-Distributed Optical Fiber Sensor Based on FDM/WDM Techniques and Fabry-Pérot Interferometers*”. sensor. 12 April 2019.
- [79] - Mohamed Saidi, Aron Gabor “*Experimental analysis of the tensile behaviour of textile reinforced cementitious matrix composites using distributed fibre optic sensing (DFOS) technology*”. Elsevier. Construction and Building Materials 230 (2020).
- [80] - Qiwen Qiu, Jihua Zhu, Jian-Guo Dai “*In-situ X-ray microcomputed tomography monitoring of steel corrosion in engineered cementitious composite (ECC)*”. Elsevier. Construction and Building Materials 262 (2020).
- [81] - Zhenbo Wang, Chang Liu, Jianping Zuo, Zishan Zhang, Yudong Han, Shihan Mana “*Monitoring and modeling the damage evolution in engineered cementitious composites subjected to sulfate attack through continuous ultrasonic measurements*”. Elsevier. Construction and Building Materials 262 (2020).
- [82] - Klajdi Toska, Flora Faleschini, Mariano Angelo Zanini, Lorenzo Hofer, Carlo Pellegrino “*Repair of severely damaged RC columns through FRCM composites*”. Elsevier. Construction and Building Materials. 16 November 2020.
- [83] - Christoph Kralovec and Martin Schagerl “*Review of Structural Health Monitoring Methods Regarding a Multi-Sensor Approach for Damage Assessment of Metal and Composite Structures*”. sensor. 4 February 2020.
- [84] - Qixiang Tang, Cong Du, Xingwei Wang, Tzuyang Yu “*Temperature and crack detection of steel rods using an all-optical photoacoustic ultrasound system*”. Elsevier. Construction and Building Materials 262 (2020).
- [85] - Yan Zhao, DianYin Hu, Meng Zhang, Wei Dai and Weifang Zhang “*The Location Monitoring of Fatigue Crack Damage by Using the Spectral Area Extracted from FBG Spectra*”. sensor. 22 April 2020
- [86] - Gao Maa, Cheng Wu, Hyeon-Jong Hwang, Bo Li “*Crack monitoring and damage assessment of BFRP-jacketed concrete cylinders under compression load based on acoustic emission techniques*”. Elsevier. Construction and Building Materials 272 (2021).
- [87] - Vanni Nicoletti, Davide Arezzo, Sandro Carbonari, Fabrizio Gara “*Dynamic monitoring of buildings as a diagnostic tool during construction phases*”. Elsevier. Journal of Building Engineering 46 (2022).
- [88] - Alessandro Zanini “*Analisi dei dati da emissione acustica per la valutazione del danneggiamento strutturale*”. Università Degli Studi Di Roma "Tor Vergata".

- [89] - M. Dolce M. Laterza A. Masi F.R. Telesca “*Criteri metodologici e soluzioni tecnologiche per l’applicazione dell’isolamento alla base all’adeguamento sismico di edifici in c.a.*”. Elsevier. Construction and Building Materials 262 (2020).
- [90] - Giovanni Fabbrocino, C. Rainieri, G. M. Verderame “*L’analisi dinamica sperimentale e il monitoraggio delle strutture esistenti*”. Università degli Studi del Molise. Università degli Studi “Federico II” di Napoli. Consorzio ReLUIS.
- [91] - Carlo Rainieri, Giovanni Fabbrocino “*Il periodo elastico delle torri in muratura: correlazioni empiriche per la previsione*”. Laboratorio di Dinamica Strutturale e Geotecnica StreGa – Università degli Studi del Molise. Via Duca degli Abruzzi, 86039 Termoli.

#### CONTROLLO DINAMICO DEI PONTI

- [92] - Z. Radosavljevid and O, Markovidc “*Some Foundation Stability Problems of the Railway Bridge over the Mala Rijeka*”. Rock Mechanics Felsmechanik Mecanique des Roche. April 12, 1976.
- [93] - Paolo Clemente, Francesco Marulo, Leonardo Lecce & Andrea Bifulco “*Experimental modal analysis of the Garigliano cable-stayed bridge*”. Elsevier. Soil Dynamics and Earthquake Engineering. 29 January 1998.
- [94] - ÁdaÂm KovaÂcs, Zsolt VöÂzvaÂry “*Structural parameter sensitivity analysis of cantilever-and bridge-type accelerometers*”. Elsevier. 27 October 2000.
- [95] - R C Tennyson, A A Mufti, S Rizkalla, G Tadros and B Benmokrane “*Structural health monitoring of innovative bridges in Canada with fiber optic sensors*”. ISIS Canada, A Network of Centres of Excellence, 227 Engineering Building, University of Manitoba, Winnipeg, Manitoba, Canada R3T 5V6. 15 September 2000.
- [96] - Darryll Pines and A Emin Aktan “*Status of structural health monitoring of long-span bridges in the United States*”. USA. 25 September 2002.
- [97] - Mostafiz R. Chowdhury\*, James C. Ray “*Accelerometers for bridge load testing*”. NDT&E International. Elsevier. NDT&E Internationa. 2003.
- [98] – Steve E. Watkins “*Smart bridges with fiber-optic sensor*”. Courtesy Of The University Of Missouri-Rolla. June 2003.
- [99] - C Cremona “*Dynamic monitoring applied to the detection of structural modifications: a high-speed railway bridge study*”. Laboratoire Central des Ponts et Chaussées, Paris, France. 25 June 2004.
- [100] - T.H.T. Chana, L. Yu, H.Y. Tam, Y.Q. Ni, S.Y. Liu, W.H. Chung, L.K. Cheng “*Fiber Bragg grating sensors for structural health monitoring of Tsing Ma bridge: Background and experimental observation*”. Elsevier. Engineering Structures. 27 October 2005.
- [101] - G. Kister, R.A. Badcock , Y.M. Gebremichael, W.J.O. Boyle, K.T.V. Grattan, G.F. Fernando, L. Canning “*Monitoring of an all-composite bridge using Bragg grating sensors*”. Elsevier. Construction and Building Materials. 18 September 2006.
- [102] - G. Kistera, D. Wintera, R.A. Badcock, Y.M. Gebremichael, W.J.O. Boyle, B.T. Meggitt, K.T.V. Grattan, G.F. Fernando “*Structural health monitoring of a composite bridge using Bragg grating sensors. Part 1: Evaluation of adhesives and protection systems for the optical sensors*”. Elsevier. Engineering Structures. 7 July 2006.

- [103] - X. Meng, A.H. Dodson, G.W. Roberts “*Detecting bridge dynamics with GPS and triaxial accelerometers*”. Elsevier. Engineering Structures. 23 April 2007.
- [104] - F. Necati Catbasa, Melih Susoy, Dan M. Frangopol “*Structural health monitoring and reliability estimation: Long span truss bridge application with environmental monitoring data*”. Elsevier. Engineering Structures. 6 March 2008.
- [105] - Christine Evans-Pughe “*bridge of sighs*”. comms monitoring. Engineering & Technology. 21 November - 4 December 2009.
- [106] - Ntotsios Evangelos “*Experimental Modal Analysis Using Ambient And Earthquake Vibrations: Theory, Software And Applications*”. Diploma in Mechanical Engineering, University of Thessaly, 2005.
- [107] - Vistasp M. Karbhari and Farhad Ansari “*Structural health monitoring of civil infrastructure systems*”. 2009.
- [108] - Gaetano De Pasquale, GluUa Bernardini, Pier Paolo Ricci, Carmelo Gentile “*Ambient Vibration Testing of Bridges by Non-Contact Microwave Interferometer*”. IEE A&ESYSTEMS MAGAZINE. 2008.
- [109] - Carlos Rodrigues, Carlos Félix, Armindo Lage, Joaquim Figueiras “*Development of a long-term monitoring system based on FBG sensors applied to concrete bridges*”. Elsevier. Engineering Structures. Portugal. 1 April 2010.
- [110] - André D. Orcesi, Dan M. Frangopol, Sunyong Kim “*Optimization of bridge maintenance strategies based on multiple limit states and monitoring*”. Elsevier. Engineering Structures. 24 November 2009.
- [111] - Ming Liu, Dan M. Frangopol, Kihyon Kwon “*Optimization of retrofitting distortion-induced fatigue cracking of steel bridges using monitored data under uncertainty*”. Elsevier. Engineering Structures. 9 August 2010.
- [112] - Hao Wang,a, Ai-qun Li, Jian Li “*Progressive finite element model calibration of a long-span suspension bridge based on ambient vibration and static measurements*”. Elsevier. Engineering Structures. 8 June 2010.
- [113] - Tyler Harms, Sahra Sedigh, and Filippo Bastianini “*Structural Health Monitoring of Bridges Using Wireless Sensor Networks*”. IEEE Instrumentation & Measurement Magazine. December 2010.
- [114] - X.H. Hea, X.G. Hua, Z.Q. Chen, F.L. Huang “*EMD-based random decrement technique for modal parameter identification of an existing railway bridge*”. Elsevier. Engineering Structures. 8 February 2011.
- [115] - Filipe Magalhães, A´lvvaro Cunha “*Explaining operational modal analysis with data from an arch bridge*”. Elsevier. Mechanical Systems and Signal Processing. 2011.
- [116] - Z.W. Chen, Y.L. Xua, Y. Xia, Q. Li c, K.Y. Wong “*Fatigue analysis of long-span suspension bridges under multiple loading: Case study*”. Elsevier. Engineering Structures. 29 September 2011.
- [117] - Reza Jafarkhani & Sami F. Masri “*Finite Element Model Updating Using Evolutionary Strategy for Damage Detection*”. Computer-Aided Civil and Infrastructure Engineering. 2011.
- [118] - Damian Nevers, Jian Zhao, Konstantine Sobolev, George Hanson “*Investigation of strain-sensing materials based on EM surface wave propagation for steel bridge health monitoring*”. Elsevier. Construction and Building Materials. 5 March 2011.

- [119] - Fanis Moschas, Stathis Stiros “*Measurement of the dynamic displacements and of the modal frequencies of a short-span pedestrian bridge using GPS and an accelerometer*”. Elsevier. Engineering Structures. 4 October 2010.
- [120] - T. NAGAYAMA, M. USHITA, Y. FUJINO “*Suspension Bridge Vibration Measurement Using Multihop Wireless Sensor Networks*”. Elsevier. Procedia Engineering. 2011.
- [121] - Hugo C. Gomeza, Paul J. Fanning, Maria Q. Fenga, Sungchil Lee “*Testing and long-term monitoring of a curved concrete box girder bridge*”. Elsevier. Engineering Structures. 7 July 2011.
- [122] - D.M. Siringoringo, Y. Fujino, T. Nagayama, And H.Wenzel “*Vibration Characteristics of an Overpass Bridge During Full-Scale Destructive Testing*”. Elsevier. Procedia Engineering 14 (2011).
- [123] - E.Köppe, M.Bartholmai “*Wireless Sensor Network with Temperature Compensated Measuring Technology for Long-Term Structural Health Monitoring of Buildings and Infrastructures*”. Elsevier. Procedia Engineering 25 (2011)
- [124] - Pengzhen Lu, Xu Xie, Changyu Shao “*Experimental study and numerical analysis of a composite bridge structure*”. Elsevier. Construction and Building Materials. 16 January 2012.
- [125] - Carlos Rodrigues, Filipe Cavadas, Carlos Félix, Joaquim Figueiras “*FBG based strain monitoring in the rehabilitation of a centenary metallic bridge*”. Elsevier. Engineering Structures. 13 July 2012.
- [126] - Bruno J. Afonso Costa, Joaquim A. Figueiras “*Fiber optic based monitoring system applied to a centenary metallic arch bridge: Design and installation*”. Elsevier. Engineering Structures. 13 July 2012.
- [127] - Bruno J. Afonso Costa, Joaquim A. Figueiras “*Fiber optic based monitoring system applied to a centenary metallic arch bridge: Design and installation*”. Elsevier. Engineering Structures. 13 July 2012.
- [128] - D. Ribeiro, R. Calçada, R. Delgado, M. Brehm, V. Zabel “*Finite element model updating of a bowstring-arch railway bridge based on experimental modal parameters*”. Elsevier. Engineering Structures. 5 April 2012.
- [129] - K. Alten, R. Flesch “*Finite element simulation prior to reconstruction of a steel railway bridge to reduce structure-borne noise*”. Elsevier. Engineering Structures. 7 January 2012.
- [130] - M.H. El Ouni, N. Ben Kahla, A. Preumont “*Numerical and experimental dynamic analysis and control of a cable stayed bridge under parametric excitation*”. Elsevier. Engineering Structures. 2 August 2012.
- [131] - X.H. He, X.W. Sheng, A. Scanlon, D.G. Linzell, X.D. Yu “*Skewed concrete box girder bridge static and dynamic testing and analysis*”. Elsevier. Engineering Structures. 3 March 2012.
- [132] - X.W. Y, Y.Q. Ni, K.Y. Wong, J.M. Ko “*Statistical analysis of stress spectra for fatigue life assessment of steel bridges with structural health monitoring data*”. Elsevier. Engineering Structures. 24 July 2012.
- [133] - Nonthachart Kulprapha, Pennung Warnitchai “*Structural health monitoring of continuous prestressed concrete bridges using ambient thermal responses*”. Elsevier. Engineering Structures. 22 March 2012.
- [134] - Piotr Omenzetter, Sherif Beskhyroun, Faisal Shabbir, Ge-Wei Chen, Xinghua Chen, Shengzhe Wang, Alex Zha “*FORCED AND AMBIENT VIBRATION TESTING OF FULL SCALE BRIDGES*”. A report submitted to Earthquake Commission Research Foundation (Project No. UNI/578). October 2013.

- [135] – Mbusiness Julio F. Davalos An Chen Pizhong Qiao “*FRP DECK AND STEEL GIRDER BRIDGE SYSTEMS Analysis and Design*”. 2013 by Taylor & Francis Group.
- [136] - Yasser Khodair and Sophia Hassiotis “*Numerical and experimental analyses of an integral bridge*”. International Journal of Advanced Structural Engineering 2013.
- [137] - Ayaho Miyamoto, Minoru Motoshita and Joan R Casas “*Development of an integrated remote monitoring technique and its application to para-stressing bridge system*”. International Journal of Advanced Structural Engineering 2013.
- [138] - Wai-Fah Chen and Lian Duan “*Bridge Engineering Handbook, Second Edition*”. Taylor & Francis Group. 2014.
- [139] - Chiara Bedon a, Antonino Morassi “*Dynamic testing and parameter identification of a base-isolated bridge*”. Elsevier. Engineering Structures. 11 January 2014.
- [140] - V. Zanjani Zadeh • A. Patnaik “*Finite element modeling of the dynamic response of a composite reinforced concrete bridge for structural health monitoring*”. ORIGINAL RESEARCH. 2014.
- [141] - Corrado Chisari, Chiara Bedon, Claudio Amadio “*Dynamic and static identification of base-isolated bridges using Genetic Algorithms*”. Elsevier. Engineering Structures. 24 August 2015.
- [142] - MM.T. Yarnold, F.L. Moon “*Temperature-based structural health monitoring baseline for long-span bridges*”. Elsevier. Engineering Structures. 17 January 2015.
- [143] - Houzeng Han, Jian Wang, Xiaolin Meng, Hua Liu “*Analysis of the dynamic response of a long span bridge using GPS/accelerometer/anemometer under typhoon loading*”. Elsevier. Engineering Structures. 26 May 2016.
- [144] - Jinlong Xu, Yongkang Dong, Zhaohui Zhang, Shunlong Li, Shaoyang He and Hui Li “*Full scale strain monitoring of a suspension bridge using high performance distributed fiber optic sensors*”. Measurement Science and Technology. 14 November 2016.
- [145] - Knut Andreas Kvåle, Ole Øiseth, Anders Rønning “*Operational modal analysis of an end-supported pontoon bridge*”. Elsevier. Engineering Structures. 7 July 2017.
- [146] - B. Torres Górriz | P. Rinaudo | P. A. Calderón García “*Comparison between point and long-gage FBG-based strain sensors during a railway bridge load test*”. Universitat Politècnica de València, Instituto de Ciencia y Tecnología del Hormigón, Valencia, Spain. Strain. 5 April 2017.
- [147] - J.M.W. Brownjohn “*Ambient vibration re-testing and operational modal analysis of the Humber Bridge*”. Department of Civil & Structural Engineering, University of Sheffield, UK. Engineering Structures, 32 (8), pp. 2003-2018
- [148] - M.H. El Ouni, N. Ben Kahla, A. Preumont “*Double bridge circuit for self-validated structural health monitoring strain measurements*”. Wiley strain. J.dos Reis, C. Oliveria Costa, J. Sa da Costa. 25 April 2018.
- [149] - Abbas Zangeneh, Christoffer Svedholm, Andreas Andersson, Costin Pacoste, Raid Karoumi “*Identification of soil-structure interaction effect in a portal frame railway bridge through full-scale dynamic testing*”. Elsevier. Engineering Structures. 2018.
- [150] - Chengxin Yu<sup>1</sup>, Guojian Zhang, Xiaodong Liu, Li Fan and Hua Hai “*Monitoring Bridge Dynamic Deformation in Vibration by Digital Photography*”. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science. 2018.

- [151] - Pan Zeng and Ronghui Wang “*Long-term Bridge Deflection Monitoring Using a Connected Pipe System Considering Structural Vibration*”. International Conference on Civil and Hydraulic Engineering. 2018.
- [152] - Swagato Das, Purnachandra Saha “*A review of some advanced sensors used for health diagnosis of civil engineering structures*”. School of Civil Engineering, KIIT, Deemed to be University, Bhubaneswar, Odisha, India. Elsevier. Measurement. 2018.
- [153] - A N Sargsyan, G G Sargsyan, A A Sargsyan “*Bridge health monitoring: the Davtashen bridge example in Yerevan*”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 698 (2019).
- [154] - Wen-Jun Cao, Chan Ghee Koh, I.F.C. Smith “*Enhancing static-load-test identification of bridges using dynamic data*”. Elsevier. Engineering Structures 186 (2019).
- [155] - Congrui Zhang, Yongxiang Ge, Zhongchun Hu, Ke Zhou, Gaofeng Ren, Xiaodong Wang “*Research on deflection monitoring for long span cantilever bridge based on optical fiber sensing*”. Elsevier. Optical Fiber Technology. 2019.
- [156] - Marco Gatti “*Structural health monitoring of an operational bridge: A case study*”. Elsevier. Engineering Structures 195 (2019).
- [157] - Wan Hong, Zhicheng Lv, Xiaoyu Zhang, Xiamin Hu “*Displacement shape measurement of continuous beam bridges based on long-gauge fiber optic sensing*”. Elsevier. Optical Fiber Technology 56 (2020).
- [158] - Tianyu Wu , Wenliang Qiu “*Dynamic analyses of pile-supported bridges including soil-structure interaction under stochastic ice loads*”. Elsevier. Soil Dynamics and Earthquake Engineering 128 (2020).
- [159] - Fabrizio Gara, Vanni Nicoletti, Sandro Carbonari, Laura Ragni, Andrea Dall’Asta “*Dynamic monitoring of bridges during static load tests: influence of the dynamics of trucks on the modal parameters of the bridge*”. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2020).
- [160] - Kuladeep Chilamkuri, Venkatesh Kone “*Monitoring of varadhi road bridge using accelerometer sensor*”. Elsevier. Materials Today: Proceedings 33 (2020).
- [161] - Qiling Zou, Kavi Pool and Suren Chen “*Performance of suspension bridge hangers exposed to hazardous material fires considering wind effects*”. Advances in Bridge Engineering (2020) 1:2.
- [162] - Guang-Dong Zhou, Ting-Hua Yi, Wen-Jie Li, Ji-Wei Zhong and Guan-Hua Zhang “*Standardization construction and development trend of bridge health monitoring systems in China*”. Advances in Bridge Engineering (2020) 1:13
- [163] - Luna Ngeljaratan, Mohamed A. Moustafa “*Structural health monitoring and seismic response assessment of bridge structures using target-tracking digital image correlation*”. Elsevier. Engineering Structures 213 (2020).
- [164] - Xiang Xu, Yuan Ren, Qiao Huang, Zi-Yuan Fan<sup>1</sup>, Zhao-Jie Tong, Wei-Jie Chang and Bin Liu “*Anomaly detection for large span bridges during operational phase using structural health monitoring data*”. Smart Materials and Structures 29 (2020).
- [165] - Hassan Sarmadi, Alireza Entezami, Masoud Salar, Carlo De Michele “*Bridge health monitoring in environmental variability by new clustering and threshold estimation methods*”. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2021).
- [166] - Qiang Mao, Matteo Mazzotti, Mustafa Furkan, Aaron Hicks, Ivan Bartoli, Emin Aktan “*Characterization of bridge substructures explored by leveraging structural identification of a scaled bridge model*”. Elsevier. Engineering Structures 246 (2021)

- [167] - Sam Cocking, Haris Alexakis, Matthew DeJong “*Distributed dynamic fibre-optic strain monitoring of the behaviour of a skewed masonry arch railway bridge*”. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2021).
- [168] - Jian Gao, Dongming Li, Yafei Feng, Lijun Wan and Guojun Wu “*Application and Research of Health Monitoring System of Xiangshan Port Bridge*”. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 719 (2021)
- [169] - Jian Guo, Cheng-Jie Hu, Min-Jun Zhu, Yi-Qing Ni “*Monitoring-based evaluation of dynamic characteristics of a long span suspension bridge under typhoons*”. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2021)
- [170] - Mohammad Abedin , Armin B. Mehrabi “*Health monitoring of steel box girder bridges using non-contact sensors*”. Elsevier. Structures 34 (2021)
- [171] - Jeong-Tae Kima, Jae-Hyung Park, Dong-Soo Honga, Woo-Sun Park “*Hybrid health monitoring of prestressed concrete girder bridges by sequential vibration-impedance approaches*”. Elsevier. Engineering Structures 32 (2010)
- [172] - X.X. Cheng, Z.Y. Song “*Modal experiment and model updating for Yingzhou Bridge*”. Elsevier. Structures 32 (2021).
- [173] - Yanbo Niu, Yun Ye, Weijian Zhao, Jiangpeng Shu “*Dynamic monitoring and data analysis of a long-span arch bridge based on high-rate GNSS-RTK measurement combining CF-CEEMD method*”. Journal of Civil Structural Health Monitoring (2021).
- [174] - Pietro Palumbo “*Monitoraggio strutturale ed identificazione dinamica: il caso studio del ponte Bologna a Torino*”. Dipartimento di Ingegneria Strutturale, Edile e Geotecnica. Politecnico di Torino. Torino. 2020-2021
- [175] - Carlo Rainieri, Matilde A. Notarangelo and Giovanni Fabbrocino “*Experiences of Dynamic Identification and Monitoring of Bridges in Serviceability Conditions and after Hazardous Events*”. Infrastructures. Italia. 16 October 2020.
- [176] - Carlo Rainieri, Giovanni Fabbrocino “*Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures*”. ISBN 978-1-4939-0766-3.
- [177] - P. Galvina,d, A. Romero, E. Moliner, G. De Roeck, M.D. Martínez-Rodrigo “*On the dynamic characterisation of railway bridges through experimental testing*”. Elsevier. Engineering Structures 226 (2021)
- [178] - Emad Norouzzadeh Tochaei, Zheng Fang, Todd Taylor, Saeed Babanajad, Farhad Ansari “*Structural monitoring and remaining fatigue life estimation of typical welded crack details in the Manhattan Bridge*”. Elsevier. Engineering Structures 231 (2021)
- [179] - Tong Wu, Liang Tang, Shuai Shao, Xiangyu Zhang, Yijun Liu, Zhixiang Zhou, Xiaolei Qi “*Accurate structural displacement monitoring by data fusion of a consumer-grade camera and accelerometers*”. Elsevier. Engineering Structures 262 (2022).
- [180] - Zhaoyu Ma, Fuyou Xu, Miaomin Wang, Mingjie Zhang, Hua Zeng “*Design, fabrication, and dynamic testing of a large-scale outdoor aeroelastic model of a long-span cable-stayed bridge*”. Elsevier. Engineering Structures 256 (2022).
- [181] - Zhiguo He, Wentao Li, Hadi Salehi, Hao Zhang, Haiyi Zhou, Pengcheng Jiao “*Integrated structural health monitoring in bridge engineering*”. Elsevier. Automation in Construction 136 (2022).

- [182] - Gen Kondo “Review of Development on Convolution Neural Network Based Structural Health Monitoring on Bridges”. 2021 The 10th International Conference on Engineering Mathematics and Physics. Journal of Physics: Conference Series 2014 (2021).
- [183] - Mao Lin, Lin Xu, Dai Li “Strain Data Analysis of Small and Medium Bridge Structures Based on Finite Element”. 2020 4th International Workshop on Renewable Energy and Development (IWRED 2020). IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 510 (2020).
- [184] - A. Alijani, M. Kh. Abadi, S. Ghyasvand “Numerical and experimental analysis of intact and cracked railway bridges”. Elsevier. Structures 38 (2022).
- [185] - Siti Shahirah Saidin, Sakhiah Abdul Kudus, Adiza Jamadin, Muhamad Azhan Anuar, Norliyati Mohd Amin, Zainah Ibrahim, Atikah Bt Zakaria, Kunitomo Sugiura “Operational modal analysis and finite element model updating of ultra-high-performance concrete bridge based on ambient vibration test”. Elsevier. Case Studies in Construction Materials 16 (2022).
- [186] - Nurdan Memisoglu Apaydin, A. Can Zulfikar, Oguzhan Cetindemir “Structural health monitoring systems of long-span bridges in Turkey and lessons learned from experienced extreme events”. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 16 January 2022.
- [187] - Woo Hyun Ban, Jong Wan Hu, and Mosbeh R. Kaloop “Prestressed Continuous Bridge Evaluation using Structural Health Monitoring System”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 473 (2019).
- [188] - Qingkai Xiao, Yiping Liu, Licheng Zhou, Zejia Liu, Zhenyu Jiang, Liqun Tang “Reliability analysis of bridge girders based on regular vine Gaussian copula model and monitored data”. Elsevier. Structures 39 (2022).
- [189] - Jing-xian SHI Jiang FAN “Benchmark model correction of monitoring system based on Dynamic Load Test of Bridge”. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 128 (2018).
- [190] - Jing xian SHI, Xun LIU and Yuan YUE “Current Situation and Trend Analysis of Health Monitoring System for Continuous Rigid Frame Bridges”. IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science 295 (2019).
- [191] - N Sinsamutpadung and E Sasaki “Strain-based Evaluation of Bridge Monitoring using Numerical Model Analysis”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 639 (2019).
- [192] - Ana Fernandez-Navamuel, Diego Zamora-Sánchez, Ángel J. Omella, David Pardo, David Garcia-Sanchez, Filipe Magalhães “Supervised Deep Learning with Finite Element simulations for damage identification in bridges”. Engineering Structures 257 (2022).
- [193] - Eryu Zhu Zhengwei Bai Li Zhu, Yujie Li “Research on bridge structure SAM based on real-time monitoring”. Journal of Civil Structural Health Monitoring. 25 March 2022.
- [194] - Kleidi Islami, Giovanni Tecchio, Claudio Modena “Structural life extension by modal analysis and automatic damage control during SHM of deteriorated strategic bridges.”. Department of Structural Health Monitoring, Mageba sa, Bulach, Switzerland. Department of Civil, Environmental and Architectural Engineering, University of Padua, Padua, Italy
- [195] - A. Cabboi, C. Gentile, A. Saisi “Vibration-based SHM of a centenary bridge: a comparative study between two different automated OMA techniques”. Department of Civil and Environmental Eng. and Architecture, University of Cagliari, Piazza d'Armi, 09123 Cagliari, Italy. Department of Architecture, Built environment and Construction Engineering (ABCE), Politecnico di Milano.
- [196] - Qingkai Xiao, Yiping Liu, Licheng Zhou, Zejia Liu, Zhenyu Jiang, Liqun Tang “Reliability analysis of bridge girders based on regular vine Gaussian copulamodel and monitored data”. Elsevier. Structures 39 (2022).

[197] - Woo Hyun Ban, Jong Wan Hu and Mosbeh R. Kaloop “Prestressed Continuous Bridge Evaluation using Structural Health Monitoring System”. IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 473 (2019).

[198] - I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab s.r.l., TOD System s.r.l. “REPORT D.1.1 - Stato dell’arte e progettazione”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”. 2022.

[199] - I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab s.r.l., TOD System s.r.l. “REPORT D.3.1 – Piano dei Test”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”. 2022.

[200] - I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab S.r.l., TOD System s.r.l. “REPORT D.3.2 - Test e validazione”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”. 2022.

# PROPOSTA DI SISTEMA AUTODIAGNOSTICANTE INTELLIGENTE

G. Porco \* - L. Bonanno \*\* - F. Forestieri\*\* - R. Calbi\*\*\*

\*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria.

[giacinto.porco@unical.it](mailto:giacinto.porco@unical.it)

\*\*Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria.

[info@sismlab.it](mailto:info@sismlab.it)

[f.forestieri@sismlab.it](mailto:f.forestieri@sismlab.it)

[l.bonanno@sismlab.it](mailto:l.bonanno@sismlab.it)

\*\*\*I.Ca.Ro. s.r.l., Via Lucrezia della Valle c/o B. C. "Le Aquile", Catanzaro, 88100, Italia.

## SOMMARIO

Il presente articolo si inquadra nel contesto del Progetto *Sis.Mo.Co.* e restituisce nello specifico la proposta di un'architettura autodiagnosticante intelligente per il monitoraggio e controllo in campo dinamico delle strutture dell'ingegneria civile, con particolare riguardo ai ponti. Il progetto di ricerca, denominato “*Progetto R&S Sis.Mo.Co. - Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell'ingegneria civile*”, muove dall'esigenza dei tecnici del settore di operare con strumentazioni di agile utilizzo per garantire una ampia accessibilità al monitoraggio ed al controllo delle strutture e delle infrastrutture civili anche a soggetti non specializzati.

Il lavoro di ricerca *Sis.Mo.Co.* avviato da un team di tecnici ed aziende fornitrici, in particolare dai partners I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab s.r.l., TOD System s.r.l. è stato finalizzato ad individuare un sistema di monitoraggio intelligente per cui sia possibile studiare tramite procedura automatizzata il comportamento dinamico globale e/o locale di un'opera ed effettuare la verifica, con emissione di diagnosi, delle membrature in condizioni di esercizio o a valle di eventi singolari, quali sisma o condizioni di carico non previste e non prevedibili., e altresì per validare l'efficacia degli interventi di consolidamento eseguiti su strutture non rispondenti alle richieste normative.

Il sistema autodiagnosticante intelligente proposto, rientra nel campo dei sistemi di monitoraggio e controllo per le verifiche di sicurezza e di efficienza di strutture dell'ingegneria civile, in particolare, per i ponti, edifici e per opere o parti strutturali in acciaio quali le catene di rinforzo presenti nei beni soggetti a tutela artistica che, a fronte di condizioni di danneggiamento strutturale o perdite di consistenza, mostrano comportamenti dinamici diversi da quelli attesi da un elemento integro.

## 1. INTRODUZIONE

Dallo studio sullo stato dell'arte in ambito di sistemi di monitoraggio e controllo strutturale, effettuato nel precedente articolo del volume, è emerso chiaramente come le metodologie di analisi presenti in letteratura e in commercio sono limitate dal fatto che pur impiegando una specifica strumentazione di monitoraggio non forniscono una guida di supporto alle decisioni da intraprendere, demandando l'assunzione di decisioni ad esclusivo appannaggio di una o più figure

tecniche professionali altamente specializzate e con esperienza in settori multidisciplinari. In questo caso potremmo dire che la tecnologia non è combinata con la tecnica. La richiesta di un'alta specializzazione da parte dei tecnici coinvolti nel processo di controllo costituisce il principale motivo dell'attuale bassa diffusione dei sistemi attuali per il monitoraggio e controllo di opere civili. Si è constatato come i sistemi attuali offrono la sola possibilità di acquisire i dati della struttura osservata, ma per ottenere risultati utili il solo sistema di monitoraggio non è sufficiente. Infatti, per ottenere una opportuna diagnosi sullo stato di sicurezza della struttura, è necessario che i dati sperimentali acquisiti vengano trattati numericamente ed interpretati da una o più figure tecniche professionali altamente specializzate e con esperienza in più campi, quali analisi strutturale, modellazione agli elementi finiti, analisi delle applicazioni sperimentali, risoluzione di problematiche di tipo informatico e di trasmissione dei dati, elaborazione ed interpretazione dei dati.

Altro aspetto avverso emerso dallo studio dei sistemi ad oggi disponibili è stato quello della bassa affidabilità dei dati sperimentali acquisiti e di conseguenza dei risultati ottenuti a valle delle successive manipolazioni matematiche. Questo è dovuto ad una non perfetta sincronizzazione dei rilevatori e quindi agli errori di sfasamento tra le misurazioni che inficiano il successivo trattamento numerico del dato sperimentale acquisito.

Il sistema intelligente proposto, come vedremo nelle successive sezioni, prevede due elementi costituenti principali, ovvero l'impiego di una rete di sensori dedicati e modulabili in frequenza, con i quali si intende garantire una sincronizzazione più accurata, e la disponibilità di un software autodiagnosticante, che automatizzi le fasi di elaborazione ed interpretazione del dato sperimentale, in modo da fornire all'utilizzatore finale messaggi semplici di allarme o di allerta. Questo sarà reso possibile integrando ai dispositivi fisici di monitoraggio uno specifico software, in grado di gestire tutti quegli aspetti decisionali, intesi come azioni da intraprendere sulla struttura (ad esempio se intervenire o no per mettere in sicurezza la struttura osservata), senza che sia necessaria l'analisi da parte di soggetti con elevata professionalità ed esperienza. L'obiettivo è quello di disporre di un sistema che, sulla base delle acquisizioni dei dati sperimentali rilevati su di una infrastruttura, sia in grado di fornire decisioni in merito alle azioni da intraprendere per la messa in sicurezza della struttura stessa, senza l'ausilio di figure tecniche di alta professionalità e rendere così tali sistemi di controllo accessibili ad una più ampia pluralità di figure professionali e di contesti applicativi.

Con l'impiego di sensori wireless dedicati e modulabili in frequenza si vuole inoltre superare il problema della sincronizzazione e consentire di analizzare sia modi globali che locali anche per materiali e rigidità diverse.

Come schematizzato in figura (1), il sistema autodiagnosticante intelligente proposto è composto da due parti principali interagenti:

- una parte costituita da una rete di unità di monitoraggio wireless posizionate su specifici punti della struttura osservata (nello specifico un ponte) e avente come funzione principale l'acquisizione dei dati sperimentali di interesse della struttura stessa;
- una parte costituita dal software autodiagnosticante che, sulla base dei dati sperimentali acquisiti dalla rete di unità di monitoraggio, ha come funzione principale l'esecuzione di una opportuna analisi finalizzata all'autodiagnosi della struttura osservata per stabilire le azioni di intervento.

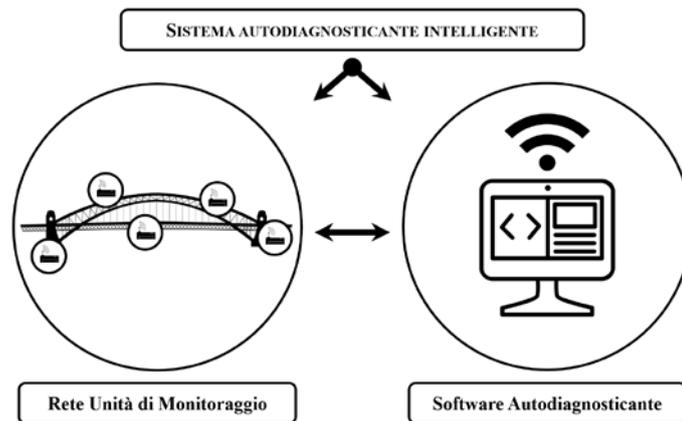


fig.1 – Schematizzazione delle parti costituenti il sistema autodiagnostico intelligente.

È opportuno specificare che ogni singola unità di monitoraggio sarà un sistema a sé stante in grado di svolgere una serie di operazioni, grazie all'esecuzione di uno specifico software di gestione sviluppato e installato al suo interno (edge computing). Invece, il software autodiagnostico sviluppato sarà installato su di una unità esterna, ovvero un computer, su cui svolgerà le operazioni richieste per l'autodiagnosi della struttura osservata e gestirà opportunamente ogni singola unità di monitoraggio presente, come sarà descritto successivamente (fog computing).

Queste parti saranno interagenti tra loro, ovvero il computer sarà in grado di comunicare a distanza e senza cavi con ogni singola unità di monitoraggio; quindi da questo punto di vista l'intero sistema autodiagnostico intelligente proposto potrà essere inteso come un sistema master-slave integrato, dove il sistema master è rappresentato dal computer su cui è installato ed opera il software autodiagnostico, mentre i sistemi slave sono rappresentati da ogni singola unità di monitoraggio presente.

Di seguito si espongono nel dettaglio le parti costituenti il prototipo di sistema intelligente, per poi passare alla descrizione del processo autodiagnostico in tutte le sue fasi.

## 2. ARCHITETTURA DEL PROTOTIPO DI SISTEMA

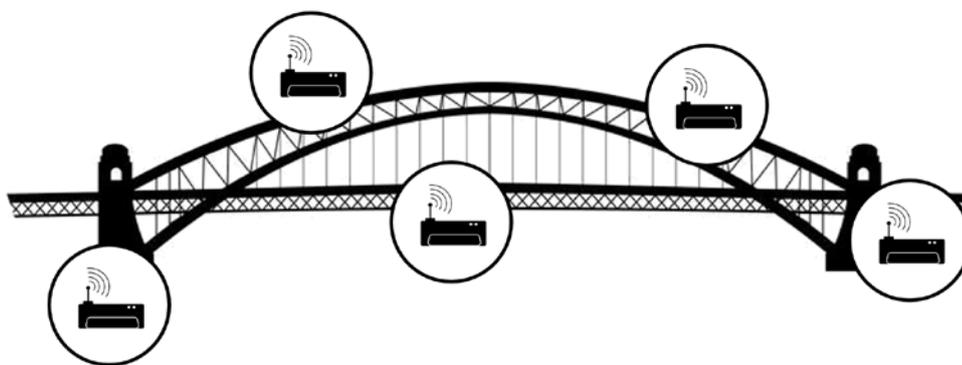
Il sistema autodiagnostico intelligente proposto, ha come obiettivo quello di fornire delle indicazioni decisionali sulle azioni da intraprendere per la salvaguardia di opere dell'ingegneria civile, attraverso una procedura automatizzata, resa possibile grazie all'utilizzo di una rete di unità di monitoraggio wireless (sensori), e dall'utilizzo di uno specifico software autodiagnostico sviluppato ad hoc.

Le singole unità di monitoraggio dinamico, saranno posizionate in specifici punti della struttura osservata e avranno il compito di acquisire dati sperimentali utili a definire il comportamento dinamico della stessa.

Il software autodiagnostico sviluppato sarà in grado di fornire, in maniera automatizzata, utili indicazioni decisionali quali, la scelta dei punti da osservare, i punti di installazione dei sensori e di interpretare i dati opportunamente elaborati che consentiranno di individuare potenziali condizioni di rischio, su cui successivamente intraprendere azioni di rinforzo o anche semplicemente di limitazione all'uso della struttura monitorata.

La parte relativa alla rete di unità di monitoraggio wireless è fisicamente costituita da una serie di dispositivi senza cavi il cui compito principale è quello di acquisire dati sperimentali di interesse sulla struttura osservata in corrispondenza dei punti della stessa su cui sono posizionati.

Le singole unità di monitoraggio saranno posizionate, vedi figura (2), in punti ben precisi sulla struttura da monitorare. Come sarà descritto nella sezione successiva, il numero e le posizioni delle unità di monitoraggio saranno indicate dal software autodiagnosticante a seguito di una analisi preliminare svolta con modellatori agli elementi finiti sulla struttura oggetto di analisi che genereranno dati rappresentativi del comportamento dinamico dell'opera. Con la disponibilità dei dati noti, ossia geometrie, rigidzze, frequenze e modi di vibrare globali e locali, il sistema autodiagnosticante fornirà ai tecnici una indicazione sui punti rappresentativi su cui installare i rilevatori con relativi settaggi delle frequenze di campionamento da impiegare per ogni rilevatore.



*fig.2 – Schematizzazione della rete di unità di monitoraggio, con posizionamento delle singole unità in corrispondenza di specifici punti della struttura osservata.*

Le singole unità di monitoraggio non sono semplici sensori wireless, ma sono veri e propri sistemi che oltre ad acquisire i dati sperimentali di interesse possono eseguire operazioni di elaborazione dati, salvataggio dati e comunicazione dati con unità esterne.

Ciascuna unità di monitoraggio, come schematizzato in figura (3), contiene al suo interno una serie di componenti elettroniche quali:

- Un sensore in grado di eseguire la misurazione del dato sperimentale di interesse. Per il sistema autodiagnosticante intelligente proposto il fenomeno di interesse è rappresentato dalla micro-vibrazione della struttura. Ogni singola unità di monitoraggio, acquisisce i valori temporali dell'oscillazione meccanica (ovvero uno spostamento spaziale), in termini di accelerazione dell'oscillazione (che tecnicamente rappresenta la derivata temporale seconda dello spostamento spaziale stesso), nel punto della struttura in cui è posizionata l'unità di monitoraggio. Quindi, per il sistema autodiagnosticante intelligente proposto il dato sperimentale di interesse è rappresentato da una accelerazione. I valori della micro-vibrazione sono acquisiti grazie ad un sensore di accelerazione, presente all'interno di ciascuna unità di monitoraggio, che misura appunto l'accelerazione della vibrazione meccanica in corrispondenza del punto della struttura osservata in cui è posizionata la singola unità di monitoraggio;
- una memoria in grado di consentire l'archiviazione in locale dei dati sperimentali acquisiti durante le misurazioni eseguite. Tale memoria è un elemento estraibile della unità di

monitoraggio e quindi può anche essere facilmente rimossa per consentire l'accesso ai dati sperimentali archiviati;

- un modulo di comunicazione per grandi distanze in grado di consentire la ricezione, senza cavi, dei dati proveniente da un sistema satellitare GPS. Tale modulo, come sarà descritto nella sezione successiva, è utilizzato per consentire la sincronizzazione temporale delle misurazioni acquisite tra tutte le unità di monitoraggio presenti nella rete;
- un modulo di comunicazione per brevi/medie distanze in grado di consentire la ricezione/trasmisione, senza cavi, dei dati/direttive proveniente da dispositivi esterni alla rete. Tale modulo, come sarà descritto nella sezione successiva, è utilizzato per consentire la comunicazione tra l'unità di monitoraggio e il computer master su cui è presente il software autodiagnosticante;
- un microprocessore che rappresenta la componente di governo di ogni singola unità di monitoraggio. Questo elemento ha il compito principale di gestire e coordinare tra loro tutte le componenti elettroniche presenti all'interno dell'unità di monitoraggio. In particolare, può permettere:
  - la comunicazione tra il sensore e la memoria nell'unità di monitoraggio, in modo da consentire l'archiviazione in locale dei dati sperimentali acquisiti;
  - la gestione tra moduli di comunicazione di ogni singola unità di monitoraggio e le unità esterne (ovvero i satelliti GPS e il computer master);
  - l'analisi dei dati sperimentali acquisiti per avviare specifiche attività operative, come sarà descritto nella sezione successiva.

Affinché queste operazioni possano essere eseguite dal microcontrollore, su di esso è installato un opportuno software di gestione (firmware) sviluppato solo per consentire l'esecuzione delle operazioni richieste a livello della singola unità di monitoraggio;

- una batteria in grado di alimentare opportunamente e in maniera autonoma l'unità di monitoraggio.

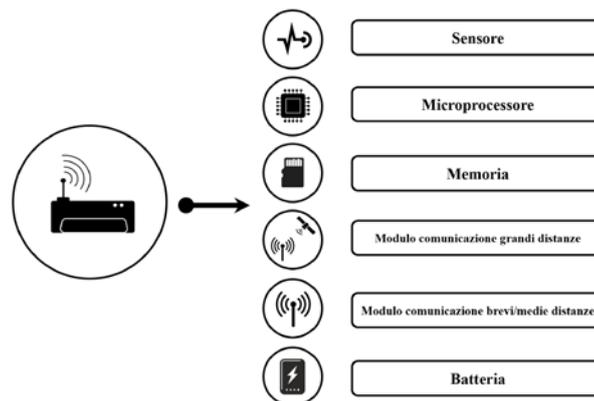
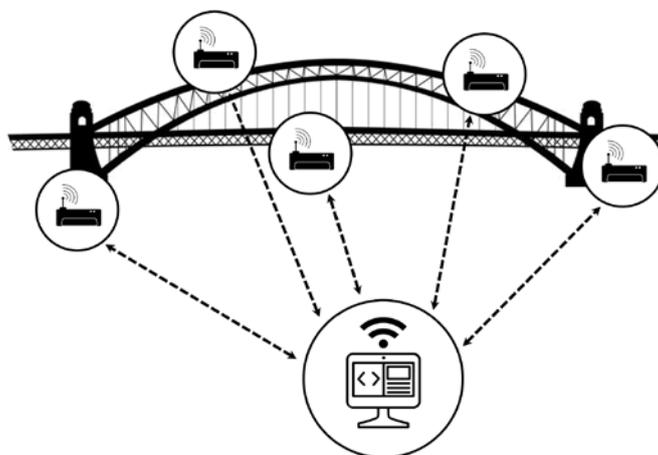


fig.3 – Schematizzazione componenti interne di ogni singola unità di monitoraggio.

È utile sottolineare il fatto che ciascuna unità di monitoraggio può essere settata in modo da avere una specifica frequenza di acquisizione dei dati sperimentali; quindi le diverse unità di monitoraggio presenti sulla struttura osservata possono eseguire acquisizioni con frequenze di campionamento diverse. Questo perché una struttura civile, come un ponte, essendo una struttura complessa, ovvero costituita da parti di diversa natura, sulla base della zona interessata alla misura sarà necessario acquisire ad una specifica frequenza (o range di frequenze) per formulare una

corretta autodiagnosi. Il valore della frequenza di acquisizione con cui una specifica unità di monitoraggio acquisisce i dati sperimentali in corrispondenza della zona in cui è posizionata viene stabilito, come sarà descritto nella sezione successiva, dal software autodiagnosticante sulla base di un'analisi preliminare della struttura osservata. Il valore di frequenza di campionamento non è l'unico parametro che può essere settato dal software autodiagnosticante, infatti, esso può impostare su ciascuna unità di monitoraggio uno specifico parametro di soglia, legato all'intensità dell'accelerazione misurata, utile per la gestione della modalità di trasmissione dei dati sperimentali acquisiti tra le unità di monitoraggio e il computer master su cui è presente il software autodiagnosticante; anche questo aspetto sarà descritto nella sezione successiva.

Come specificato in precedenza, il software autodiagnosticante è fisicamente installato su di un dispositivo esterno, ovvero un computer master, comunque posizionato in loco. Questo computer master possiede anche un modulo di trasmissione dati per consentire la comunicazione a distanza, e senza cavi, con ciascuna singola unità di monitoraggio slave, installate sulla struttura osservata; tale situazione è schematizzata in figura (4). Come sarà descritto nella sezione successiva, la comunicazione tra il computer master e una generica unità di monitoraggio slave non è limitata alla sola trasmissione dati, ma il computer master può anche inviare specifiche direttive e parametri di settaggio ad una specifica unità di monitoraggio sulla base di considerazioni operative utili per l'esecuzione dell'analisi di autodiagnosi della struttura osservata; ad esempio, il computer master può inviare una direttiva di settaggio relativa alla frequenza di acquisizione che una specifica unità di monitoraggio deve possedere nell'acquisizione dei dati sperimentali. Quindi, per il sistema autodiagnosticante intelligente proposto il computer master funge anche da centralina madre del sistema.

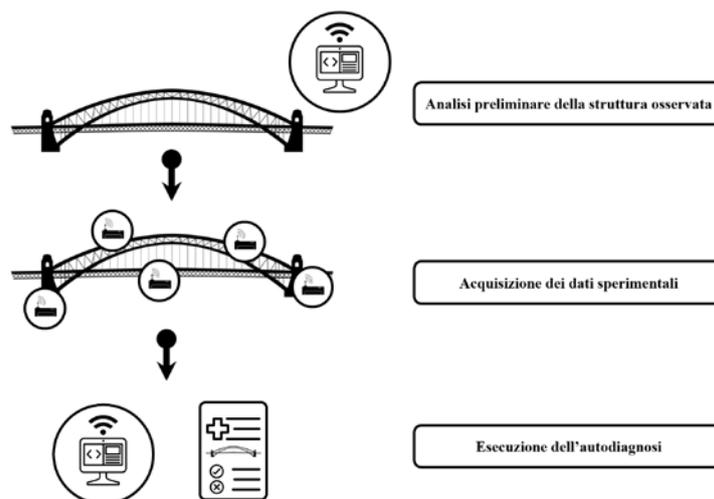


*fig.4 – Schematizzazione comunicazione tra il computer master, su cui è presente il software autodiagnosticante e le unità di monitoraggio della rete installata sulla struttura osservata.*

### **3. PROCEDURA AUTOMATIZZATA INTELLIGENTE**

Dal punto di vista funzionale, per eseguire l'analisi di autodiagnosi della struttura osservata, il sistema autodiagnosticante intelligente proposto procede con delle fasi operative precedute ovviamente da attività di campo conoscitive e di analisi strutturale con software agli elementi finiti di tipo comune. In particolare le fasi operative del sistema autodiagnosticante intelligente, come schematizzate in figura (5), prevedono:

1. La fase di analisi preliminare conoscitiva sarà costituita da azioni di campo utili a ricostruire geometricamente e sotto il profilo materico l'opera da monitorare in modo da poter analizzarne il comportamento dinamico con modellatori agli elementi finiti che renderanno disponibili dati caratterizzanti il comportamento della struttura integra.
2. Con la disponibilità dei dati preliminari della struttura osservata, il software autodiagnosticante genererà le informazioni sul settaggio, la configurazione e l'installazione della rete di unità di monitoraggio;
3. La fase successiva di tipo osservazionale in continuo sarà ovviamente preceduta da una attività di installazione in opera delle unità di monitoraggio. In questa fase, i dati sperimentali acquisiti dalle unità di monitoraggio installate sulla struttura osservata, sono sottoposti anche ad una procedura di sincronizzazione temporale. È utile specificare che le unità di monitoraggio sono comandate dal computer master sulla base delle indicazioni fornite dal software autodiagnosticante.
4. La fase di osservazione routinaria consentirà l'autodiagnosi, il tutto ad opera del software intelligente il quale, sia in forma comparativa sia, in forma oggettiva mediante l'impiego di opportuni parametri di soglia, fornirà sia indicazioni di corretto funzionamento dell'opera sia di presenza di anomalie classificate come evidenze di allerta o di allarme.



*fig.5 - Schematizzazione fasi operative del sistema autodiagnosticante intelligente.*

Di seguito si descriverà nel dettaglio ogni singola fase del processo automatizzato del sistema autodiagnosticante intelligente.

### **3.1 FASE DI ANALISI PRELIMINARE (FASE 1)**

La prima fase di analisi preliminare è eseguita esclusivamente in campo e con l'impiego di software comuni agli elementi finiti, che sulla base di opportuni criteri ingegneristici esegue le seguenti operazioni:

- analisi del rilievo della struttura osservata, ovvero al software FEM vengono fornite le rappresentazioni grafiche descrittive della geometria della struttura osservata in tutte le sue

parti con quote. In pratica vengono forniti i modelli CAD dettagliati della struttura osservata;

- analisi dei materiali presenti nella struttura osservata, al fine di conoscere i materiali di costruzione presenti e le loro specifiche tecniche;
- individuazione di un modello discretizzato FEM (ovvero un classico modello per metodi ad elementi finiti) per simulare il comportamento della struttura integra e con danneggiamenti tipici in sezioni sensibili propri della struttura osservata;
- dall'analisi con il modello FEM saranno individuati i dati dinamici caratterizzanti da fornire al software autodiagnosticante per individuare i punti della struttura su cui posizionare i sensori. In pratica con le modellazioni FEM saranno individuati i comportamenti guida sia per strutture integre che per strutture con danneggiamenti tipici dell'opera osservata ossia:
  - Modi di vibrare e periodi fondamentali globali della struttura integra;
  - Modi di vibrare e periodi fondamentali globali della struttura danneggiata;
  - Modi di vibrare e periodi fondamentali locali di parti di struttura integra;
  - Modi di vibrare e periodi fondamentali locali di parti di struttura danneggiata;
  - Punti della struttura con caratteristiche dinamiche caratterizzanti i modi propri globali e locali;
- Questi dati saranno successivamente utilizzati nella procedura autodiagnosticante per individuare i punti da sottoporre a controllo.

Le simulazioni delle condizioni di danneggiamento saranno effettuate attingendo da una banca dati che associa al tipo di struttura osservata le condizioni di deterioramento proprie, disponibili in letteratura o rilevate in opera.

Sulla base delle analisi eseguite in questa fase preliminare, il software autodiagnosticante fornirà il numero di unità di monitoraggio da utilizzare e la posizione in cui queste unità di monitoraggio dovranno essere installate, in maniera fissa, sulla struttura osservata.

Inoltre, sempre in questa fase operativa, il software autodiagnosticante individua le frequenze di acquisizione con cui ciascuna unità di monitoraggio dovrà operare, ovvero le frequenze di campionamento con cui saranno acquisite le accelerazioni delle micro-vibrazioni. Quindi, ogni unità di monitoraggio potrà acquisire i dati sperimentali con uno specifico valore di frequenza, più alta o più bassa, sulla base delle specifiche richieste dal software autodiagnosticante.

Una volta posizionate le diverse unità di monitoraggio, ognuna identificabile con un proprio codice di riconoscimento, il software autodiagnosticante potrà comunicare a distanza in modo da poter settare il valore relativo alla frequenza di acquisizione con cui ciascuna unità di monitoraggio dovrà operare.

### **3.2 FASE DI ACQUISIZIONE DATI (FASE 2)**

La seconda fase operativa è relativa all'acquisizione dei dati sperimentali, ad opera delle unità di monitoraggio installate sulla struttura osservata, in corrispondenza dei punti indicati dal software autodiagnosticante.

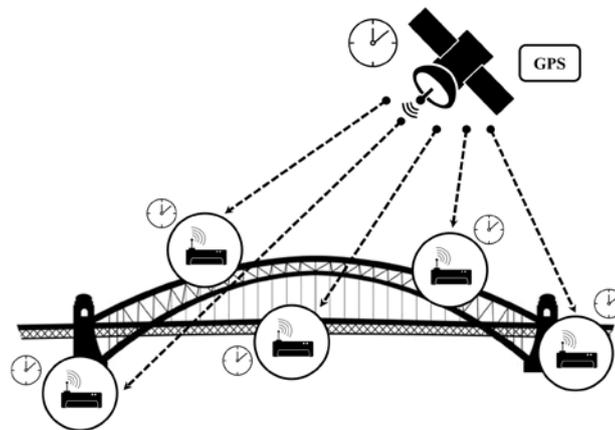
Una volta posizionate le diverse unità di monitoraggio sui punti specifici della struttura osservata, e impostati i valori delle frequenze di acquisizione, attraverso il software di autodiagnosi, ogni singola unità di monitoraggio può avviare l'acquisizione dei dati sperimentali. Tale acquisizione viene eseguita continuamente e i dati sperimentali sono archiviati sulla memoria locale

di ogni unità di monitoraggio; la trasmissione dei dati sperimentali acquisiti verso il computer master, per l'analisi ad opera del software autodiagnosticante, può avvenire secondo due modalità come sarà descritto successivamente.

Tuttavia, prima della loro archiviazione, questi dati devono essere sottoposti ad una procedura di sincronizzazione temporale.

La sincronizzazione temporale delle misurazioni eseguite dalle unità di monitoraggio presenti nella rete è un punto fondamentale, perché se i dati sperimentali non sono ben sincronizzati tra le diverse unità di monitoraggio, allora il trattamento numerico che successivamente eseguirà il software autodiagnosticante non sarà affidabile ai fini della diagnosi della struttura osservata.

Come descritto nella sezione precedente, tra le componenti interne di ogni unità di monitoraggio wireless, è presente uno specifico modulo di comunicazione per grandi distanze, ovvero una tecnologia tale da consentire a ciascuna unità di monitoraggio di ricevere opportuni segnali temporali inviati dai satelliti GPS; questo modulo hardware è utilizzato per il processo di sincronizzazione delle misurazioni. Nello specifico, i segnali satellitari di interesse si riferiscono all'istante temporale assoluto iniziale e al segnale periodico di sincronizzazione (PPS); tali segnali sono fondamentali per far sì che ogni singola unità di monitoraggio possa sincronizzare il proprio clock interno, attraverso cui si assegna un istante temporale al dato sperimentale acquisito, con un tempo universale fornito dal sistema satellitare GPS. Questo processo sarà dettagliato successivamente. In figura (6) è riportata una schematizzazione della comunicazione tra le unità di monitoraggio della rete installate sulla struttura osservata e i sistemi satellitari GPS, per il processo di sincronizzazione temporale dei dati sperimentali acquisiti.



*fig.6 - Schematizzazione comunicazione tra le unità di monitoraggio della rete installata sulla struttura osservata e i sistemi satellitari GPS, per il processo di sincronizzazione temporale dei dati sperimentali acquisiti.*

In generale, i sistemi di tipo satellitare consentono di usufruire dei segnali emessi dalla rete satellitare al fine di determinare, con un buon grado di accuratezza, alcune importanti informazioni, quali la posizione geografica, l'altitudine rispetto al livello del mare ed il segnale di sincronizzazione temporale riferito al tempo universale UTC (Universal Time Coordinated). Ogni satellite GPS utilizza un tempo che si basa su orologi atomici (altamente precisi). Il principio di funzionamento di massima di un qualunque sistema satellitare è basato sulla misura del tempo di percorrenza del segnale trasmesso dai satelliti e ricevuto dagli apparati di ricezione terrestri. I dispositivi ricevitori sono corredati di un proprio orologio interno (clock) e risultano quindi in grado di misurare l'intervallo di tempo che intercorre fra l'istante di trasmissione del segnale e l'istante di

ricezione; dalla conoscenza di questa grandezza, fissata la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche, è possibile ottenere in prima approssimazione il valore della distanza fra il satellite ed il ricevitore.

Ogni singola unità di monitoraggio, del sistema autodiagnosticante intelligente proposto, esegue una sincronizzazione temporale delle proprie acquisizioni con il tempo universale fornito dai sistemi satellitari GPS; quindi di fatto le diverse acquisizioni delle unità di monitoraggio presenti risulteranno temporalmente sincronizzate tra loro. Il processo di sincronizzazione dei dati sperimentali acquisiti è eseguito dal software implementato e installato all'interno di ogni singola unità di monitoraggio. Tale software permette di eseguire una procedura in grado di realizzare la sincronizzazione temporale globale dei dati acquisiti in locale, dai propri sensori, grazie ai segnali satellitari ricevuti dallo specifico modulo hardware di comunicazione presente.

La sincronizzazione temporale è il processo per mezzo del quale sistemi distribuiti (ad esempio: dispositivi sensoristici per le acquisizioni di grandezze fisiche), che operano in parallelo, condividono lo stesso ordinamento temporale degli eventi o delle operazioni eseguite. A tal fine è possibile immaginare all'interno di ogni dispositivo un proprio orologio (internal clock-source), che gestisce le informazioni temporali; ovvero ad ogni singola acquisizione il dispositivo associa alla misura eseguita un istante temporale sulla base del proprio clock interno; tutto ciò al fine di stabilire un ordinamento temporale tra le acquisizioni eseguite.

L'ordinamento temporale, tra due o più dispositivi, lo si può ottenere garantendo sui dispositivi le due seguenti condizioni operative:

- Avere un istante di riferimento comune (lo stesso per tutti, o comunque relazionato).
- Avere una stessa dinamica di lavoro, intesa come la stessa velocità di esecuzione delle operazioni richieste (tecnicamente un clock simile).

In ottica del sistema autodiagnosticante intelligente in oggetto, ci si riferisce alla sincronizzazione delle misurazioni come al processo che stabilisce una coerenza temporale tra le misurazioni acquisite dalle diverse unità di monitoraggio. In pratica, ciò può essere ottenuto facendo sì che gli orologi di ciascun dispositivo, siano temporalmente allineati con un sistema di satelliti GPS che, essendo in grado di inviare a ciascuna unità di monitoraggio un segnale temporale comune, funge da riferimento temporale.

I dati acquisiti e memorizzati dalle singole unità di monitoraggio sono caratterizzati da un istante temporale di riferimento (proveniente da un orologio in comune del GPS), e dagli istanti temporali delle singole acquisizioni realizzati sulla base dei clock interni di ogni singola unità di monitoraggio. Successivamente, tali dati acquisiti devono essere rettificati per un adeguamento temporale (al fine di correggere le derive temporali derivanti dalle piccole differenze nella dinamica dei dispositivi), in modo che gli istanti delle singole acquisizioni risultino uguali per tutti. Ciò è possibile appunto perché per ogni unità di monitoraggio si conosce un istante temporale di riferimento comune, ed è quindi possibile esprimere gli istanti temporali delle acquisizioni rispetto a questo valore.

Nel sistema autodiagnosticante intelligente proposto, ogni singola unità di monitoraggio è in grado di sincronizzare il proprio riferimento temporale con un tempo globale ottenuto tramite satelliti in tecnologia GPS. Quindi ogni singola unità di monitoraggio è in grado di comunicare, attraverso un modulo GPS, e ottenere un riferimento temporale comune, dai sistemi satellitari, su cui impostare gli istanti dalle diverse sincronizzazioni.

All'avvio delle acquisizioni ogni unità di monitoraggio riceve un segnale temporale dai sistemi satellitari e rettifica i propri istanti temporali (ottenuti con il clock interno) sulla base di questo riferimento temporale. Tuttavia, questa sola azione basata sull'istante temporale "iniziale" comune, non sarebbe sufficiente in quanto tiene conto delle variazioni temporali successive che potrebbero verificarsi a causa delle differenti dinamiche delle singole unità di monitoraggio (legate al clock interno) e che quindi potrebbero compromettere la sincronizzazione temporale delle misure. Per correggere queste derive, si fa riferimento ad un altro segnale trasmesso dai sistemi satellitari, ovvero il PPS.

Il PPS (pulse per second) è un segnale elettrico che scandisce in modo preciso ed accurato i secondi di una scala temporale di riferimento, ovvero è un segnale periodico che può assumere solo due valori digitali possibili, 0 (valore basso) e 1 (valore alto), costituito da un treno di impulsi che emette il valore logico alto ogni secondo (quindi ha un periodo di 1 secondo), ovvero è un segnale periodico con frequenza 1 Hz. Quindi, ogni unità di monitoraggio, dal riferimento temporale iniziale inviato, sulla base di questo segnale periodico ricevuto dai satelliti rettifica, ogni secondo, i propri valori temporali interni adattandoli al riferimento temporale comune. Così facendo, migliora l'accuratezza della sincronizzazione temporale delle misurazioni tra le unità di monitoraggio interessate.

### **3.3 FASE DI AUTODIAGNOSI (FASE 3)**

La terza fase operativa è l'esecuzione dell'autodiagnosi della struttura osservata, ad opera del software autodiagnosticante, sulla base dei dati sperimentali acquisiti dalle unità di monitoraggio. Come specificato in precedenza, il computer master è in grado di dialogare con le unità di monitoraggio in remoto. La trasmissione dei dati sperimentali, da parte delle unità di monitoraggio, può avvenire secondo due modalità:

- una modalità su richiesta da parte del software autodiagnosticante. Con questa modalità, i dati sperimentali archiviati in locale sulla memoria delle unità di monitoraggio vengono trasmessi al computer master a seguito di una richiesta del software autodiagnosticante. Il software autodiagnosticante può richiedere i dati sperimentali dalle unità di monitoraggio, con una specifica finestra temporale; ad esempio può richiedere 30 minuti di misurazioni dalle unità di monitoraggio, specificando la fascia oraria, ogni giorno o ogni settimana;
- una modalità condizionata sulla base di specifici eventi. Con questa modalità, i dati sperimentali archiviati in locale sulle memorie delle unità di monitoraggio vengono trasmessi al computer master a seguito del verificarsi di un evento nella registrazione dei dati sperimentali; questo evento è rappresentato da una vibrazione di alta intensità. Ad esempio, se una unità di monitoraggio rileva un valore di accelerazione maggiore rispetto un valore di soglia, preventivamente stabilito e settato, durante la prima fase di analisi preliminare dal software autodiagnosticante, allora le unità di monitoraggio invieranno i dati sperimentali al computer master. I set dei dati sperimentali inviati in questi casi dalle unità di monitoraggio avranno una specifica finestra temporale centrata all'istante di registrazione dell'evento; ad esempio 10 minuti precedenti e 10 minuti successivi all'evento. È utile sottolineare che i parametri di soglia sono settati sempre dal software autodiagnosticante, durante la prima fase di analisi preliminare, e sempre sulla base di criteri utili per l'analisi di autodiagnosi. Ad esempio, il software autodiagnosticante può settare i valori di soglia con

due livelli: una soglia di allerta e una soglia di allarme con un valore più alto; nel primo caso la finestra temporale sarà di 10 minuti mentre nel secondo caso di 30 minuti.

#### **3.4 FASE DI COMPARAZIONE (FASE 4)**

A seguito della trasmissione dei dati sperimentali, il software autodiagnosticante, presente sul computer master, eseguirà un'analisi di autodiagnosi, sulla base di criteri ingegneristici per ottenere indicazioni sulla localizzazione delle zone con problemi strutturali. Il tutto ad opera del software intelligente, il quale, sia in forma comparativa, sia in forma oggettiva, mediante l'impiego di opportuni parametri di soglia, fornirà indicazioni di corretto funzionamento dell'opera in presenza di anomalie classificate come evidenze di allerta o di allarme.

#### **4. CONCLUSIONI**

Dallo studio sullo stato dell'arte in ambito di sistemi di monitoraggio e controllo strutturale è emersa la mancanza di software autodiagnostici, che consentano dalle acquisizioni dei dati sperimentali relativi alle accelerazioni di parti della struttura osservata, di ricavare dei parametri in termini di frequenza, di confrontarli con le frequenze proprie del ponte e fornire indicazioni sulla localizzazione delle zone con problemi strutturali. I sistemi attuali presentano reti di sensori collegati tramite cavo alle centraline di acquisizione, caratterizzati da una scarsa sincronizzazione e da una frequenza di campionamento uguale per tutti i rilevatori.

Con il sistema autodiagnosticante intelligente proposto intende fronteggiare tali criticità, attraverso l'utilizzo di un software autodiagnosticante e una rete di sensori wireless a frequenza modulabile per il monitoraggio dinamico. In particolare il software autodiagnosticante andrebbe a risolvere l'attuale problematica sulla richiesta di tecnici altamente specializzati in campi multidisciplinari, chi nel comportamento dinamico, chi nell'analisi strutturale, e chi nella modellazione agli elementi finiti. Mentre l'utilizzo di unità di monitoraggio di tipo wireless senza cavi comporterà una più facile installazione sulla struttura osservata e garantirà una sincronizzazione temporale più accurata tra le misurazioni che si tradurrà in maggiore affidabilità dei risultati ottenuti a valle del trattamento numerico. Inoltre, la flessibilità dei sensori wireless proposti, ovvero la possibilità di cambiare la frequenza di campionamento nell'acquisizione dei dati sperimentali, automaticamente sulla base delle richieste del software autodiagnosticante sarà un aspetto fondamentale per consentire la determinazione dei modi di vibrare locali e tutto ciò che ne consegue da tale studio.

L'architettura del sistema proposto è stata descritta in tutti i suoi componenti hardware e software, in particolare sono state descritte tutte le fasi operative della procedura automatizzata eseguita dal Software autodiagnosticante intelligente. Adesso del prototipo è necessario definire nel dettaglio la rete di sensori wireless sincronizzati per il monitoraggio strutturale di opere dell'ingegneria civile.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] - Partners I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab s.r.l., TOD System s.r.l. “REPORT D.1.1 - Stato dell’arte e progettazione”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”. 2022.
- [2] - Partners I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab s.r.l., TOD System s.r.l. “REPORT D.3.1 – Piano dei Test”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”. 2022.
- [3] - Partners I.Ca.Ro. s.r.l., Age.S.P s.r.l.s., Noitech.net s.r.l., Sismlab S.r.l., TOD System s.r.l. “REPORT D.3.2 - Test e validazione”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”. 2022.
- [4] - G. Porco, L. Bonanno “Il controllo dinamico delle opere in c.a. in campo civile: lo stato dell’arte”. 2023.

# Definizione di una rete di sensori wireless sincronizzati per il monitoraggio strutturale di opere dell'ingegneria civile.

Domenico Colacino<sup>a</sup>, Vincenzo Gualtieri<sup>a</sup>, Antonio Oliverio<sup>a</sup>, Roberto Calbi<sup>b</sup> and Salvatore Tucci<sup>c</sup>

<sup>a</sup>TOD System s.r.l., I traversa Viale Cassiodoro, Davoli, 88060, Italia

<sup>b</sup>I.CA.RO s.r.l., Via Lucrezia della Valle c/o B. C. "Le Aquile", Catanzaro, 88100, Italia

<sup>c</sup>Age.S.P s.r.l.s., Via Lucrezia della Valle c/o B. C. "Le Aquile", Catanzaro, 88100, Italia

---

## ARTICLE INFO

### Keywords:

Vibrazioni meccaniche.

Monitoraggio strutturale.

opere dell'ingegneria civile.

Rete dispositivi wireless.

Sincronizzazione temporale misurazioni.

Sistema compatto, integrato e autonomo.

## ABSTRACT

Il monitoraggio strutturale continuo di un'opera dell'ingegneria civile, come un ponte, rappresenta un aspetto fondamentale per il controllo della sicurezza e dell'efficienza della struttura stessa.

Conoscendo alcune informazioni strutturali di base dell'opera, quali, ad esempio, la tipologie dei materiali utilizzati e la conformazione delle parti costituenti, attraverso opportuni metodi ingegneristici, è possibile ottenere informazioni sul suo stato di salute, rilevando opportunamente le microvibrazioni locali in punti specifici su di esso. Affinché questi metodi diagnostici risultino affidabili, le microvibrazioni acquisite, attraverso i dispositivi sensoristici, devono soddisfare opportuni requisiti; in particolare, le acquisizioni devono essere rilevate, contemporaneamente, in corrispondenza di più punti specifici della struttura e devono essere temporalmente sincronizzati tra di loro.

L'obiettivo di questo lavoro è la progettazione e lo sviluppo di una rete di unità sensoristiche wireless in grado di garantire la sincronizzazione temporale delle misurazioni da fornire per la diagnosi strutturale.

---

## 1. Introduzione

Il monitoraggio strutturale è essenziale per garantire la sicurezza e l'affidabilità delle opere dell'ingegneria civile, specialmente in ambienti soggetti a carichi dinamici e sollecitazioni esterne.

Nel campo del monitoraggio strutturale per le opere dell'ingegneria edile, l'uso di opportuni sensori è fondamentale per rilevare una serie di grandezze fisiche, come ad esempio la deformazione, le vibrazioni e la corrosione, al fine di ottenere informazioni che possono essere utilizzate per identificare i potenziali problemi strutturali, per poter adottare opportune misure preventive.

In particolare, i sensori di accelerazione sono in grado di rilevare le microvibrazioni di una struttura nei punti in cui sono collocati. Quando in un punto della struttura si manifesta una vibrazione, si verifica un cambiamento della sua posizione, ovvero un movimento, e questo cambiamento di posizione nel tempo può essere espresso in termini di accelerazione. I sensori di accelerazione sono progettati per misurare con precisione queste accelerazioni e trasformarle in segnali elettrici che possono essere registrati e analizzati. I dati raccolti da più sensori di accelerazione possono essere utilizzati per monitorare l'evoluzione delle vibrazioni nel tempo e per identificare eventuali anomalie, le quali possono rappresentare un indicatore di problemi strutturali, come cedimenti.

Tutto ciò è eseguito al fine pratico di ottenere delle analisi strutturali avanzate e valutare le prestazioni della struttura in risposta alle vibrazioni stesse. Ciò può consentire, ai tecnici esperti, di comprendere meglio il comportamento dinamico della struttura e prendere decisioni informate sulla sua manutenzione.

Quindi, il monitoraggio strutturale con una rete di sensori di accelerazione è una tecnica efficace per la prevenzione

dei danni strutturali. I sensori possono essere utilizzati per monitorare le strutture in modo continuo e per identificare eventuali problemi strutturali in anticipo. Questo consente di adottare misure preventive e di evitare che i danni strutturali si verifichino.

Tuttavia a tali tipologie di sistemi di monitoraggio è associato un problema pratico di grande rilevanza che spesso ne preclude l'utilizzo pratico e la loro diffusione. Tale problema è legato al fatto che per avere una informazione affidabile dell'opera monitorata si devono utilizzare più unità sensoristiche distribuite in punti specifici della struttura stessa e le misurazioni che tali dispositivi eseguono devono essere temporalmente sincronizzate tra loro; inoltre, sulla base della loro posizione i singoli sensori devono essere in grado di rilevare le grandezze con frequenze di campionamento diverse.

Tali aspetti sono attualmente gestiti, dal punto di vista pratico, attraverso l'uso di sistemi a rete di sensori con cavi; qui, tutte le singole unità sensoristiche sono collegate ad una centralina comune attraverso cavi per l'invio dei segnali delle grandezze acquisite. Con questa architettura i dispositivi consentono di rilevare le grandezze acquisite in maniera sincronizzata grazie al fatto che tutti i cavi sono della stessa lunghezza. Qui, la problematica è rappresentata dall'installazione dei sensori nei diversi punti della struttura che possono trovarsi a distanze considerevoli tra loro; ciò comporta una difficoltà operativa della messa in opera dell'impianto del sistema di monitoraggio.

Una possibile soluzione a questo aspetto applicativo è data dalla possibilità di poter utilizzare unità sensoristiche wireless. Una rete di sensori wireless può rappresentare un'importante soluzione per consentire l'acquisizione di dati in tempo reale per monitorare l'integrità delle strutture in

modo continuo, senza le difficoltà d'installazione associate a quei sistemi di monitoraggio caratterizzati dalla presenza dei cavi.

Ottenere una sincronizzazione accurata da parte di sensori wireless è attualmente un'operazione molto difficoltosa che richiede hardware complessi e costosi.

In letteratura esistono diversi lavori, [2], [4], [5], in cui si è cercato di sviluppare sistemi in grado di eseguire tale operazione di sincronizzazione; alcuni di essi, [1], [3], basati sullo sviluppo di un hardware a basso costo, di semplice sviluppo e utilizzo. Tali lavori sono stati presi in considerazione per lo sviluppo delle unità sensoristiche wireless del sistema di monitoraggio prototipale proposto.

Nel lavoro [1] è stato sviluppato un nuovo metodo di sincronizzazione temporale che funziona in modo indipendente su ciascun elemento della rete, ovvero su ciascun singolo dispositivo, senza che le singole unità presenti si scambiano tra loro pacchetti di sincronizzazione temporali. Questa operazione autonoma è in grado di rendere il processo di misurazione sul campo molto efficiente e inoltre la singola unità del sistema è stata sviluppata utilizzando un hardware a basso costo e semplice utilizzo, rappresentato da una scheda *Arduino*.

Obiettivo di questo lavoro è lo sviluppo un sistema di monitoraggio strutturale composto da una serie di unità sensoristiche wireless in grado di consentire una sincronizzazione temporale delle misurazioni da parte di ciascun dispositivo interessato, basato, in particolare, su quanto presentato nel lavoro [1]. Tale sistema deve essere caratterizzato da un metodo di sincronizzazione tale da essere gestito da un hardware semplificato, di facile sviluppo e a bassi costi.

## 2. Metodo di sincronizzazione temporale per le unità sensoristiche wireless

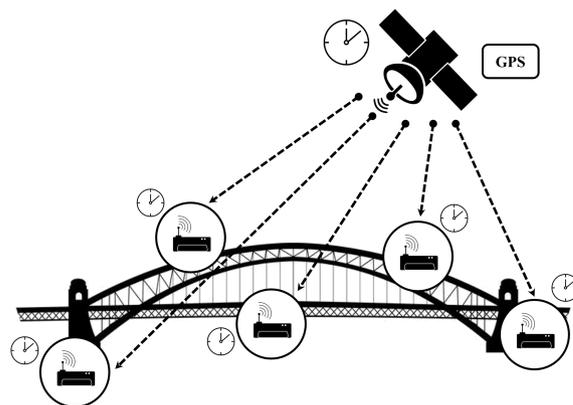
In un sistema di monitoraggio costituito da una rete di unità sensoristiche wireless, la sincronizzazione temporale è un'operazione cruciale per ottenere una corretta interpretazione delle misure, in particolare con le misure di accelerazione per stimare le forme modali, al fine di ottenere un'efficace analisi e interpretazione delle informazioni strutturali.

Per raggiungere tale fine, il metodo qui proposto utilizza un modulo hardware GPS, presente in ogni unità sensoristica wireless, per consentire a ciascuna singola unità di ricevere opportuni segnali temporali inviati dai satelliti GPS.

In particolare, i segnali satellitari d'interesse si riferiscono all'istante temporale iniziale, ovvero l'istante di FIX, e al segnale periodico di sincronizzazione Pulse-Per-Second (PPS); tali segnali sono fondamentali per far sì che ogni singola unità sensoristica possa sincronizzare il proprio clock interno, che assegna un istante temporale locale al dato sperimentale acquisito, con un istante universale fornito dal sistema satellitare GPS. Così facendo, il sistema ricampiona temporalmente i dati contrassegnati in modo da associare per ognuno di essi un valore temporale sincronizzato con il tempo del satellite GPS.

Eseguito tale procedura, in maniera indipendente in ogni singola unità, si avrà indirettamente una sincronizzazione temporale tra tutti i set di dati acquisiti dai vari dispositivi presenti nella rete.

In figura 1 è riportata una schematizzazione della comunicazione tra le unità sensoristiche wireless della rete installate sulla struttura osservata, ad esempio un ponte, e i sistemi satellitari GPS, per il processo di sincronizzazione temporale dei dati sperimentali acquisiti.



**Figure 1:** Schematizzazione concettuale della comunicazione tra unità sensoristiche wireless installate sulla struttura osservata e i sistemi satellitari GPS, per il processo di sincronizzazione temporale.

La sincronizzazione temporale è il processo per mezzo del quale sistemi distribuiti (ad esempio: dispositivi sensoristici per le acquisizioni di grandezze fisiche), che operano in parallelo, condividono lo stesso ordinamento temporale degli eventi o delle operazioni eseguite. A tal fine è possibile immaginare all'interno di ogni dispositivo un proprio orologio (internal clock-source), che gestisce le informazioni temporali; ovvero ad ogni singola acquisizione il dispositivo associa alla misura eseguita un istante temporale sulla base del proprio clock interno; tutto ciò al fine di stabilire un ordinamento temporale tra le acquisizioni eseguite.

L'ordinamento temporale, tra due o più dispositivi, lo si può ottenere indirettamente garantendo sui dispositivi le due seguenti condizioni operative:

- Avere un istante di riferimento comune (lo stesso per tutti, o comunque relazionato).
- Avere una stessa dinamica di lavoro, intesa come la stessa velocità di esecuzione delle operazioni richieste (tecnicamente un clock simile).

Ci si riferisce alla sincronizzazione delle misurazioni, come al processo che stabilisce una coerenza temporale tra le misurazioni acquisite dalle diverse unità sensoristiche. In pratica, ciò può essere ottenuto facendo sì che gli orologi di ciascun dispositivo, siano temporalmente allineati con un sistema di satelliti GPS che, essendo in grado di inviare a ciascuna unità di monitoraggio un segnale temporale comune, funge da riferimento temporale.

I dati acquisiti e memorizzati dalle singole unità sensoristiche sono caratterizzati da un istante temporale di riferimento (proveniente da un orologio in comune del GPS), e dagli istanti temporali delle singole acquisizioni realizzati sulla base dei clock interni di ogni singola unità di monitoraggio.

Successivamente, tali dati acquisiti devono essere rettificati per un adeguamento temporale (al fine di correggere le derive temporale derivanti dalle piccole differenze nella dinamica dei dispositivi), in modo che gli istanti delle singole acquisizioni risultino uguali per tutti. Ciò è possibile appunto perché su ogni unità si conosce un istante temporale di riferimento comune, ed è quindi possibile esprimere gli istanti temporali delle acquisizioni rispetto a questo valore. All'avvio delle acquisizioni ogni unità riceve un segnale temporale di riferimento, dai sistemi satellitari GPS, rispetto al quale rettifica i propri istanti temporali (ottenuti con il clock interno).

Tuttavia, questa sola azione basata sull'istante temporale *iniziale* comune, non sarebbe sufficiente in quanto tiene conto delle variazioni temporali successive che potrebbero verificarsi a causa delle differenti dinamiche delle singole unità di monitoraggio (legate al clock interno) e che quindi potrebbero compromettere la sincronizzazione temporale delle misure. Per correggere queste derive, si fa riferimento ad un altro segnale trasmesso dai sistemi satellitari, ovvero il PPS.

Il PPS è un segnale elettrico, inviato sempre dai sistemi satellitari GPS, che scandisce in modo preciso ed accurato i secondi di una scala temporale di riferimento, ovvero è un segnale periodico che può assumere solo due valori digitali possibili, 0 (valore basso) e 1 (valore alto), costituito da un treno di impulsi che emette il valore logico alto ogni secondo, ovvero è un segnale periodico con frequenza 1 Hz. Quindi, ogni unità, dal riferimento temporale iniziale inviato, sulla base di questo segnale periodico ricevuto dai satelliti GPS rettifica, ogni secondo, i propri valori temporali interni adattandoli al riferimento temporale comune.

Così facendo, migliora l'accuratezza della sincronizzazione temporale delle misurazioni tra le unità sensoristiche wireless interessate.

È opportuno sottolineare che l'operazione di sincronizzazione, non è un'operazione che viene praticata in real-time con l'acquisizione dati, ma è un'operazione successiva che può essere eseguita in post-elaborazione sull'unità stessa o su un computer su cui verranno scaricate le misurazioni acquisite archiviate sulla memoria dell'unità stessa.

### 3. Architettura hardware dell'unità sensoristica

Il sistema di monitoraggio a rete di sensori wireless ideato si presenta come una serie di unità di monitoraggio sensoristiche, ciascuna delle quali è un unico blocco compatto, costituito da un singolo contenitore, al cui interno sono presenti tutte le componentistiche elettroniche utili. Tale unità è stata anche rinominata con la sigla *Sis.Mo.Co.*

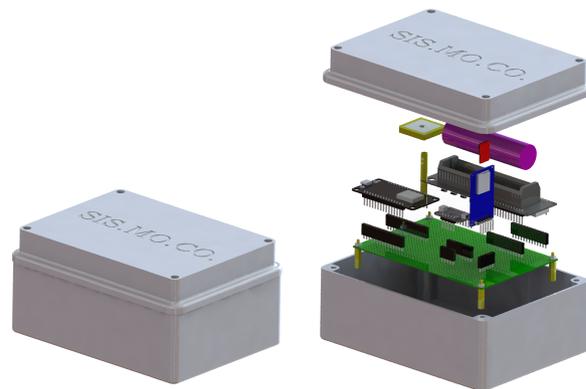
(*Sistema di Monitoraggio e Controllo*).

Nella realizzazione del prototipo di queste unità, ci si è concentrati soprattutto sulle operazioni di registrazione delle grandezze di accelerazione, e sulla ricezione dei segnali di ausilio per le operazioni di temporale delle acquisizioni eseguite.

Al suo interno, ogni singolo contenitore contiene la seguente componentistica elettronica utile:

- Basetta millefori di collegamento.
- Microcontrollore ESP8266.
- Microcontrollore LILYGO TTGO T-beam V1.1 ESP32.
- Accelerometro triassiale LSM6DSOX.
- Adattatore microSD.
- Scheda SD 32 GB.
- Antenna GPS (modello 1575R).
- Batteria per alimentazione.

In figura 2 sono riportate le immagini del CAD 3D, vista di insieme e vista esplosa, della singola unità sensoristica wireless con la disposizione interna della componentistica utilizzata.



**Figure 2:** CAD unità sensoristica wireless: vista esplosa (a destra) e d'insieme (a sinistra).

L'unità sensoristica wireless prototipale, esternamente si presenta come un unico blocco compatto costituito da un contenitore in materiale plastico.

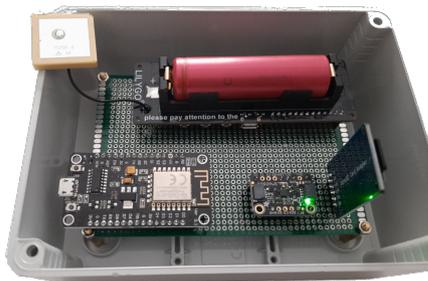
Al suo interno è presente una basetta elettronica millefori (dimensioni: 120x80 [mm]) che costituisce la superficie di appoggio e di collegamento elettrico dei dispositivi elettronici utilizzati, tra cui anche il sensore di accelerazione.

L'unità sensoristica wireless deve essere vincolata in maniera fissa e stabile in punti specifici della struttura su cui si devono eseguire le misurazioni delle accelerazioni.

Poiché tipicamente in tali zone è presente una superficie di appoggio metallica, quindi, per fissare l'unità sulla struttura monitorata sono presenti 4 piedini calamitati sulla base inferiore del contenitore, che permettono appunto non soltanto il

fissaggio stabile, ma anche una facile rimozione del blocco, il tutto senza interferire nelle misurazioni delle grandezze rilevate.

Una foto reale dei collegamenti interni dell'unità sensoristica wireless è riportata in figura 3.



**Figure 3:** Immagine interna dell'unità sensoristica wireless.

#### 4. Processo di misurazione

Dal punto di vista operativo, ogni singola unità sensoristica wireless, ha il compito base di registrare, in continuo, sia valori delle sollecitazioni meccaniche (in termini di accelerazioni delle vibrazioni) a cui è sottoposta, che i segnali temporali ricevuti dal GPS (sia il tempo di FIX che il segnale PPS).

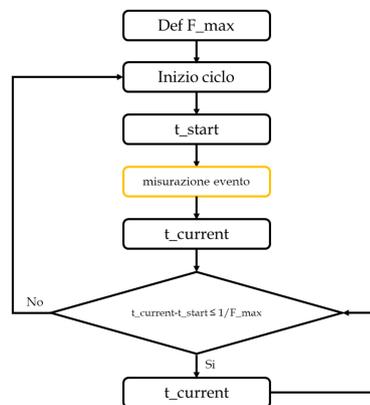
Tutti questi valori di acquisizione saranno archiviati su di una microSD che memorizzerà i dati. Tutte le operazioni sono eseguite, *in tandem*, da entrambi i microcontrollori presenti.

Nella misurazione dei valori di accelerazione, ogni singola unità sensoristica wireless può essere settata ad uno specifico valore di frequenza di acquisizione, agendo attraverso un metodo implementato appositamente per il dispositivo in esame, sul codice software di gestione.

L'implementazione di tale metodo si è resa necessaria a causa della instabilità della frequenza di clock interna del microcontrollore ESP8266, che teoricamente presenta una frequenza prestabilita, ma che nella pratica è soggetta a variazione derivante da diverse cause (come ad esempio il tempo di lavoro e la temperatura di esercizio).

Il metodo si basa sul principio che si stabilisce una frequenza massima che il sistema non dovrà mai superare nell'acquisizione delle misurazioni delle grandezze (si ricorda che il microcontrollore esegue in maniera ciclica il codice relativo all'operazione di misurazione della grandezza interessata) e che la velocità con cui viene eseguita questa operazione determina la velocità di acquisizione (e quindi la frequenza) delle grandezze del dispositivo stesso.

È possibile schematizzare il metodo implementato con un diagramma di flusso, come riportato in figura 4.



**Figure 4:** Diagramma di flusso del metodo implementato per l'impostazione della frequenza di acquisizione nell'unità sensoristica wireless.

Il metodo per l'impostazione della frequenza di acquisizione della singola unità sensoristica wireless è caratterizzato dai seguenti aspetti:

- Si imposta un valore di frequenza massima ( $F_{max}$ ) per l'acquisizione delle accelerazioni (espresso in [Hz]).
- Come prima operazione del ciclo di acquisizione del dispositivo si genera una variabile,  $t_{start}$ , che memorizza il tempo (locale del dispositivo) iniziale del ciclo.
- Successivamente, vengono acquisite le grandezze dall'accelerometro e vengono salvate sulla scheda SD.
- Successivamente, si genera una nuova variabile,  $t_{current}$ , che memorizza il tempo (locale del dispositivo) dopo le operazioni di acquisizione delle grandezze.
- Ora si esegue un sotto-ciclo di while, dipendente dalla condizione:

$$t_{current} - t_{start} \leq \frac{1}{F_{max}}$$

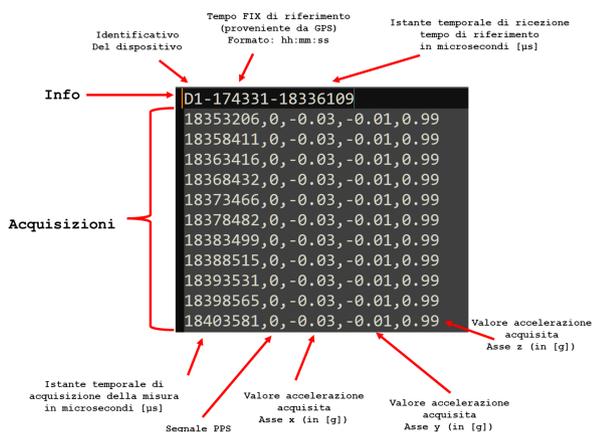
quindi, se l'intervallo di tempo dell'acquisizione delle grandezze è minore di quello prestabilito (ovvero l'inverso della frequenza massima) allora il sistema non può proseguire ad una nuova acquisizione, ma deve rimanere nel sotto-ciclo while.

In tali condizioni la variabile temporale  $t_{current}$  viene continuamente aggiornata e quando non sarà più soddisfatta la condizione del while, allora il dispositivo potrà eseguire una nuova acquisizione, uscendo dal sotto-ciclo, ritornando ad eseguire il normale ciclo di acquisizione delle grandezze.

Per quanto riguarda la sincronizzazione delle misurazioni eseguite, come già specificato, questa operazione non è eseguita in real-time durante le acquisizioni, ma è eseguita successivamente, in post elaborazione, a registrazione terminata.

L'operazione di sincronizzazione consiste nel rimodulare gli istanti temporali delle acquisizioni eseguite dall'unità sensoristica wireless, in modo da associare ad ogni acquisizione un istante temporale comune alle corrispondenti acquisizioni eseguite con tutti le unità presenti nella rete. A tal fine è stato implementato un metodo che permette tale operazione attraverso l'ausilio dei segnali relativi al tempo UTC e al segnale PPS forniti dal sistema GPS.

Ciascuna unità sensoristica wireless, una volta avviata, attende il collegamento con i satelliti GPS e, una volta che ciò avviene, riceve un tempo UTC di FIX, il segnale PPS, e successivamente comincia il ciclo di acquisizione delle grandezze interessate, descritto in precedenza.



**Figure 5:** Esempio struttura dei dati forniti dalla singola unità sensoristica wireless.

La struttura dei dati che l'unità sensoristica fornisce a seguito di una misurazione è riportata in figura 5; in essa è possibile osservare la seguente strutturazione:

- Nella prima riga si hanno una serie di informazioni quali:
  - identificativo del dispositivo;
  - tempo FIX di riferimento (proveniente dal GPS), nel formato: hh:mm:ss;
  - istante temporale di ricezione del tempo FIX di riferimento; espresso in microsecondi [µs].
- Nelle altre righe (ogni riga si riferisce ad una acquisizione), si hanno le seguenti informazioni:
  - Istante temporale di acquisizione della misurazione; in microsecondi [µs];
  - segnale PPS;
  - valore accelerazione acquisito lungo l'asse x (in [g]);
  - valore accelerazione acquisito lungo l'asse y (in [g]);
  - valore accelerazione acquisito lungo l'asse z (in [g]).

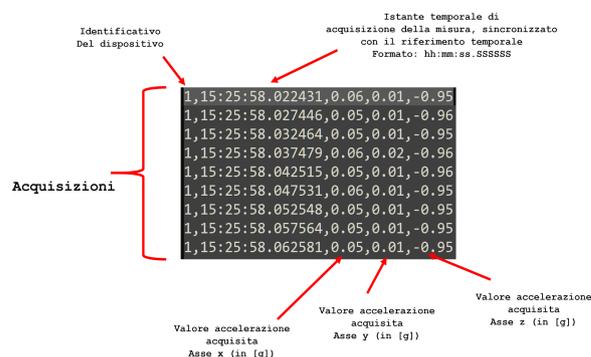
Nella suddetta struttura dati, gli istanti temporali di acquisizione sono espressi in riferimento ad un tempo locale del singolo dispositivo (clock interno); tuttavia, nella prima riga,

si ha l'informazione relativa al tempo di FIX universale del GPS e l'istante temporale di ricezione di questo valore; inoltre per ogni acquisizione è riportato il valore del segnale PPS ricevuto dai satelliti GPS.

Come specificato, il segnale PPS è un segnale binario, assimilabile ad un treno di impulsi, che assume il valore alto 1 periodicamente ogni secondo (ovvero ogni 1000 [ms]), sulla base del riferimento temporale satellitare.

Quindi, sulla base di queste ultime informazioni è possibile esprimere i diversi istanti temporali di acquisizione rispetto al tempo universale applicando il metodo di sincronizzazione temporale proposto, nella sezione precedente, per il sistema di monitoraggio in esame.

Così facendo si genera un nuovo file di testo in cui ogni istante temporale di misurazione sarà espresso con riferimento al tempo universale, e quindi comune per tutte le acquisizioni realizzate da ciascuna unità sensoristica presente nella rete. Tale operazione viene eseguita automaticamente, in post-elaborazione dai dati presenti sulla SD, attraverso il metodo implementato che permette di ottenere, da un set di dati di acquisizione, una nuova struttura dati come riportato in figura 6.



**Figure 6:** Esempio struttura dei dati rimodulata con assegnazione di istanti temporali universali (legati al tempo GPS).

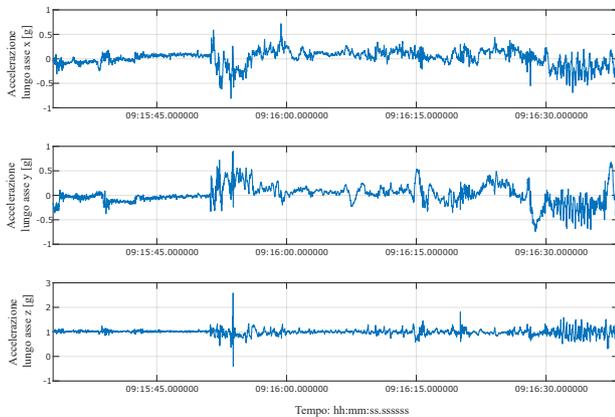
Con il risultato ottenuto è possibile osservare come ogni riga contiene le informazioni di acquisizione delle accelerazioni originali, con la differenza che adesso gli istanti di acquisizione sono espressi attraverso un riferimento globale nella forma: hh:mm:ss.SSSSSS.

In questo modo sarà possibile mettere in confronto le acquisizioni ricavate da più dispositivi appunto perché si potrà stabilire una relazione tra gli istanti temporali espressi con un tempo comune.

Un esempio di set di accelerazioni acquisite nelle tre direzioni spaziali, da una singola unità sensoristica wireless, sono graficati e riportati in figura 7.

## 5. Conclusioni

Nel lavoro in esame è stato analizzato un sistema di monitoraggio strutturale di opere dell'ingegneria civile costituito da una rete di unità sensoristiche wireless.



**Figure 7:** Esempio di un set di accelerazioni acquisite nelle tre direzioni spaziali, da una singola unità sensoristica wireless.

Tale sistema ha il compito di acquisire e archiviare l'intensità delle microvibrazioni locali di una struttura, attraverso le misurazioni delle loro accelerazioni, che subisce la stessa in specifici punti, su cui sono collocate tali unità; ciò al fine di fornire utili informazioni per la diagnosi di potenziali problemi strutturali e permettere così un intervento tempestivo e mirato per salvaguardare l'integrità struttura e funzionale dell'opera.

L'utilizzo di un sistema a rete di dispositivi senza cavi comporta una serie di vantaggi pratici rispetto a sistemi di monitoraggio classici che per il loro utilizzo richiedono un vero e proprio impianto di cavi con tutte le difficoltà associate alla messa in opera.

Affinché un sistema di monitoraggio possa fornire indicazioni utili per la diagnosi strutturale è necessario che i set di dati acquisiti da ogni singola unità sensoristica, siano temporalmente sincronizzati tra loro; questo aspetto rappresenta una problematica per una rete con unità sensoristiche wireless in quanto è un processo molto complesso da realizzare e necessita l'uso di moduli hardware molto costosi.

L'obiettivo di questo lavoro è stato lo sviluppo di un sistema di monitoraggio strutturale costituito da una rete di unità sensoristiche wireless in grado di operare un processo di sincronizzazione temporale efficace, attraverso l'ausilio di moduli hardware dal costo contenuto. Il metodo di sincronizzazione sviluppato si basa sull'utilizzo di segnali satellitari GPS e permette di rimodulare gli istanti temporali delle misurazioni acquisite con tempi comuni a tutti le unità presenti sulla rete.

## References

- [1] Koo, Ki Young and Hester, David and Kim, Sehoon. "Time Synchronization for Wireless Sensors Using Low-Cost GPS Module and Arduino." *Frontiers in Built Environment*. Vol. 4 (2019). ISSN: 2297-3362.
- [2] Zervopoulos, Alexandros and Tsipis, Athanasios and Alvanou, Aikaterini Georgia and Bezas, Konstantinos and Papamichail, Asterios and Vergis, Spiridon and Styliou, Andreana and Tsoumanis, Georgios

and Komianos, Vasileios and Koufoudakis, George and Oikonomou, Konstantinos. *Wireless Sensor Network Synchronization for Precision Agriculture Applications*. Agriculture. Vol. 10 (2020). ISSN: 2077-0472.

- [3] Linhares, Robson R. and Lima, Carlos R. E. and Renaux, Douglas P. B. and Pottker, Fabiana and Oroski, Elder and Lazzaretti, André E. and Mulinari, Bruna M. and Ancelmo, Hellen C. and Gamba, Adriano and Bernardi, Luiz A. and Lima, Lucas T. *One-millisecond low-cost synchronization of wireless sensor network*. 2019 IX Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC). 2019.
- [4] Kimberly Jane Co and Arlyn Verina Ong and Marnel Peradilla. *WSN Data Collection and Routing Protocol with Time Synchronization in Low-cost IoT Environment*. *Procedia Computer Science*. Vol. 191 (2021). ISSN: 1877-0509.
- [5] N. Ha, H. -S. Lee and S. Lee. *An algorithm for compensating synchronization error in IoT-based wireless sensor networks*. 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Asia (ICCE-Asia), Seoul, Korea (South). 2020.

# Test sperimentale e validazione dei risultati di una rete di dispositivi wireless sincronizzati da impiegare per il monitoraggio strutturale di opere dell'ingegneria civile.

Domenico Colacino<sup>a</sup>, Vincenzo Gualtieri<sup>a</sup>, Antonio Oliverio<sup>a</sup>, Roberto Calbi<sup>b</sup> and Salvatore Tucci<sup>c</sup>

<sup>a</sup>TOD System s.r.l., I traversa Viale Cassiodoro, Davoli, 88060, Italia

<sup>b</sup>I.CA.RO s.r.l., Via Lucrezia della Valle c/o B. C. "Le Aquile", Catanzaro, 88100, Italia

<sup>c</sup>Age.S.P s.r.l.s., Via Lucrezia della Valle c/o B. C. "Le Aquile", Catanzaro, 88100, Italia

---

## ARTICLE INFO

### Keywords:

Vibrazioni meccaniche.

Monitoraggio strutturale.

Rete dispositivi wireless.

Sincronizzazione temporale misurazioni.

Test e sperimentazioni.

## ABSTRACT

Il monitoraggio strutturale continuo, rappresenta un aspetto fondamentale per il controllo della sicurezza e dell'efficienza di diverse opere dell'ingegneria civile.

Conoscendo alcune informazioni di base della struttura, quali: il tipo di materiali costituenti e le loro geometrie, è possibile ottenere una diagnosi sullo stato di salute della stessa, a patto di rilevare opportunamente le microvibrazioni locali.

Per essere affidabili, i metodi di analisi in grado di eseguire tali diagnosi, richiedono che le acquisizioni delle grandezze, realizzate attraverso dispositivi sensoristici, siano in possesso di specifici requisiti, come la possibilità di poter sincronizzare le misurazioni eseguite contemporaneamente da diversi punti della struttura monitorata.

L'obiettivo di questo lavoro è la sperimentazione e il testing di una rete di dispositivi sensoristici wireless sviluppati per fornire i dati ad un sistema di monitoraggio strutturale. La sperimentazione è finalizzata a valutare l'efficacia sulla sincronizzazione da parte dei dispositivi e l'affidabilità delle loro misurazioni eseguite.

---

## 1. Introduzione

Il monitoraggio strutturale di un'opera dell'ingegneria civile è un aspetto essenziale per garantire la sua sicurezza e affidabilità.

Infatti, esistono metodi diagnostici che, attraverso la conoscenza di specifiche grandezze rilevate sull'opera, permettono di ottenere lo stato di salute dell'opera al fine di stabilire opportuni e tempestivi interventi da compiere per salvaguardare l'integrità della struttura.

Nel campo del monitoraggio strutturale per le opere dell'ingegneria edile, l'uso di opportuni sensori è un aspetto fondamentale per rilevare una serie di grandezze fisiche, come ad esempio le vibrazioni. In particolare, i sensori di accelerazione sono in grado di rilevare le microvibrazioni della struttura nei punti in cui sono collocati.

I dati raccolti da più sensori di accelerazione possono essere utilizzati per monitorare l'evoluzione delle vibrazioni nel tempo e per identificare eventuali anomalie, le quali possono essere un indicatore di problemi strutturali, come cedimenti. Quindi, il monitoraggio strutturale con una rete di sensori di accelerazione è una tecnica efficace per la prevenzione dei danni strutturali.

Tuttavia a di questi sensori è associato un problema pratico che spesso ne preclude l'utilizzo pratico.

Tale problema è legato al fatto che per avere una informazione affidabile dell'opera monitorata si devono utilizzare più unità sensoristiche distribuite in punti specifici della struttura stessa e le misurazioni che tali dispositivi eseguono devono essere temporalmente sincronizzate tra loro.

Attualmente, i sistemi di monitoraggio presenti in commercio sono costituiti da una rete di sensori con cavi,

collegate ad una centralina comune per l'invio dei segnali delle grandezze acquisite.

Con questa architettura, i dispositivi consentono di rilevare le grandezze acquisite in maniera sincronizzata grazie al fatto che tutti i cavi sono della stessa lunghezza, ma la problematica è rappresentata dall'installazione dei sensori nei diversi punti della struttura, che possono trovarsi a distanze considerevoli tra loro.

Ciò comporta una grande difficoltà operativa della messa in opera del sistema di monitoraggio, soprattutto se l'impianto, come spesso succede, non è utilizzato in maniera permanente sulla struttura, ma viene utilizzato solo temporaneamente per eseguire i test diagnostici sulla stessa.

Una possibile soluzione a tale problematica è dalla possibilità di poter utilizzare unità sensoristiche wireless, così da permettere una semplice installazione sulla struttura da monitorare grazie alla non presenza dei cavi di collegamento.

Tuttavia ottenere una sincronizzazione temporale accurata nelle misurazioni eseguite da parte di sensori wireless è attualmente un'operazione molto difficoltosa che richiede spesso hardware complessi e costosi.

Obiettivo di questo lavoro è il testing sperimentale per la validazione di un sistema di monitoraggio strutturale prototipale composto da una serie di unità sensoristiche wireless in grado di consentire una sincronizzazione temporale delle misurazioni eseguite, e caratterizzato da dispositivi aventi un hardware semplificato, di facile sviluppo e bassi costo. Al fine di validare il sistema prototipale proposto saranno presentati i risultati ottenuti da una serie di test sperimentali, in cui è stato eseguito un confronto del sistema con un dispositivo master già presente in commercio.

## 2. Descrizione del sistema prototipale

Il sistema di monitoraggio proposto è costituito da una rete di unità sensoristiche wireless indipendenti, ciascuna delle quali è composto da un unico blocco compatto, ovvero una cassetta di contenimento, al cui interno è presente tutta la componentistica elettronica utile.

Tale unità è stata anche rinominata con la sigla *Sis.Mo.Co.* (Sistema di Monitoraggio e Controllo).

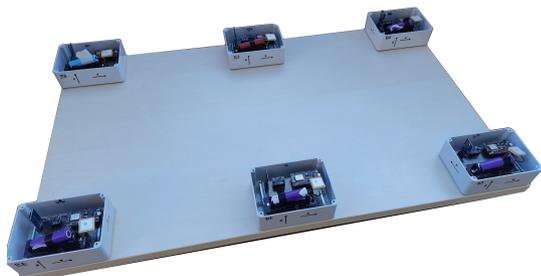
In letteratura esistono diversi lavori, [2], [4], [5], in cui si è cercato di sviluppare sistemi in grado di eseguire tale operazione di sincronizzazione; alcuni di essi, [1], [3], basati sullo sviluppo di un hardware a basso costo, di semplice sviluppo e utilizzo. Tali lavori sono stati presi in considerazione per lo sviluppo delle unità sensoristiche wireless del sistema di monitoraggio prototipale proposto.

Ogni singola unità sensoristica wireless contiene, al suo interno, tutta una serie componentistiche elettroniche utili per l'esecuzione delle azioni richieste; tale componentistica è costituita da:

- Basetta millefori di collegamento.
- Microcontrollore ESP8266.
- Microcontrollore modello LILYGO TTGO T-beam V1.1 ESP32.
- Accelerometro triassiale LSM6DSOX.
- Adattatore microSD.
- Scheda SD 32 GB.
- Antenna GPS (modello 1575R).
- Batteria per alimentazione.

Inoltre, poiché ogni unità sensoristica wireless deve essere vincolata in maniera fissa e stabile nella zona della struttura su cui si devono eseguire le misurazioni delle accelerazioni, per fissare l'unità sono presenti 4 piedini calamitati sulla base inferiore del contenitore, che permettono non soltanto il fissaggio stabile, ma anche la possibilità di rimuovere facilmente il blocco; il tutto senza interferire nelle misurazioni delle grandezze rilevate.

Una immagine reale di sei unità sensoristiche wireless realizzate, è riportata in figura 1.



**Figure 1:** Unità sensoristiche wireless prototipali.

Dal punto di vista operativo, ogni singola unità sensoristica wireless, ha il compito base di registrare, in continuo, sia i valori delle sollecitazioni meccaniche (in termini di accelerazioni delle vibrazioni) a cui è sottoposta, che i segnali temporali ricevuti dal GPS (sia il tempo di FIX che l'evoluzione del segnale PPS).

Tutti questi valori di acquisizione saranno archiviati su di una microSD che memorizzerà i dati. Nella misurazione dei valori di accelerazione ogni singola unità sensoristica wireless può essere settata ad uno specifico valore di frequenza di acquisizione.

Per quanto riguarda la sincronizzazione delle misurazioni eseguite, questa operazione non è eseguita in real-time durante le acquisizioni, ma viene eseguita successivamente, in post-elaborazione, a registrazione terminata.

L'operazione di sincronizzazione consiste nel rimodulare gli istanti temporali delle acquisizioni eseguite dall'unità sensoristica wireless, in modo da associare ad ogni acquisizione un istante temporale comune alle corrispondenti acquisizioni eseguite con tutti le unità presenti nella rete. A tal fine è stato implementato un metodo che permette tale operazione attraverso l'ausilio dei segnali relativi al tempo UTC e al segnale PPS forniti dal sistema satellitare GPS.

In questo modo sarà possibile mettere in confronto le acquisizioni ricavate da più dispositivi appunto perché si potrà stabilire una relazione tra gli istanti temporali espressi con un tempo comune; ciò considerando una finestra temporale in comune tra le acquisizioni eseguite in maniera indipendente.

## 3. Descrizione delle prove sperimentali

Con i test sperimentali si vuole valutare con precisione le prestazioni delle unità sensoristiche wireless prototipali, su di una singola trave soggetta ad un'oscillazione generata a seguito dell'applicazione di uno spostamento indotto, di ampiezza 2 cm. Con i dati rilevati dai test, si vuole verificare se le caratteristiche tecniche di tali unità siano tali da poter analizzare a pieno il fenomeno fisico oggetto di studio.

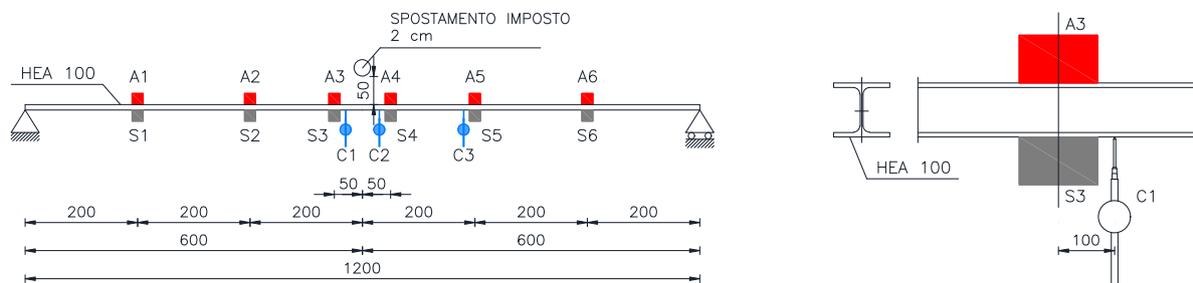
Il metodo di valutazione utilizzato sarà di tipo comparativo, ovvero durante la sperimentazione, alle diverse unità wireless saranno affiancati dei sensori con cavi di un sistema *Master*, già validato in commercio, e successivamente saranno confrontati fra loro le misurazioni eseguite per la validazione.

Per tali test sperimentali è stata considerata una struttura statica costituita da una trave con profilato in acciaio HEA 100 della lunghezza di 12 metri, secondo due configurazioni:

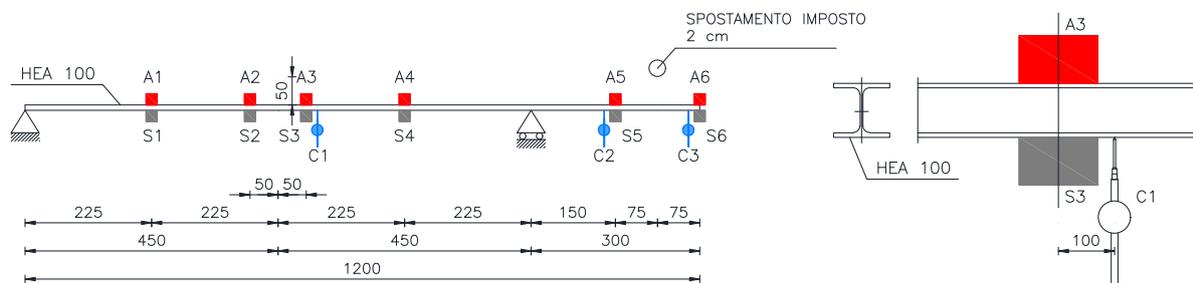
- Schema 1: trave appoggiata.
- Schema 2: trave a sbalzo.

Come specificato, su ogni schema sono applicate le unità sensoristiche, in specifiche posizioni, di due distinti sistemi di acquisizione:

- Sistema Master: sistema con unità sensoristiche a cavo collegate ad una centralina.



**Figure 2:** Configurazione sperimentale di collegamento dei diversi dispositivi utilizzati sulla trave considerata, secondo lo schema sperimentale 1.



**Figure 3:** Configurazione sperimentale di collegamento dei diversi dispositivi utilizzati sulla trave considerata, secondo lo schema sperimentale 2.

- Sistema Sperimentale: con unità sensoristiche wireless indipendenti.

I test prevedono: l'applicazione in un punto specifico della trave di un abbassamento fino a 2 cm, il successivo rilascio e il rilevamento dell'evoluzione delle oscillazioni della trave stessa, nei diversi punti di applicazione dei sensori.

Prima dell'esecuzione dei test sperimentali sono state eseguite delle modellazioni agli elementi finiti per ottenere un'analisi dinamica predittiva numerica, con risultati attesi in termini di escursioni di spostamento generato e di frequenze sviluppate nei punti di osservazione.

Sulla base di tali previsioni, per le prove sperimentali, si è proceduto a settare opportunamente i sensori di accelerazione delle unità sensoristiche wireless in modo da essere adatti all'osservazione del fenomeno e quindi al monitoraggio. In particolare, ogni unità deve garantire le seguenti caratteristiche tecniche:

- una banda minima di frequenze di acquisizione utilizzabile fino a 200 Hz;
- una sensibilità nominale minima pari a  $5 \frac{V}{g}$ ;
- un fondo scala minimo di  $\pm 2 g$ .

Come sistema Master, da utilizzare nei test sperimentali per il confronto, è stato considerato un sistema composto da:

- Sensori accelerometri SA10 (SARA) con frequenze di campionamento da 0-200 Hz.
- Centralina di acquisizione dinamica DYMAS 24 ALBEN a 24 canali.

- Comparatori millesimali (range di spostamenti rilevabili con una escursione massima di circa 5 cm, frequenza di campionamento di 10 Hz).

I sensori di accelerazione del sistema master, sono sensori mono assiali, mentre i sensori nelle unità wireless sono tri-assiali. Per il confronto si farà riferimento alle accelerazioni rilevate lungo la sola direzione verticale.

Come specificato in precedenza, le configurazioni applicative sono due.

Nello schema 1 sono stati installati 6 accelerometri monoassiali tradizionali (identificati con la sigla A e collegati via cavo ad una centralina), tre comparatori millesimali (identificati con la sigla C), e 6 unità sensoristiche wireless sperimentali triassiali (identificati con la sigla S).

In figura 2 è riportata la configurazione di collegamento dei diversi dispositivi sulla trave considerata, secondo lo schema sperimentale 1.

Nello schema 2 sono stati installati sempre 6 accelerometri monoassiali tradizionali (identificati con la sigla A e collegati via cavo ad una centralina), tre comparatori millesimali (identificati con la sigla C), e 6 unità sensoristiche wireless sperimentali triassiali (identificati con la sigla S).

In figura 3 è riportata la configurazione di collegamento dei diversi dispositivi sulla trave considerata, secondo lo schema sperimentale 2.

In figura 4 sono riportate alcune immagini delle prove di sperimentazione eseguite.

Il test sullo schema 1 ha restituito, in termini di frequenze i risultati riportati in tabella 1.

Per validare le prestazioni delle misurazioni sono state prese



**Figure 4:** Immagini delle prove di sperimentazione eseguite.

in considerazione anche i valori degli spostamenti; grazie ad un processo di integrazione, ed all'utilizzo di appositi filtri per evitare deriva numerica, è stato possibile ricavare gli spostamenti dai valori delle accelerazioni ed eseguire una comparazione con i valori ottenuti dai comparatori predisposti. I valori degli spostamenti ricostruiti, per la configurazione Schema 1, sono riportati in tabella 2.

Il test sullo schema 2 ha restituito, in termini di frequenze i risultati riportati in tabella 3.

I valori degli spostamenti ricostruiti, per la configurazione Schema 2, sono riportati in tabella 4.

#### 4. Risultati

La comparazione finale dei risultati ottenuti per i due schemi applicativi e per entrambe le tipologie di sensori, master e prototipale, prevede i seguenti controlli:

- Confronto tra degli andamenti delle accelerazioni acquisite;
- Confronto tra le frequenze fondamentali ricavate dal trattamento numerico delle accelerazioni sperimentali;

RISULTATI FREQUENZE SCHEMA 1		
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
A1	2,16	HZ
A2	2,16	HZ
A3	2,16	HZ
A4	2,16	HZ
A5	2,16	HZ
A6	2,16	HZ
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
D1	2,1713	HZ
D2	2,1698	HZ
D3	2,1713	HZ
D4	2,1698	HZ
D5	2,1713	HZ
D6	NON HA REGISTRATO	

**Table 1**  
Frequenze ottenute, da sistema master e prototipale, per la configurazione Schema 1.

SPOSTAMENTI SCHEMA 1			
SPOSTAMENTI RICAVATI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO (f=0,2)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
A1	10,35	-15,11	mm
A2	11,63	-6,72	mm
A3	20,2	-30,88	mm
A4	20,23	-30,65	mm
A5	17,42	-26,39	mm
A6	10,16	-14,7	mm
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS (f=1)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
D1	15,33	-21,78	mm
D2	26,97	-36,18	mm
D3	16,66	-20,52	mm
D4	15,1	-20,01	mm
D5	14,78	-17,72	mm
D6	NON HA REGISTRATO		

**Table 2**  
Spostamenti ricavati, con sistema master e prototipale, per la configurazione Schema 1.

RISULTATI FREQUENZE SCHEMA 2		
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CON CAVI		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
A1	3,33	HZ
A2	3,33	HZ
A3	3,33	HZ
A4	3,33	HZ
A5	3,33	HZ
A6	3,33	HZ
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
D1	NON HA REGISTRATO	
D2	2,1698	HZ
D3	3,3416	HZ
D4	3,3477	HZ
D5	3,3416	HZ
D6	3,3477	HZ

**Table 3**  
Frequenze ottenute, da sistema master e prototipale, per la configurazione Schema 2.

SPOSTAMENTI SCHEMA 2			
SPOSTAMENTI RICAVATI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO (f=0,2)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
A1	7,96	-4,68	mm
A2	11,63	-6,72	mm
A3	12,24	-6,89	mm
A4	9,77	-5,34	mm
A5	5,2	-11,09	mm
A6	10,68	-22,97	mm
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS (f=4)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
D1	NON HA REGISTRATO		
D2	8,32	-8,05	mm
D3	3,23	-3,25	mm
D4	2,46	-2,49	mm
D5	5,6	-2,27	mm
D6	9,15	-19,34	mm

**Table 4**  
Spostamenti ricavati, con sistema master e prototipale, per la configurazione Schema 2.

- Confronto tra gli andamenti di spostamento ricavati dal trattamento numerico delle accelerazioni sperimentali.

La prima attività sperimentale ha permesso di fornire una prima valutazione sul sistema prototipale con unità sensoristiche wireless. Dall'analisi, si evince che:

- La sovrapposizione grafica delle accelerazioni tra le due tipologie di sistemi ha dato esito positivo;
- In termini di frequenze entrambi i sistemi forniscono frequenze fondamentali molto simili tra di loro rispecchiando le frequenze fondamentali estrapolate dalla modellazione agli elementi finiti;
- Anche gli spostamenti ricavati dai due sistemi tramite successive integrazioni e opportuno filtraggio dei segnali, risultano essere prossimi agli spostamenti ottenuti dai comparatori installati in opera.

In definitiva dal primo test, schema 1, i due sistemi, tradizionale e prototipale, offrono le stesse garanzie di controllo.

La seconda attività sperimentale, schema 2, ha consentito di ottenere una seconda valutazione sul sistema prototipale con unità sensoristiche wireless. In particolare si è ottenuto che:

- La sovrapposizione grafica delle accelerazioni tra le due tipologie di sistemi ha dato esito positivo;
- In termini di frequenze entrambi i sistemi forniscono frequenze fondamentali molto simili tra di loro rispecchiando le frequenze fondamentali estrapolate dalla modellazione agli elementi finiti;
- Allo stesso modo anche gli spostamenti ricavati dai due sistemi tramite successive integrazioni e opportuno filtraggio dei segnali, risultano essere prossimi agli spostamenti ottenuti dai comparatori installati in opera.

Anche dai risultati ottenuti da questo secondo test, risulta che i valori associati alle frequenze e agli spostamenti estrapolati dalla campagna sperimentale siano molto simili tra di loro.

## 5. Conclusioni

Nel lavoro in esame sono state eseguite una serie di test sperimentali per la valutazione di un prototipo di sistema di monitoraggio strutturale, costituito da una rete di unità sensoristiche wireless, per fornire indicazioni utili alla diagnosi di opere dell'ingegneria civile.

Ogni singola unità sensoristica ha il compito di acquisire e archiviare l'intensità delle microvibrazioni della struttura monitorata, attraverso la misurazione delle accelerazioni rilevati in locale nel punto su cui è collocata l'unità stessa. Affinché il sistema di monitoraggio possa fornire indicazioni utili per la diagnosi strutturale è necessario che i set di dati

acquisiti da ogni singola unità sensoristica, siano temporalmente sincronizzati tra loro.

Il metodo di sincronizzazione, sviluppato per il sistema proposto, si basa sull'utilizzo di segnali satellitari GPS e permette di rimodulare gli istanti temporali delle misurazioni acquisite con tempi comuni a tutti le unità presenti sulla rete. Per testare e validare il sistema proposto sono state eseguite delle prove sperimentali, in cui il sistema in esame è stato affiancato ad un sistema master, già validato, costituito da unità sensoristiche con cavi.

Dalle prove eseguite, nella campagna sperimentale, si è visto come i due sistemi a confronto, ovvero il sistema prototipale con unità sensoristiche wireless e il sistema master con cavi, mostrano risultati molto simili tra di loro.

## References

- [1] Koo, Ki Young and Hester, David and Kim, Sehoon. "Time Synchronization for Wireless Sensors Using Low-Cost GPS Module and Arduino." *Frontiers in Built Environment*. Vol. 4 (2019). ISSN: 2297-3362.
- [2] Zervopoulos, Alexandros and Tsipis, Athanasios and Alvanou, Aikaterini Georgia and Bezas, Konstantinos and Papamichail, Asterios and Vergis, Spiridon and Styliou, Andreana and Tsoumanis, Georgios and Komianos, Vasileios and Koufoudakis, George and Oikonomou, Konstantinos. *Wireless Sensor Network Synchronization for Precision Agriculture Applications*. *Agriculture*. Vol. 10 (2020). ISSN: 2077-0472.
- [3] Linhares, Robson R. and Lima, Carlos R. E. and Renaux, Douglas P. B. and Pottker, Fabiana and Oroski, Elder and Lazzaretti, André E. and Mulinari, Bruna M. and Ancelmo, Hellen C. and Gamba, Adriano and Bernardi, Luiz A. and Lima, Lucas T. *One-millisecond low-cost synchronization of wireless sensor network*. 2019 IX Brazilian Symposium on Computing Systems Engineering (SBESC). 2019.
- [4] Kimberly Jane Co and Arlyn Verina Ong and Marnel Peradilla. *WSN Data Collection and Routing Protocol with Time Synchronization in Low-cost IoT Environment*. *Procedia Computer Science*. Vol. 191 (2021). ISSN: 1877-0509.
- [5] N. Ha, H. -S. Lee and S. Lee. *An algorithm for compensating synchronization error in IoT-based wireless sensor networks*. 2020 IEEE International Conference on Consumer Electronics - Asia (ICCE-Asia), Seoul, Korea (South). 2020.

# **SISTEMA DI MONITORAGGIO E SORVEGLIANZA IN CONTINUO PER LA VERIFICA DEI PONTI E DELLE OPERE DELL'INGEGNERIA CIVILE: CAMPAGNE SPERIMENTALI**

G. Porco \* - F. Forestieri\*\* - D. De Vita \*\* - F. De Bartolo\*\* - A. Iorfida\*\* - L. Bonanno\*\*

\*Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria.

[giacinto.porco@unical.it](mailto:giacinto.porco@unical.it)

\*\*Sismlab s.r.l.- Spin – Off Università della Calabria.

[info@sismlab.it](mailto:info@sismlab.it)

[f.forestieri@sismlab.it](mailto:f.forestieri@sismlab.it)

[nfd.devita@sismlab.it](mailto:nfd.devita@sismlab.it)

[f.debartolo@sismlab.it](mailto:f.debartolo@sismlab.it)

[a.iorfida@sismlab.it](mailto:a.iorfida@sismlab.it)

[l.bonanno@sismlab.it](mailto:l.bonanno@sismlab.it)

## **SOMMARIO**

Il presente articolo si inquadra nel contesto del Progetto denominato “*Progetto R&S Sis.Mo.Co. - Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell'ingegneria civile*” e restituisce nello specifico i test sperimentali votati alla validazione dei nuovi sensori wireless per il monitoraggio e controllo in campo dinamico delle strutture dell'ingegneria civile.

Le attività sperimentali hanno visto coinvolti i partner Sismlab s.r.l. e Tod System s.r.l. ed in particolare hanno riguardato azioni di tipo numerico per la definizione di dati utili al settaggio dei nuovi accelerometri e a seguire l'esecuzione di campagne dinamiche su prototipi sia in scala ridotta che reale con comparazione tra i risultati ottenuti a valle del trattamento numerico per le acquisizioni di entrambi i sensori, innovativi e di tipo tradizionale.

### **1. INTRODUZIONE**

Sulla scorta delle informazioni acquisite, i partner hanno individuato un sensore innovativo con tecnologia wireless per il monitoraggio strutturale in campo dinamico di opere dell'ingegneria civile, in sostituzione a quelli tradizionali presenti sul mercato. Ora resta ricercare informazioni utili alla taratura di tale prototipo per ottenere una versione perfezionata e pronta ad essere validata con test sperimentali che ne verifichino il corretto funzionamento.

A tale scopo i partner hanno programmato tre attività, di cui la prima di tipo prettamente numerico prevede il trattamento di dati accelerometrici già disponibili rilevati precedentemente dal monitoraggio dinamico di un ponte in c.a.. L'obiettivo di questa prima fase è quello di individuare i parametri caratterizzanti il comportamento modale di un'opera in c.a. utili a tarare e calibrare il nuovo sensore. Le successive attività sono di tipo sperimentale e consistono in due campagne dinamiche da eseguire sia su prototipi in scala ridotta e sia su un caso studio reale di torre eolica. Queste campagne sperimentali hanno inizio con un'analisi modale predittiva, finalizzata ad individuare i valori attesi in termini di frequenza fondamentale della struttura, e seguono poi con

attività di confronto tra i valori di frequenze ottenute a valle del trattamento numerico dei dati accelerometrici rilevati da entrambi i tipi di sensore, tradizionale e wireless. Si restituisce, inoltre, ai fini della validazione del prototipo di sensore anche il confronto in termini di spostamento tra i valori misurati direttamente dai comparatori installati in opera e quelli ottenuti dal trattamento numerico delle accelerazioni misurate durante la campagna dinamica da entrambi i tipi di sensore.

Di seguito si riportano le attività svolte, partendo dalla caratterizzazione dinamica di un ponte in c.a. con individuazione dei parametri utili alla taratura e calibrazione del nuovo sensore, per poi esporre i risultati salienti ottenuti dalla sperimentazione sia di laboratorio che di campo.

## 2. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA DI UN PONTE IN C.A. PER LA TARATURA E CALIBRAZIONE DEL NUOVO SENSORE

Il ponte in c.a. oggetto della campagna dinamica è costituito da tre campate giuntate aventi sistema strutturale di tipo “ad arco a spinta eliminata”, con luce totale di circa 100 metri, con monta di circa 8,00 per la campata B e di circa 7,00 m per le campate A e C.

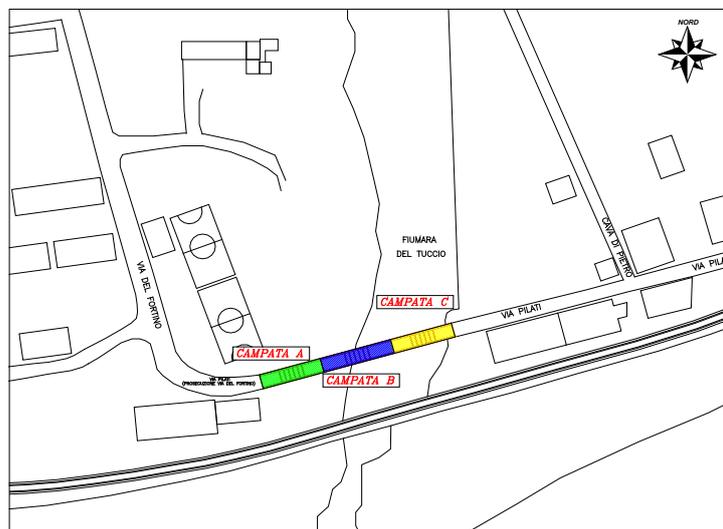


Fig. 1 - Planimetria Generale Ponte.

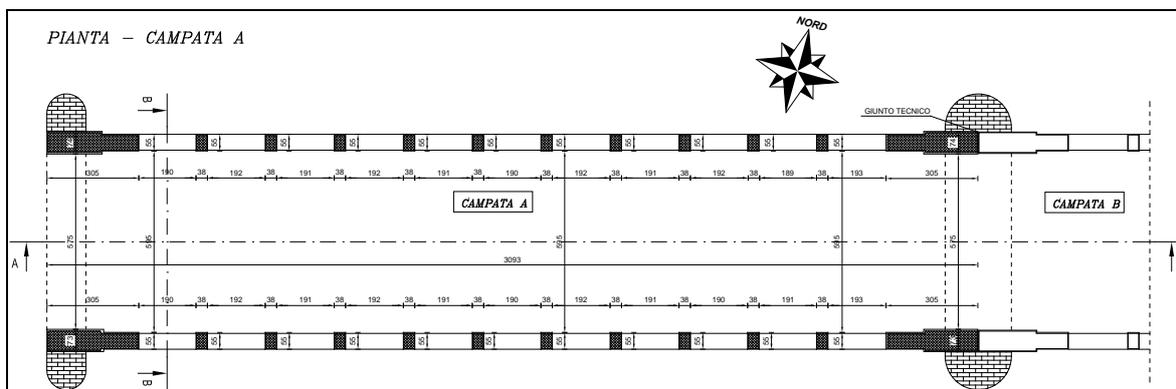


Fig. 2 - Rilievo Geometrico Campata A - Pianta.

Fig.

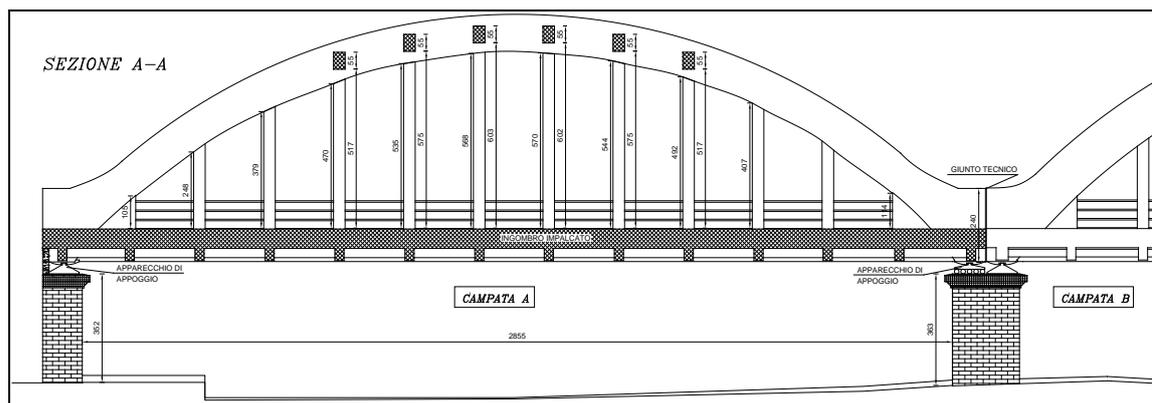


Fig. 3 - Rilievo Geometrico Campata A - Sezione Longitudinale.

Nel Settembre 2021 su tale opera è stata effettuata una campagna sperimentale per la caratterizzazione meccanica dei materiali, a carico della Sismlab, dalla quale sono stati individuati i parametri meccanici del calcestruzzo e dell'acciaio da utilizzare nelle analisi numeriche con un modellatore agli elementi finiti.

Sempre su tale opera è stata effettuata in passato una campagna dinamica sperimentale, sempre a carico della Sismlab. All'epoca di tale sperimentazione, le misurazioni delle accelerazioni di piano dell'impalcato in direzione verticale sono state acquisite in determinati punti della campata A in due distinte campagne di indagine secondo due diverse configurazioni di allocazione dei sensori, per come di seguito riportato nelle figure, utilizzando come parametri un tempo di acquisizione pari a 15 minuti e una frequenza di campionamento pari a 200 Hz.

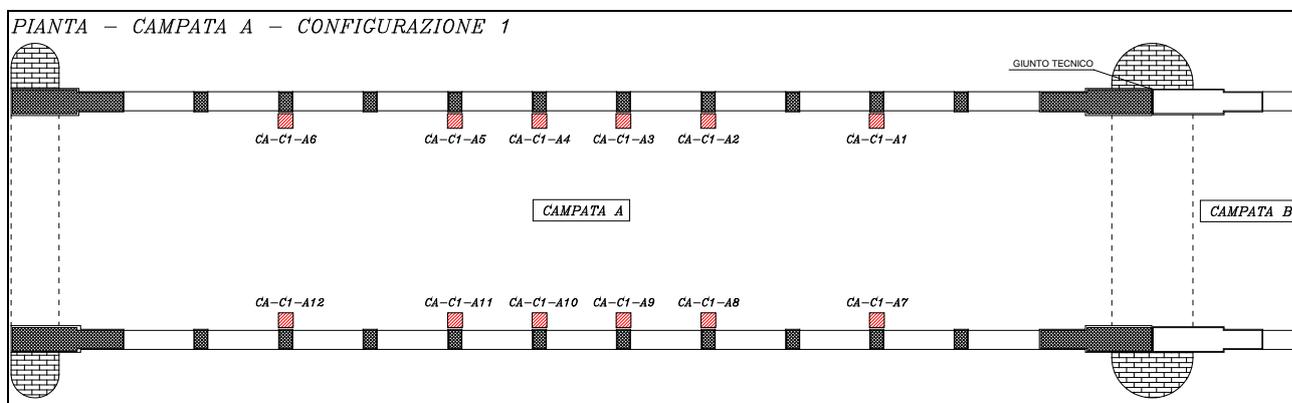


Fig. 4 - Ubicazione accelerometri Campata A Configurazione 1.

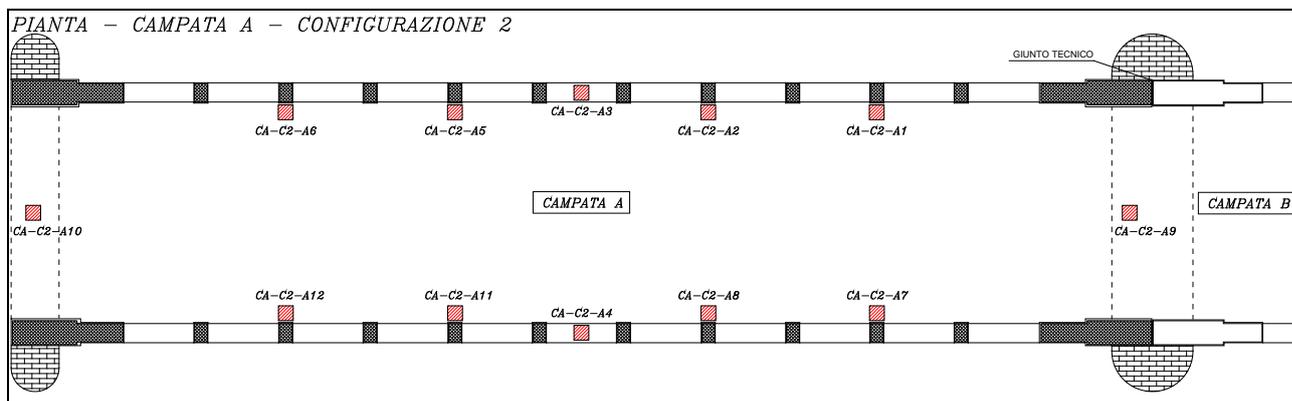


Fig. 5 - Ubicazione accelerometri Campata A Configurazione 2.

Nell'ambito del progetto Sis.Mo.Co. data la disponibilità di questi valori di accelerazione già acquisiti, i partners hanno programmato ed eseguito attività di trattamento numerico con l'intento di recuperare grandezze utili per la taratura e la messa in esercizio dei nuovi prototipi di accelerometro. In particolare, l'approccio numerico previsto per il trattamento di questi dati grezzi è stato quello dell'analisi modale operativa *OMA Operational Modal Analysis* con tecnica di identificazione dinamica di tipo *output-only*, nota come *FDD Frequency Domain Decomposition*. Tale metodo, partendo dai valori sperimentali di accelerazione acquisiti in campo sulla struttura sottoposta ad eccitazione ambientale del rumore bianco, restituisce in maniera automatica i parametri modali del ponte in c.a., permettendo di recuperare in generale le informazioni sul comportamento dinamico delle opere di ingegneria civile, utili al settaggio del sensore prototipo nelle successive fasi di sperimentazione.

Dall'analisi modale teorica condotta con un software agli elementi finiti per le due differenti modellazioni, integra e danneggiata, si sono ottenuti i seguenti valori, riportati in tabella, di periodi e frequenze relative ai modi globali della struttura. Da questi si evince come il danneggiamento comporti un aumento della frequenza relativa al primo modo di vibrare in direzione verticale z.

	MODELLO INTEGRO CAMPATA A			MODELLO DANNEGGIATO CAMPATA A		
	Periodo	Frequenza	Direzione	Periodo	Frequenza	Direzione
	Sec	Cic/sec	-	Sec	Cic/sec	-
MODO 1	0,311	3,216	Y	0,311	3,219	Y
MODO 2	0,221	4,528	Y	0,222	4,500	Y
MODO 3	<b>0,156</b>	<b>6,389</b>	<b>Z</b>	<b>0,153</b>	<b>6,527</b>	<b>Z</b>

Tabella 1 - Frequenze del modello FEM.

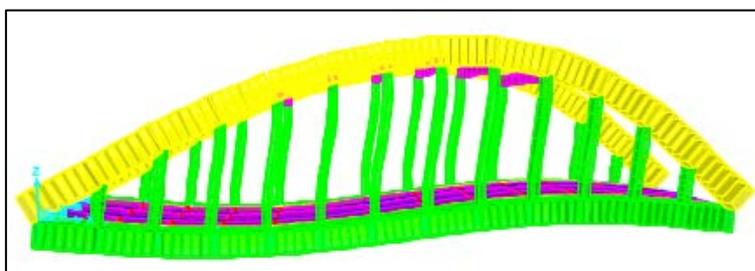


Fig. 6 - Deformata del primo modo di vibrare della Campata A in direzione Z.

I risultati più significativi, ottenuti a valle del trattamento numerico del dato sperimentale con metodo OMA per le due differenti configurazioni di acquisizione, sono le frequenze relative ai modi globali della struttura in direzione verticale, di seguito riportate in tabella.

	CONFIGURAZIONE 1 CAMPATA A		CONFIGURAZIONE 2 CAMPATA A	
	Frequenza	Direzione	Frequenza	Direzione
	Cic/sec	-	Cic/sec	-
MODO 1	<b>7,479</b>	<b>Z</b>	<b>7,465</b>	<b>Z</b>
MODO 2	8,704	Z	8,704	Z
MODO 3	12,933	Z	12,918	Z

Tabella 2 - Frequenze del modello sperimentale dinamico condotto sulla Campata A.

Questi risultati confermano la bontà della modellazione numerica in quanto l'impalcato della Campata A, essendo totalmente fuori servizio, restituisce delle frequenze di vibrazione più alte del modello integro e delle campagne sperimentali condotte sulla speculare Campata C (6,189 Hz).

Le frequenze rilevate in opera caratterizzanti lo stato di danneggiamento della Campata A evidenziano sia frequenze a valore più alto rispetto a quelle teoriche integre sia modi dissimmetrici, che attestano il diverso stato di danneggiamento delle parti resistenti. In particolare si sono riscontrati valori caratteristici di frequenze riferite a campate danneggiate che si attestano a 7,4 Hz in linea con quanto previsto dalla modellazione FEM.

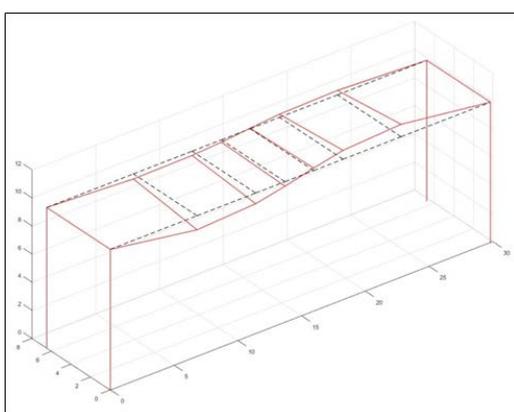


Fig. 7 - Campata A Configurazione 1 Modo 1

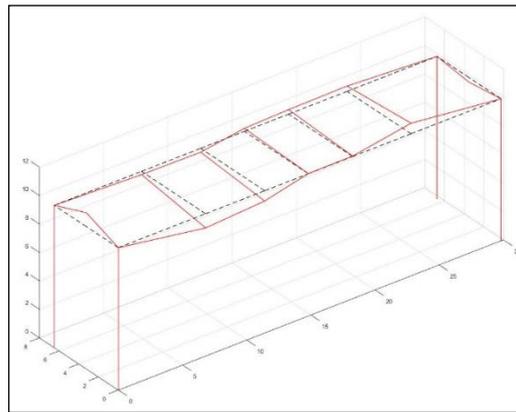


Fig. 8 - Campata A Configurazione 2 Modo 1

Sulla scorta dei parametri dinamici recepiti dalla campagna sperimentale sul ponte, è stato possibile capire come, utilizzando sensori con frequenza di campionamento pari a 200 Hz e range di acquisizione pari a  $\pm 2g$ , sia possibile risalire dalle accelerazioni al campo di spostamento filtrando opportunamente frequenze che danno deriva numerica. In particolare, è stato possibile individuare le caratteristiche tecniche per perfezionare il prototipo di sensore, di cui una banda minima utilizzabile che va da 0-200Hz, una sensibilità nominale minima pari a 5 V/g (2g fondo scala), e un fondo scala minimo pari a  $\pm 2g$  standard.

Di seguito si riportano i risultati dei test di vibrazioni ambientale per la verifica del corretto funzionamento del prototipo di sensore sia su strutture in acciaio che su strutture in c.a.

### 3. CAMPAGNA SPERIMENTALE PER LA VALIDAZIONE DEL NUOVO SENSORE

Nella presente sezione si riportano le campagne dinamiche sperimentali per la validazione e verifica dei sensori prototipo tarati con i parametri adatti al rilevamento del fenomeno. Il primo test riguarda prototipi in scala ridotta, costituiti da due travi in acciaio con differenti schemi statici. Il secondo test consiste nella campagna dinamica di campo effettuata sulla struttura reale di una torre eolica. Le acquisizioni accelerometriche sono avvenute, per entrambi i test, simultaneamente attraverso i due tipi di sensore, wireless e tradizionale.

Per tali attività, al fine di validare il prototipo di sensore, sono state previste attività di confronto delle frequenze sperimentali ottenute a valle del trattamento numerico dei dati accelerometrici acquisiti dai due tipi di sensore. Il confronto è stato restituito anche in termini di spostamento tra i valori misurati direttamente dai comparatori installati sui profilati HEA e quelli ottenuti dal trattamento numerico dei dati accelerometrici acquisiti in opera.

I risultati sperimentali di seguito presentati sono contenuti anche nell'articolo [6] sulla sperimentazione e validazione dei risultati di una rete di dispositivi wireless sincronizzati, a cura dei partner TOD System s.r.l., I.CA.RO s.r.l., Age.S.P s.r.l.s.

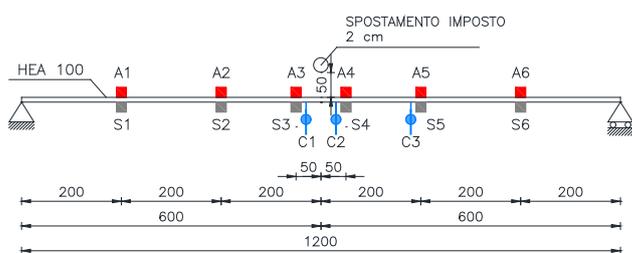
### 3.1 RISULTATI TEST DI LABORATORIO

I test di laboratorio eseguiti da entrambi i partner Sismlab s.r.l. e Tod System s.r.l, si sono riferiti a due schemi statici realizzati con profilati in acciaio HEA 100 della lunghezza di 12 metri, di cui uno con schema N.1 di trave appoggiata e l'altro con schema N.2 di trave a sbalzo. Su ciascuno schema sono stati installati due tipologie di sistema di acquisizione, quello con gli accelerometri prototipo collegati tramite GPS e quello con accelerometri tradizionali collegati direttamente via cavo ad una centralina di acquisizione. Le acquisizioni per ciascuno schema hanno misurato la vibrazione generata da un abbassamento indotto di 2 cm con rilascio immediato.

Prima di eseguire i test sono state eseguite analisi modali predittive sui modelli FEM delle travi HEA per ottenere le previsioni in termini di periodi e frequenze fondamentali della struttura. Grazie al supporto previsionale ottenuto dalla modellazione agli elementi finiti è stato possibile continuare la sperimentazione ed eseguire i test sui due prototipi, restituendo come risultato l'andamento delle accelerazioni nel tempo e quello delle frequenze fondamentali ottenute da un opportuno trattamento del dato sperimentale.

Nello schema N.1, come di seguito riportato in figura, sono stati installati 6 accelerometri monoassiali tradizionali identificati con la sigla "A" e collegati via cavo a tre comparatori millesimali C1, C2, e C3; e 6 accelerometri sperimentali triassiali identificati con la sigla "S" collegati tramite GPS.

SCHEMA 1



PARTICOLARE

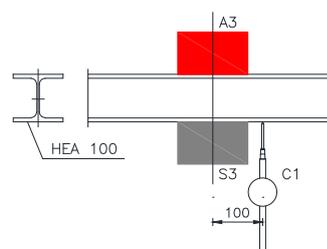




Fig. 9 -1° Campagna sperimentale \_ Schema N.1: preparazione del primo test.

Sono state ricavate, dall'analisi modale per lo schema N.1, le previsioni in termini di frequenze fondamentali della struttura. In particolare, la frequenza fondamentale teorica con partecipazione di massa lungo l'asse "Z" per il caso di trave appoggiata è risultata pari a 2.28 Hz.

FREQUENZE RICAVATE CON MODELLO FEM				
TABLE: Modal Periods And Frequencies				
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec
MODAL	Mode	1	0,437097	2,28782164
MODAL	Mode	2	0,048817	20,48461295
MODAL	Mode	3	0,017753	56,32719128
MODAL	Mode	4	0,009131	109,51407
MODAL	Mode	5	0,004429	225,7667056

Tabella 3- Frequenze ricavate dal modello FEM.

Si è proseguito all'acquisizione delle accelerazioni sperimentali e al trattamento numerico delle stesse con restituzione dell'andamento delle frequenze nel tempo per entrambi i tipi di sensore.

RISULTATI FREQUENZE SCHEMA 1		
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
A1	2,16	HZ
A2	2,16	HZ
A3	2,16	HZ
A4	2,16	HZ
A5	2,16	HZ
A6	2,16	HZ
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
D1	2,1713	HZ
D2	2,1698	HZ
D3	2,1713	HZ
D4	2,1698	HZ
D5	2,1713	HZ
D6	NON HA REGISTRATO	

Tabella 4- Frequenze ottenute da entrambi gli accelerometri per lo Schema 1.

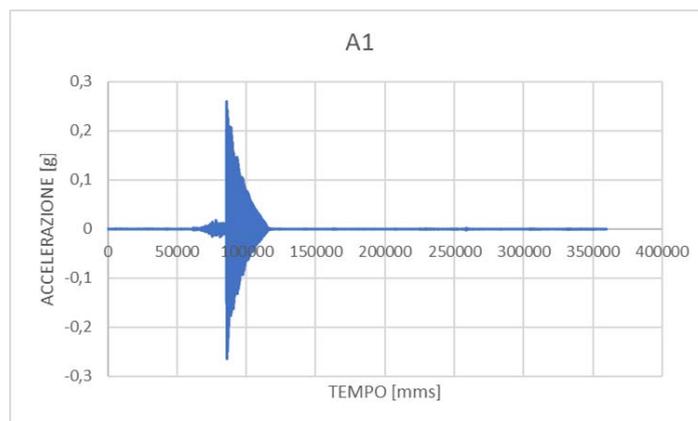


Fig. 10 – Andamento dell'accelerazione nel tempo (Accelerometro tradizionale).

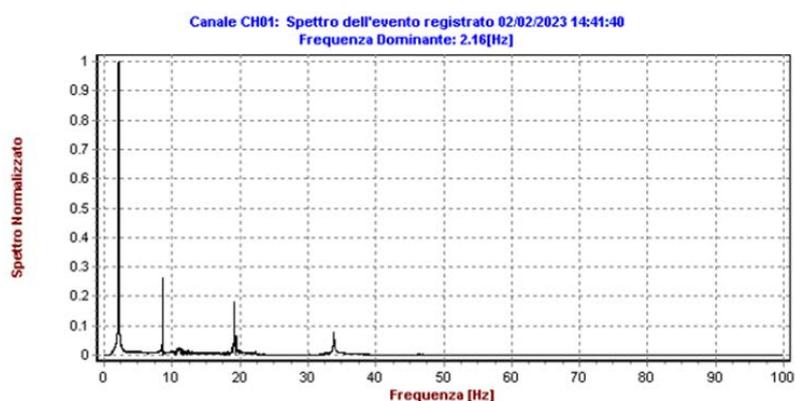


Fig. 11 – Frequenza fondamentale ricavata dall'accelerometro tradizionale.

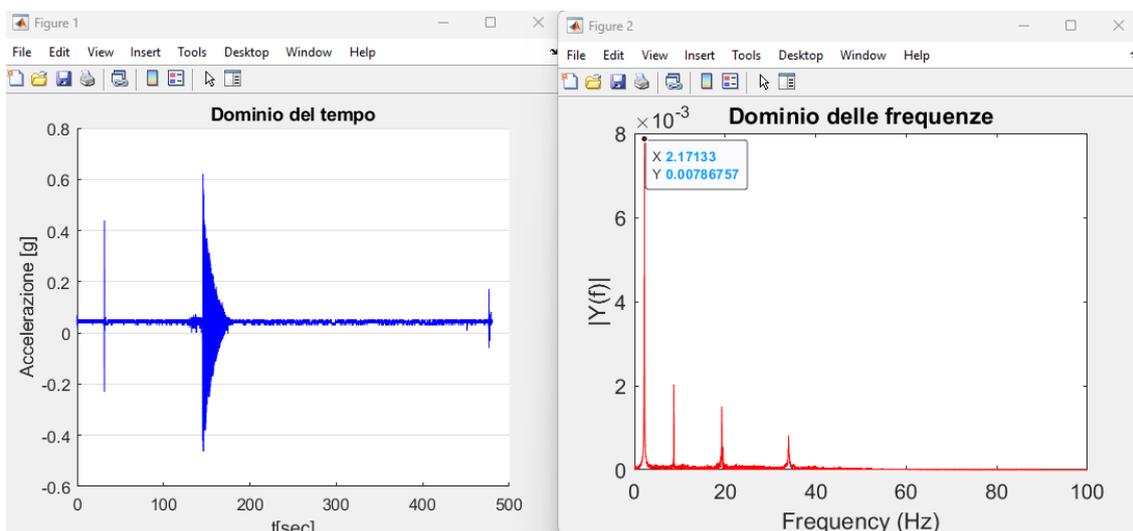


Fig. 12 – Accelerogramma e Frequenza fondamentale ricavata da un accelerometro prototipale.

La validazione dell'accelerometro è passata anche da una valutazione in termini di spostamento, pertanto, è stato eseguito un confronto tra i valori di spostamento ottenuti dai dati accelerometrici e quelli ottenuti dai comparatori predisposti sul prototipo.

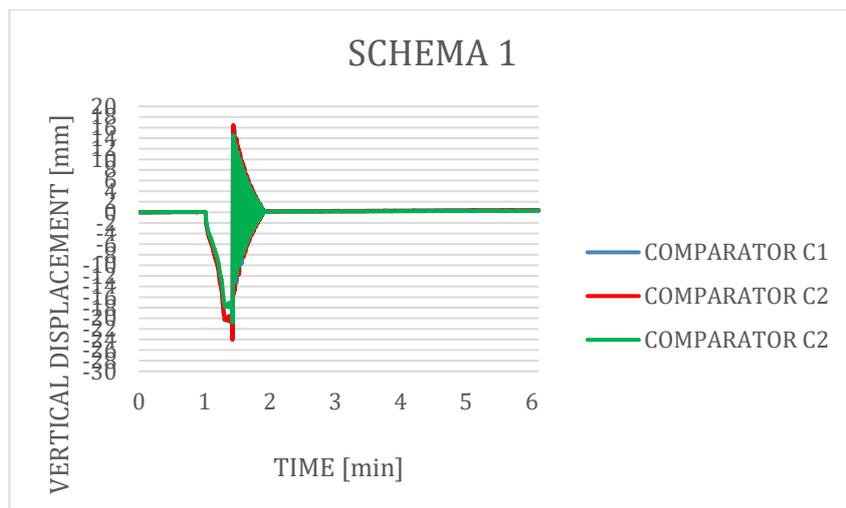


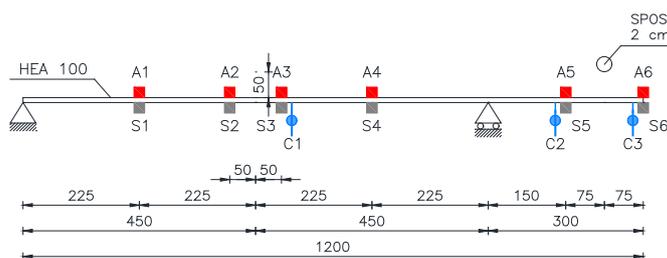
Fig. 13 – Andamento degli spostamenti ricavati dai comparatori.

SPOSTAMENTI SCHEMA 1			
SPOSTAMENTI RICAVATI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO (f=0,2)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
A1	10,35	-15,11	mm
A2	11,63	-6,72	mm
A3	20,2	-30,88	mm
A4	20,23	-30,65	mm
A5	17,42	-26,39	mm
A6	10,16	-14,7	mm
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS (f=1)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
D1	15,33	-21,78	mm
D2	26,97	-36,18	mm
D3	16,66	-20,52	mm
D4	15,1	-20,01	mm
D5	14,78	-17,72	mm
D6		NON HA REGISTRATO	

Tabella 5- Spostamenti ricavati dagli accelerometri.

Anche per lo schema n°2 è stata eseguita una analisi modale predittiva attraverso una modellazione FEM e successivamente sono stati ricavati gli andamenti di accelerazione e frequenze sperimentali.

SCHEMA 2



PARTICOLARE

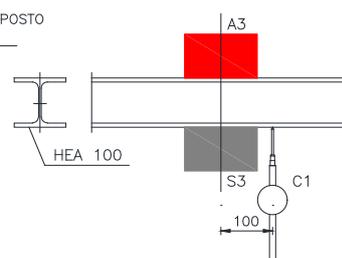




Fig. 14 -2° Campagna sperimentale\_ Schema N.2: preparazione del secondo test.

La frequenza fondamentale con partecipazione di massa lungo l'asse "Z" per il caso di trave a mensola derivante dall'analisi modale è pari a 3.49 Hz.

TABLE: Modal Periods And Frequencies				
OutputCase	StepType	tepNur	Period	Frequency
Text	Text	Jnitless	Sec	Cyc/sec
MODAL	Mode	1	2,004428	0,49889534
MODAL	Mode	2	0,322302	3,102680838
MODAL	Mode	3	0,285825	3,498647372

Tabella 6- Frequenze ricavate dal modello FEM.

Analogamente allo schema N.2 si è proseguito con la sperimentazione restituendo gli andamenti delle accelerazioni e delle frequenze nel tempo per entrambi i tipi di sensore.

RISULTATI FREQUENZE SCHEMA 2		
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CON CAVI		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
A1	3,33	HZ
A2	3,33	HZ
A3	3,33	HZ
A4	3,33	HZ
A5	3,33	HZ
A6	3,33	HZ
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS		
ID. SENSORE	FREQUENZA	UNITA' DI MISURA
D1	NON HA REGISTRATO	
D2	2,1698	HZ
D3	3,3416	HZ
D4	3,3477	HZ
D5	3,3416	HZ
D6	3,3477	HZ

Tabella 7- Frequenze ottenute da entrambi gli accelerometri per lo Schema 2.

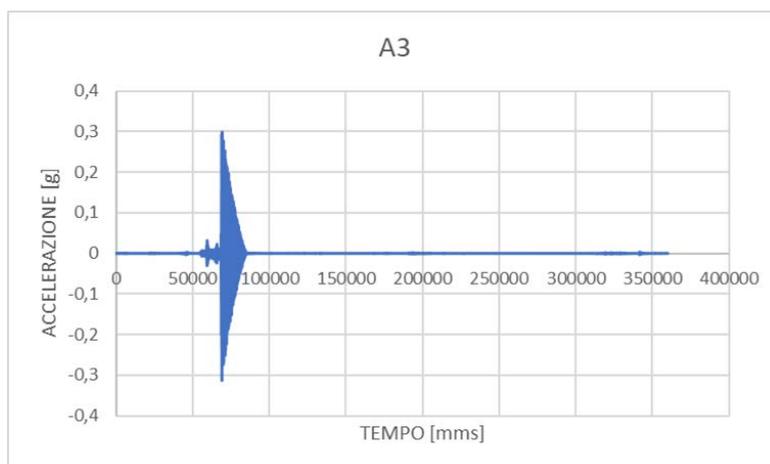


Fig. 15 – Andamento dell'accelerazione nel tempo (Accelerometro tradizionale).

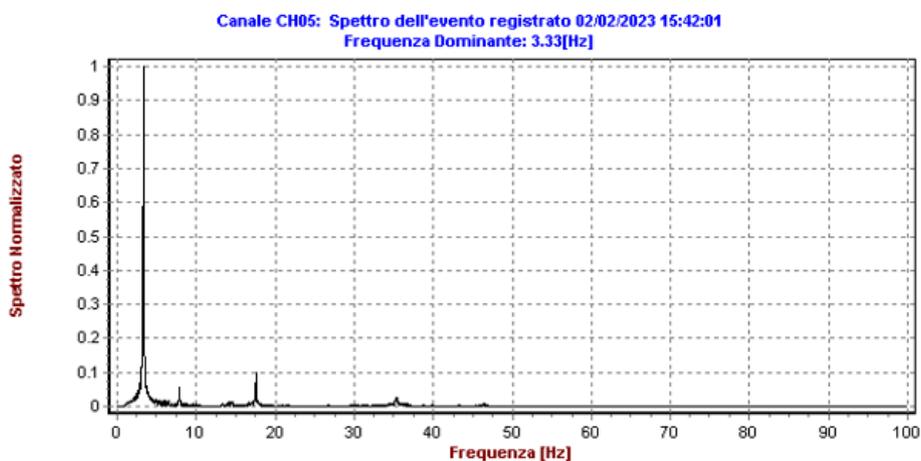


Fig. 16 – Frequenza fondamentale ricavata dall'accelerometro tradizionale.

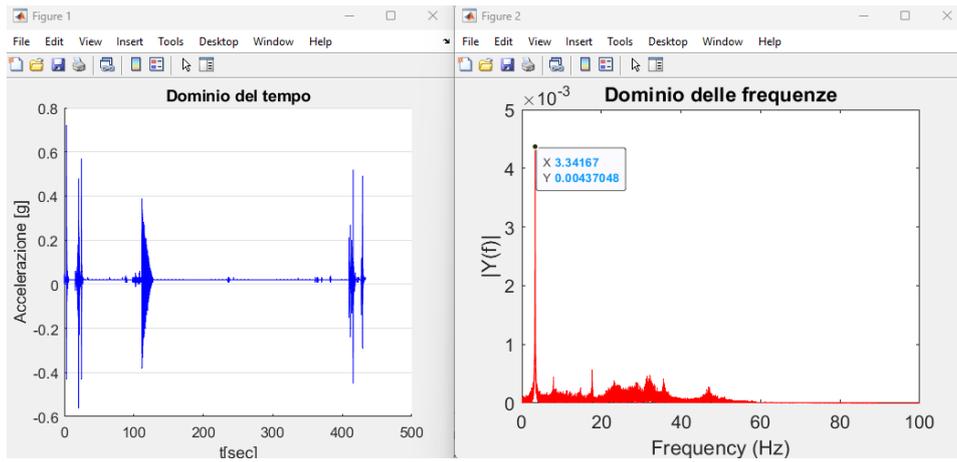


Fig. 17 – Accelerogramma e Frequenza fondamentale ricavata da un accelerometro prototipale.

Anche la comparazione in termini di spostamento è avvenuta come nel primo test restituendo i seguenti risultati.

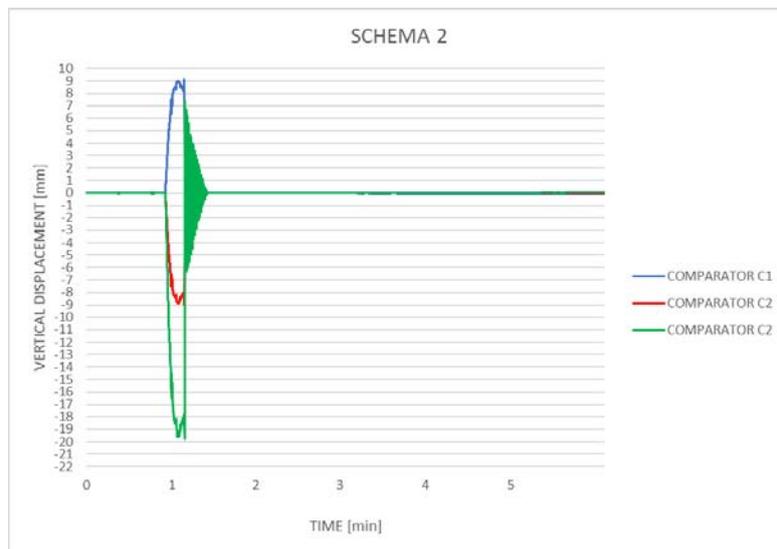


Fig. 18 – Andamento degli spostamenti ricavati dai comparatori.

SPOSTAMENTI SCHEMA 2			
SPOSTAMENTI RICAVATI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO (f=0,2)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
A1	7,96	-4,68	mm
A2	11,63	-6,72	mm
A3	12,24	-6,89	mm
A4	9,77	-5,34	mm
A5	5,2	-11,09	mm
A6	10,68	-22,97	mm
FREQUENZE RICAVATE CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS (f=4)			
ID. SENSORE	SPOST. MAX (+)	SPOST. MAX (-)	UNITA' DI MISURA
D1		NON HA REGISTRATO	
D2	8,32	-8,05	mm
D3	3,23	-3,25	mm
D4	2,46	-2,49	mm
D5	5,6	-2,27	mm
D6	9,15	-19,34	mm

Tabella 8- Spostamenti ricavati dagli accelerometri.

### 3.2 RISULTATI CAMPAGNA DINAMICA SU TORRE EOLICA

Supportati dagli ottimi risultati ricavati dai due test di laboratorio, gli autori sono passati alla validazione del nuovo accelerometro attraverso una nuova sperimentazione sul caso reale di una torre eolica. La procedura ha previsto la misurazione delle oscillazioni della torre indotte da una condizione di arresto in esercizio dell'aerogeneratore. In particolare, si sono considerati due tipi di arresto, il Normal Stop (arresto ordinario) e l'Emergency Stop (arresto in emergenza), secondo i seguenti passi cronologicamente ordinati:

- Fermo macchina. La fase di campo per il controllo delle accelerazioni e delle frequenze verticali ha avvio con l'arresto dell'aerogeneratore.
- Messa a dimora dei sensori nei punti prescelti. Prima dell'avvio e dell'entrata in esercizio dell'aerogeneratore sono stati installati, in punti preordinati, misuratori di spostamento e accelerometri mono assiali.
- Avvio dell'aerogeneratore.
- Avvio delle registrazioni, quando la torre va a regime, con imposizione della procedura di Normal Stop o di Emergency Stop, a secondo del test da effettuare.

L'attrezzatura prevista per la campagna dinamica sperimentale è costituita da:

- Centralina di acquisizione a 24 canali;
- n. 7 Accelerometri monoassiali da collocare per le acquisizioni verticali ossia lungo l'asse Z,
- n. 8 Cavi di collegamento schermati e dotati di connettore;
- Pc dotato di Software di acquisizione e per la gestione dati;
- Piastre di collegamento per la messa a dimora dei sensori di perimetro sulla torre;
- 2 Comparatori millesimali;
- 6 sensori accelerometrici wireless.

Di seguito si riportano gli schemi usati per la campagna di indagine e i risultati derivanti dall'analisi modale predittiva e dalla sperimentazione con successivo trattamento del dato.

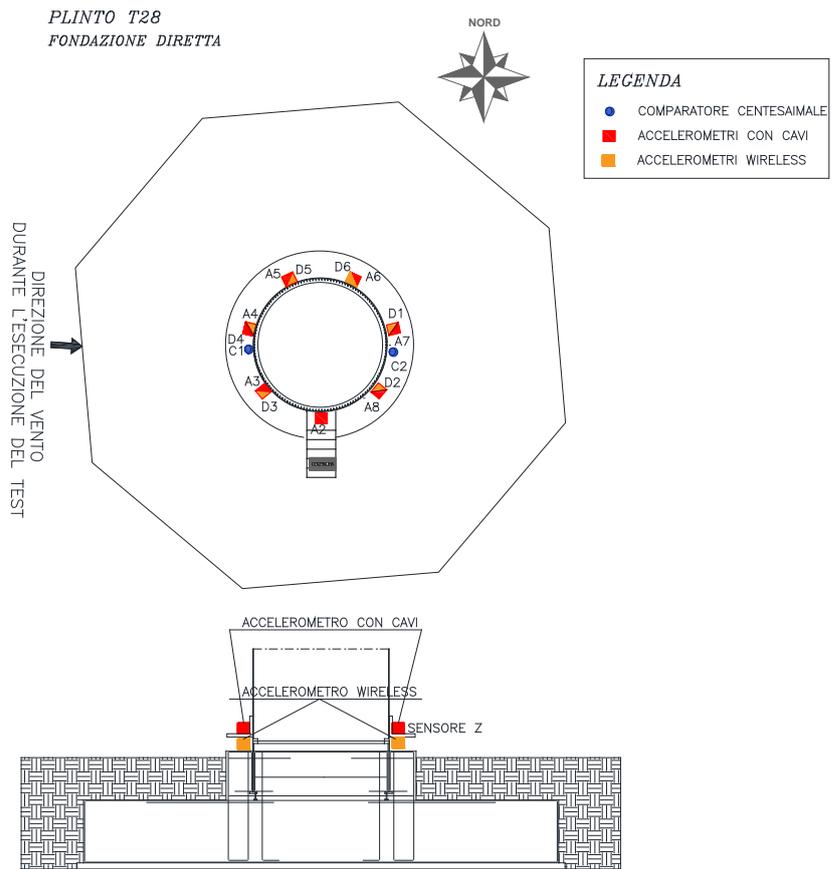


Fig. 19 -Schema della terza campagna sperimentale.

La campagna sperimentale parte con un'analisi modale predittiva finalizzata ad individuare le frequenze fondamentali teoriche, a fornire informazioni sul numero e sulla collocazione ottimale dei sensori, sui tempi di acquisizione, nonché ad essere guida interpretativa degli scenari di possibile evoluzione del fenomeno osservato, per generare utili parametri di soglia in termini di frequenze e spostamenti. Le frequenze fondamentali con partecipazione di massa lungo l'asse "Z" si sono riscontrate a partire da valori di frequenza pari a 19,28 Hz.

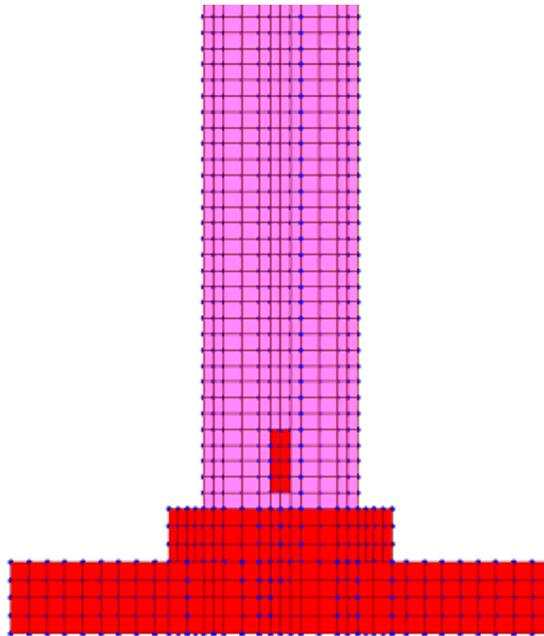


Fig. 20 -Modello FEM della torre eolica.

TABLE: Modal Periods And Frequencies				
OutputCase	StepType	StepNum	Period	Frequency
Text	Text	Unitless	Sec	Cyc/sec
MODAL	Mode	1	0,051849	19,28684602
MODAL	Mode	2	0,020146	49,63792409
MODAL	Mode	3	0,012043	83,03575692
MODAL	Mode	4	0,00851	117,5155114
MODAL	Mode	5	0,006706	149,1112493
MODAL	Mode	6	0,005443	183,7223743
MODAL	Mode	7	0,0046	217,3852176
MODAL	Mode	8	0,004018	248,9014307
MODAL	Mode	9	0,003725	268,4221501
MODAL	Mode	10	0,003708	269,651345

Tabella 9- Frequenze ricavate dal modello FEM.

<b>RISULTATI FREQUENZE TORRE EOLICA STOP</b>		
<b>FREQUENZE RICAVATE CON SENSORI CABLATI</b>		
<b>ID. SENSORE</b>	<b>FREQUENZA</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
A2	42,4	HZ
A3	36,2	HZ
A4	32,7	HZ
A5	45	HZ
A6	43,9	HZ
A7	51,5	HZ
A8	49,3	HZ
<b>FREQUENZE RICAVATE CON SENSORI WIRELESS</b>		
<b>ID. SENSORE</b>	<b>FREQUENZA</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
D3	NON HA REGISTRATO	
D4	8,97	HZ
D5	NON HA REGISTRATO	
D6	33,41	HZ
D1	9,43	HZ
D2	2,45	HZ

Tabella 10- Frequenze ottenute da entrambi gli accelerometri per il caso reale nella condizione di Stop della torre.

<b>RISULTATI FREQUENZE TORRE EOLICA EMERGENCY STOP</b>		
<b>FREQUENZE RICAVATE CON SENSORI CABLATI</b>		
<b>ID. SENSORE</b>	<b>FREQUENZA</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
A2	42,4	HZ
A3	36,2	HZ
A4	32,9	HZ
A5	45,1	HZ
A6	43,9	HZ
A7	48,6	HZ
A8	51,7	HZ
<b>FREQUENZE RICAVATE CON SENSORI WIRELESS</b>		
<b>ID. SENSORE</b>	<b>FREQUENZA</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
D3	NON HA REGISTRATO	
D4	2,34	HZ
D5	NON HA REGISTRATO	
D6	32,67	HZ
D1	8,41	HZ
D2	23,26	HZ

Tabella 11- Frequenze ottenute da entrambi gli accelerometri per il caso reale nella condizione di Emergency Stop della torre.

Anche in questo caso, è stata eseguita una comparazione in termini di spostamento con i comparatori installati in opera.

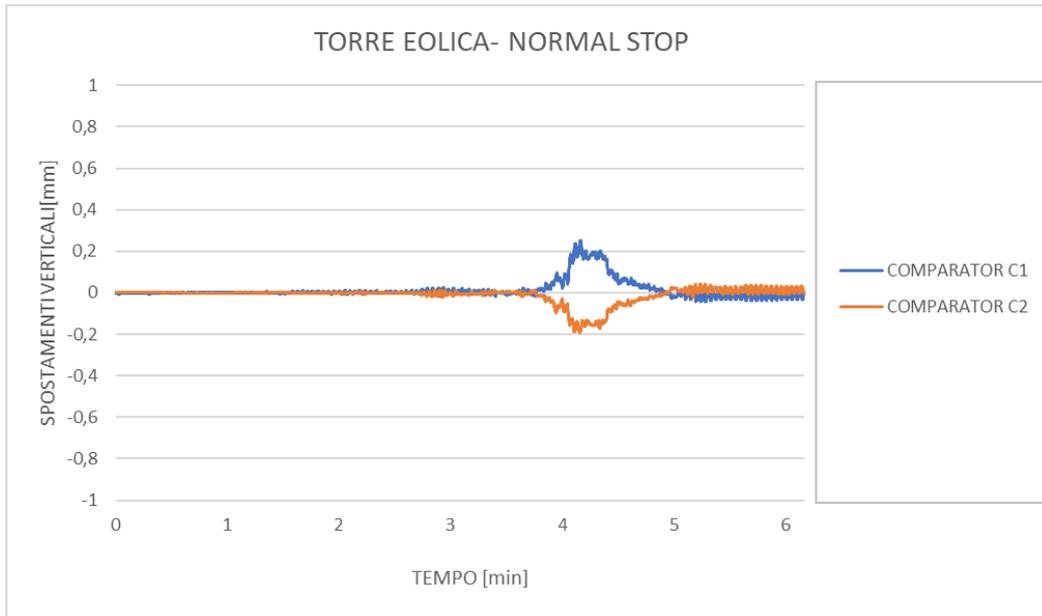


Fig. 21 – Andamento degli spostamenti ricavati dai comparatori nel caso di Normal Stop.

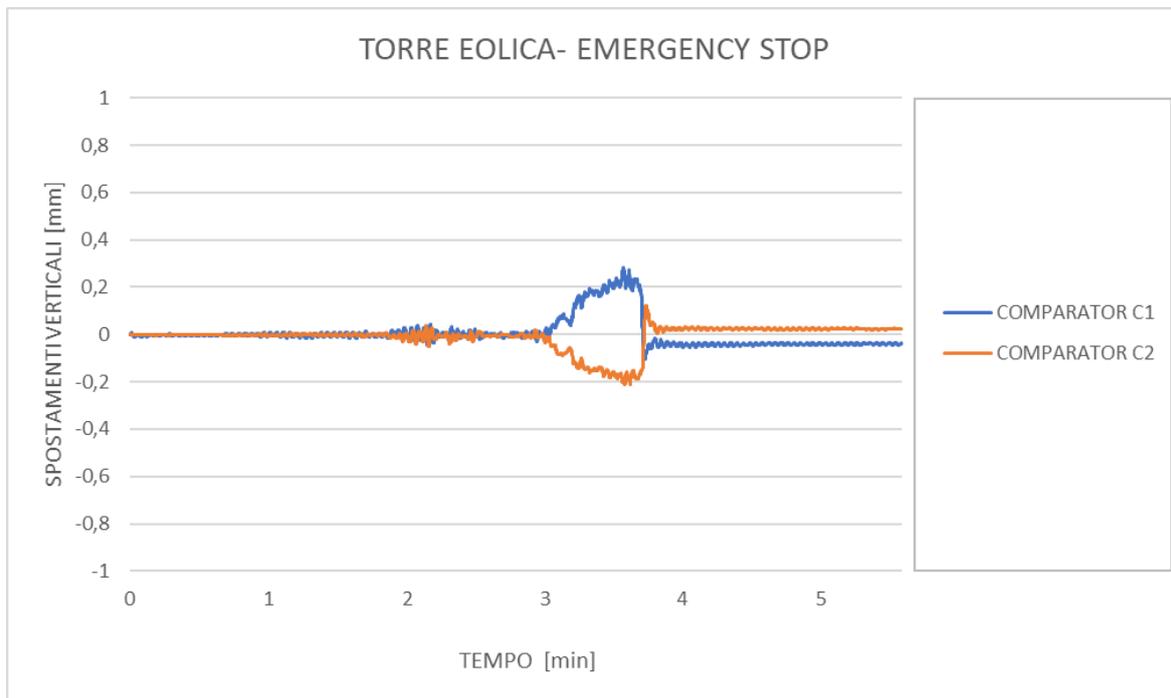


Fig. 22 – Andamento degli spostamenti ricavati dai comparatori nel caso di Emergency Stop.

<b>SPOSTAMENTI STOP</b>			
<b>SPOSTAMENTI RICAVALI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO (f=0,2)</b>			
<b>ID. SENSORE</b>	<b>SPOST. MAX (+)</b>	<b>SPOST. MAX (-)</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
A2	0,0696	-0,0867	mm
A3	0,1225	-0,1128	mm
A4	0,0877	-0,159	mm
A5	0,0841	-0,0777	mm
A6	0,1052	-0,1054	mm
A7	0,1157	-0,0969	mm
A8	0,0981	-0,1088	mm
<b>FREQUENZE RICAVALI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS (f=11)</b>			
<b>ID. SENSORE</b>	<b>SPOST. MAX (+)</b>	<b>SPOST. MAX (-)</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
D3	NON HA REGISTRATO		mm
D4 f16	0,3968	-0,1264	mm
D5	NON HA REGISTRATO		mm
D6 f42	0,1099	-0,0821	mm
D1 f11	0,0917	-0,1208	mm
D2 f58	0,1011	-0,0866	mm

Tabella 12- Spostamenti ricavati dagli accelerometri ne caso Stop.

<b>SPOSTAMENTI E_STOP</b>			
<b>SPOSTAMENTI RICAVALI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO CABLATO (f=0,2)</b>			
<b>ID. SENSORE</b>	<b>SPOST. MAX (+)</b>	<b>SPOST. MAX (-)</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
A2	0,1029	-0,0812	mm
A3	0,1193	-0,1953	mm
A4	0,1306	-0,2831	mm
A5	0,1318	-0,1222	mm
A6	0,1131	-0,1278	mm
A7	0,144	-0,2112	mm
A8	0,1737	-0,3365	mm
<b>FREQUENZE RICAVALI CON ARCHITETTURA DI MONITORAGGIO WIRELESS (f=1)</b>			
<b>ID. SENSORE</b>	<b>SPOST. MAX (+)</b>	<b>SPOST. MAX (-)</b>	<b>UNITA' DI MISURA</b>
D3	NON HA REGISTRATO		mm
D4 f50	0,148	-0,1134	mm
D5	NON HA REGISTRATO		mm
D6 f28	0,114	-0,1251	mm
D1 f15	0,125	-0,1412	mm
D2	0,2619	-0,3195	mm

Tabella 13- Spostamenti ricavati dagli accelerometri ne caso di Emergency stop.

#### 4. CONCLUSIONI

Nell'ambito Progetto di Ricerca *Sis.Mo.Co.* i partner hanno avviato delle attività sperimentali per la validazione del prototipo di sensore wireless per il monitoraggio e controllo in campo dinamico delle strutture dell'ingegneria civile.

Queste attività hanno riguardato inizialmente azioni di tipo prettamente numerico su dati accelerometrici già disponibili con l'obiettivo di individuare i parametri caratterizzanti il comportamento modale di un'opera in c.a. utili a tarare e calibrare il nuovo sensore. In particolare, è stato possibile individuare le caratteristiche tecniche per rifinire il settaggio del prototipo di sensore,

di cui una banda minima utilizzabile che va da 0-200Hz, una sensibilità nominale minima pari a 5 V/g (2g fondo scala), e un fondo scala minimo pari a +/-2g standard.

A seguire, per validare il funzionamento del prototipo così perfezionato, per il monitoraggio sia di strutture in acciaio che in c.a., sono state effettuate campagne dinamiche su prototipi di profilati HEA in scala ridotta e su un caso reale di torre eolica.

Dai test di laboratorio sui prototipi di travi in acciaio è emerso che per entrambi i sensori i valori associati alle frequenze e agli spostamenti estrapolati dalle campagne sperimentali siano molto simili tra di loro. Pertanto i due sistemi, tradizionale e prototipale, offrono le stesse garanzie di controllo.

Anche dalla campagna dinamica sulla struttura della torre eolica, come nei test precedenti, è emerso che i valori associati alle frequenze più basse danno risultati estremamente affidabili. In questo caso, per le frequenze più alte, non si riscontra la stessa qualità ma risultano sempre soddisfacenti sia per quanto riguardano le accelerazioni, sia frequenze che spostamenti.

## **BIBLIOGRAFIA**

- [1] - Partners ICARO S.r.l., AGESP S.r.l.s., NOITECH S.r.l., SISMLAB S.r.l., TOD SYSTEM S.r.l. “REPORT D.1.1 - Stato dell’arte e progettazione”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”.
- [2] - Partners ICARO S.r.l., AGESP S.r.l.s., NOITECH S.r.l., SISMLAB S.r.l., TOD SYSTEM S.r.l. “REPORT D.3.1 – Piano dei Test”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”.
- [3] - Partners ICARO S.r.l., AGESP S.r.l.s., NOITECH S.r.l., SISMLAB S.r.l., TOD SYSTEM S.r.l. “REPORT D.3.2 - Test e validazione”. Progetto R&S Sis.Mo.Co. “Sistema di monitoraggio e sorveglianza in continuo per la verifica dei ponti e delle opere dell’ingegneria civile”.
- [4] - G. Porco, L. Bonanno “*Il controllo dinamico delle opere in c.a. in campo civile: lo stato dell’arte*”. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria. Marzo 2023.
- [5] - G. Porco, L. Bonanno, F. Forestieri, R. Calbi “*Proposta di sistema autodiagnosticante intelligente*”. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria. Marzo 2023.
- [6] - R. Calbi, D. Colacino, V. Gualiteri, A. Oliverio “Test sperimentale e validazione dei risultati di una rete di dispositivi wireless sincronizzati da impiegare per il monitoraggio strutturale di opere dell’ingegneria civile”. Dipartimento di Ingegneria Civile, Università della Calabria. Marzo 2023.



N.15 - March 2023  
ISBN: 979-12-80280-14-5

ISBN 979-12-80280-14-5



9 791280 280145

*EDIZIONI SISMLAB*  
Available online at [www.sismlab.com](http://www.sismlab.com)