

# Sistemi avanzati di monitoraggio dei ponti con analisi dati in tempo reale

*Il monitoraggio delle strutture esistenti è una necessità, rendere tale processo sempre meno dipendente dall'azione umana e sempre più automatizzato è un dovere del progettista. La sfida è legare i risultati di tale processo ad un sistema di allarme che in tempo reale possa avvisare del pericolo e mettere in sicurezza la struttura e i suoi utilizzatori*



La gestione della sicurezza di strutture e infrastrutture rappresenta una delle principali sfide ingegneristiche in Italia. La loro conservazione costituisce una risorsa strategica che i paesi non possono ignorare. Il tragico crollo del ponte sul fiume Polcevera a Genova, in Italia, nel 2018 ha reso evidente la necessità di un cambiamento nell'approccio alla sorveglianza e alla manutenzione delle infrastrutture, generando un forte impulso verso lo sviluppo di strategie di controllo più efficienti.

In questo contesto, il Monitoraggio dello Stato Strutturale (SHM) è cruciale come valido mezzo di manutenzione predittiva per valutare lo stato delle strutture e la loro necessità di conservazione nel tempo. SHM rappresenta l'insieme di attività legate alla caratterizzazione di strutture esistenti, utilizzando una fitta rete di sensori, con l'obiettivo di garantire che il livello di sicurezza della struttura oggetto di indagine non scenda mai al di sotto di una certa soglia.

L'individuazione di questa soglia, o di più soglie di allarme, avviene con un'analisi di post processing una volta acquisiti i dati del sistema; ma la sfida più importante è quella non solo di accelerare l'elaborazione di questi dati rendendola il più possibile automatica ed autonoma, ma è soprattutto

quella di comunicare i risultati ottenuti in tempo reale al fine di poter intervenire tempestivamente. Ed è proprio la comunicazione dell'allarme e dell'azione correttiva conseguente l'obiettivo che ETS si era posta all'avvio del progetto di monitoraggio di questo ponte in acciaio la cui costruzione risale alla fine del 1800.

## Monitoraggio dello stato strutturale (SHM)

Il monitoraggio dello stato strutturale (SHM) è un processo che coinvolge una serie di tecniche progettate per valutare le condizioni di strutture come ponti, edifici e infrastrutture. Lo scopo è garantire la sicurezza e l'efficienza individuando precocemente i danni che potrebbero non essere visibili sulla struttura.

Il monitoraggio strutturale si divide principalmente in due tipologie:

- monitoraggio statico, che riguarda la misura di spostamenti e deformazioni dovute ad azioni lente, come carichi permanenti o carichi lentamente variabili, e prevede l'utilizzo di inclinometri, strumenti topografici, estensimetri ecc.;
- monitoraggio dinamico, che si basa sulla misurazione delle vibrazioni tramite accelerometri, con l'obiettivo di ricavare le proprietà dinamiche della struttura.

Il monitoraggio strutturale, inoltre, può essere suddiviso in occasionale, ovvero periodico per una durata limitata, oppure continuo con installazioni e rilevamenti permanenti per una lunga durata di tempo. Il primo caso mira ad ottenere le proprietà dinamiche della struttura per la creazione di modelli FEM, mentre il secondo caso mira ad identificare l'insorgenza del danno nel tempo.

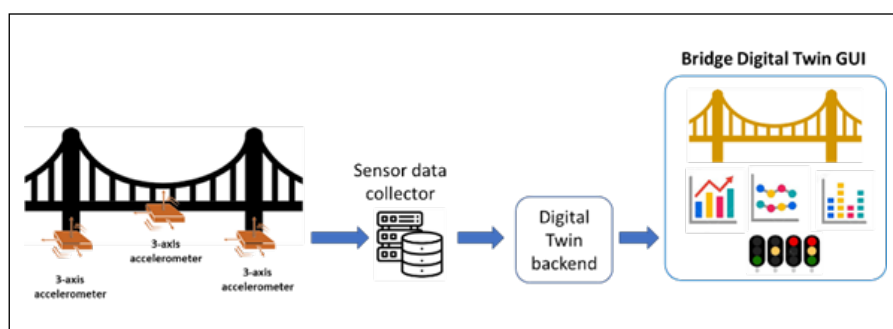
Le fasi del monitoraggio comprendono:

- studio preliminare dell'infrastruttura, compresa la geometria e le informazioni storiche;

**Raffaella Romanello  
Gabriele Miceli.  
ETS, via Benedetto  
Croce 68, Roma**

- progettazione del sistema di monitoraggio, che dovrà definire la tipologia degli strumenti da impiegare e la loro collocazione nella struttura;
- installazione del sistema di monitoraggio, che deve essere eseguita con la massima cura per evitare problemi durante le misurazioni;
- calibrazione del sistema di monitoraggio e metodi di acquisizione dati;
- validazione dei dati acquisiti, necessari per determinare il corretto funzionamento degli strumenti;
- gestione dei dati, che deve consentire il trattamento di una grande quantità di dati nel modo più semplice possibile.

SHM è quindi una pratica ingegneristica complessa generata dalla combinazione di vari strumenti tecnologici (hardware e software) costituita dai seguenti sistemi (figura 2):



**Figura 2: Architettura del Sistema di Monitoraggio.**

- una rete di sensori cablati o wireless, montati direttamente sulla struttura oggetto di studio, per rilevare quantità fisiche significative di risposta strutturale, azioni e condizioni ambientali;
- un sistema di acquisizione dati dai sensori;
- sistemi di trasmissione dati verso unità di elaborazione locali o remote;
- componenti software, più o meno complessi, per la pre-elaborazione, l'analisi e l'interpretazione dei dati (identificazione del danno), la valutazione della vita residua e il supporto alle decisioni;
- un sistema decisionale e di allerta per la gestione delle situazioni di emergenza.

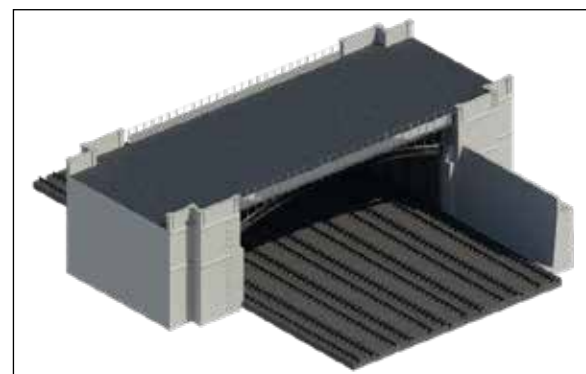
### Caso di studio: ponte con struttura in acciaio

La struttura analizzata è costituita da un ponte stradale in acciaio situato nel centro Italia. Gli obiettivi del monitoraggio sono focalizzati sull'acquisizione di tutte le informazioni necessarie in tempo reale per comprendere le condizioni attuali del ponte ed essere consapevoli del suo comportamento strutturale sotto azioni statiche e dinamiche, al fine di garantire un adeguato livello di sicurezza per l'incolumità pubblica. Ulteriore obiettivo era quello di implementare un sistema di avviso del superamento delle soglie di allarme preventivamente determinate e di predisporre una meto-

dologia di gestione dell'emergenza con indicazione delle azioni da intraprendere ed il tempo necessario per espletarle.

### Fase 1 - Acquisizione delle informazioni di base

Attraverso lo studio del progetto originario, i sopralluoghi in sito e l'esame dei risultati del rilievo, è stato possibile caratterizzare la struttura in questione sia dal punto di vista geometrico che materico. La figura 3 mostra un rendering BIM della struttura. Gli archi centrali sono realizzati con profilati compositi chiodati, mentre i due archi esterni sono strutture reticolari; sono collegati tra loro da diaframmi reticolari e controventi posti a livello delle ali inferiori. La larghezza complessiva della struttura è di 14,5 metri, e i supporti, che creano un sistema di cerniere, sono realizzati in fusione di acciaio. L'impalcato è costruito con una lastra colata su Zores Steel ed è sostenuto da una serie di montanti che lo collegano agli archi. Le spalle della muratura sono inclinate di circa 16° rispetto all'asse stradale, determinando lo sfalsamento dei nove archi. Il ponte è attualmente attraversato dalla strada comunale a tre corsie.



**Figura 3: Modello BIM completo.**

Questa caratterizzazione geometrica è stata resa possibile attraverso misurazioni con laser scanner, da cui è stata ottenuta la "nuvola di punti". I risultati ottenuti dal laser scanner sono stati utilizzati per la realizzazione dei contorni esterni della struttura ai vari livelli di elevazione, per le sezioni trasversali e per la generazione dei prospetti metrici ortogonali. Contemporaneamente è stata effettuata la caratterizzazione meccanica dei diversi elementi strutturali che compongono la struttura in esame sulla base delle informazioni acquisite dalla campagna investigativa condotta sulla struttura

### Fase 2 - Progetto di monitoraggio strutturale

Il progetto del sistema di monitoraggio è stato implementato attraverso analisi preliminari su un modello provvisorio agli elementi finiti del ponte, da

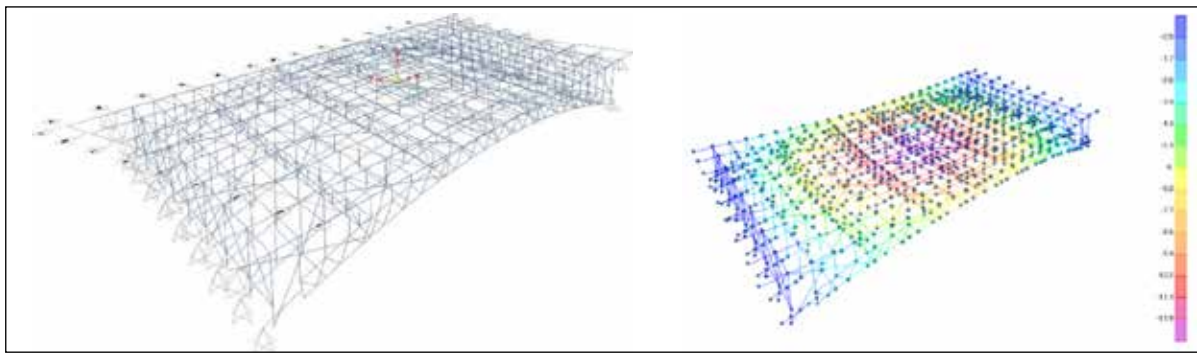


Figura 4: Modello FEM.

cui sono state ricavate le proprietà dinamiche e deformative del ponte.

L'analisi dei modi più significativi misurati sul modello ha permesso di determinare la posizione degli accelerometri al fine di identificare i relativi modi di vibrazione. Inoltre, sono state eseguite analisi transitorie per valutare l'ampiezza dell'accelerazione prevista e poter impostare la sensibilità richiesta degli strumenti e i limiti di confidenza delle misurazioni.

Diciassette accelerometri triassiali sono stati posizionati come illustrato nella figura 5.

Sul ponte è stata installata un'ulteriore strumentazione per misurazioni statiche. Sono stati utilizzati inclinometri per la determinazione indiretta continua dello spostamento verticale degli archi. Gli inclinometri sono stati posizionati solo sulla trave che subisce la massima deformazione. Altri due inclinometri sono stati posizionati sulle spalle del ponte per verificare l'assenza di rotazioni assolute della spalla e rotazioni relative tra spalla e appoggio del ponte (figura 6). Inoltre, sugli archi sono stati posizionati 20 sagome ferroviarie per misurare le sollecitazioni assiali e di flessione degli elementi. Gli estensimetri sono stati posizionati sull'ala inferiore e sull'anima, in posizione baricentrale.

Il sistema di monitoraggio è stato completato con l'installazione di una stazione totale fissa topografica per la misura degli spostamenti assoluti (figura 8).

### Fase 3 - Installazione del sistema di monitoraggio

L'installazione del sistema di monitoraggio deve garantire l'assenza di disturbi e l'accuratezza delle misurazioni. A questo scopo sono stati progettati supporti e collegamenti rigidi, in modo che le misurazioni dinamiche potessero essere esenti da frequenze spurie.

### Fase 4 - Calibrazione del sistema di monitoraggio

La calibrazione è stata effettuata attraverso vari confronti:

- analisi delle misure statiche e dinamiche ottenute da prove di carico statiche e dinamiche con azio-

Figura 5: Disposizione degli accelerometri.

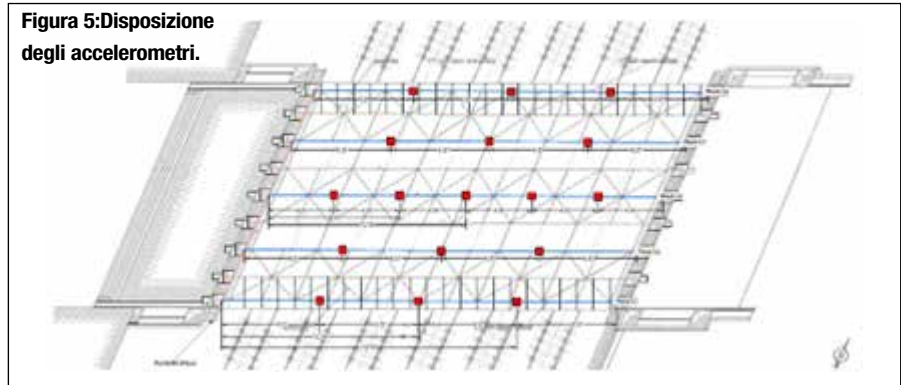


Figura 6: Disposizione degli inclinometri.

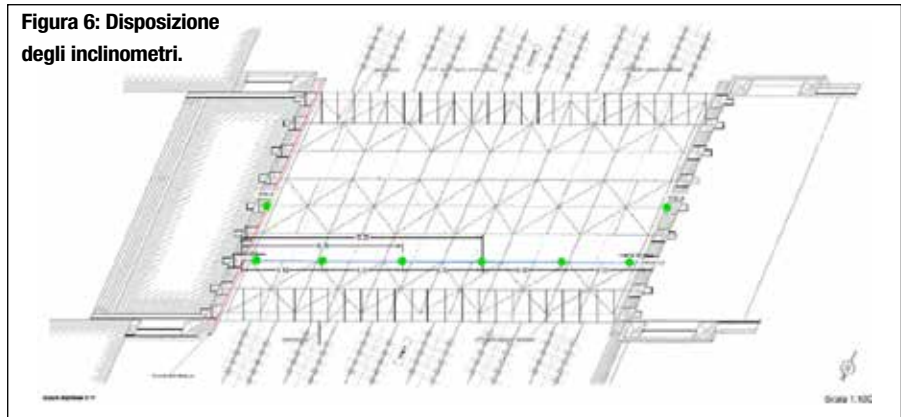
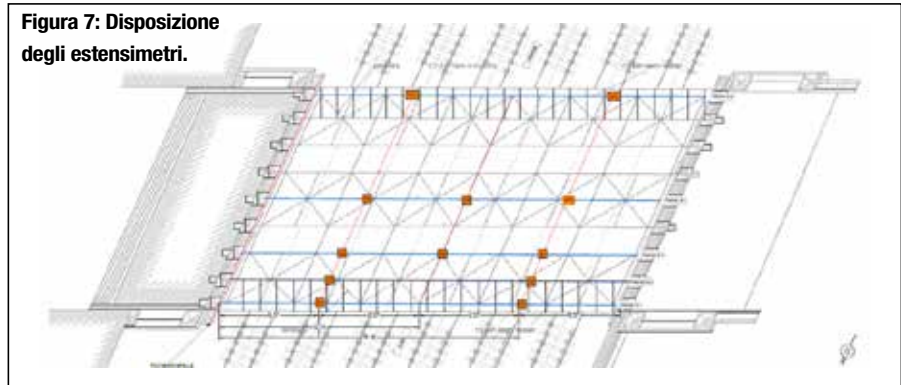


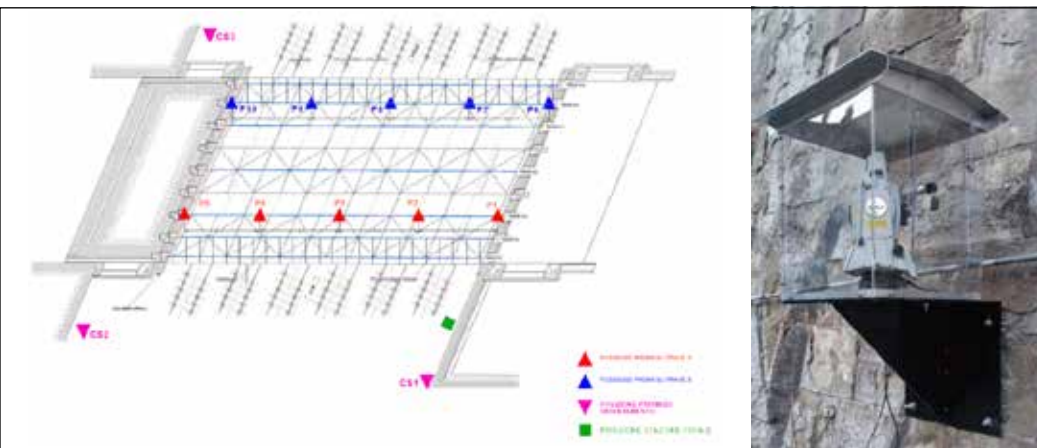
Figura 7: Disposizione degli estensimetri.



ni note. La prova di carico è necessaria sia per la messa a punto della strumentazione che per acquisire dati da confrontare con le previsioni teoriche;

- monitoraggio delle vibrazioni per un periodo di tempo selezionato.





**Figura 8: A destra la stazione totale automatizzata, a sinistra i prismi, i capisaldi e le posizioni della stazione totale.**

Proprio allo scopo di tarare la strumentazione installata sul ponte sono state effettuate prove statiche e dinamiche. La prova di carico statico è stata progettata, programmata ed eseguita per testare parte della strumentazione installata sul ponte e valutare il comportamento elastico del ponte ed eventuali deformazioni residue allo scarico.

La prova di carico dinamico è stata eseguita per te-

te l'analisi dei dati ottenuti dagli accelerometri. Due mesi di registrazioni sono state studiate utilizzando tecniche di Analisi Modale Operativa (OMA). OMA consente di ottenere le proprietà dinamiche di strutture e infrastrutture esclusivamente dai dati di output, ovvero accelerazioni, velocità e spostamenti.

Preliminarmente alla messa in servizio dell'impianto è necessario tarare gli strumenti. Ogni segnale, infatti, è affetto da rumore ed errori strumentali che devono essere adeguatamente filtrati per garantire la correttezza del dato. Azioni accidentali, malfunzionamenti elettrici, condizioni ambientali possono influenzare i dati e l'utente deve essere in grado di separare i dati reali da quelli spuri.

I metodi per farlo si basano sull'analisi degli errori della teoria dei segnali, che richiedono comunque di fissare una serie di criteri e soglie che cambiano di caso in caso, la cui determinazione è uno degli obiettivi della fase di validazione. In particolare, sono state utilizzate tecniche di identificazione ad alta fedeltà appartenenti alla Stochastic Subspace Identification, consentendo

**Figura 9: Strumentazioni installate sul ponte.**



stare parte della strumentazione installata sul ponte (accelerometri) e valutare la risposta dinamica della struttura (frequenze proprie). A questo scopo sono stati fissati alla struttura dei listelli di legno di cinque e dieci centimetri, posti in diverse posizioni sul ponte. I camion pesanti venivano lasciati cadere dal listello di legno in modo da indurre vibrazioni forzate sul ponte. Ogni registrazione è stata esaminata per verificare la corretta risposta della strumentazione. Attraverso un'analisi di Fourier sono state ottenute le prime frequenze e modi di vibrazione della struttura, e confrontati con quelli attesi. In particolare, è stata osservata l'assenza di irregolarità locali dei modi di vibrazione, che potrebbero suggerire la presenza di imperfezioni locali o danneggiamenti nella struttura (figura 14).

#### **Fase 5 - Validazione dei dati acquisiti**

Una volta assicurato il corretto funzionamento della strumentazione si può passare alla fase di validazione dei dati, che prevede principalmen-

te l'estrazione automatica di frequenze, rapporti di smorzamento e forme modali. Sono stati sviluppati criteri per distinguere automaticamente tra modalità reali e non reali utilizzando diagrammi di stabilizzazione, che distinguono tra modalità stabili e instabili attraverso criteri basati su frequenze, rapporti di smorzamento e forme modali, consentendo il confronto delle modalità e potenzialmente escludendo quelle ripetute.

Nel caso studio del ponte sono stati analizzati due mesi di registrazioni, utilizzando registrazioni effettuate alla stessa ora del giorno. Questo perché è stato osservato che, soprattutto per le strutture in acciaio, le dilatazioni termiche dovute alle variazioni di temperatura nell'arco della giornata portano a notevoli variazioni dei risultati. I futuri sviluppi in questo campo prevedono un'ulteriore analisi delle registrazioni nei diversi momenti della giornata e un confronto per comprendere l'intervallo giornaliero di variazioni di frequenza, fissando soglie oltre le quali si può ipotizzare che



**Figura 10: Prova dinamica.**

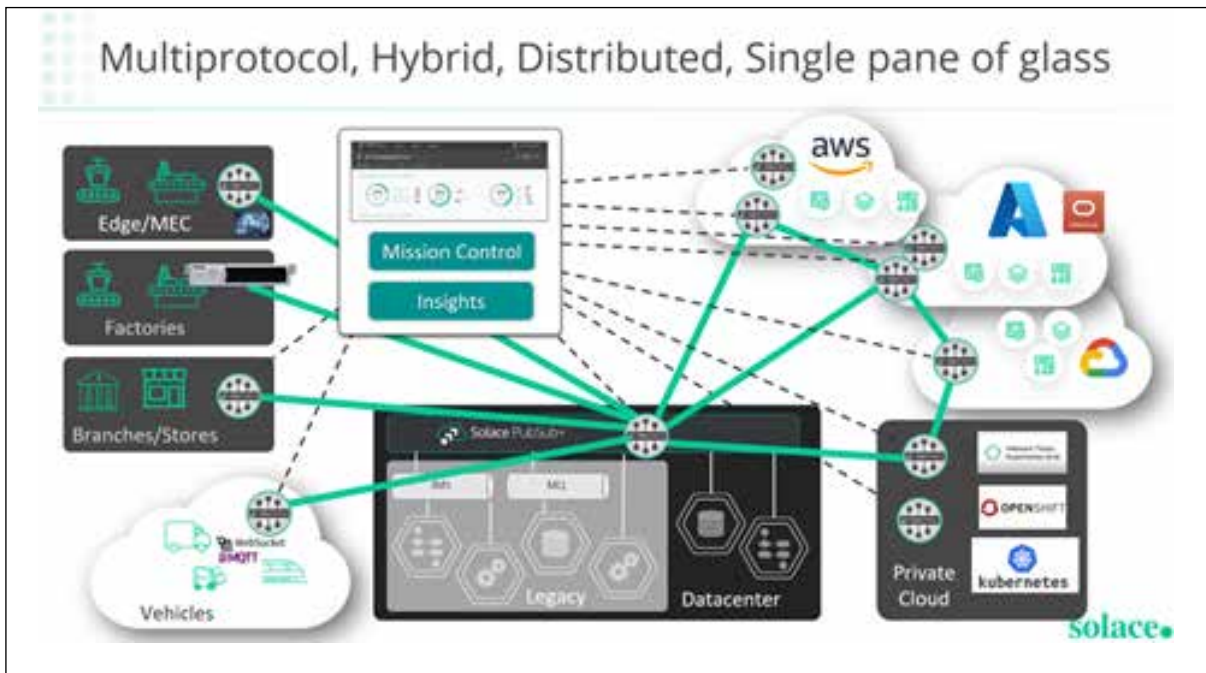


Figura 11: Rete di Eventi (Event Mesh).

la struttura abbia subito danni. Una volta completata la fase di analisi con tecniche OMA, i risultati ottenuti vengono confrontati con il modello FEM per migliorare e aggiornare il modello FEM.

**Fase 6 - Gestione dei dati**

Calibrato il modello, si è passati alla messa in esercizio del sistema di monitoraggio della struttura.

I dati registrati dai sensori (accelerometri, inclinometri, estensimetri) installati sul ponte sono inviati tramite un Gateway ad una piattaforma di gestione e distribuzione degli eventi in tempo reale che attraverso un sistema automatizzato analizza i dati attraverso algoritmi appositamente studiati per la struttura in esame, sviluppati internamente da ETS e validati in ambito universitario; i risultati di tali analisi sono restituiti sotto forma di diagrammi. Contemporaneamente, se tali dati superano le soglie di allarme prefissate, si attiva automaticamente il sistema di allarme di superamento delle soglie che ETS ha ribattezzato "chiamata riconosciuta".

Al centro di questa architettura dei dati c'è una piattaforma completa di gestione e streaming degli eventi (letture dati sensori) che consente l'integrazione, la notifica e l'instradamento di quest'ultimi attraverso l'adozione di un'architettura basata su Message Broker Multiprotocollo che abilitano il dialogo bi-direzionale real time tra applicazioni eterogenee. Questi broker formano il cosiddetto "Event Mesh" (Figura 11) cioè un'infrastruttura configurabile e dinamica ottimizzata per la distribuzione di eventi tra applicazioni, servizi cloud e dispositivi in modo asincrono. La mesh rende la gestione degli eventi governa-

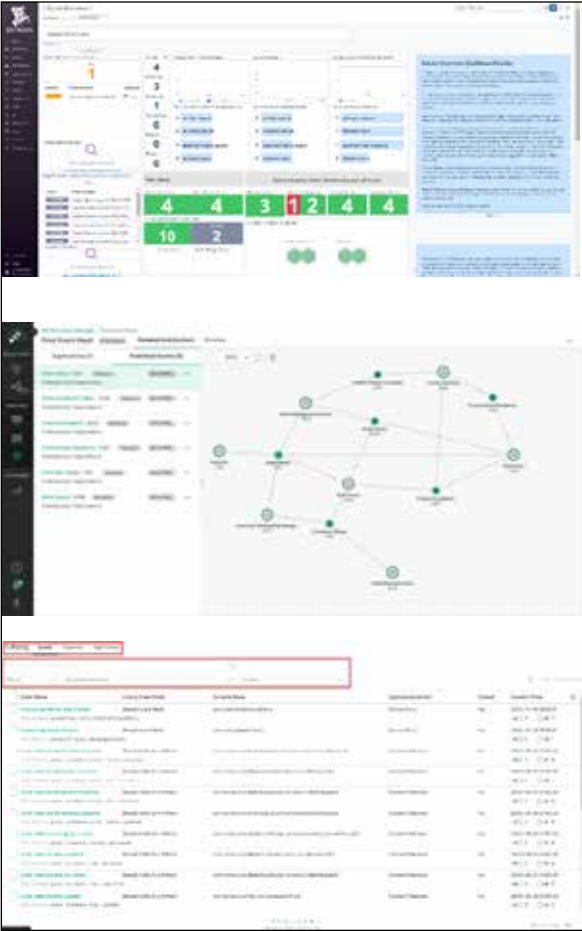


Figura 12: Dashboard Portale Eventi.

bile, flessibile, affidabile e veloce attraverso un apposito Portale degli eventi (figura 12). Una Rete di Eventi (Event Mesh) è quindi un'architettura che consente agli eventi di un'applicazione di essere instradati dinamicamente e ricevuti da qualsiasi altra applicazione, indipen-

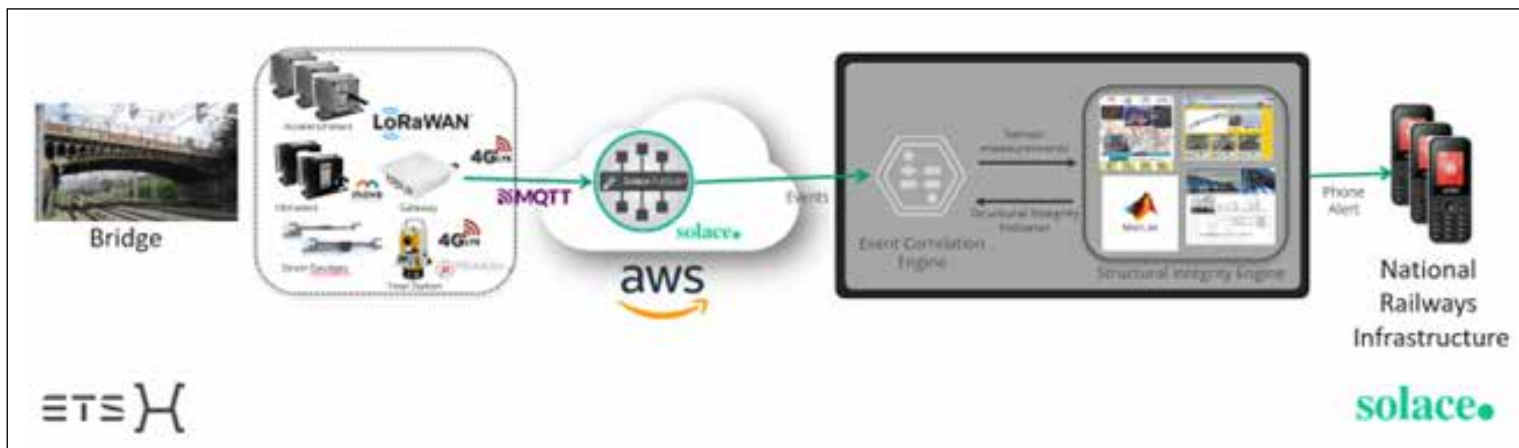


Figura 13: Architettura del sistema di analisi dei dati.

dentemente da dove queste applicazioni sono distribuite (on-premise, cloud privato, cloud pubblico, Edge 5G). Tra le funzionalità del sistema PubSub+ ed Event Broker figurano il routing degli eventi, la pubblicazione-sottoscrizione, la consegna garantita, l'implementazione cloud nativa, API di streaming ad alte prestazioni, bassa latenza e l'uso di standard di mercato tra cui AMQP, MQTT, JMS, REST e altri.

La soluzione tecnica proposta prevede l'indirizzamento dei dati dei sensori direttamente all'Event Mesh utilizzando l'architettura Event Streaming con un sistema di avviso telefonico (chiamata riconosciuta) configurabile e personalizzabile per le soglie di allarme della struttura in esame (figura 13). Inoltre, la soluzione fornirà all'entità di gestione un'interfaccia per estrarre dati storici con funzionalità di visualizzazione di base per i valori dei segnali.

### Conclusioni

Il sistema di avviso del superamento delle soglie di allarme "Chiamata Riconosciuta" prevede una chiamata a determinati e prefissati numeri di cellulare che attraverso un messaggio predefinito, indica quale soglia di allarme è stata superata e quali sono le azioni da intraprendere. Il sistema prevede tre soglie di allarme corrispondenti a tre situazioni di pericolo per la struttura e per gli utilizzatori della stessa.

Il sistema continuerà a chiamare la lista dei numeri in elenco fino a che un operatore non risponde e conferma la presa in carico dell'operazione attraverso una serie di combinazioni di tasti.

Contemporaneamente alla chiamata, si è previsto di attivare anche l'invio di una email a tutti gli indirizzi preimpostati che riporta lo stesso messaggio della telefonata, ma in più aggiunge informazioni pratiche necessarie all'operatore che deve intervenire, indicando ad esempio quali sensori sono stati interessati dal superamento della soglia e quali sono le azioni che devono es-



Figura 14: Soglie di allarme.

sere intraprese e entro quanto tempo devono essere svolti accertamenti sulla struttura.

La gestione dei dati in tempo reale, la qualità delle analisi svolte e la certezza della consegna delle informazioni, aprono scenari vasti sulle possibili implementazioni del sistema, come ad esempio in caso di superamento della soglia più alta, legata ad un possibile danneggiamento che può comportare pericolo per gli utilizzatori finali, il collegamento del sistema di allarme ad un impianto semaforico che impedisca l'accesso alla struttura, oppure il collegamento con sbarre che si abbassano precludendo l'accesso alla struttura, o ancora il collegamento diretto con gli enti preposti alla sicurezza pubblica come vigili del fuoco.

Senza contare la possibilità di ribaltare questi valori direttamente sul modello FEM della struttura in maniera tale che automaticamente il software strutturale svolga le analisi in base ai nuovi dati di input e possa immediatamente mettere in evidenza quali siano gli elementi danneggiati, creando di fatto le basi per il vero digital twin del ponte. ■■