

## Monitoraggio strutturale intelligente: strategie e tecnologie per la gestione della sicurezza delle costruzioni

*Il monitoraggio strutturale con reti di sensori è ormai un pilastro della sicurezza per le costruzioni moderne. Questo articolo analizza le strategie più efficaci, dai sistemi di controllo periodico a quelli permanenti, evidenziando come la tecnologia SHM possa ridurre i costi e migliorare la sicurezza delle infrastrutture.*

Giuseppe Latte Bovio

Il tema del monitoraggio strutturale mediante reti di sensori ha ricevuto negli ultimi anni un interesse crescente da parte sia del mondo della ricerca sia da quello professionale come testimonia il numero crescente di sistemi di monitoraggio installati su varie tipologie strutturali.

I motivi principali di questo sviluppo risiedono da un lato nelle limitazioni connesse con l'utilizzo dei metodi tradizionali basati su ispezioni visive, dall'altro nelle grandi potenzialità offerte da un sistema di rilevamento automatico dello stato di salute della struttura in termini di riduzione dei costi di manutenzione.

Sono già 30 anni che gli studi e le osservazioni sperimentali hanno dimostrato che le strutture in calcestruzzo armato non sono eterne come si pensava fino alla fine degli anni 80 del secolo scorso ma che sia per vetustà sia per sovra-utilizzo esibiscono un forte deterioramento. Il rischio legato all'invecchiamento e/o a manutenzione inadeguata può essere sicuramente mitigato e tenuto sotto controllo dal monitoraggio continuo.

Questa metodologia può rapidamente individuare "anomalie" consentendo un ripristino tempestivo delle condizioni ottimali con conseguente riduzione dei costi sul ciclo di vita e abbattimento del rischio di danni alle persone.

Inoltre il controllo continuo della struttura consente di passare da un sistema manutentivo basato su controlli a prefissate scadenze temporali ad un sistema di interventi effettuati 'a richiesta' in base alle effettive condizioni strutturali con conseguente riduzione dei costi e aumento della sicurezza e dell'efficienza.

**Boviar** ha dedicato parecchi sforzi allo studio ed alla progettazione di sistemi e strumenti in grado di migliorare sia l'affidabilità sia l'efficienza del monitoraggio attraverso soluzioni che incrementino le prestazioni dei vari componenti del sistema e dalla metà degli anni '90 produce sistemi di monitoraggio remoto fisso, e sistemi portatili per un monitoraggio ed esecuzione di prove sorvegliato per brevi periodi di tempo.

Schematicamente un sistema di monitoraggio è costituito dai seguenti elementi :

- a. una rete di sensori di vario tipo collocati su una struttura e in grado di rilevare sia la risposta strutturale alle sollecitazioni esterne, sia le grandezze ambientali che possano influire su di essa;
- b. un sistema di raccolta e trasmissione dei dati che può operare mediante sistemi cablati o no (centraline di acquisizione e Gateway);

- c. Trasmissione dati a Contenitori/depository su Internet o direttamente su Piattaforme in Cloud;
- d. Elaborazione e interpretazione: una procedura per l'analisi dei dati finalizzata alla diagnosi strutturale (eventuale)
- e. un sistema di allerta per la gestione di situazioni di emergenza.

## Il Monitoraggio Strumentale (SHM): in cosa consiste?

Per monitoraggio strumentale (Structural Health Monitoring) si intendono tutte quelle metodologie che si basano sull'installazione, per periodi di tempo abbastanza lunghi (diversi mesi o anni) o per l'intera vita operativa di una struttura, di reti di sensori gestiti da sistemi hardware/software che consentono di acquisire i dati provenienti dai sensori e di elaborarli in modo automatico o semiautomatico, identificando attraverso opportuni algoritmi la presenza di malfunzionamenti.

Si può pensare così che il sistema composto dalla struttura e dall'impianto SHM possa comportarsi come un sistema "intelligente", cioè capace di funzioni di autodiagnosi e di trasmissione di "messaggi" nei confronti di un operatore umano.

Queste metodologie, nate e sviluppatesi nei settori dell'industria aeronautica e meccanica, negli ultimi due decenni stanno trovando importanti applicazioni anche nel settore dell'ingegneria civile e delle infrastrutture.

La crescente necessità di tenere sotto controllo il comportamento di moderne strutture, di grande dimensioni o tecnologicamente molto complesse, così come quella di monitorare il comportamento di quelle già esistenti, unita alla consapevolezza dei limiti degli approcci tradizionali alla sorveglianza delle opere d'arte e ai gravi incidenti che si sono manifestati in Italia e all'estero, ha fatto sì che il numero delle applicazioni di questi sistemi sia in crescente aumento.

## Le strategie di monitoraggio

Fatte queste doverose considerazioni di carattere generale, entriamo nel merito dell'argomento con riferimento a due strategie, non necessariamente alternative, di monitoraggio:

- il monitoraggio occasionale o periodico, di durata relativamente breve ed eventualmente ripetuto con regolarità,
- ed il monitoraggio permanente, che invece è concepito per rimanere funzionante a lungo, fino a coprire anche l'intera vita dell'opera.

La norma *UNI TR 11634:2016 - Linee Guida per il monitoraggio strutturale*, oltre a fornire alcune raccomandazioni generali, precisa che un sistema di monitoraggio deve essere definito negli obiettivi, concepito, progettato e gestito in funzione delle specifiche problematiche che caratterizzano la struttura ed il suo contesto.

Tali problematiche, e quindi le funzioni che il sistema è chiamato ad assolvere, non possono che essere individuate, e quindi valutate nel corso dell'esercizio del sistema, da chi svolge le attività di sorveglianza e/o dai progettisti degli interventi di manutenzione o di nuova costruzione, secondo idonee specifiche procedure.

In relazione alle finalità, la norma riporta che:

*“Tramite il monitoraggio si può pervenire a:*

- una miglior correlazione tra carichi/azioni agenti sulla struttura; [...] quindi una più affidabile conoscenza del comportamento della struttura;*
- una individuazione di più precise modellazioni, di più efficienti criteri di dimensionamento e di una miglior valutazione della sicurezza, anche con riferimento alle fasi di costruzione;*
- una individuazione tempestiva di eventuali anomalie della risposta strutturale [...], soprattutto causate dal decadimento delle risorse strutturali dovute al comportamento sotto azioni cicliche ripetute nel tempo (fatica) o da azioni occasionali, [...];*
- un prolungamento della vita attesa per la struttura;*
- una miglior gestione delle costruzioni;*
- una raccolta di dati statistici che potrebbero avere ricadute sui disposti normativi, anche con riferimento agli effetti delle variazioni climatiche”.*

Quindi tra i vantaggi e le opportunità delle tecnologie SHM c'è quello di consentire:

- la valutazione della sicurezza in tempo (quasi) reale, integrando e semplificando il ricorso a tecniche tradizionali di investigazione (diagnosi)
- una determinazione ragionevolmente attendibile della vita residua (prognosi) attraverso la costruzione di curve di lifetime
- ed una valutazione ragionevolmente attendibile dell'efficacia degli interventi di manutenzione, ripristino/miglioramento delle strutture.

*Le informazioni ottenute dall'applicazione di tecniche SHM possono orientare le ispezioni ordinarie e straordinarie, riducendone l'impegno e consentendo la loro esecuzione in modo mirato.*

## **Monitoraggio occasionale e periodico, quando si applica?**

Il monitoraggio occasionale consiste nell'installazione di un sistema SHM per una durata limitata (da alcuni mesi ad alcuni anni) ed eventualmente nel ripetere l'installazione ad intervalli più o meno regolari di tempo (monitoraggio periodico); è raccomandabile nei seguenti casi:

- interventi di manutenzione straordinaria o adeguamento, per i quali l'installazione di sistemi strutturali va fatta prima, durante e dopo l'intervento per valutarne l'efficacia;
- studio del comportamento di tipologie strutturali ripetitive;
- situazioni al contorno di natura transitoria (ad esempio studio del comportamento dei versanti in vista di interventi preventivi di stabilizzazione);

- analisi di fenomeni di degrado/danneggiamento anomali, per i quali è necessario comprendere, ad esempio, cause e natura evolutiva, e situazioni di rischio elevato.

## Qual è la finalità del monitoraggio occasionale?

Essenzialmente acquisire informazioni su fenomeni di degrado o di dissesto la cui presenza sia nota e di cui sia necessario studiare le tendenze evolutive, ovvero determinarne le cause attraverso la correlazione fra i parametri di comportamento. Per cui l'installazione di questi sistemi è raccomandata per lo studio di una fenomenologia già nota ed osservata nel corso delle ispezioni.

## Monitoraggio permanente o continuo

Nel monitoraggio permanente, il sistema hardware/software è concepito per rimanere operativo per lunghi periodi, fino a coprire tutta la vita di servizio di una struttura. Questa strategia realizza compiutamente gli scopi dello *Structural Health Monitoring* e dell'integrazione a scala completa con le attività di sorveglianza. Vediamo alcune delle applicazioni più tipiche.

## Monitoraggio strutturale

Con monitoraggio strutturale si intende un approccio sistemico al rilevamento e all'identificazione dei danni che si possono manifestare nei sistemi strutturali a causa dell'invecchiamento o del degrado dei materiali, di azioni eccedenti le previsioni di progetto o di eventi eccezionali di origine naturale o antropica.

La finalità del monitoraggio strutturale è quella di acquisire informazioni relative ad un determinato manufatto e all'ambiente con cui interagisce attraverso lo studio delle sue condizioni strutturali e l'evoluzione del tempo dei parametri e delle grandezze fisiche tenute sotto osservazione.

Per un progettista è abbastanza frequente che, nel corso dell'attività preliminare di ricognizione di una struttura, vengano osservati, ad esempio, stati fessurativi che rendano necessari ulteriori accertamenti che rientrano nella categoria di monitoraggi al fine di una qualificazione dello stato d'essere degli stessi, da affiancare alla normale attività di indagine strutturale, ovvero prove sui materiali, rilievi geometrici e strutturali, etc.

L'attività di monitoraggio in questione consente infatti di osservare le possibili variazioni ed evoluzioni o il rilevamento delle possibili cause attraverso l'accertamento della presenza di vibrazioni indotte, cedimenti delle fondazioni o degrado del materiale.

## Monitoraggio sismico

I sistemi di monitoraggio installati su costruzioni in zona sismica, oltre al miglioramento della conoscenza del comportamento delle strutture reali, consentono di valutare in un tempo relativamente breve lo stato di danno subito dalla struttura a seguito di un evento sismico e facilitano la progettazione di interventi di consolidamento e la valutazione a posteriori della loro efficacia.

In questi sistemi, l'acquisizione dei dati nella memoria degli accelerometri posizionati al suolo e dei sensori collocati sulla struttura è attivata da trigger; successivamente i dati sono trasferiti all'elaboratore di processo del sistema SHM.

*Il monitoraggio continuo è l'unica strategia che permette la registrazione della risposta della struttura sotto l'effetto del sisma.*

Prove statiche e dinamiche o monitoraggi strumentali attivati in seguito all'evento, anche se potrebbero rivelare danneggiamenti subiti dalla struttura mediante il confronto con informazioni eventualmente già disponibili, non ne consentirebbero una caratterizzazione sismica completa.

### **Monitoraggio ambientale**

Nell'ambito del monitoraggio ambientale uno degli obiettivi prioritari è il monitoraggio dei pendii, instabili o potenzialmente instabili, per la definizione di modelli comportamentali degli stessi, in presenza ed in assenza di manufatti o di opere di stabilizzazione, finalizzati sia al controllo dell'instabilità in termini di evoluzione, sia alla gestione della sicurezza delle strutture presenti.

A tale scopo è necessaria l'installazione di dispositivi atti alla misurazione dell'evoluzione di grandezze fisiche significative quali spostamenti assoluti e relativi, superficiali e profondi, deformazioni di elementi strutturali, pressioni interstiziali e suzione, da porre in relazione con i dati di natura meteorologica.

Il progetto del sistema di monitoraggio deve considerare la tipologia di frana e i conseguenti meccanismi cinematici e d'innescio, fondamentali per la realizzazione di un sistema efficiente e funzionale a procedure emergenziali.

Con riferimento alle vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni ed alla relativa Circolare Applicativa, deve essere poi posta alla pericolosità dell'evento e, in particolare, alla sua potenziale velocità di esplicazione, parametro di particolare significato nella definizione dei rischi per la vita umana, che dovrà essere garantita da sistemi ben strutturati, affidabili e ridondanti.

Considerando il ruolo determinante giocato dalle condizioni climatiche, nel caso, ad esempio, di precipitazioni intense e particolarmente prolungate nel tempo, nell'attivazione di meccanismi di frana, tecniche di monitoraggio ambientale particolarmente avanzate potrebbero rivelarsi molto utili nell'ambito del preavviso e/o della mitigazione del rischio idrogeologico. Un punto di forza potrebbe essere rappresentato da un sistema di monitoraggio climatico e idrologico/geotecnico costituito da diversi sensori wireless che registrino una serie di informazioni in relazione a grandezze di tipo meteorologico, idrologico e geotecnico.

I dati inviati ad una piattaforma web, opportunamente processati, potrebbero infatti consentire il controllo in tempo reale della stabilità di una determinata area di studio permettendo di prevedere l'attivazione o meno di una frana a seguito di precipitazioni particolarmente intense e consentendo l'invio di messaggi di warning.

## Monitoraggio statico vs dinamico

Definita la strategia di monitoraggio, occorre fare una ulteriore distinzione tra due modalità:

- *monitoraggio statico*
- *e monitoraggio dinamico.*

Il monitoraggio statico prevede l'applicazione di strumenti atti a misurare spostamenti relativi ed è volto al continuo e regolare rilevamento delle lente variazioni di alcuni parametri in periodi di tempo piuttosto lunghi.

Il monitoraggio dinamico si basa sull'analisi di segnali provenienti da vibrazioni caratteristiche della struttura indotte da fenomeni naturali o da forzanti esterne ed è quindi *orientato al controllo delle proprietà dinamiche della struttura* oggetto di misure, *sia in condizioni operative che durante eventi straordinari.*

È possibile anche installare sistemi permanenti capaci di auto attivarsi e registrare il moto della struttura ogni qualvolta si verifichi un microsisma o una significativa vibrazione superi il valore soglia.

Le due modalità si differenziano anche per la risposta: infatti il sistema statico dà risposte locali come gli *spostamenti, le aperture delle fessure, pressione e l'esposizione chimica*, mentre quello dinamico fornisce risposte globali *come le accelerazioni (parametri modali), tensioni, posizione assoluta, temperatura, umidità, vento e il peso in movimento.*

Per sua natura, il monitoraggio dinamico continuo richiede una grande disponibilità di memoria dati per la raccolta del sistema di acquisizione, tramite il quale, come già detto, è possibile l'individuazione del danno sulla base di algoritmi che elaborano parametri quali lo smorzamento modale, le forme modali (modi superiori) e loro derivate, la densità spettrale di potenza (PSD) e i modi delle deformazioni, cioè i modi derivati dalle storie temporali delle deformazioni anziché dalle accelerazioni.

## La centralina DDAS

La centralina DDAS, ultimo prodotto della famiglia #DAS di Boviari, ha la capacità di leggere in modo indipendente da 8 (versione base) a 64 canali con una frequenza massima pari a 1 KHz su tutti i canali in simultaneo.

Si tratta di un prodotto estremamente versatile, potendo disporre di versioni espandibili in configurazione stand-alone oppure scegliere il collegamento di più unità tra loro fino a costituire una rete cablata multipla.



Centralina DDAS. (@Boviar)

Grazie al web-server integrato e la porta Ethernet/Wifi la gestione del datalogger avviene in locale e/o in remoto mediante un browser (Chrom Chrome/Firefox/Edge) da un qualunque dispositivo (smartphone/tablet/PC) senza l'utilizzo di alcun software da dover installare.

È ideale sia per monitoraggi di tipo statici che dinamici perché su ogni singolo canale è possibile configurare sensori con acquisizione statica o dinamica (indipendente e contemporanea), soglie di allarme ed allarme e la relativa azione di invio SMS/e-mail a diversi utenti, con messaggi di testo editabili.

### Da cosa è composto un sistema di monitoraggio?

I sistemi di monitoraggio sono composti da:

- una rete di sensori per il rilevamento di grandezze fisiche significative della risposta strutturale, delle azioni e delle condizioni ambientali;

- sistemi per l'acquisizione e la gestione dei dati provenienti dai sensori, tipicamente delle centraline di acquisizione dati e un sistema di trasmissione dei dati verso le unità di processo locali o remote che costituiscono una piattaforma #DAS - Data Acquisition System ;
- strumenti software, più o meno complessi, che consentono l'immediata gestione e fruibilità dei dati disponibili direttamente dal datalogger e/o attraverso delle piattaforme in Cloud o i servizi web disponibili a fini del pre-processamento, l'analisi e l'interpretazione dei dati, la valutazione della vita residua e il supporto alle decisioni.

Quali sono le tipologie di sensori?

Le tipologie di sensori adatti allo scopo sono assai varie, sia per applicazioni strutturali che per applicazioni geotecniche e ambientali. Possiamo distinguere tra:

- sensori tradizionali di tipo analogico (estensimetri, trasduttori di spostamento o forza, accelerometri, sensori termici, anemometri, ecc.) che forniscono la misura attraverso segnali elettrici;
- sensori a fibra ottica puntuali (interferometrici, reticolo di Bragg) o continui che forniscono la misura di deformazioni o temperatura attraverso segnali ottici e possono essere assemblati in modo da consentire la misura di molte altre grandezze fisiche;
- sensori digitali (MEMS - Micro Electro-Mechanical Systems) che convertono la misura del trasduttore in forma binaria, cioè in un segnale analogico-digitale con minore possibilità di condizionamento del segnale.  
Sunta ha sviluppato e realizzato su Progetto di Boviar i sensori inclinometrici ed accelerometrici della serie m-Sense.

Il sistema di collegamento può essere cablato, con configurazione che può essere "a stella", in cui ogni sensore è collegato alla centralina tramite un unico cavo, "distribuita", in cui il cavo collega più sensori, o wireless, con trasmissione del segnale tramite onde radio, particolarmente efficace nel caso di aree di monitoraggio molto estese. In questo caso il sistema deve essere munito di alimentatore.

La tecnologia WSN (Wireless Sensor Network) di cui può essere dotato il sistema crea una rete senza fili stabile e affidabile tra i sensori datalogger, in grado non solo di trasmettere ma anche di memorizzare la misura acquisita, onde evitare la perdita dei dati, e il nodo concentratore/registratore.

In questo ambito Boviar propone i suoi sistemi Wise e Dwise con tecnologia DigiMesh nell'ambito di monitoraggio statico, mentre per applicazioni dinamiche distribuisce in esclusiva sul mercato italiano i prodotti di Move Solutions.

Un aspetto delicato, connesso all'utilizzo di sensori dinamici non cablati, risiede nella necessità di sincronizzare i dati registrati da sensori diversi collocati in postazioni differenti. Le risposte registrate sulla struttura devono essere riferite ad una scala temporale comune affinché l'analisi delle registrazioni effettuate in posizioni differenti della struttura sia significativa. A tale scopo MOVE Solutions ha messo a punto tecniche che consentono di portare gli errori di sincronizzazione molto al di sotto del ms.

- **WiSe:** Dispositivo datalogger wireless di tipo slave, a basso consumo per sensori e trasduttori con uscita analogica (potenziometro, ponte resistivo, PT100, termistori) con funzioni di invio dei dati acquisiti dai sensori, allarme e di diagnostica al modulo mGateway
- **dWiSe:** Dispositivo datalogger wireless di tipo slave, a basso consumo per sensori e trasduttori con uscita digitali MODBUS-RTU (RS485) o ASCII (RS485) con funzioni di invio dei dati acquisiti dai sensori, allarme e di diagnostica al modulo mGateway .
- **mGateway:** Dispositivo gateway per la realizzazione di reti wireless/wired di datalogger con funzioni di concentratore dei dati acquisiti dalla rete, configurazione e manutenzione della rete di monitoraggio, invio automatico su server FTP dei dati acquisiti e funzioni di early warning mediante allarmi (SMS/e-mail).

In caso di prove in campo sorvegliate Boviar propone l'ultimo prodotto realizzato dalla Start-up Sunta (come gli altri prodotti presentati da Boviar) pd-Das.

Il datalogger pD-das è una strumentazione, portatile programmabile e dotata di grande \*\*autonomia \*\*con funzionamento a batteria (12 Vdc).

Esegue prove in campo dinamiche e statiche in ambito strutturale geotecnico ed ambientale grazie alla vasta gamma di sensori con cui si può interfacciare. Disponibile in configurazione a 16 o 32 canali per Prove di Collaudo e Carico in genere; Sw di analisi ed elaborazione per l'identificazione strutturale in dotazione Sistema ottimo per la misura di vibrazioni in sito.

Si tratta di un apparato versatile di raccolta dati, ideato e realizzato per Prove in Campo sorvegliate con l'obiettivo di fornire uno strumento affidabile ed economico, con alimentazione autonoma, dal semplice utilizzo, ideale anche per monitoraggi di breve termine.

Per conoscere i sistemi per la realizzazione di un impianto di monitoraggio ed avere maggiori informazioni sulla famiglia di prodotti #DAS (EDAS, DDAS, DWise e WISE accelerometri ed inclinometri m\_Sense )

[consultate il sito di Boviar](#)

## Sistemi di allerta

I sistemi di allerta integrati nei nostri prodotti della Linea dDas e Edas hanno lo scopo di rilevare e trasmettere l'informazione circa il superamento di un valore di soglia del parametro rappresentativo.

Data la rapidità con cui tali informazioni devono essere disponibili, il sistema deve funzionare in maniera automatica prescindendo da un intervento umano che, necessariamente, rallenterebbe la procedura. Un approccio utilizzato frequentemente è basato sulla definizione: al di sopra della soglia si assume che la struttura sia danneggiata.

Il valore di soglia è quello cui corrisponde una probabilità, considerata sufficientemente bassa, che la struttura non sia danneggiata. L'obiettivo della definizione di una soglia è quello di fissare un valore al



superamento del quale, attraverso una procedura automatica, venga comunicato ad una centrale di controllo o direttamente ai responsabili l'accadimento dell'evento.

B-IoT-P è una piattaforma IoT gestita da Boviari che fornisce una suite completa di funzionalità per la raccolta, lo storage, il processing, la visualizzazione e la gestione dei dati dei dispositivi IoT. Le principali caratteristiche della piattaforma sono lo streaming di dati in tempo reale, la gestione dei dispositivi e modulo di elaborazione dati, il che lo rende una soluzione adatta per vari usi IoT ed in particolare per il

**Sede amministrativa**  
Casoria (NA) 80026  
via G. Puccini 12/a  
T +39 081 7583566  
F +39 081 7587857

**Sede legale**  
Lainate (Mi) 20020  
via Rho 56  
T +39 02 93799240  
F +39 02 93301029



assoresauro



[www.boviar.com](http://www.boviar.com)  
[info@boviar.com](mailto:info@boviar.com)