



PROVINCIA DI COSENZA
Settore Viabilità

pag. 1

RELAZIONE GENERALE

OGGETTO: Monitoraggi Ponti su Strade Provinciali attraverso indagini tecnico -
diagnostiche - 2° stralcio.
Oneri sicurezza non compresi nei prezzi

COMMITTENTE: Provincia di Cosenza

Cosenza, 18/12/2020

IL TECNICO
Ing. Michele Arcuri

RELAZIONE GENERALE

Caratteristiche del sistema di monitoraggio per ogni singolo ponte o viadotto.

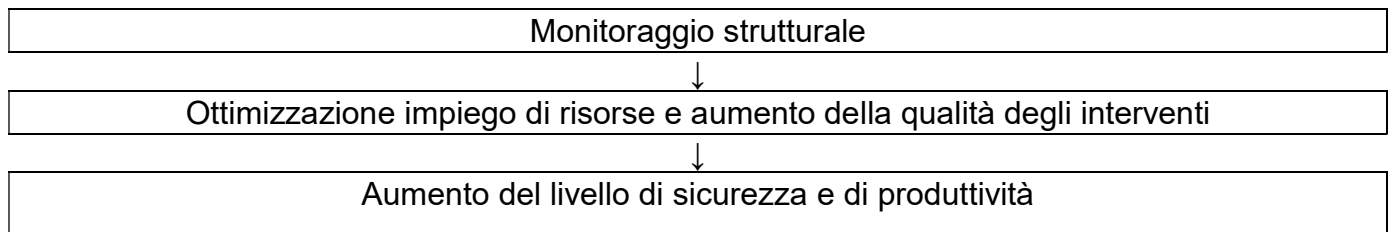
Nell'ambito della Convenzione fra il Polo di Innovazione per l'Edilizia Sostenibile "Green Home" (POR Calabria 2014-2020) la Provincia di Cosenza – Settore Viabilità rappresentato dal Dirigente ing. Claudio Le Piane, ha chiesto al Laboratorio SMART Lab (Structural Monitoring, structural Advanced materials, structural Rehabilitation, structural Testing Laboratory) dell'UniCal, coordinato dal prof. Ing. Raffaele Zinno afferente al Dipartimento di Ingegneria dell'Ambiente (DIAM), di collaborare alla messa a punto di un sistema di monitoraggio strutturale dei ponti e dei viadotti gestiti sul territorio dalla Provincia di Cosenza.

La rete stradale della Provincia di Cosenza, a differenza di quella autostradale, è diffusa capillarmente su tutto il territorio provinciale. Monitorare, quindi, lo stato di salute strutturale dei manufatti della rete stradale gestita da quest'Ente non solo fornisce dati strettamente connessi alla rete stradale stessa ma estendibili a tutte le strutture ed infrastrutture circostanti. Solo a titolo di esempio, qualora la zona ionica fosse sede di un evento sismico, conoscere in tempi brevi la situazione strutturale dei ponti della rete stradale provinciale ricadenti in quest'area e comprendere l'entità dei possibili danni, può essere utile informazione al sistema della Protezione Civile per meglio organizzare eventuali soccorsi e/o interventi, anche conoscendo dati relativi alla logistica e, quindi, alla possibilità di spostamento dei propri mezzi da e verso quella zona.

Inoltre, avere una rete capillare di monitoraggio e poter acquisire dati storici sulle strutture ed infrastrutture stradali sarà utile sia alla Provincia per meglio organizzare gli interventi di manutenzione periodica e straordinaria, sia alla Comunità scientifica che, attraverso lo SMART Lab, verrebbe in possesso di dati da analizzare statisticamente, strutturalmente, etc.

Il monitoraggio strutturale, noto anche come structural health monitoring (SHM), infatti, è uno dei più recenti e interessanti campi di studio dell'ingegneria strutturale. Esso rende possibile, sfruttando il continuo sviluppo tecnologico di strumenti di rilevazione ed elaborazione dati, valutare con sempre maggior chiarezza le caratteristiche strutturali e il livello di danneggiamento di una qualunque opera, consentendo al professionista di predirne l'andamento nel tempo. Monitorare lo stato di salute di una struttura significa aumentarne il livello di sicurezza nelle sue diverse fasi di vita, dalla realizzazione all'abbattimento. Implementare un sistema di monitoraggio ad esempio rende possibile, alle autorità competenti, l'individuazione delle criticità e una loro categorizzazione. La realizzazione di un archivio, continuamente aggiornato con i dati rilevati, permette infine di ottimizzare l'impiego delle risorse e migliorare la qualità degli interventi da programmare.

Il seguente schema esemplifica rapidamente i vantaggi di un sistema di monitoraggio strutturale



L'innovazione del monitoraggio strutturale permette anche di variare la logica con cui vengono programmati gli interventi di manutenzione. Il programma di manutenzione preventiva difatti permette di valutare lo stato della struttura solamente a intervalli cadenzati. L'applicazione dello Structural Health Monitoring consente invece, di passare da un sistema manutentivo basato su controlli a prefissate scadenze temporali ad un sistema di interventi effettuati "a richiesta", cioè quando è ritenuto necessario, in base alle effettive condizioni strutturali. In questo modo è possibile migliorare l'efficacia degli interventi sulla struttura e ottimizzare i costi dell'intero programma di manutenzione.

L'idea alla base del monitoraggio attraverso l'uso delle vibrazioni è che i parametri modali, quali frequenze, modi del sistema, smorzamento strutturale, sono funzioni delle proprietà fisiche della struttura come massa, rigidezza e smorzamento. Da qui risulta che la variazione delle proprietà fisiche, causata da un danneggiamento, determinerà la variazione dei parametri modali.

Il monitoraggio strutturale si basa sull'interazione di tecniche di rilevamento e modelli matematici. Le ipotesi alla base dei modelli matematici sono quelle che costituiscono la spina dorsale della Scienza delle Costruzioni e vantano, pertanto, una traduzione letteraria ampia e variegata. La continuità nel tempo del monitoraggio è infine la caratteristica peculiare che differenzia il monitoraggio continuo ed on-line da una sporadica misurazione di dati, rendendo possibile la registrazione delle variazioni dei principali fattori d'interesse.

Un sistema di monitoraggio per opere civili, in fase di esercizio, viene normalmente redatto al fine di garantire il raggiungimento dei seguenti scopi:

- Gestione/manutenzione delle opere
- Verifica del comportamento atteso
- Ottimizzazione delle procedure di controllo, in funzione del comportamento riscontrato in seguito all'analisi delle serie storiche ed eventualmente di quello determinato con modelli strutturali analizzati con i consueti metodi della Meccanica strutturale e computazionale.

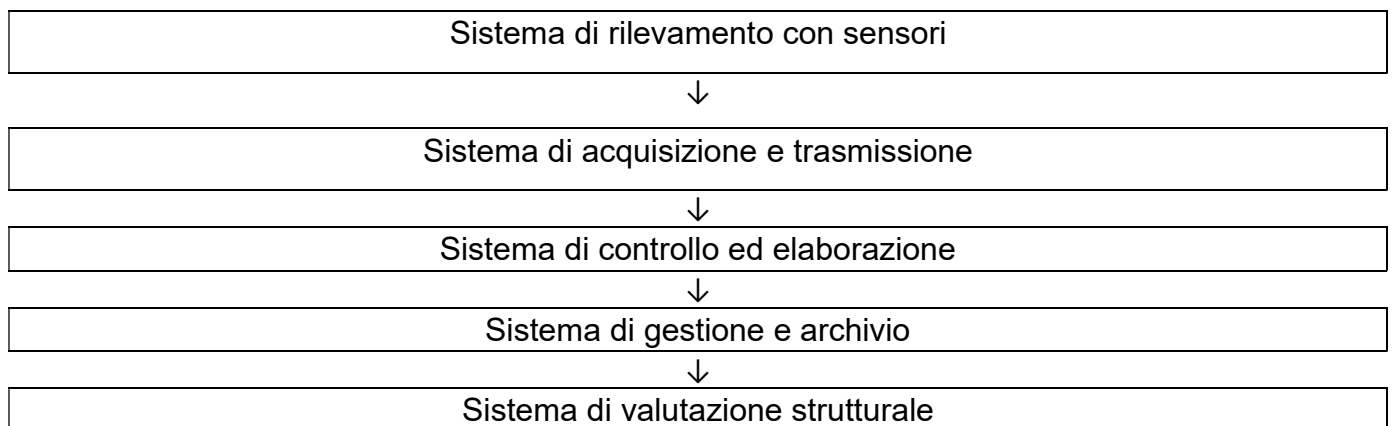
In particolare, riferendoci al monitoraggio strutturale di opere civili quali i ponti ed i viadotti della Provincia di Cosenza, il monitoraggio si prefigge lo scopo di:

- Sorvegliare il comportamento di singole opere, strutture e elementi strutturali particolarmente rilevanti o critici.
- Tenere sotto controllo il comportamento delle opere nel tempo, mediante rilievo di parametri fisici significativi.
- Permettere l'elaborazione di previsioni sull'evoluzione di fenomeni anomali.
- Fornire informazioni utili per le attività di manutenzione.

L'architettura del monitoraggio strutturale, o meglio dell'SHM è una complessa pratica ingegneristica generata dall'unione di diversi strumenti tecnologici. Un sistema di monitoraggio è costituito in generale dai seguenti sistemi:

- Sistema di sensori: misurano le grandezze d'interesse;
- Sistema di acquisizione e trasmissione dati: dispositivi che ricevono i segnali generati dai sensori, li convertono e li trasmettono ai computer per l'elaborazione;
- Sistema di controllo ed elaborazione dati: controllano le operazioni del sistema di acquisizione ed elaborano i dati ricevuti;
- Sistema di gestione e archivio dati: archiviano i risultati dell'elaborazione per consentire analisi successive;
- Sistema di valutazione strutturale;

I primi due sistemi sono generalmente installati sulla struttura, gli altri invece sono dislocati all'interno degli uffici di controllo del gestore dell'infrastruttura. Tutti questi sistemi permettono all'ingegnere strutturale di inquadrare lo stato di integrità di una struttura. Il seguente schema esemplifica le varie fasi ed i vari sistemi che entrano in gioco nell'SHM:



La seguente figura esemplifica il funzionamento del sistema:

Schema del sistema di monitoraggio e allerta sismico



I metodi di indagine per la valutazione del danno presente su una struttura, possono essere schematizzati, come proposto da Rytter [12], nei seguenti punti:

- Metodi di primo livello o di rilevamento: sono solo in grado di valutare la presenza di un eventuale danno sulla struttura;
- Metodi di secondo livello o di localizzazione: capaci di valutare la presenza di un eventuale danno fornendo anche indicazioni circa la posizione;
- Metodi di terzo livello o di classificazione: capaci di identificare un eventuale danno fornendo indicazioni circa la posizione e l'entità del danneggiamento;
- Metodi di quarto livello o di predizione: capaci di individuare l'eventuale presenza di danno, stimarne l'entità e la posizione, oltre a dare indicazioni circa l'impatto che il danneggiamento ha sulla struttura

La scelta del livello di dettaglio nell'identificazione del danno determinerà la tipologia e la strategia del metodo SHM che dovrà essere utilizzato. Quindi ogni metodologia, di livello crescente in funzione alla precisione che si vuole ottenere nello stimare la salute dell'opera, richiede altrettante informazioni e algoritmi per l'analisi a complessità variabile. Le metodologie più raffinate richiedono, ovviamente, costi più elevati e risultano computazionalmente onerose a causa degli elevati tempi di calcolo.

Nel caso in cui sia sufficiente soffermarsi al livello 1, per capire se la struttura si sia danneggiata durante un certo evento sismico, oppure durante il suo esercizio per obsolescenza, fatica, o quant'altro, è sufficiente effettuare il confronto tra i valori assunti da

un parametro legato al danno prima e dopo l'evento potenzialmente causa di danno. A tale scopo si utilizzano ad esempio le frequenze proprie dei primi modi di vibrazione della struttura, che possono essere stimate utilizzando un numero molto limitato di sensori. In molti casi sono sufficienti due sensori collocati alla base e in sommità di un edificio. Ciò può essere molto utile nei casi in cui si debba monitorare non una sola, ma un gruppo di strutture con un modesto impegno economico e quindi si disponga di un numero limitato di sensori. In questa proposta ci si prefigge di ottenere il raggiungimento del livello 1, ponendo però le basi, eventualmente con integrazioni del sistema, spesso anche solo di tipo software, di proseguire verso gli altri livelli.

I sistemi che possono essere progettati e messi in esecuzione possono essere standardizzati, ovvero commercialmente reperibili e opportunamente certificati, e non standardizzati, ovvero ancora nella fase prototipale ed ancora in fase di sperimentazione o di certificazione. In seguito si proporrà un sistema prevalentemente standardizzato, ma su alcune strutture più significative, l'associazione con sistemi non standardizzati, in modo da poter paragonare il loro funzionamento evidenziandone peculiarità, pregi e difetti, e quindi di aiutare l'innovazione e la ricerca sui vari sistemi di monitoraggio, rendendoli sempre più avanzati e performanti.

Il metodo di analisi e di monitoraggio che si propone è stato messo a punto dallo SMART Lab nell'ambito del distretto della Domotica con il progetto PON-DOMUS.

In tale sperimentazione le fasi seguite sono:

- a) Rilievo geometrico dell'opera
- b) Determinazione delle caratteristiche meccaniche dei materiali con metodi di prova non distruttivi, semidistruttivi e/o distruttivi
- c) Analisi della struttura mediante un modello strutturale analizzato con i metodi classici della Meccanica Computazionale (i.e. Metodo di analisi agli Elementi Finiti) per definirne i parametri statici e dinamici fondamentali
- d) Progettazione del sistema di monitoraggio statico e dinamico della struttura per verificare la correttezza dell'analisi teorica e, comunque, per stabilire sperimentalmente l'attuale comportamento dinamico della stessa, con la memorizzazione dei principali parametri
- e) Analisi periodica in loco della salute strutturale, tramite i rilievi ottenuti tramite la rete di sensori applicata, e tramite l'utilizzo di un apposito software risiedente su computer locale. Invio di eventuali warning nel caso ci sia discordanza con i dati storici memorizzati, indicativi di un eventuale danno strutturale
- f) Archiviazione dei dati misurati periodicamente e trasmissione degli stessi ad una

centrale operativa remota perchè siano poi oggetto di analisi statistiche, strutturali, etc.

- g) Possibilità di collegamento on-line della strumentazione con la centrale operativa al fine di rilevarne la salute strutturale, oppure testare il corretto funzionamento degli apparati e correggere il loro eventuale malfunzionamento.

Inoltre il laboratorio SMART Lab è coinvolto in un altro progetto (S3HM) di monitoraggio da poco finanziato dalla Regione Calabria, nell'ambito della linea POR 2014/20 – Living Lab, che riguarda il monitoraggio di tre centri abitati del Savuto (Scigliano, Bianchi e Colosimi), con una metodologia simile a quella proposta per i ponti ed i viadotti della Provincia di Cosenza, sempre discendente dall'esperienza PON-Domus.

Il progetto S3HM (Savuto Smart Structural Health Monitoring), infatti, si pone l'obiettivo di sviluppare sensori più economici, ricercando il giusto compromesso costo-precisione della misura, connessioni wireless per facilitare la messa in opera e realizzare il monitoraggio e l'analisi strutturale, oltre alla conoscenza dello stato di salute strutturale di un singolo edificio, permettere agli enti, ai proprietari e ai tecnici di individuare le azioni per la manutenzione programmata e la possibilità di prevedere scenari d'intervento in condizioni di emergenza (sismica, idrogeologica, ecc..) e, di conseguenza, attivare azioni di allerta / allarme.

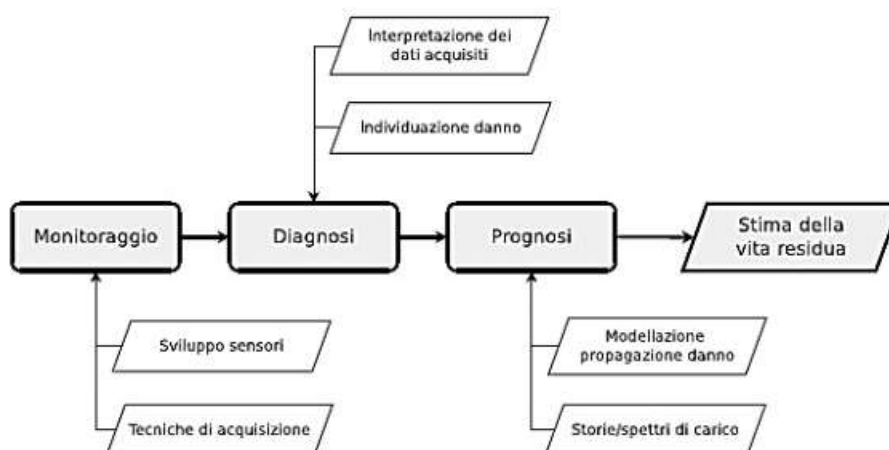
La soluzione proposta prevede la creazione di un alias digitale unitario archiviato su piattaforma cloud, un modello BIM opportunamente esteso per archiviare i dati storici provenienti dai vari sensori e abilitare analisi moderne in chiave di prevenzione di possibili danni o malfunzionamenti, per fornire informazioni per la messa in atto di azioni correttive volte a migliorare la qualità strutturale degli edifici, tutelando l'incolumità delle persone e preservando anche il valore economico del patrimonio immobiliare, spesso anche di pregio architettonico e/o storico. Tale centrale operativa, potrà integrarsi con quella della Provincia per le strutture stradali, in modo da divenire punto comune di raccolta di dati, sia in caso di ordinaria gestione della manutenzione dei manufatti, sia in caso di emergenza, in particolare di emergenza sismica.

Il sistema sviluppato nel PON-Domus, già approvato per il POR Living Lab S3HM, potrà essere, quindi adattato ai ponti ed ai viadotti della rete stradale provinciale. Anche nel caso di tali strutture, in linea generale si tenderà ad installare sistemi di monitoraggio per grandezze dinamiche, atti a misurare la risposta dinamica dei ponti e dei viadotti tramite la stima dei parametri modali o, eventualmente, tramite la misura della risposta dinamica delle grandezze cinematiche quali le accelerazioni, la velocità di oscillazione e/o le

ampiezze di oscillazione. Oltre a tali sistemi si prevederanno anche sistemi di monitoraggio di grandezze statiche, come ad esempio la misura delle escursioni dei giunti di dilatazione, le inclinazioni delle sottostrutture verticali o gli spostamenti assoluti, tramite misure topografiche e geodetiche automatizzate tramite stazioni robotizzate e/o altri sistemi moderni e innovativi (i.e. interferometria – GB-SAR -, Real Aperture Radar – RAR, Syntetic Aperture Radar – SAR -, etc.).

Il monitoraggio strutturale di opere esistenti è una pratica ingegneristica che, dal punto di vista teorico, riscopre i ruoli ricoperti dalle informazioni utilizzate in fase di progettazione. Durante il progetto di una costruzione sono note le azioni sollecitanti (statiche o dinamiche) e si possiede il modello strutturale, queste conoscenze vengono combinate per ottenere la previsione della risposta strutturale nelle varie condizioni d'interesse (stato limite di servizio e stato limite ultimo). Nel monitoraggio di un'opera esistente vengono effettuati dei rilievi e delle prove (in situ o in laboratorio) che forniscono la risposta strutturale a determinate sollecitazioni. In questo caso quindi si è a conoscenza della risposta e delle azioni, mentre ciò che si vuole determinare è il modello. Si potrebbe dire che nel primo caso si gestisce un problema diretto, mentre nel secondo si affronta il problema inverso.

In pratica, con riferimento alla successiva figura che descrive il completo processo di Structural Health Monitoring, i metodi diretti ed inversi, successivamente alla fase di “monitoraggio”, costituiscono il cuore della fase “diagnosi”. A questa fase al momento, in questo progetto, ci si fermerà alla richiesta di controllo ed al lancio di segnali di allarmi, riservando ad integrazioni successive del sistema (che risiedono spesso più sul lato teorico e di sviluppo del software) il raggiungimento delle fasi “prognosi” e “stima della vita residua”. D'altra parte, queste fasi, hanno anche necessità di storie di carico e spettri di carico, che solo con l'attivazione di una efficiente e diffusa rete di monitoraggio potranno essere ottenuti.



Passando allo specifico caso del progetto proposto, in dettaglio, per le principali parti strutturali costituenti i ponti ed i viadotti, si elencano le misure statiche e dinamiche che si intendono essenziali.

Impalcati: prime frequenze proprie di oscillazione (flessionali e torsionali), escursioni tensionali, misure topografiche (GPS + TPS automatiche)

Pile: prime frequenze proprie di oscillazione (flessionali e torsionali), escursioni tensionali, Rotazioni (inclinazioni), misure topografiche (GPS + TPS automatiche)

Spalle: Rotazioni (inclinazioni), Valori di accelerazione (per eventi sismici), misure topografiche (GPS + TPS automatiche)

Risulta abbastanza immediato comprendere, considerando soprattutto l'elevato numero di ponti e di viadotti presenti sulla rete stradale della Provincia di Cosenza, che progettare e realizzare per l'intero patrimonio strutturale ed infrastrutturale di tale rete un sistema completo di monitoraggio risulta presentare costi non affrontabili con le risorse a disposizione o reperibili nel breve e medio termine. Allo stesso tempo prevedere degli interventi episodici completi ma numericamente minimi, oppure una miriade di sistemi incompleti e sconnessi fra loro sarebbe in entrambi i casi poco efficiente ed efficace. Nella presente proposta, allora, si cerca di progettare, o almeno di stabilire le linee guida, di una rete completa e capillare diffusa a tutte le opere stradali gestite dall'Ente Provincia, collegata a delle centrali operative (se ne prevedono due gemelle, una nella sede della Provincia ed una nella sede dello SMART Lab) perchè siano continuamente controllate e per acquisire quanti più dati possibili. Da questo progetto completo si identificheranno i singoli interventi che al momento potrebbero essere anche parziali o completi episodicamente, ma di cui è previsto e programmato, attraverso la loro integrazione, il raggiungimento di una rete completa, anche localmente, e coordinata. Oltre alla completezza, la rete deve essere, ovviamente, affidabile, deve cioè svolgere il suo compito per il quale è progettata, nelle condizioni operative di riferimento e per il periodo di tempo richiesto.

Se queste finalità generali, completezza finale e affidabilità, sono condivise ne discende che bisogna tenere in conto necessariamente i seguenti aspetti:

Significatività del parametro	Rilevanza oggettiva che un determinato parametro assume nel contesto generale della conoscenza del fenomeno in atto e del suo peso, ad esempio, nella definizione di livelli o scenari di allertamento, di
-------------------------------	--

	rischio o di allarme
Rapporto qualità/prezzo	Ottimizzare i costi in funzione degli obiettivi prefissati
Scelta della tipologia strumentale più idonea	Gli strumenti per i quali siano disponibili dati certi e riscontri nella letteratura tecnica relativamente alla loro capacità di funzionare per periodi di tempo significativi
Utilizzo di componenti di derivazione industriale	Strumentazione di largo consumo, collaudati, garantiti e per i quali sono facilmente disponibili ricambi ed assistenza
Ridondanza parziale della strumentazione	Nei casi di misure particolarmente critiche o di strumenti per i quali siano impossibili interventi di riparazione, sostituzione o verifica di funzionamento, o anche per creare un parallelismo con strumenti non standardizzati, ovvero sperimentali
Progettazione impiantistica	Dovrà tenere conto delle condizioni operative e le specificità del componente interessato
Progettazione installazione	Da eseguire con procedure collaudate e da parte di personale esperto e responsabile
Costante manutenzione del sistema	Ogni componente deve rientrare in un programma di interventi basato sulla conoscenza delle specificità dei componenti, delle esigenze della Provincia di CS e delle possibili cause di danneggiamento nelle condizioni operative di riferimento.

Per quanto riguarda il periodo di riferimento, spesso precedentemente citato, si deve considerare che il sistema di monitoraggio deve essere in grado di operare secondo le specifiche per il maggior tempo possibile. Ciò potrà essere ottenuto se tutti i componenti del sistema siano di ottima qualità e di provata durata, oppure che essi siano sostituibili.

Un'altra caratteristica che, per quanto possibile, si dovrebbe ottenere è un elevato grado di intercambiabilità ovvero una possibile utilizzazione in più contesti. Ciò garantisce un maggiore flessibilità del sistema, una più semplice ed economica gestione dello stesso e dei ricambi disponibili, nonché una più semplice e generale preparazione e formazione del personale addetto alla gestione del sistema e delle misure.

E' altresì importante la precisione degli strumenti e dei vari componenti, così come altre grandezze (i.e. risoluzione, deriva termica, stabilità nel tempo, etc.) che si indicherà nei criteri fondamentali per le scelte progettuali.

Importante sarà anche l'automatizzabilità degli strumenti e dei componenti il sistema.

Per ciò che riguarda il software si cercherà di utilizzare pacchetti software standard, su cui sia possibile intervenire, in caso di riconfigurazioni del sistema, espansione o riduzione dei canali collegati, modifiche delle procedure di lettura e di conversione dei dati, di settaggio delle soglie di allarme, etc., tramite strumenti compresi nel pacchetto software stesso.

Infine, il sistema dovrà essere in grado di introdurre eventuali innovazioni tecnologiche, sia per favorire la sperimentazione parallela all'uso del sistema standardizzato, sia qualora tali innovazioni si dimostrino utili al miglioramento dell'efficacia del monitoraggio in generale.

Lo Structural Health Monitoring (SHM) è strettamente correlato al campo della statistica e a quello della scienza dei materiali. È possibile individuare nei seguenti principi, i concetti cardine di questo settore:

1. tutti i materiali possiedono difetti al livello atomico microstrutturale, ad esempio inclusioni e impurità;
2. per identificare un'anomalia è necessario effettuare una comparazione tra due stati del sistema, chiamati baseline case e nonconforming case, ovvero stato di riferimento e stato non conforme;
3. ricerca e localizzazione del danno possono essere eseguite attraverso procedure non supervisionate, mentre identificazione del tipo e quantificazione della severità del danno richiedono l'intervento del professionista;
4. a. il danno non può essere misurato direttamente;
b. quanto più una misura è sensibile al danno, tanto più sarà influenzata dal cambiamento delle modalità operative o delle condizioni ambientali;
5. la previsione dello sviluppo temporale del danneggiamento indica quale sia il migliore sistema di monitoraggio (hardware) da utilizzare;
6. esiste un compromesso tra sensibilità di misurazione e capacità di filtrare il rumore esterno;
7. la dimensione del danno che può essere individuata dai cambiamenti nella dinamica del sistema è inversamente proporzionale al range di frequenze di eccitazione;

Il danno aumenta la complessità di una struttura, indirizzandola verso un comportamento non lineare.

Saper distinguere una configurazione strutturale compromessa da una in buona salute richiede la conoscenza delle caratteristiche strutturali nelle diverse fasi di vita dell'opera. La mole dei dati da processare può spesso causare un allungamento dei tempi di analisi, per questo è necessario individuare le caratteristiche strutturali maggiormente influenzate dalla presenza del danneggiamento. L'identificazione di queste caratteristiche è eseguita

attraverso l'implementazione di modelli analitici e sperimentali, come ad esempio un modello agli elementi finiti. Si sottolinea come sia l'acquisizione dei dati che la successiva analisi, debbano essere in grado di distinguere la risposta strutturale indotta da un eventuale danneggiamento, da quella causato dal cambiamento delle condizioni ambientali o delle modalità operative di rilevamento.

Il sistema di rilevazione sensoriale è il primo e uno dei più importanti elementi costituenti l'architettura del monitoraggio strutturale. Per poter modellare analiticamente e gestire numericamente il comportamento strutturale di un manufatto è necessario effettuare delle rilevazioni. Le rilevazioni hanno il compito di misurare delle grandezze fisiche, che nel caso del monitoraggio strutturale si traducono principalmente in tre tipologie di parametri:

1. Sorgenti di carico: ambientali (vento, azione sismica) o artificiali (traffico);
2. Risposte strutturali: spostamenti, deformazioni, accelerazioni e inclinazioni;
3. Effetti ambientali: temperatura, precipitazioni atmosferiche, umidità, particelle inquinanti presenti nell'aria;

L'accuratezza e la precisione delle previsioni formulate attraverso il monitoraggio strutturale sono inevitabilmente correlate all'accuratezza e alla precisione degli strumenti di rilevazione. L'importanza che la qualità del dato fornito dalle misurazioni assume è pari a quella dell'intero modello matematico utilizzato nell'elaborazione dei dati. È evidente quindi che strumenti di misura, caratterizzati da elevata accuratezza e precisione nell'acquisizione dei parametri d'interesse, predispongono ad una migliore interpretazione della risposta strutturale. I sensori, che per definizione costituiscono solo una componente dei più complessi trasduttori, traducono una grandezza in ingresso in un'altra grandezza in uscita. Progettare il miglior sistema di monitoraggio per una determinata struttura richiede diversi passaggi. È necessario innanzitutto stabilire quali siano i parametri che si vogliono utilizzare nell'analisi della risposta strutturale. A questa fase segue quella della scelta dei sensori, fatta sulla base della grandezza e della complessità dell'opera da monitorare. Le caratteristiche qualitative intrinseche di ciascun sensore, nonché le differenti tipologie, suggeriscono agli ingegneri quali siano i dispositivi più adatti all'impiego a seconda degli obiettivi che si vogliono raggiungere. Alcuni esperti hanno individuato nei seguenti parametri le principali caratteristiche degli strumenti di misurazione: range di misura, sensibilità di misura, risoluzione, linearità, stabilità, accuratezza, risposta di frequenza e durabilità.

Nel seguito sono, quindi, riportati i principali dispositivi di misurazione utilizzati nel campo

Termometri

i termometri misurano la temperatura della struttura e quella dell'aria. In strutture particolarmente sviluppate in senso verticale e orizzontale, l'influenza delle deformazioni indotte dalle variazioni termiche è notevole.

Estensimetri

L'estensimetro (in inglese, strain gauge) è lo strumento utilizzato per misurare la deformazione, intesa come la variazione di lunghezza nell'intorno di un punto, di un elemento tridimensionale. Si riporta un elenco dei principali estensimetri utilizzati fino ad oggi, e una sommaria descrizione:

- estensimetro induttivo: utilizza un trasduttore di spostamenti induttivo per leggere i piccoli spostamenti;
- estensimetro capacitivo: la variazione della distanza tra le armature attive di un condensatore viene tradotta in deformazione;
- estensimetro a filo vibrante: la variazione di lunghezza di un filo teso alle due estremità si traduce in una variazione della tensione a cui è soggetto e questa è responsabile della variazione delle frequenze proprie di vibrazione;
- estensimetro ottico: un sistema di prismi e specchi proiettava un raggio luminoso con angolazione variabile all'aumentare della deformazione registrata;
- estensimetro ottico laser: utilizza i principi dell'interferometria ottica;
- estensimetro resistivo: uno dei più comuni, descritto successivamente;
- estensimetro a fibre ottiche: uno dei sistemi più utilizzati negli ultimi anni, descritto successivamente.

Inclinometri

Gli inclinometri sono strumenti che consentono di misurare il grado di inclinazione. Nell'ingegneria civile restituiscono il valore della variazione angolare tra la posizione iniziale e finale dell'elemento su cui è stato installato il sensore. Le tecniche di misurazione dell'inclinazione variano ampiamente, dai goniometri meccanici a pendolo e dai livelli a bolla fino ai trasduttori interferometrici ottici e ai sensori elettrolitici. Questi ultimi, tra i più diffusi, sono anche quelli più sensibili alle interferenze elettromagnetiche. È stato questo uno dei motivi per cui le fibre ottiche hanno riscontrato grande successo tra i sensori di misurazione: la loro "immunità" ai campi elettromagnetici.

Accelerometri

Gli accelerometri sono sensori di misura delle vibrazioni in grado di rilevare un'accelerazione e convertirla in un segnale elettrico misurabile. Gli ultimi anni hanno visto un incremento dell'uso degli accelerometri, oltre che nel tradizionale ambito scientifico e aerospaziale, anche nei settori automotive, testing, meccanico e civile. Questi sensori possono sfruttare diversi principi per misurare una vibrazione (accelerometro piezoelettrico, IEPE o charge mode, sensori MEMS, servoaccelerometro), ciascuno adatto per determinati ambiti applicativi. Sono inoltre disponibili modelli in grado di rilevare le vibrazioni su più direzioni.

Pesa dinamica

Sistema di pesa dinamica a doppia cella per corsia per il monitoraggio del peso dei veicoli in transito, fino alla velocità massima consentita, installato su due corsie, costituito da sensori piezoelettrici, spire induttive in pavimentazione, unità di pesatura dinamica datalogger, sensori di temperatura e telecamera.

Caratteristiche generali del sistema di monitoraggio

Indipendentemente dalla dimensione del sistema installato su ogni singolo ponte o viadotto, dalla sua architettura, dalle modalità di acquisizione, di misura, di archiviazione dei dati, lo stesso sistema dovrà trasferire i dati a due server posti in due centrali operative, una presso la sede indicata dalla Provincia di Cosenza e l'altro presso i locali dello SMART Lab dell'UniCal. Tali centrali svolgeranno, fra l'altro, la funzione di Centri di Controllo Remoto (CCR). In linea generale si prevederà l'archiviazione dei dati di misura organizzandoli secondo le seguenti modalità:

- ogni tipologia di sensori installati salva i dati su files che saranno nominati con un dato prefisso identificativo, ad esempio nel caso di sensori inclinometrici e sensori accelerometrici, si avranno una serie di file che listano le misure inclinometriche dei vari sensori installati, ed un'altra serie di file che listano le misure accelerometriche;
- per ogni gruppo di sensori della medesima tipologia, sarà prodotto un file per ciascun giorno di misura che sarà quindi archiviato con un suffisso indicante la data;
- le misure rilevate dai sensori dovranno avere una precisa attribuzione temporale e per questo motivo, ciascun sistema di monitoraggio deve possedere una sincronizzazione oraria facente riferimento ad un server NTP affidabile;

- il sistema dovrà prevedere anche la misura della temperatura, in ciascun punto ove vengono installati i sensori di misura previsti, al fine di poter depurare le misure dagli effetti termici.

In linea generale si tenderà ad installare sistemi di monitoraggio per grandezze dinamiche, atti a misurare la risposta dinamica delle strutture tramite una stima dei parametri modali o, eventualmente, tramite la misura della risposta dinamica delle grandezze cinematiche quali le accelerazioni, la velocità di oscillazione o le ampiezze di oscillazione.

Oltre a tali sistemi si potranno prevedere anche sistemi di monitoraggio per grandezze statiche, come ad esempio la misura delle escursioni dei giunti di dilatazione, le inclinazioni delle sottostrutture verticali o gli spostamenti assoluti, rilevati tramite misure topografiche automatizzate tramite stazioni robotizzate.

Ciascun sistema di monitoraggio dovrà prevedere la possibilità di eseguire un controllo fra valori misurati e valori di riferimento stabiliti, in modalità continua ed automatica, e dovrà essere in grado di comunicarle alle CCR ed anche di inviare messaggi di allerta (via sms o via email) nel caso in cui i valori misurati si discostino di un valore superiore ad una tolleranza predefinita. La definizione dei valori di riferimento saranno definiti dai software e dai supervisori delle CCR anche in base a dati storici ottenuti dopo un opportuno periodo di osservazione dell'opera mediante lo stesso sistema di monitoraggio installato

Fasi di realizzazione del singolo sistema di monitoraggio

Per la realizzazione del sistema di monitoraggio per il singolo ponte o viadotto si procederà con le seguenti fasi, similmente a quanto realizzato nei progetti PON Domus e POR Living Lab S3HM dallo SMART Lab, nonchè nel rispetto delle linee guida per il monitoraggio strutturale UNI/TR 11634-2016.

- accurata pulizia del sito e della struttura da monitorare
- rilievo geometrico dell'opera tramite rilievi topografici e/o laser-scanner con la generazione di file leggibile dai più comuni programmi di software strutturale agli Elementi Finiti e di Building Information Modeling (BIM), nonchè di Computer Aided Design (CAD)
- Tali file saranno analizzati dagli Uffici Tecnici della Provincia di Cosenza che,

con la collaborazione dello SMART Lab, verificherà se le indicazioni generali previste in questo progetto per il singolo ponte relativamente alla configurazione del sistema di monitoraggio definitivo ed alla sensoristica minima indicata, sono rispettate. Qualora ciò non si verificasse si procederà alla ridefinizione del sistema con i limiti del 10% complessivo ed un massimo locale fino al 20% dello stesso sistema. In caso di verifica positiva si autorizzerà l'installazione della sensoristica prevista per la singola opera.

- Installazione del sistema di monitoraggio, ovvero di tutta la sensoristica, del sistema di comunicazione locale cablato, degli apparati di controllo ed analisi locali e degli apparati di trasmissione dei dati verso le CCR situate presso la Provincia di Cosenza e presso lo SMART Lab.

Controllo locale della struttura

La stazione master dell'impianto, installata su ogni singola opera (quasi sempre in prossimità del quadro elettrico) si collegherà alla scatola di derivazione centrale per il trasporto di alimentazione e dei dati che vengono smistati alle altre scatole di derivazione ed a tutti i sensori installati. L'analisi continua delle deformazioni rilevate per le travi dell'impalcato dovrà permettere di acquisire informazioni in tempo reale su:

Superamento dei limiti di carico

Il sistema deve essere in grado di generare messaggi di warning se rileva il superamento dei limiti di carico in corrispondenza di transiti singoli.

Anomalie nel ritorno elastico delle deformazioni

Il sistema deve essere in grado di generare messaggi di warning se rileva che, a valle di un transito, la deformazione della trave non viene completamente riassorbita entro 60 secondi dall'evento.

Tabulazione dei dati di transito

Il sistema deve generare un tabulato nel quale vengono elencati i singoli transiti distinti per corsia e direzione, con indicazione del peso complessivo e, ove di interesse, anche la velocità di percorrenza.

Statistica dei carichi

Il sistema deve essere in grado di elaborare la distribuzione statistica dei carichi riportandone le occorrenze riscontrate, in un dato periodo.

Statistica dei transiti

Il sistema deve essere in grado di elaborare la distribuzione statistica dei transiti nelle due direzioni e nelle due corsie per direzione, in un dato periodo.

Anomalie nelle caratteristiche dinamiche

Localmente i dati provenienti dagli accelerometri dovranno differire da quelli memorizzati ed ottenuti dall'analisi computazionale della struttura ed aggiornati in base ai dati storici acquisiti dai sensori della rete installata. Qualora la differenza superi una prefissata tolleranza, il sistema dovrà immediatamente trasferire i dati alle CCR e dovrà inviare messaggi di warning via sms e via email,

I dati del monitoraggio dovranno, comunque, essere trasmessi con cadenza almeno oraria alle CCR e devono essere fruibili attraverso un applicativo web.

Caratteristiche del sistema di monitoraggio per ogni singolo ponte o viadotto.

- 1) Pulizia del ponte e della zona circostante per rendere possibile il rilievo laser scanner della struttura.
- 2) Rilievo laser scanner della struttura con generazione di file leggibili dai sistemi BIM, CAD e FEM.
- 3) Nel caso di indisponibilità della rete elettrica posizionamento di un impianto fotovoltaico per alimentazione in modalità continua delle apparecchiature posizionate sulla campata/pila, regolatore di carica e batterie di accumulazione che consentano fino a 12 h di alimentazione del sistema di monitoraggio.
- 4) Un armadio in vetroresina tale da garantire l'isolamento delle apparecchiature interne e la protezione dagli urti e dagli agenti atmosferici, staffato ad una delle pile di estremità del ponte o in altro sito dedicato.
- 5) Modem con SIM dati per il monitoraggio statico e dinamico
- 6) Un gateway ethernet.
- 7) Uno switch per la lettura dei dati da locale e la trasmissione via modem alla centrale di controllo.

- 8) Un PC industriale per la centrale di controllo da remoto ed uno portatile per la lettura locale dei dati.
- 9) Software.
- 10) Un sistema di acquisizione dati per il monitoraggio statico e dinamico.
- 11) Due moduli multisensore per misura di temperatura (uno al centro di ognuna delle due travi esterne dell'impalcato).
- 12) Tre estensimetri uno sulla trave centrale e due sulle travi esterne costituenti la campata e posti all'intradosso in posizione longitudinalmente centrale.
- 13) Quattro fessurimetri elettrici posizionati ai quattro spigoli della campata centrale del ponte/viadotto per la misura degli spostamenti dei giunti ivi posizionati ed all'intradosso delle travi esterne.
- 14) Un accelerometro mems triassiale alla testa della pila centrale ed un accelerometro mems triassiale a piano campagna posizionato alla base della stessa pila.
- 15) Un inclinometro biassiale per la pila centrale.
- 16) Nove accelerometri mems triassiali per campata, limitatamente ad una campata ogni tre, da posizionare tutti al centro delle anime delle travi, di cui tre sulla trave esterna destra, tre sulla trave esterna sinistra e tre sulla trave centrale (in caso di travi in numero pari, i tre centrali saranno posizionati all'intradosso dell'impalcato fra le due travi simmetriche di centro). Ogni gruppo da tre sarà posizionato ad $1/6$, $1/2$, e $5/6$ della luce della singola campata misurati a partire da uno dei due estremi della singola trave.
- 17) Cavi per i bus di trasmissione e cavi di alimentazione elettrica posizionati in apposite canaline o tubazioni di protezione.

Il Tecnico
Ing. Michele Arcuri