



SEMINARIO

DURABILITÀ DELLE COSTRUZIONI - LE INDAGINI IN SITO E TECNICHE DI CONSOLIDAMENTO

Genova, 9 Ottobre 2015

IL RUOLO DEL MONITORAGGIO STRUTTURALE NELLA GESTIONE DEL COSTRUITO

Prof. Ing. Andrea Del Grosso
Scuola Politecnica, Università di Genova

1. Introduzione

Il tema della durabilità delle costruzioni è venuto ad assumere importanza fondamentale nei Paesi industrializzati, che sono stati oggetto in epoche più o meno recenti di estesi sviluppi nel campo dell'edilizia e delle infrastrutture. L'efficienza delle costruzioni in esercizio è infatti condizione essenziale per consentire lo svolgimento in sicurezza ed economicità delle attività umane. Tuttavia, l'efficienza delle costruzioni è soggetta alla minaccia del degrado e dell'obsolescenza conseguenti ai fenomeni di invecchiamento dei materiali, della corrosione, dell'evoluzione delle condizioni d'uso, ad eventi rari, eccezionali o incidentali e, più recentemente, a quelli associati ai cambiamenti climatici che possono modificare anche in misura sostanziale le azioni ambientali che si esercitano sulle costruzioni stesse.

Tutto ciò pone alle società moderne sfide assai rilevanti poichè il contrasto del degrado delle costruzioni esistenti ed il mantenimento della loro efficienza comporta, considerando il patrimonio costruito complessivo, investimenti colossali, pena sostanziali diminuzioni del valore economico diretto e indiretto delle patrimonio stesso, investimenti tuttavia difficilmente affrontabili anche dalle economie più floride. Ad esempio, recenti studi [1] hanno valutato che i danni economici prodotti dalla corrosione nel mondo, comprendendo ovviamente gli impianti e quant'altro soggetto al fenomeno, possono raggiungere annualmente il 3 o 4 per cento del PIL globale. Per quanto riguarda le infrastrutture, diverse organizzazioni Europee hanno predisposto documenti [2, 3] che definiscono linee strategiche per la ricerca e l'implementazione di azioni che consentano di mantenere e ulteriormente sviluppare le infrastrutture di trasporto europee per conservare e migliorare i livelli di sicurezza, efficienza e sostenibilità necessari per lo sviluppo dell'Unione.

A tali sfide scienza e tecnologia oppongono diverse soluzioni: da un lato, con lo sviluppo di nuovi materiali, di metodi di indagine e di progettazione sempre più sofisticati ed affidabili nel garantire elevata durabilità e, dall'altro, con la messa in campo di strategie di gestione del costruito (*Asset Integrity Management*) che consentono la pianificazione ottimale degli interventi di manutenzione, consolidamento ed adeguamento funzionale. In tale ambito, il monitoraggio strutturale (*Structural Health Monitoring*), basato sulla sistematica applicazione di sistemi di rilevamento strumentali e

tecniche automatiche o semiautomatiche di elaborazione ed interpretazione dei dati rilevati, riveste rinnovata importanza.

2. Il Monitoraggio Strutturale (Structural Health Monitoring)

Sono state proposte molte definizioni del monitoraggio strutturale, considerato da alcuni evoluzione, per quanto non semplice, dei tradizionali metodi non distruttivi di indagine. In realtà, nella accezione contemporanea del termine, il monitoraggio strutturale è il risultato di un insieme di tecnologie volte a determinare lo *stato* di un sistema strutturale e la sua *evoluzione nel tempo*, allo scopo di rilevare e quantificare eventuali fenomeni di degrado o di danneggiamento e di consentire l'espressione di un *giudizio* sull'integrità del sistema stesso (*diagnosi*) e sulla sua capacità di rimanere in esercizio con adeguati livelli di sicurezza per un tempo determinato (*prognosi*). La funzione del monitoraggio strutturale è esplicitata attraverso *sistemi* più o meno complessi che comprendono componenti *hardware* e *software* e che comunque si interfacciano con una *conoscenza esperta* fornita attraverso l'intervento umano. In tal senso, le tecniche di monitoraggio strutturale si integrano con le indagini in situ, consentendone una più mirata definizione.

Le tecnologie coinvolte nello sviluppo e nella gestione di un sistema di monitoraggio hanno carattere fortemente interdisciplinare poichè comprendono, oltre all'ingegneria strutturale, la sensoristica e la metrologia, l'informatica e la tecnologia delle comunicazioni, le tecniche matematiche specifiche per il processo dei segnali e la costruzione di modelli comportamentali numerici, le teorie probabilistiche ed i modelli decisionali. Questo insieme di tecnologie, che ha cominciato ad essere sviluppato sistematicamente a partire dai primi anni 90, ha ormai raggiunto un elevato grado di maturità dal punto di vista scientifico e vanta significative applicazioni e prassi formalizzate e ben riconosciute nelle costruzioni meccaniche e, soprattutto, in quelle aeronautiche ed aerospaziali.

Per quanto siano note ed ampiamente riportate in letteratura notevoli applicazioni anche nel campo dell'ingegneria civile e soprattutto nell'ingegneria dei ponti [4], non si può dire che in tale campo l'applicazione delle tecniche di monitoraggio strutturale costituisca una prassi corrente. Le ragioni sono molteplici, prima fra tutte la caratteristica di fondamentale unicità nelle problematiche che ciascuna costruzione mostra rispetto alle altre, ancorché simili, e, secondariamente, la scarsa conoscenza dei vantaggi in termini di costo/beneficio che si possono in molti casi conseguire mediante l'applicazione di tali tecniche nella gestione del costruito, tanto a livello di singola struttura quanto a livello di patrimoni infrastrutturali complessi. Nel settore delle costruzioni civili, il carattere di unicità delle singole situazioni oggetto di studio rende meno facile lo sviluppo e la messa a punto di processi fortemente integrati e pertanto l'intervento della conoscenza umana è sempre richiesto anche nei livelli intermedi del processo. Da tale considerazione deriva peraltro la consapevolezza di un deficit formativo degli ingegneri civili che a sua volta non favorisce lo sviluppo delle applicazioni. Un'ultima considerazione riguarda il fatto che la vita operativa delle costruzioni civili è assai più lunga di quella dei sistemi industriali, veicoli di ogni tipo inclusi, e che quindi le fenomenologie del degrado e dell'obsolescenza si manifestano generalmente in tempi notevolmente superiori rispetto a questi.

E' comunque riconosciuto che le tecniche del monitoraggio strutturale, già ampiamente disponibili, possono comportare significativi vantaggi in termini di miglioramento della conoscenza del comportamento delle strutture sotto esame nonché di riconoscimento precoce e di più precisa identificazione dei fenomeni in atto, sia precedentemente che successivamente ad interventi di manutenzione o consolidamento.

3. Componenti di un sistema di monitoraggio

Un sistema di monitoraggio si compone dei seguenti sottosistemi.

- Una **rete di sensori** installati nella struttura (sulla sua superficie o all'interno dei materiali che la costituiscono), capace di rilevare con la necessaria accuratezza e stabilità di misura nel tempo i valori delle grandezze fisiche significative per la caratterizzazione dei fenomeni in atto. Le principali grandezze fisiche oggetto di rilevamento sono grandezze di tipo ambientale (temperature, umidità, radiazioni ecc.), di tipo cinematico e meccanico (spostamenti, rotazioni, velocità, accelerazioni, deformazioni, pressioni e forze) e di tipo chimico o elettrochimico (PH, concentrazioni, potenziali elettrochimici, ecc.). I sensori possono essere basati su principi fisici e tecnologie molto diversi (es. meccanici, elettrici ed elettronici, ottici, ecc.), possono essere dotati di logiche autonome di preprocessamento dei dati rilevati e possono essere assemblati in piattaforme sensoriali complesse, composte da molteplici sensori e da microprocessori capaci di svolgere autonomamente diverse funzioni, inclusa la comunicazione con altre piattaforme e con unità di processo remote.
- Un sistema **di acquisizione e di trasmissione dei dati** verso le unità di archiviazione e processamento, comprendente le interfacce con le diverse tipologie di sensori, i moduli di interrogazione, di acquisizione e di dispacciamento delle stringhe di dati in formato analogico o digitale provenienti dai sensori, la rete di trasmissione dei dati, cablata o non cablata, e, in sintesi, quant'altro necessario a far pervenire ai processori che gestiscono le unità di archiviazione i dati provenienti dai sensori in formato utilizzabile dalle successive fasi del processo.
- Un insieme di unità di elaborazione con installati **sistemi software di trattamento ed interpretazione dei dati**, capace di eseguire con modalità più o meno interattive e secondo architetture di sistema più o meno distribuite e complesse, le funzioni di:
 - o validazione dei dati, filtraggio, compressione e memorizzazione;
 - o ricerca e selezione delle serie temporali di valori significativi;
 - o estrazione delle caratteristiche comportamentali della struttura, sensibili alle variazioni del suo stato;
 - o caratterizzazione dello stato attuale della struttura, attraverso l'identificazione del danneggiamento o degrado del sistema strutturale e delle relazioni con i parametri d'uso ed ambientali;
 - o valutazione della vita residua e/o supporto alle decisioni operative.

L'insieme dei processi di trattamento ed interpretazione dei dati, che può essere più o meno complesso a seconda dei casi e degli algoritmi utilizzati, implementa la trasformazione dei **dati** in **informazioni** e delle informazioni in **conoscenza**, utile ai fini dell'assunzione di decisioni circa la gestione dei beni oggetto di monitoraggio.

4. Strategie di monitoraggio

A seconda della tipologia della struttura in studio e delle fenomenologie di degrado in atto o attese, differenti strategie di monitoraggio possono essere dispiegate allo scopo di formare i livelli di conoscenza richiesti. Le diverse strategie comportano differenti impegni economici ed organizzativi per l'acquisto, l'installazione e la gestione del sistema di monitoraggio e devono essere quindi selezionate in funzione di una valutazione dei benefici attesi dallo sfruttamento delle conoscenze

acquisite per l'ottimizzazione delle procedure di gestione, in particolare per la pianificazione e la progettazione degli interventi di manutenzione e/o consolidamento strutturale.

Le strategie di monitoraggio si possono classificare come segue, in ordine crescente di impegno economico ed organizzativo per la loro implementazione.

- **Monitoraggio occasionale** (di breve durata): in accordo a questa strategia, qualora siano stati riscontrati livelli di degrado in un sistema strutturale esistente, ai fini di ottimizzare i necessari interventi manutentivi può essere opportuno integrare le indagini conoscitive eseguite con metodi tradizionali con un più approfondito livello di conoscenza, quale quello fornito dall'osservazione dell'evoluzione dei sintomi del degrado e della loro correlazione con le azioni derivanti dall'esercizio o con parametri e fenomenologie ambientali (esempio correlazione tra variazioni dell'ampiezza delle lesioni di un determinato quadro fessurativo con parametri rappresentativi di fenomeni che possono esserne la causa). In questo caso, la sensoristica da installare è mirata al rilevamento delle sole grandezze rappresentative e le altre componenti del sistema sono dimensionate di conseguenza. L'osservazione è inoltre limitata ad un periodo di tempo sufficiente a caratterizzare il fenomeno; trascorso detto periodo il sistema può essere almeno in parte rimosso ed eventualmente può essere reinstallato a seguito dei lavori di consolidamento, allo scopo di verificarne l'efficacia. Periodi tipici di osservazione variano da alcuni giorni o settimane fino ad uno o più anni quando siano coinvolti fenomeni di tipo stagionale.
- **Monitoraggio periodico**: quando si manifesti opportuno tenere sotto controllo fenomenologie di degrado ben definite in apparati strutturali appartenenti a tipologie correnti, il sistema di monitoraggio può essere installato sulla struttura per periodi brevi (alcune ore o giorni), e poi disinstallato, con cadenze predeterminate (alcuni anni), generalmente in accordo a programmi di ispezione e/o successivamente ad eventi potenzialmente pericolosi per l'integrità dell'opera. In base a questa strategia, il sistema strumentale è generalmente costituito da poche tipologie di sensori collocati in punti della struttura opportunamente scelti in modo da ottenere una risposta caratteristica, la cui variazione nel tempo può essere indicativa dell'insorgere o del progredire di un danno. L'elaborazione dei dati derivanti dalle misure è generalmente più complessa del caso precedente. Esempio tipico di questa strategia sono le prove di carico periodiche ed i rilievi periodici della risposta dinamica di una struttura alle vibrazioni ambientali mediante sistemi accelerometrici, seguiti dall'esecuzione di *analisi modali operative* e dal tracciamento dell'evoluzione nel tempo dei parametri dinamici strutturali, quali frequenze proprie, forme modali, coefficienti di smorzamento o quantità da esse derivate quali distribuzioni di energia. Unitamente alla registrazione della risposta in termini di accelerazione è sempre necessario rilevare le variazioni della temperatura nel corso delle misure ed eventualmente altri parametri ambientali o condizioni di esercizio che possono influenzare la risposta dinamica al fine di provvedere alle opportune compensazioni.
- **Monitoraggio continuo o permanente**: si tratta della strategia di monitoraggio più completa e generalmente raccomandata per il controllo in esercizio di sistemi strutturali complessi (ad esempio grandi ponti, strutture di grande luce o realizzate con soluzioni strutturali innovative) o potenzialmente soggetti ad azioni rare, incidentali o eccezionali (ad esempio sismi, urti, tempeste e transitori termici severi) e per i quali sia necessario procedere all'accertamento dell'integrità strutturale entro breve tempo dal verificarsi di un evento potenzialmente dannoso. In accordo a questa strategia, il sistema di monitoraggio viene installato sulla struttura in modo permanente e con lo scopo di rimanere funzionante per l'intera vita operativa dell'opera. L'acquisizione dei dati forniti dai sensori avviene in modo continuo o comunque a frequenze elevate (diverse scansioni

giornaliere) e le anomalie comportamentali vengono rilevate in tempo reale, generando segnali di *attenzione* o *allarme* quando determinati parametri, rappresentativi dello stato del sistema strutturale, superano soglie prestabilite. Valutazioni complete dello stato della struttura, basate sul complesso dei dati misurati, vengono in genere prodotte periodicamente. Le tipologie dei sensori da installare possono essere molto differenziate poiché devono essere rilevate tutte le grandezze significative della risposta e, ove possibile, della sollecitazione, in modo da poter caratterizzare i fenomeni in atto con la necessaria affidabilità. Nel progetto e nella gestione dei sistemi di monitoraggio deve essere tenuta presente la durabilità del sistema sensoriale e la sua manutenibilità, inclusa la possibilità di sostituire i sensori eventualmente danneggiati durante l'esercizio; analogamente, le problematiche della gestione e dell'aggiornamento delle componenti elettroniche e dei sottosistemi software devono essere attentamente considerate. Il dispiegamento di questa strategia, di cui sono raccomandati lo studio già in fase di progetto esecutivo della struttura e l'installazione durante la costruzione, richiede approfondite valutazioni di costi/benefici, considerando sia i costi relativi alla gestione del sistema di monitoraggio, sia i benefici derivanti dalla migliore conoscenza del comportamento della struttura reale e dalla possibilità di individuare precocemente i fenomeni che incidono sulla durabilità dell'opera, ottimizzando le fasi di ispezione e indagine diretta nonché gli interventi di manutenzione.

5. Algoritmi di trattamento dei dati

I dati acquisiti dalla strumentazione, una volta memorizzati e riferiti ad epoche di acquisizione omogenee, devono essere trattati per ottenere serie temporali analizzabili con i modelli interpretativi e con i processi di riconoscimento dello stato del sistema strutturale.

In particolare, gli algoritmi utilizzati in questa fase del processo hanno lo scopo di eliminare i rumori che influenzano la qualità del segnale, eliminare derive e frequenze non significative, riconoscere ed eliminare letture spurie, integrare dati mancanti ed infine separare gli effetti delle componenti ambientali non significative per effettuare le necessarie compensazioni. Allo scopo sono disponibili una notevole quantità di procedimenti, generalmente di tipo statistico, e di filtri numerici che possono convenientemente essere impiegati.

Alcuni di questi algoritmi possono essere implementati direttamente nelle logiche di piattaforme sensoriali complesse, in modo da acquisire segnali pretrattati. In generale, il preprocessamento dei dati misurati è eseguito a valle delle acquisizioni e precedentemente all'impiego dei modelli di interpretazione onde archiviare permanentemente solo le serie temporali corrette.

Altri importanti algoritmi per il trattamento dei dati sono quelli finalizzati alla *compressione* delle serie temporali. Nel caso di monitoraggi di lungo periodo (soprattutto se continui, in cui possono essere coinvolte alcune centinaia di sensori), la mole dei dati diventa rapidamente di dimensioni molto grandi, tali da richiedere soluzioni informatiche particolari per la memorizzazione e la conservazione (*clouds*) e algoritmi specifici per ottimizzare l'occupazione di spazio (spesso dell'ordine dei *terabytes*) e recuperare i dati in modo efficiente e veloce.

6. Modelli di interpretazione e identificazione del danno

Negli ultimi dieci-quindici anni sono stati sviluppati e proposti moltissimi approcci per l'interpretazione dei dati provenienti dal monitoraggio e per il riconoscimento della presenza,

localizzazione ed intensità di un possibile danneggiamento strutturale. Nel campo delle costruzioni meccaniche ed aeronautiche/aerospaziali alcuni di questi approcci sono oggi considerati affidabili ed effettivamente applicati in pratica. Per quanto riguarda i sistemi strutturali civili, dove le fenomenologie di danno si sviluppano molto più lentamente e sono influenzate da fattori che si differenziano molto nei diversi casi, non si è ancora pervenuti a considerare completamente affidabili molti fra gli approcci proposti.

Tuttavia, un numero rilevante di essi è in grado di fornire indicazioni importanti circa la presenza di *anomalie comportamentali* che con probabilità più o meno grandi sono associabili a stati di degrado di una determinata intensità. La persistenza nel tempo e l'amplificarsi di tali anomalie sono peraltro indicativi di malfunzionamenti permanenti del sistema strutturale e l'uso di alcuni modelli di interpretazione è effettivamente capace di fornire indicazioni abbastanza attendibili sulla localizzazione del degrado. L'integrazione del monitoraggio strumentale con indagini e ispezioni mirate consentirà poi di caratterizzare l'anomalia in modo ingegneristicamente completo.

I principali processi di interpretazione dei dati e di identificazione del danno si distinguono in:

- processi basati sull'uso di **modelli fisico-matematici**;
- processi basati sull'uso di **modelli numerici di analisi del segnale**.

I processi che appartengono alla prima categoria operano attraverso il confronto della risposta misurata, o di alcuni parametri sintetici di essa, con i risultati provenienti da modelli fisico-matematici del sistema strutturale, quali i modelli ad elementi finiti. Si osserva tuttavia che i modelli ad elementi finiti utilizzati in fase di progetto della struttura non rispecchiano quasi mai in modo esatto il comportamento della struttura reale. E' pertanto necessario che le caratteristiche della risposta della struttura reale siano rilevate per un periodo sufficientemente lungo, in cui la struttura possa considerarsi integra, e che quindi i modelli ad elementi finiti di riferimento siano *tarati* per fornire risultati il più possibile prossimi a quelli della struttura reale. Sono disponibili diversi metodi, alcuni più intuitivi altri più complessi matematicamente, per effettuare tale operazione di taratura. In sintesi i metodi di taratura del modello ad elementi finiti consistono nel minimizzare una qualche misura della differenza tra risultati del modello e valori misurati. Ad esempio, selezionando opportunamente un numero ragionevole di parametri del modello, si possono impostare dei processi basati sull'algoritmo dei minimi quadrati. Altri processi sono basati sulla minimizzazione della differenza con algoritmi di tipo genetico.

Una volta definito il modello teorico di riferimento (da alcuni definito *gemello numerico* della struttura reale), differenze che successivamente si manifestino tra risposta della struttura reale e modello, in misura eccedente le dispersioni statistiche riscontrate nella fase di taratura, possono essere interpretate come anomalie. Analisi eseguite sul modello numerico di riferimento con diverse ipotesi di danneggiamento possono quindi fornire valide indicazioni sullo stato effettivo della struttura e quindi guidare in modo efficiente le successive indagini e la progettazione degli eventuali interventi di consolidamento.

I processi appartenenti alla seconda categoria operano sulle serie temporali dei dati utilizzando modelli numerici, tendenzialmente privi di significato fisico, tratti dalla più generale categoria degli algoritmi di processo dei segnali ed utilizzati in vari campi delle scienze applicate e della tecnologia. I modelli numerici in questione possono ulteriormente suddividersi come segue.

- **Modelli predittivi** : i modelli predittivi utilizzano le serie temporali delle misure acquisite in una fase della vita della struttura in cui lo stato può ritenersi invariato (struttura integra o danneggiamento stabile) per costruire numericamente, per ciascuna delle serie temporali,

delle previsioni della risposta attesa nelle fasi successive e delle associate bande di confidenza. Qualora uno o più parametri della risposta successivamente si manifestino stabilmente al di fuori delle bande di confidenza, può essere riconosciuta un'anomalia comportamentale. In tal caso analisi di correlazione tra i parametri della risposta, note le posizioni dei sensori, possono fornire indicazioni utili per la localizzazione e la quantificazione del danno. Sono disponibili molti algoritmi per la costruzione dei modelli numerici predittivi, dai modelli di regressione e autoregressione ai modelli di correlazione ed infine ai modelli basati sull'uso delle reti neurali.

- **Modelli di decomposizione del segnale:** questi modelli utilizzano varie forme di decomposizione del segnale e caratterizzano il sistema strutturale attraverso coefficienti di combinazione e funzioni componenti elementari. Anche in questo caso, la decomposizione effettuata per serie temporali acquisite in uno stato invariato del sistema strutturale costituisce il modello di riferimento e successive variazioni dei coefficienti di combinazione e delle componenti elementari costituiscono delle anomalie e forniscono indicazioni sull'insorgenza, sulla localizzazione e in taluni casi sull'intensità del danneggiamento. Oltre a modelli statistici di regressione e correlazione, appartengono a questa classe processi basati sull'analisi di Fourier, sull'uso delle cosiddette *ondine (wavelets)* e quelli basati sulla decomposizione in *componenti principali* (ad esempio la *decomposizione ortogonale propria*). Si osserva che, per misure della risposta dinamica, i metodi *dell'analisi modale operativa* appartengono in linea di principio a questa classe, con la differenza che le forme proprie e le frequenze proprie in cui viene decomposta la risposta della struttura hanno un significato fisico-meccanico mentre gli altri algoritmi di decomposizione non possiedono necessariamente analogo significato.

Tutti i modelli si distinguono altresì per le seguenti proprietà:

- lunghezza del periodo di tempo necessario per definire un modello stabile di riferimento;
- lunghezza minima del tempo di osservazione affinché un danno di una determinata intensità possa produrre anomalie nei parametri del modello;
- intensità minima del danno rilevabile;
- affidabilità dell'informazione fornita.

A proposito di quest'ultima proprietà, in analogia con i metodi di indagine non distruttivi, l'affidabilità dei processi di identificazione del danno può essere valutata in termini combinati di *probabilità di rilevamento* del danno, cioè della probabilità di rilevare un danno di determinata intensità effettivamente presente nella struttura, e della *probabilità di falso allarme*, cioè della probabilità di segnalare la presenza del danno quando la struttura è in realtà integra. Queste probabilità sono funzione del livello di danno e dell'intensità dei disturbi nei segnali. Tuttavia, l'esperienza applicativa non è ancora sufficiente a caratterizzare compiutamente con detti parametri i diversi approcci.

7. Modelli di degrado

Il degrado di un sistema strutturale è il prodotto di fenomeni complessi ed inoltre le diverse componenti strutturali tendono a degradarsi in modo differenziato. Conseguentemente, la rappresentazione del degrado attraverso modelli matematici rigorosi è tutt'altro che semplice.

Recentemente sono stati proposti vari modelli che utilizzano un solo parametro sintetico che rappresenta l'efficienza del sistema strutturale in funzione del tempo. Alcuni di questi modelli utilizzano il classico coefficiente di affidabilità β , mentre altri utilizzano un *indice di efficienza*

globale, dedotto da combinazioni euristiche di misure dell'efficienza delle componenti più critiche, a loro volta funzione del loro stato. Ad esempio, l'indice di efficienza globale è tipicamente definito in modo compatibile con i sistemi di valutazione impiegati in diversi Paesi per la gestione dei ponti (ad esempio: le classificazioni standard AASHTO, DIN, quelle in uso in Italia presso le concessionarie autostradali ed alcune amministrazioni pubbliche e quella proposte dalla 4 EMME [5]) e che possono essere estesi ad altre tipologie strutturali.

L'effetto del degrado è quindi rappresentato da funzioni decrescenti nel tempo con leggi esponenziali, definite *curve del ciclo di vita* o *curve di decadimento*, il cui andamento tipico è rappresentato nella figura seguente.

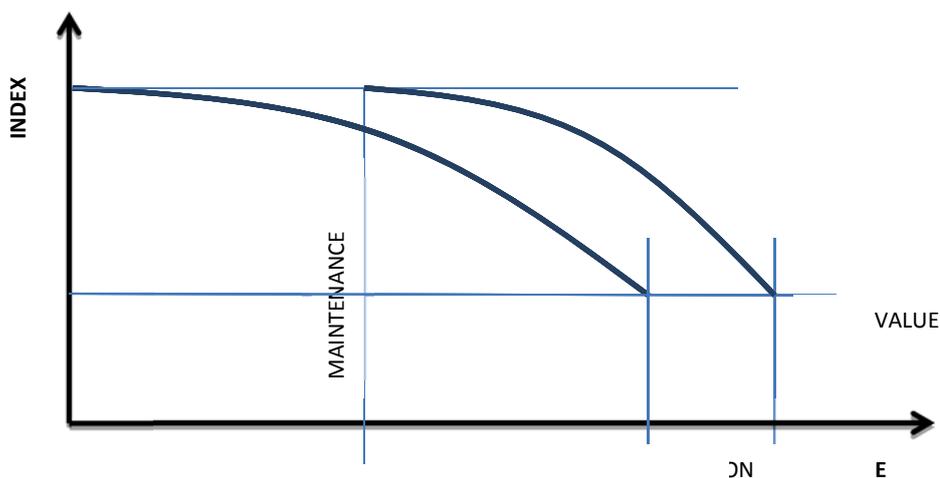


Figura 1 – Andamento tipico di una curva del ciclo di vita e effetto della manutenzione

Quando l'indice raggiunge il suo valore limite, la vita operativa della struttura si considera conclusa. In linea di principio, si può ritenere che detto limite sia raggiunto al termine della vita di progetto. Tuttavia, se durante la vita della struttura vengono messi in atto interventi di manutenzione (consolidamento) capaci di ristabilire il valore iniziale dell'indice, la vita operativa può essere estesa. Teoricamente, ripetendo gli interventi di manutenzione, la vita operativa di una struttura potrebbe essere estesa all'infinito ma occorre considerare che gli interventi di manutenzione hanno un costo (funzione ovviamente del grado di recupero dell'indice di efficienza rispetto al valore di progetto) e quindi, con opportune analisi di costo/beneficio, si possono definire strategie ottimali di gestione che altresì prevedano la sostituzione o la completa riabilitazione della struttura quando, per effetto dell'obsolescenza funzionale, il cumulo dei benefici attesi risulti inferiore ai costi cumulati. Naturalmente, la previsione della curva di degrado è affetta da incertezze che possono essere rappresentate con formulazioni di tipo probabilistico.

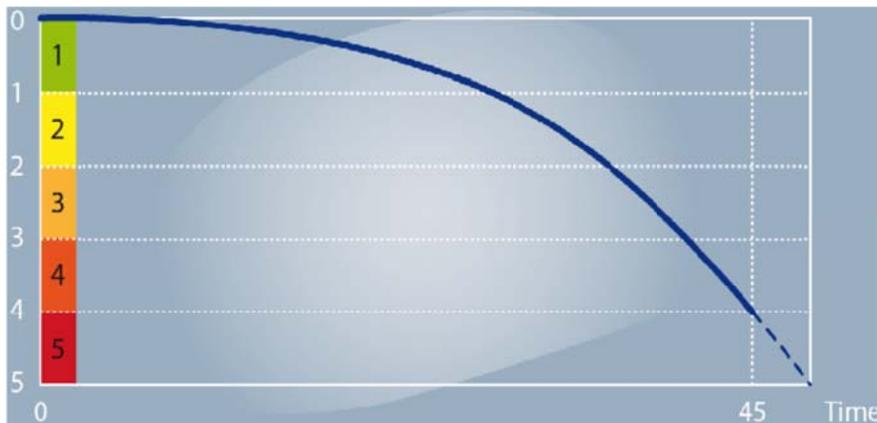


Figura 2 – Curva media standard e classificazione DIN 1076 (ponti)

Tale approccio è stato recentemente formulato in un documento tecnico CEN [6] utilizzando espressioni semplificate della curva e delle relative bande di confidenza ottenute sulla base di estesi dati statistici riguardanti in prevalenza i ponti. Il metodo è stato già adottato come standard in diversi Paesi europei ed incluso nel più recente progetto di norma europea relativo alle ispezioni basate su valutazioni del rischio. La figura 2 mostra il raffronto fra la curva di degrado standard e la classificazione DIN 1076 [7] per i ponti (prime 5 classi, la sesta riguarda strutture da escludere dall'esercizio), con i relativi codici di colore.

8. Ruolo del monitoraggio strutturale

L'adozione di curve del ciclo di vita definite a priori non è tuttavia sufficiente ad impostare una strategia di gestione ottimale in quanto l'effettivo manifestarsi del degrado strutturale può essere diverso, maggiore o minore, rispetto a quanto descritto dalla curva. Si consideri ad esempio che la vita di progetto tipica di una costruzione civile è di 50 anni per gli edifici e anche di 100 anni per alcune infrastrutture quindi, a meno che non si possa disporre di un attendibile supporto di dati statistici, a tale distanza di tempo le incertezze che gravano sulla previsione del degrado diventano largamente preponderanti sui valori attesi.

L'accertamento delle reali condizioni di una struttura e la determinazione dell'indice di efficienza attuale attraverso il monitoraggio strutturale consente però di aggiornare con continuità, ovvero ad intervalli regolari, la curva di decadimento riducendo considerevolmente le incertezze della stima. Il processo completo è schematicamente rappresentato nella figura 3 [8].

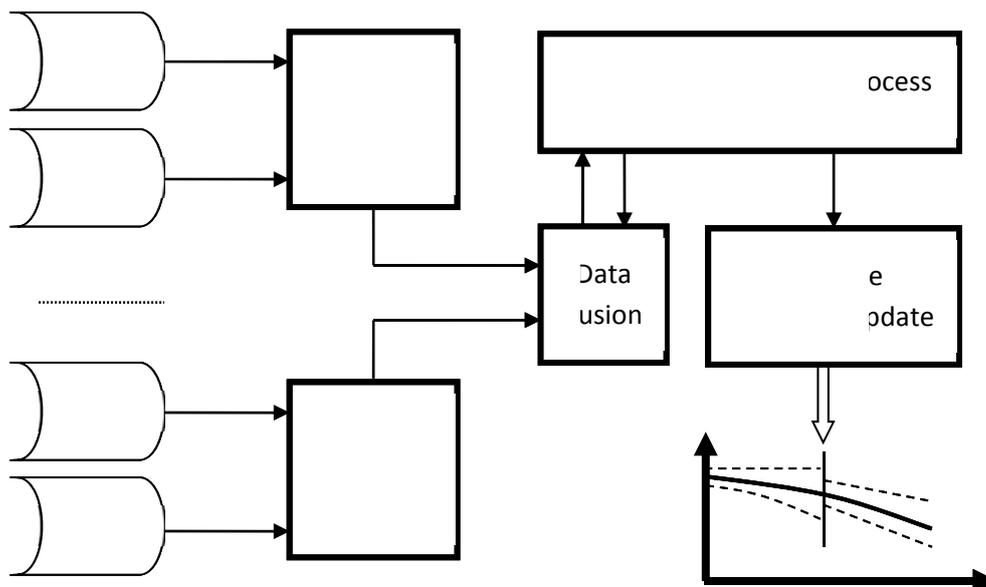


Figura 3 – Schema del processo di aggiornamento delle curve di decadimento mediante il monitoraggio strutturale

L'aggiornamento della curva può essere eseguito con varie tecniche probabilistiche, ad esempio mediante applicazione della regola di Bayes, tenendo altresì conto delle incertezze associate con il processo di identificazione dello stato.

Una volta determinato lo stato attuale del sistema strutturale in termini di indice di efficienza, l'espressione aggiornata della curva può essere utilizzata per la determinazione della *vita residua*, così fornendo un modello prognostico semplice ed efficace, ancorché approssimato. La considerazione della vita residua ha un significato pratico ed intuitivo e consente di mettere facilmente a confronto diverse alternative per la strategia di manutenzione, inclusa l'opzione di non procedere a nessun intervento o di procrastinare gli interventi di manutenzione mantenendo tuttavia il controllo dell'efficienza attraverso il sistema di monitoraggio.

9. Attività di standardizzazione in Italia

Riconoscendo l'importanza del monitoraggio strutturale sia per il miglioramento della conoscenza sul comportamento reale delle costruzioni che per l'accertamento delle condizioni di sicurezza in esercizio e per l'ottimizzazione delle strategie di manutenzione nella gestione del costruito, il Comitato Ingegneria Strutturale dell'UNI ha attivato nel 2013 un gruppo di lavoro denominato GL06 allo scopo di redigere un Documento Tecnico comprendente linee guida per la progettazione, l'installazione, la manutenzione, la gestione e l'impiego di sistemi di monitoraggio strutturale.

Esistono già documenti simili [9] emessi da varie associazioni o istituzioni tecnico-scientifiche in Europa, USA, Corea e Cina e, come norma tecnica ufficiale (GOST), nel caso della Russia, ma l'intenzione del Comitato è stata quella di predisporre un documento più adatto ad essere utilizzato in un contesto in cui la cultura relativa al monitoraggio strutturale è oggettivamente meno diffusa.

Il Gruppo di Lavoro, formato da rappresentanti di varie organizzazioni è così composto:

- Aldo Castoldi, membro di collegamento, UNI U20 Acustica e Vibrazioni
- Francesca Da Porto, Università di Padova DICEA
- Andrea Del Grosso, D'Appolonia S.p.A., coordinatore
- Alessandro De Stefano, Ass. Italiana Software Tecnico
- Clara Miramonti, UNI
- Claudio Modena, Consiglio Superiore LL PP
- Alessandra Ronchetti, ASSOBTETON
- Alberto Vintani, UNICMI
- Daniele Zonta, Università di Trento DICA

e sta per terminare le proprie attività. Il documento, una volta discusso ed approvato dal Comitato e dall'UNI, sarà reso pubblico.

Nella redazione del documento è stata data notevole importanza al processo completo del monitoraggio strutturale, trattando gli aspetti salienti e critici delle diverse fasi, articolate secondo lo schema rappresentato nella figura 4 [10].

Non vi sono invece normative generali o linee guida ufficiali di ambito strutturale per la gestione del patrimonio costruito, ma sono comunque applicabili le norme UNI ed ISO [11] relative alla gestione dei patrimoni (*Asset Management*), di cui fa parte la citata revisione effettuata dal CEN dell'esistente standard per la pianificazione e la gestione delle ispezioni tecniche basate sul rischio [12]. Dette normative sono concepite in ambito industriale (estesamente applicate ad esempio nell'industria petrolifera e in generale nell'industria chimica ed in quella per la produzione di energia) ma sono sicuramente mutuabili per l'applicazione alle costruzioni facenti parte di patrimoni infrastrutturali.

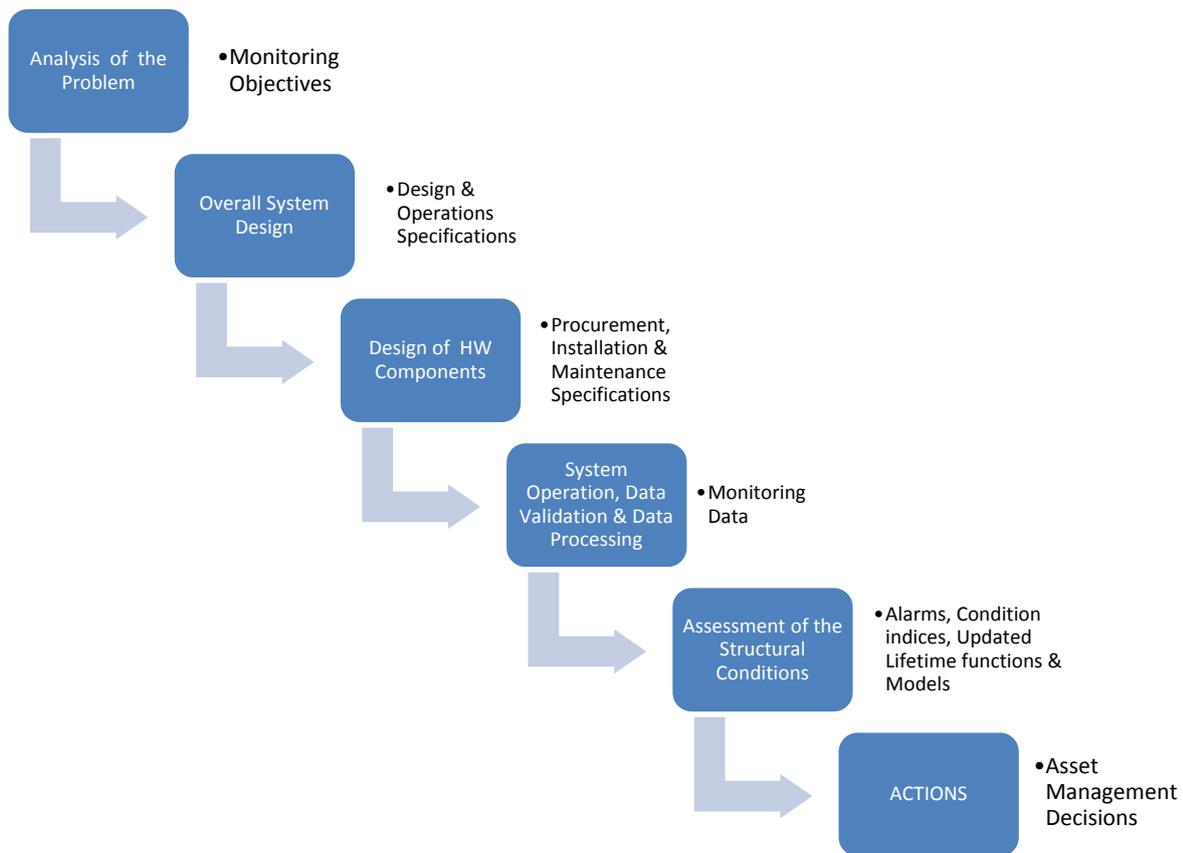


Figura 4 – Schema logico del processo di monitoraggio e risultati delle diverse fasi

10. Conclusioni

Le metodologie del monitoraggio strutturale, quando necessario integrate da indagini specifiche eseguite con ispezioni visive e prove in situ, sono potenzialmente in grado di fornire importanti e dettagliate informazioni sullo stato di un sistema strutturale, consentendo la diagnosi e la caratterizzazione precoce dei fenomeni di degrado e contribuendo in modo significativo al dispiegamento di metodologie di gestione del costruito sempre più efficienti ed economicamente sostenibili. La sostenibilità economica della conservazione in esercizio o della sostituzione delle infrastrutture di ogni tipo oggi esistenti rappresenta nei Paesi di antica infrastrutturazione un problema di emergenza assoluta ma, nei Paesi di più recente sviluppo, primi fra tutti i Paesi

dell'Estremo Oriente, si riscontra altresì una forte sensibilità nei confronti delle sfide alle loro economie che per il medesimo problema si presenteranno in futuro, al punto che presso di essi la cultura e la diffusione della pratica del monitoraggio strutturale è assai più largamente diffusa che altrove.

Nella presente relazione sono state brevemente esposte le caratteristiche principali dei processi di monitoraggio strutturale ed è stato descritto il loro ruolo potenziale nell'ambito delle metodologie di gestione del patrimonio costruito.

A conclusione della memoria, si osserva che l'installazione di sistemi permanenti di monitoraggio strutturale dovrebbe essere attentamente considerata già nelle fasi di progettazione di un'opera di nuova costruzione o nella pianificazione preliminare degli interventi di consolidamento di una struttura esistente. Per gli edifici o le infrastrutture di nuova costruzione si deve osservare che nei casi di maggiore rilevanza è comunque prevista l'installazione di sistemi di gestione della sicurezza e/o dei consumi energetici (*Building Management Systems, Infrastructure Management Systems*) che comprendono sensoristiche dedicate e apparecchiature elettroniche di acquisizione/controllo sostanzialmente compatibili con quelle necessarie per l'implementazione di processi di monitoraggio della componente strutturale dell'edificio. L'impiego delle tecnologie di monitoraggio strutturale integrate con i sistemi automatici di gestione, già previsti, non rappresenta pertanto un'innovazione tecnologica di significativo impatto economico, soprattutto a fronte dei benefici che ne possono derivare.

Riferimenti

1. Schmitt, G., M. Schütze, G.F. Hays, W. Burns, E-H. Han, A. Pourbaix, and G. Jacobson. 2009. Global Needs for Knowledge Dissemination, Research, and Development in Materials Deterioration and Corrosion Control, *White Paper*, The World Corrosion Organization.
2. European Commission. 2011. *White Paper, Roadmap to a Single European Transport Area – Towards a Competitive and Resource Efficient Transport System*.
3. European Construction Technology Platform. 2005. *Networking Europe: Vision 2030 and Strategic Research Agenda*.
4. Wenzel H., 2009. *Health Monitoring of Bridges*, John Wiley & Sons, USA.
5. 4 EMME, 2011, *Manuale per la valutazione dello stato dei ponti*, Edizione CIAS, Bolzano,
6. CEN/WS063 – CWA 16663:2013. *Ageing behaviour of Structural Components with regard to Integrated Lifetime Assessment and subsequent Asset Management of Constructed Facilities*.
7. DIN 1076, 1999, Highway Structures – Testing and Inspection
8. Del Grosso A. E., 2013, The role of SHM in infrastructure management, *Structural Health Monitoring 2013 – A Roadmap to Intelligent Structures*, F-K. Chang Ed., DESTech Publications, Lancaster, pp. 2554-2561.
9. Del Grosso A. E., 2014, Structural Health Monitoring Standards, *Procc 37th IABSE Symposium: Engineering for Progress, Nature and People, Madrid, 3-5 September 2014*, IABSE, Zurich, pp. 804,805 (8p su CD-Rom).
10. Del Grosso A. E., 2015, Activities of the Italian UNI-WG6 on Standardization in SHM, *Structural Health Monitoring 2015*, F-K. Chang Ed., DESTech Publications, Lancaster, pp. 1583-1590.
11. ISO 55000:2014, *Asset Management – Overview, Principles and Terminology*.
12. CEN DS/CWA 15740:2008, *Risk-Based Inspection and Maintenance Procedures for European Industry (RIMAP)*.