

**Giornata CIAS**  
**RIABILITAZIONE DEL COSTRUITO E ADEGUAMENTO SISMICO**  
**Genova, 22 Ottobre 2010**

**IL MONITORAGGIO STRUTTURALE NELLA GESTIONE DEL CICLO DI VITA  
DELLE OPERE CIVILI: RICERCHE ED ESPERIENZE**

**Prof. Ing. Andrea Del Grosso**

**1. INTRODUZIONE**

Mutuando concetti e procedure dal contesto dell'ingegneria industriale, da alcuni anni si stanno sviluppando nel panorama internazionale della ricerca nell'ingegneria strutturale studi ed esperienze applicative intese a formalizzare le modalità di concezione, realizzazione e gestione delle infrastrutture e delle opere civili in genere, sulla base del concetto di ciclo di vita (*life-cycle, LC*).

In breve, per rappresentare il ciclo di vita di un'opera civile viene considerata l'evoluzione nel tempo di uno o più indicatori del suo stato di efficienza, dalla messa in servizio fino al raggiungimento di uno stato limite ultimo accettabile, al di sotto del quale l'opera stessa deve essere teoricamente posta fuori esercizio, sostituita, oppure assoggettata ad un intervento di completa rifunzionalizzazione. Detta evoluzione, che sottintende l'insopprimibile esistenza di fenomeni di degrado ed obsolescenza, è tipicamente rappresentata dalla curva di Figura 1.

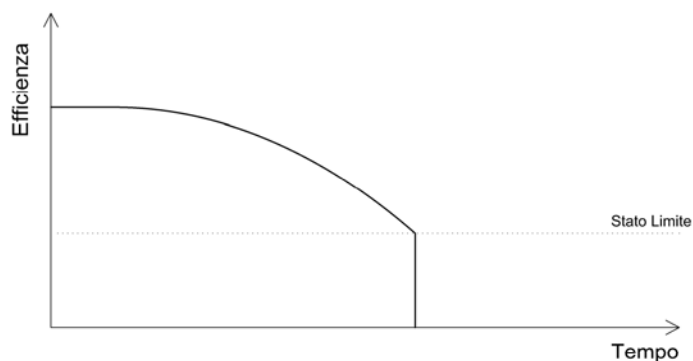


Figura 1 – Curva del ciclo di vita

L'esplicita considerazione dei fenomeni di degrado ed obsolescenza attraverso la determinazione della curva del ciclo di vita apre la strada alla definizione di approcci metodologici scientificamente fondati all'ottimizzazione dei processi di gestione delle opere civili (*infrastructure management, building management, etc.*) capaci di rendere minimo il costo esteso all'intero ciclo di vita dell'opera (*life cycle cost, LCC*) in relazione alla sua prevista vita operativa.

Occorre infatti osservare che la curva del ciclo di vita può essere modificata sia in senso positivo

che in senso negativo da eventi che intervengano nel corso della vita stessa. Ad esempio (Figura 2 a,b), interventi di manutenzione hanno il risultato di innalzare il livello di efficienza (eventualmente ripristinando il valore originario) e quindi di estendere la vita attesa ma il verificarsi di situazioni accidentali (urti, esplosioni, fenomeni naturali estremi, etc.) ovvero la modifica delle condizioni di uso (azioni, norme e regolamenti, etc.) possono viceversa condurre ad un abbassamento del livello di efficienza e quindi ad una riduzione della vita attesa.

La conoscenza della curva del ciclo di vita e degli effetti potenzialmente indotti da attività di manutenzione e da fattori esterni è quindi un aspetto essenziale del processo di ottimizzazione della gestione delle opere e delle infrastrutture civili.

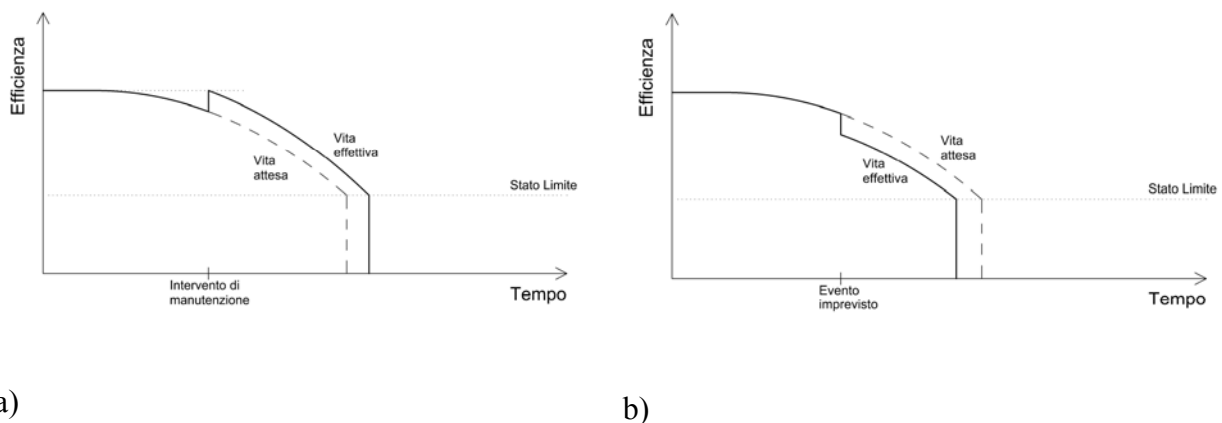


Figura 2 – Effetti delle manutenzioni (a) e di eventi accidentali (b) sulla curva del ciclo di vita

Lo sviluppo degli studi correlati a detto contesto trae origine da una duplice serie di motivi. In primo luogo esso discende dalla considerazione che nei Paesi di sviluppo economico meno recente (Europa, USA, Giappone) l'*asset* infrastrutturale ed in generale l'estensione del costruito sono assai ingenti ed oggetto di estesi fenomeni di invecchiamento ed obsolescenza. I costi di manutenzione e adeguamento del costruito sono stati valutati da alcuni studiosi dell'ordine del 10% del PIL nei Paesi di antica industrializzazione (la quota media di PIL attribuibile all'industria delle costruzioni nel suo complesso è ad esempio circa pari al 15% del PIL nell'Europa a 15, contro il 25 % circa della Cina) ma, a fronte di tale significativa spesa, il livello medio di efficienza delle infrastrutture e di sicurezza del costruito è considerato in generale inadeguato a sostenere un'ulteriore fase di sviluppo economico ed a garantire un miglioramento della qualità della vita; di qui la necessità da un lato di aumentare gli investimenti nel settore della gestione del costruito e dello sviluppo e adeguamento delle infrastrutture e, dall'altro, di garantire l'ottimalità di detti investimenti. Per i Paesi di più recente infrastrutturazione o per i quali la realizzazione di infrastrutture è ancora marcatamente in atto (es. Cina), si registra una crescente attenzione verso il manifestarsi di situazioni analoghe in prospettiva, ma anche in relazione all'assai modesto livello di efficienza e di sicurezza in termini attuali delle infrastrutture ed in generale del costruito di epoca precedente al loro sviluppo economico e culturale.

In secondo luogo, gli studi in questione traggono altresì origine dalla tendenza evolutiva delle normative tecniche, da uno standard eminentemente prescrittivo ad uno sempre più orientato ad un approccio di tipo prestazionale. In base a quest'ultimo, infatti, il mantenimento dei prescritti

livelli prestazionali nel corso della vita operativa necessita di una esplicita formalizzazione in grado di ridefinire adeguate ipotesi di base per il progetto, anche in funzione delle modalità di gestione e delle soluzioni che vengono adottate per garantire la durabilità delle opere..

A seguito di tali considerazioni, negli ultimi dieci anni si sono riscontrati a livello internazionale significativi investimenti nella ricerca e nella sperimentazione riguardante il tema, con il coinvolgimento di organismi pubblici, proprietari e gestori pubblici e privati, accademie ed organizzazioni professionali. Ad esempio, il *Department of Transportation* degli Stati Uniti ha recentemente finanziato un piano di ricerca ventennale inteso a caratterizzare il comportamento a lungo termine dei ponti stradali (*Long Term Bridge Performance Project*). Iniziative si riscontrano anche in Europa da parte di diversi organismi locali, nazionali e comunitari anche se sono mancati fino a questo momento progetti analoghi per importanza dei finanziamenti ed estensione temporale.

## 2. DEFINIZIONE DELLE CURVE LC

La definizione delle curve del ciclo di vita per un'opera di ingegneria civile deriva dall'applicazione di modelli capaci di simulare in modo semplice il comportamento di sistemi complessi e dalla disponibilità di basi dati concernenti i fenomeni evolutivi interessanti i singoli elementi che contribuiscono alla costruzione di una idonea misura dell'efficienza dell'opera.

Sono ad esempio fra questi elementi:

- Il degrado per invecchiamento, usura e corrosione delle caratteristiche chimico-fisiche dei materiali e dei componenti elementari;
- L'evoluzione delle azioni derivanti dall'uso (ad esempio le previsioni di incremento di traffico);
- L'evoluzione di fenomeni naturali o della loro conoscenza;
- L'evoluzione delle leggi e delle normative riguardanti le costruzioni ed il loro uso;
- L'evoluzione del contesto economico e sociale e dei criteri di valutazione degli impatti energetico ed ambientale.

Alcuni di essi sono rappresentabili in termini di modelli matematici, altri invece sono solo frutto di stime parzialmente soggettive. In entrambi i casi, la determinazione delle curve è comunque affetta da incertezze, sia di natura aleatoria che di natura epistemica, talchè la curva LC di riferimento potrà essere ottenuta mediante rappresentazioni di tipo probabilistico. Al medesimo tempo, anche il valore corrispondente allo stato limite di riferimento per la fine della vita operativa sarà affetto da incertezza, così determinando una rappresentazione del problema quale quella indicata in Figura 3.

Complessivamente, il quadro risultante appare profondamente influenzato dalle incertezze e l'approccio di scarsa utilità pratica, a meno che non siano disponibili sufficienti basi statistiche concernenti la vita e il degrado di funzionalità delle diverse componenti e non si restringa il concetto di efficienza a misure quantitative. Va peraltro osservato che tali basi statistiche esistono in taluni casi, ad esempio con riferimento alla gestione dei grandi stock infrastrutturali e dei grandi patrimoni immobiliari, mentre per molti altri casi sono disponibili valutazioni approssimate, che peraltro possono essere utili nella definizione di curve LC i cui valori siano caratterizzati da distribuzioni soggettive di probabilità.

E' comunque interessante osservare che sussiste uno stretto rapporto tra la stima probabilistica della vita attesa definita dalle curve LC e la vita di progetto assunta a base del calcolo delle

azioni secondo le correnti procedure di progettazione.

Fra le modalità proposte in letteratura per la formulazione di curve LC valide per il solo aspetto strutturale (cioè limitandosi a considerare la sicurezza strutturale come parametro di efficienza) si citano ad esempio la rappresentazione in termini di indice di affidabilità (funzione della probabilità di sopravvivenza) o di parametri inversamente legati ad una misura del rischio, quale la vulnerabilità. Questa ultima scelta appare particolarmente indicata per interpretare l'efficienza strutturale con riferimento ad edifici soggetti ad azioni sismiche.

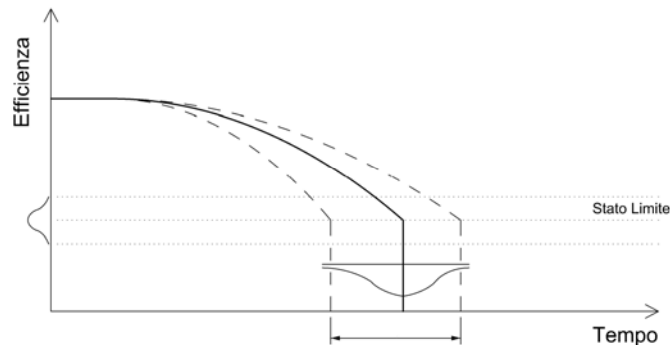


Figura 3. Rappresentazione delle incertezze nelle curve LC

### 3. VALUTAZIONI PERIODICHE DELLO STATO DI EFFICIENZA

La questione delle incertezze insite nella definizione delle curve LC può essere ricondotta a termini compatibili con la loro utilizzazione pratica attraverso l'adozione di programmi di valutazione periodica dell'efficienza delle opere. Molti dei fenomeni fisici all'origine del degrado dei componenti di una costruzione sono infatti noti solo in termini generali e la loro conoscenza conduce a stime dei loro effetti potenziali. Nella realtà, a causa di fattori intrinseci dei materiali come posti in opera, delle condizioni ambientali e di eventi inattesi il degrado effettivo può manifestarsi in modo assai diverso da quanto previsto dai modelli matematici disponibili e dalla conoscenza statistica del comportamento nel tempo dei componenti stessi. La valutazione periodica dello stato di efficienza costituisce pertanto un aspetto essenziale della gestione delle opere di ingegneria civile secondo l'approccio descritto. Il grafico di Figura 4 illustra come l'effetto di tali valutazioni, per quanto esse stesse affette da incertezza, possa contribuire in modo significativo a ridurre l'incertezza della stima della vita residua e quindi possa consentire la costruzione di processi decisionali attendibili relativamente alla pianificazione ottimale degli interventi di manutenzione e di riabilitazione dell'opera ovvero alla sua dismissione.

Gli strumenti disponibili per la valutazione periodica in esercizio dello stato di efficienza di una costruzione sono molteplici ed in parte riconducibili a prassi relativamente tradizionali come le ispezioni visive, l'impiego di metodi di indagine non distruttivi o moderatamente distruttivi, l'esecuzione di prove di carico statiche e dinamiche, ma anche comprendono l'impiego di metodi e sistemi innovativi a proposito dei quali negli ultimi anni sono stati compiuti notevoli progressi sia in termini di sviluppi tecnologici che di metodiche di analisi ed interpretazione dei dati.

In particolare, una consistente attività di ricerca e sviluppo è stata dedicata all'implementazione di sistemi cosiddetti di monitoraggio dell'integrità strutturale (Structural Health Monitoring), basati sull'applicazione permanente di sensori alla struttura o sull'integrazione di sensori nei

materiali e nelle componenti della struttura stessa.

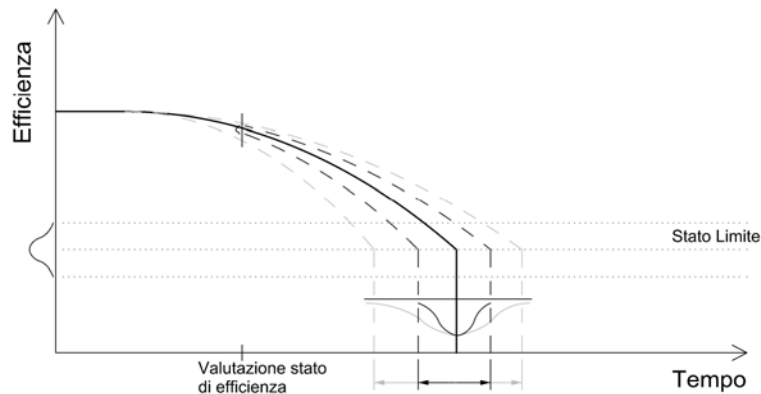


Figura 4 – Effetti della valutazione in esercizio dello stato di efficienza

#### 4. SISTEMI DI MONITORAGGIO STRUTTURALE

Un sistema di monitoraggio strutturale si compone dei seguenti sottosistemi:

- un insieme di sensori capaci di rilevare con continuità le caratteristiche della risposta strutturale, delle condizioni ambientali, dei carichi agenti e dei parametri relativi ai processi di degrado,
- un sistema di acquisizione e di memorizzazione dei dati,
- un sistema di processamento dei dati e di gestione di soglie di allarme,
- una procedura di identificazione delle anomalie e di quantificazione dei fenomeni di degrado,
- una procedura per la valutazione della vita residua,
- un sistema di supporto alla decisione per la gestione ottimale degli interventi.

In tale contesto l'approccio basato sull'impiego delle curve di ciclo di vita rappresenta il momento di sintesi delle informazioni dedotte dai dati e la loro trasformazione in conoscenza relativa all'effettiva condizione di efficienza della struttura nonché il fondamento scientifico per l'analisi dei processi decisionali conseguenti. Una struttura dotata di un sistema di monitoraggio come descritto è spesso considerata l'analogo di un sistema biologico composto da elementi sensibili, fasci nervosi capaci di trasmettere le informazioni al cervello che le elabora ed assume automaticamente decisioni che si traducono in reazioni capaci di contrastare situazioni indesiderate o di moderarne gli effetti.

Allo stato attuale, lo sviluppo dei sistemi di monitoraggio ha tuttavia raggiunto livelli assai diversi per quanto riguarda i singoli sottosistemi.

La tecnologia dei sensori è ad oggi sufficientemente sviluppata per offrire soluzioni economiche, affidabili e di durata che può essere considerata paragonabile a quella della vita della struttura cui i sensori stessi sono applicati. Sensori a fibra ottica, sostanzialmente insensibili a fenomeni elettromagnetici, sensori basati su tecnologie MEM con comunicazioni sia wired che wireless, sensori mobili e remoti sono disponibili sul mercato per il rilevamento di spostamenti,

deformazioni, accelerazioni, temperature, concentrazioni di agenti chimici, eccetera. La ricerca e lo sviluppo di sensori di nuovo tipo è costantemente attiva e importanti novità sono di prossima introduzione, soprattutto nel campo dell'integrazione di sensori nei materiali e nei componenti e nello sviluppo di nanotecnologie per la produzione di materiali strutturali capaci di svolgere funzioni sensoriali unitamente alla resistenza meccanica.

L'affidabilità e la durata dei moderni sistemi di acquisizione e memorizzazione dei dati sono altresì assai elevate ma tuttavia sussistono problemi relativamente alla diversa vita operativa delle componenti elettroniche rispetto alle strutture civili.

Sono invece ancora in fase di sviluppo e sperimentazione le procedure intese a identificare e quantificare le fenomenologie del degrado dalle serie temporali dei dati. Esse principalmente si basano sulla caratterizzazione della risposta statica o dinamica della struttura in condizioni che possano essere considerate di riferimento (struttura integra) e nel rilevamento ed interpretazione di eventuali anomalie nella risposta che insorgano successivamente, nel corso della vita della struttura. L'interpretazione è generalmente basata sull'uso di modelli numerici tarati sulla risposta strutturale in condizioni di riferimento (cosiddetti "gemelli numerici" – numerical twins) cui possono essere applicate le condizioni esterne rilevate in corrispondenza di risposte anomale.

Tecniche basate sull'impiego di tecniche di identificazione statistica, cioè senza fare ricorso a modelli numerici sono altresì allo studio.

Si tratta di contesti altamente interdisciplinari e le tecniche impiegate sono in parte derivate da applicazioni sviluppate in campi differenti da quelli dell'ingegneria civile, come l'ingegneria aeronautica ed aerospaziale e l'ingegneria meccanica.

## 5. APPLICAZIONI E FUTURI SVILUPPI

L'applicazione di sistemi di monitoraggio strutturale e di procedure conseguenti di interpretazione e di supporto alla decisione è stata recentemente sviluppata soprattutto per strutture speciali (grandi ponti, dighe, edifici alti, grandi edifici, eccetera) ma applicazioni sperimentali sono altresì state realizzate per strutture di caratteristiche ordinarie in zona sismica.

Alcune di queste applicazioni sono operative da diversi anni e sono attualmente in corso interessanti valutazioni in merito alla loro efficacia.

Il risultato delle sperimentazioni fino ad ora condotte ha confermato la validità dell'approccio soprattutto con riferimento al miglioramento della conoscenza del comportamento delle strutture in esercizio ed alla integrazione delle informazioni fornite con i risultati di metodi tradizionali di indagine e caratterizzazione delle strutture.

In particolare, ai fini di una gestione economicamente ottimale delle opere di ingegneria civile, l'impiego di sistemi di monitoraggio strutturale è ritenuto vantaggioso in quanto consente di ridurre la frequenza delle ispezioni visive e fornisce un'utile base per indirizzare indagini localizzate. Sistemi di monitoraggio della risposta strutturale si sono dimostrati di notevole utilità in interventi di riabilitazione, rendendo possibile la caratterizzazione della struttura prima e dopo gli interventi.

La comunità scientifica e tecnica internazionale sta da tempo operando per raccogliere e confrontare le esperienze di applicazione dei sistemi di monitoraggio dell'integrità strutturale ed il loro impiego nella valutazione delle curve che rappresentano il ciclo di vita delle opere stesse. Più recentemente, l'approccio basato sul ciclo di vita è stato considerato come un utile strumento per la pianificazione ottimale per la gestione delle opere in esercizio e sono in fase di avviamento iniziative intese a confrontare ed uniformare a livello internazionale le procedure impiegate.