



*Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti*  
*Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici*

# **Linee Guida per la Classificazione e Gestione del Rischio, la Valutazione della Sicurezza e il Monitoraggio dei Ponti esistenti**

## **PARTE III** **SISTEMA DI SORVEGLIANZA E MONITORAGGIO** **ASPETTI OPERATIVI E DI DETTAGLIO**

(Prof. Ing. Andrea Del Grosso)

# ARGOMENTI

- Identificazione degli elementi costruttivi e ausiliari
- Ispezioni ordinarie e straordinarie
- Concezione e progetto dei sistemi strumentali (SHM)
- Analisi dei dati
- Formazione degli indici numerici di valutazione
- Funzioni di degrado
- Aggiornamento dei modelli numerici
- Ottimizzazione del processo di manutenzione
- Interoperabilità delle basi dati

# IDENTIFICAZIONE ELEMENTI



# IDENTIFICAZIONE ELEMENTI



Ogni sottoelemento caratterizzato da un **identificativo univoco** e **parametri dimensionali** utili a:

- Quantificare intensità ed estensione del danno,
- Stimare costi di ripristino,
- Stimare tempi di ripristino

## PONTI E VIADOTTI STRADALI

GRUPPO «IMPALCATO»

Elementi da censimento di Livello 0 (AINOP)

Tipologia soletta

## SOTTOELEMENTI (Opera)

Per ogni campata (con identificativo campata):

- Luce
- Larghezza
- Travi (numero e identificativo trave)
- Traversi (testata e intermedi con identificativi)
- Campi di soletta (identificativo per ciascun campo)
- Sbalzi
- Sistema di smaltimento acque di piattaforma

# ISPEZIONI ORDINARIE



Le i.o. vanno condotte su **ciascuno** dei sottoelementi (travi, traversi, campi di soletta, sbalzi, ecc.) utilizzando :

- Le schede difettologiche dell'allegato C
- Le schede di difettosità dell'allegato B (o equivalenti)
- La scheda fenomeni frana e idraulici dell'allegato B (o equivalenti)

Nella conduzione delle i.o. sono usati semplici strumenti e potranno essere impiegati tablet, droni o altre apparecchiature a controllo remoto purché le immagini ottenute siano geometricamente referenziabili. Si concludono con l'attribuzione di un **indice numerico** a ciascun sottoelemento.

Le risultanze delle ispezioni sono memorizzate nel BMS e potranno essere riferite ad un modello 3D (BIM) del ponte (oggetti = sottoelementi).

## Frequenza delle ispezioni ordinarie

<i>CDA -</i>	<i>Bassa</i>	<i>Medio - Bassa</i>	<i>Media</i>	<i>Medio-Alta</i>	<i>Alta</i>
<b>Frequenza Opere "Tipo 1"</b>	Biennale	18 mesi	Annuale	In funzione del monitoraggio o semestrale	In funzione del monitoraggio o semestrale
<b>Frequenza Opere "Tipo 2"</b>	Annuale	9 mesi	Semestrale	In funzione del monitoraggio o trimestrale	In funzione del monitoraggio trimestrale

# ISPEZIONI STRAORDINARIE



Le i.s. devono sempre essere condotte, secondo specifiche all'uopo predisposte, **a contatto** con l'opera e utilizzare **metodi di indagine ND** onde accertare le caratteristiche dei materiali e quantificare i fenomeni di degrado o le altre sorgenti di rischio.

Ove opportuno, le i.s. possono essere accompagnate da:

- Prove di carico statiche (rif. NTC – prove di collaudo)
- Rilievi della risposta dinamica (UNI 10985/ISO 14963)
- Monitoraggi strumentali occasionali

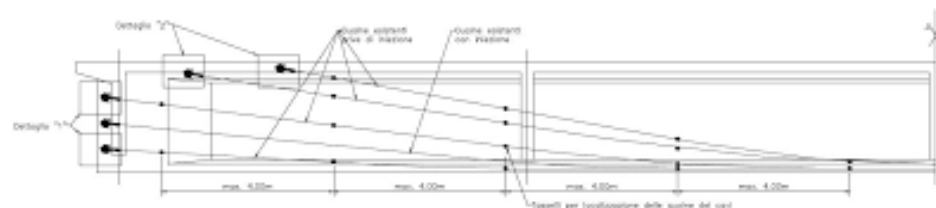
allo scopo di verificare le ipotesi sul comportamento globale della struttura e/o aggiornare i modelli di calcolo.

Le risultanze delle ispezioni straordinarie sono documentate in appositi rapporti, archiviati nel BMS. Le i.s. possono comportare verifiche di sicurezza di **LIVELLO 4** o modifica della CDA.

## Frequenza delle ispezioni straordinarie

CDA	Bassa	Medio-Bassa	Media	Medio-Alta	Alta
F min	5 anni	5 anni	2 anni	2 anni	2 anni
In presenza di criticità o a seguito di eventi eccezionali: entro 60 gg dalla notizia					

# CASI RICHIEDENTI ATTENZIONE



- **Strutture precomprese a cavi post-tesi e iniettati:** Le strutture precomprese di questo tipo, particolarmente se eseguite negli anni 60 e 70, possono presentare situazioni di degrado dei cavi di precompressione, generalmente associato a difetti di iniezione. Le ispezioni ed i controlli devono essere condotti facendo riferimento a standard di comprovata validità (FHWA-HRT-13-028). Sono raccomandate almeno le seguenti indagini:
  - Individuazione del tracciato dei cavi e localizzazione di eventuali difetti associabili a danneggiamento dei cavi (es. manifestazioni esterne, vacuità da riconoscere mediante NDT: georadar, impact-echo, metodi magnetici (MFL), etc.
  - Ispezione delle testate di ancoraggio (ove accessibili)
  - Valutazione del grado di difettosità degli elementi, con metodi NDT e **indagini dirette** (saggi, endoscopie)

Nelle i.o. potranno essere utilizzate le schede di ispezione speciale di cui all'allegato D. A seguito delle i.s. saranno redatti appositi rapporti.

# CASI RICHIEDENTI ATTENZIONE

- **Scalzamento delle pile**: Lo scalzamento è una delle più frequenti cause di dissesto e collasso dei ponti con pile in alveo non adeguatamente protette. E' raccomandato che ispezioni dettagliate, anche subacquee dirette o con ROV, vengano eseguite periodicamente e comunque a seguito di eventi di piena dei corsi d'acqua attraversati. Si raccomanda di includere il controllo del fenomeno dello scalzamento tra gli obiettivi dei sistemi di monitoraggio permanente dei ponti soggetti a rischio idraulico.
- **Smaltimento acque di piattaforma**: Le ispezioni devono porre particolare attenzione all'efficienza di questi sistemi, particolarmente importanti per la conservazione delle strutture. Sono necessarie ispezioni dettagliate e prove di funzionalità in occasione di piogge.

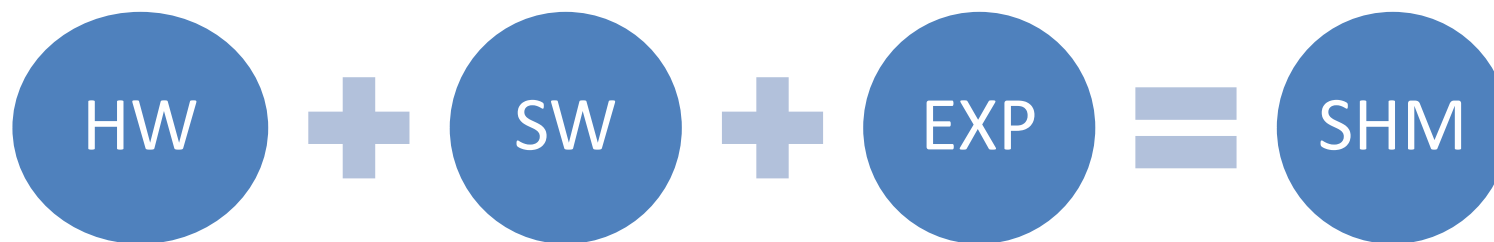




# SISTEMI STRUMENTALI (SHM)

I sistemi di monitoraggio strumentale devono essere concepiti, progettati, installati e gestiti secondo le indicazioni contenute in UNI 11634:2016 *Linee Guida per il monitoraggio strutturale*.

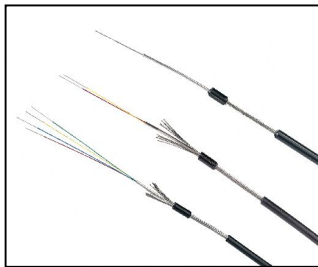
Il monitoraggio si attua attraverso l'implementazione nella struttura di **sistemi complessi** comprendenti sottosistemi **hw** e **sw** che si interfacciano con una **conoscenza esperta** (umana).



# SISTEMI STRUMENTALI (SHM)

## COMPONENTI DEL SISTEMA

- Rete di **sensori** per la misura di grandezze fisiche
- Sistema di **acquisizione** dati
- Sistema **trasmissione** dati
- Sistema di **memorizzazione** e **processamento** dei dati
- Software per **trattamento/interpretazione** dati (**IDENTIFICAZIONE DEL DANNO**)
- Sistema di **supporto alle decisioni** (eventuale)



# SISTEMI STRUMENTALI (SHM)

La fase **concettualmente** più importante del processo è **l'analisi del problema**, che ha lo scopo di:

- Identificare le **fenomenologie** associate al degrado
- Identificare i **punti critici** (hot spots) dove i fenomeni possono più probabilmente prodursi
- Definire la **strategia** di monitoraggio ed i suoi **obiettivi**
- Identificare i **parametri comportamentali** rappresentativi della condizione strutturale (stato di danno o di degrado)
- Identificare i **modelli rappresentativi** del comportamento strutturale
- Identificare le **grandezze fisiche** (variabili di stato) che definiscono il comportamento strutturale attraverso i modelli e che saranno oggetto di misura
- Definire numero e posizioni dei sensori
- Definire la **strategia di misura** e l'**accuratezza** richiesta
- Definire le **componenti** del sistema
- Definire soglie di **attenzione** e di **allarme** (tempo reale)

# STRATEGIE DI MONITORAGGIO

**Monitoraggio occasionale** (da alcuni mesi ad alcuni anni) o periodico, raccomandato nei seguenti casi:

- **Interventi di manutenzione** straordinaria o adeguamento: è raccomandata l'installazione di sistemi strumentali prima, durante e dopo l'intervento per valutarne l'efficacia (ponti con livello di attenzione alto).
- Studio del comportamento di **tipologie strutturali ripetitive**.
- Analisi di fenomeni di degrado/danneggiamento **anomali**.
- Situazioni al contorno di natura transitoria
- Situazioni di rischio elevato e di imminente pericolo in genere

**Monitoraggio continuo**, con sistemi installati **permanentemente**, raccomandato almeno nei seguenti casi:

- Ponti **strallati o sospesi e ponti di grande luce** (> 200 m)
- Ponti con campate di luce **superiore ai 50 m** in c.a.p. realizzati da più di 40 anni
- Ponti con difficoltà di ispezione
- Ponti con **soluzioni strutturali innovative**
- Ponti di rilevanza storica
- Ponti in ambienti critici o soggetti a **condizioni di traffico estreme**
- Ponti con classe di attenzione **medio-alta o alta**
- Situazioni al contorno critiche (rischio inondazioni e frane elevato)

# ANALISI DEI DATI

IL DOMINIO DEI DATI E' DEFINITO NELLO SPAZIO E NEL TEMPO (4D)

## Trattamento/interpretazione

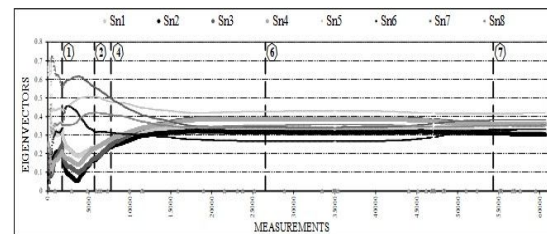
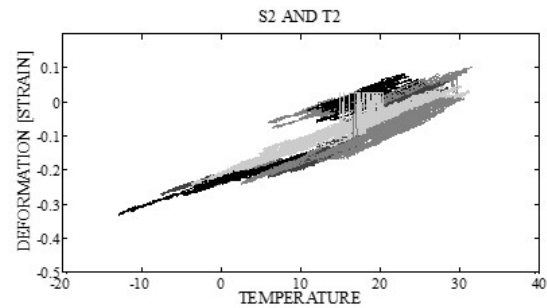
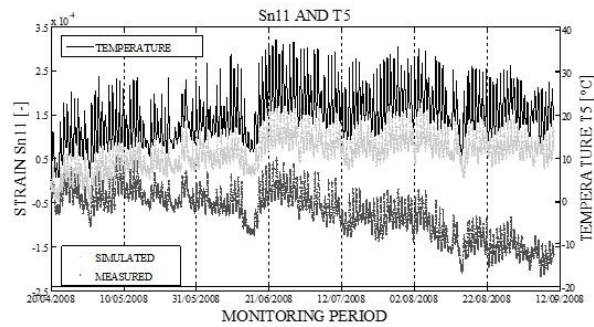
- validazione dei dati, filtraggio, compressione e memorizzazione;
- ricerca e selezione delle serie temporali di valori significativi
- estrazione delle caratteristiche comportamentali della struttura, sensibili alle variazioni del suo stato

**Identificazione del danno** : ricerca di **anomalie comportamentali** associabili al danno, **localizzazione** ed **intensità** probabili

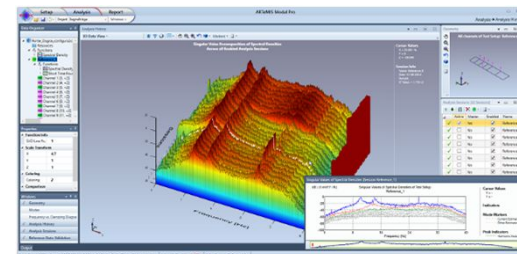
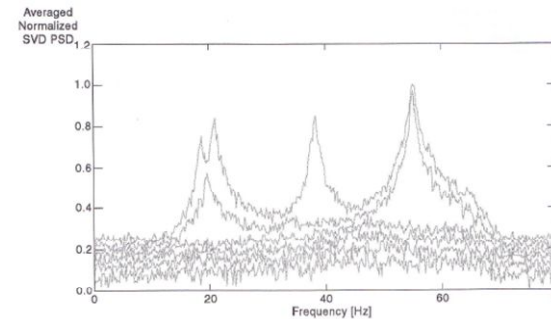
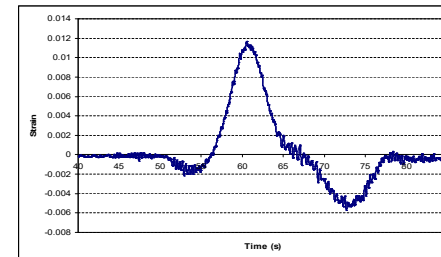
- Algoritmi basati su modelli fisico-matematici
  - Modelli FEM tarati su risposta osservata in periodi di riferimento
  - Altri modelli
- Algoritmi basati su modelli di analisi del segnale
  - Predittivi (es. regressione, correlazione, reti neurali)
  - Decomposizione del segnale
    - Wavelets
    - Decomposizione in componenti principali (PCA, OMA)

# ANALISI DEI DATI

## Dati statici



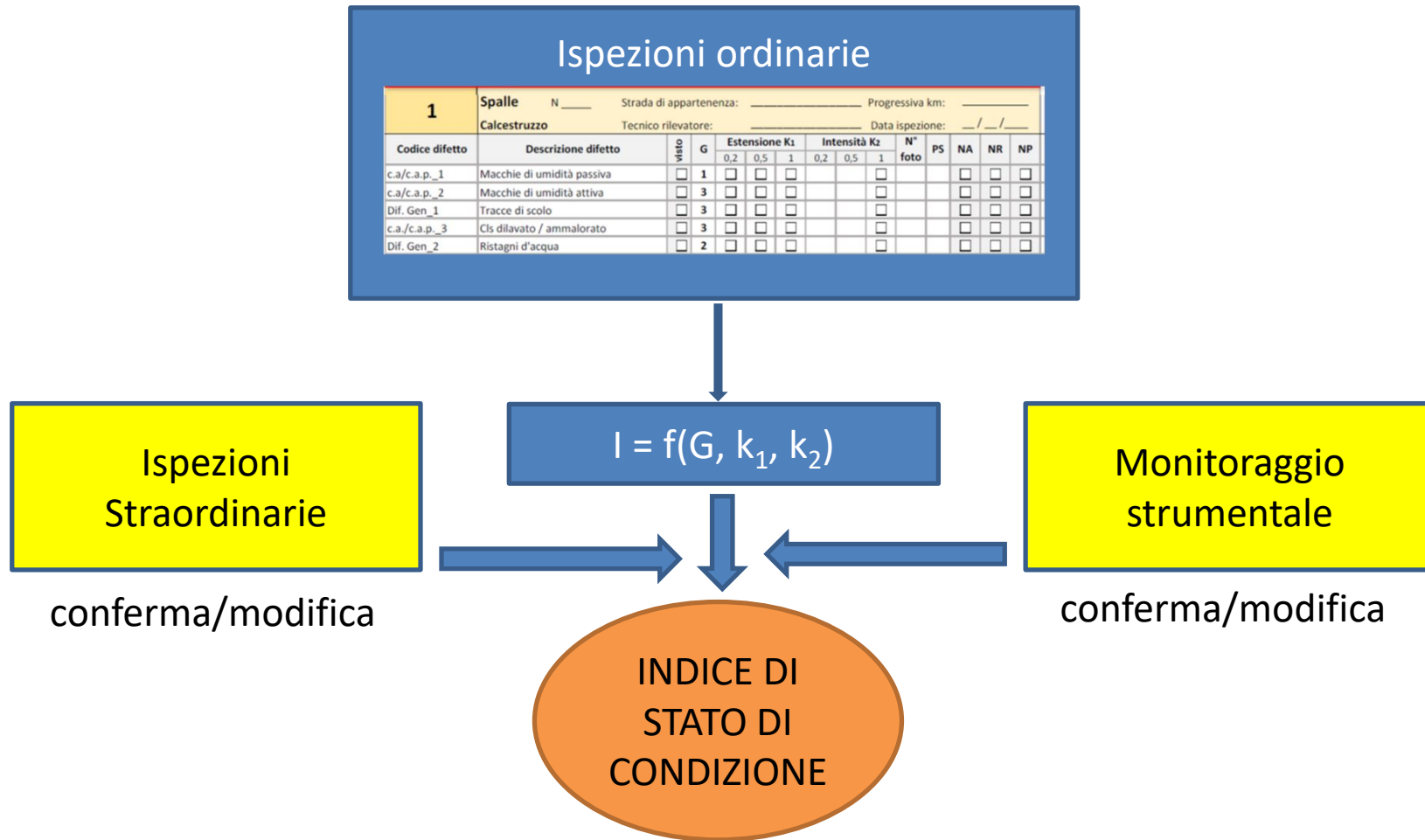
## Dati dinamici



# CARATTERISTICHE DEGLI ALGORITMI

- Lunghezza del periodo di riferimento
- Lunghezza del periodo necessario al rilevamento del danno
- Sensitività alle perturbazioni
- Intensità minima del danno rilevabile
- Capacità di localizzare il danno
- Capacità di rilevare l'intensità del danno
- Capacità di rilevare danni multipli

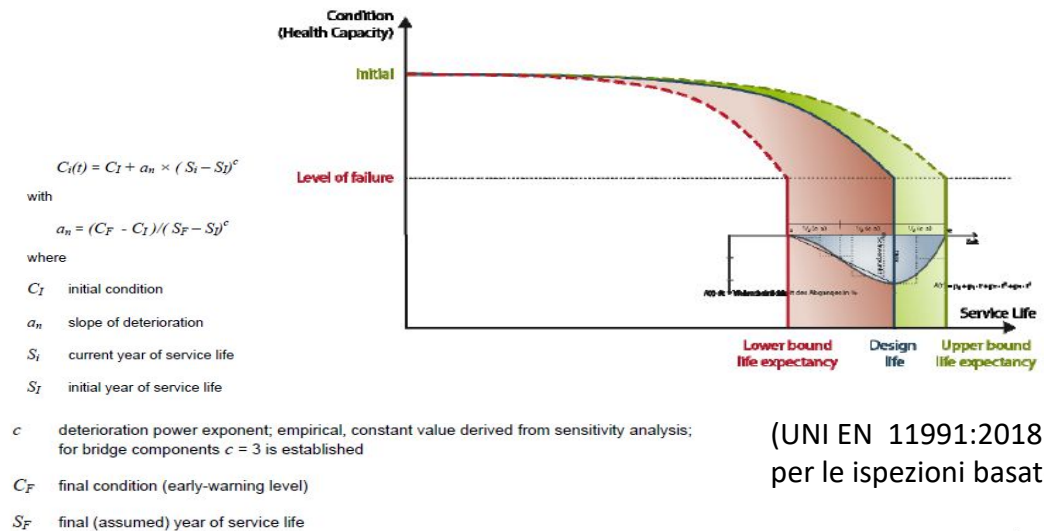
# VALUTAZIONE NUMERICA





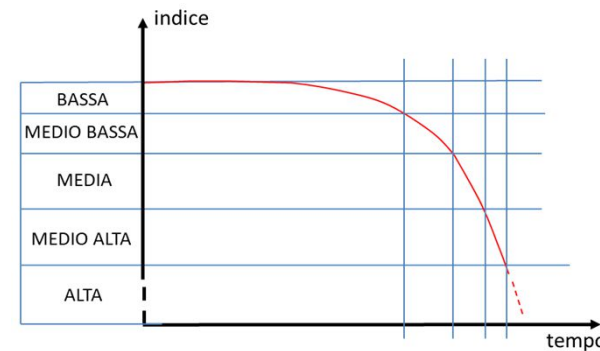
# USO DELL'INDICE

Formazione/aggiornamento di **modelli di degrado**



(UNI EN 11991:2018 – Quadro di riferimento per le ispezioni basate sul rischio)

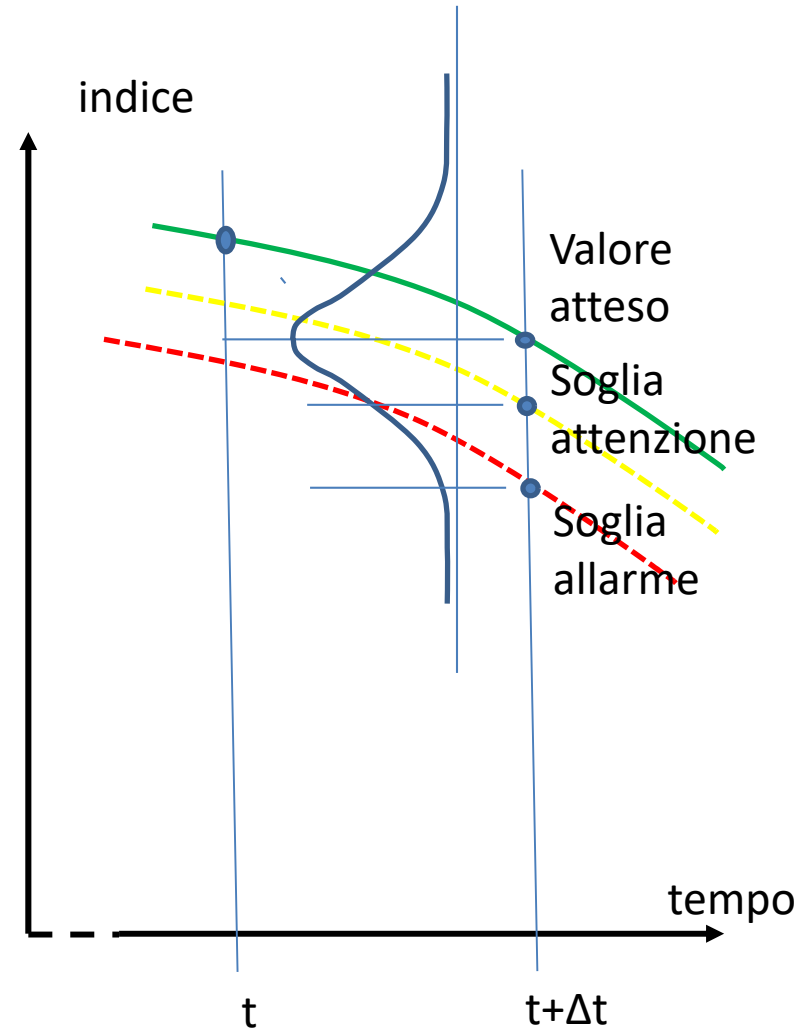
Aggiornamento delle **classi di attenzione**



# MODELLI PREDITTIVI

I modelli di degrado aggiornati possono essere usati come modelli predittivi del comportamento strutturale al fine di:

- Prevedere l'evoluzione dei fenomeni di degrado
- Gestire allarmi (in tempo differito) qualora le osservazioni si mantenessero stabilmente al di sotto dei limiti di soglia (intervalli di confidenza)
- Fornire stime approssimative della vita residua



# AGGIORNAMENTO DEI MODELLI NUMERICI

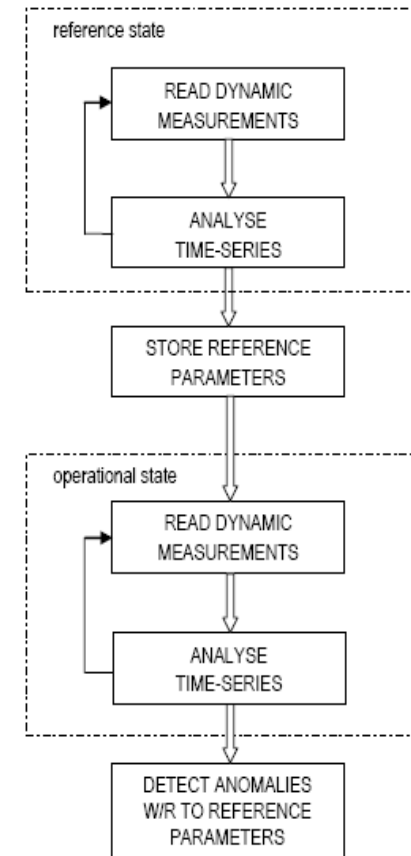
L'esecuzione di **prove statiche o dinamiche occasionali** e il **monitoraggio periodico o permanente** consentono di costruire modelli («gemelli») numerici (FEM) i cui parametri possono essere modificati per rappresentare il **comportamento della struttura reale** (richiesti per verifiche di LIVELLO 4) utili al riconoscimento di **anomalie** comportamentali, all'interpretazione dei **fenomeni di danneggiamento** e alla valutazione delle loro conseguenze.

# COSTRUZIONE DEI MODELLI

- In generale, il g.n. di una struttura è costruito a partire da un modello geometricamente raffinato (**as built**) e completo di **tutte le componenti** che possono influenzare la risposta (es. appoggi)
- Le **proprietà dei materiali** sono quelle risultanti dalle prove di accettazione, verificate durante il collaudo e rideterminate nel corso delle ispezioni
- Parametri del modello (gradi di libertà) sono **co-locali** anche in corrispondenza dei sensori installati (es. nodi della mesh di un modello EF)

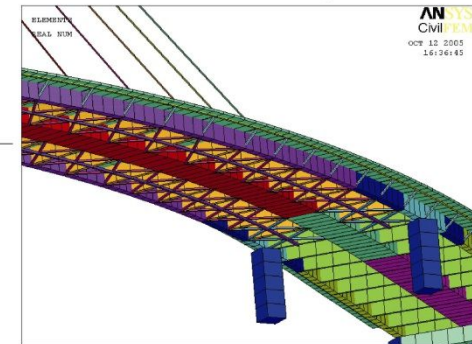
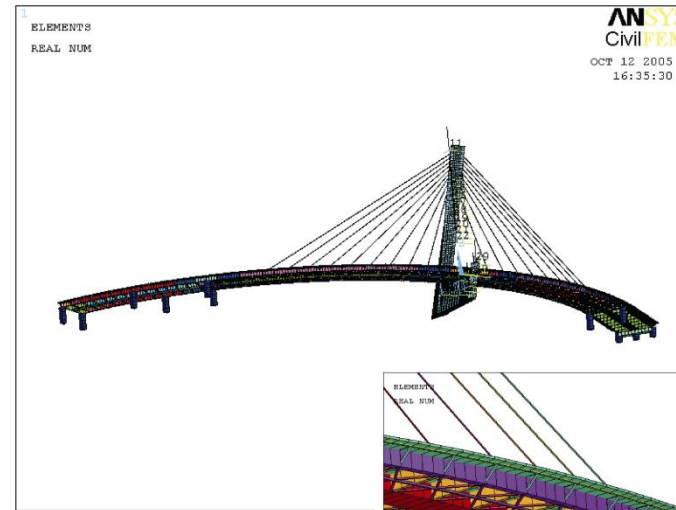
# COSTRUZIONE DEI MODELLI

- Si definiscono parametri di modello **fissi** e parametri di modello **variabili**
- I parametri di modello variabili vengono gradualmente modificati sulla base delle serie di valori osservati in condizioni omogenee (stato della struttura **invariato**)
- In caso di anomalie (interpretate le cause e non ritenute da correggere) il modello può essere ulteriormente aggiornato.
- **Il modello deve essere tanto complesso quanto è necessario e tanto semplice quanto è possibile.**

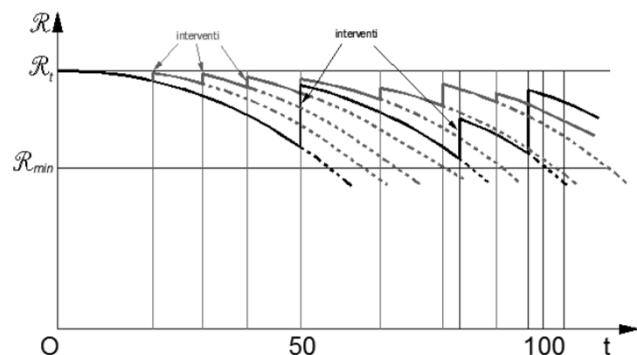


# COSTRUZIONE DEI MODELLI

- Metodi **deterministici**
  - Metodi diretti
  - Metodi parametrici
- Metodi **probabilistici**
  - Stimatori probabilistici
  - Metodi Monte-Carlo
  - Metodi multi-modello



# OTTIMIZZAZIONE MANUTENZIONE



L'ottimizzazione dei processi di manutenzione può essere impostata sulla conoscenza delle curve di degrado risultanti dalle osservazioni eseguite nel tempo e sulla formazione di correlazioni statistiche tra tipologie di degrado, costi standard di intervento e variazioni dell'indicatore dello stato di condizione.

Il problema è strutturabile matematicamente definendo opportune funzioni obiettivo da rendere max/min. Nel caso generale, ci si può ricondurre alla **soluzione di problemi di ottimo a obiettivi multipli** (distribuzione ottimale delle risorse finanziarie, massimizzazione dell'indice di condizione, ecc.).

Nel caso pratico, possono essere utilizzati criteri semplici come ad esempio ottimizzare il rapporto  $\Delta R/C$  (norma SIA 269) tra la riduzione del rischio (misurato ad esempio dall'indice di condizione) ed il costo dell'intervento.

# INTEROPERABILITA'

Lo strumento per la gestione delle informazioni a livello dell'Ente Gestore è il BMS (Bridge Management System). Il BMS deve consentire lo scambio dati (interoperabilità) con vari applicativi per l'esecuzione delle funzioni di elaborazione più complesse (es. BIM, FEM), con il sistema di gestione del monitoraggio strumentale (ove installato) e con le basi dati di livello superiore (es. AINOP). Tali aspetti dovrebbero essere considerati nella selezione e nell'implementazione del BMS.

