

**Attività di formazione per i tecnici degli Enti Locali**

**Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti**  
coordinatori Proff. Edoardo Cosenza e Mauro Dolce



**Lezione 5**  
**Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture**

## **Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti**

### **Le linee guida per i ponti esistenti - Tipologie strutturali e analisi delle principali criticità**

- L1a - Introduzione alle linee guida
- L1b - Ponti in cemento armato
- L1c - Ponti in cemento armato precompresso
- L1d - Ponti in muratura
- L2a - Ponti in acciaio e composti acciaio-calcestruzzo
- L2b - Pile e spalle
- L2c - Selle Gerber
- L2d - Dispositivi di appoggio
- L2e - Introduzione alle schede difettologiche

### **La valutazione della classe di attenzione strutturale-fondazionale - scenari di casi studio. Ispezioni speciali e indagini in situ**

- L3a - Ponti in cemento armato
- L3b - Ponti in cemento armato precompresso
- L3c - Ponti ad arco in muratura
- L4a - Ponti in acciaio e ponti composti acciaio-calcestruzzo
- L4b - Ispezioni speciali e indagini in situ

### **Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione**

- L5a - Applicazione di sistemi di monitoraggio
- L5b - Gestione delle informazioni e modelli informativi digitali

### **Esercitazione**

- L6 - Esempi di compilazione in ambiente virtuale di schede di ispezione

## **Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti**

### **Le linee guida per i ponti esistenti - Tipologie strutturali e analisi delle principali criticità**

- L1a - Introduzione alle linee guida
- L1b - Ponti in cemento armato
- L1c - Ponti in cemento armato precompresso
- L1d - Ponti in muratura
- L2a - Ponti in acciaio e composti acciaio-calcestruzzo
- L2b - Pile e spalle
- L2c - Selle Gerber
- L2d - Dispositivi di appoggio
- L2e - Introduzione alle schede difettologiche

### **La valutazione della classe di attenzione strutturale-fondazionale - scenari di casi studio. Ispezioni speciali e indagini in situ**

- L3a - Ponti in cemento armato
- L3b - Ponti in cemento armato precompresso
- L3c - Ponti ad arco in muratura
- L4a - Ponti in acciaio e ponti composti acciaio-calcestruzzo
- L4b - Ispezioni speciali e indagini in situ

### **Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione**

- L5a - Applicazione di sistemi di monitoraggio**
- L5b - Gestione delle informazioni e modelli informativi digitali

### **Esercitazione**

- L6 - Esempi di compilazione in ambiente virtuale di schede di ispezione

## Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione

### Sistemi di monitoraggio strumentale

- Inquadramento attività di sorveglianza e monitoraggio secondo LL GG
- Introduzione al monitoraggio strumentale  
(occasionale, periodico, continuo - applicazioni)
- Progetto del sistema di monitoraggio strumentale  
Obiettivi, requisiti, strategia e strumenti di misura, gestione dei dati
- Esempio di progetto di sistema di monitoraggio strumentale



# **Attività di sorveglianza e monitoraggio secondo Linee Guida**



## Monitoraggio

### 7.1.1. STRUMENTI OPERATIVI DEL SISTEMA DI SORVEGLIANZA E MONITORAGGIO

Sono strumenti operativi del sistema di sorveglianza e monitoraggio:

- Ispezioni periodiche ordinarie;
- Ispezioni straordinarie;
- Indagini non distruttive e semidistruttive;
- Prove di carico statiche e rilievi della risposta dinamica;
- Monitoraggio strumentale;
- Algoritmi di analisi e interpretazione dati;
- Modelli rappresentativi del comportamento reale;
- Indici dello stato di condizione e modelli di degrado;
- Basi dati informatiche (BMS, di cui al §7.8).

rimanere funzionante a lungo sino a coprire l'intera vita dell'opera. Le indicazioni fornite sono da intendersi complementari rispetto ai contenuti generali del documento *UNI TR 11634:2016 Linee Guida per il monitoraggio strutturale*, cui si farà utile riferimento. Tra le raccomandazioni di carattere generale qui si anticipa, in via preminente, che un sistema di monitoraggio deve essere definito negli obiettivi, concepito, progettato e gestito in funzione delle specifiche problematiche che caratterizzano la struttura ed il suo contesto. Tali problematiche, e quindi le funzioni che il sistema è chiamato ad assolvere, non possono che essere individuate, e quindi valutate nel corso dell'esercizio del sistema, da chi svolge le attività di sorveglianza e/o dai progettisti degli interventi di manutenzione o di nuova costruzione, secondo idonee specifiche procedure.

- ✓ migliorare la conoscenza dell'opera **riducendo le incertezze di natura epistemica** (azioni, resistenze, modelli);
- ✓ aggiornare la **valutazione del rischio** dell'opera e quindi il suo inserimento in una Classe di Attenzione corrente;
- ✓ pianificare in modo efficace, in termini tecnico-economici, gli interventi di **manutenzione** ordinaria e straordinaria.

L'impiego del monitoraggio strumentale è raccomandato per le opere di Classe di Attenzione Medio-Alta e Alta e per alcune classi di opere ritenute a maggior rischio o di particolare interesse.

Le ispezioni ed il monitoraggio hanno lo scopo di effettuare una **diagnosi** della condizione della struttura con riferimento alla sua "idoneità all'uso previsto" e di stimarne le tendenze evolutive (**prognosi**).

Ciò comprende:

- gli aspetti di sicurezza strutturale e fondazionale;
- gli aspetti relativi alle eventuali pericolosità di natura ambientale;
- gli aspetti legati all'efficienza degli apparati ausiliari.

## Processo di controllo delle condizioni di una struttura e ruolo del monitoraggio strutturale

**Il controllo in esercizio** → **conoscenza** del comportamento reale e delle condizioni in cui si trova una struttura (effetto delle azioni e modifiche) **x gestione** ottimale e sicura del patrimonio edilizio esistente.

Favorisce decisioni razionali e tempestive di intervento dopo eventi eccezionali o degrado incipiente.

Processo: identificazione del valore assunto da alcuni parametri che caratterizzano il comportamento della struttura

- proprietà fisico-meccaniche dei materiali
- caratteristiche funzionali dei vari elementi strutturali di cui l'opera si compone e dei vincoli
- alterazioni dei valori di tali parametri (e.g. per fenomeni di deterioramento).

- **il modello della struttura**, validato attraverso una calibrazione iniziale (modello di riferimento)
  - grado di dettaglio adeguato alla complessità e alla importanza dell'opera
  - non necessariamente FEM ma anche modello statistico in funzione del livello dell'output del monitoraggio
- **un sistema di raccolta e gestione dati da diagnostica strutturale** (ispezioni, prelievi di campioni, prove non distruttive, prove di carico, ecc.) e da **sensori direttamente installati sulla struttura** (utilizzati nella fase iniziale per la calibrazione del modello e successivamente come input alle procedure di controllo)
- **un insieme di procedure di elaborazione dei dati** per la valutazione delle condizioni strutturali e della loro tendenza evolutiva
- **procedure decisionali** che guidano nella scelta delle azioni successive in funzione delle indicazioni fornite dal monitoraggio.

## ISPEZIONI

ISPEZIONI  
VISIVE

PROVE NON  
DISTRUTTIVE

PROVE  
DISTRUTTIVE

## MONITORAGGIO STRUMENTALE

OCCASIONALE

PERIODICO

CONTINUO

Condotte periodicamente o a valle di eventi speciali (eventi estremi, interventi di riparazione, miglioramento, adeguamento) mediante tecniche diagnostiche (distruttive e non)

Identificano **deterioramento locale** utilizzando tecniche di prova basate su fenomeni elettromagnetici, propagazione di onde,...

In genere vengono condotte quando:

- la struttura non è in servizio
- la posizione del deterioramento è nota e accessibile

Condotto in maniera continua, periodica o occasionale utilizzando sensori a contatto (installati sulla struttura) o operanti in remoto

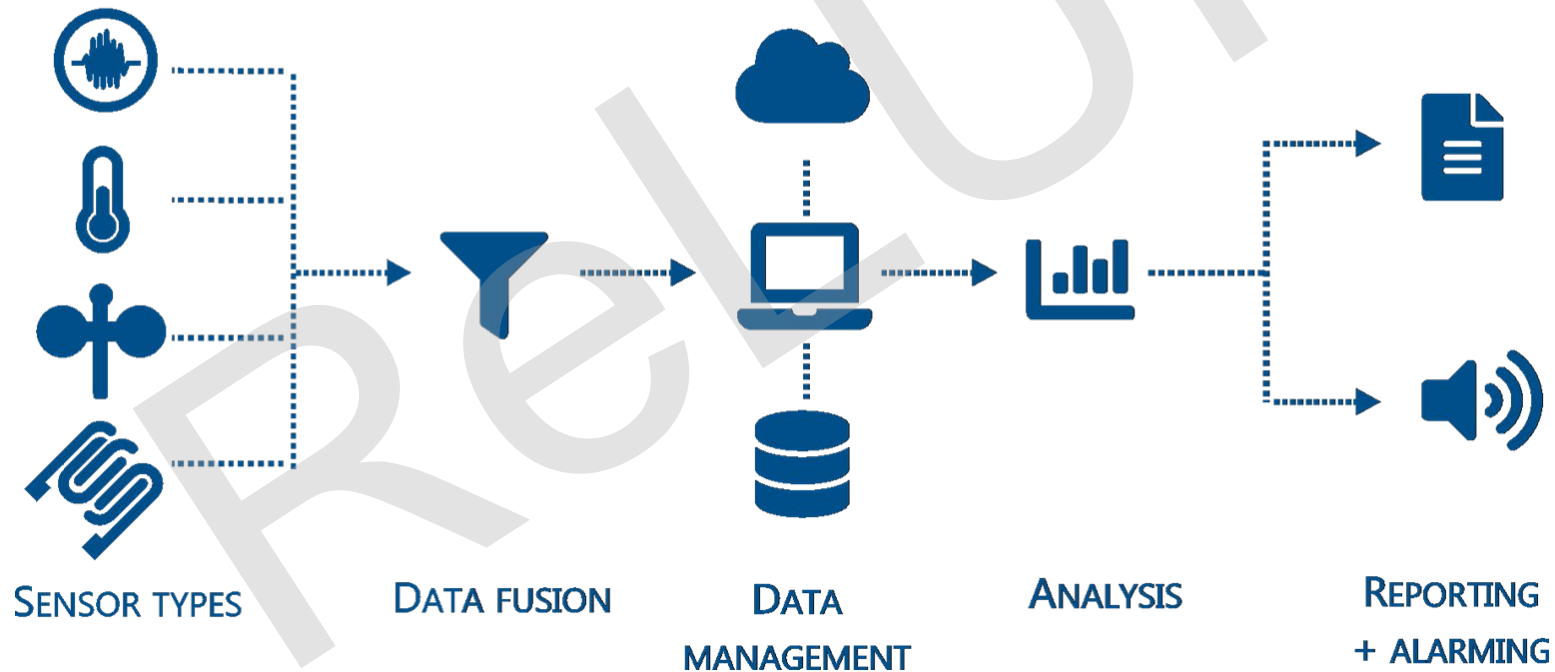
Identifica **deterioramento locale e globale** utilizzando l'analisi della risposta statica o dinamica della struttura misurata attraverso sensori installati sulla struttura o in remote.

Possono essere condotte quando:

- la struttura è in servizio
- la posizione del deterioramento non è nota o non è facilmente accessibile

L'interesse per l'SHM sta crescendo per il risparmio sui costi dovuto alla riduzione del numero di ispezioni

## Monitoring Process Flow



**Medico che si occupa  
del controllo della salute**



## Attività

- Utilizzo delle strumentazioni mediche per verificare la salute dell'uomo
- Prescrivere le medicine per la cura se parametri sono alterati

## Requisiti

- ✓ Conoscere il corpo umano (struttura ossea, organi, ...)
- ✓ Conoscere le possibili malattie e la loro relazione con i sintomi
- ✓ Effettuare un'analisi considerando valori di riferimento dei valori misurati per effettuare la diagnosi

**Ingegnere che si occupa  
di monitoraggio strutturale**



## Attività

- Utilizzo di strumenti di misura per verificare la salute della struttura
- Indica gli interventi per correggere la situazione se tensioni o deformazioni sono eccessive

## Requisiti

- ✓ Conoscere il comportamento della struttura (schema statico, materiali, ...)
- ✓ Conoscere la causa del degrado e del danno
- ✓ Definire i valori soglia dei parametri che influenzano il comportamento della struttura

La selezione della strategia di monitoraggio più opportuna può essere condotta in base ad analisi costi/benefici che tengano in conto **il valore delle informazioni** fornite dal sistema di monitoraggio. Tali informazioni consentono di ridurre le incertezze di natura epistemica (cioè derivanti dalla mancanza di conoscenza) relative sia ai parametri caratteristici del comportamento strutturale sia alla caratterizzazione di fenomeni non altrimenti quantificabili o non conosciuti.

Inoltre le informazioni fornite da questi sistemi possono **orientare le ispezioni** ordinarie e straordinarie riducendone l'impegno e possono consentire di eseguirle in modo mirato.



# Introduzione al monitoraggio strumentale

Reluis

Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione

## OCCASIONALE

alcuni **giorni** o **settimane** fino ad uno o più **anni** quando siano coinvolti **fenomeni di tipo stagionale**

Per **ottimizzare i necessari interventi manutentivi**

integrare le indagini conoscitive con un più approfondito livello di conoscenza 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.

## PERIODICO

**periodi brevi**  
(alcune ore o giorni)  
**cadenze predeterminate**  
(alcuni anni)

Per **tenere sotto controllo fenomenologie di degrado ben definite** in apparati strutturali appartenenti a tipologie correnti

Esempio: prove di carico sistematiche e periodiche ed i rilievi periodici della risposta dinamica di una struttura alle vibrazioni ambientali (e.g. mediante accelerometri o estensimetri dinamici).

## CONTINUO

**diverse scansioni giornaliere**  
e anomalie in tempo reale

segnali di attenzione o allarme  
(soglia)

Per sistemi strutturali complessi o potenzialmente soggetti ad **azioni rare, incidentali o eccezionali**

Consigliato lo studio della strategia già in fase di progetto esecutivo della struttura e l'installazione durante la costruzione.

Valutazioni costi relativi alla gestione del sistema di monitoraggio e benefici derivanti dalla migliore conoscenza del comportamento della struttura reale.

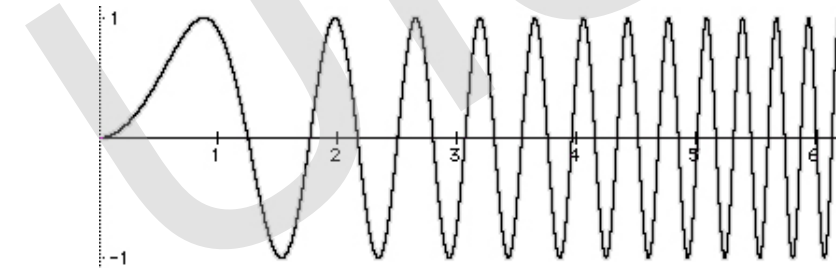
# Monitoraggio occasionale, periodico e continuo

Condotto mediante prove statiche o dinamiche per misurare la risposta globale della struttura

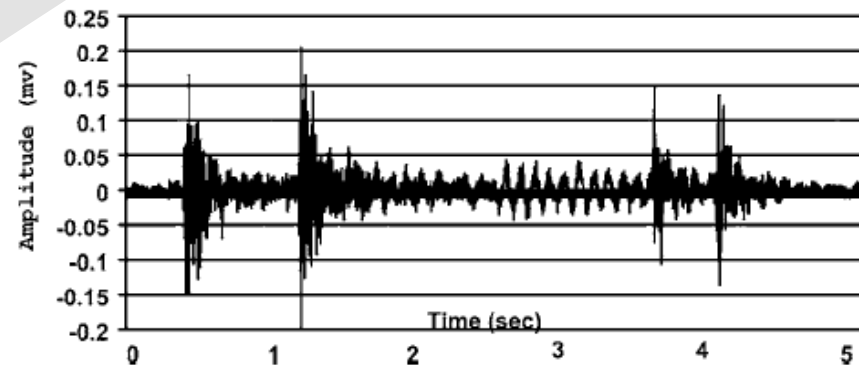
## PROVE STATICHE



## PROVE DINAMICHE



Vibrazioni forzate



Vibrazioni ambientali  
(vento, traffico)

OCCASIONALE

PERIODICO

Tale strategia è raccomandabile nei casi in cui vi siano **situazioni evolutive temporanee e/o ad alto rischio** ed in particolare:

- Interventi di **manutenzione straordinaria o adeguamento**: è raccomandata l'installazione di sistemi strumentali prima, durante e dopo l'intervento per valutarne l'efficacia;
- Situazioni al **contorno di natura transitoria** (ad esempio studio del comportamento dei versanti in vista di interventi preventivi di stabilizzazione);
- Analisi di **fenomeni di degrado/danneggiamento anomali** (per i quali è necessario comprendere, ad esempio, cause e natura evolutiva)
- **Situazioni di rischio elevato** (ad esempio: ponti con Classe di Attenzione Alta e Medio-Alta).



# Monitoraggio occasionale e periodico

Interventi di manutenzione straordinaria o adeguamento

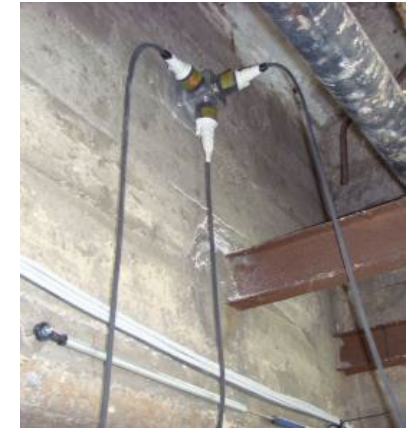
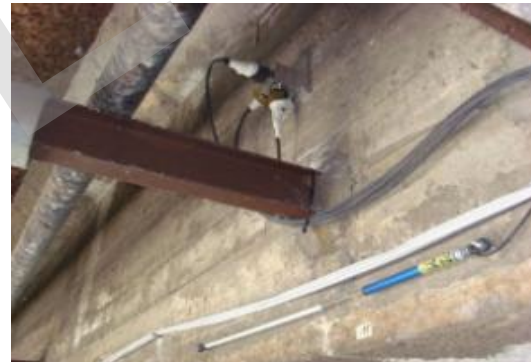


**MONITORAGGIO DINAMICO**

**6 ACCELEROMETRI MONOASSIALI**

**MONITORAGGIO STATICO**

**16 POTENZIOMETRI LINEARI**



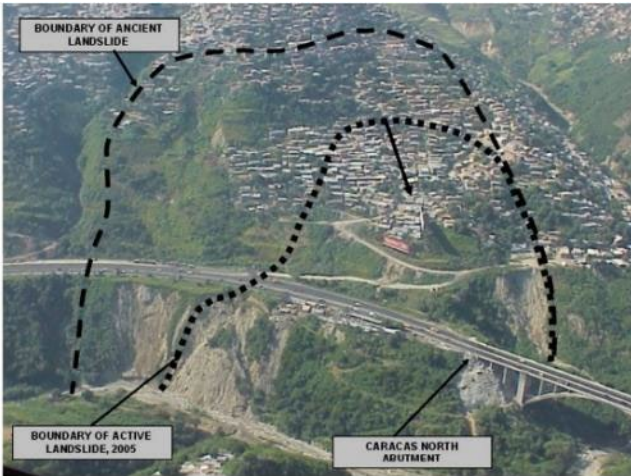
Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione



# Monitoraggio occasionale e periodico

Situazioni al contorno di natura transitoria



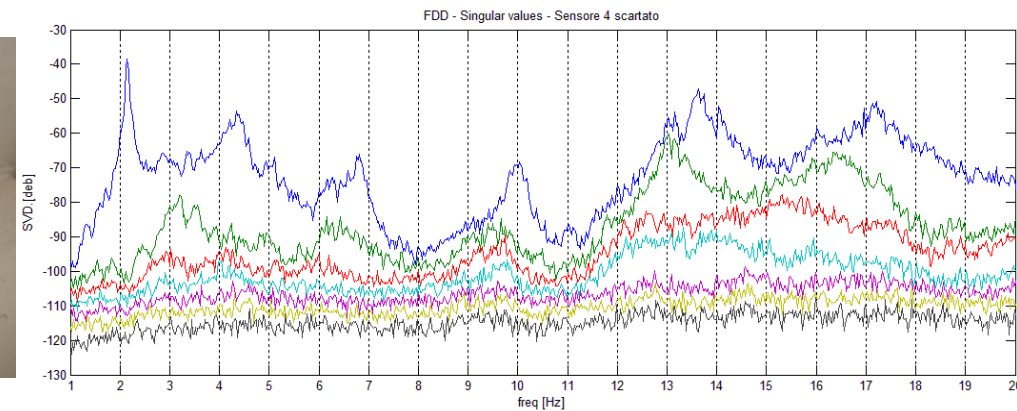
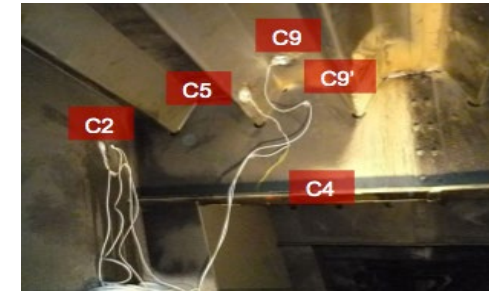
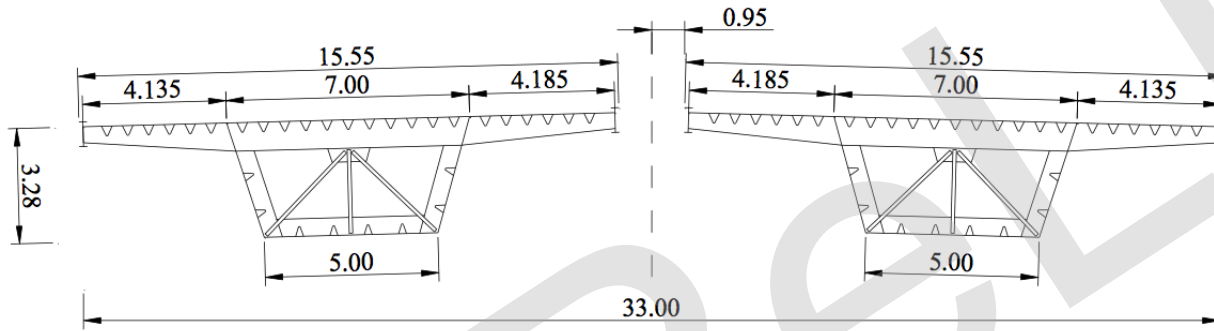
Salcedo (2009). Behavior of a landslide prior to inducing a viaduct failure, Caracas–La Guaira highway, Venezuela, *Engineering Geology*, 109, 16–30

Luo, et al. Stability evaluation and prediction of the Dongla reactivated ancient landslide as well as emergency mitigation for the Dongla Bridge. *Landslides* 14, 1403–1418 (2017). <https://doi.org/10.1007/s10346-017-0796-9>

Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione





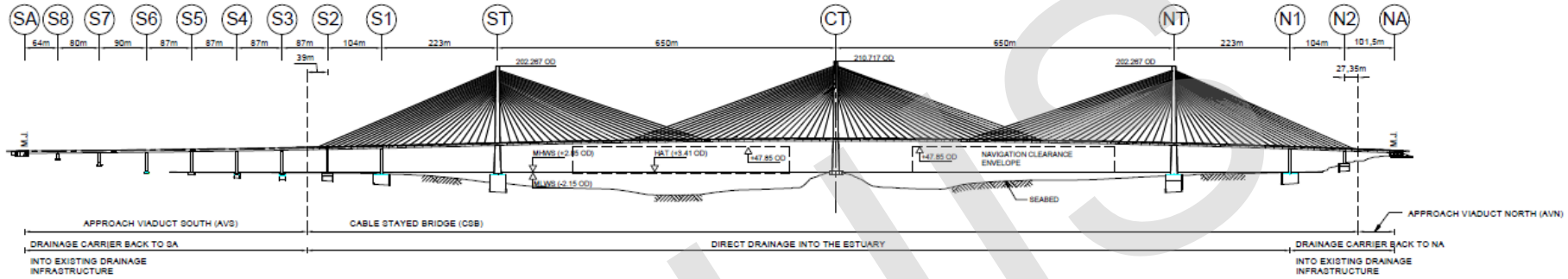
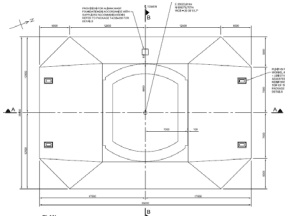
## CONTINUO

Il monitoraggio continuo, con sistemi installati permanentemente, è raccomandabile nei seguenti casi:

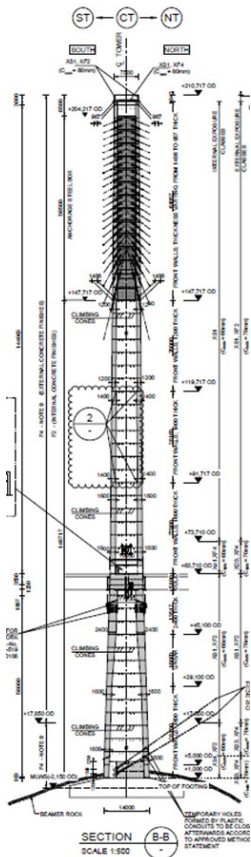
- Ponti **strallati** o **sospesi** e ponti di **luce > 200 m**.
- Ponti con campate di **luce superiore ai 50 m in c.a.p.** realizzati da **piu di 40 anni**.
- Ponti con **difficolta di ispezione** (travate a cassone e pile non ispezionabili) in c.a.p. o acciaio.
- Ponti con **soluzioni strutturali innovative**.
- Ponti di **rilevanza storica**.
- Ponti in **ambienti critici**, caratterizzati da elevati carichi da **traffico** (ad esempio frequente transito di trasporti eccezionali), con problematiche di **fatica**, in zone ad alto rischio sismico o con situazioni al contorno critiche, quali rischio inondazioni e frane elevato o ponti per i quali possono avere grande rilevanza fenomeni accidentali, quali **urti** o simili (per i quali, evidentemente, la Classe di Attenzione può aumentare).



## Queensferry Crossing (Transport Scotland)



ELEVATION  
SCALE 1:5000



<https://www.theforthbridges.org/queensferry-crossing/>

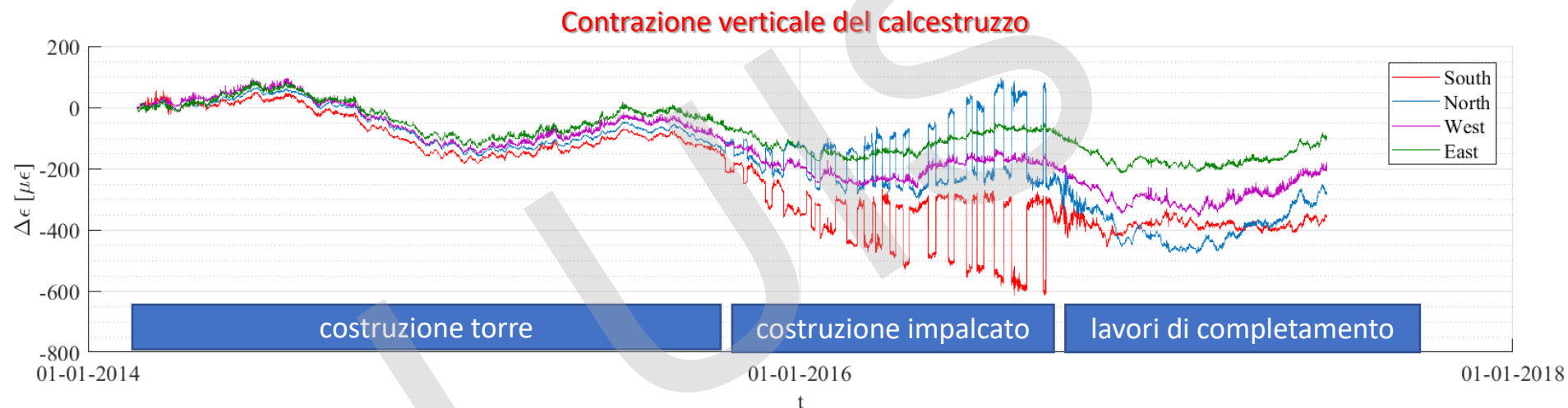
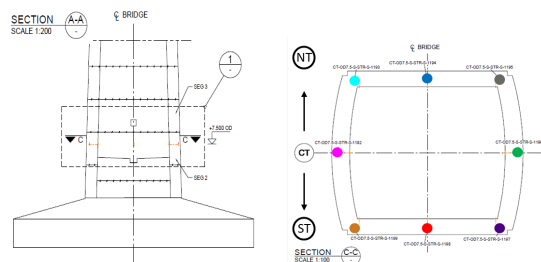
- Progettato e costruito fra il 2011 e il 2017
- connette Edimburgo alla regione del Fife
- lungo complessivamente 2.7 km
- campate principali di 650 m
- torri in cemento armato
- impalcato composta acciaio calcestruzzo
- 288 stralli con lunghezza variabile da 94 m a 420 m
- Ciascuno strallo composto da 45 a 106 trefoil 0.6"



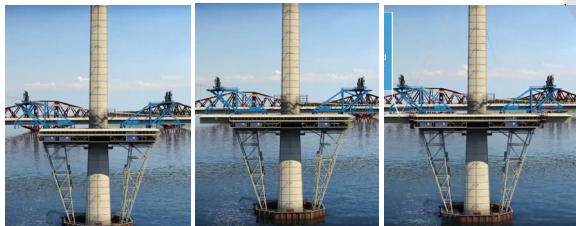


## Queensferry Crossing (Transport Scotland)

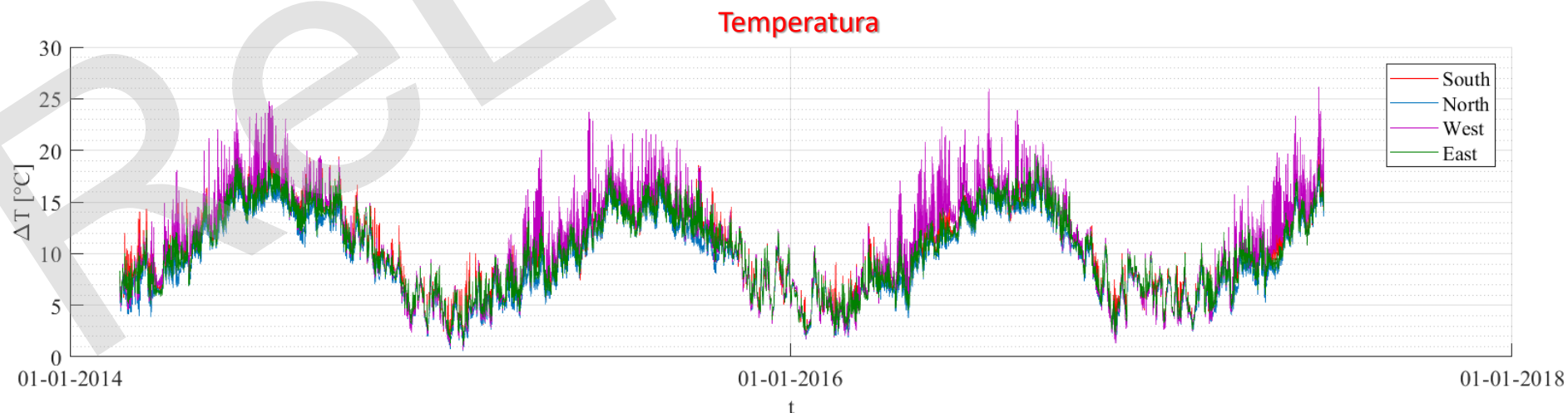
### Misure di contazione alla base della torre centrale



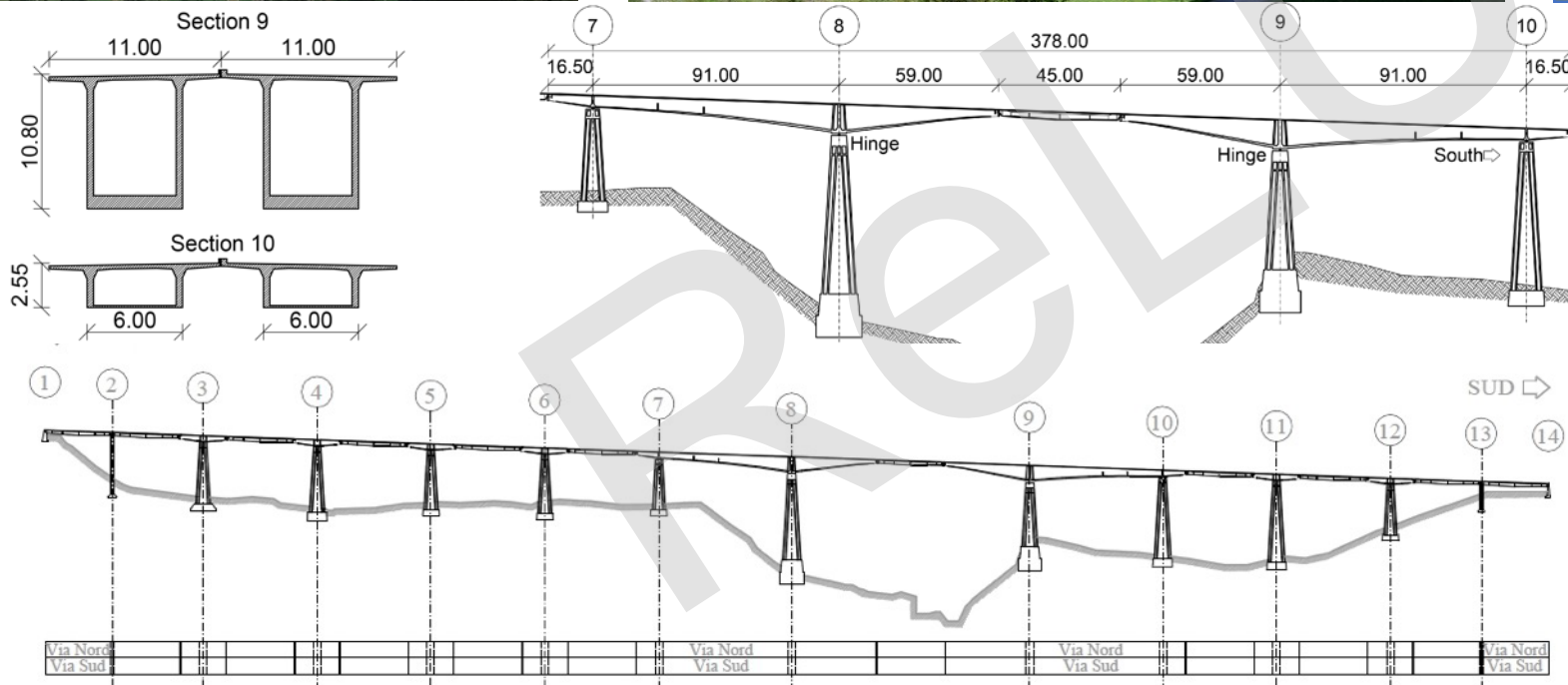
### costruzione bilanciata dell'impalcato



<http://www.queensferrycrossingarc.co.uk/>



reluis **Ponti con campate di luce superiore ai 50 m in c.a.p. realizzati da piu di 40 anni**  
**Viadotto Colle Isarco (Autostrada A22, Bolzano)**



- Ponte in calcestruzzo precompresso
- Costruito nel 1968 e aperto al traffico nel 1971
- Composto da due impalcati indipendenti con 13 campate
- Lunghezza totale di 1028.2 m, campata principale di 378.0 m.
- La campata principale consiste di due travi a cassone Niagara simmetriche con altezza variabile da 10.93 m alla pila a 2.57 m all'estremità delle mensole.

Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

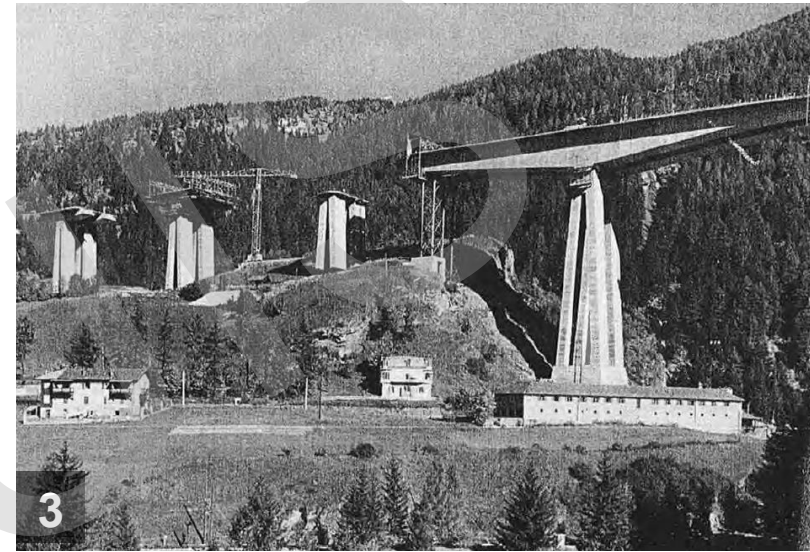
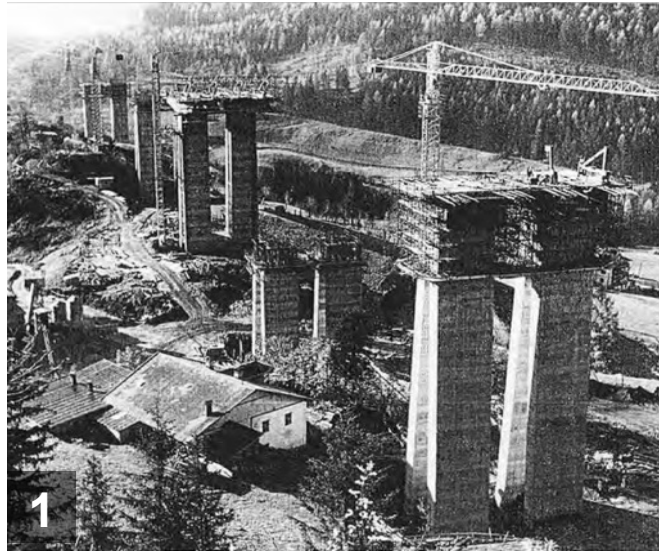
Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione



# Ponti con campate di luce superiore ai 50 m in c.a.p. realizzati da piu di 40 anni

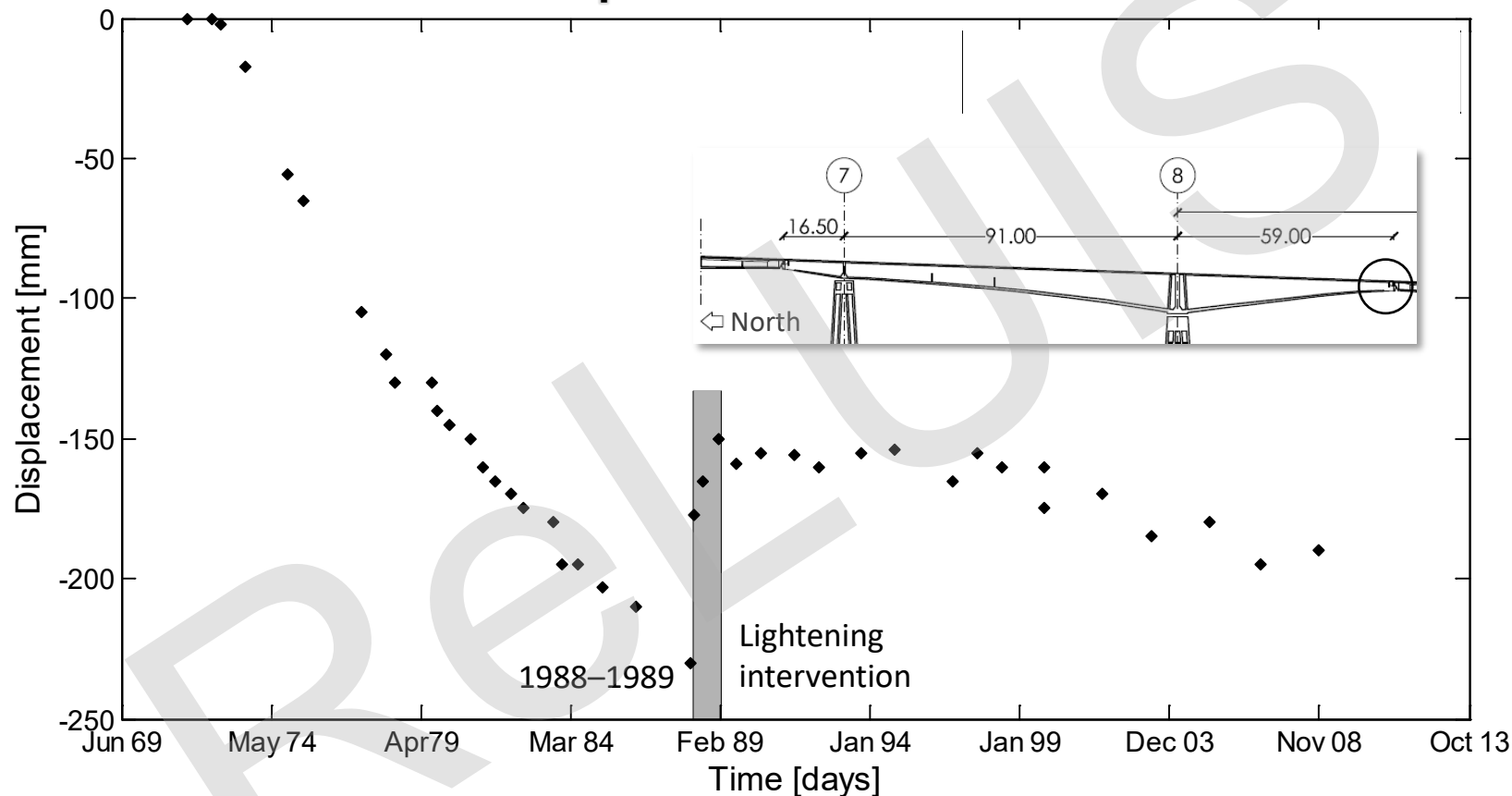
## Viadotto Colle Isarco (Autostrada A22, Bolzano)

Fasi di costruzione



1. Realizzazione delle pile
2. Realizzazione delle stampelle
3. Stampelle su supporti provvisori
4. Realizzazione campata sospesa

### Comportamento osservato



- Abbassamento anomalo inaspettata all'estremità della stampella
- Recupero di 70 mm dopo aver ridotto il carico della pavimentazione su stampelle e campata sospesa

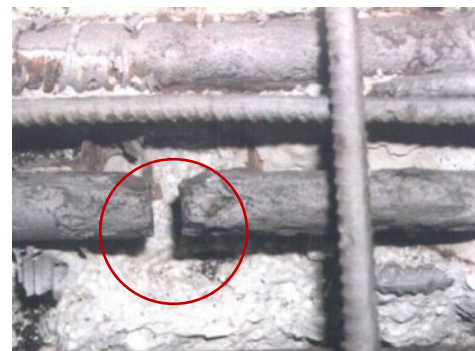


#### CAUSE

- **Sali disgelanti**: corrosione delle barre superiori della soletta, perdita di precompressione
  - 48% delle barre longitudinali analizzate
  - 3 barre di 1425 sono state trovate rotte
  - **Creep** del calcestruzzo: descritto dal modello Bazant B3

#### SOLUZIONI – Intervento del 2014

- Idrodemolizione e ricostruzione della soletta: da 4.0 cm a 6.5 cm
- Nuovo set di barre post-tese e diaframmi di irrigidimento
- Sistema di monitoraggio





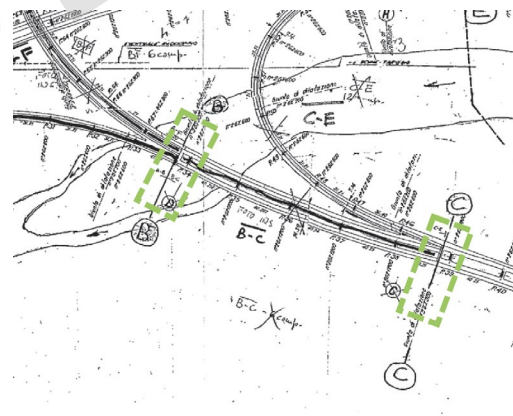
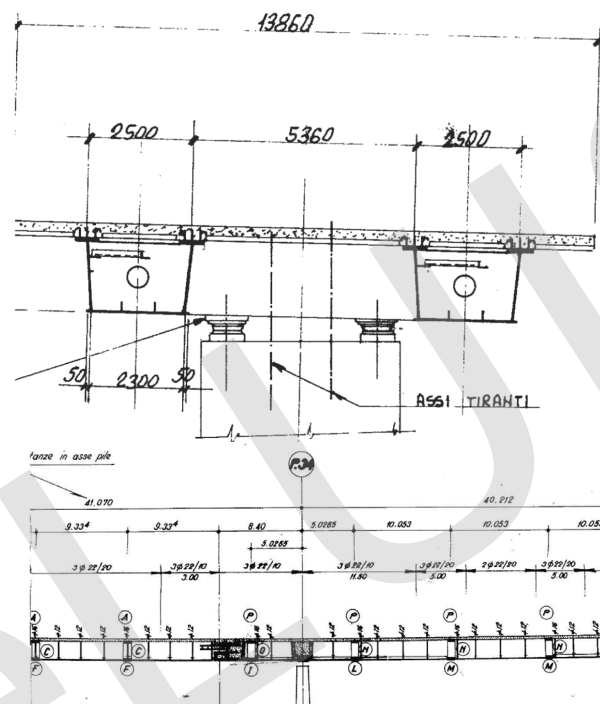




## Svincolo Pontebba Ramo B-C ASPI DT9

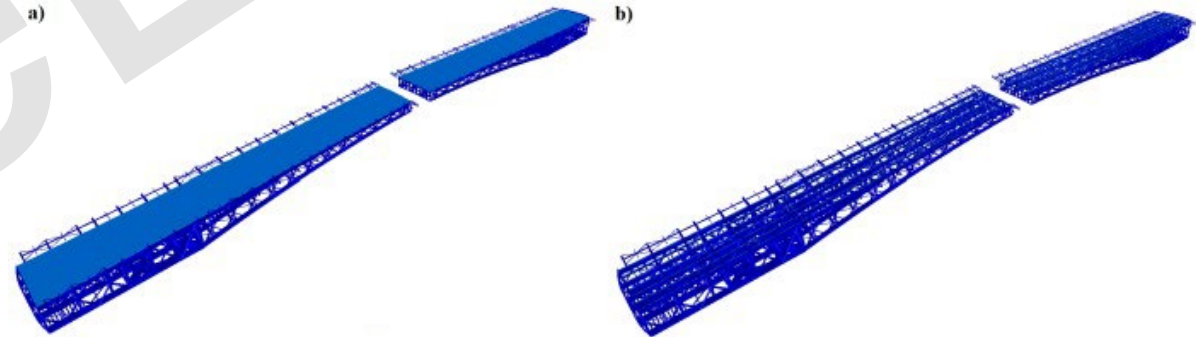
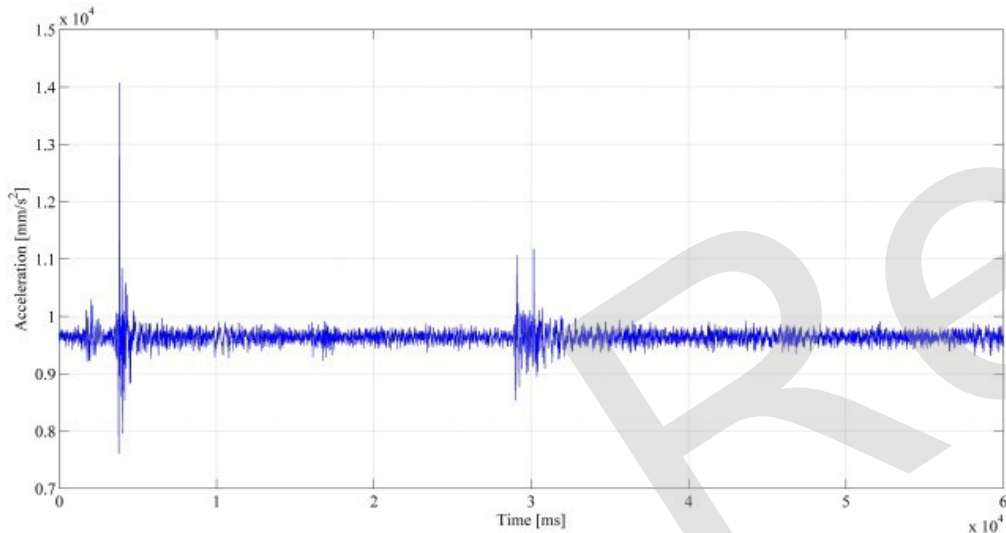
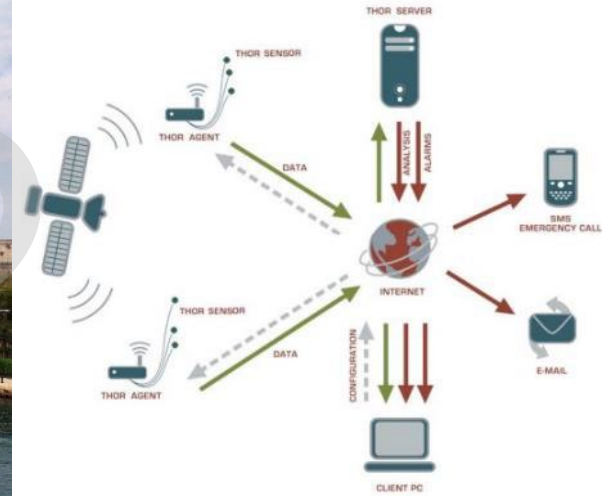


Anno di costruzione	1986
Tipologia impalcati	Cassoni continui in acciaio con Selle Gerber di collegamento ai rami precedente e successivo
Tipologia costruttiva impalcato	Acciaio - CAO
Tipo cassone	F Accesso consentito da controsoletta; passaggio non consentito tra Sella Gerber e trasverso
Tipologia pile	No pile cave Pile a forma rettangolare a fusto unico Dimensioni 4.80 x (min 1.75 – max 1.90 m)
Careggiata	Entrambe
N° campate	6
Elementi Equivalenti	6
Impalcati	1 (unico)
Elenco luci	5 x 40.25 m
Altezza pile	11.3 – 14.46 m
Zona sismica	1
Presenza di corso d'acqua	Si
Fondazioni	Nr. 5 profonde pali D=150 cm
Coordinate geografiche	46.5104586 – 13.3279949 (Google Maps)
Note	Il tratto in oggetto inizia con una Sella Gerber che sostiene i due tratti precedenti e confluenti (A-B e B-F), ci sono poi 4 pile (numerata da 34 a 38 nella documentazione di progetto disponibile) e l'ultima campata che termina in appoggio su una Sella Gerber sostenuta dal tratto successivo (C-D).



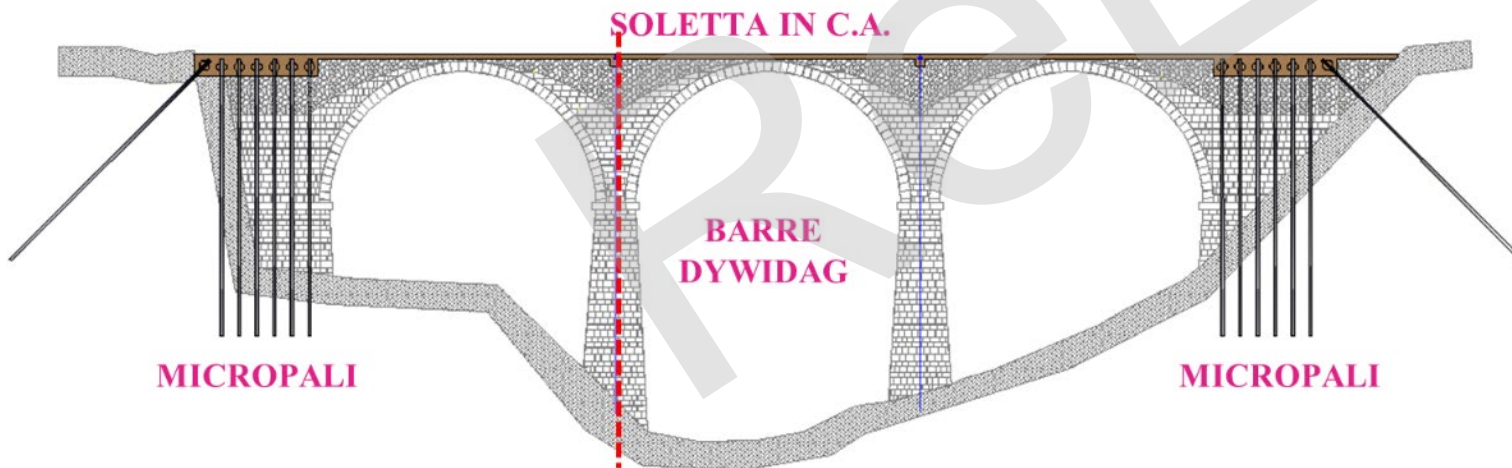
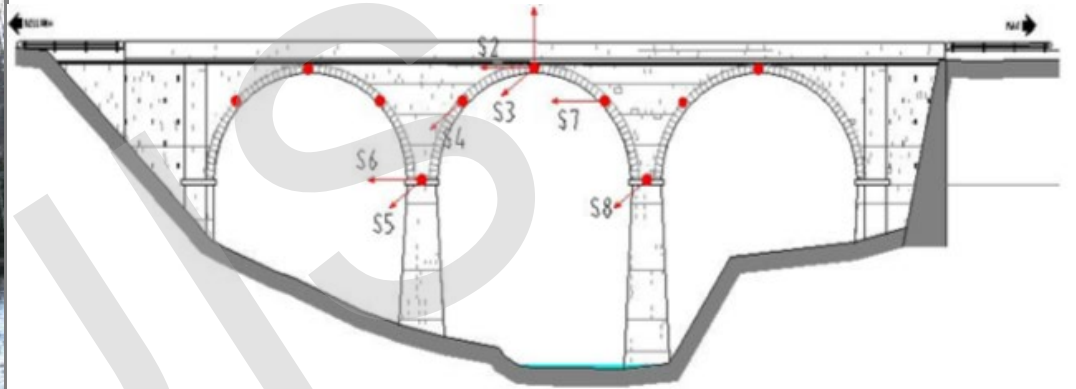
Cassoncino metallico di difficile accesso





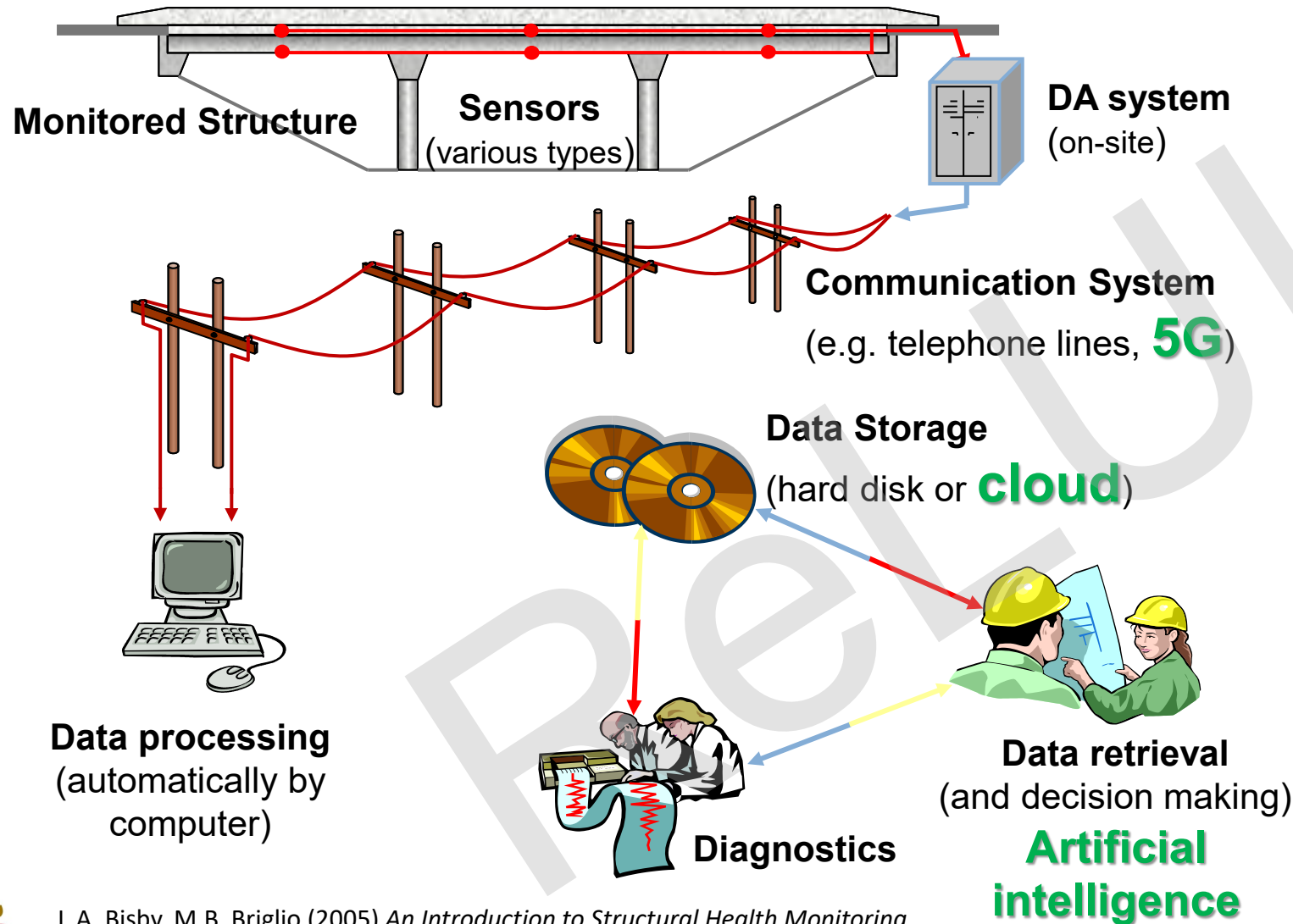
Marano et al. (2011). Dynamic monitoring of the “St. Francesco da Paola” swing bridge in Taranto: experimental and information based technologies.





# **Sistema di monitoraggio strumentale**

**Obiettivi, requisiti, strategia e strumenti di misura, gestione dei dati**

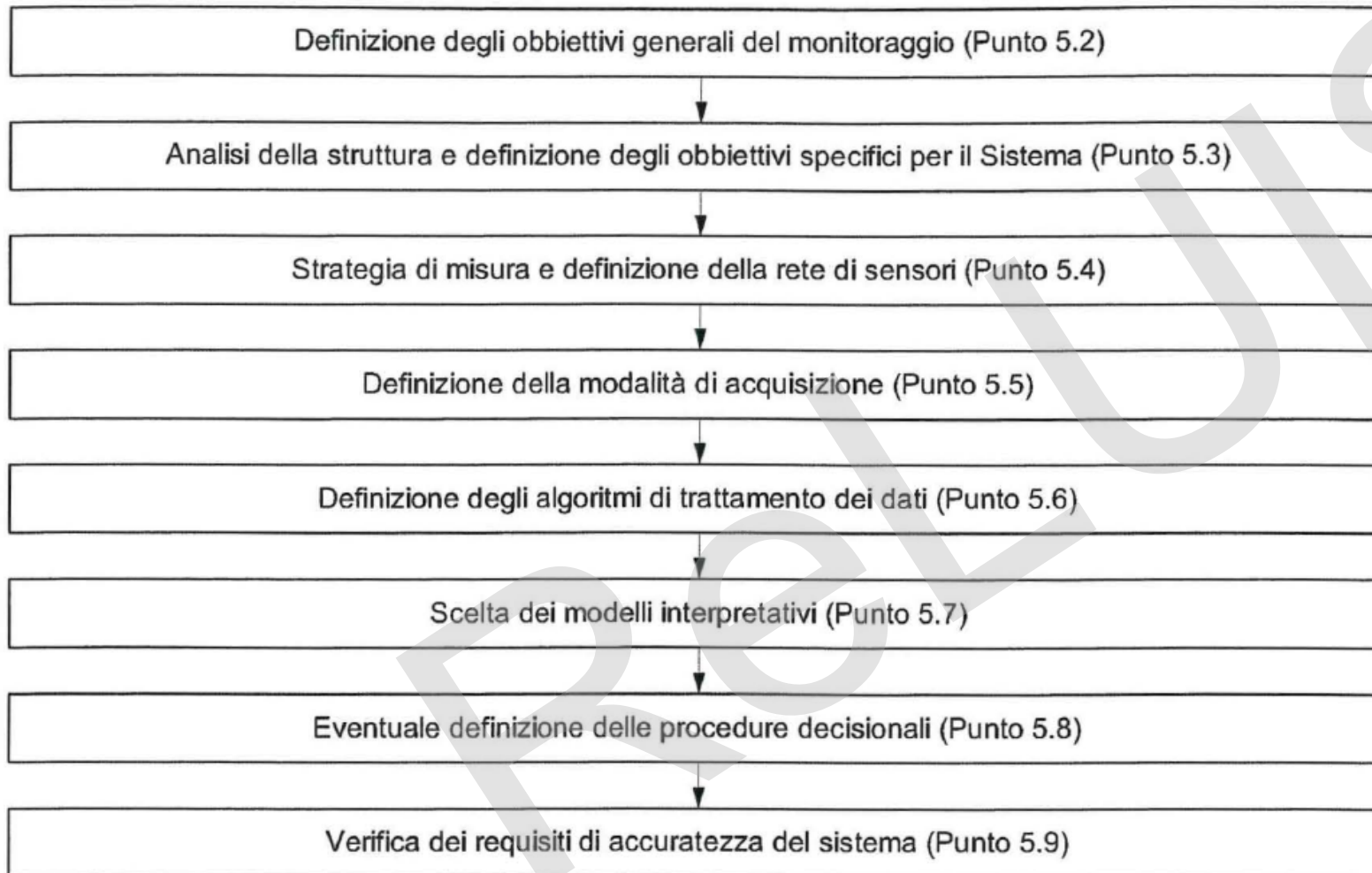


Un sistema SHM ideale dovrebbe:

- **fornire informazioni su richiesta** sullo stato di salute di una struttura
- **avvertire di danni significativi** che sono stati rilevati.

Coinvolgimento di **esperti in molte discipline**, come strutture, materiali, rilevamento dei danni, sensori, gestione dei dati e elaborazione intelligente, computer e comunicazione.

L.A. Bisby, M.B. Briglio (2005) *An Introduction to Structural Health Monitoring*  
 Prepared by ISIS Canada ([www.isiscanada.com](http://www.isiscanada.com)) and SAMCO Network of the European Commission (<http://www.samco.org>)





# Attori del processo di monitoraggio



**committente**



**progettista  
strutturale**



**progettista del sistema  
di monitoraggio**



**progettista  
esecutivo**



**fornitore e  
installatore**



**supervisore  
tecnico**

**gestore del sistema**





**committente:** proprietario/gestore (per esempio un concessionario o un soggetto delegato dal proprietario alla gestione del bene). Richiedere/approvare e commissionare l'attivazione del processo.



**progettista strutturale:** per manutenzione o riabilitazione di una struttura esistente o per progetto nuova costruzione; individua l'opportunità di attivare il processo di monitoraggio e ne **definisce gli obiettivi** sulla base di un'analisi (e.g. modelli numerici) del comportamento strutturale, delle problematiche connesse alla costruzione o al consolidamento ed all'esercizio della struttura.



**progettista del sistema di monitoraggio:** il progettista del sistema di monitoraggio, che può eventualmente coincidere con il progettista strutturale e/o con il progettista esecutivo, possiede adeguate conoscenze di ingegneria strutturale e delle tecniche del monitoraggio strutturale. Il suo compito è quello di definire, **sulla base degli obiettivi del processo**, il progetto funzionale di massima del sistema, incluso tipologia, numero e collocazione dei sensori, architettura del sistema di acquisizione e trasmissione dei dati nonché le prestazioni richieste alla componente software, tenuto conto dei livelli di accuratezza richiesti al processo.



**progettista esecutivo:** esperto nella progettazione esecutiva di tutte le componenti del sistema, dai sensori ai sistemi di acquisizione e trasmissione dei dati ed al software di analisi ed interpretazione. Il progettista esecutivo definisce le specifiche di acquisizione e installazione del sistema. Può eventualmente coincidere con il progettista del sistema o con il fornitore e installatore

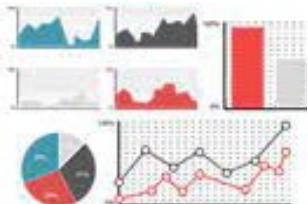




**fornitore e installatore:** è responsabile della fornitura di tutte le componenti del sistema e della loro corretta installazione. (idonea esperienza e, ove richiesto, necessarie certificazioni. È altresì responsabile dell'acquisto delle diverse componenti dai rispettivi costruttori e della loro integrazione nel sistema.



**supervisore tecnico:** sovrintende alla corretta fornitura e installazione del sistema. Approva le forniture prima della loro messa in opera ed è responsabile della documentazione tecnica relativa al sistema. E altresì responsabile delle procedure di messa in servizio e di collaudo del sistema stesso e di istruzione dei tecnici incaricati della gestione. La responsabilità della supervisione tecnica può essere affidata al progettista esecutivo, a tecnici del fornitore/installatore ovvero a tecnici indipendenti.



**gestore del sistema:** è l'organizzazione che prende in carico il sistema successivamente al collaudo ed alla messa in servizio. È responsabile dell'analisi e dell'interpretazione dei dati, incluso l'aggiornamento dei modelli, e della comunicazione dei risultati del monitoraggio al progettista strutturale ed al committente. Individua le necessità di manutenzione ed ampliamento del sistema e le comunica al committente. Può essere parte dell'organizzazione del committente ovvero coincidere con uno degli altri attori del processo.

Gli **ingegneri strutturisti** sanno come progettare le strutture...

... seguono una procedura razionale e consolidata:

Obiettivo della progettazione strutturale: garantire la stabilità sotto un determinato carico con un fattore di sicurezza appropriato.

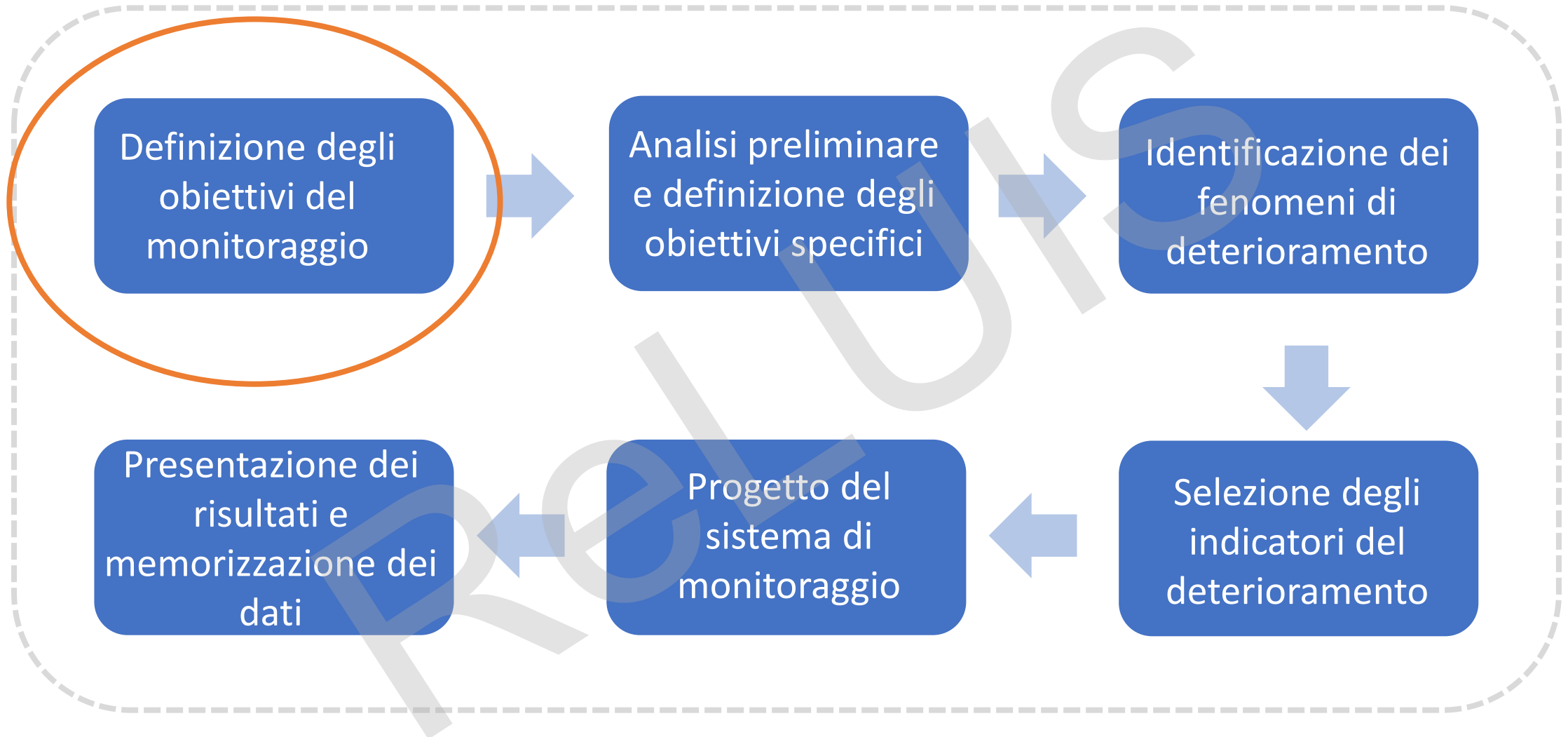
- Definizione dei **carichi di progetto**;
- Calcolo delle sollecitazioni  $S$  (**richiesta strutturale**) utilizzando un modello strutturale;
- Scelta di una soluzione tecnologica che offra la resistenza richiesta  $R$  (o **capacità**).
- Il progetto è soddisfacente se  $R > S$  (**capacità > domanda**).

## Quando si progetta una struttura...

... segue una **procedura razionale e consolidata**, in base alla quale le prestazioni del concetto progettuale sono previste attraverso l'analisi strutturale e valutate **quantitativamente** rispetto alle prestazioni target

## Quando si progetta un sistema di monitoraggio...

... al contrario, l'approccio è spesso **euristico** con una valutazione **qualitativa** delle prestazioni basata sul **buon senso o sull'esperienza**.





**committente**

## Motivazioni generiche

- ❖ conoscere le condizioni in cui si trova la struttura per intervenire in caso di danno significativo
- ❖ riconoscere la presenza di eventuali fenomeni di deterioramento in atto

## Avere idee chiare:

### sull'accuratezza

- capacità di misurare l'efficacia del sistema

### sui costi

- installazione del sistema (costi diretti)
- gestione futura (costi indiretti)

### sul prodotto

- indice o indicatore di danno
- indice di prestazione (una misura della sicurezza strutturale come l'indice di affidabilità o la probabilità di collasso);
- un indice della vita residua
- una classificazione (la più semplice è la binaria: danneggiata oppure no)



## Finalità

Le finalità dell'adozione del sistema di monitoraggio strutturale sono prevalentemente legate alla gestione della struttura e si declinano sia nella programmazione razionale della manutenzione che nell'estensione della vita residua.



- la possibilità di una **classificazione del deterioramento dell'opera** in base all'entità del danno valutato consente una razionalizzazione dell'attività ispettiva e di sorveglianza che può essere concentrata sulle opere che presentano i sintomi di degrado più gravi e, allo stesso tempo, di **allocare le risorse economiche a disposizione nel modo più razionale**, concentrandole sulle strutture che presentano la maggiore criticità.
- la **conoscenza accurata** dello stato di fatto della struttura basato sulla conoscenza storica dell'opera e su un modello numerico aggiornato e rappresentativo **delle attuali condizioni dell'opera** costituisce un elemento indispensabile per valutare la possibilità di estendere la vita utile dell'opera al di là di quella di progetto, effettuando eventuali **interventi manutentivi mirati**.



**Nella progettazione di un sistema di monitoraggio**, un ingegnere deve essere in grado di rispondere a tre domande:

## **1) Ho davvero bisogno di un sistema di monitoraggio?**

In altre parole, la mia attuale conoscenza dello stato strutturale (a priori - senza guardare i dati di monitoraggio) è abbastanza accurata da permettermi di prendere decisioni ottimali sulla gestione strutturale?

## **2) Il sistema di monitoraggio migliora le mie conoscenze sullo stato strutturale?**

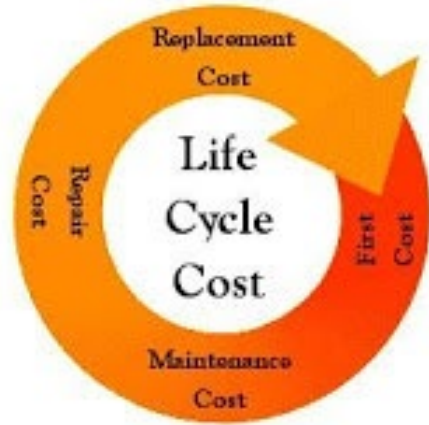
In altre parole, la conoscenza aggiornata (a posteriori - dopo aver esaminato i dati di monitoraggio) è ben superiore alla mia conoscenza precedente (a priori)?

## **3) Il sistema di monitoraggio (provvisorio) corrisponde all'obiettivo di progetto?**

In altre parole, il sistema SHM (provvisorio) ha aumentato la conoscenza sullo stato strutturale abbastanza da permettermi di intraprendere azioni ottimali sulla gestione strutturale?



## Gestione della manutenzione



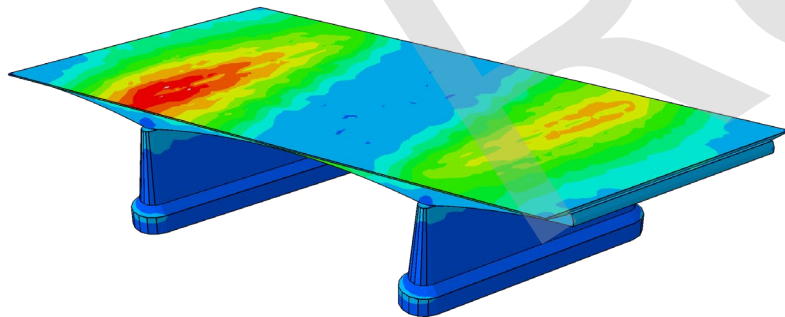
## Gestione dell'emergenza



## Verifiche puntuali

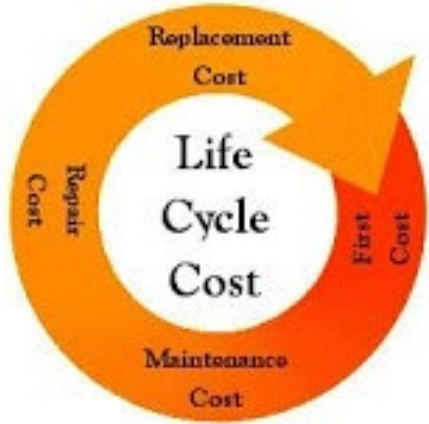
S, Max. Principal  
(Avg: 75%)

Red	+3.224e+06
Orange	+2.000e+06
Yellow	+1.801e+06
Light Green	+1.602e+06
Green	+1.404e+06
Light Blue	+1.205e+06
Blue	+1.006e+06
Dark Blue	+8.072e+05
Very Dark Blue	+6.084e+05
Black	+4.095e+05
Dark Blue	+2.107e+05
Very Dark Blue	+1.194e+04
Black	-1.869e+05
Dark Blue	-3.857e+05



## Aggiornamento delle norme tecniche





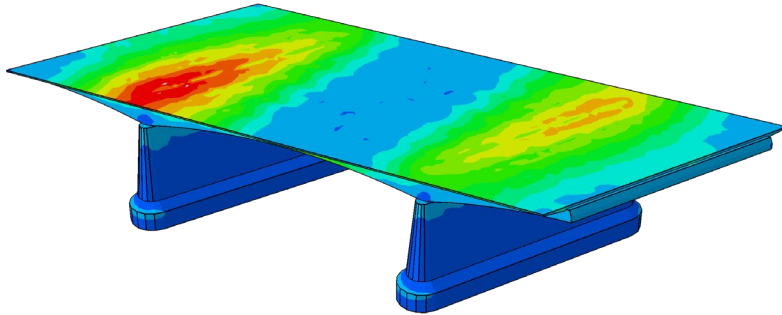
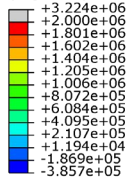
- fornire un **supporto ai processi decisionali** volti a pianificare gli interventi di **manutenzione** in modo ottimale (alto rapporto benefici/costi)
- **migliorare la conoscenza** dell'opera riducendo le incertezze derivanti da una insufficiente quantità di dati disponibili (capacità, richiesta, fattori ambientali)
- supportare la **prioritizzazione** degli interventi (indagini più dettagliate o riparazione/adequamento) a livello di rete di ponti
- **aggiornare la valutazione del rischio** dell'opera e quindi il suo inserimento in una Classe di Attenzione.





- ❑ Supporto a decisioni relative alla **limitazione d'uso** del singolo ponte (restrizioni del traffico)
- ❑ Supporto a decisioni relative alla **prioritizzazione** degli interventi di emergenza (ispezioni visive/riparazioni)

S, Max. Principal  
(Avg: 75%)



Per esempio al livello 3 e 4 delle linee guida

## Livello 3: valutazioni preliminari

sulla base della capacità da norme di progetto e del **carico da traffico** attuale

## Livello 4: valutazioni accurate NTC

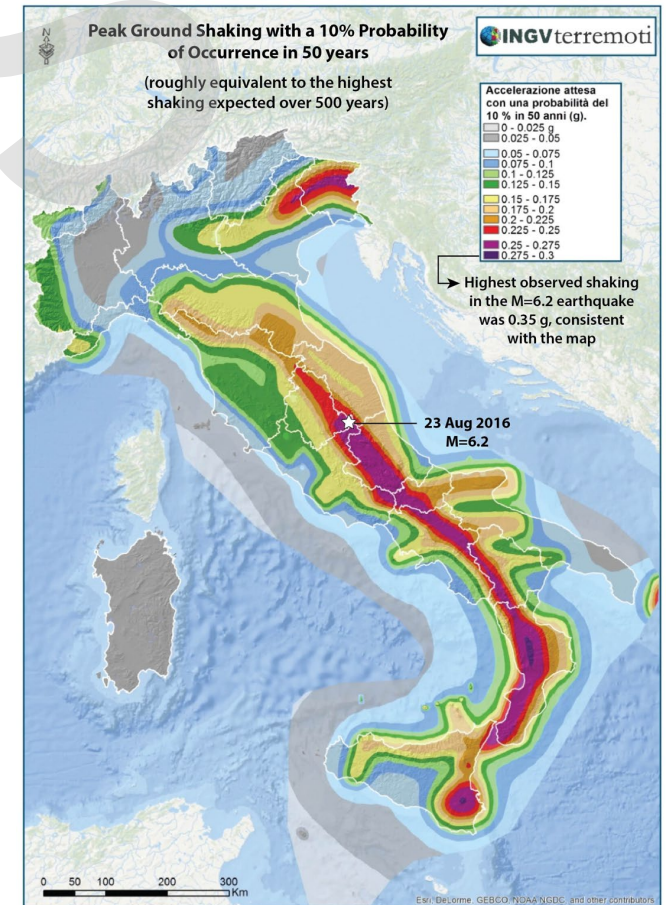
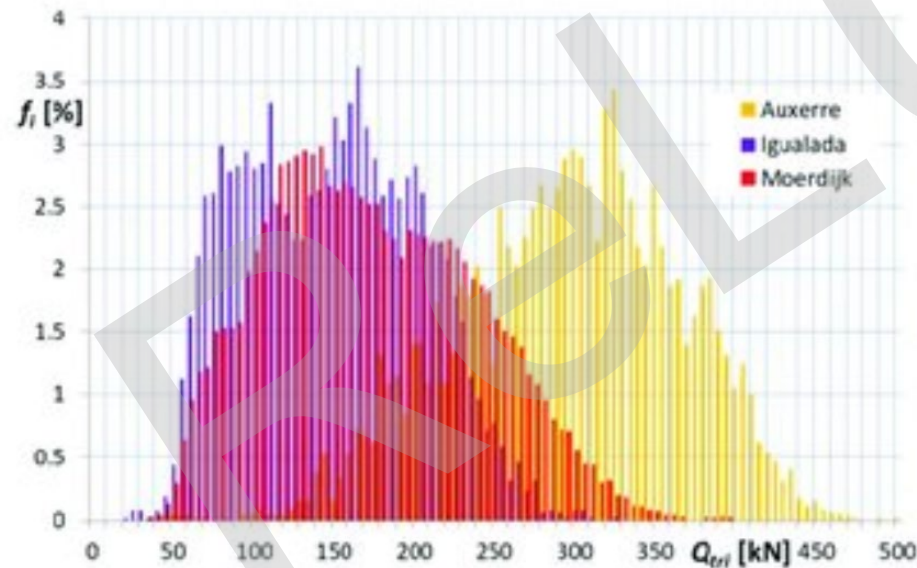
sulla base di informazioni (misure e modelli) relative alla **condizione e alle azioni effettive**

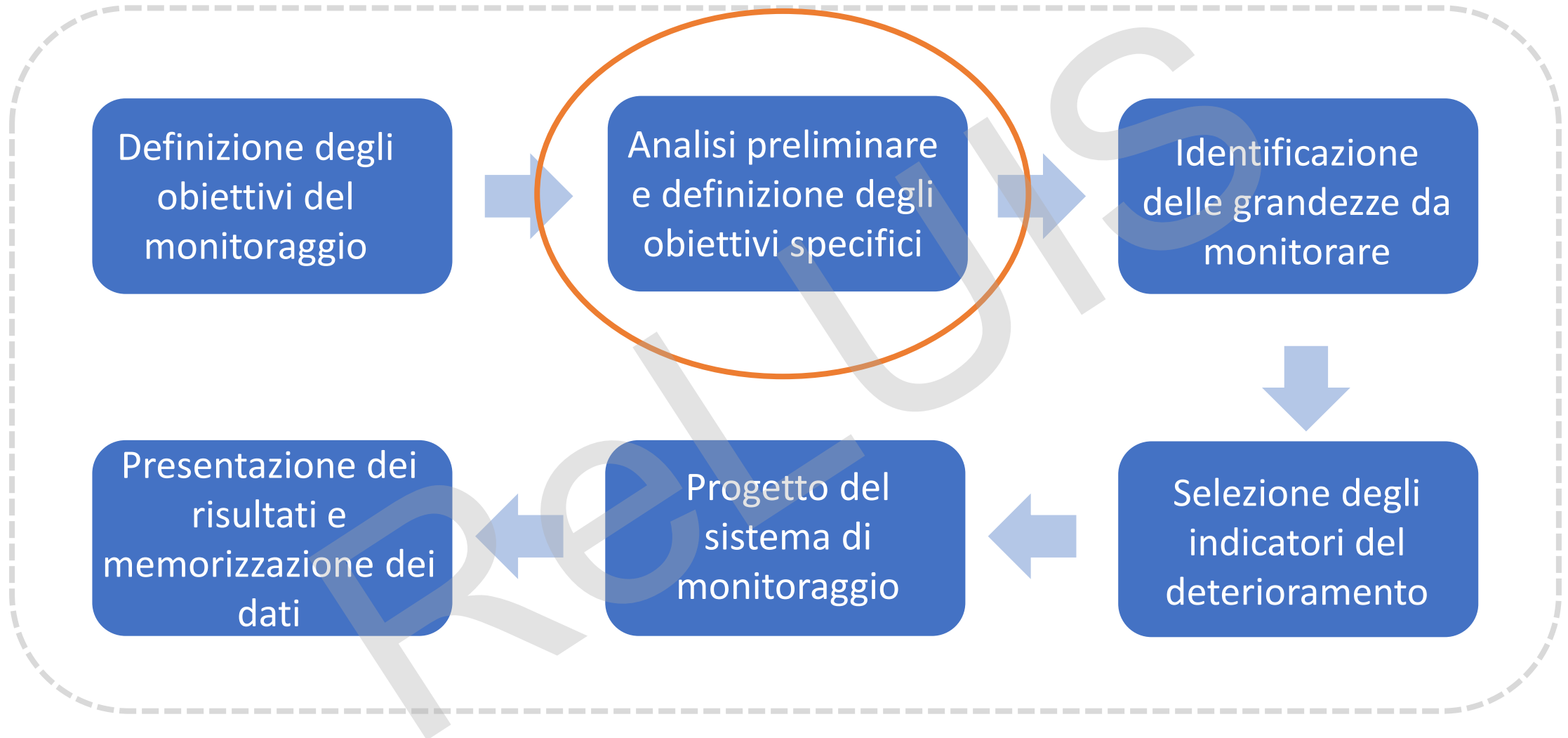
# Obiettivi e finalità del monitoraggio: Aggiornamento delle norme tecniche



pericolosità sismica

carico da traffico







La conoscenza di dettaglio della struttura e dell'evolversi del suo comportamento è raramente possibile ma **ampliare la rete** di sensori **non è una soluzione** al problema

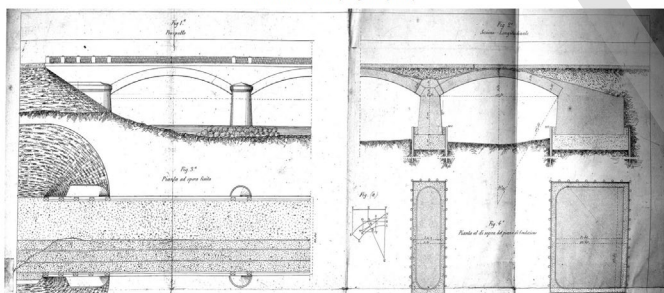
**Individuare un numero ridotto di grandezze significative** che contengono le informazioni essenziali sulla struttura.

## Come: analisi preliminare dell'opera

- tipologia
- organizzazione strutturale
- materiali impiegati
- la presenza di componenti essenziali ad un corretto esercizio e quindi critici;
- carichi attesi
- condizioni ambientali

per individuare meccanismi specifici di collasso o di danneggiamento della struttura

## Raccolta documentale



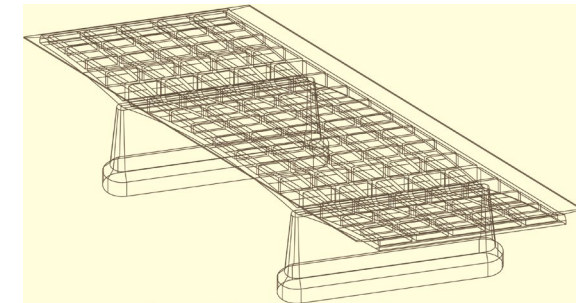
## Rilievo geometrico



## Indagini diagnostiche



## Analisi strutturale





La conoscenza di dettaglio della struttura e dell'evolversi del suo comportamento è raramente possibile ma **ampliare la rete** di sensori **non è una soluzione** al problema

**Individuare un numero ridotto di grandezze significative** che contengono le informazioni essenziali sulla struttura.

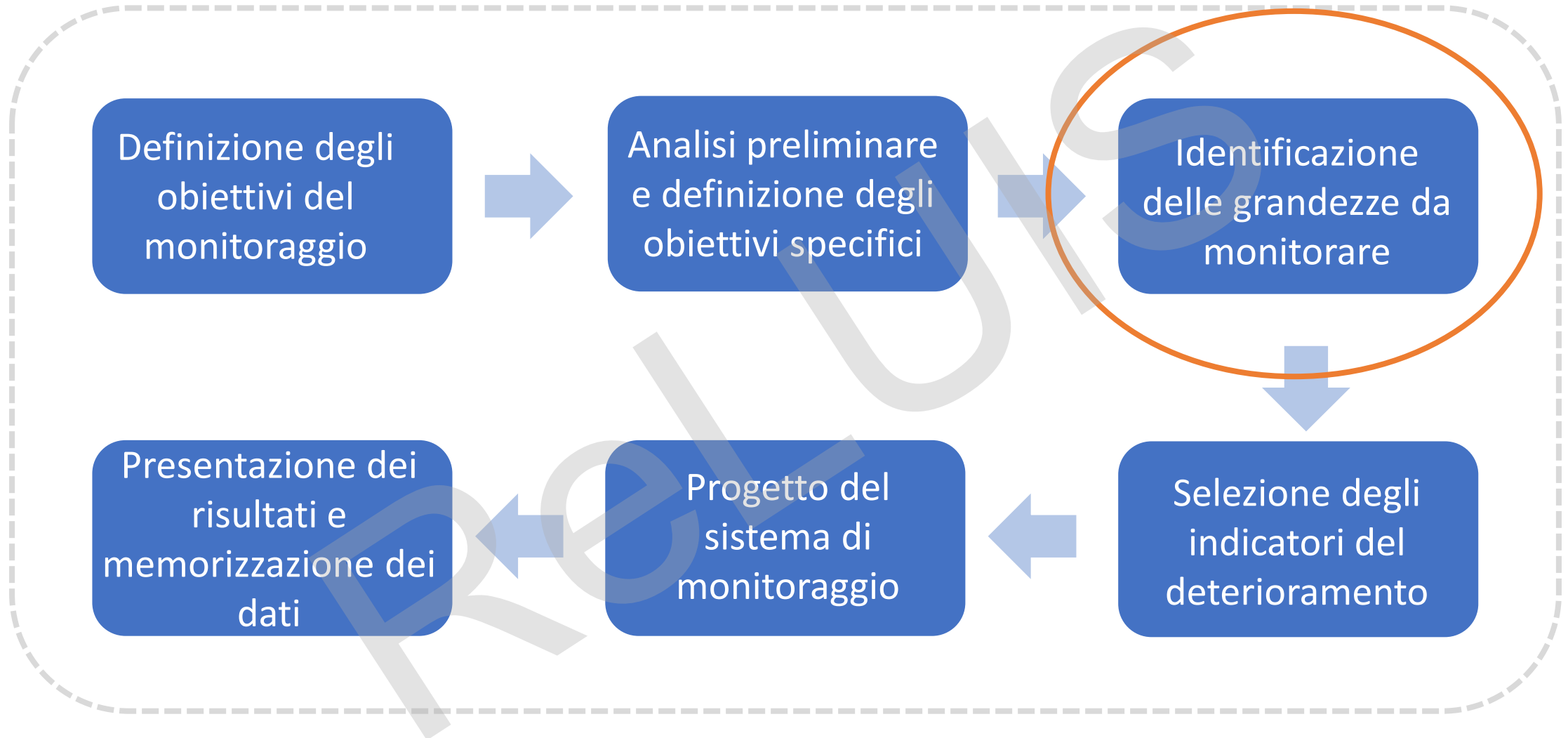
## Cosa:

- una caratteristica delle azioni sulla struttura
  - il traffico giornaliero medio,
  - il carico eccezionale massimo,
  - l'accelerazione sismica alla base di una pila,
  - la temperatura,
  - ...
- una caratteristica della risposta strutturale
  - ampiezza di una vibrazione
  - spostamento permanente dopo l'azione sismica,
  - ...
- parametri che definiscono il comportamento strutturale quali funzioni di trasferimento o parametri modali.

## Attenzione!

- ✓ non includere il rilievo di grandezze ininfluenti nei modelli interpretativi (con un aggravio dei costi)
- ✓ non dimenticare grandezze che potrebbero essere significative;

L'esperienza e il giudizio ingegneristico dello strutturista sono fondamentali e spesso sufficienti per eseguire questa analisi;  
**nei casi più complessi può essere d'aiuto la disponibilità di un modello di calcolo.**



Tenere sotto controllo il valore di alcuni parametri significativi

- Spostamenti
- Deformazioni
- Cedimenti
- Indici di comportamento globale (e.g. frequenze proprie)

opportunamente scelti in modo da individuare con maggiore facilità l'approssimarsi o il raggiungimento di uno **stato limite di danno rilevante** o, nei casi più gravi, di **possibile collasso**.

Il confronto dei valori assunti da tali parametri con valori limite derivanti dal calcolo o dall'esperienza permette al gestore, in caso di superamento, di prendere i provvedimenti d'urgenza più opportuni:

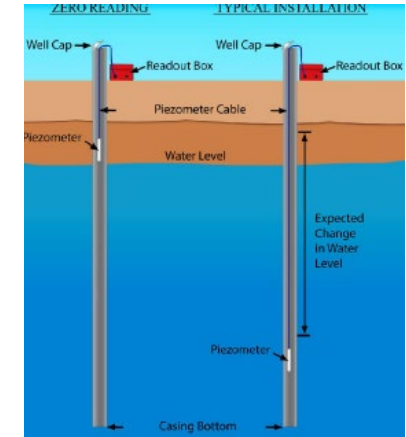
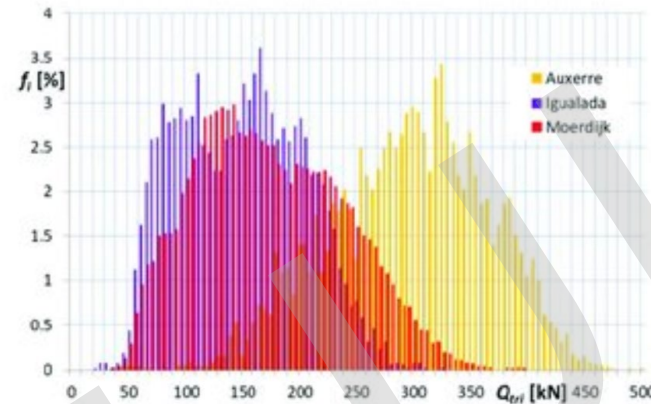
- ✓ messa fuori servizio dell'opera
- ✓ attuazione di opere di presidio
- ✓ esecuzione di una campagna di ispezioni e controlli specifici.

In alcuni casi il sistema attiva in maniera automatica il processo di messa in sicurezza dell'opera: per esempio, in caso di sisma, il valore di accelerazione raggiunto può attivare l'interruzione immediata del traffico nell'area interessata dal sisma.

Oltre ad individuare la gravità del verificarsi di un comportamento anomalo, segnalato dall'andamento non in linea con le previsioni o con le misure precedenti di alcune risposte caratteristiche della struttura alle azioni esterne (**anomalia**), il sistema di monitoraggio è anche di supporto ai tecnici per definire **l'origine e la natura** del degrado in atto e per darne una classificazione.

Per questo motivo è necessario **affiancare alla rete di sensori un modello di riferimento** della struttura sufficientemente sofisticato per tener conto dei meccanismi di degrado a cui la struttura può andare incontro, in modo da poter sapere quali parametri (desumibili sia attraverso misure dirette che in modo indiretto attraverso elaborazioni successive delle misure stesse) sono indicativi della manifestazione di un fenomeno di degrado, e quali trend di variazione di tali parametri sono correlati all'avanzamento del fenomeno stesso.

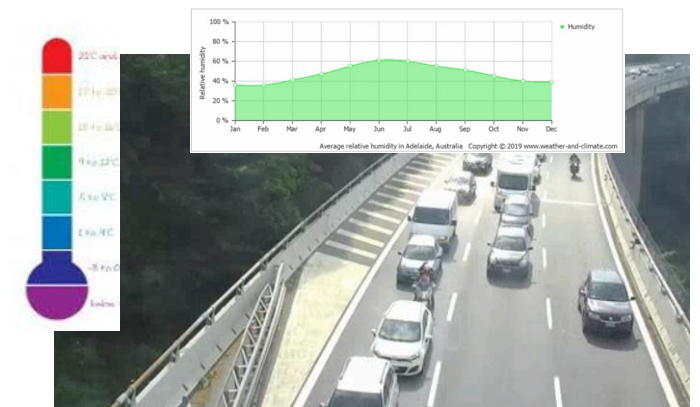
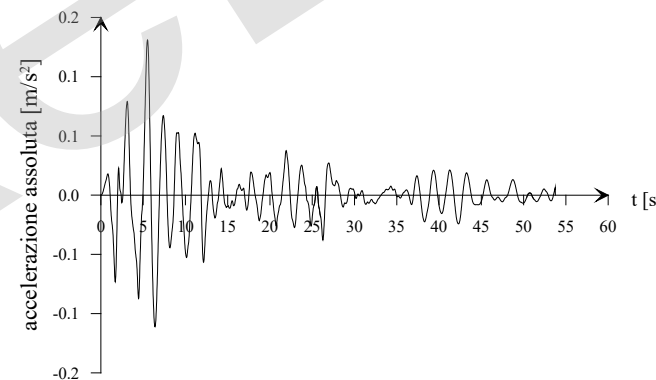
I dati da acquisire devono descrivere vari aspetti che descrivono il fenomeno e che influiscono sul comportamento strutturale



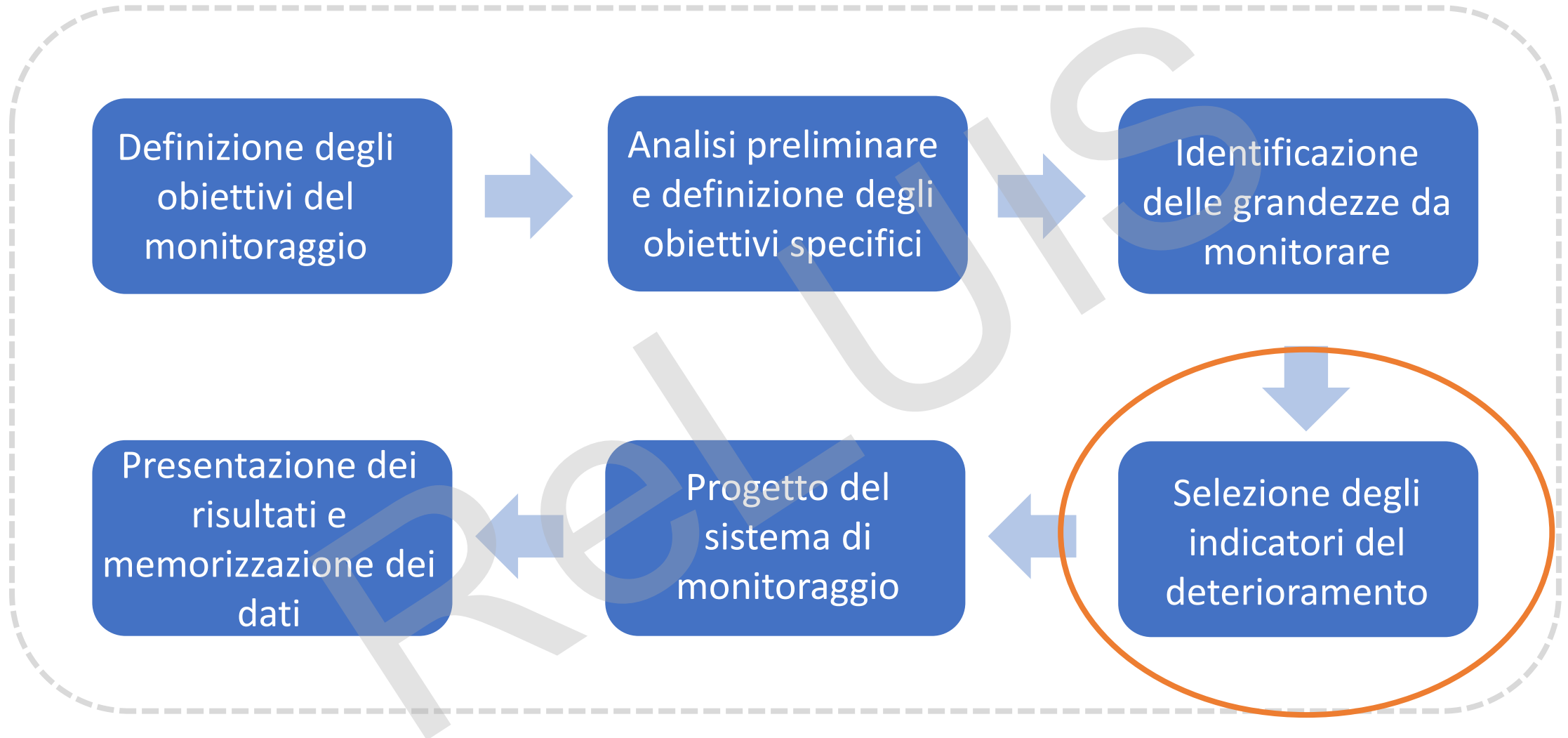
**Fenomeni di degrado** (corrosione, fatica, scalzamento pile, perdite di tensione...)

**Azioni** (traffico, azioni sismiche, portata del fiume,...)

**Parametri ambientali** (temperatura, umidità, vento...)







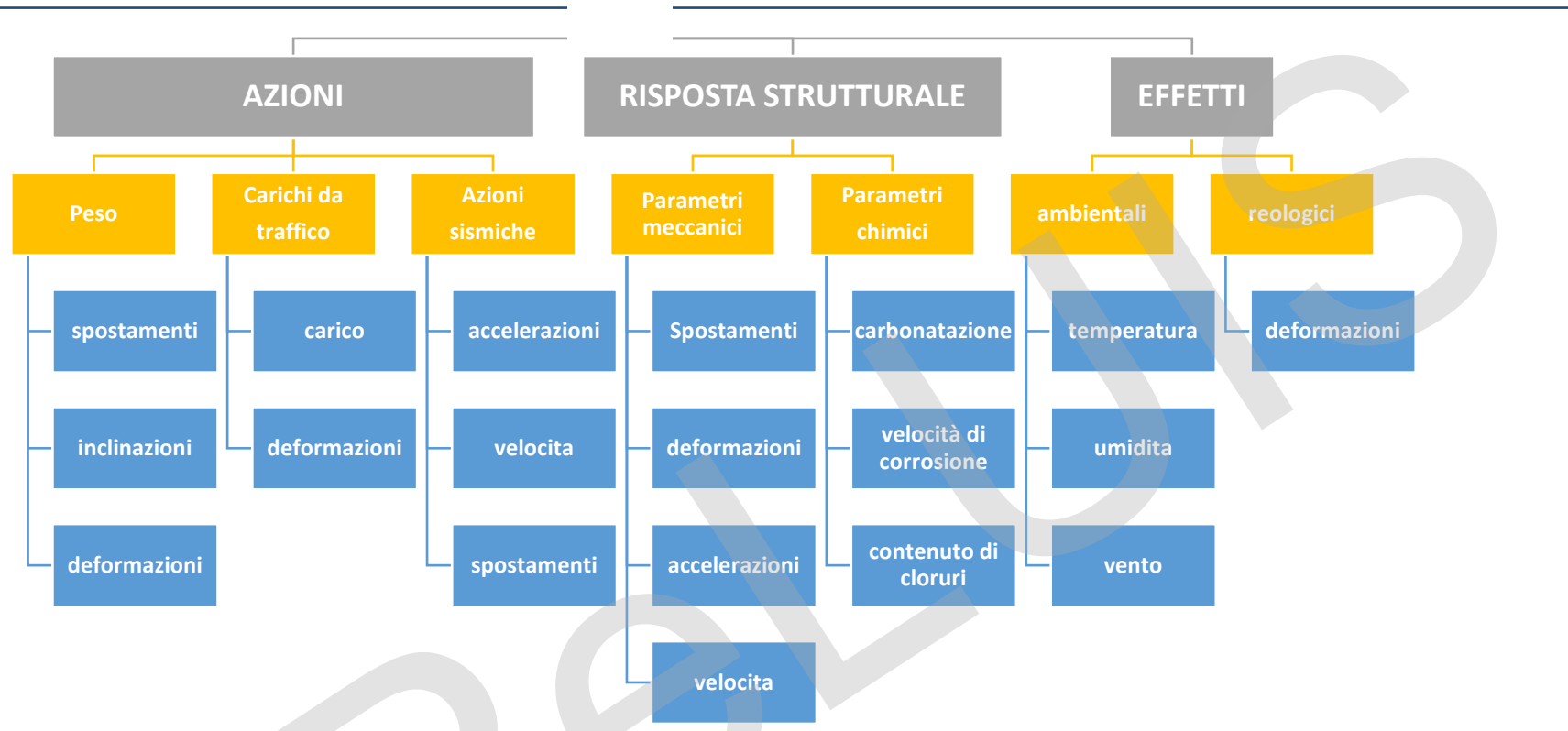
Per ciascun fenomeno da monitorare devono essere scelti uno o più indicatori che possono essere estratti dalle misure:

- **sensibili** (e.g. corrosione) al fenomeno che si deve investigare
- **robusti** rispetto ad altri fenomeni (e.g. variazioni termiche)

Gli indicatori possono avere **carattere locale e globale**.

Gli **indicatori con carattere globale** forniscono informazioni che riguardano la struttura nel suo complesso. Un esempio di indicatori globali sono i parametri modali.

Gli **indicatori locali** forniscono informazioni relative a posizioni o porzioni di struttura limitate all'intorno della zona in cui la misura è stata acquisita. Fanno parte di questa categoria gli indicatori ricavati da indagini diagnostiche



MISURE

.. Linee guida ...

## Analisi delle misure



INDICATORI

Allo stato attuale delle conoscenze si considerano fra i più sensibili al danno lo **smorzamento modale**, le **forme modali** (modi superiori) e **loro derivate**, la **densità spettrale di potenza (PSD)** e i **modi delle deformazioni**, cioè i modi derivati dalle storie temporali delle deformazioni anziché dalle accelerazioni.

Per la valutazione del **danno a fatica** nei ponti metallici, si utilizzano in genere l'algoritmo del flusso di pioggia (rain flow count) e la regola di **Miner-Palmer**.



# Misure e indicatori

## analisi modale operativa (OMA)

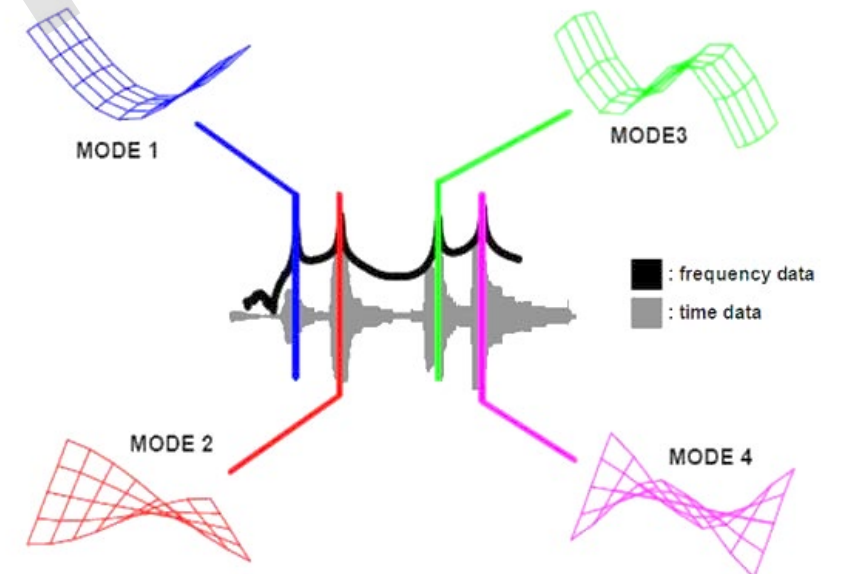
Metodologia sperimentale utilizzata per identificare le **caratteristiche dinamiche** di una struttura durante le sue normali condizioni operative. È suddivisa in **due fasi**:

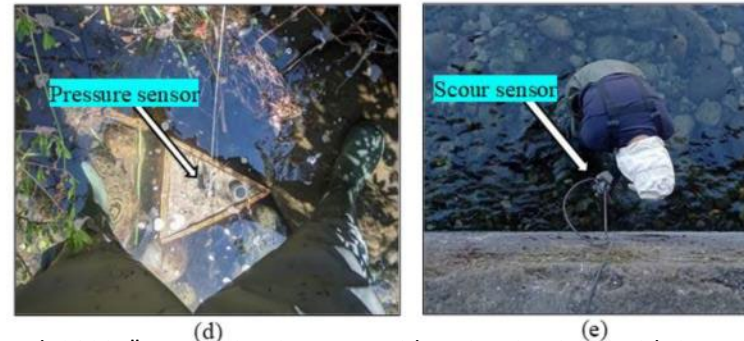
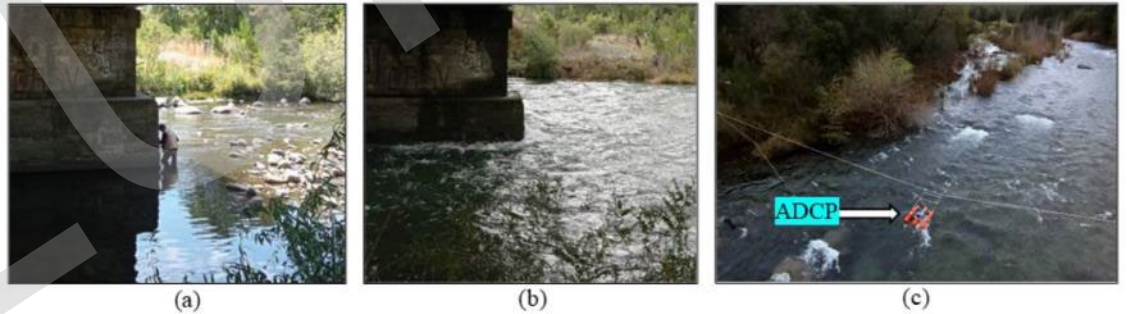
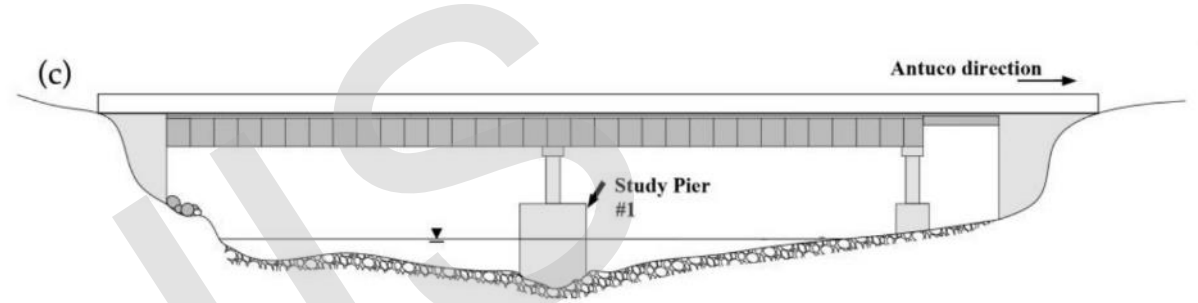
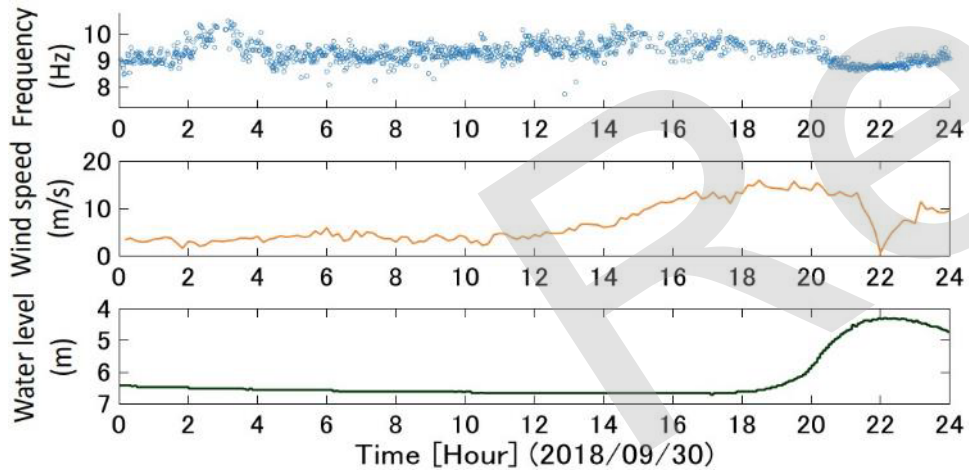
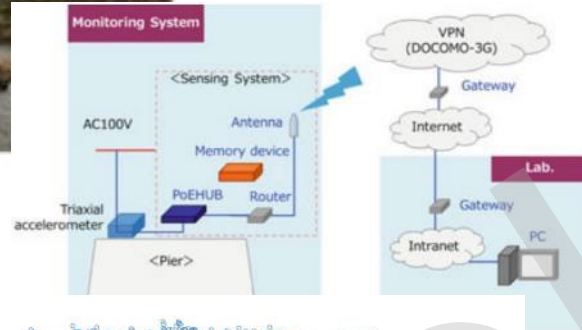
- 1) **Prova di vibrazione ambientale** – misura della risposta dinamica dovuta tipicamente a eccitazioni non note
- 2) **Identificazione dinamica** – analisi della risposta dinamica per ottenere le proprietà modali

Risposta strutturale per diverse eccitazioni

Eccitazione ambientale	Banda di frequenze (Hz)	Spostamenti misurati ( $\mu\text{m}$ )	Velocità misurate (mm/s)	Accelerazioni misurate ( $\mu\text{g}$ )
Traffico	1-80	1-200	0.2-50	2-100
Vento	0.1-10	10-10 <sup>5</sup>		
Acustico (p.e. traffico esterno)	10-250	1-1100	0.2-30	2-100
Sisma	0.1-30	10-10 <sup>5</sup>	0.2-400	2-2000

Adattato da "Vibration of Buildings – guidelines for the measurement of vibrations and their effects on buildings," ANSI S2.47-1990 (ASA 95-1990)



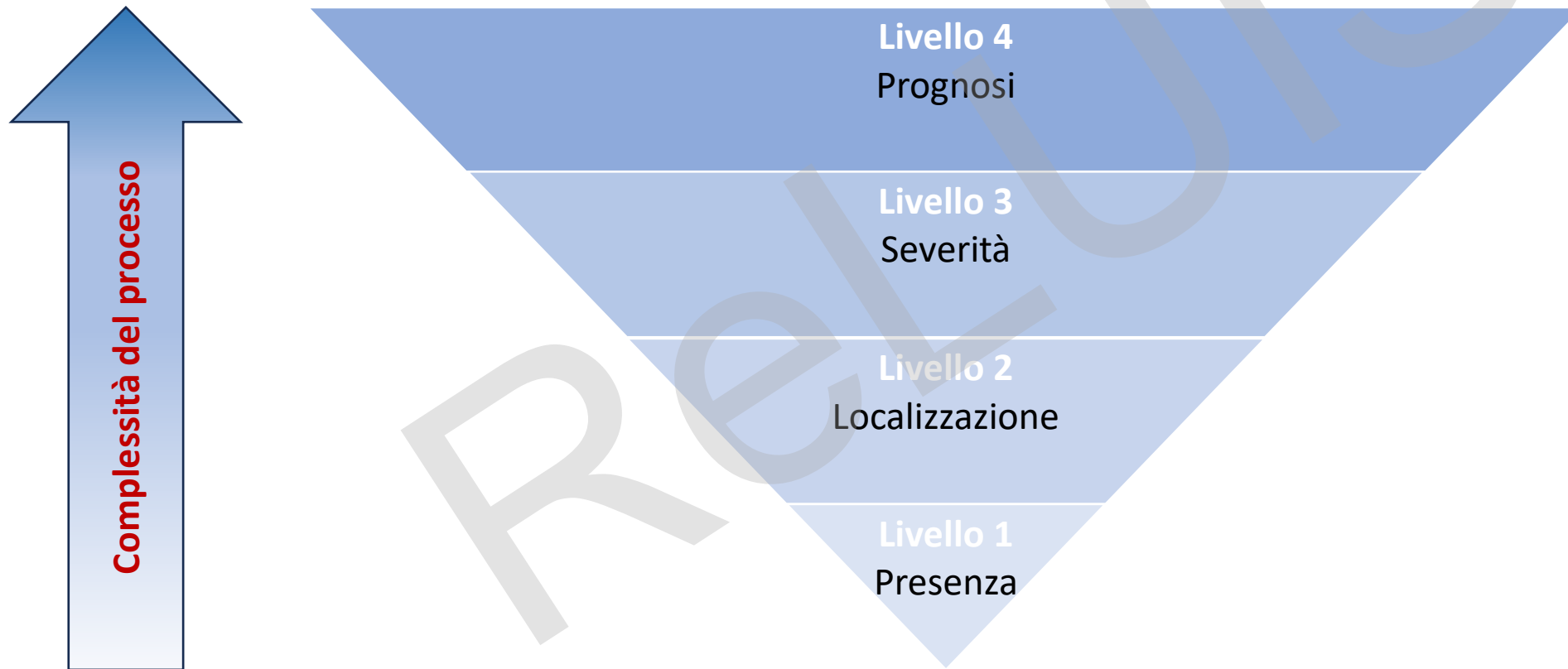


San Martin et al. 2023. "Monitoring Scour at Bridge Piers in Rivers with Supercritical Flows" Hydrology 10, no. 7: 147.

Kim et al. (2021) Scour Detection of Railway Bridges by Microtremor Monitoring

Il sistema di monitoraggio strumentale è finalizzato principalmente a supportare i tecnici dell'ente gestore nel definire il manifestarsi di eventuali criticità strutturali dell'opera, attraverso la **valutazione** di anomalie dovute ad azioni ordinarie e/o eccezionali e l'identificazione dell'insorgere o dell'avanzare di fenomeni di degrado.

Tale valutazione può essere condotta a vari livelli di dettaglio che corrispondono ad una complessità via via crescente del processo

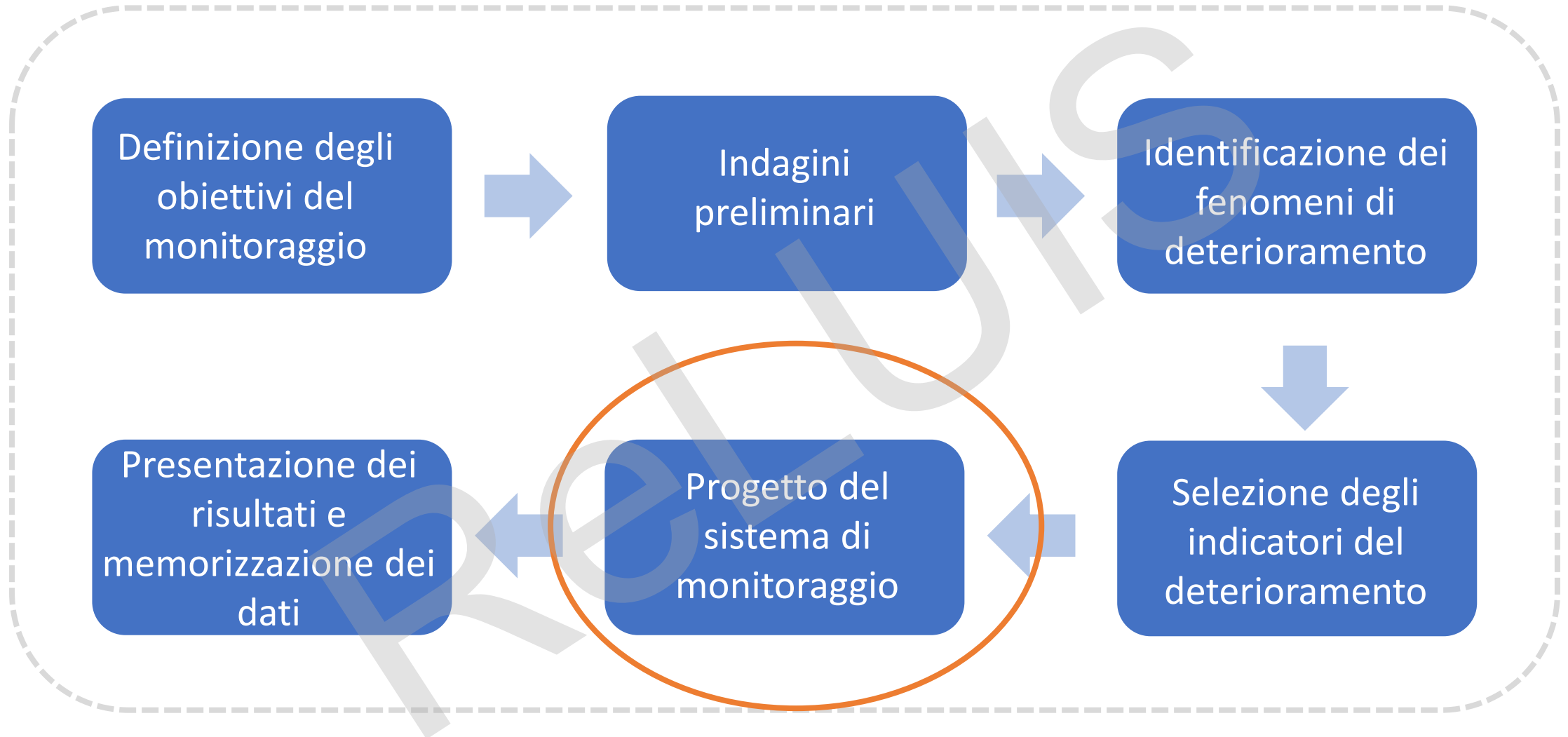


## Analisi dei dati accelerometrici

I metodi di **rilevamento dei danni basati sulle vibrazioni** sono stati sviluppati e applicati per la prima volta nell'ingegneria aerospaziale e meccanica. La comunità dell'ingegneria civile ha studiato il rilevamento dei danni basati sulle vibrazioni delle strutture dei ponti sin dai primi anni '80.

Metodo	Numero di metodi esaminati	Parametri	Livello di identificazione del danno	note
<b>Rilevamento dei danni basati sulle vibrazioni</b>	circa 20 di cui solo la metà applicati a casi reali	frequenze, forme modali, smorzamento, funzione di risposta in frequenza	Livello 2 senza modello numerico Livello 3 con modello numerico	in assenza di modello è necessario partire da un riferimento a T=0.
<b>Metodi basati su elaborazione del segnale</b>	circa 20 quasi tutti applicati a casi reali	trasformazioni dei segnali accelerometrici	Livello 2 un caso Livello 3 in presenza di dati su struttura non danneggiata	<ul style="list-style-type: none"> <li>• non si prevede uso di modello</li> <li>• sono quasi sempre output only</li> <li>• qualche volta serve dato a T=0</li> </ul>
<b>Model updating di modelli FEM</b>	circa 30 quasi tutti applicati a casi reali	<ul style="list-style-type: none"> <li>• frequenze e forme modali</li> <li>• accelerazioni</li> <li>• deformazioni dinamiche</li> </ul>	Livello 3 - tutti	<ul style="list-style-type: none"> <li>• soprattutto strutture in acciaio</li> <li>• tecniche di ottimizzazione e/o sottostrutture</li> </ul>
<b>Algoritmi di ottimizzazione</b>	meno di 10 di cui solo la metà applicati a casi reali	frequenze, forme modali	Livello 3 - tutti	complicati e onerosi dal punto di vista computazionale
<b>Metodi statistici per serie temporali</b>	circa 10 quasi tutti applicati a casi reali	<ul style="list-style-type: none"> <li>• parametri di regressione</li> <li>• accelerazione input-output</li> </ul>	Livello 2 Livello 3 se usato con input-output	sono necessari dataset estesi
<b>Machine learning</b>	circa 25 di cui solo la metà applicati a casi reali	frequenze, accelerazioni, funzione di risposta in frequenza, trasformazioni dei segnali accelerometrici	Livello 3 i supervisionati Livello 1 i non supervisionati Livello 1-3 i semi-supervisionati	semi-supervisionati utili per monitoraggio on-line, ma è necessario partire da un riferimento a T=0.
<b>Metodi Bayesiani</b>	circa 10 quasi tutti applicati a casi reali	<ul style="list-style-type: none"> <li>• frequenze e forme modali</li> <li>• accelerazioni note</li> </ul>	Livello 3 - quasi tutti	





Analisi ad hoc per il miglior impiego delle risorse economiche a disposizione e delle professionalità coinvolte

- **Importanza dell'opera:** da valutarsi in termini di valore economico e funzione svolta
  - ✓ grandi linee di comunicazione
  - ✓ edifici adibiti a compiti essenziali per la società (ospedali, caserme, edifici pubblici,...)
  - ✓ edifici storici e i beni monumentali
  - ✓ ...
- **Condizioni ambientali:** forte aggressività dell'ambiente in cui la struttura si trova
  - ✓ zone ad alto rischio sismico
  - ✓ condizioni climatiche estreme
  - ✓ ...

in considerazione di una più elevata possibilità di danno.

- **Complessità e grado d'innovazione della struttura:**  
strutture che fanno ricorso a nuovi materiali o impiegano tecniche costruttive innovative  
(in ragione del significativo contributo allo sviluppo e al progresso del settore delle costruzioni che ne potrebbe derivare)
- **Grado di affidabilità del monitoraggio e analisi costi-benefici:** il monitoraggio strutturale rappresenta in prospettiva il naturale sbocco del processo di controllo; **ciò è particolarmente vero per i ponti (esperienze significative).**

Allo stato attuale il monitoraggio non risponde in modo completo a tutte le esigenze di un controllo efficiente e deve essere supportato nelle sue conclusioni da ispezioni, indagini e analisi specialistiche.

## I sensori e le grandezze misurabili

É oggi disponibile una grande varietà di sensori che permettono la misura, con una precisione adeguata, di tutte le grandezze di interesse più comune nel monitoraggio strutturale, quali:

- grandezze meccaniche caratteristiche della risposta strutturale (grandezze cinematiche, grandezze dinamiche, deformazioni);
- grandezze meccaniche caratteristiche delle azioni (forze, pressioni, impulsi, azioni ambientali);
- grandezze termodinamiche (temperature, irraggiamento);
- grandezze chimiche (concentrazioni di agenti, umidità, pH);
- grandezze elettromagnetiche (potenziali elettrici e magnetici).

Preferibile l'osservazione di grandezze fisiche direttamente correlate ai parametri di comportamento, in modo da limitare le incertezze relative al modello di interpretazione

Nella concezione di sistemi per il monitoraggio strutturale, nelle LLGG si sottolinea l'opportunità di considerare l'installazione delle seguenti tipologie di sensori:

- Stazioni meteorologiche;
- Sistemi WIM (Weight-in-Motion);
- Sensori per il controllo dei fenomeni di corrosione;
- Sensori di spostamento/rotazione, deformazione, accelerazione, temperatura e umidità relativa;
- Sensori di irraggiamento (piranometri);
- Sensori per il controllo dei fenomeni di scalzamento delle pile.

Per il rilevamento degli spostamenti assoluti (cioè rispetto ad un riferimento fisso) possono essere utilizzati **sensori satellitari GPS** o per altra costellazione geostazionaria, ove visibile.

**In via sperimentale** possono essere impiegati metodi di **rilevamento satellitare con tecnica SAR** (metodo dei permanent scatterers o con riflettori) purchè siano presenti anche sensori tradizionali a contatto o remoti terrestri per la convalida dei dati.



Per ponti in zona sismica oltre ai sensori collocati sulla struttura, devono essere installati accelerometri per il **rilevamento del moto al suolo** in corrispondenza delle **spalle** e almeno uno di riferimento in **posizione lontana dal ponte**;

Per viadotti di lunghezza notevole (oltre 1 km), è necessario il posizionamento di accelerometri al suolo in corrispondenza di **posizioni intermedie significative**.

L'acquisizione nella memoria degli accelerometri è **attivata da trigger** e successivamente i dati sono trasferiti all'elaboratore di processo del sistema SHM.

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

Ove se ne manifesti l'opportunità, potranno essere installati strumenti per il monitoraggio continuo dei **movimenti delle fondazioni delle pile, delle spalle e dei terreni interessati**, integrati nel sistema principale.

Anche per tali applicazioni sono disponibili ampie tipologie di strumentazione e sensori adatti all'integrazione in sistemi SHM.

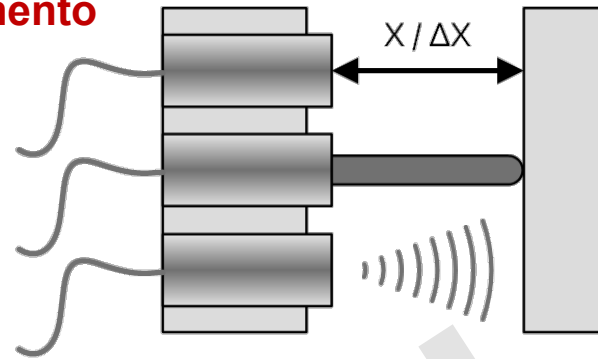
Per i ponti soggetti a rischio di **franamento dei versanti**, deve essere valutata l'opportunità di installare sistemi per il monitoraggio delle zone in frana potenzialmente incidenti sul ponte, eventualmente con segnalazioni automatiche di allarme e comunque interfacciati con il sistema principale.

Per i ponti soggetti a **rischio idraulico**, dovrà essere valutata la necessità di installare lungo i corsi d'acqua attraversati ed in prossimità del ponte **sezioni di misura di velocità, portata e livello idrico**, eventualmente con segnalazioni automatiche di allarme e comunque interfacciati con il sistema principale, e correlate a **stazioni meteorologiche**.

Si renderà inoltre necessario attivare specifici **sistemi di rilevamento per la verifica dell'efficienza delle opere di confinamento** e di controllo delle portate nelle zone in prossimità del ponte.

## Sensoristica per il monitoraggio strutturale

Spostamento



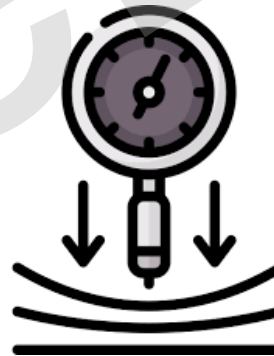
Deformazione



Accelerazione



Forza



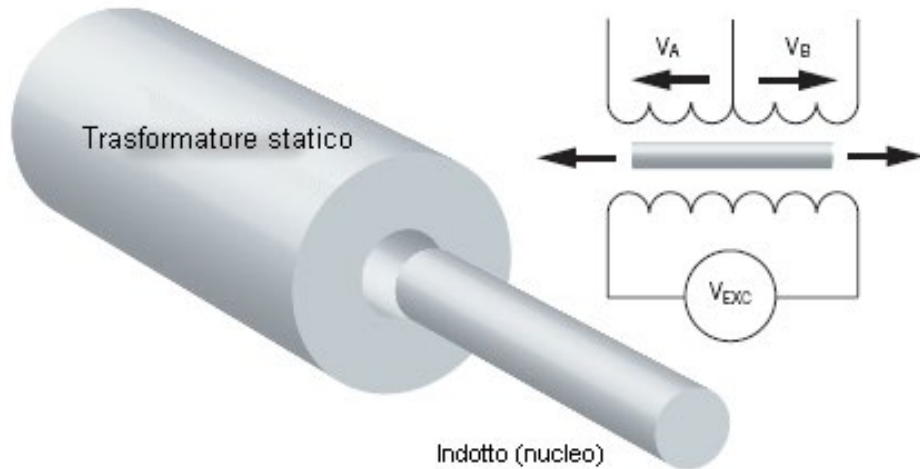
Temperatura



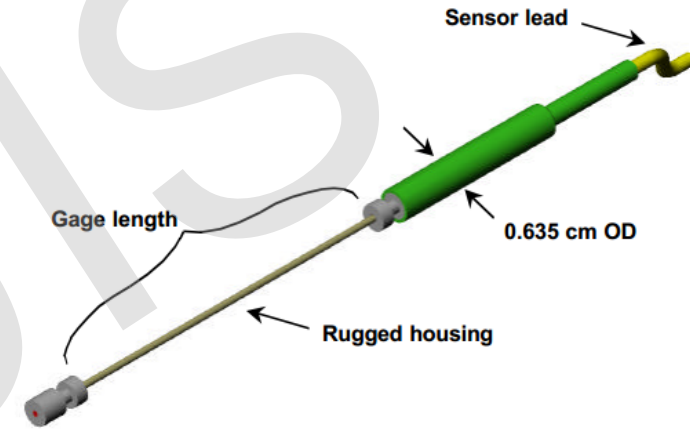


## Sensori di spostamento

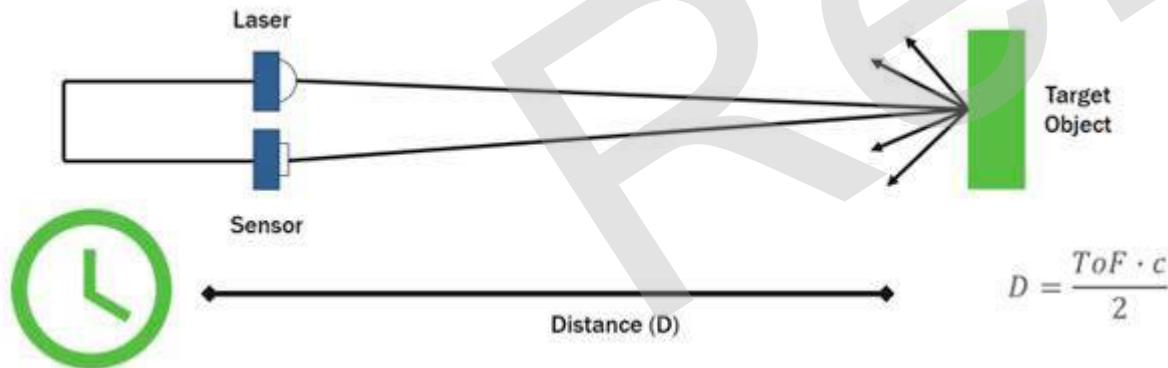
### Linear Variable Differential Transformer (LVDT)



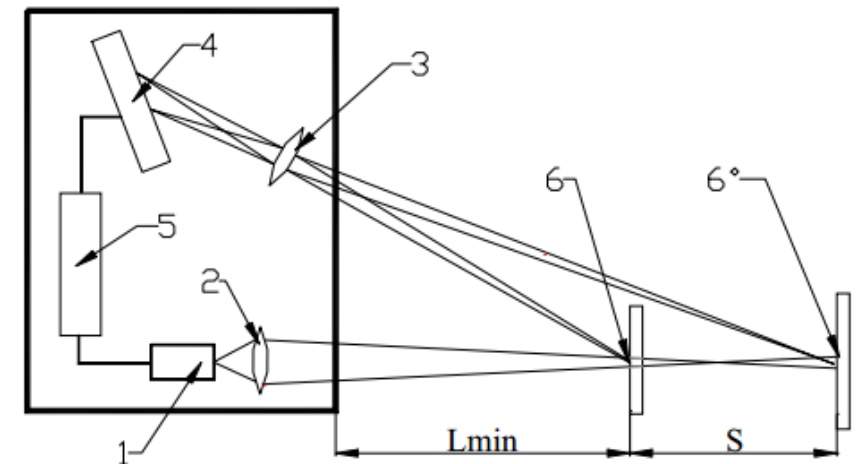
### Long Gauge Fibre Optics



### Laser a tempo di volo

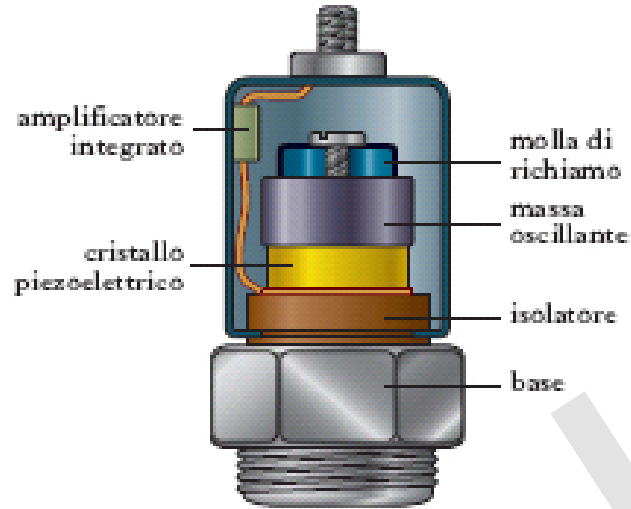


### Laser (position sensitive detector - PSD)

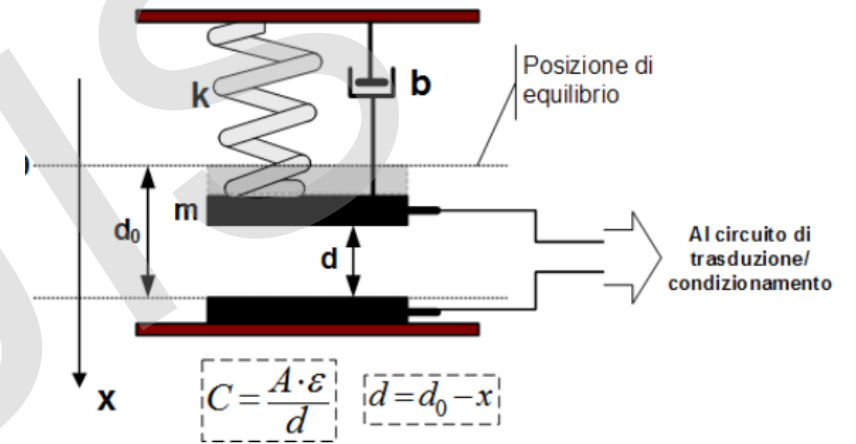


## Sensori di accelerazione

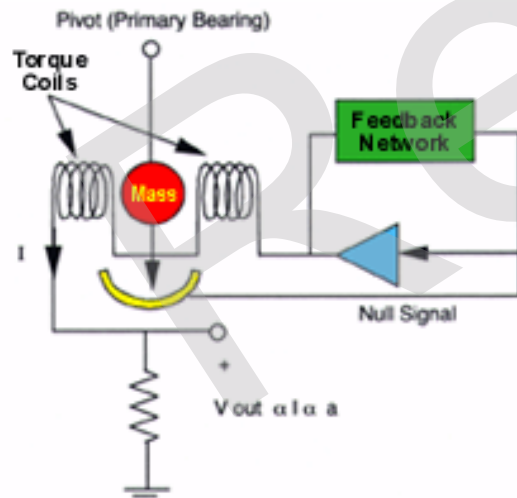
### Accelerometro piezoelettrico



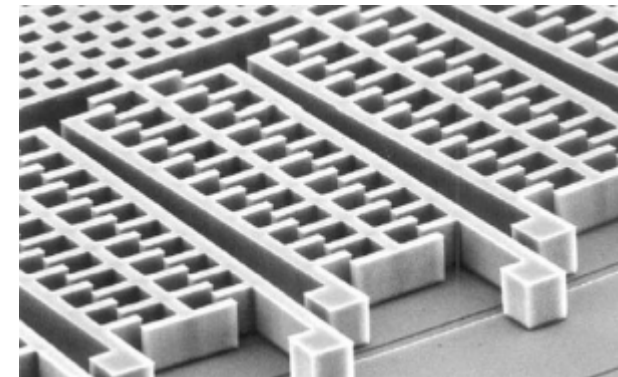
### Accelerometro capacitativo



### Accelerometro a forza bilanciata

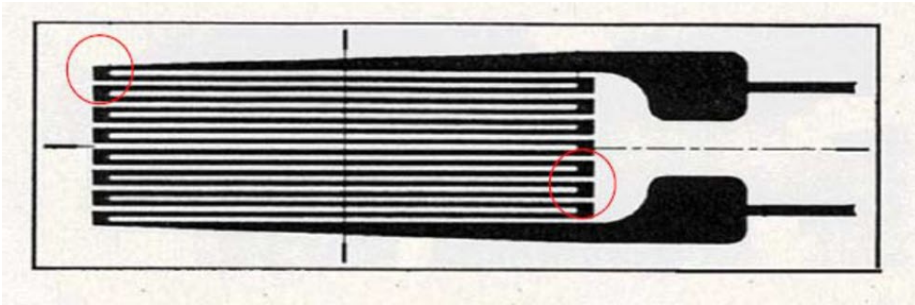


### MEMS (micro electro-mechanical systems)

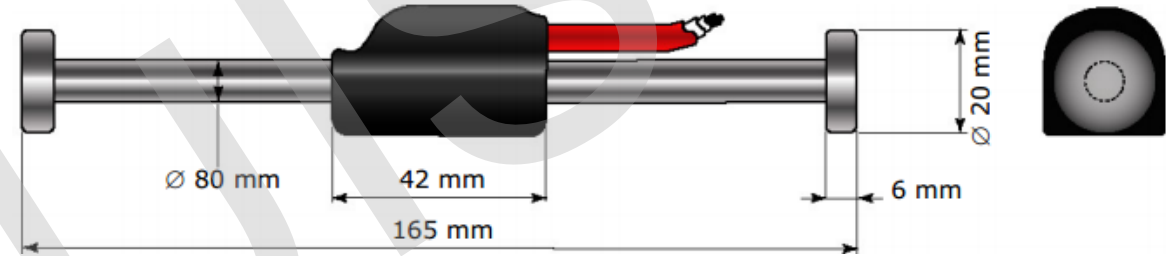


## Sensori di deformazione

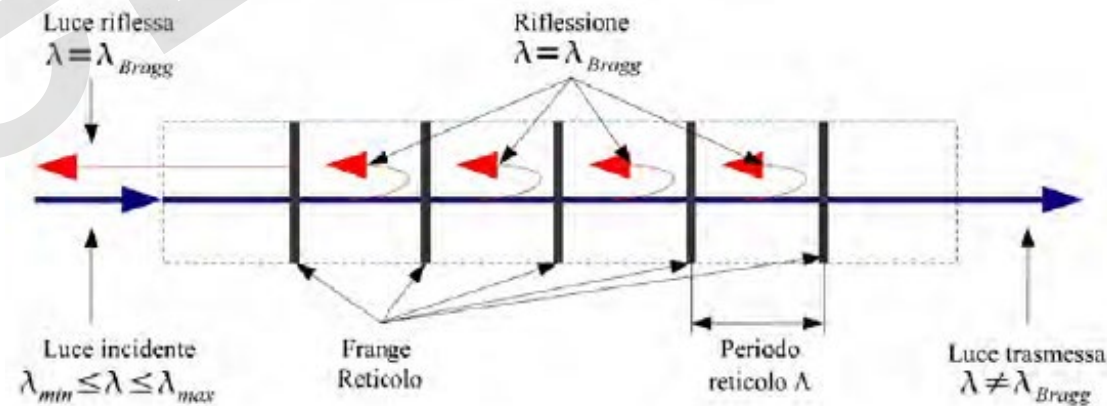
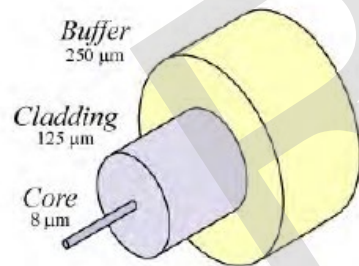
### Strain gauge elettrico



### Sensore a corda vibrante

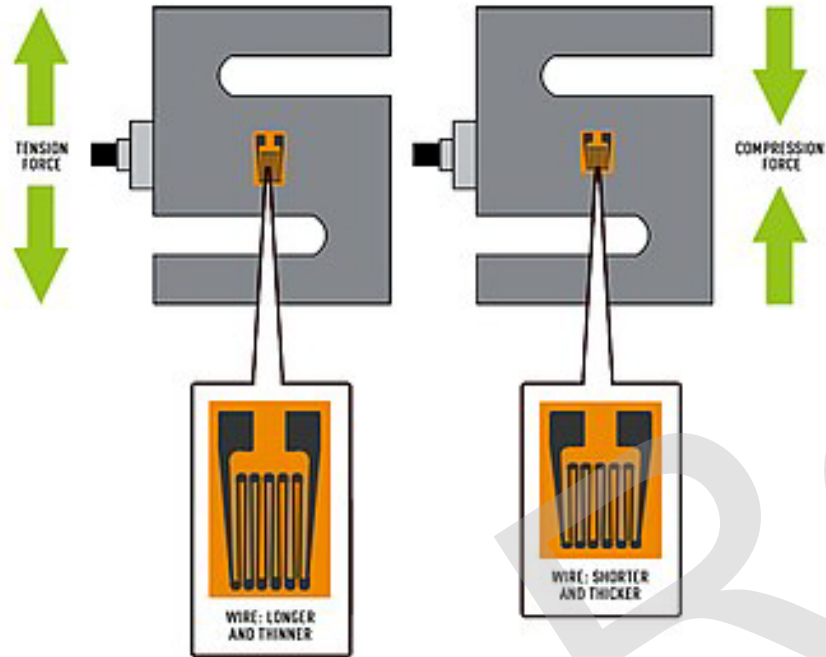


### Fibra ottica a reticolo di Bragg

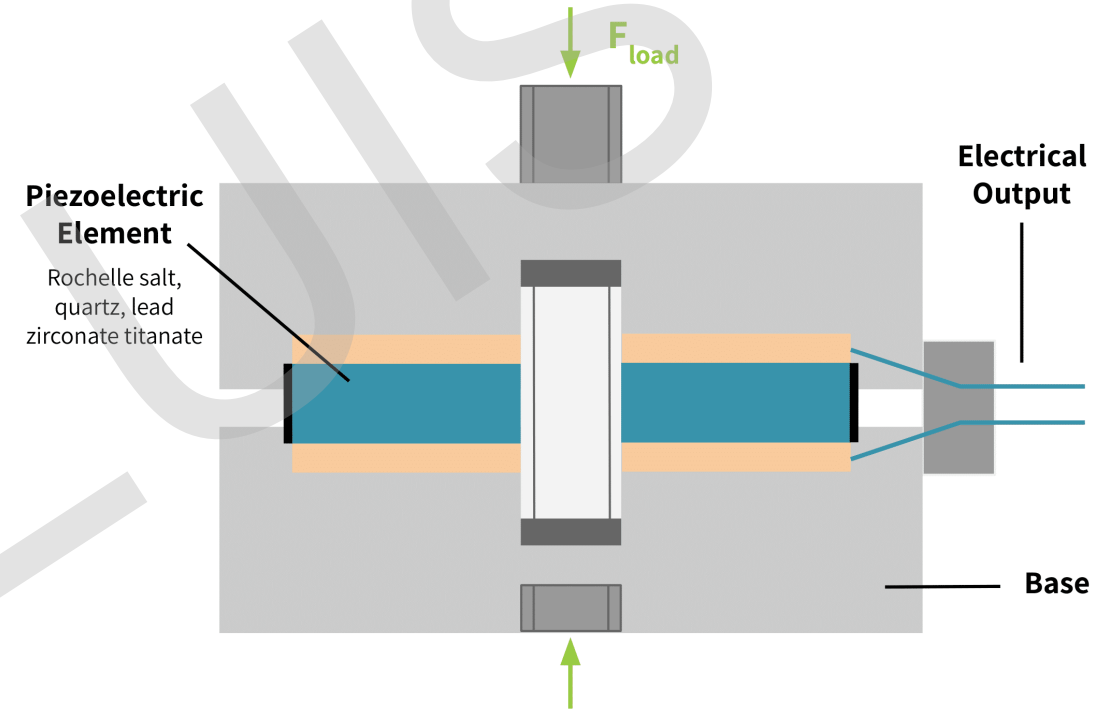


## Sensori di forza

### Cella di carico a resistenza elettrica



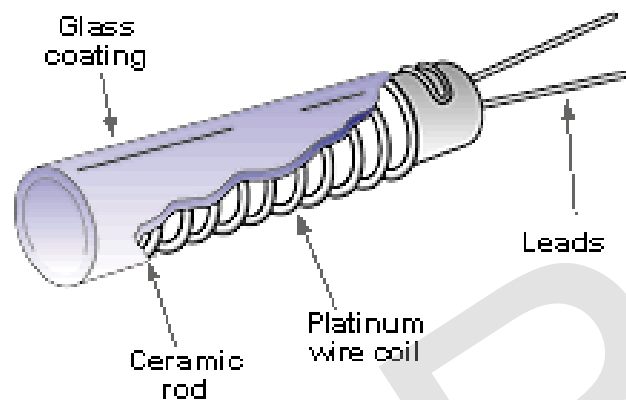
### Cella di carico piezoelettrica



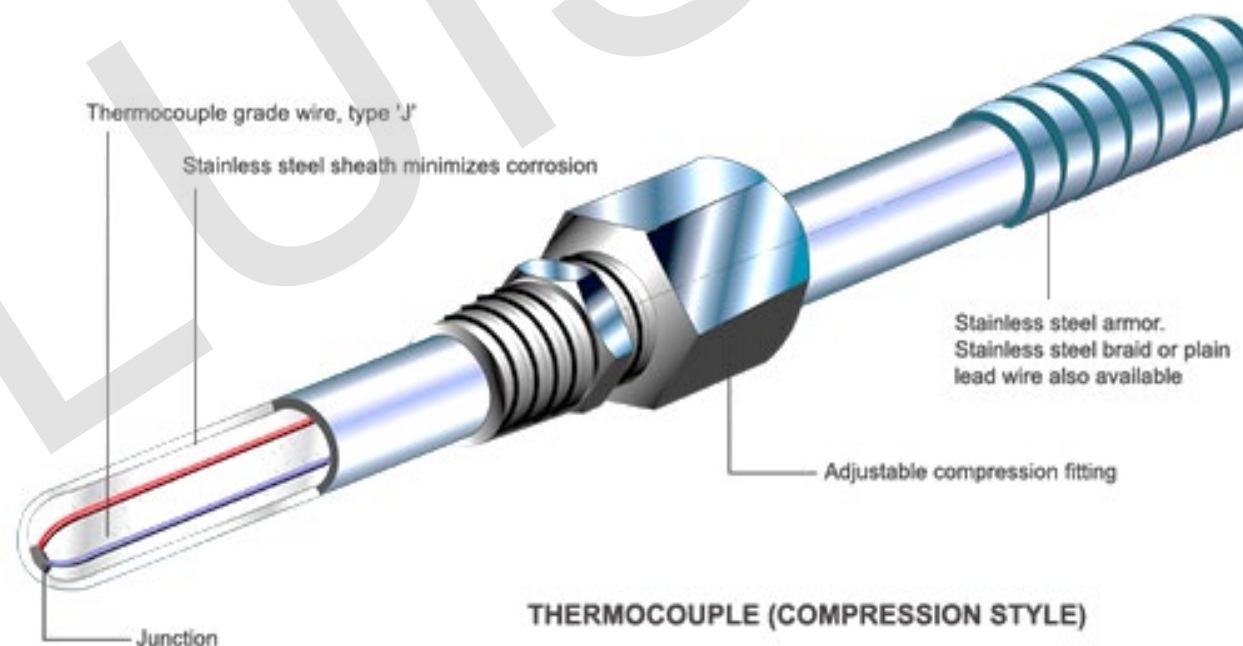


## Sensori di temperatura

### Termometro a resistenza elettrica



### Termocoppie



## Numero e posizione dei punti misura

Dipendono da:

- tipologia della struttura,
- obiettivi del monitoraggio,
- accuratezza richiesta e
- tipologia di strumentazione (i.e. termografia, interferometria e fotogrammetria: qualsiasi punto nel campo di osservazione.)

N.B. 1 strumentazione è fisiologicamente soggetta a malfunzionamenti e degrado e che la determinazione iniziale del numero e posizione della strumentazione può essere variata nel corso del monitoraggio → **opportuna ridondanza**

N.B. 2 in alcuni casi il monitoraggio strutturale richiede la misura o l'identificazione di un campo (per esempio: la deformata, la forma modale di una struttura). In questo caso, la scelta del numero e della posizione dei punti di misura è sempre un compromesso tra la necessità di osservare in modo esaustivo il campo, limitando le incertezze dovute all'incompletezza del campo osservato, e il costo dei sensori. Ogni configurazione strumentale implica delle incertezze da considerarsi opportunamente nell'interpretazione delle osservazioni.

## Specifiche del sistema di misura.

La misura di una grandezza comporta il ricorso ad una "catena di misura" idealmente costituita dal sensore vero e proprio, dall'elettronica di condizionamento del segnale in uscita dal sensore, dal cavo di collegamento al sistema di conversione analogico-digitale. **Esiste una vasta possibilità di scelta fra soluzioni diverse.**

È opportuno che il **progetto di massima** si limiti a definire in modo chiaro le specifiche di tipo metrologico richieste in base alle considerazioni sull'accuratezza lasciando a chi svilupperà il progetto esecutivo il compito di scegliere il sensore e la soluzione hardware più conveniente sul piano della configurazione logistica della rete, del costo e della affidabilità nel rispetto comunque delle **specifiche metrologiche** richieste.

## Specifiche metrologiche

- **precisione:** è il grado di concordanza tra indicazioni o valori misurati ottenuti da un certo numero di misurazioni ripetute dello stesso oggetto o di oggetti simili, eseguite in condizioni specificate.
- **ripetibilità:** è il grado di concordanza tra i risultati di successive misurazioni dello stesso misurando, eseguite nelle stesse condizioni di misura
- **stabilità:** è l'attitudine di uno strumento di misura a mantenere le proprie caratteristiche metrologiche costanti nel tempo;
- **sensibilità** alle condizioni ambientali: è definita come la variazione di sensibilità di un sensore in funzione al cambiamento di una qualsiasi condizione ambientale che influisce sulla misurazione
- **campo di misura:** l'intervallo tra due valori del misurando, o della quantità che è fornita, all'interno del quale i limiti di incertezza dello strumento di misura sono specificati (Per esempio:  $\pm 2$  g,  $-20^{\circ}$  -  $80^{\circ}\text{C}$ )
- **linearità:** è definita come l'abilità di uno strumento di misura di fornire un'indicazione avente una relazione lineare con una quantità definita al netto di grandezze di influenza
- **rapporto segnale/rumore (SNR):** è definito come il rapporto, all'interno di una certa banda di frequenza, tra l'ampiezza picco-picco del segnale e il rumore in termini di RMS.
- **funzione di trasferimento:** è la funzione di trasferimento in cui le quantità complesse sono le trasformate di Fourier di ingressi e uscite dello strumento
- **sensibilità:** rapporto tra la variazione dell'uscita dello strumento e la corrispondente variazione del misurando



## Accuratezza della domanda di deformazione

### Precisione target per l'acciaio

deformazione per sollecitazione di 1MPa

$$\varepsilon_{\text{steel}} = \frac{\sigma}{E} = \frac{1\text{MPa}}{200000\text{MPa}} = 5\mu\varepsilon$$

### Precisione target per il calcestruzzo

deformazione per sollecitazione di 0.1MPa

$$\varepsilon_{\text{CLS}} = \frac{\sigma}{E} = \frac{0.1\text{MPa}}{30000\text{MPa}} = 3.3\mu\varepsilon$$

## Effetto dell'errore nella misura

parametro derivato ←  $y = a(x_2 - x_1)$  ← misure

$\sigma_x = \sigma_{x_1} = \sigma_{x_2}$

$$\mu_y = a(\mu_{x_2} - \mu_{x_1})$$

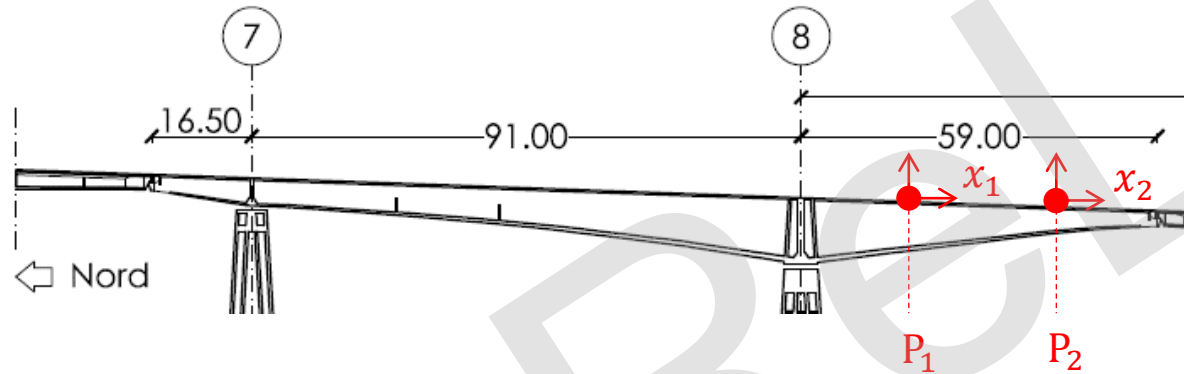
$$\sigma_y^2 = a^2(\sigma_x^2 + \sigma_x^2) = a^2 2\sigma_x^2$$

$$\sigma_y = \sqrt{2} a \sigma_x$$

media delle misure

Dev.st. delle misure

Esempio: **misure topografiche** differenziali per ottenere l'allungamento



$$\sigma_{x_1} = \sigma_{x_2} = \sigma_x = 1 \text{ mm}$$

$$L = 10 \text{ m}$$

$$\varepsilon = \frac{x_1 - x_2}{L} \quad \sigma_\varepsilon^2 = \frac{1}{L^2}(\sigma_x^2 + \sigma_x^2) = \frac{1}{L^2}(2\sigma_x^2)$$

$$\sigma_\varepsilon = \frac{1}{L} \sqrt{2\sigma_x} = \frac{1}{10000} \sqrt{2} = 1.41 \cdot 10^{-4} = 141 \mu\varepsilon$$

>> 5

## Acquisizione dati per un sistema di monitoraggio in continuo

### Periodicità delle misure

Anche se le misure sono in continuo, l'acquisizione è periodica (sincronizzazione di tutti gli strumenti) con diverse modalità:

- Orari e durata prefissata (e.g. 4 volte in 24 ore, per 60 minuti, in fasce orarie significative dei diversi volumi di traffico)
- In funzione del superamento di una soglia prestabilita (e.g. spostamento in campata, accelerazione in testa alla pila, ...)
- Su richiesta comunicata dal gestore della infrastruttura (ad esempio il transito di un veicolo noto e autorizzato).

### Frequenza di campionamento

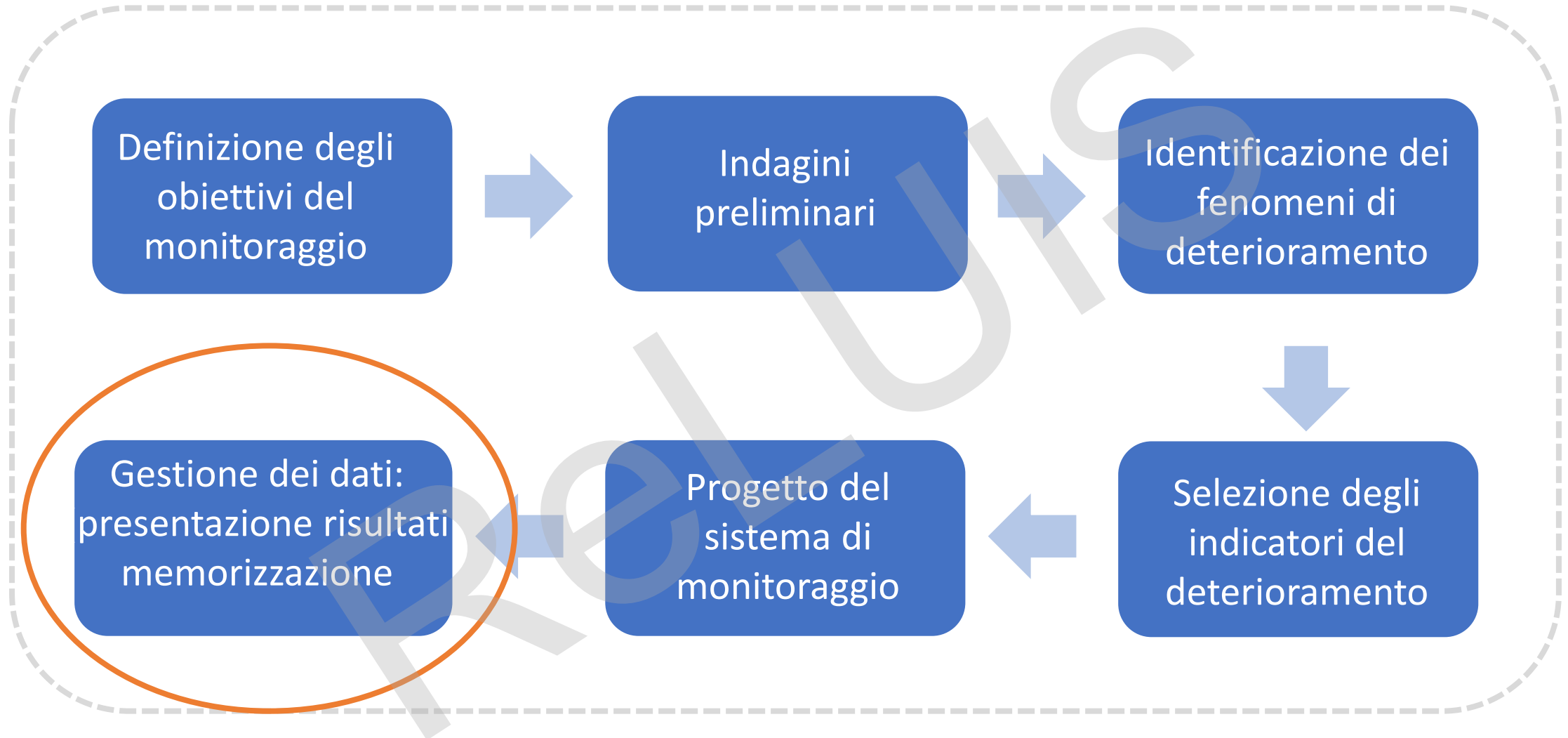
La frequenza di campionamento viene scelta tipicamente in funzione della velocità di variazione del parametro in misura:

- per gli accelerometri la frequenza di campionamento consigliata è spesso superiore a 200 Hz
- per le misurazioni degli spostamenti o rotazioni (e.g. in mezzera o agli appoggi) può essere sufficiente campionare a 100 Hz

Il valore di frequenza di campionamento viene prescelto in funzione delle assunzioni teoriche e **rifinito in funzione delle evidenze sperimentali durante le prime acquisizioni di dati.**

### Stoccaggio dei dati

- ✓ in piattaforma dati elaborati (e.g. frequenze dell'OMA, spostamenti e rotazioni massime, accelerazione massima, etc.) per almeno 1 anno
- ✓ su hard disk solido dati grezzi (valutare modalità trasmissione dati al server di stoccaggio)





- Modalità **transmissione** dati (cablata/non cablata)
- Requisiti **pratici** (alimentazione, restrizioni traffico, etc)
- Modalità di **archiviazione** (supporto fisico/cloud,..)
- **Costo sul ciclo di vita** (acquisizione, installazione, manutenzione del sistema e dei dati, elaborazione dati e archiviazione dati)
- **Ottimizzazione** su valore informazione (processo iterativo)

- Le informazioni ricavate dal sistema di monitoraggio devono essere presentate in maniera **sintetica** in modo da poter essere agevolmente utilizzati come **supporto alle decisioni**.
- A tale scopo la presentazione dei risultati deve essere definita sulla base di un **contributo significativo da parte dell'utente finale** delle informazioni.
- Questo può richiedere una serie di **iterazioni successive** prima di arrivare alla forma finale
- I **criteri** alla base delle decisioni devono essere **implementati** in modo che le informazioni siano effettive come supporto alle decisioni.
- Questo richiede la **definizione di soglie** corrispondenti ai criteri definiti e la possibilità che la decisione venga eseguita in maniera automatica (esempio allerta di vario tipo al superamento delle soglie).
- L'automatismo richiede una fase di prova per la validazione del sistema e **l'ottimizzazione delle soglie** in funzione del bilancio tra falsi e mancati allarmi

# Esempio di progetto di sistema di monitoraggio strumentale

RELUIS

## Obiettivi e finalità del sistema di monitoraggio

elemento degradato e/o con difetto conclamato (e.g. appoggio, sella Gerber, curvatura)  
degrado globale (non conclamato)  
monitoraggio sismico

## Progetto del sistema di monitoraggio

Tipologia strutturale, schemi statici e dettagli costruttivi

Progetti – Ispezioni - Indagini - Identificazione dinamica - Prove di collaudo

Fenomeni di degrado/danno

Descrizione e modellazione numerica dei fenomeni

Parametri misurabili per la valutazione dei fenomeni (specifico per struttura e/o tipologia strutturale)

Strumentazione per il monitoraggio

parametro globale                      abbassamento, rotazione, frequenze

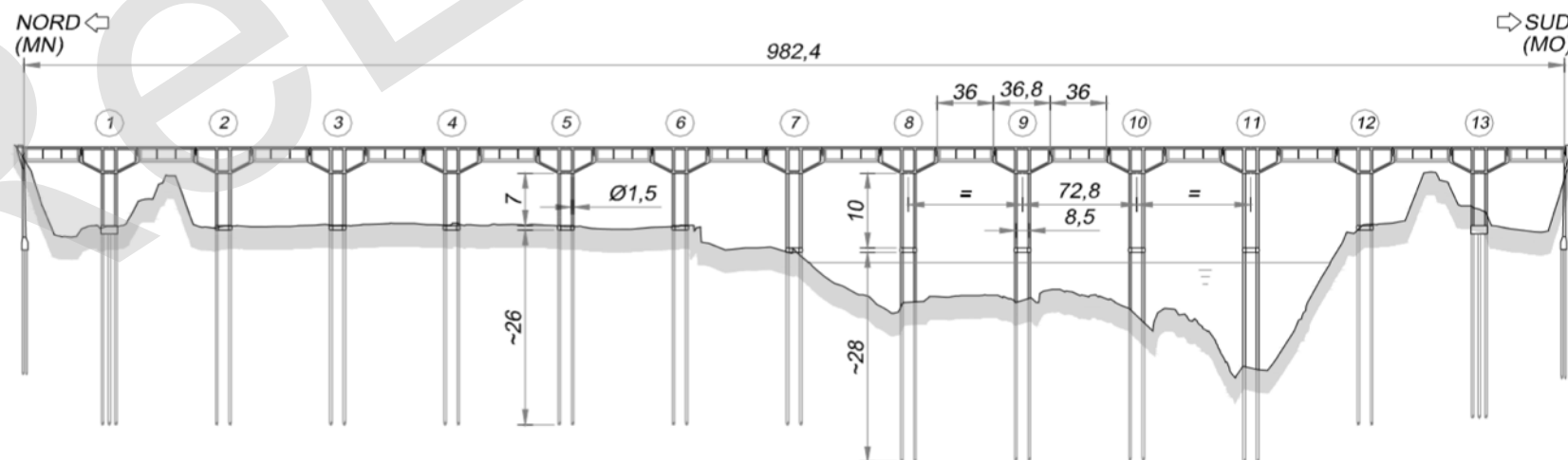
parametro locale                      spostamento, deformazione, deformata modale

Clinometri, Deformometri, Trasduttori di spostamento, Accelerometri, Condizioni ambientali

Layout del sistema di monitoraggio

Caratteristiche sensori, sistema di acquisizione, elaborazione dei dati

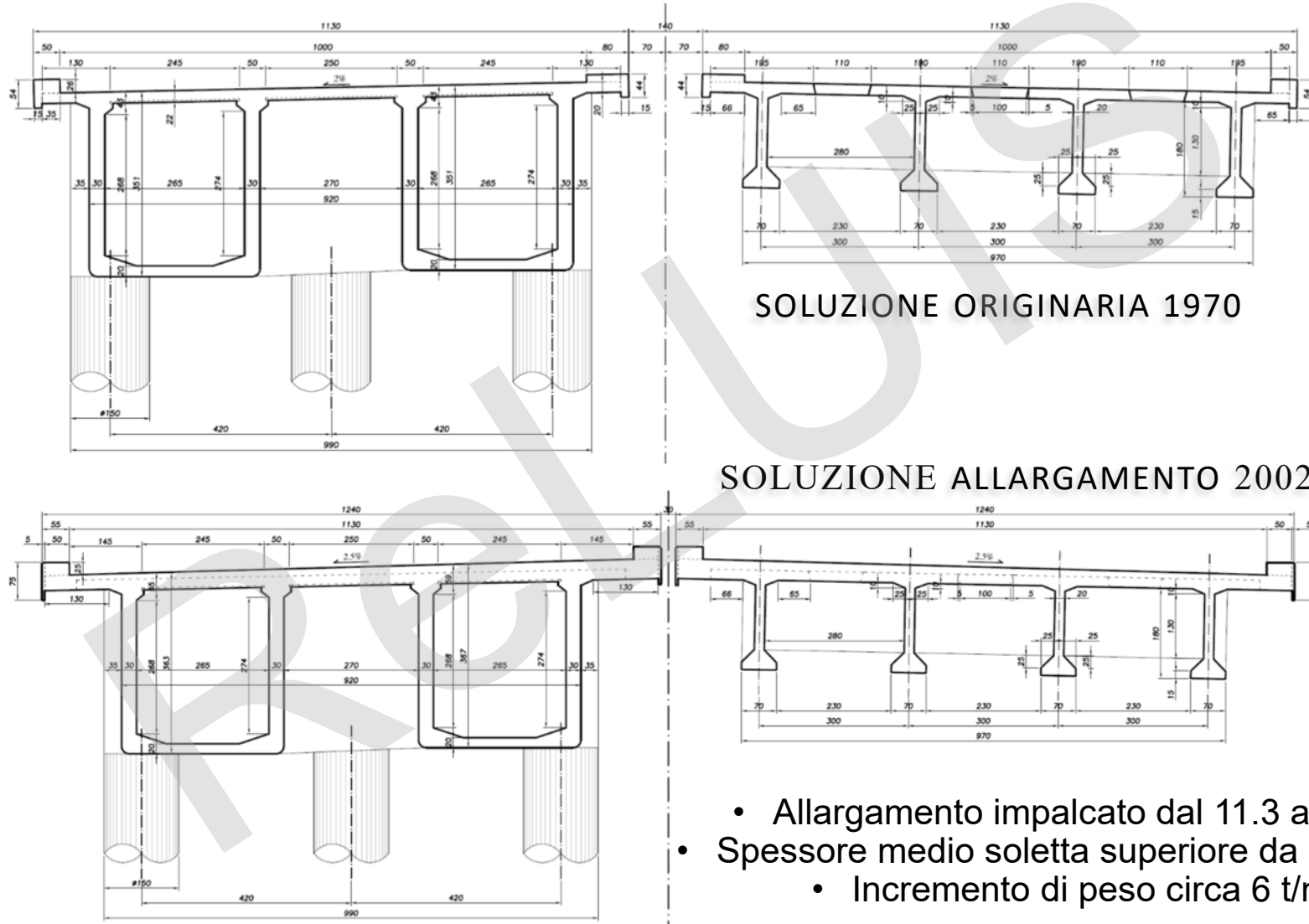
- Costruito nel 1970 (anno collaudo).
- Lunghezza 980m, sostanzialmente in rettilineo
- Due viadotti identici, paralleli e affiancati, in ca/cap, ciascuno ospitante una carreggiata autostradale
- Campate interne isostatiche 36m di luce, appoggio su «Gerber» all'estremità di pile a stampella. Luce totale in asse pila 72,8m.
- 13 pile, 5 in alveo, 9 in golena (6 lato Nord dir. Mantova, 2 lato Sud dir. Modena).
- Pile costituite da 6 colonne circolari diametro 1,5m, cinte alla base da collare in ca sezione 2.0x1.6m, sotto in quale proseguono pali di fondazione D1500.



Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

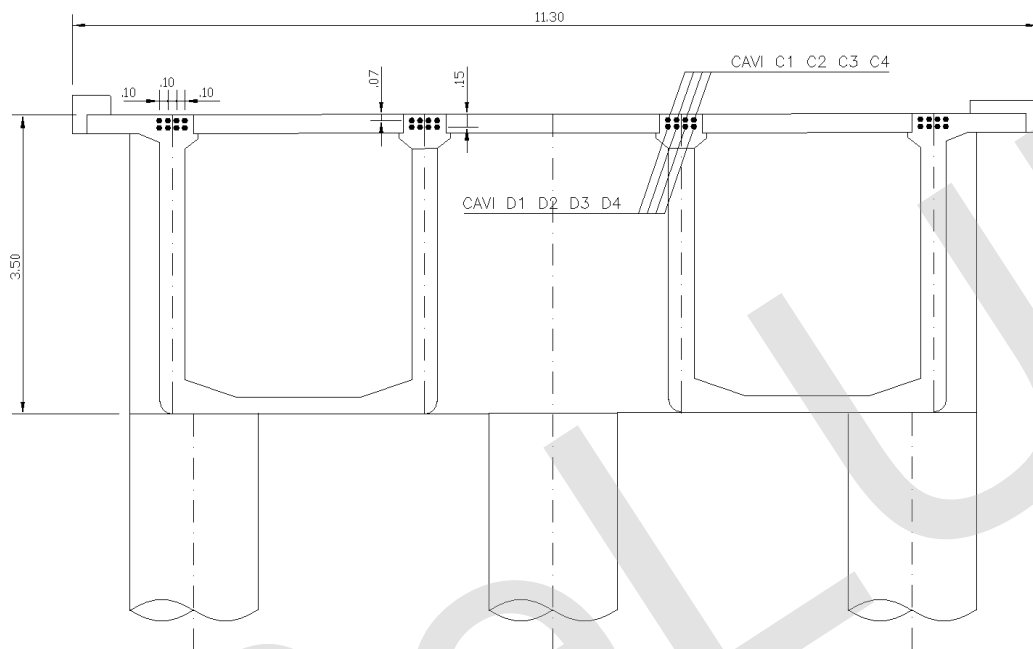


Progetto originale e  
stato di fatto

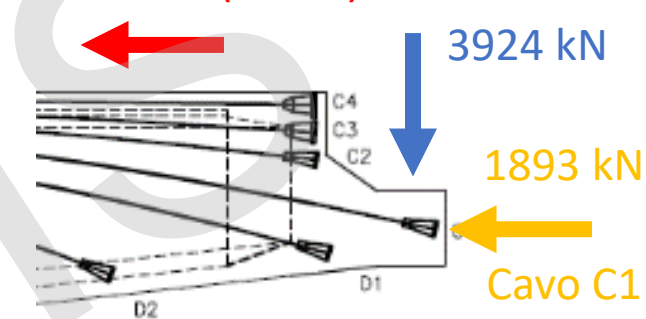


Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

## STATO DI FATTO precompressione



51522 kN (totale)

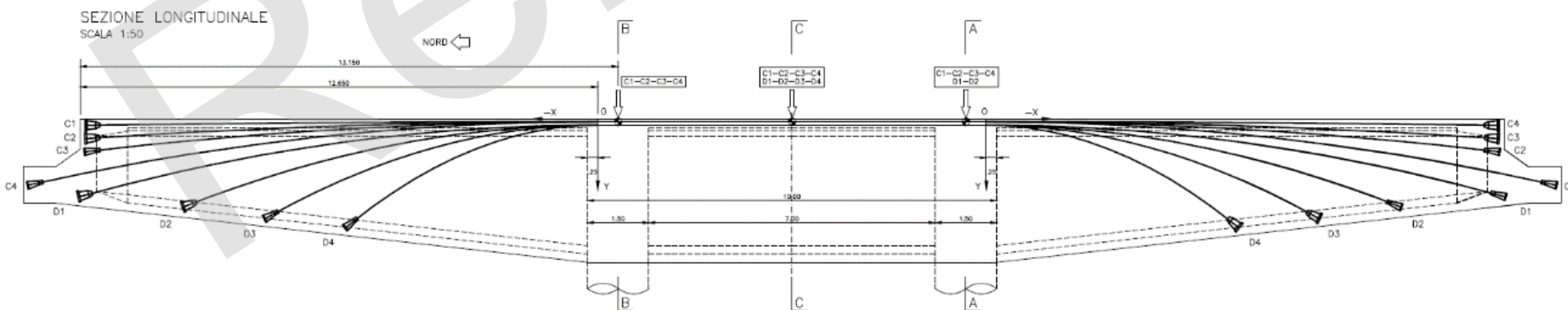


Per ogni nervatura:

- 2 cavi da 40 fili  $\Phi 7$  (C1 e C4)
- 6 cavi da 32 fili  $\Phi 7$  (C2, C3, D1-D4)

Totale fili per sezione: 1088

Tiro iniziale: 1230 MPa



# Ponte sul fiume Po (Autostrada A22, Mantova)

## Progetto preliminare sistema di monitoraggio

obiettivi del monitoraggio

### Comportamento a lungo termine

- Trend di deformazione nelle mensole e campate dovuta a comportamento viscoso
- Distorsioni pile, mensole, campate
- Controllo stato di precompressione nelle mensole e selle Gerber
- Controllo stato fessurativo

### Comportamento indotto da carichi mobili

- Deformazioni al passaggio dei carichi
- Stato tensionale nelle selle Gerber al passaggio dei carichi
- Spostamenti ai giunti al passaggio dei carichi
- Comportamento dinamico della struttura

### Comportamento in caso di sisma

- Storia degli spostamenti subiti durante il sisma
- Spostamenti residui

### Controllo scalzamento

- Profondità di erosione del terreno in corrispondenza della Pila 11
- Livello dell'acqua nel tempo

Definizione del sistema di monitoraggio secondo le indicazioni della normativa UNI/TR 11634:2016 "Linee guida per il monitoraggio strutturale:

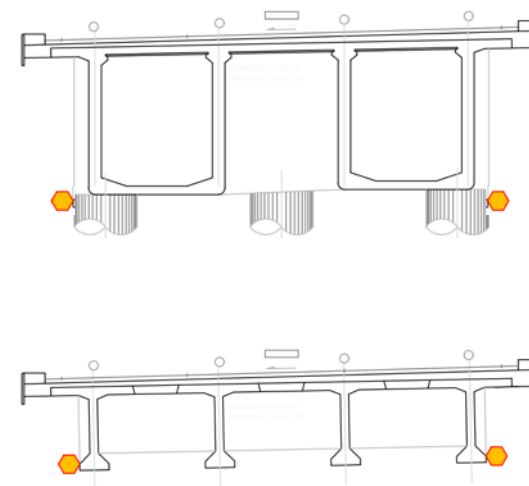
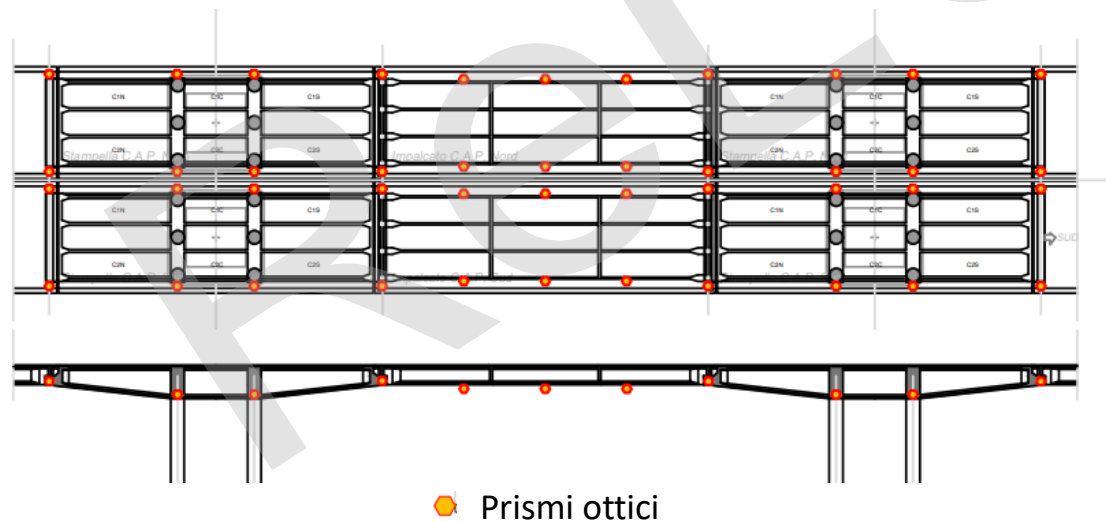
# Ponte sul fiume Po (Autostrada A22, Mantova)

## Progetto preliminare sistema di monitoraggio

Grandezza obiettivo	Accuratezza richiesta	Posizione
Trend di spostamento permanente in 3D	0.1 mm/anno (dopo un anno di osservazione)	<ul style="list-style-type: none"> <li>- Fondazioni</li> <li>- Sommità pile</li> <li>- Sommità spalle</li> <li>- Estremità capitelli</li> <li>- Estremità campate</li> <li>- Mezzeria campate</li> </ul>

Specifica	Valore
Grandezza misurata	Spostamento in direzione x,y,z
Accuratezza	Almeno 1 mm
Frequenza di campionamento	1 campione/15 minuti
Tipologia proposta	Stazione totale + prismi ottici

### PUNTI DI MISURA Campata e stampella campione



SPOSTAMENTI a lungo termine

# Ponte sul fiume Po (Autostrada A22, Mantova)

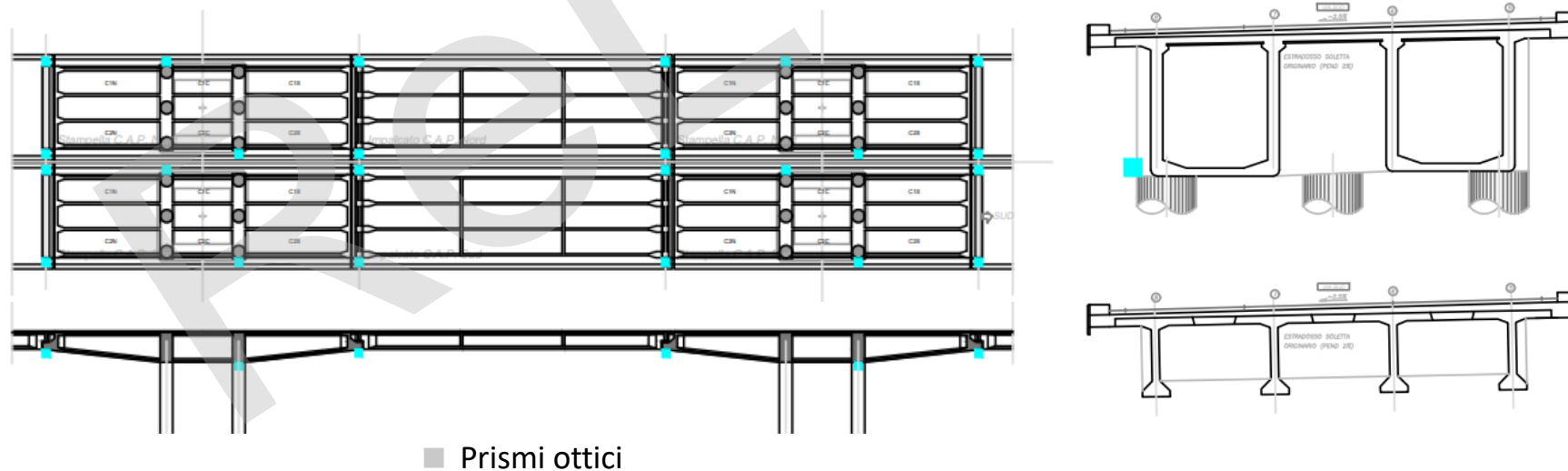
## Progetto preliminare sistema di monitoraggio

Grandezza obiettivo	Accuratezza richiesta	Posizione
Trend di rotazione permanente	10 $\mu$ rad/anno (dopo un anno di osservazione)	- Sommità pile - Sommità spalle - Estremità capitello

Specifica	Valore
Grandezza misurata	Rotazione attorno ad asse x e y
Fondo scala	10000 $\mu$ rad
Accuratezza	(ideale: 10 $\mu$ rad), almeno 50 $\mu$ rad
Frequenza di campionamento	1 campione/15 minuti
Tipologia proposta	Inclinometri triassiali

**ROTAZIONE**  
 a lungo termine

### PUNTI DI MISURA Campata e stampella campione



Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione



# Ponte sul fiume Po (Autostrada A22, Mantova)

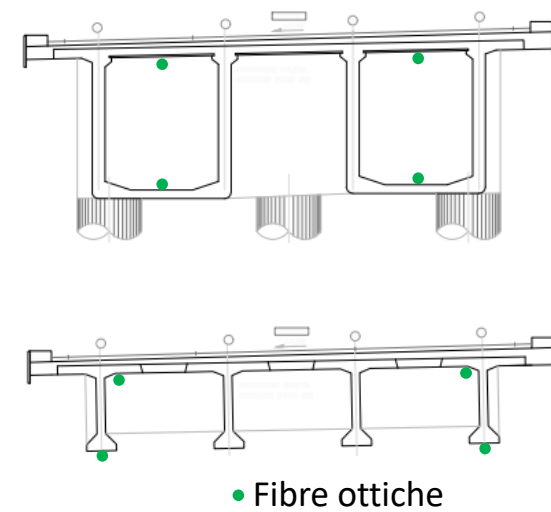
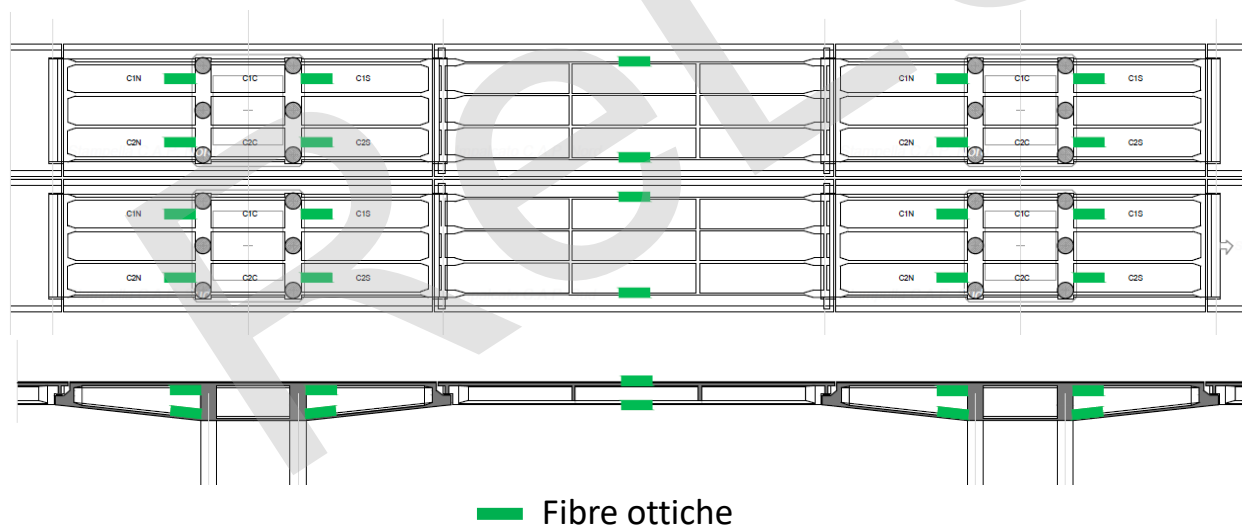
## Progetto preliminare sistema di monitoraggio

Grandezza obiettivo	Accuratezza richiesta	Posizione
Trend di deformazione permanente	10 $\mu\epsilon$ /anno (dopo un anno di osservazione)	- Soletta superiore e inferiore capitello sezione filo pila
		- Intradosso e estradosso travi esterne mezzeria campata

Specifica	Valore
Grandezza misurata	Deformazione per flessione
Base di misura	60 cm
Fondo scala	2500 $\mu\epsilon$
Accuratezza	1‰ FS
Frequenza di campionamento	1 campione/15 minuti
Tipologia proposta	Strain gauge ottici

**TREND DI DEFORMAZIONE a lungo termine**

### PUNTI DI MISURA Campata e stampella campone



Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

# Ponte sul fiume Po (Autostrada A22, Mantova)

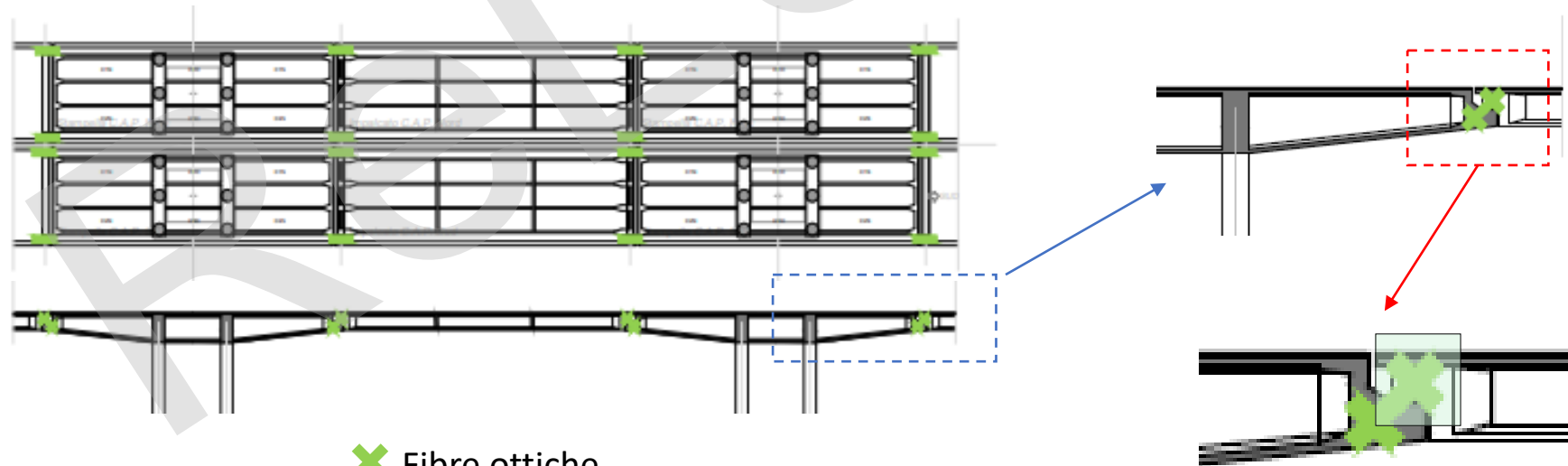
## Progetto preliminare sistema di monitoraggio

Grandezza obiettivo	Accuratezza richiesta	Posizione
Trend di deformazione nelle selle Gerber per tensioni dovute al taglio	10 $\mu\epsilon$ /anno (dopo un anno di osservazione)	- Sella Gerber lato capitello
		- Sella Gerber lato campata

Specifica	Valore
Grandezza misurata	Deformazione per taglio
Base di misura	150 cm
Fondo scala	2500 $\mu\epsilon$
Accuratezza	1‰ FS
Frequenza di campionamento	1 campione/15 minuti
Tipologia proposta	Strain gauge ottici

**INDICATORE  
PERDITE DI  
PRECOMPRESSIONE  
selle Gerber**

**PUNTI DI MISURA** Campata e stampella campone



**X** Fibre ottiche incrociate

Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

# Ponte sul fiume Po (Autostrada A22, Mantova)

## Progetto preliminare sistema di monitoraggio

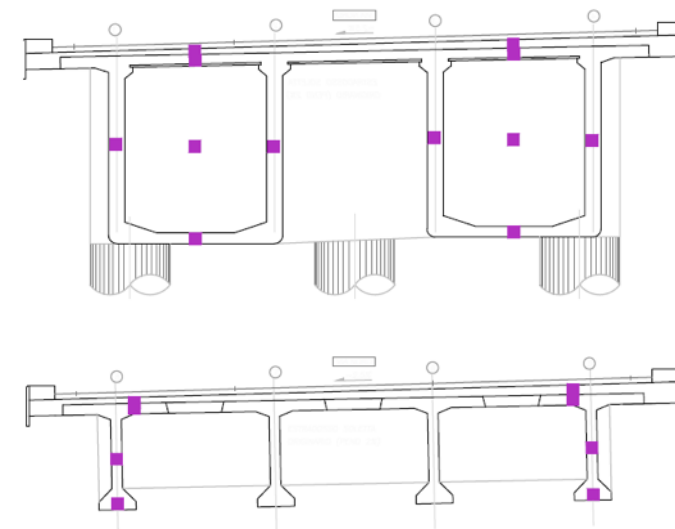
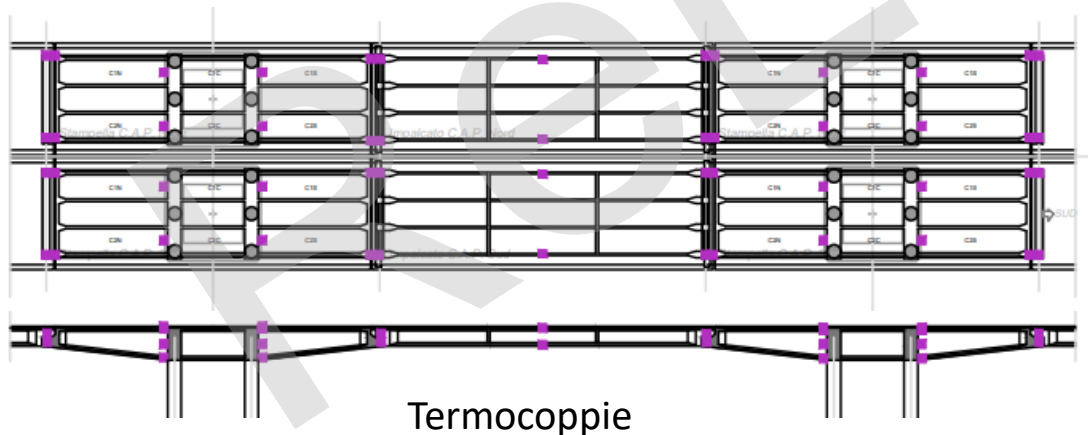
Al fine di calcolare i trend di comportamento a lungo termine è necessario eseguire una **termocompensazione delle misure acquisite**, così da rimuovere l'effetto dovuto alle variazioni termiche. È quindi necessario conoscere il campo di temperature nella struttura.

Specificativa	Valore
Grandezza misurata	Temperatura
Range di misura	-50° C/+100° C
Accuratezza	0.2 °C
Frequenza di campionamento	1 campione/15 minuti
Tipologia proposta	PT100

Campo di  
TEMPERATURE

PUNTI DI MISURA

Campata campione



Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione

## Appoggi e sella Gerber

- Trasduttori di spostamento
- Inclinometri

## Pila e/o pilastri

- Accelerometri
- Inclinometri
- Sensori di temperatura e umidità

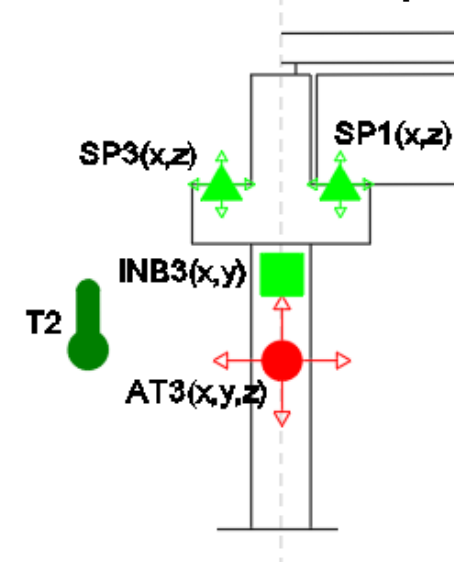
## Travi/impalcato

- Accelerometri
- Deformometri
- Sensori di temperatura e umidità

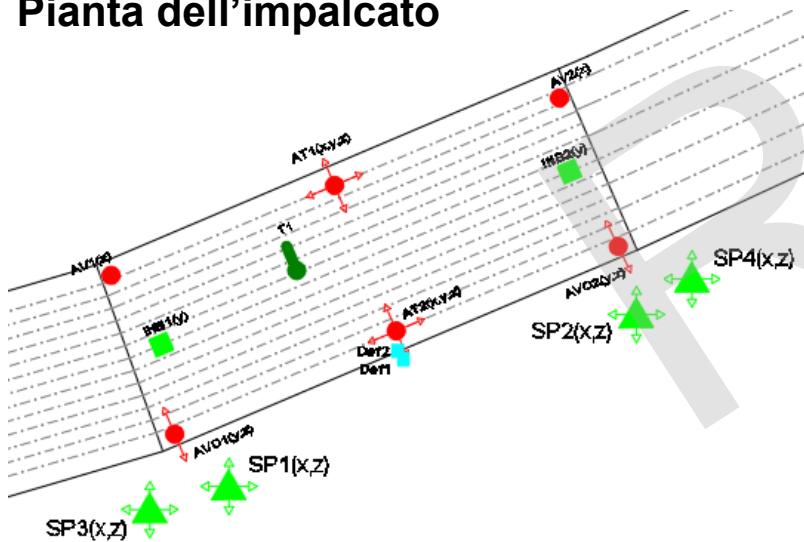
## Dettagli di installazione



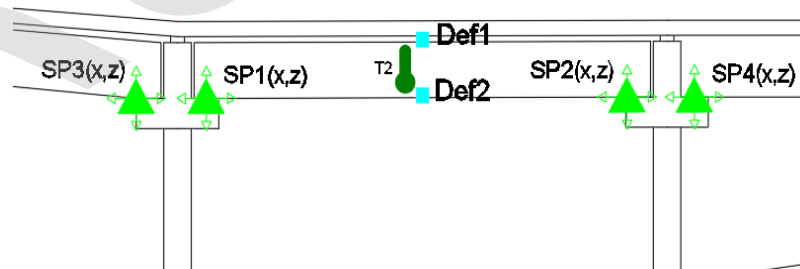
## Vista laterale della pila



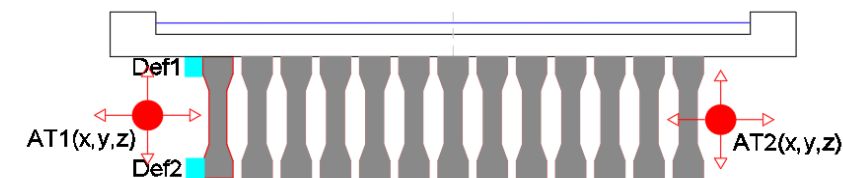
## Pianta dell'impalcato



## Vista laterale dell'impalcato



## Sezione dell'impalcato



## **Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti**

### **Le linee guida per i ponti esistenti - Tipologie strutturali e analisi delle principali criticità**

- L1a - Introduzione alle linee guida
- L1b - Ponti in cemento armato
- L1c - Ponti in cemento armato precompresso
- L1d - Ponti in muratura
- L2a - Ponti in acciaio e composti acciaio-calcestruzzo
- L2b - Pile e spalle
- L2c - Selle Gerber
- L2d - Dispositivi di appoggio
- L2e - Introduzione alle schede difettologiche

### **La valutazione della classe di attenzione strutturale-fondazionale - scenari di casi studio. Ispezioni speciali e indagini in situ**

- L3a - Ponti in cemento armato
- L3b - Ponti in cemento armato precompresso
- L3c - Ponti ad arco in muratura
- L4a - Ponti in acciaio e ponti composti acciaio-calcestruzzo
- L4b - Ispezioni speciali e indagini in situ

### **Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione**

- L5a - Applicazione di sistemi di monitoraggio
- L5b - Gestione delle informazioni e modelli informativi digitali**

### **Esercitazione**

- L6 - Esempi di compilazione in ambiente virtuale di schede di ispezione



# Il BIM: Teoria e processi Standard e protocolli internazionali

**Entro il 2025 "la digitalizzazione su larga scala... porterà a risparmi globali sui costi annui pari al 13 % - 21 % nelle fasi di progettazione, ingegneria e costruzione e al 10 % - 17 % nella fase operativa"**

BCG (The Boston Consulting Group)

"Digital in Engineering and Construction: The Transformative Power of Building Information Modeling", 2016



Co-funded by  
the European Union

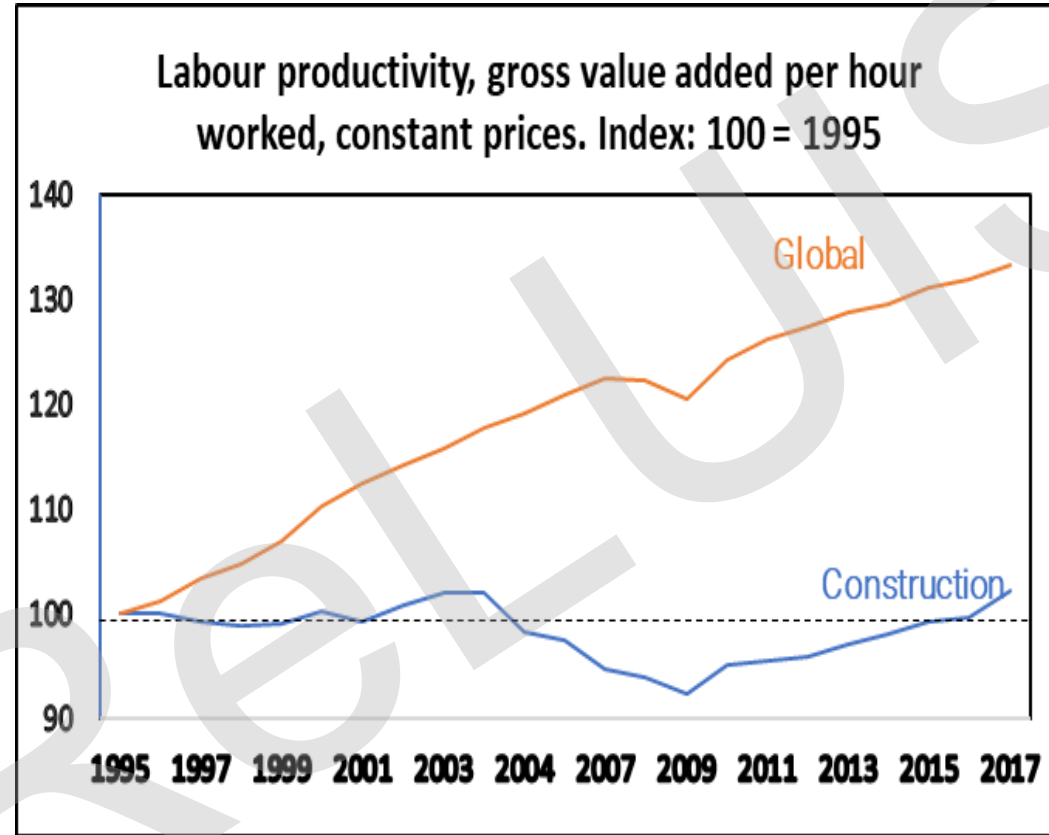


Estratto da *Manuale per l'introduzione del BIM da parte della domanda pubblica in Europa* ©

Il primo Paese ad interessarsi alla standardizzazione delle metodologie BIM è stato il Regno Unito, dove è stato istituito nel 2011 il BIM TASK Group (UK).

A livello mondiale è attiva l'organizzazione internazionale **buildingSMART** (Canada, Cina, Finlandia, Francia, Germania, Hong Kong, Italia, Giappone, Nord America, Norvegia, Russia, Singapore, Spagna, Svizzera, UK e Irlanda) **responsabile del rilascio di molti standard OpenBIM**, come il formato IFC.

# Il settore delle costruzioni: scarsa produttività...

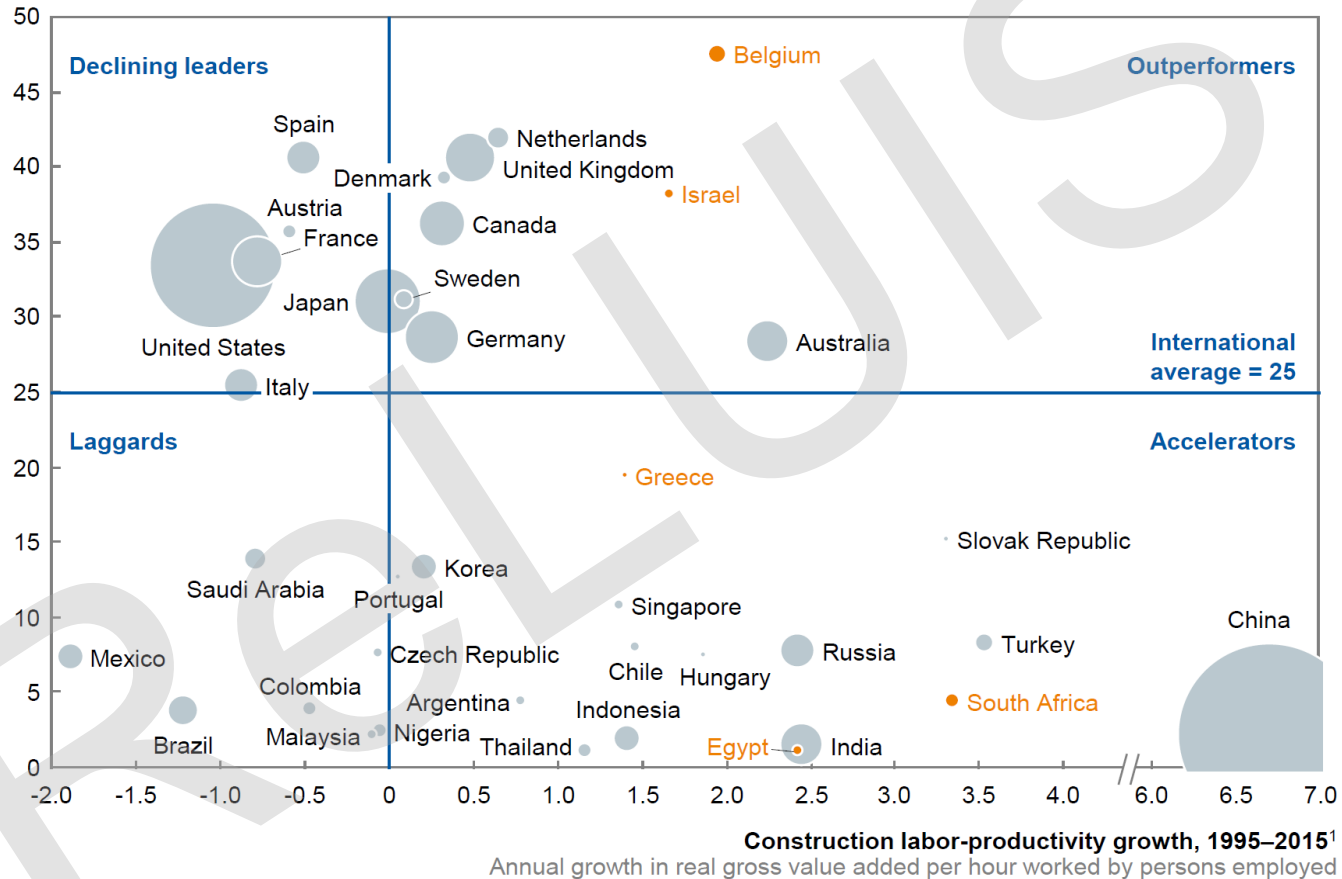


Elaborazione su dati OCSE

# ...in particolare in Italia

## Construction labor productivity, 2015<sup>1</sup>

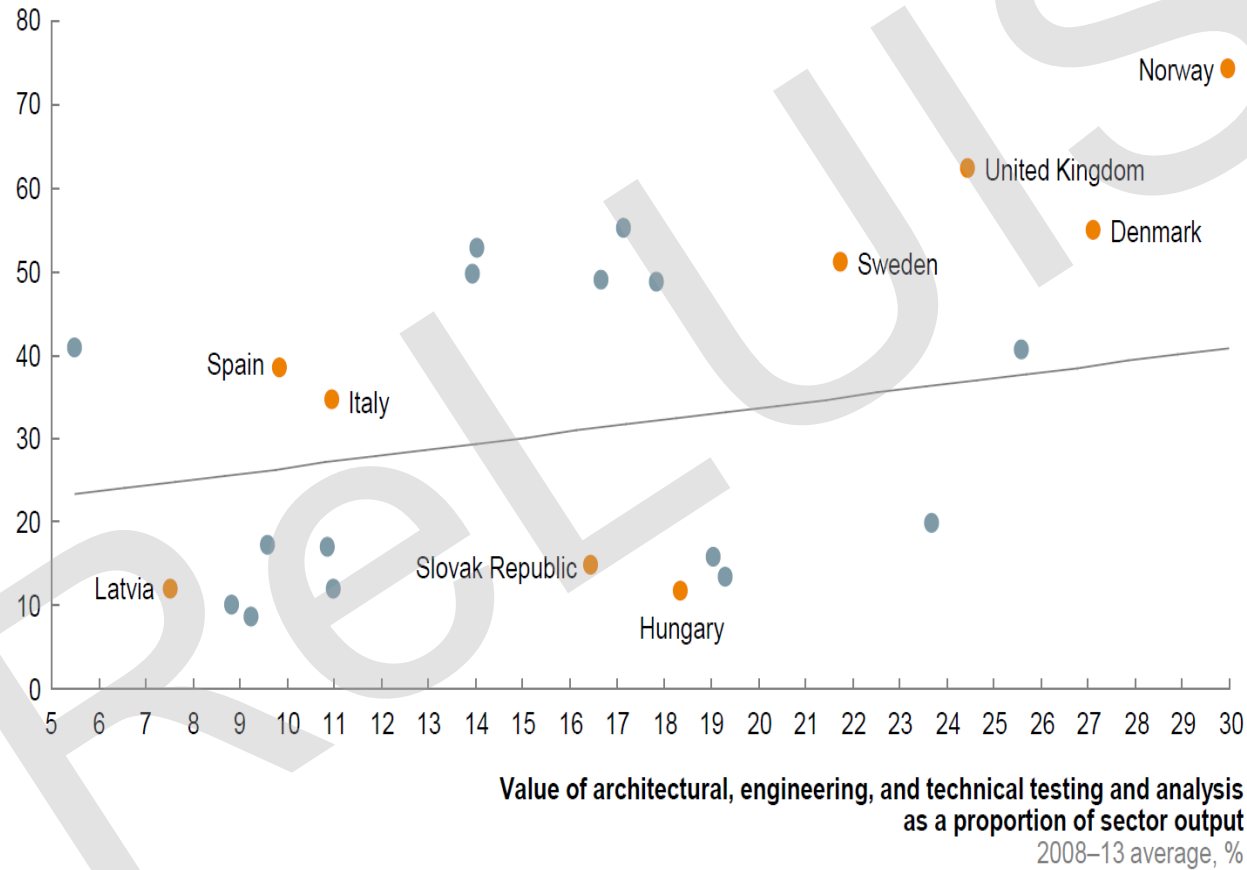
2005 \$ per hour worked by persons employed, not adjusted for purchasing power parity<sup>2</sup>



McKinsey, 2017

# Investimenti nella progettazione vs. produttività

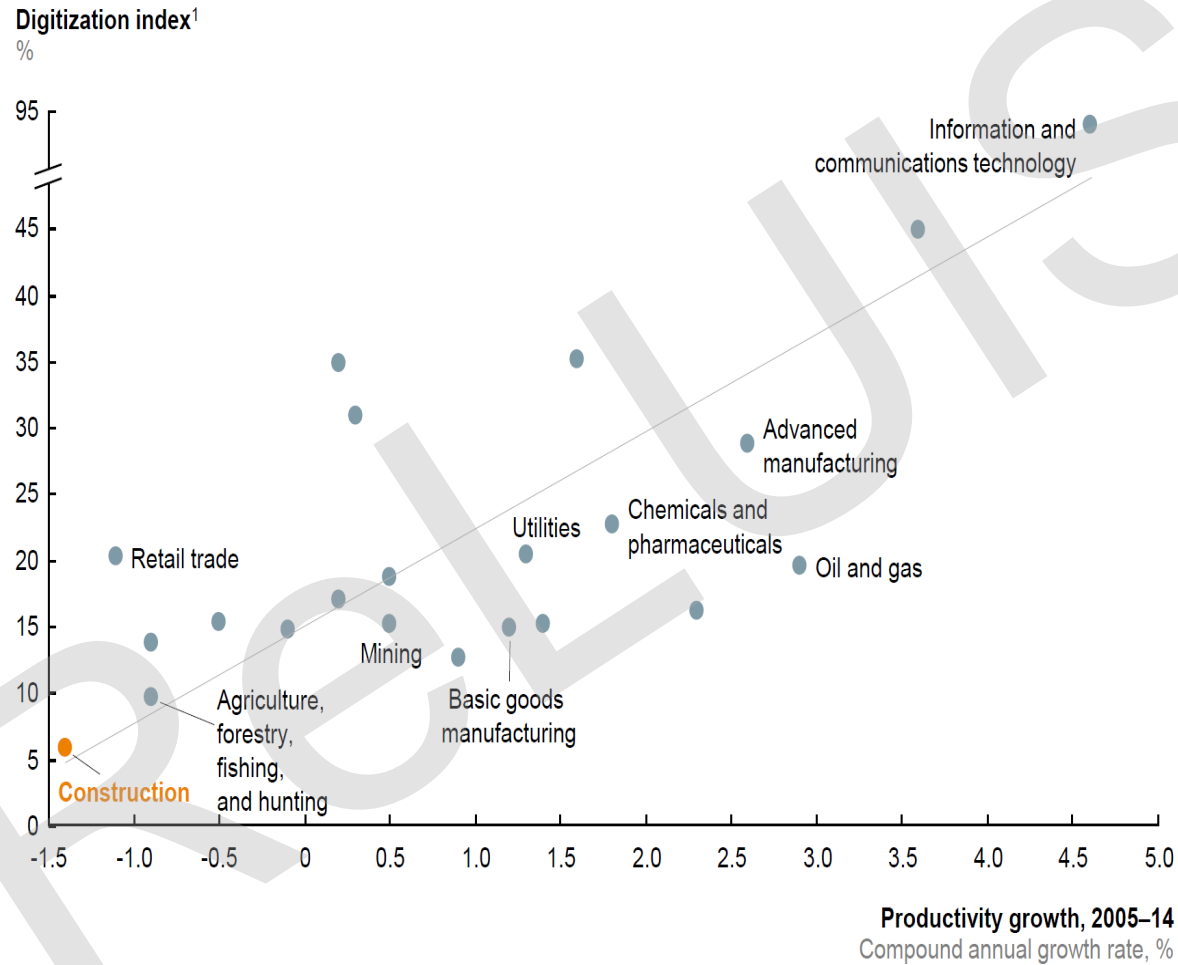
**Construction sector labor productivity**  
Gross value added per hour worked, 2009  
2005 %



McKinsey, 2017



# Digitalizzazione vs. produttività



McKinsey, 2017

# Quali le ragioni della scarsa produttività?

I prodotti  
sono ad  
elevata  
complessità

RELUIS

# Quali le ragioni della scarsa produttività?

I prodotti  
sono ad  
elevata  
complessità

Manca la  
fase della  
prototipazio  
ne

# Quali le ragioni della scarsa produttività?

I prodotti  
sono ad  
elevata  
complessità

Manca la  
fase della  
prototipazio  
ne

I «siti della  
produzione»  
sono diversi  
e complicati

# Quali le ragioni della scarsa produttività?

I prodotti  
sono ad  
elevata  
complessità

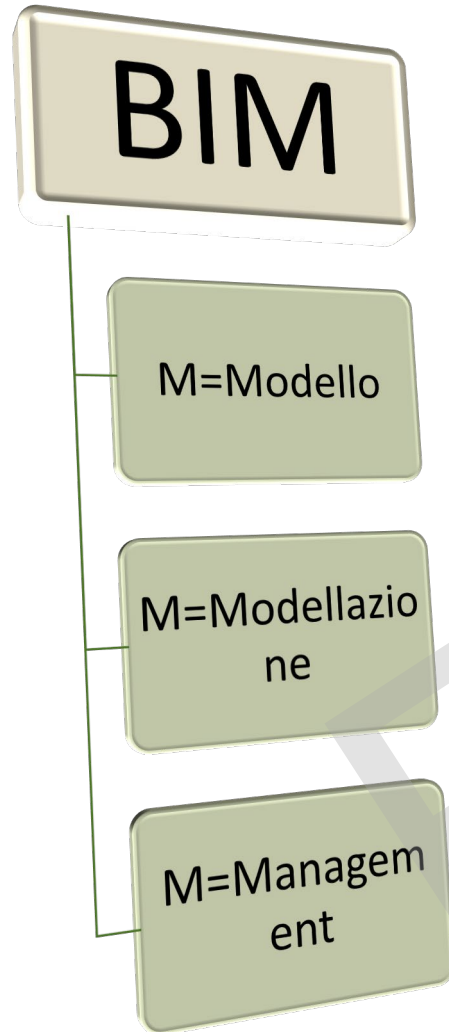
Manca la  
fase della  
prototipazio  
ne

I «siti della  
produzione»  
sono diversi  
e complicati

I processi di  
progettazione  
non sono  
standardizzati



# Classificazione del BIM

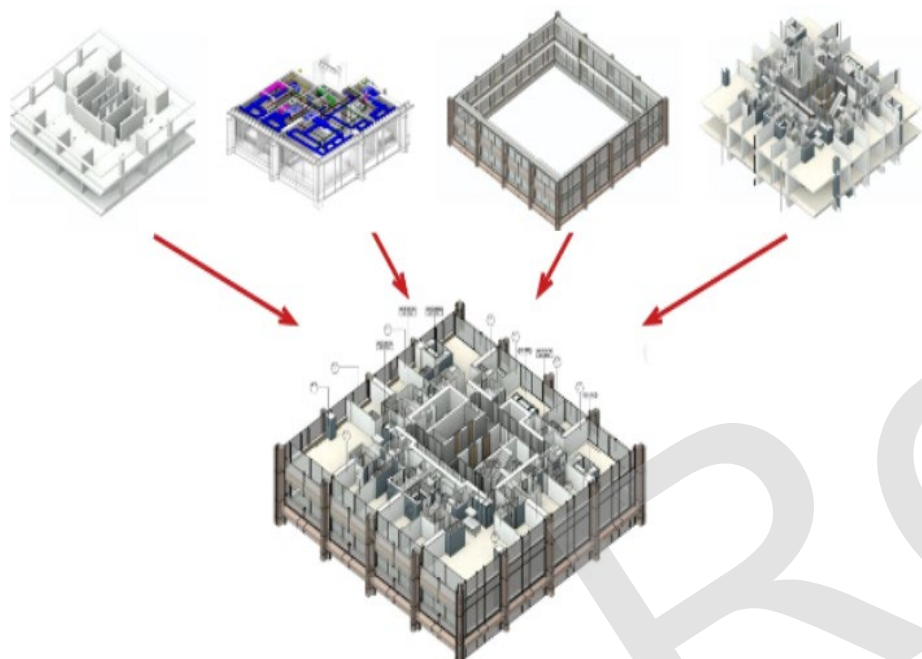


Secondo il National Building Information Modeling Standard (NBIMS), il BIM è classificabile come:

1. un prodotto (**Model**);
2. un processo di collaborazione e un risultato finale basato su standard aperti e abilitato per l'IT (**Modeling**);
3. Un sistema tecnologico per la gestione del ciclo di vita di un'opera (**Management**).



# Il Digital Twin



1. Il modello: virtualizzazione parametrica tridimensionale dell'opera e dei suoi componenti.
2. L'interfaccia: consente all'utente di interagire con il digital twin dell'opera.
3. La componente **dati**: provenienti da **sorgenti** diverse ed eterogenei.

# Il contesto normativo

BS1192:2007 PAS1192-2:2013 PAS1192-3:2014 BS1192-4:2014  
(COBie)



## ISO 19650 - PAS 1192

UNI 11337:2009 Edilizia e opere di ingegneria civile  
Criteri di codificazione di opere e prodotti da costruzione, attività e risorse  
Identificazione, descrizione e intercambiabilità

UNI 11337:2017 Edilizia e infrastrutture  
Gestione digitale dei processi informativi delle costruzioni (BIM)

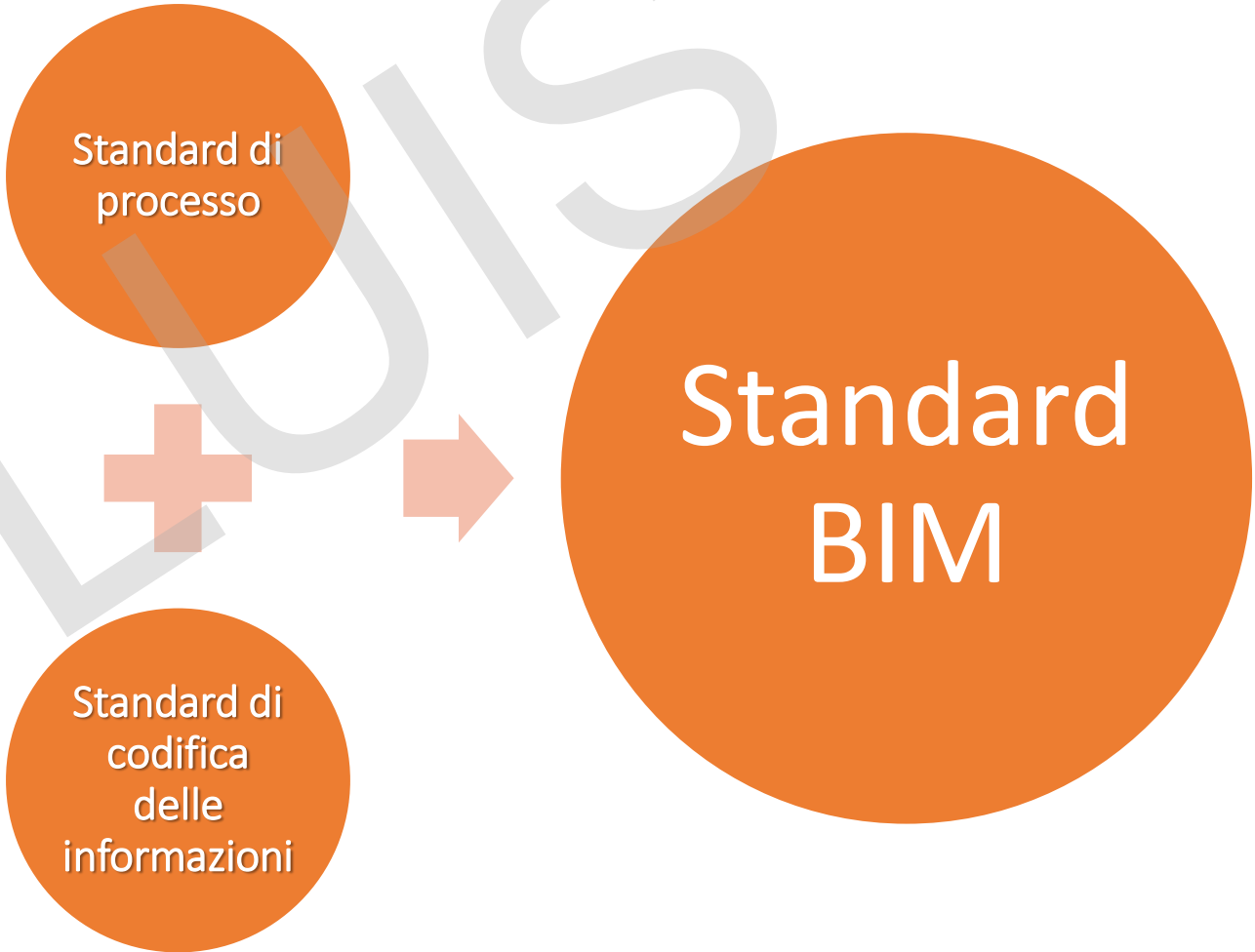
parte 1	modelli, elaborati ed oggetti	parte 6	esempio capitolato informativo
parte 2	denominazione e classificazione	parte 7	qualificazione figure
parte 3	(schede informative) LOI e LOG	parte 8	PM / BIM-M
parte 4	LOD e oggetti	parte 9	fascicolo del costruito
parte 5	gestione modelli ed elaborati	parte 10	verifica amministrativa

## UNI 11337

## IFC – ISO 16739



IFC



# Le PAS 1192



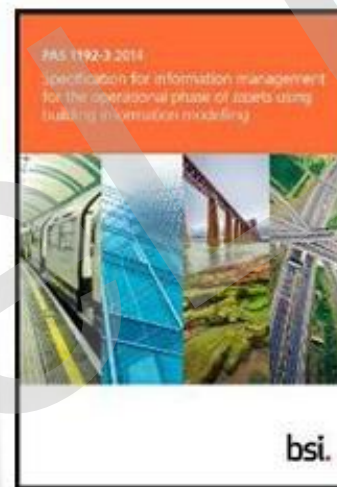
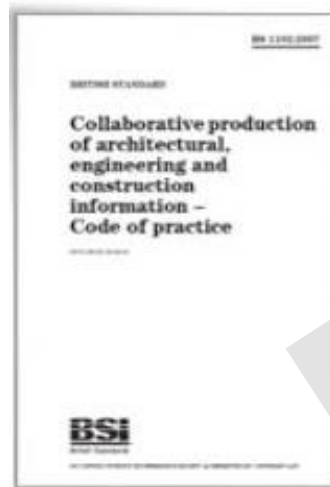
Le PAS della serie 1192 (parte 2, 3, 4, 5), in particolare, concepite come sviluppo ed evoluzione della BS 1192:2007 sono state pubblicate in risposta all'esigenza del governo britannico di implementare l'adozione della metodologia BIM nell'industria nazionale delle costruzioni e sono **liberamente scaricabili**.

BS1192:2007

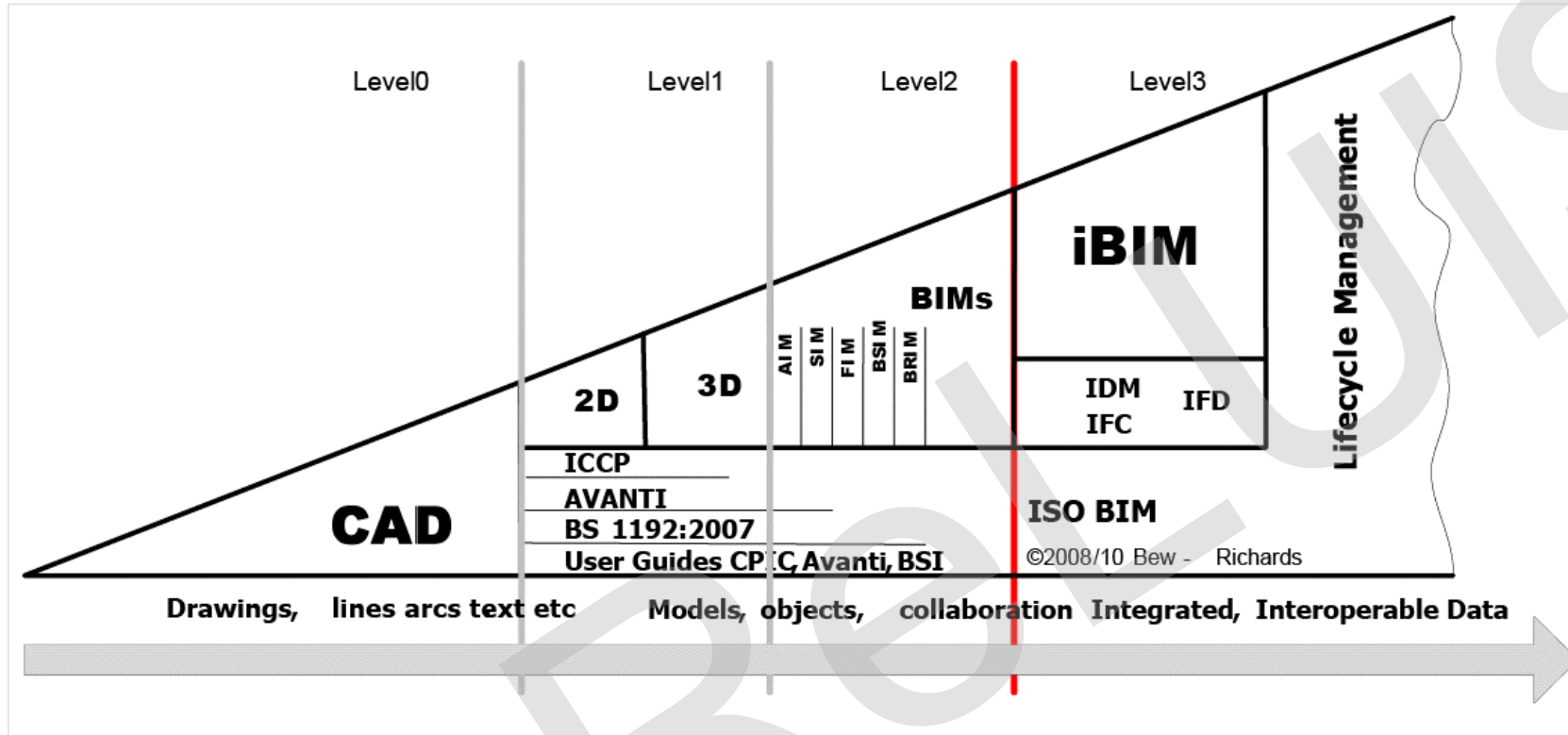
PAS1192-2:2013

PAS1192-3:2014

BS1192-4:2014  
(COBie)

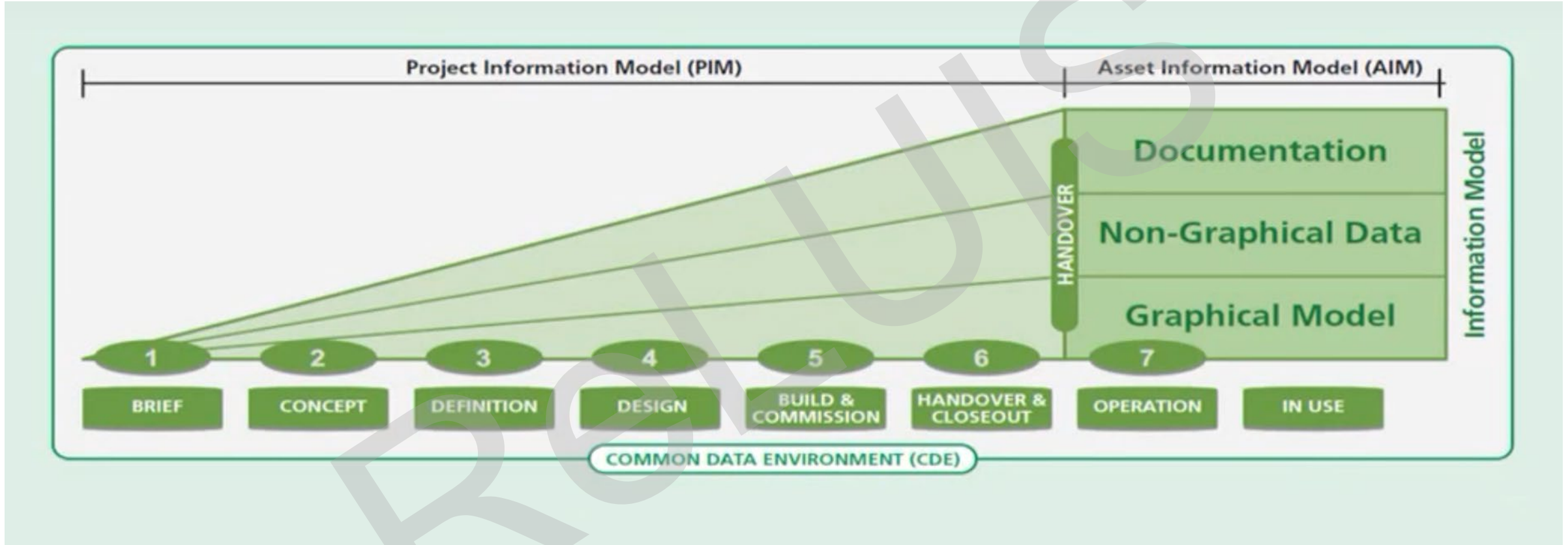


È in atto la transizione  
in ISO 19650

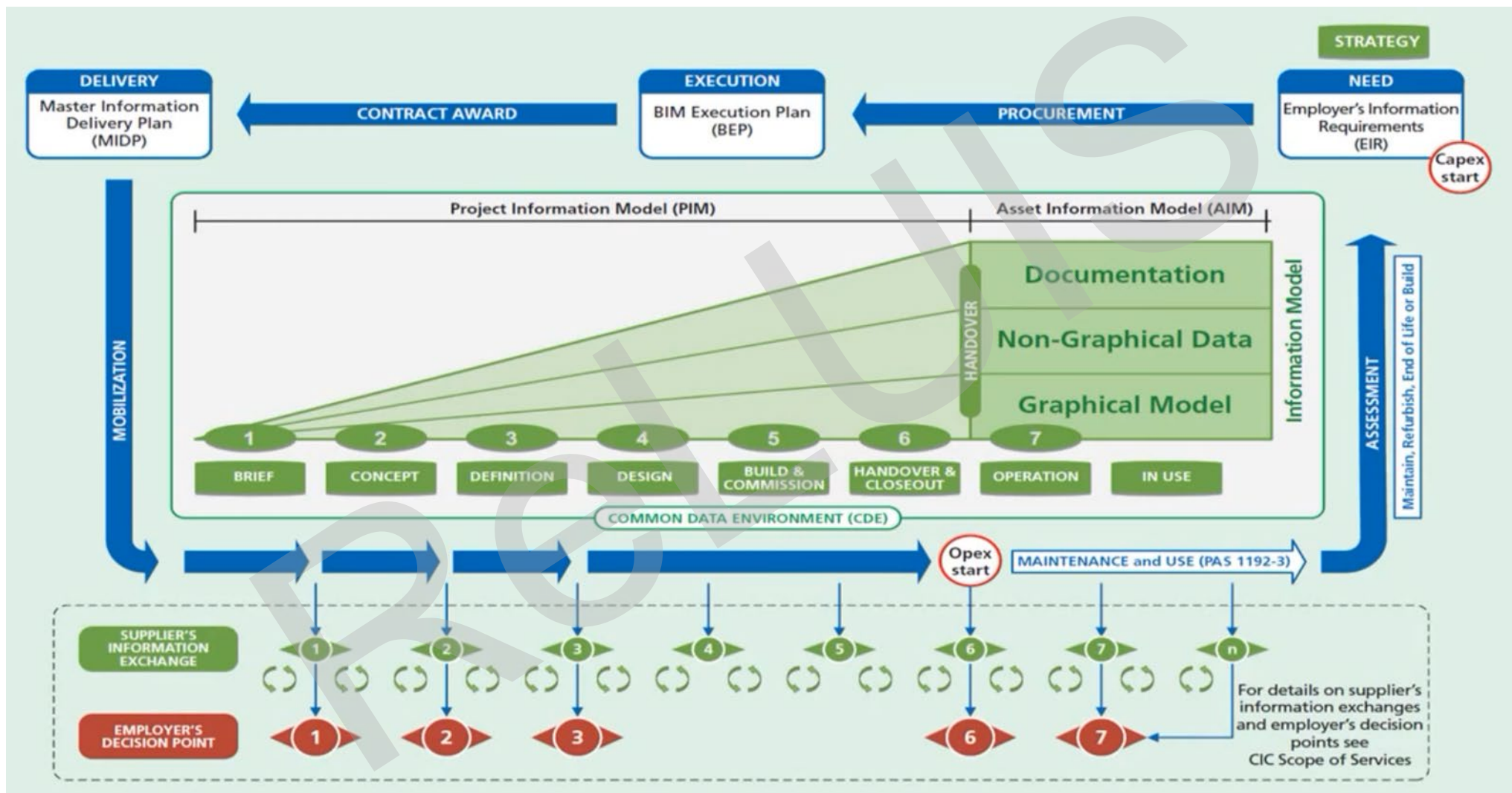


- Livello “0” – Cartaceo CAD 2D;
- Livello “1” – Modello 3D Spaziale (per Clash-Detection e Coordinamento 3D);
- Livello “2” – Modello 3D con quantità e ricco di informazioni utili a stimare anche tempi e costi;
- Livello “3” – Modello 3D integrato e interoperabile;
- Livello “4” – Modello BIM per gli utenti dell’opera.

Procedendo dal livello più basso a livello più alto aumenta la Maturità Digitale del modello ma allo stesso tempo aumenta la complessità del Processo Informatico.



# Le PAS 1192-2:2013 – il processo

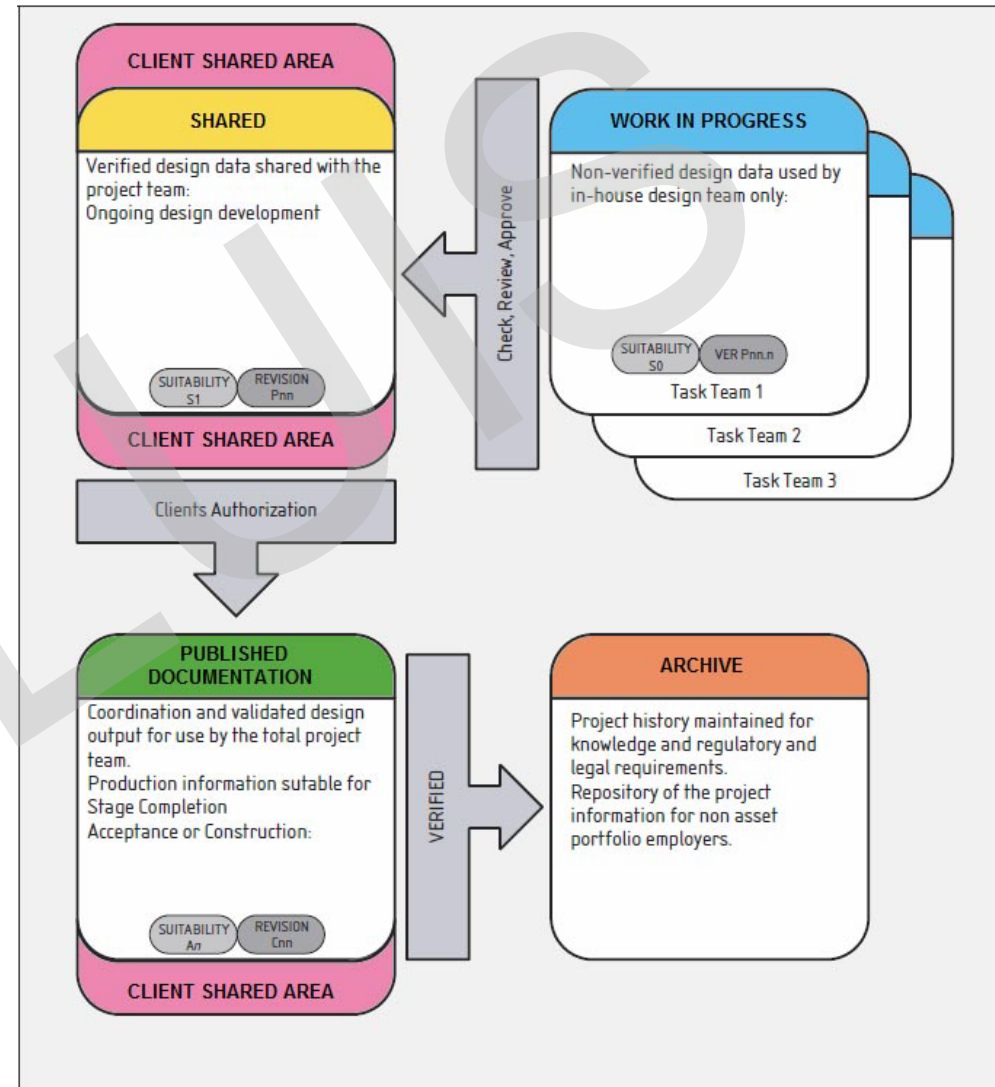


Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

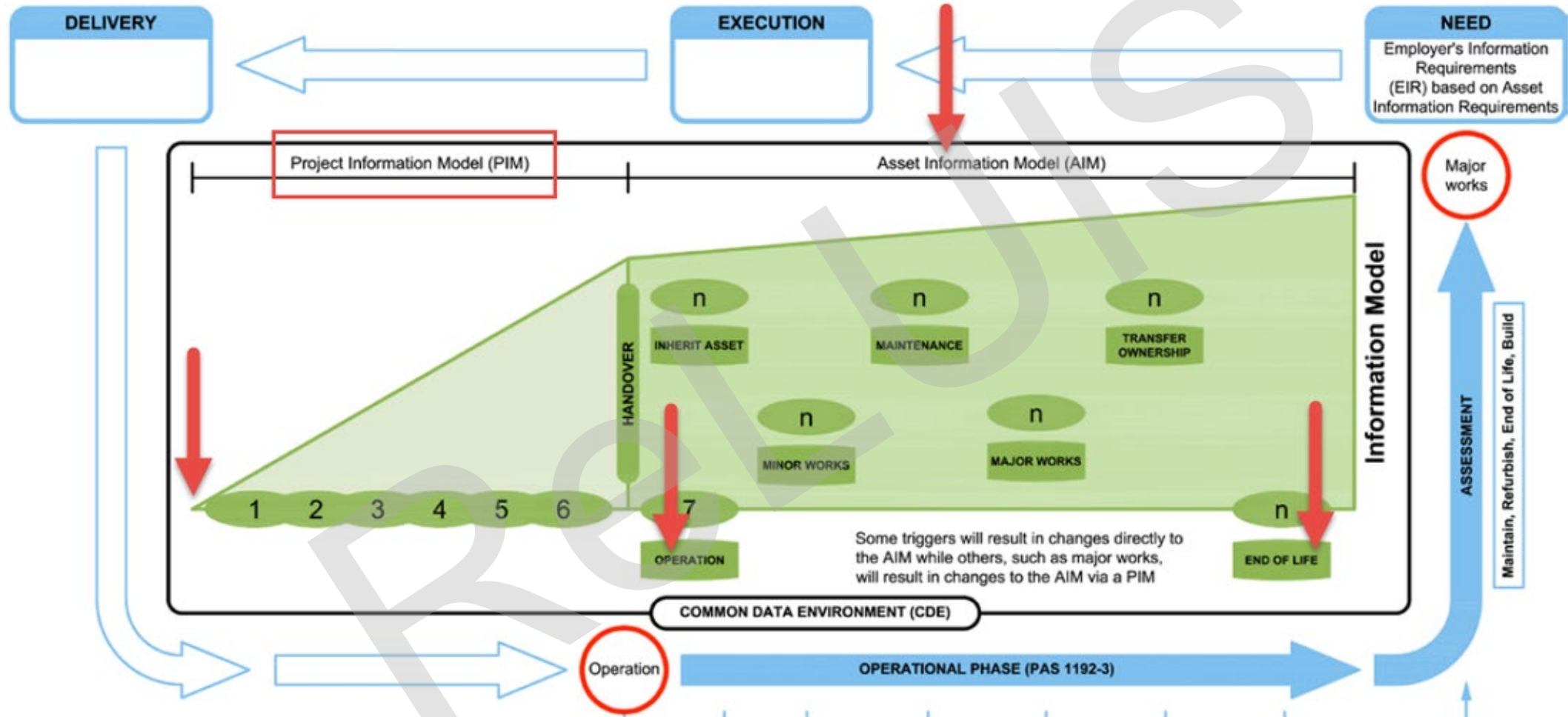
Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione



A livello internazionale, le PAS 1192-2:2013 descrivono il **Common Data Environment** come un ambiente informatico di **condivisione, produzione, trasferimento e archiviazione dei dati**, in grado di supportare il processo di sviluppo di un'opera dalla fase di concezione alla fase di esercizio e manutenzione. In particolare, i dati e le informazioni contenute nel CDE si arricchiscono fino alla consegna del manufatto alla Committenza che potrà disporre all'occorrenza aggiornando i dati in ogni momento in seguito a operazioni di manutenzione o a modifiche d'altra natura.





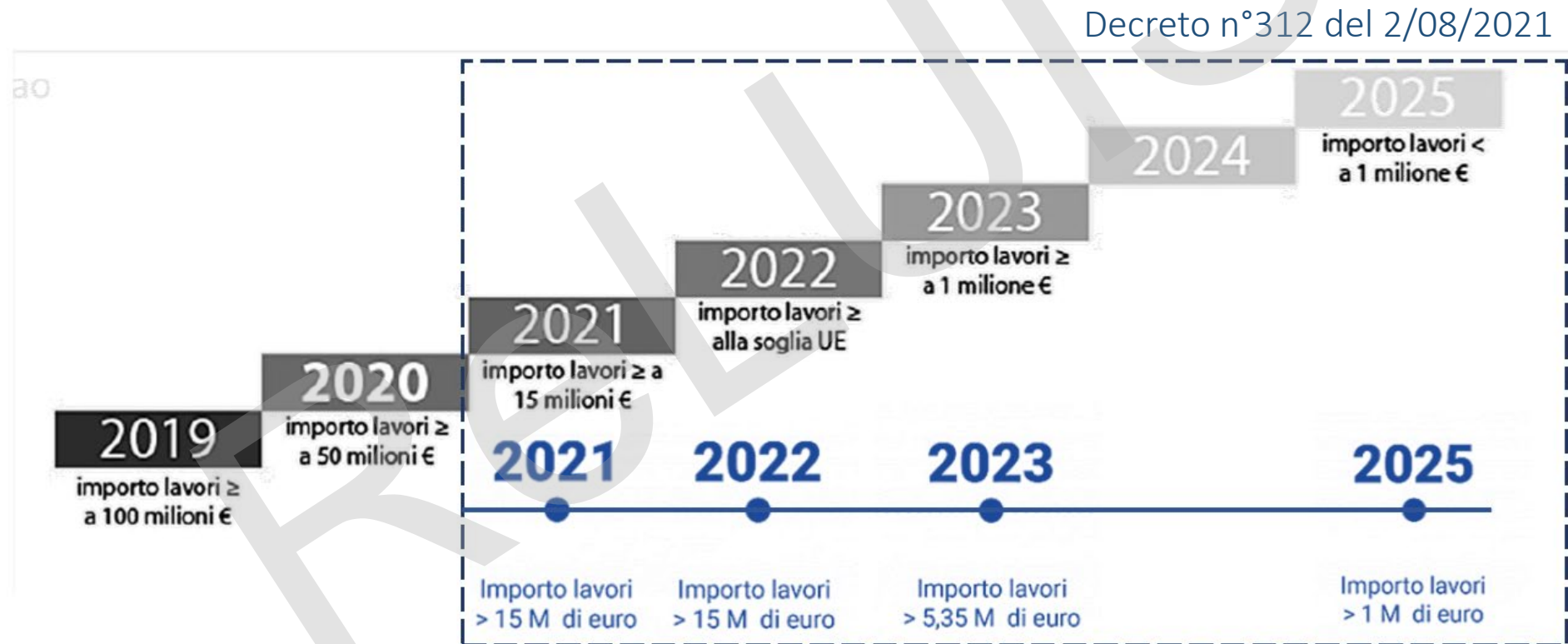


# Contesto normativo italiano

- Decreto n°560 del 1/12/2017 (**Decreto BIM**), stabiliva le modalità e i tempi di progressiva introduzione dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture;
- **UNI 11337** parti 1-4-5-6-7
- **D.M. n. 312/2021** introduce una diversa tempistica di obbligatorietà per l'uso del BIM;
- Decreto Legislativo n. 36 del 31/03/23, **Nuovo Codice dei Contratti Pubblici** in vigore da aprile 2023, prevede l'Articolo 43 che unifica le direttive sull'applicazione del BIM all'interno dei procedimenti pubblici. Inoltre, l'allegato I.9 al codice, regola la materia ai fini operativi.

# D.M. n. 312/2021 Decreto MIMS del 2 agosto

Prevede una diversa tempistica di introduzione dei metodi e degli strumenti elettronici di modellazione per l'edilizia e le infrastrutture negli appalti pubblici, modificando ed integrando il Decreto n°560



Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione

È introdotto il concetto di «**gestione informativa** digitale delle costruzioni» che sostituisce il termine «**modellazione** per l'edilizia», facendo riferimento ad un'attività di **gestione di dati ed informazioni** che va oltre la sola modellazione.

## Obbligatorietà del BIM

La data del **1° Gennaio 2025** viene definita come unico termine temporale per l'**utilizzo obbligatorio del BIM** su appalti con importo a base di gara superiore a **1 milione di euro**, a esclusione di attività di **manutenzione ordinaria e straordinaria**.



## Interoperabilità e formati aperti

Il comma 4 prevede che si: «utilizzino **piattaforme interoperabili** a mezzo di **formati aperti non proprietari** al fine di non limitare la concorrenza tra i fornitori di tecnologie e il coinvolgimento di specifiche progettualità tra i progettisti, nonché di consentire il trasferimento dei dati tra pubbliche amministrazioni e operatori economici partecipanti alla procedura aggiudicatari o incaricati dell'esecuzione del contratto.»

## Figure minime previste per le SA nell'allegato I.9

le SA devono nominare un **gestore dell'ambiente di condivisione dei dati (CDE Manager)** ed almeno un **gestore dei processi digitali (BIM Manager)** supportati da modelli informativi, e un **coordinatore dei flussi informativi (BIM Coordinator)** all'interno della struttura di supporto al responsabile unico.

## Capitolato Informativo

l'articolo 41 del Nuovo Codice prevede che in caso di adozione di metodi e strumenti di gestione informativa digitale delle costruzioni, il documento di indirizzo della progettazione contenga anche il **capitolato informativo**

UNI 11337 – EDILIZIA E OPERE DI INGEGNERIA CIVILE – GESTIONE DIGITALE DEI PROCESSI INFORMATIVI			
PARTE	TITOLO	Norma in Elaborazione	Norma approvata /in revisione
1	Modelli, elaborati e oggetti informativi per prodotti e processi		UNI 11337-1:2017
2	Criteri di denominazione e classificazione di modelli, prodotti e processi		UNI 11337-2:2021
3	Modelli di raccolta, organizzazione e archiviazione dell'informazione tecnica per i prodotti da costruzione		UNI 11337-3:2015
4	Evoluzione e sviluppo informativo di modelli, elaborati e processi		UNI 11337-4:2017
5	Flussi informativi nei processi digitalizzati		UNI 11337-5:2017
6	Linee Guida per la redazione del capitolato informativo		UNI 11337-6:2017
7	Requisiti di conoscenza, abilità e competenza delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa		UNI 11337-7:2018
8	Processi integrati di Gestione delle Informazioni e delle Decisioni	UNI 11337-8	
9	Gestione informativa in fase di esercizio (Due Diligence, Piattaforma collaborativa e Fascicolo del fabbricato)	UNI 11337-9	
10	Organizzazione delle figure coinvolte nella gestione e nella modellazione informativa	UNI 11337-10	
11	Sicurezza dei dati	UNI 11337-11	
12	Sistemi di gestione BIM (PdR 74/2020)	UNI 11337-12	

## I CONTRATTI

**Capitolato informativo (CI):** Esplicitazione delle esigenze e dei requisiti informative richiesti dal committente agli affidatari. Il capitolato informativo corrisponde, nelle sue linee essenziali, all'Employer Information Requirement(EIR).

**Offerta per la gestione informativa (oGI):** Esplicitazione e specificazione della gestione informativa offerta dall'affidatario in risposta alle esigenze e requisiti richiesti dal committente. Corrisponde, nelle sue linee essenziali, al BIM execution Plan pre-contract award (BEP pre-contractaward).

**Piano per la gestione informativa (pGI):** Pianificazione operative della gestione informative attuata dall'affidatario in risposta alle esigenze e dal rispetto dei requisiti della committenza. Corrisponde, nelle sue linee essenziali, al BIMexecution Plan.

## Capitolato Informativo (CI)

I requisiti di produzione, gestione (verifica, validazione, archiviazione ecc.) e trasmissione di dati, informazioni e contenuti informativi sono specificati dal committente all'interno del capitolato informativo (CI).

Il CI, comunque redatto e articolato dal committente in ragione delle proprie finalità di economicità, efficacia ed efficienza del processo, tratta almeno i seguenti argomenti:

### - Sezione tecnica

- caratteristiche tecniche e prestazionali dell'infrastruttura hardware (in termini di potenzialità) e software (in termini di tipologia);
- infrastruttura del committente interessata e/o messa a disposizione;
- infrastruttura richiesta all'affidatario per l'intervento specifico;
- formati di fornitura dati messi a disposizione inizialmente dal committente;
- formati di fornitura e scambio dati;
- sistema comune di coordinate e specifiche di riferimento;
- specifica per l'inserimento di oggetti;
- sistema di classificazione e denominazione degli oggetti;
- specifica di riferimento dei livelli di approfondimento di modelli ed elaborati;
- competenze di gestione informativa dell'affidatario.

### - Sezione gestionale

- obiettivi informativi, strategici e usi dei modelli e degli elaborati;
- livelli di sviluppo degli oggetti e delle schede informative;
- ruoli, responsabilità e autorità ai fini informativi;
- caratteristiche informative dei modelli, degli oggetti e/o degli elaborati messi a disposizione dalla committenza;
- strutturazione e organizzazione della modellazione digitale;
- politiche per la tutela e la sicurezza del contenuto informativo;
- proprietà del modello;
- modalità di condivisione di dati, informazioni e contenuti informativi;

<b>5</b>	<b>INDICAZIONI PER LA STESURA</b>	<b>4</b>
5.1	Premesse .....	4
5.2	Riferimenti normativi .....	5
5.3	Sezione tecnica.....	5
prospetto 1	Esempio di infrastruttura hardware.....	5
prospetto 2	Esempio di tipologia software.....	6
prospetto 3	Modulo per i formati dati emessi inizialmente dal committente.....	7
prospetto 4	Modulo per i formati dati da utilizzare.....	7
prospetto 5	Esempio modulo per i dati IFC.....	8
prospetto 6	Raccolta del sistema di riferimento.....	8
prospetto 7	Specifica per l'inserimento di oggetti.....	9
prospetto 8	Esperienze pregresse dell'affidatario in ambito di gestione informativa.....	9

## Esempio di infrastruttura hardware

Hardware			
	Obiettivo		Specifiche
	Processazione dati		Processore
	Archiviazione temporanea dati		Memoria di archiviazione
	Archiviazione di backup dati		Memoria di archiviazione
	Trasmissione dati		Rete
	Visualizzazione dati		Monitor
	Risoluzione grafica		Scheda
	Processazione dati		Processore
	...		...

## ➤ Sezione tecnica

Software			
Ambito	Disciplina	Software	Compatibilità con formati aperti
Progettazione architettonica	Modellazione BIM	Specificare la tipologia e versione di software disponibile	Ad esempio: IFC 4
	Computo metrico		Ad esempio: txt, csv
	Rendering		
	...		
Progettazione strutturale	Analisi e calcolo		
	Modellazione BIM		
	...		
Progettazione impiantistica	Modellazione BIM		
	Analisi energetica		
	...		
Model and Code checking	Aggregazione modelli in IFC, secondo UNI EN ISO 16739		
	Controllo interferenze		
	Controllo incoerenze		
Gestione cantiere	Programmazione lavori		
Manutenzione			
Programmazione			
...	...	...	...



## 5.3.4 Formati emessi dal committente

Formato dati di scambio da utilizzare			
Obiettivo	Formato		Nota
	Aperto	Proprietario	
Modellazione BIM	UNI EN ISO 16739		
Rappresentazione grafica 2D	Inserire l'estensione del file da utilizzare, specificando se il formato è proprietario o aperto.		
Revisione modelli e analisi interferenze			
Attività di computazione			
Attributi di manutenzione e gestione			
Altri documenti digitali			
Documenti di testo			
Presentazioni			
Programmazione			
Altri			

### Esempio modulo per i dati IFC

Proprietà dati IFC, secondo UNI EN ISO 16739		
Tipologia elemento formato proprietario	Classe IFC	Set di proprietà richieste
Muratura	IfcWall	Codifica progetto Codifica oggetto Area Livello superiore Livello inferiore

## 5.3.5 Formati da utilizzare dall'affidatario

Devono comunque essere indicati i formati aperti da utilizzare (obbligatori per le commesse che interessano la normativa sugli appalti pubblici) ed eventualmente quelli proprietari (file sorgenti).

L'affidatario specifica in ogni modo nella propria oGI, e successivamente nel proprio pGI, l'estensione dei file sorgenti in assonanza con l'infrastruttura software dichiarata (vedi punto 5.3.1.2).

La specifica può essere definita attraverso un modulo come contenuto nel prospetto 4.

### Modulo per i formati dati da utilizzare

Formato dati di scambio da utilizzare			
Obiettivo	Formato		Nota
	Aperto	Proprietario	
Modellazione BIM	UNI EN ISO 16739		
Rappresentazione grafica 2D			
Revisione modelli e analisi interferenze	Inserire l'estensione del file da utilizzare, specificando se il formato è proprietario o aperto.		
Attività di computazione			
Attributi di manutenzione e gestione			
Altri documenti digitali			
Documenti di testo			
Presentazioni			
Programmazione			
Altri			

# UNI 11337-6: Linee Guida per la redazione del capitolato informativo

## ➤ Sezione gestionale

OBIETTIVI  
del modello

prospetto 9

### Obiettivi del modello in relazione alle fasi del processo (esempio non esaustivo)

Fase	Obiettivo	Modello	Obiettivo
Autorizzativa	Definizione degli spazi, definizione delle prestazioni a livello di spazi e ottenimento di autorizzazioni e pareri	ARCH	Ottenimento permesso di costruire
		STRUTT	Predimensionamento
		MEP	Ottenimento ex L.10/91 e s.m.i.
		Altri	Altri
Tecnologica	Definizione delle tecnologie	tutti	Gara per individuazione appaltatore
		Altri	Altri
Altro	...	...	...

### Usi dei modelli informativi

USI  
del modello

STADIO EVOLUTIVO OPERE	Fase	MODELLI BIM DISCIPLINARI						
		Architettonico	Strutture	Facciate	Impianti meccanici	Impianti elettrici	Impianti idrico-sanitari	Reti informatiche
PRODUZIONE	Costruzione							
	Collaudo							
CONSEGNA	Messa in esercizio							

## ➤ Sezione gestionale

### Elaborati richiesti

ELABORATI RICHIESTI		
ELABORATO	NOTA	ORIGINE
Piante	Per ogni piano fuori terra	da modello
	Per ogni piano interrato	
	Piano copertura	
Sezioni	Significative	da modello
Prospetti	Tutti	da modello
Abachi	Porte e finestre	da modello
Nodi	Significativi per tecnologia	elaborato grafico
Permesso di costruire	Copia completa	esterno
Elaborati documentali	Tutti	da modello
Altro	Altro	

### Elaborati richiesti per ogni fase

	Fase Esigenziale	Fase di fattibilità e sostenibilità	Fase funzionale spaziale	Fase autorizzativa	Fase tecnologica	Fase di esecuzione	Fase di collaudo e consegna	Fase di gestione, manutenzione
ELABORATO	0	1	2	3	4	5	6	7
Rilievo energetico			x					x
VAS - VIA - AIA		x						x
Rappresentazione grafica	x	x	x	x	x	x	x	x
Relazione illustrativa		x	x	x	x			x
Relazione geologica			x	x				x
Relazione idrogeologica			x	x				x
Relazione idraulica			x	x				x
Relazione sismica			x	x				x
Relazione geotecnica			x	x				x
Relazione paesaggio			x	x				x
Relazione archeologica			x	x				x
Relazione urbanistica			x	x				x
Relazione antincendio			x	x				x
Relazione sulla sicurezza			x	x	x	x		x
Relazione energetica				x	x		x	x
Relazione tecno-alimentare			x					x
Relazione di variante						x		x
Capitolato d'appalto			x	x	x			x
Capitolato descrittivo			x	x	x			x
Capitolato prestazionale			x					x

## ➤ Sezione gestionale

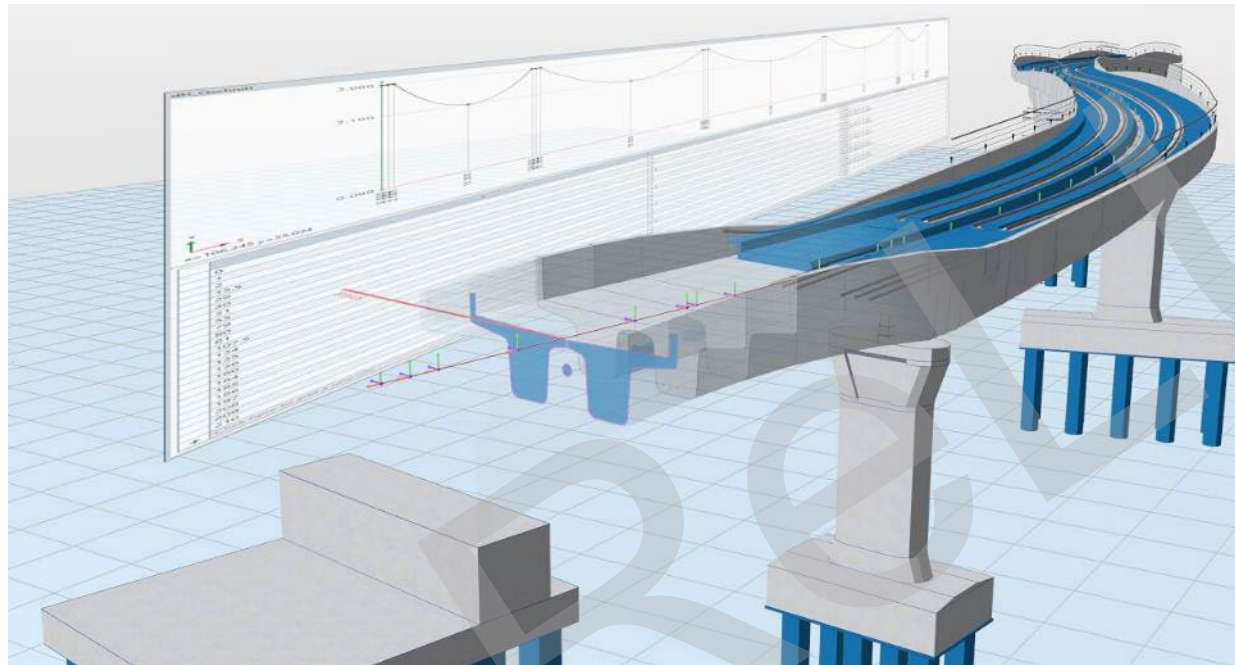
prospetto 13 Esempio di livelli di approfondimento

	Stadio di programmazione strategica		Stadio di progettazione			Stadio di produzione		Stadio di esercizio
	Fase esigenziale	Fase di fattibilità e sostenibilità	Fase funzionale spaziale	Fase autorizzativa	Fase tecnologica	Fase di esecuzione	Fase di collaudo e consegna	Fase di gestione, manutenzione
<b>OGGETTI DEL MODELLO</b>	<b>LOD</b>							
Architettonico GEN	-	A	B	C	D	D/E	F	F
Architettonico Arredi	-	A	B	C	C	D/E	F	F
Architettonico Finiture	-	A	B	C	D/E	D/E	F	F
Architettonico Esterni	-	A	B	C	D	D/E	F	F
Architettonico Elettrico	...	...	...	...	A	C	-	-
Architettonico Idraulico	...	...	...	...	A	C	-	-
Architettonico VVF	...	...	...	...	C	C	-	-
Architettonico Marketing	...	...	...	...	D	...	F	...
Strutture	...	...	B	C	D/E	...	...	...
Impianto elettrico	...	A	B	C	D	E	F	G
Impianto climatizzazione	...	A	B	C/D	D/E	E	F	G
Altri	...	...	...	...	...	...	...	...

# BIM per le infrastrutture

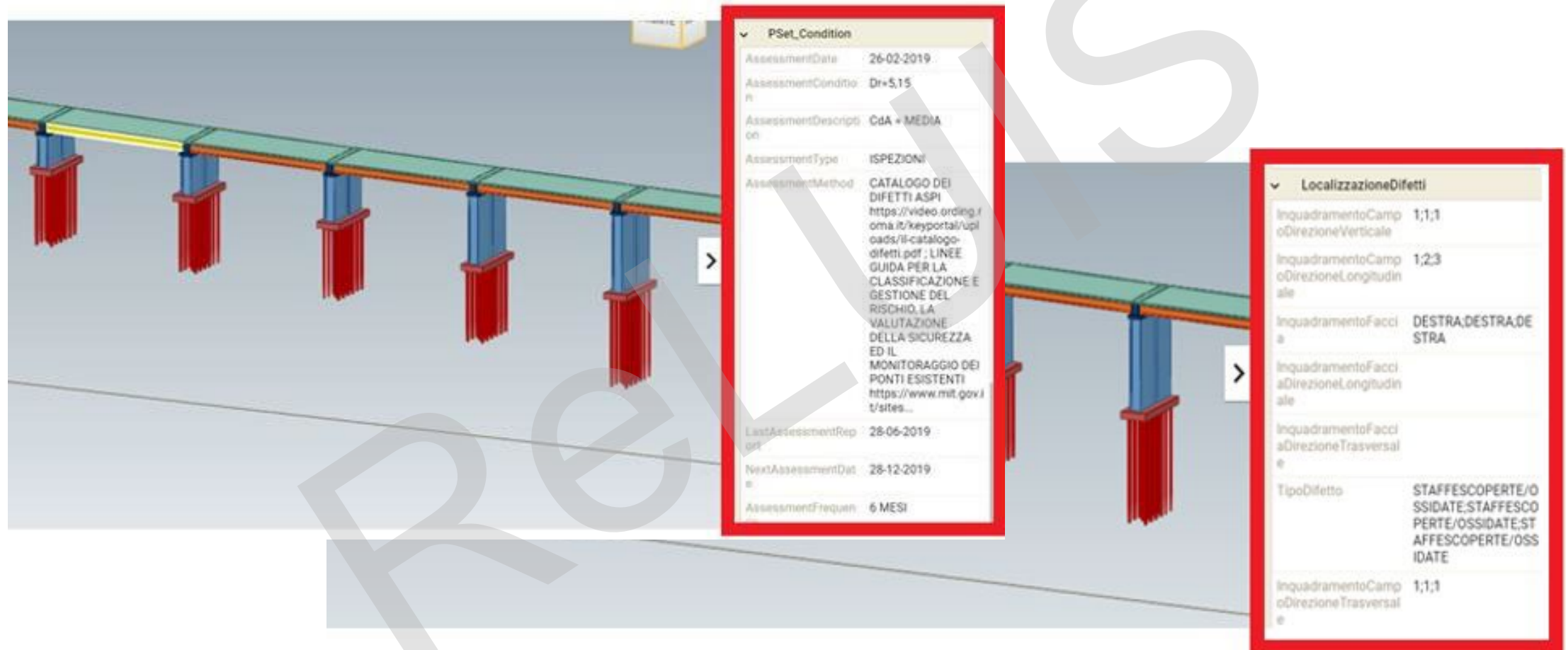


In fase di progettazione...



## Necessità:

- semplificare la progettazione di opere complesse;
- aumentare la collaborazione tra i soggetti coinvolti;
- Incrementare l'efficienza e la produttività;
- ridurre i tempi e i costi di intervento;
- eliminare gli errori di progettazione;
- migliorare la qualità e l'affidabilità del risultato finale.







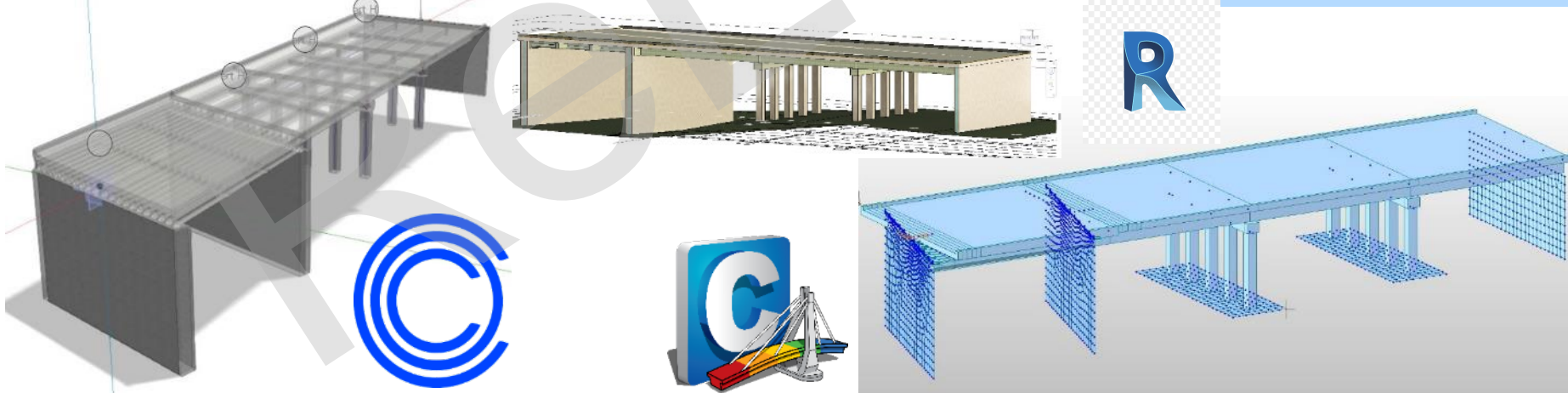





## 1. Viadotto Cannete-Vinchiaturo (IOP 100)



Realizzazione di un **modello parametrico tridimensionale** contenente tutte le **informazioni** pervenute. È stato modellato mediante diversi approcci, in software BIM distinti e con differenti gradi di dettaglio al fine di constatare la strategia migliore da adottare. Poi il modello BIM del ponte è stato trasferito in un software FEM adatto alle analisi sulle infrastrutture.

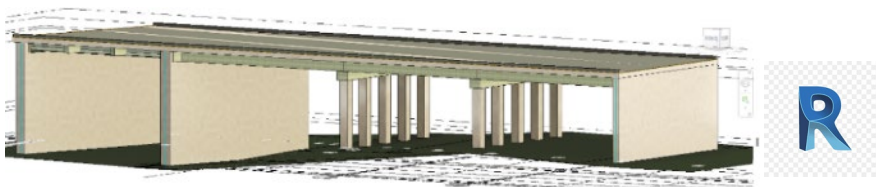







**1. Viadotto Cannete-Vinchiatura (IOP 100)**

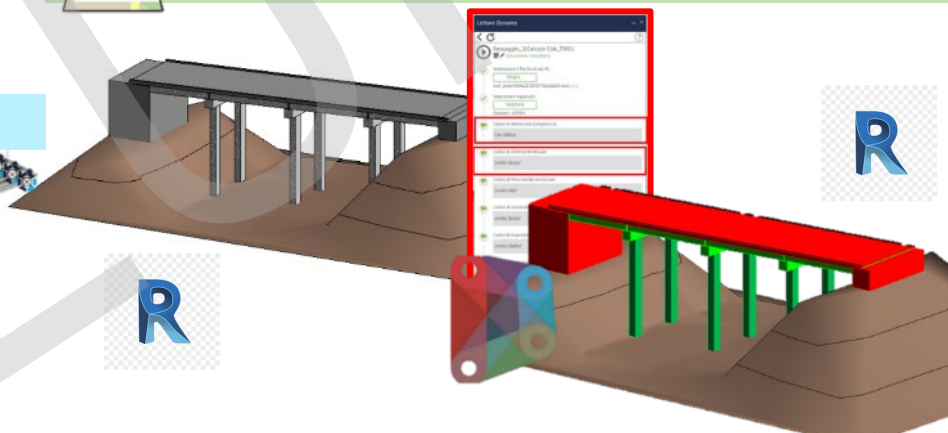
Realizzazione di un **modello parametrico tridimensionale** contenente tutte le **informazioni** acquisite. Revit Structure restituisce il **modello analitico** della struttura, contenente **tutti i dati inseriti**. Le successive analisi strutturali sono state effettuate mediante software FEM.






**2. Viadotto Antrodoco**

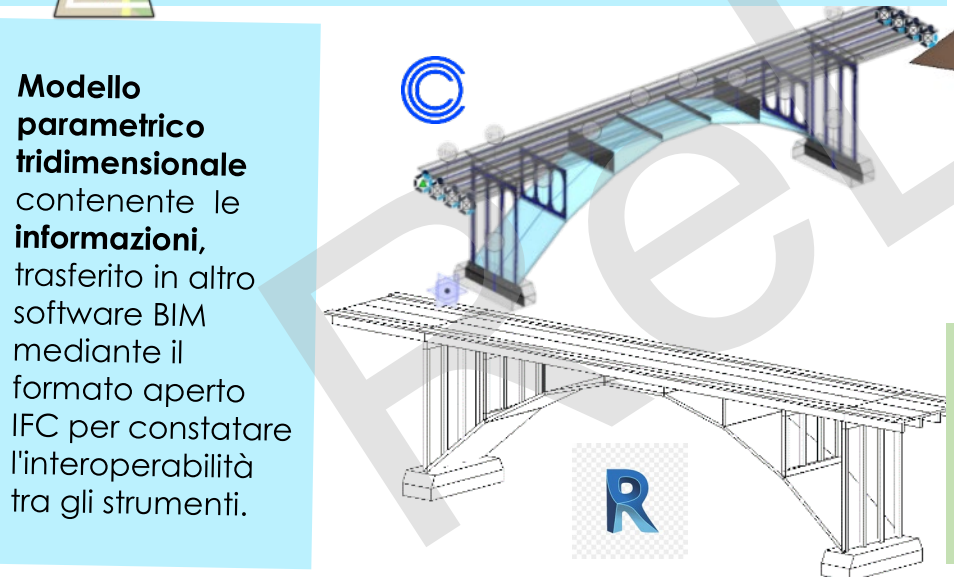
Modello parametrico tridimensionale in cui è possibile aggiungere nuove **informazioni** estratte dalle **schede di difettosità** consigliate dalle linee guida, mediante l'applicazione di un **TOOL** sviluppato per il calcolo della **classe di attenzione globale** del ponte





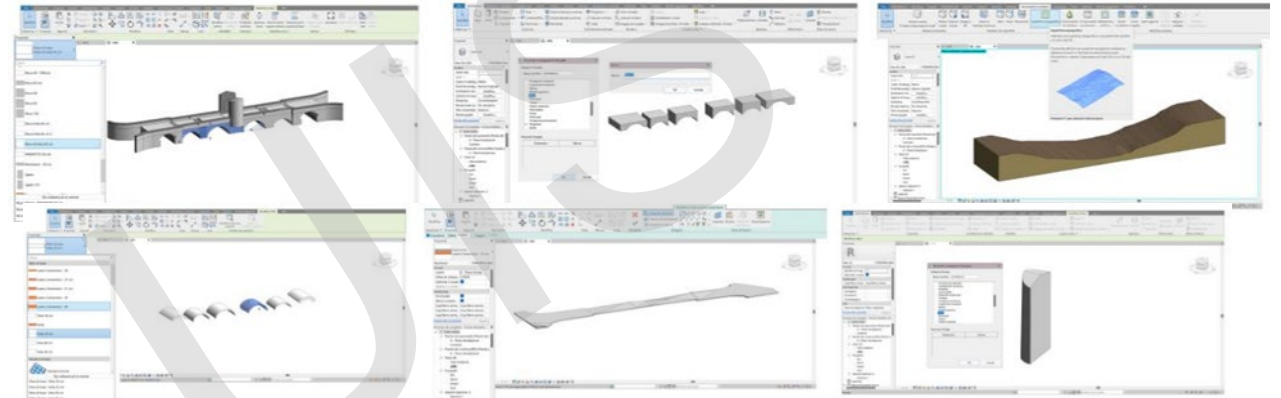
**3. Ponte Ciolo**

Modello parametrico tridimensionale contenente le **informazioni**, trasferito in altro software BIM mediante il formato aperto IFC per constatare l'interoperabilità tra gli strumenti.





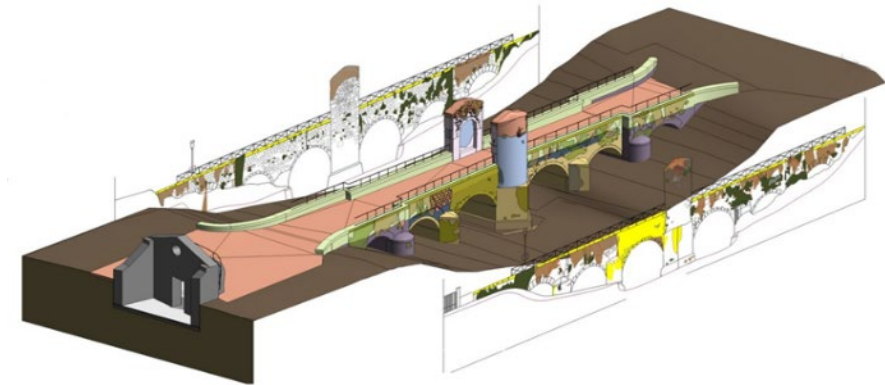
1. Nuvola di punti da laser scanner terrestre (TLS)



2. Fase di parametrizzazione degli elementi costruttivi

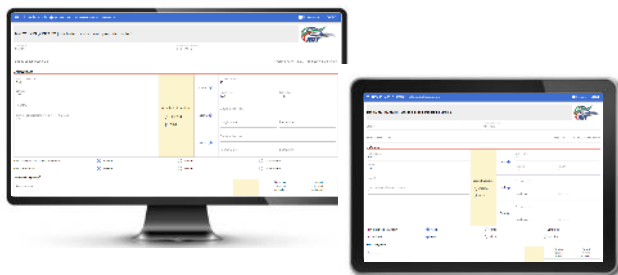


3. Modello parametrico a partire dalla procedura scan-to-BIM



4. Modello parametrico del ponte e visualizzazione in ambiente parametrico delle forme di degrado riscontrate

# Applicazione per l'informatizzazione delle schede delle Linee Guida



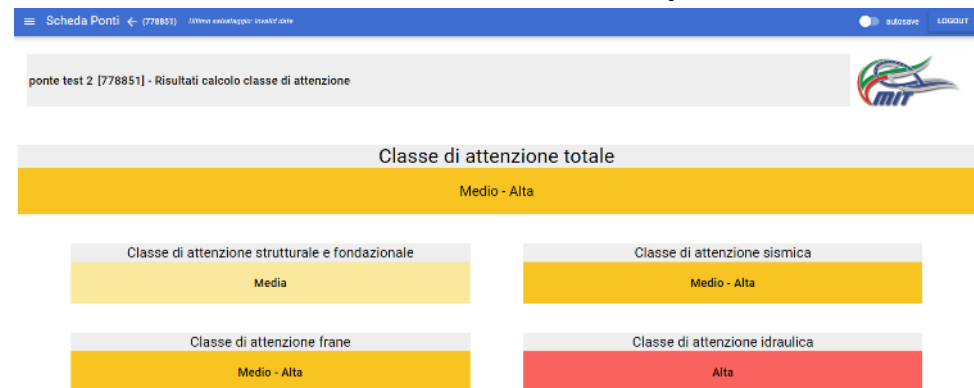
Applicazione funzionante su pc e tablet

## Schede di censimento ponti (Livello 0)

## Schede di valutazione dei difetti

N°	Descrizione difetto	visto	G	Estensione K1			Intensità K2			N° foto	PS	NA	NR	NP	Critico	Note
				0,2	0,5	1	0,2	0,5	1							
c.a./c.a.p.1	Macchie di umidità passivo	<input type="checkbox"/>	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.2	Macchie di umidità attivo	<input type="checkbox"/>	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Dif. Cer.1	Tracce di scolo	<input checked="" type="checkbox"/>	3	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input checked="" type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.3	Tracce di olii / ammassati	<input type="checkbox"/>	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Dif. Cer.2	Rischi di acqua	<input type="checkbox"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.4	Vespai	<input type="checkbox"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.5	Distacco del copriferro	<input type="checkbox"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.6	Armatura ossidata/corrota	<input type="checkbox"/>	5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.7	Lesioni e rughe/mole moderate	<input type="checkbox"/>	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.8	Fessure orizzontali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.9	Fessure verticali	<input type="checkbox"/>	2	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.10	Fessure diagonali	<input type="checkbox"/>	5	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.11	Lesioni attacco pilastri (spalle e testate)	<input type="checkbox"/>	3	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
c.a./c.a.p.12	Riprso successivo deteriorato	<input type="checkbox"/>	1	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							
Dif. Cer.3	Danni da urto	<input type="checkbox"/>	4	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>	<input type="radio"/>							

## Definizione della classe di attenzione del ponte



Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Lezione 5 - Il monitoraggio nella sicurezza delle infrastrutture e la digitalizzazione

# Modulo I - L'applicazione delle linee guida per i ponti esistenti

Coordinatori Proff. Edoardo Cosenza e Mauro Dolce

## a cura di:

Domenico Asprone, Antonio Bilotta, Eugenio Chioccarelli, Marco Di Prisco, Sergio Lagomarsino, Raffaele Landolfo, Angelo Masi, Maria Rosaria Pecce, Mauro Sassu, Marco Savoia

## con il contributo di

Beatrice Belletti, Francesca da Porto, Maria Giuseppina Limongelli, Giovanni Plizzari, Antonino Recupero, Paolo Riva, Loris Vincenzi, Daniele Zonta

