Progettare oggi un cavalcavia prefabbricato intelligente dalla struttura resistente alla struttura che dialoga con il tempo

Ingg. Andrea & Diego Dell'Erba



Digital Twin, sensori a fibra ottica FBG, Intelligenza Artificiale e manutenzione predittiva nella nuova ingegneria infrastrutturale

Anno 2026

Progettare oggi un cavalcavia prefabbricato intelligente: dalla struttura resistente alla struttura che dialoga con il tempo

Digital Twin, sensori a fibra ottica FBG, Intelligenza Artificiale e manutenzione predittiva nella nuova ingegneria infrastrutturale

Abstract (Italiano)

La moderna progettazione di un **cavalcavia** su viabilità provinciale richiede oggi una visione integrata capace di superare il modello tradizionale centrato esclusivamente sul dimensionamento statico finale.

L'opera deve essere concepita come sistema tecnico evolutivo, nel quale:

- il comportamento geotecnico governa le condizioni di fondazione;
- la prefabbricazione industriale garantisce qualità e controllo;
- i sensori in **fibra ottica FBG** permettono lettura continua delle deformazioni;
- il **Digital Twin** confronta costantemente teoria e realtà;
- la **Intelligenza Artificiale** anticipa l'insorgere delle anomalie.

La struttura moderna non nasce più soltanto per resistere, ma per raccontare il proprio comportamento nel tempo.

Abstract (English)

Modern design of a prefabricated road overpass requires an integrated engineering approach able to overcome the traditional model based only on final static verification.

The infrastructure must be conceived as an evolving technical organism where:

- geotechnical behaviour controls foundation response;
- industrial prefabrication ensures quality;
- embedded FBG optical sensors provide continuous strain reading;
- Digital Twin continuously compares theoretical and real behaviour;
- Artificial Intelligence predicts progressive anomalies.

The modern structure is no longer only load-bearing: it becomes self-interpreting over time.

1. Il territorio come primo livello della sicurezza

Ogni cavalcavia nasce prima nel terreno che nel calcolo.

La fase preliminare impone:

- rilievi topografici ad alta precisione;
- ricostruzione geologica del sito;
- indagini geotecniche profonde;
- verifica piezometrica;
- studio dei cedimenti differenziali;
- analisi idraulica del contesto.

La relazione geotecnica fondamentale:

$$\sigma' = \sigma - u$$

ricorda che la tensione efficace governa realmente il comportamento del terreno.

In presenza di terreni compressibili o falda superficiale, il comportamento delle spalle diventa determinante.

2. Perché la prefabbricazione è oggi scelta strategica

La prefabbricazione consente:

- riduzione dei tempi di esecuzione;
- controllo industriale dei materiali;
- precisione geometrica elevata;
- minori interferenze sul traffico.

Schema tipico:

- spalle in cemento armato;
- fondazioni profonde;
- travi prefabbricate precompresse;
- traversi di irrigidimento;

- soletta collaborante.

La prefabbricazione oggi non è soltanto velocità.

È controllo ingegneristico superiore.

3. La trave prefabbricata va verificata in tutte le fasi

La verifica strutturale non può fermarsi all'esercizio finale.

Occorre analizzare separatamente:

- prefabbricazione;
- trasporto;
- sollevamento;
- varo;
- esercizio.

Relazione meccanica:

$$\sigma = \frac{N}{A} \pm \frac{M}{W}$$

Ma:

$$M_{varo} \neq M_{esercizio}$$

Il massimo rischio spesso si genera proprio durante il montaggio.





4. La trave intelligente: sensori FBG già in stabilimento

La vera innovazione è che la trave deve uscire dallo stabilimento già monitorabile.

I sensori FBG vengono integrati:

- lungo i cavi di precompressione;
- nelle fibre inferiori tese;
- nelle fibre superiori compresse;
- nelle zone di massimo momento;
- presso gli appoggi.

Equazione del sensore:

$$\Delta\lambda_B = K_\varepsilon \cdot \varepsilon + K_T \cdot \Delta T$$

Essi misurano:

- deformazioni;
- temperatura;
- variazioni di rigidezza.

5. Digital Twin: la replica viva della struttura

Il modello digitale contiene:

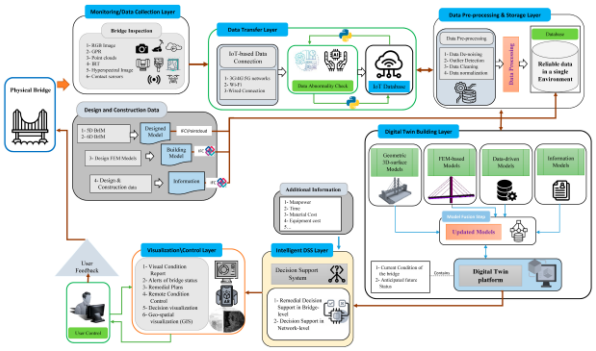
- geometria reale;
- materiali reali;
- cronologia delle deformazioni;
- dati sensoriali continui.

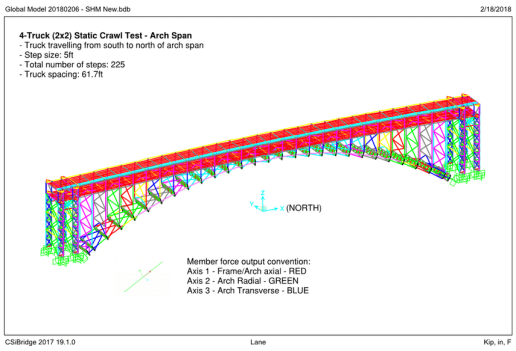
Funzione di confronto:

$$R(t) = D_{reale}(t) - D_{teorico}(t)$$

Quando il residuo cresce:

si apre la lettura predittiva.





6. IA e manutenzione predittiva

La IA legge serie storiche continue.

Funzione:

$$P(danno) = f(\varepsilon, T, f, tempo)$$

Individua:

- deviazioni progressive;
- perdita di rigidezza;
- segnali deboli.

La manutenzione diventa predittiva.

Non più ispettiva.

7. Box tecnico — Metodo Dell’Erba

Una struttura moderna non è conclusa il giorno del collaudo.

Il collaudo segna soltanto l’inizio della sua lettura.

La vera sicurezza nasce quando la struttura continua a parlare dopo essere stata costruita.

8. Conclusione

La nuova ingegneria infrastrutturale porta verso opere che non sono più elementi passivi.

La moderna trave prefabbricata:

- porta carico;
- registra deformazioni;
- produce dati;
- anticipa il degrado.

Questo rappresenta il vero passaggio culturale

costruire bene non basta più.
Occorre comprendere il futuro della struttura mentre la si progetta.

Andrea Dell'Erba & Diego Dell'Erba

L'attività professionale congiunta degli Ingegneri Diego Dell'Erba e Andrea Dell'Erba si sviluppa nel campo dell'ingegneria civile, strutturale e geotecnica, con particolare riferimento alla progettazione, verifica e controllo di opere civili e infrastrutturali.

La competenza integrata deriva dall'unione tra consolidata esperienza tecnico-operativa e moderna capacità di modellazione progettuale, con attenzione ai processi evolutivi dell'ingegneria contemporanea.

Gli ambiti principali di attività comprendono:

- opere strutturali civili e infrastrutturali
- ponti, cavalcavia e viadotti
- fondazioni speciali e geotecnica applicata
- consolidamenti e opere territoriali
- gestione tecnica del cantiere
- monitoraggio strutturale avanzato

Particolare orientamento è rivolto all'impiego di strumenti innovativi quali:

- **Digital Twin**
- sensori a **fibra ottica FBG**
- modelli di manutenzione predittiva
- sistemi di **Intelligenza Artificiale**

L'impostazione professionale è orientata a una ingegneria capace di integrare progettazione, controllo continuo e lettura intelligente del comportamento dell'opera nel tempo.