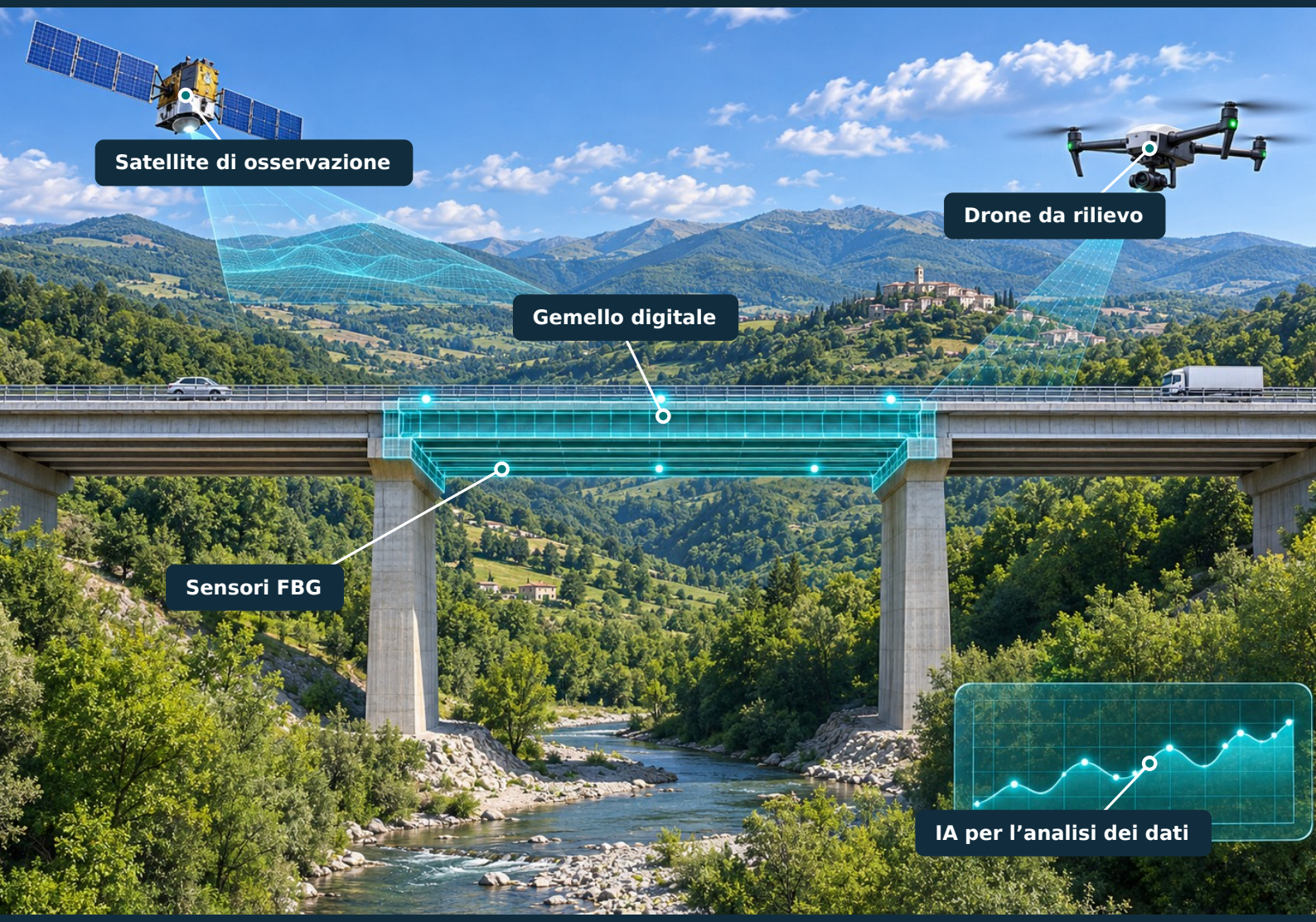
CYBER PHYSICAL ENGINEERING / LA NUOVA INGEGNERIA

Il viadotto che si misura

Dalla fabbrica al cantiere, fino alla manutenzione predittiva

SENSORI FBG / GEMELLO DIGITALE / IA IN CANTIERE



ESEMPIO TECNICO-DIVULGATIVO

Ing. Diego Dell’Erba

www.ingdiegodellerba.it

La sicurezza è il primo progetto.

Tre campate, un piano di misura

Un viadotto stradale ipotetico per mostrare come si progetta il monitoraggio insieme alla struttura.

3 × 30 m	12 m	15 travi
Campate nominali	**Larghezza indicativa**	**5 per campata**

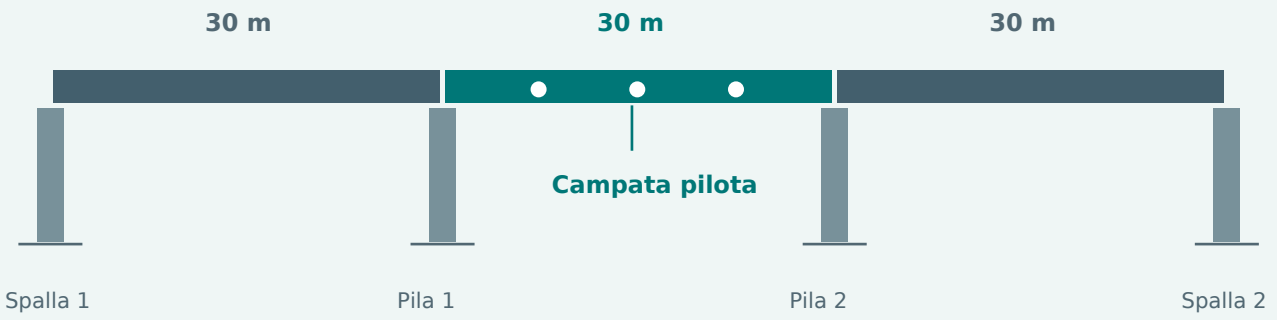


Fig. 1 · Schema longitudinale di principio. I tre punti bianchi indicano le sezioni monitorate a L/4, L/2 e 3L/4 sulle travi selezionate.

La struttura

Impalcato a travi prefabbricate in calcestruzzo armato precompresso e soletta collaborante gettata in opera. L’esempio assume tre campate con schema di semplice appoggio e due pile intermedie.

La campata pilota

Si strumentano tre travi della campata centrale, le due esterne e una interna. Il confronto trasversale aiuta a leggere la distribuzione dei carichi e a distinguere fenomeni locali da variazioni comuni.

Verifiche da sviluppare per un sito reale

Rilievi e indagini geotecniche, eventuale verifica idraulica, azioni stradali e sismiche, stati limite, appoggi e fasi transitorie di trasporto, varo e getto. Riferimenti a pag. 13.

La fibra entra nella trave

I sensori FBG si installano in stabilimento, con i controlli ottici previsti prima, durante e dopo le lavorazioni.



Fig. 2a · Illustrazione della posa nel cassero prima del getto. I richiami indicano i componenti illustrati.

Prima del getto	Si fissano i sensori longitudinali con supporti compatibili con il dettaglio costruttivo. Si proteggono cavo, uscita e connettori. Si registrano posizione, orientamento e spettro ottico iniziale.
Getto e maturazione	Si controllano continuità ottica e qualità dei picchi, registrando temperatura e fasi di getto e maturazione. I fissaggi devono sopportare le lavorazioni previste.
Trasferimento e trasporto	Si documentano la sequenza di rilascio della precompressione e le letture prima e dopo il trasferimento, dove previsto. Si ripete il controllo prima del trasporto e all’arrivo in cantiere.

Identità di ogni sensore

La scheda della trave registra codice FBG, coordinate, calibrazione, linea ottica, fotografie e letture di riferimento. La scheda segue la trave fino al gestore.

Il sensore prima del getto

Un primo piano mostra il collegamento fra il sensore incorporato nella trave e la linea ottica che porta il segnale all’esterno.

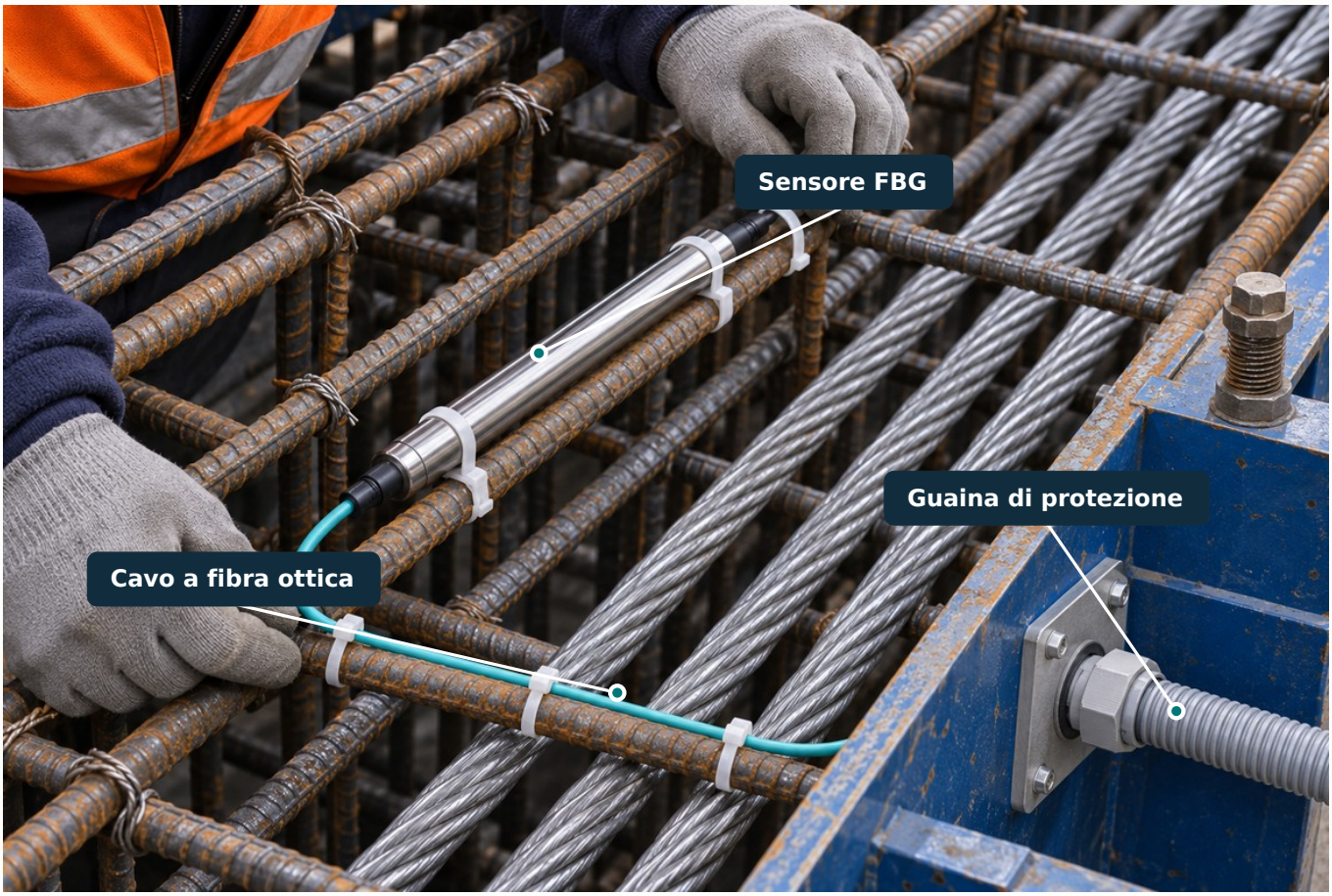


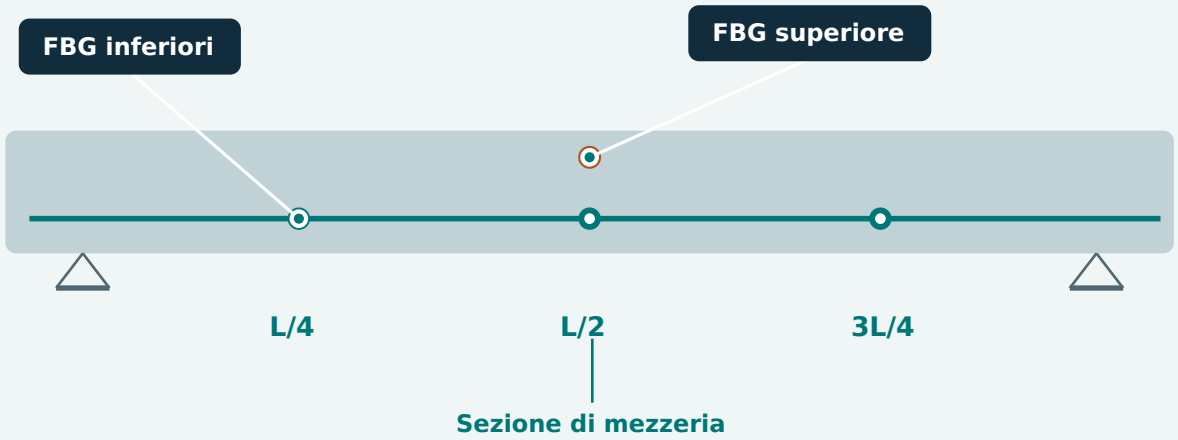
Fig. 2b · Dettaglio illustrativo della posa. Geometria, fissaggio e protezione sono definiti nel progetto di strumentazione della trave.

Sensore FBG	Il sensore di deformazione è orientato lungo l’asse della trave. Il suo montaggio deve consentire il trasferimento della deformazione del calcestruzzo al sensore.
Cavo di collegamento	Il cavo è instradato e fissato per evitare schiacciamenti e pieghe strette. L’uscita dal cassero è protetta per le operazioni di getto e disarmo.
Controllo prima del getto	Si acquisisce lo spettro di ogni canale, si verifica la leggibilità del picco e si associa la misura al codice della trave e alla posizione documentata.

Dove e che cosa si misura

I reticoli di Bragg in fibra ottica (FBG) rilevano deformazioni locali. Per interpretarle si misura anche la temperatura.

Trave pilota in prospetto



Schema longitudinale semplificato, senza scala

Fig. 3 · Tre misure inferiori lungo ciascuna trave e una superiore in mezzeria. I riferimenti termici, previsti vicino alle sezioni strumentate, sono omessi dallo schema.

Dalla lunghezza d’onda alla deformazione

Il reticolo riflette una banda stretta di luce. L’interrogatore legge lo spostamento della lunghezza d’onda riflessa, influenzato da deformazione e temperatura. Un riferimento ottico disaccoppiato meccanicamente aiuta a correggere la sensibilità termica del sensore. Le deformazioni termiche reali della trave si interpretano nel modello.

Dotazione indicativa della campata pilota

12 canali di deformazione su 3 travi, più 9 riferimenti termici locali, uno per sezione su ogni trave. Se si vogliono stimare gradienti termici verticali, servono riferimenti aggiuntivi a quote diverse. Spostamenti degli appoggi, frecce e vibrazioni richiedono misure complementari quando rilevanti.

Dati disponibili anche in caso di interruzione della rete

Rami ottici separati per limitare la perdita di canali, armadio protetto, alimentazione di riserva e memoria locale con sincronizzazione al ripristino. Frequenza di campionamento dimensionata sugli eventi da osservare.

Dal dato al modello

Il gemello digitale collega l’opera costruita, le misure dei sensori e un modello di calcolo aggiornabile con procedure documentate.



Fig. 4 · Flusso delle informazioni. Il BIM identifica componenti e sensori. Il FEM simula la risposta strutturale.

1. Ricostruire le fasi reali

Il modello geometrico conserva codici delle travi, appoggi, quote e posizione dei sensori. Il modello agli elementi finiti rappresenta per fasi trasferimento della precompressione, varo, getto della soletta e servizio. Tra i fenomeni da valutare rientrano viscosità, ritiro e temperatura.

2. Calibrare e verificare

Si confrontano deformazioni e, se disponibili, frecce indipendenti durante prove con carichi noti. Per verificare la capacità di riprodurre il comportamento si usano anche misure indipendenti da quelle di calibrazione. Si registrano ipotesi, parametri e incertezza.

3. Controllare lo scarto

Il residuo è la differenza fra misura e previsione per condizioni confrontabili. Si controllano persistenza, coerenza tra travi, temperatura, traffico e qualità ottica. Ogni aggiornamento del modello va approvato e registrato con la relativa versione.

Il dato deve poter essere ricostruito

Per ogni misura si conservano valore grezzo e corretto, unità, marca temporale, canale, stato di qualità e versione della calibrazione. Accessi, modifiche e copie di sicurezza sono gestiti con responsabilità definite.

Da uno scarto a un’ispezione

Una tendenza persistente, verificata su dati affidabili, può far anticipare un controllo mirato su trave, appoggio o giunto.

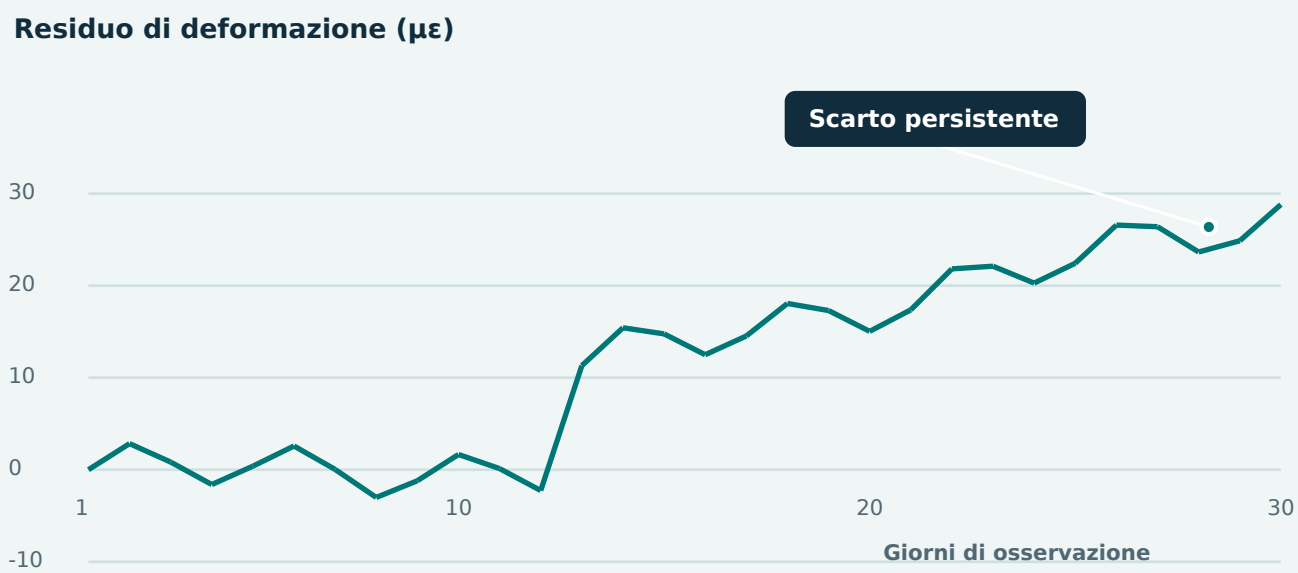


Fig. 5 · Serie simulata a fini divulgativi. I valori rappresentano uno scarto rispetto al modello, privo di soglie operative. 1 με corrisponde a 1 micrometro per metro.

1. Qualità del segnale	Se il picco si perde o il canale diventa incoerente, si apre una verifica strumentale e si segnala la riduzione della copertura.
2. Anomalia persistente	Si confrontano misure di travi vicine, condizioni di traffico, temperatura e spostamenti. Un tecnico valuta se programmare una prova o un’ispezione mirata.
3. Condizione critica	Se ricorrono i criteri del piano di monitoraggio, si attiva il protocollo concordato. Il gestore e i responsabili competenti dispongono le azioni sulla viabilità.

Un esempio di previsione utile

Se gli scarti a mezzeria crescono in più travi sotto carichi e temperature confrontabili, il gestore può anticipare il controllo degli appoggi e dell’impalcato. Il trend da solo lascia aperta la diagnosi.

Le soglie effettive si definiscono con il progettista e il gestore in base al comportamento atteso, alla variabilità ambientale e all’incertezza di misura.

Una trave di 30 m in viaggio

Il trasporto si progetta insieme alla trave. Il percorso, i punti di appoggio e la sequenza di consegna condizionano il montaggio.



Fig. 6a · Trasporto illustrativo di una trave prefabbricata. Tipo di veicolo, numero di assi e modalità di vincolo dipendono dalle verifiche del trasporto.

Prima della partenza	Lo stabilimento consegna massa effettiva, baricentro, punti di appoggio e istruzioni di movimentazione. Si registrano la lettura ottica e la protezione delle terminazioni FBG.
Percorso e autorizzazioni	Il trasportatore verifica sagoma e masse a pieno carico, ripartizione per asse, curve, pendenze, sottopassi, manufatti e accessi. Quando ricorrono le condizioni di eccezionalità, si acquisiscono le autorizzazioni applicabili.
Arrivo in sequenza	Il piano di consegna assegna a ogni trave una fascia oraria, una campata e una posizione di posa. Il capocantiere conferma che accesso e area di ricezione sono disponibili.

Stima di programmazione

Con 15 travi, una trave per viaggio e due consegne effettive per giornata, servono almeno 8 giornate di consegna. Le finestre autorizzate, il meteo e il ritmo di posa determinano il calendario reale.

Dall’arrivo alla piazzola

La trave viene identificata, controllata e presa in carico. Le misure ottiche prima e dopo il viaggio aiutano a interpretare eventuali scostamenti.



Fig. 6b · Area di ricezione illustrativa con appoggi temporanei, controllo delle terminazioni ottiche e delimitazione delle aree operative.

Piazzola e appoggi	Il piano di cantiere individua la viabilità interna e le zone di attesa. Il progetto definisce posizione, portanza e stabilità degli appoggi temporanei e la capacità della piazzola.
Controllo della trave	Si riscontrano codice, documenti, geometria, condizioni delle superfici e integrità delle terminazioni. Il tecnico confronta le letture FBG con quelle di fabbrica considerando temperatura e configurazione di appoggio.
Esito e decisione	Un canale ottico assente o un danno visibile genera una segnalazione. I responsabili valutano la trave e la strumentazione e registrano l’esito prima del passaggio alla fase successiva.

Esempio di tracciabilità

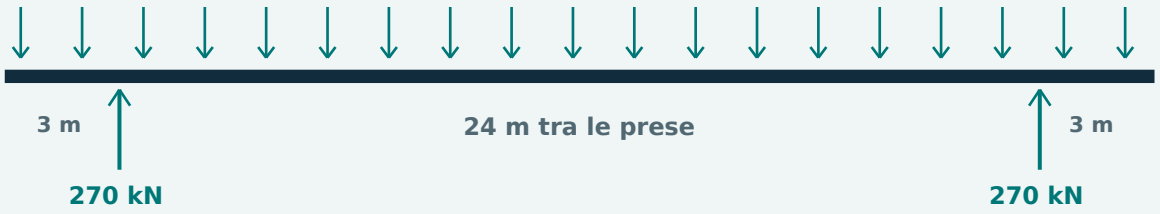
C2-T03 identifica la terza trave della campata centrale. La scheda riunisce verbale di arrivo, foto, esito del controllo FBG e posizione di montaggio.

Quanto pesa una trave?

Esempio statico per una trave ideale di 30 m, a sezione costante. I dati sono ipotetici e i risultati si riferiscono al solo peso proprio.

30 m	0,72 m²	25 kN/m³
Lunghezza teorica L	**Area media ipotizzata A**	**Peso unitario assunto**

Schema statico con due punti di presa simmetrici



Carico uniforme di peso proprio 18,0 kN/m

Fig. 7 · Schema teorico a due punti di presa, con sbalzi da 3 m. Le posizioni servono a illustrare il calcolo.

Volume, peso e massa

V = 0,72 × 30 = **21,6 m³**. Peso W = 21,6 × 25 = **540 kN**. Massa equivalente W / g ≈ **55 t**, con g ≈ 9,81 m/s².

Carico lineare e reazioni

w = 540 / 30 = **18,0 kN/m**. Con geometria e carico simmetrici, reazione verticale a ciascuna presa R = 540 / 2 = **270 kN**.

Momenti di peso proprio

Alla presa M = −18 × 3² / 2 = **−81 kN·m**. In mezzeria M = 270 × 12 − 18 × 15² / 2 = **+1.215 kN·m**.

Dalla stima al piano di sollevamento

Con 3 t ipotetiche di accessori, la massa sospesa totale è circa 58 t. La verifica operativa usa masse reali, diagramma della gru alla configurazione e al raggio previsti, azioni dinamiche, angoli delle brache e portanza della piazzola.

Il modello fornisce le sole azioni statiche del peso proprio. Il progetto verifica anche trave precompressa, punti di presa, instabilità laterale e fasi transitorie.

Il varo, fase per fase

Il piano di sollevamento coordina gru, trave, appoggi, verifiche di stabilità e comunicazioni fra gli addetti.



Fig. 8 · Scena illustrativa del varo. La sequenza effettiva e le misure di sicurezza derivano dai piani approvati e dalle condizioni di sito.

Prima del varo	Si verificano piazzola, stabilizzatori, raggio operativo, attrezzature e condizioni meteo. Si controllano gli appoggi di destinazione e si libera l’area interdetta.
Presa e posizionamento	Gli addetti eseguono presa e movimentazione secondo il piano di sollevamento. Prima dello sgancio si verifica il corretto appoggio e si assicura la stabilità provvisoria prescritta.
Dopo la posa	Si controllano posizione e quote, si registrano vincoli provvisori e si ripetono le letture FBG previste. Diaframmi e soletta seguono la sequenza progettata.

Un caso operativo

Una lettura ottica manca dopo la posa della trave T08. Il sistema propone una verifica del collegamento prima della lavorazione successiva. Il tecnico controlla fibra e connettori, registra l’esito e il responsabile decide come procedere.

Droni, satelliti e IA in cantiere

Ogni strumento risponde a una domanda diversa. I dati vengono associati alla fase di lavoro, alla posizione e al responsabile della verifica.



Fig. 9 · Dalle evidenze di campo alla decisione registrata nel giornale di cantiere.

Drone e rilievi	Fotografie e rilievi aerei documentano accessi, piazzole, appoggi e avanzamento. Le quote di posa si accertano con il metodo e la precisione prescritti. Per i voli si verificano regole e restrizioni applicabili.
Satellite e territorio	L’interferometria radar può contribuire a studiare movimenti lenti del terreno nell’area di interesse, dove copertura e qualità del dato lo consentono. Il rilievo di cantiere e i sensori locali completano il quadro.
Sensori FBG	Le letture sono confrontate prima e dopo trasporto e varo con il contesto di temperatura e appoggio. Il dato confluisce nello storico della trave e viene collegato al gemello digitale.
IA e cronoprogramma	L’IA incrocia schede di arrivo, sequenza di posa, disponibilità della gru e previsioni meteo. Evidenzia dati mancanti e propone alternative di programma da verificare sul campo.

Esempio di decisione registrata

La consegna C2-T03 slitta. L’IA segnala il conflitto con la finestra di varo. L’impresa verifica la nuova sequenza, le interferenze e gli appoggi disponibili, quindi registra la decisione approvata e avvisa i soggetti coinvolti.

La sicurezza fin dal progetto

La Nuova Ingegneria integra progetto strutturale, misure in opera e decisioni documentate lungo tutta la vita del viadotto.

Dalla progettazione alla messa in esercizio

Il progettista definisce le grandezze da osservare, la posizione dei sensori, le prestazioni richieste e i criteri di allerta. L’impresa realizza e documenta la posa. La direzione lavori verifica i controlli di competenza. Le prove previste per il collaudo e l’accettazione del sistema consentono di fissare una base di riferimento.

Il passaggio al gestore

Il gestore riceve il modello dell’opera costruita, l’inventario dei sensori, le tarature, lo storico iniziale, la procedura per dati mancanti e allerte, il piano di ispezione e il registro delle responsabilità. Ispezioni e valutazioni tecniche completano la lettura delle misure.

La macchina calcola, l’uomo decide

L’IA segnala scostamenti e prepara proposte verificabili. Progettista, direzione lavori e gestore assumono le decisioni di rispettiva competenza sulla base di misure, verifiche e ispezioni.

Riferimenti tecnici

- D.M. 17 gennaio 2018, Norme tecniche per le costruzioni (cap. 5, Ponti).
- D.M. 9 marzo 2023, modifiche e integrazioni alle NTC.
- D.M. 204/2022, Linee guida per i ponti esistenti. Riferimento per la fase di esercizio.
- Rassegna tecnica sui sensori FBG nel monitoraggio di strutture civili.
- Codice della strada, art. 10. Veicoli e trasporti eccezionali.
- ENAC. Voli con droni e restrizioni dello spazio aereo.
- Copernicus. Limiti dei dati dell’European Ground Motion Service.

Ing. Diego Dell’Erba

La sicurezza è il primo progetto.