DALL'INGEGNERIA STATICA ALL'INGEGNERIA DINAMICA

Come Digital Twin, Intelligenza Artificiale e monitoraggio continuo stanno cambiando il modo di progettare, gestire e preservare le infrastrutture

Ing. Andrea Dell'Erba - Ing. Diego Dell'Erba



L'ingegneria delle costruzioni
sta attraversando una fase di profonda trasformazione.
Negli ultimi decenni, l'introduzione di tecnologie digitali, sistemi di monitoraggio avanzati, piattaforme di modellazione informativa e strumenti di Intelligenza Artificiale
ha modificato il modo di osservare e gestire il patrimonio costruito.

Anno 2026

DALL'INGEGNERIA STATICA ALL'INGEGNERIA DINAMICA

Come Digital Twin, Intelligenza Artificiale e monitoraggio continuo stanno cambiando il modo di progettare, gestire e preservare le infrastrutture

Abstract

L'ingegneria delle costruzioni sta attraversando una fase di profonda trasformazione. Negli ultimi decenni, l'introduzione di tecnologie digitali, sistemi di monitoraggio avanzati, piattaforme di modellazione informativa e strumenti di Intelligenza Artificiale ha modificato il modo di osservare e gestire il patrimonio costruito.

Per oltre un secolo l'attenzione dell'ingegnere si è concentrata principalmente sulla progettazione, sulla verifica della sicurezza e sulla realizzazione delle opere. Oggi, invece, emerge l'esigenza di estendere il progetto all'intero ciclo di vita dell'infrastruttura, accompagnandola con monitoraggio continuo, aggiornamento dei modelli digitali e manutenzione basata sulle condizioni reali di esercizio.

In questo articolo si propone una riflessione sul passaggio da un approccio tradizionale, definibile come **Ingegneria Statica**, a un paradigma evolutivo che possiamo chiamare **Ingegneria Dinamica**. Quest'ultimo integra Digital Twin, Structural Health Monitoring, sensori intelligenti, Intelligenza Artificiale e manutenzione predittiva per migliorare la conoscenza delle opere e supportare decisioni tecniche più consapevoli.

L'Ingegneria Dinamica viene qui presentata come una proposta metodologica che interpreta l'evoluzione dell'ingegneria contemporanea, ponendo al centro non soltanto il progetto dell'opera, ma la gestione intelligente del suo intero ciclo di vita.

L'ingegneria davanti a un nuovo cambio di paradigma

La storia dell'ingegneria è caratterizzata da trasformazioni profonde che hanno modificato il modo di progettare e costruire. L'introduzione del calcestruzzo armato, lo sviluppo delle strutture metalliche, l'evoluzione dell'analisi numerica e, più recentemente, la diffusione del Building Information Modeling (BIM) hanno rappresentato tappe fondamentali nella crescita della disciplina.

Oggi siamo di fronte a una trasformazione di natura diversa. Non riguarda soltanto nuovi materiali o nuove tecniche costruttive, ma il rapporto stesso tra l'infrastruttura e il tempo.

Per molti decenni il progetto è stato considerato il momento conclusivo del processo di conoscenza dell'opera. Attraverso il calcolo strutturale, le verifiche normative e il collaudo, l'ingegnere definiva le condizioni di sicurezza iniziali della costruzione. Successivamente, la gestione era affidata a ispezioni periodiche, manutenzioni programmate e interventi straordinari, spesso determinati dall'insorgere di fenomeni di degrado.

Questo modello ha consentito di realizzare opere di straordinaria qualità e rimane il fondamento dell'ingegneria strutturale moderna. Tuttavia, il progressivo invecchiamento del patrimonio infrastrutturale, l'aumento dei carichi di esercizio, gli effetti dei cambiamenti climatici e la crescente necessità di ottimizzare le risorse economiche richiedono oggi un'evoluzione del paradigma tradizionale.

La disponibilità di reti di sensori, sistemi di comunicazione, piattaforme cloud e strumenti di analisi dei dati rende possibile osservare il comportamento reale delle opere durante il loro esercizio. Per la prima volta nella storia dell'ingegneria è possibile disporre di una conoscenza continua e quantitativa dello stato di salute delle infrastrutture.

Il progetto, quindi, non termina più con il collaudo.

Inizia una nuova fase nella quale l'opera continua a essere osservata, interpretata e gestita attraverso un flusso costante di informazioni.

Dall'Ingegneria Statica all'Ingegneria Dinamica

L'espressione **Ingegneria Dinamica** non intende sostituire l'ingegneria tradizionale né introdurre una nuova disciplina autonoma. Essa rappresenta piuttosto una chiave interpretativa dell'evoluzione in atto.

L'Ingegneria Statica si fonda sulla capacità di prevedere il comportamento dell'opera mediante modelli matematici, verifiche progettuali e coefficienti di sicurezza. L'Ingegneria Dinamica mantiene questi principi come base imprescindibile, ma aggiunge una nuova dimensione: la conoscenza continua del comportamento reale dell'infrastruttura.

Il passaggio è sostanziale. Non si progetta più soltanto una struttura resistente, ma un sistema capace di essere monitorato, interpretato e gestito lungo tutto il proprio ciclo di vita.

L'infrastruttura diventa così una fonte permanente di informazioni. Le deformazioni, le vibrazioni, le variazioni termiche, gli spostamenti e gli effetti dell'ambiente possono essere misurati in tempo reale attraverso sistemi di monitoraggio sempre più evoluti.

Questi dati non sostituiscono il progetto: lo completano. Consentono infatti di confrontare il comportamento previsto con quello effettivamente osservato, migliorando progressivamente la conoscenza dell'opera e supportando decisioni tecniche più consapevoli.

Il progetto assume quindi una nuova natura: non è più un documento che descrive l'opera al momento della costruzione, ma un processo continuo che accompagna l'intero ciclo di vita dell'infrastruttura.

Questa prospettiva apre la strada a una gestione basata sulla conoscenza, nella quale il monitoraggio continuo, il Digital Twin, l'Intelligenza Artificiale e la manutenzione predittiva diventano elementi integrati di un unico sistema decisionale.

È proprio in questo contesto che il **Digital Twin** assume un ruolo centrale, trasformandosi da semplice rappresentazione digitale dell'opera a piattaforma dinamica per la gestione intelligente delle infrastrutture.

IL DIGITAL TWIN

Dalla rappresentazione digitale alla memoria dinamica dell'infrastruttura

Il **Digital Twin** è oggi uno dei concetti più innovativi nell'ambito dell'ingegneria delle infrastrutture. Negli ultimi anni il termine è stato utilizzato con crescente frequenza, talvolta identificandolo semplicemente con un modello tridimensionale o con una rappresentazione digitale dell'opera. In realtà il suo significato è molto più ampio e profondo.

Il Digital Twin non è un elaborato grafico evoluto né una semplice evoluzione del Building Information Modeling. È un **sistema digitale dinamico**, capace di rappresentare, interpretare e seguire il comportamento di un'infrastruttura durante l'intero ciclo di vita.

Questa differenza, apparentemente sottile, modifica radicalmente il modo di concepire il progetto.

Per oltre un secolo il progetto è stato considerato la descrizione dell'opera al momento della sua costruzione. Con il Digital Twin il progetto diventa invece un organismo dinamico che evolve insieme all'infrastruttura.

L'opera fisica e il modello digitale rimangono costantemente collegati attraverso un flusso continuo di informazioni.

Ogni variazione osservata sulla struttura aggiorna il modello digitale.

Ogni intervento manutentivo viene registrato.

Ogni nuova conoscenza entra a far parte della memoria tecnica dell'opera.

Il progetto smette così di essere una fotografia e diventa un sistema vivente.

Il Digital Twin come evoluzione del progetto

Nella pratica professionale il progetto termina normalmente con il collaudo dell'opera.

Da quel momento inizia una fase completamente diversa, nella quale il gestore dispone spesso di informazioni limitate sul comportamento reale della struttura.

Le verifiche vengono effettuate mediante ispezioni periodiche, controlli visivi e campagne di monitoraggio temporanee.

Questo approccio ha garantito per molti decenni risultati importanti, ma presenta inevitabili limiti.

Le ispezioni descrivono ciò che è visibile.

Il comportamento strutturale, invece, evolve continuamente.

Le deformazioni cambiano.

I materiali invecchiano.

Le condizioni ambientali modificano le prestazioni.

Le azioni di traffico aumentano.

I dissesti geologici evolvono lentamente.

La struttura racconta ogni giorno una storia diversa.

Il Digital Twin nasce proprio per raccogliere questa storia.

Il suo obiettivo non consiste nel sostituire il progetto strutturale, ma nel prolungarne la validità durante tutta la vita dell'opera.

Il progetto iniziale rappresenta la conoscenza teorica.

Il Digital Twin rappresenta la conoscenza reale.

L'integrazione tra queste due dimensioni costituisce uno dei passaggi fondamentali della Nuova Ingegneria.

La nuova conoscenza dell'infrastruttura

Per comprendere il significato del Digital Twin occorre introdurre un concetto fondamentale.

L'infrastruttura produce continuamente dati.

Ogni ponte si deforma.

Ogni edificio oscilla.

Ogni diga modifica il proprio stato tensionale.

Ogni versante evolve lentamente nel tempo.

Per molti anni queste informazioni sono rimaste invisibili.

Oggi possono essere misurate.

Questa è probabilmente la più grande rivoluzione introdotta dalla sensoristica moderna.

Le opere civili iniziano a raccontare il proprio comportamento.

Il compito dell'ingegnere non consiste più soltanto nell'eseguire verifiche statiche, ma nell'interpretare questa enorme quantità di informazioni.

Il Digital Twin diventa quindi il luogo nel quale i dati acquisiscono significato.

Non raccoglie semplicemente misure.

Costruisce conoscenza.

Structural Health Monitoring: la nascita delle infrastrutture intelligenti

La possibilità di aggiornare continuamente il Digital Twin dipende dall'evoluzione dei sistemi di **Structural Health Monitoring (SHM)**.

Negli ultimi vent'anni il monitoraggio strutturale è passato da campagne di misura occasionali a sistemi permanenti capaci di osservare l'infrastruttura ventiquattro ore su ventiquattro.

Sensori distribuiti vengono installati direttamente sull'opera.

Tra questi assumono particolare rilievo i sensori in fibra ottica **Fiber Bragg Grating (FBG)**.

Questa tecnologia rappresenta oggi una delle soluzioni più avanzate per il monitoraggio delle infrastrutture.

I sensori FBG consentono di misurare con elevata precisione deformazioni, temperatura e variazioni meccaniche, mantenendo elevate prestazioni anche in ambienti particolarmente aggressivi.

La loro immunità ai disturbi elettromagnetici, la lunga durata e la possibilità di installare numerosi sensori lungo una singola fibra ottica li rendono particolarmente adatti al monitoraggio di ponti, viadotti, gallerie, edifici strategici, dighe e opere geotecniche.

Accanto ai sensori FBG operano accelerometri, inclinometri, estensimetri, sensori geotecnici, radar interferometrici, sistemi GNSS, rilievi da drone e osservazioni satellitari.

L'infrastruttura viene così osservata come un organismo vivente.

Ogni variazione viene registrata.

Ogni informazione contribuisce ad aggiornare il Digital Twin.

Dal monitoraggio all'Intelligenza Artificiale

L'evoluzione del monitoraggio pone però una nuova sfida.

Una grande infrastruttura può produrre milioni di dati ogni giorno.

La disponibilità di informazioni non coincide automaticamente con la conoscenza.

Occorre interpretare tali dati.

Occorre riconoscere fenomeni anomali.

Occorre comprendere quali variazioni rappresentino semplici oscillazioni fisiologiche e quali, invece, costituiscano segnali precursori di degrado.

È in questo contesto che entra in gioco l'**Intelligenza Artificiale**.

Gli algoritmi di Machine Learning permettono di individuare correlazioni difficilmente riconoscibili attraverso l'analisi tradizionale.

Possono identificare comportamenti ricorrenti, classificare livelli di rischio, riconoscere anomalie e costruire modelli predittivi.

È importante sottolineare che l'Intelligenza Artificiale non sostituisce l'ingegnere.

L'interpretazione tecnica, la responsabilità professionale e la decisione finale rimangono prerogative del progettista e del gestore.

L'IA rappresenta piuttosto uno strumento di supporto, capace di ampliare la capacità di analisi e di trasformare grandi quantità di dati in informazioni utili.

Verso il Digital Twin cognitivo

L'integrazione tra monitoraggio continuo, sensori intelligenti, Digital Twin e Intelligenza Artificiale conduce verso una nuova generazione di sistemi che possiamo definire **Digital Twin cognitivi**.

Il modello digitale non si limita più a rappresentare lo stato dell'opera.

Lo interpreta.

Lo confronta con il comportamento previsto.

Ne valuta l'evoluzione.

Supporta la pianificazione della manutenzione.

Assiste il gestore nella definizione delle priorità.

Il Digital Twin diventa così una vera piattaforma di governo dell'infrastruttura.

Non è più soltanto uno strumento di modellazione.

Diventa uno strumento di conoscenza.

Ed è proprio questa capacità di trasformare il dato in conoscenza che segna il passaggio dall'Ingegneria Statica all'Ingegneria Dinamica.

Nella prossima sezione verrà affrontato uno degli aspetti più rilevanti di questa trasformazione: la **manutenzione predittiva**, nella quale il Digital Twin e l'Intelligenza Artificiale consentono di passare da interventi programmati nel tempo a strategie manutentive basate sulle reali condizioni di salute dell'infrastruttura.

LA MANUTENZIONE PREDITTIVA

Dalla manutenzione programmata alla gestione intelligente del patrimonio costruito

L'evoluzione dell'ingegneria delle infrastrutture non si misura soltanto nella capacità di progettare opere sempre più performanti, ma anche nella possibilità di conservarne nel tempo sicurezza, efficienza e funzionalità.

Per molti decenni la manutenzione è stata considerata una fase successiva al progetto, spesso condizionata dalla disponibilità economica o dall'insorgere di situazioni di emergenza.

Oggi questo approccio mostra limiti sempre più evidenti.

Il patrimonio infrastrutturale europeo è costituito in larga parte da opere costruite tra gli anni Cinquanta e Ottanta del secolo scorso. Molte di esse sono ancora perfettamente funzionali, ma sono state progettate per condizioni di esercizio profondamente diverse da quelle attuali.

L'aumento dei carichi di traffico, l'incremento della mobilità, l'invecchiamento dei materiali, gli effetti dei cambiamenti climatici e la maggiore frequenza di eventi estremi rendono indispensabile un nuovo modello di gestione.

La vera sfida dell'ingegneria contemporanea non consiste soltanto nel costruire nuove infrastrutture, ma nel preservare e valorizzare il patrimonio esistente.

È proprio in questo contesto che nasce il concetto di **manutenzione predittiva**.

Dalla manutenzione correttiva alla manutenzione predittiva

Storicamente la manutenzione delle infrastrutture si è sviluppata secondo tre modelli principali.

Il primo è la **manutenzione correttiva**.

Si interviene quando il danno è già evidente o quando si verifica un guasto.

È un modello tipico degli impianti industriali del passato e, purtroppo, ancora presente nella gestione di molte opere civili.

Il secondo modello è la **manutenzione preventiva programmata**.

Gli interventi vengono pianificati sulla base del tempo trascorso o del numero di cicli di esercizio.

Si tratta di un approccio certamente più evoluto, ma presenta un limite fondamentale: non tiene conto dello stato reale dell'infrastruttura.

Due ponti identici possono infatti evolvere in modo completamente diverso in funzione dell'ambiente, dei carichi, della qualità costruttiva e della storia manutentiva.

Programmare gli stessi interventi per entrambe le opere significa ignorare il loro comportamento reale.

Nasce così il terzo modello.

La **manutenzione predittiva**.

L'obiettivo non è più stabilire quando intervenire sulla base del calendario, ma comprendere quando l'infrastruttura manifesta segnali concreti di evoluzione del degrado.

L'intervento viene deciso osservando il comportamento reale dell'opera.

Il patrimonio costruito come organismo vivente

La manutenzione predittiva introduce una nuova visione del patrimonio infrastrutturale.

Ponti, edifici, gallerie, dighe, versanti e reti tecnologiche non vengono più considerati elementi statici.

Essi diventano organismi complessi il cui stato di salute evolve continuamente.

Come avviene nella medicina moderna, il controllo periodico lascia progressivamente spazio al monitoraggio continuo.

L'ingegnere non osserva soltanto gli effetti finali del degrado.

Analizza i fenomeni che lo precedono.

Piccole deformazioni.

Lente variazioni di rigidezza.

Modifiche delle frequenze proprie.

Incrementi degli spostamenti.

Variazioni termiche.

Fenomeni di fatica.

Cedimenti differenziali.

Ciascuno di questi segnali costituisce una preziosa informazione sul comportamento della struttura.

L'infrastruttura inizia così a raccontare la propria storia.

Il ruolo del Digital Twin

In questo scenario il Digital Twin assume una funzione completamente nuova.

Non rappresenta soltanto il modello digitale dell'opera.

Diventa il luogo nel quale convergono tutte le informazioni prodotte durante il ciclo di vita dell'infrastruttura.

Ogni misura proveniente dai sistemi di monitoraggio aggiorna il modello.

Ogni intervento manutentivo modifica la memoria tecnica dell'opera.

Ogni evento eccezionale viene registrato.

Il Digital Twin costruisce progressivamente una banca dati storica dell'infrastruttura.

Questa memoria consente di comprendere come la struttura abbia reagito nel tempo ai carichi, agli eventi climatici, ai terremoti e alle trasformazioni ambientali.

Per la prima volta il gestore dispone non soltanto di una fotografia dell'opera, ma di un vero e proprio film della sua evoluzione.

L'Intelligenza Artificiale come supporto decisionale

Il numero di dati prodotti dalle moderne infrastrutture rende impossibile un'analisi esclusivamente manuale.

Qui interviene l'Intelligenza Artificiale.

Gli algoritmi di Machine Learning elaborano continuamente le informazioni provenienti dai sistemi di monitoraggio.

Essi possono:

- riconoscere comportamenti ricorrenti;
- individuare anomalie difficilmente percepibili;
- stimare l'evoluzione dei fenomeni di degrado;
- confrontare infrastrutture appartenenti alla stessa tipologia;
- supportare la classificazione del rischio;
- suggerire priorità di intervento.

È fondamentale sottolineare che l'Intelligenza Artificiale non sostituisce il giudizio tecnico dell'ingegnere.

La responsabilità della valutazione rimane sempre umana.

L'IA rappresenta uno strumento di supporto che amplia la capacità di interpretare dati complessi e di prendere decisioni fondate su evidenze oggettive.

Il Remaining Useful Life

Uno degli obiettivi più avanzati della manutenzione predittiva consiste nella stima della **Remaining Useful Life (RUL)**, ovvero della vita utile residua di un componente o di un'infrastruttura.

Conoscere la vita residua non significa prevedere con assoluta certezza il momento del guasto.

Significa stimare, sulla base dei dati disponibili e dei modelli previsionali, il margine temporale entro il quale la struttura potrà continuare a svolgere le proprie funzioni in condizioni di sicurezza.

Questa informazione permette di pianificare gli interventi nel momento più opportuno, evitando sia manutenzioni premature sia situazioni di emergenza.

L'intera gestione del patrimonio costruito assume così un carattere proattivo.

Dalla gestione delle opere alla gestione della conoscenza

La vera innovazione della manutenzione predittiva non consiste nell'introduzione di nuovi sensori o di nuovi algoritmi.

Il cambiamento più profondo riguarda il modo di concepire l'infrastruttura.

L'opera non viene più gestita esclusivamente attraverso interventi materiali.

Viene gestita attraverso la conoscenza.

Ogni dato acquisito aumenta il patrimonio informativo disponibile.

Ogni nuova misura migliora la comprensione del comportamento strutturale.

Ogni intervento manutentivo arricchisce la memoria tecnica dell'infrastruttura.

Il valore principale non è rappresentato soltanto dall'opera fisica, ma anche dal patrimonio di conoscenze costruito nel tempo.

È proprio questa evoluzione che prepara il passaggio alla **Cyber Physical Engineering**, nella quale infrastrutture fisiche, Digital Twin, Intelligenza Artificiale e sistemi di monitoraggio costituiscono un unico ecosistema integrato.

L'ingegnere del futuro non gestirà soltanto ponti, edifici o gallerie.

Gestirà sistemi intelligenti capaci di osservare il proprio comportamento, apprendere dalla propria storia e supportare decisioni sempre più consapevoli.

In questa prospettiva la manutenzione predittiva non rappresenta semplicemente una nuova tecnica manutentiva.

Essa costituisce uno dei pilastri
della **Nuova Ingegneria**,
nella quale il progetto continua a evolvere insieme all'opera,
accompagnandola durante tutto il suo ciclo di vita.

Autori

Ing. Andrea Dell'Erba

Ingegnere e ricercatore nel settore dell'innovazione applicata alle costruzioni e alle infrastrutture digitali. La sua attività è orientata allo sviluppo di metodologie integrate per il **Building Information Modeling (BIM)**, i **Cantieri Digitali**, il **Digital Twin** e l'applicazione dell'Intelligenza Artificiale ai processi di progettazione, costruzione e gestione delle opere. Collabora a progetti di ricerca e sviluppo dedicati alle Smart Cities, alla digitalizzazione del patrimonio costruito e alla resilienza delle infrastrutture.

Ing. Diego Dell'Erba

Nuclear Engineer – Multidisciplinary Engineer

Ingegnere multidisciplinare, ricercatore e progettista nel settore delle infrastrutture strategiche, della gestione del rischio e dell'innovazione tecnologica applicata all'ingegneria civile. Svolge attività di ricerca e sviluppo nei campi dello **Structural Health Monitoring**, dei **Digital Twin**, dei **sensori in fibra ottica Fiber Bragg Grating (FBG)**, dell'**Intelligenza Artificiale** e della **manutenzione predittiva**.

È promotore della metodologia **Cyber Physical Engineering**, una proposta metodologica che integra infrastrutture fisiche, sistemi di monitoraggio, modelli digitali e strumenti di supporto alle decisioni per la gestione intelligente dell'intero ciclo di vita delle opere. La sua attività è orientata allo sviluppo di modelli innovativi per infrastrutture resilienti, Smart Cities e gestione digitale del patrimonio costruito.

Bibliografia essenziale

1. Building Information Modeling – *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Designers, Engineers, Contractors, and Facility Managers*.
2. Digital Twin.
3. Structural Health Monitoring.
4. Fiber Optic Sensors.
5. Artificial Intelligence.

6. International Organization for Standardization – Norme della serie **ISO 19650** per la gestione delle informazioni mediante BIM.
7. Institute of Electrical and Electronics Engineers – Pubblicazioni su monitoraggio strutturale, Digital Twin e Intelligenza Artificiale.
8. American Society of Civil Engineers – Linee guida e pubblicazioni su resilienza infrastrutturale e gestione del ciclo di vita.