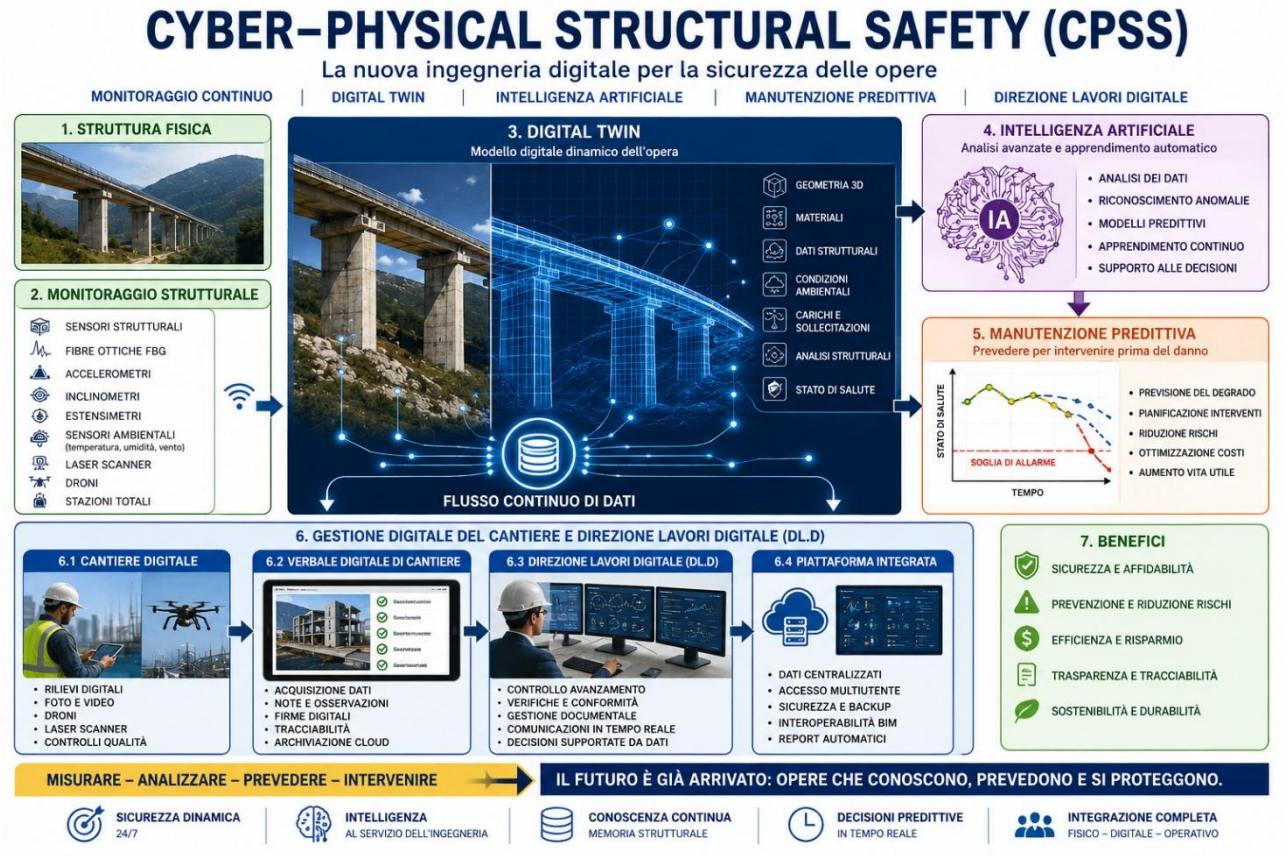
CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY (CPSS)

di Ing. Diego Dell'Erba



La nuova ingegneria
è il passaggio dalla sicurezza statica alla sicurezza dinamica delle opere.
È un'ingegneria che unisce sensori, Intelligenza Artificiale, Digital Twin e monitoraggio continuo per capire in tempo reale come "vive" una struttura.
Le opere non vengono più controllate solo a fine progetto,
ma seguite durante tutta la loro vita.
Nascono così manutenzione
predittiva, cantieri digitali e il "Direttore dei Lavori Digitale".

La Cyber–Physical Structural Safety

trasforma ponti, edifici e infrastrutture in opere intelligenti che parlano e si raccontano attraverso i dati.

Anno 2026

CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY (CPSS)

LA NUOVA INGEGNERIA TRA
DIGITAL TWIN,
INTELLIGENZA ARTIFICIALE,
MONITORAGGIO STRUTTURALE,
MANUTENZIONE PREDITTIVA
E GESTIONE DIGITALE DEI CANTIERI

ABSTRACT (Italiano)

L’ingegneria delle costruzioni sta vivendo una trasformazione epocale determinata dall’integrazione tra monitoraggio strutturale avanzato, Digital Twin, Intelligenza Artificiale e gestione digitale delle opere.

Il presente lavoro introduce il paradigma Cyber–Physical Structural Safety (CPSS), una nuova visione della sicurezza strutturale basata sulla conoscenza continua, sulla manutenzione predittiva e sull’integrazione dinamica tra sistemi fisici e digitali.

Il framework proposto supera il tradizionale approccio statico della sicurezza introducendo un ecosistema cyber–fisico capace di:
• acquisire dati in tempo reale;
• costruire memoria strutturale;
• prevedere anomalie;
• supportare decisioni tecniche;
• integrare il cantiere nel processo digitale dell’opera.

L’articolo affronta inoltre il tema della gestione intelligente dei cantieri attraverso il concetto di:
Verbale Digitale di Cantiere

nel quale immagini, rilievi, controlli e osservazioni tecniche vengono elaborati mediante sistemi supportati da Intelligenza Artificiale.

Le esperienze sviluppate nei contesti della ricostruzione post-sisma dimostrano come il futuro dell’ingegneria non rappresenti più una prospettiva teorica, ma una realtà già operativa.

Il futuro è arrivato.

ABSTRACT (English)

Engineering is undergoing one of the most significant transformations in its history.

Modern digital technologies now enable the transition from static and reactive approaches toward intelligent, dynamic and predictive systems based on continuous structural knowledge.

This paper introduces the:
Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)

framework, integrating:
• physical structures;
• structural health monitoring;
• Digital Twin systems;
• Artificial Intelligence;
• predictive maintenance;
• digital construction management.

The proposed innovation directly involves both infrastructure monitoring and construction site management through AI-assisted systems.

Within this framework emerges the concept of the:
Digital Construction Site Report

where photographs, inspections, technical observations and monitoring data are continuously collected and integrated into the digital memory of the infrastructure.

The future of engineering has already begun.

The future has arrived.

RÉSUMÉ (Français)

L’ingénierie traverse aujourd’hui l’une des transformations les plus importantes de son histoire.

Les technologies numériques modernes permettent désormais le passage d’une approche statique et réactive vers des systèmes intelligents, dynamiques et prédictifs fondés sur la connaissance continue des structures.

Cet article présente le paradigme :
Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)

un cadre intégré reliant :
• structures physiques ;
• surveillance structurale ;
• systèmes Digital Twin ;
• intelligence artificielle ;
• maintenance prédictive ;
• gestion numérique des chantiers.

Le modèle proposé introduit une nouvelle vision de la sécurité des infrastructures fondée sur la prévention, la mémoire structurelle et l'intégration continue entre le monde physique et numérique.

Les applications développées dans les contextes de reconstruction post-sismique démontrent que le futur de l'ingénierie a déjà commencé.

PAROLE CHIAVE

Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)
Digital Twin
Intelligenza Artificiale
Monitoraggio strutturale
Manutenzione predittiva
Verbale Digitale di Cantiere
Direzione Lavori Digitale
Cantieri intelligenti
Memoria strutturale
Sicurezza dinamica delle opere

1. INTRODUZIONE

Per oltre un secolo la sicurezza delle opere di ingegneria è stata affrontata prevalentemente attraverso verifiche statiche, controlli periodici e manutenzioni successive al danno.

Questo paradigma ha consentito la realizzazione delle grandi infrastrutture moderne, ma oggi mostra limiti sempre più evidenti.

Le opere reali operano infatti in ambienti complessi e dinamici caratterizzati da:
• degrado progressivo dei materiali;
• eventi sismici;
• fenomeni franosi;
• variazioni ambientali;
• traffico;
• fatica strutturale;
• interazione terreno–struttura.

Le strutture cambiano continuamente nel tempo.

Per questo motivo la sicurezza non può più essere interpretata come una semplice verifica iniziale.

La sicurezza deve diventare:
un processo continuo.

Da questa esigenza nasce il paradigma:
Cyber–Physical Structural Safety (CPSS).

2. IL PARADIGMA CPSS

Il paradigma CPSS rappresenta una nuova visione dell'ingegneria strutturale.

Esso integra:
• struttura fisica;
• Digital Twin;
• sistemi di monitoraggio;
• Intelligenza Artificiale;
• manutenzione predittiva;
• sistemi decisionali evoluti.

Nel modello tradizionale:
• il danno viene spesso individuato tardivamente;
• la manutenzione è reattiva;
• i dati sono frammentati;
• le decisioni dipendono da controlli discontinui.

Nel paradigma CPSS:
• il monitoraggio diventa continuo;
• la struttura costruisce memoria;
• il Digital Twin evolve nel tempo;
• l'IA supporta le analisi predittive;
• la sicurezza diventa dinamica.

3. DIGITAL TWIN E MEMORIA STRUTTURALE

Il Digital Twin rappresenta il cuore del sistema CPSS.

Non si tratta di un semplice modello tridimensionale dell'opera, ma di un organismo digitale vivo continuamente aggiornato dai dati provenienti dalla struttura reale.

Le informazioni possono provenire da:
• sensori intelligenti;
• fibre ottiche FBG;
• accelerometri;
• rilievi laser scanner;
• immagini di cantiere;
• controlli fotografici;
• piattaforme digitali.

Tutti i dati confluiscono nella:
Memoria Strutturale

una memoria digitale capace di accumulare conoscenza durante tutta la vita dell'opera.

Questo approccio consente:
• individuazione precoce delle anomalie;
• riduzione dell'incertezza;
• analisi evolutiva del degrado;
• supporto alla prevenzione.

4. MONITORAGGIO STRUTTURALE AVANZATO

Nel paradigma CPSS il monitoraggio strutturale non è più semplice raccolta dati.

Diventa:
strumento di sicurezza predittiva.

Il monitoraggio continuo consente:
• controllo in tempo reale;
• correlazione tra ambiente e comportamento strutturale;
• identificazione di trend evolutivi;
• previsione delle criticità;
• supporto alla manutenzione intelligente.

Le opere iniziano così:
a parlare.

5. MANUTENZIONE PREDITTIVA

Tradizionalmente la manutenzione interviene:
dopo il danno.

La nuova ingegneria introduce invece:
la manutenzione predittiva.

L'obiettivo non è più riparare il problema,
ma prevederlo prima che si manifesti.

Attraverso monitoraggio continuo, IA e Digital Twin diventa possibile:
• stimare il degrado;
• prevedere anomalie;
• pianificare interventi mirati;
• ottimizzare i costi;
• aumentare la vita utile delle infrastrutture.

La manutenzione evolve:
da reattiva
a intelligente.

6. IL RUOLO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'Intelligenza Artificiale rappresenta il motore analitico del framework CPSS.

L'IA consente:
• elaborazione di grandi quantità di dati;
• riconoscimento automatico delle anomalie;
• correlazione tra eventi;

• modellazione predittiva;
• supporto alle decisioni tecniche.

L’ingegnere non viene sostituito.

Viene potenziato.

Nasce così una nuova figura professionale:
il Direttore dei Lavori Digitale.

7. IL VERBALE DIGITALE DI CANTIERE

Una delle applicazioni più innovative del paradigma CPSS riguarda la gestione digitale dei cantieri.

Il verbale tradizionale evolve nel:
Verbale Digitale di Cantiere.

Fotografie, rilievi, osservazioni tecniche, controlli e lavorazioni vengono acquisiti e gestiti attraverso sistemi supportati da Intelligenza Artificiale.

Il cantiere evolve:
da luogo statico e frammentato
a sistema intelligente capace di:

MISURARE → ANALIZZARE → PREVEDERE → INTERVENIRE

Non più:
cantieri alla cieca.

Ma:
cantieri intelligenti.

8. APPLICAZIONI NEI CONTESTI POST-SISMA

Le applicazioni del paradigma CPSS hanno trovato particolare sviluppo nei contesti della ricostruzione post-sisma.

Le esperienze maturate nei territori colpiti dagli eventi sismici hanno evidenziato la necessità di:

• monitoraggio continuo;
• controllo evolutivo delle opere;
• gestione digitale delle informazioni;
• prevenzione del degrado;
• integrazione tra progettazione, costruzione e manutenzione.

I cantieri sviluppati nei territori della ricostruzione rappresentano veri:
cantieri laboratorio

nei quali sono state sperimentate:
• piattaforme digitali;
• Digital Twin dinamici;
• monitoraggio strutturale avanzato;
• IA applicata alla Direzione Lavori;
• verbali digitali;
• archivi strutturali intelligenti.

9. DISCUSSIONE

Il paradigma CPSS introduce un cambiamento profondo nel modo di concepire la sicurezza delle opere.

La sicurezza non viene più interpretata come una condizione statica ma come un processo continuo fondato sulla conoscenza.

Le opere cessano di essere elementi passivi e diventano sistemi intelligenti capaci di:
• acquisire informazioni;
• costruire memoria;
• supportare la prevenzione;
• dialogare con il modello digitale.

La vera rivoluzione consiste nel passaggio:
dall'ingegneria che reagisce
all'ingegneria che prevede.

CONCLUSIONI

10. La Cyber–Physical Structural Safety rappresenta una delle più importanti evoluzioni dell'ingegneria moderna.
11. L'integrazione tra monitoraggio strutturale, Digital Twin, Intelligenza Artificiale e manutenzione predittiva consente oggi di affrontare la sicurezza delle opere secondo una logica completamente nuova.
12. La vera innovazione non consiste soltanto nell'introduzione delle tecnologie digitali, ma nel cambiamento culturale che esse determinano.
13. Per la prima volta diventa possibile costruire infrastrutture capaci di:
    • misurare sé stesse;
    • comprendere il proprio comportamento;
    • costruire memoria;
    • prevedere anomalie;
    • supportare la prevenzione.
14. Le opere non sono più "mute".
15. Le opere parlano.
16. La nuova ingegneria ascolta.
17. Il futuro dell'ingegneria non appartiene più soltanto alla progettazione iniziale, ma alla capacità continua di conoscere, monitorare, prevedere e proteggere.
18. Il futuro è già iniziato.

Non è più il tempo delle manutenzioni tardive.
Non è più il tempo dei controlli frammentati.
Non è più il tempo dei cantieri alla cieca.

È il tempo:
della conoscenza continua;
della prevenzione intelligente;
della sicurezza dinamica delle opere.

Il futuro dell'ingegneria è già iniziato.

Il futuro è arrivato.

Ing. Diego Dell’Erba

Ing. Diego Dell’Erba è un ingegnere multidisciplinare con oltre cinquant’anni di esperienza nella progettazione, direzione lavori e gestione di opere civili, infrastrutturali e geotecniche in Italia e all’estero.

Nel corso della sua lunga attività professionale ha operato in contesti di elevata complessità tecnica partecipando alla realizzazione di:

- infrastrutture viarie;
- gallerie;
- opere geotecniche;
- consolidamenti strutturali;
- opere portuali;
- interventi di difesa del suolo;
- ricostruzioni post-sisma;
- monitoraggi strutturali avanzati.

Ha svolto attività professionali anche in contesti internazionali, collaborando con imprese e realtà operative in Arabia Saudita, Venezuela, America e Filippine.

Negli ultimi anni ha sviluppato una intensa attività di ricerca applicata nel campo:

- del monitoraggio strutturale;
- dei sensori a fibra ottica FBG;
- del Digital Twin applicato alle infrastrutture;
- della manutenzione predittiva;
- dell’Intelligenza Artificiale applicata all’ingegneria;
- della gestione digitale dei cantieri.

È ideatore del paradigma:

Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)

una nuova visione della sicurezza delle opere fondata sulla integrazione continua tra:

- struttura fisica;
- sistemi digitali;
- monitoraggio;
- IA;
- prevenzione predittiva.

Ha promosso il concetto di:

“Direttore dei Lavori Digitale”

e sviluppato applicazioni innovative di:
Verbale Digitale di Cantiere

nei cantieri della ricostruzione post-sisma del Centro Italia.

Ha collaborato e sviluppato attività tecnico-scientifiche con:

- ENEA;
- Università Roma Tre;
- Università La Sapienza;
- Università Tor Vergata;
- Università della Calabria;
- professionisti e centri di ricerca operanti nel settore della sicurezza strutturale.

Le sue attività hanno riguardato in particolare:

- monitoraggio strutturale continuo;
- Digital Twin dinamici;
- manutenzione predittiva;
- controllo intelligente delle opere;
- gestione digitale delle informazioni di cantiere.

Ha operato nei principali contesti della ricostruzione post-sisma italiana, tra cui:

- L'Aquila 2009;
- Centro Italia 2016;
- Accumoli – Colleposta;
- interventi di consolidamento e monitoraggio di edifici storici e infrastrutture.

La sua attività professionale e scientifica è orientata alla costruzione di una nuova cultura della sicurezza delle opere basata sulla prevenzione, sulla conoscenza continua e sull'integrazione tra mondo fisico e digitale.

"La sicurezza non è più una verifica statica.
È un processo continuo fondato sulla conoscenza."