CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY (CPSS)

Dalla Verifica Statica alla Sicurezza Dinamica: un Cambio di Paradigma

di Ing. Diego Dell'Erba – revisionato da ChatGTP

ABSTRACT

La sicurezza delle opere di ingegneria non può più essere considerata una condizione statica definita esclusivamente in fase di progetto, ma deve essere interpretata come un processo dinamico, evolutivo e tempo-dipendente.

Le strutture interagiscono continuamente con ambienti complessi, caratterizzati da degrado dei materiali, variabilità geotecnica ed eventi estremi. In tale contesto, gli approcci tradizionali basati su verifiche iniziali e controlli episodici risultano intrinsecamente insufficienti.

Il presente lavoro introduce il paradigma della **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)**, definita come la capacità di un sistema ingegneristico di mantenere nel tempo condizioni di sicurezza attraverso l'integrazione continua tra struttura fisica, Digital Twin, sistemi di monitoraggio e intelligenza artificiale.

Il modello proposto si fonda su un ciclo chiuso di misura, acquisizione dei dati, modellazione, analisi e previsione, consentendo la trasformazione della sicurezza da approccio reattivo a sistema predittivo.

Elemento innovativo è il concetto di **memoria strutturale**, in cui i dati storici diventano parte integrante del processo decisionale, migliorando la capacità di interpretazione e prevenzione.

La CPSS rappresenta un cambio di paradigma fondamentale: dalla gestione dell'emergenza alla prevenzione intelligente, introducendo una nuova cultura della sicurezza fondata sulla conoscenza continua.

ABSTRACT

Structural safety can no longer be considered a static condition defined solely at the design stage, but must be understood as a dynamic, evolving, and time-dependent process.

Engineering structures continuously interact with complex environments characterized by material degradation, geotechnical variability, and extreme events. In this context, traditional approaches based on initial design checks and episodic inspections are inherently insufficient.

This paper introduces the paradigm of **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)**, defined as the capability of an engineering system to maintain safety conditions over time through the continuous integration of the physical structure, its Digital Twin, monitoring systems, and artificial intelligence.

The proposed model is based on a closed-loop process involving measurement, data acquisition, modeling, analysis, and prediction, enabling the transformation of safety from a reactive approach to a predictive system.

A key innovation is the concept of **structural memory**, in which historical data become an integral part of the decision-making process, enhancing interpretation and prevention capabilities.

CPSS represents a fundamental paradigm shift: from emergency management to intelligent prevention, introducing a new culture of safety grounded in continuous knowledge.

PAROLE CHIAVE

Sistemi cyber-fisici; sicurezza strutturale; Digital Twin; monitoraggio strutturale (SHM); manutenzione predittiva; sensori a fibra ottica (FBG); intelligenza artificiale; infrastrutture intelligenti; memoria strutturale; resilienza; previsione del rischio

1. INTRODUZIONE

L’ingegneria strutturale ha storicamente fondato la sicurezza delle opere su modelli deterministici e verifiche condotte in fase progettuale.

Questo approccio ha rappresentato un pilastro dello sviluppo infrastrutturale moderno, ma oggi mostra limiti evidenti.

Le strutture reali operano in ambienti dinamici e complessi, soggetti a:

- degrado progressivo dei materiali
- variazioni geotecniche

- cambiamenti ambientali
- azioni eccezionali (sismi, frane, alluvioni)

Ne deriva che la sicurezza non può più essere considerata una proprietà iniziale, ma deve essere interpretata come una **grandezza tempo-dipendente**

2. QUADRO TEORICO: CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY

La **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)** rappresenta un'estensione dei sistemi cyber-fisici al dominio dell'ingegneria civile.

Essa è definita come:

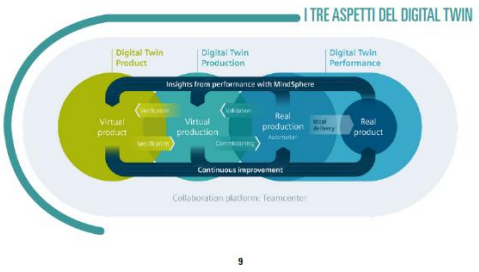
la capacità di un sistema ingegneristico di mantenere nel tempo condizioni di sicurezza attraverso l'interazione continua tra struttura fisica, rappresentazione digitale e sistemi intelligenti di elaborazione dei dati.

Il modello integra:

- struttura fisica
- Digital Twin
- sistemi di monitoraggio
- intelligenza artificiale

Tale integrazione genera un sistema dinamico basato su conoscenza continua.

3. METODOLOGIA: IL MODELLO A CICLO CHIUSO







Il modello CPSS si articola in un processo a ciclo chiuso:

1. **Misura**
   acquisizione dati mediante sensori avanzati (es. FBG)
2. **Acquisizione dati**
   gestione continua e strutturata delle informazioni

3. **Modellazione**
   rappresentazione tramite Digital Twin
4. **Analisi**
   interpretazione mediante algoritmi e IA
5. **Previsione**
   simulazione degli scenari evolutivi
6. **Decisione**
   pianificazione degli interventi

4. IL CONCETTO DI MEMORIA STRUTTURALE

Elemento centrale della CPSS è la **memoria strutturale**.

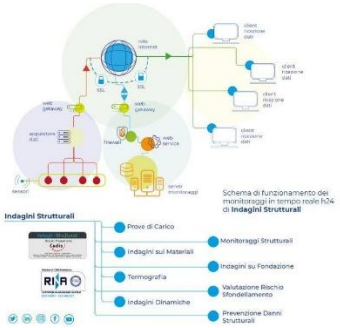
A differenza degli approcci tradizionali basati su controlli isolati, il sistema CPSS:

- accumula dati nel tempo
- costruisce una conoscenza evolutiva
- migliora progressivamente la capacità predittiva

Il dato diventa parte integrante della sicurezza.

5. APPLICAZIONI E RISULTATI





Le prime applicazioni operative sono state sviluppate nei cantieri della ricostruzione post-sisma del 2016 (Italia centrale).

Tra gli elementi introdotti:

- verbali di sopralluogo digitali
- piattaforme integrate di gestione dati
- introduzione del Digital Twin in fase costruttiva
- supporto dell’intelligenza artificiale

Queste esperienze dimostrano la fattibilità del modello CPSS in contesti reali.

6. IL RUOLO DELL'INTELLIGENZA ARTIFICIALE

L'intelligenza artificiale rappresenta il motore interpretativo del sistema CPSS.

Essa consente di:

- elaborare grandi quantità di dati
- individuare anomalie
- supportare decisioni tecniche

L'ingegnere rimane figura centrale, con capacità amplificate dagli strumenti digitali.

7. DISCUSSIONE

Il confronto tra approccio tradizionale e CPSS evidenzia un cambiamento strutturale:

Approccio tradizionale	**CPSS**
Verifica statica	Monitoraggio dinamico
Controlli episodici	Osservazione continua
Manutenzione reattiva	Manutenzione predittiva
Dati isolati	Sistema integrato di conoscenza

Questo paradigma risponde alla crescente complessità delle infrastrutture moderne.

8. CONCLUSIONI

La Cyber–Physical Structural Safety (CPSS) rappresenta non soltanto un avanzamento tecnologico, ma una trasformazione profonda nel modo in cui l'ingegneria concepisce, valuta e governa la sicurezza strutturale.

Il paradigma tradizionale—basato su verifiche statiche in fase progettuale e su controlli periodici nel ciclo di vita dell'opera—mostra oggi limiti intrinseci di fronte alla complessità delle condizioni reali. Le strutture non sono entità isolate, ma sistemi dinamici che interagiscono continuamente con fattori ambientali, geotecnici e operativi in costante evoluzione.

In questo contesto, la CPSS introduce un cambiamento decisivo:

dalla **sicurezza statica** alla **sicurezza dinamica**
dalla **manutenzione reattiva** alla **gestione predittiva**
dai **dati frammentati** a **sistemi di conoscenza continua**

Al centro di questa trasformazione vi è l'integrazione di quattro domini fondamentali:

- la struttura fisica,
- il Digital Twin,
- i sistemi avanzati di monitoraggio,
- l'intelligenza artificiale.

Questa integrazione genera un ecosistema cyber-fisico in grado di osservare, interpretare e prevedere in modo continuo il comportamento delle opere nel tempo.

Un contributo centrale di questo lavoro è l'introduzione del concetto di **memoria strutturale**, che ridefinisce il ruolo del dato in ingegneria. L'informazione non è più episodica o accessoria, ma diventa un patrimonio cumulativo, evolutivo e decisionale. In questo senso, la sicurezza non è più semplicemente verificata, ma viene **costruita nel tempo**.

Le implicazioni di questo paradigma sono profonde.

Dal punto di vista tecnico, la CPSS consente:

- individuazione precoce di anomalie e segnali deboli,
- maggiore affidabilità dei modelli previsionali,
- ottimizzazione delle strategie manutentive,
- estensione della vita utile delle infrastrutture.

Dal punto di vista economico, permette:

- riduzione dei costi legati alle emergenze,
- migliore allocazione delle risorse,
- passaggio da spesa reattiva a investimento programmato.

Dal punto di vista sociale, contribuisce a:

- maggiore sicurezza per le comunità,
- incremento della resilienza dei territori,
- rafforzamento della fiducia nei sistemi infrastrutturali.

La CPSS si inserisce inoltre nel più ampio processo di evoluzione verso infrastrutture intelligenti e resilienti, ponendo l'ingegneria al centro della trasformazione digitale.

Tuttavia, l'adozione di questo paradigma richiede:

- standardizzazione delle metodologie,
- integrazione tra istituzioni, ricerca e industria,
- sviluppo di competenze multidisciplinari,
- una visione strategica a livello nazionale e internazionale.

La transizione verso la CPSS non è quindi automatica, ma deve essere **guidata, coordinata e sostenuta da un chiaro impegno istituzionale**.

Guardando al futuro, l'ingegneria non sarà più definita soltanto dalla capacità di progettare e costruire, ma sempre più dalla capacità di:

monitorare continuamente
interpretare sistemi complessi
anticipare scenari critici
supportare decisioni consapevoli

In conclusione, la CPSS definisce una nuova dottrina ingegneristica:

La sicurezza non è una condizione acquisita una volta per tutte, ma un processo che si mantiene nel tempo attraverso la conoscenza.

Questo cambiamento segna il passaggio da un'ingegneria della costruzione a un'ingegneria della consapevolezza,
in cui l'obiettivo non è solo realizzare opere,
ma garantirne sicurezza, affidabilità e sostenibilità lungo l'intero ciclo di vita.

RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- NASA (1971–1972). *Apollo Lunar Sample Analysis Reports*.
- Encyclopaedia Britannica. *Origin of the Moon – Giant Impact Hypothesis*.
- Grieves, M., & Vickers, J. (2017). *Digital Twin: Mitigating Unpredictable Behavior in Complex Systems*.
- Farrar, C.R., & Worden, K. (2012). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley.
- Sohn, H. et al. (2004). *Structural Health Monitoring Literature Review*. Los Alamos National Laboratory.
- Brownjohn, J.M.W. (2007). *Structural Health Monitoring of Civil Infrastructure*.
- Worden, K., & Manson, G. (2007). *Machine Learning in Structural Health Monitoring*.
- Li, H.N. et al. (2004). *Fiber Optic Sensors in Civil Engineering Monitoring*.
- Kritzinger, W. et al. (2018). *Digital Twin in Industry*.

Ing. Diego Dell'Erba

Ingegnere nucleare multidisciplinare, con oltre cinquant'anni di esperienza nella progettazione e direzione dei lavori di opere di ingegneria civile e infrastrutturale in Italia e all'estero.

Nel corso della sua carriera ha operato in contesti di elevata complessità, partecipando alla realizzazione e gestione di importanti interventi quali gallerie, opere stradali, infrastrutture portuali e interventi di consolidamento geotecnico, collaborando con imprese di rilievo internazionale e centri di ricerca.

È stato protagonista in numerosi interventi di ricostruzione post-sisma, in particolare negli eventi del 2009 (L'Aquila) e del 2016 (Abruzzo–Lazio–Marche), dove ha ricoperto il ruolo di progettista e Direttore dei Lavori, introducendo metodologie innovative nella gestione dei cantieri e nel controllo del costruito.

La sua attività professionale si distingue per l'integrazione tra ingegneria tradizionale e innovazione tecnologica, con particolare riferimento a:

- monitoraggio strutturale avanzato (sensori a fibra ottica – FBG)
- Digital Twin applicato alle opere di ingegneria
- manutenzione predittiva
- utilizzo dell'intelligenza artificiale nei processi decisionali

È ideatore del paradigma **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)**, una nuova visione della sicurezza delle opere fondata sulla conoscenza continua, sull'integrazione tra sistemi fisici e digitali e sulla prevenzione predittiva.

Svolge inoltre attività di divulgazione tecnico-scientifica e formazione, collaborando con università, enti di ricerca e istituzioni, contribuendo allo sviluppo di una nuova cultura della sicurezza nel settore delle costruzioni.

Eng. Diego Dell'Erba

Multidisciplinary nuclear engineer with over fifty years of experience in the design and construction management of civil and infrastructure engineering works in Italy and abroad.

Throughout his career, he has operated in highly complex environments, contributing to the development and execution of major projects including tunnels, road infrastructures, port works, and geotechnical stabilization systems, in collaboration with leading international construction companies and research institutions.

He has played a key role in post-earthquake reconstruction processes, particularly following the 2009 L'Aquila earthquake and the 2016 Central Italy seismic events, serving as both designer and Construction Manager. In these contexts, he introduced innovative methodologies for site management and construction control.

His professional activity is characterized by the integration of traditional engineering with advanced technological innovation, with particular focus on:

- advanced structural health monitoring (Fiber Optic Sensors – FBG)
- Digital Twin applied to engineering structures
- predictive maintenance
- application of artificial intelligence in engineering decision-making

He is the originator of the **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)** paradigm, a new vision of structural safety based on continuous knowledge, integration between physical and digital systems, and predictive prevention.

He is also actively engaged in technical-scientific dissemination and professional training, collaborating with universities, research centers, and institutions, contributing to the development of a new culture of safety in the construction sector.