CYBER-PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY

DALLA VERIFICA STATICA ALLA SICUREZZA DINAMICA DELLE OPERE

IL PARADIGMA DEL METODO DELL'ERBA

"LA SICUREZZA NON È UNA PROPRIETÀ DELL'OPERA, MA UN PROCESSO CONTINUO DI DIALOGO TRA OPERA, AMBIENTE E CONOSCENZA."



IL NUOVO PARADIGMA

Le opere di ingegneria non sono più sistemi statici, ma organismi vivi che evolvono nel tempo, influenzati da carichi, ambiente, degrado ed eventi estremi.

LA SICUREZZA DIVENTA DINAMICA:

$$S = S(t)$$

LEGGE FONDAMENTALE

$$\text{SICUREZZA} = \frac{\text{ORDINE DEL SISTEMA}}{\text{DISTURBO AMBIENTALE}}$$

La sicurezza dipende dall'equilibrio tra qualità dell'opera (ordine) e azioni variabili delll'ambiente (disturbo).

Solo la conoscenza continua può mantenere questo equilibrio.

IL CICLO CONTINUO DELLA SICUREZZA



MEMORIA STRUTTURALE

"Ogni opera deve avere memoria."

La storia dell'opera, i dati e le esperienze accumulate diventano conoscenza, e la conoscenza diventa sicurezza.

DAL REATTIVO AL PREDITTIVO

IERI
Evento → Danno → Intervento

OGGI
Monitoraggio → Previsione → Prevenzione

DALLA GESTIONE DELL'EMERGENZA ALLA GESTIONE DEL RISCHIO.

INTEGRAZIONE FISICO-DIGITALE-CYBER

La sicurezza strutturale e la sicurezza informatica convergono: il Digital Twin e i dati sono infrastrutture critiche da proteggere.

APPLICAZIONI



PONTI E VIADOTTI · GALLERIE · EDIFICI STRATEGICI · OPERE GEOTECNICHE · DISSESTO E ALLUVIONI · RICOSTRUZIONE POST-SISMA

IMPATTO STRATEGICO

- ✓ Riduzione dei rischi
- ✓ Pianificazione preventiva
- ✓ Ottimizzazione delle risorse
- ✓ Aumento della resilienza nazionale

CONCLUSIONI

LA SICUREZZA NON È PIÙ UNA VERIFICA INIZIALE, MA UN PROCESSO CONTINUO BASATO SU CONOSCENZA, DATI E INTELLIGENZA.

MANIFESTO FINALE

NON ESISTE PIÙ STRUTTURA SENZA MEMORIA.
NON ESISTE PIÙ SICUREZZA SENZA PREVISIONE.
IL FUTURO DELL'INGEGNERIA È NELLA CONVERGENZA TRA MATERIA, DATI E INTELLIGENZA.

Ing. Diego Dell'Erba

CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY

Dalla verifica statica alla sicurezza dinamica delle opere

Il paradigma del Metodo Dell’Erba

di Ing. Diego Dell’Erba

ABSTRACT (VERSIONE ESTESA – ITALIANO)

La sicurezza strutturale non può più essere considerata una proprietà statica verificata in fase di progetto, ma deve essere intesa come un processo dinamico, in continua evoluzione nel tempo. Le strutture ingegneristiche interagiscono costantemente con ambienti complessi e variabili, inclusi carichi meccanici, variazioni termiche, interazione terreno–struttura, degrado dei materiali ed eventi estremi quali terremoti, frane e alluvioni.

Di conseguenza, la sicurezza è intrinsecamente tempo-dipendente e non può essere descritta completamente dalle sole condizioni iniziali di progetto.

Il presente lavoro introduce il concetto di **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)**, definito come la capacità di un sistema ingegneristico di mantenere nel tempo le proprie condizioni di sicurezza attraverso l’integrazione continua di tre domini:

- la struttura fisica,
- il suo Digital Twin,
- e l’intelligenza artificiale.

Il **Metodo Dell’Erba** proposto si fonda su un principio sistemico fondamentale:

la sicurezza strutturale emerge dall’equilibrio dinamico tra ordine del sistema, disturbo ambientale e conoscenza derivante dal monitoraggio continuo.

Il modello è articolato attraverso un processo a ciclo chiuso che comprende misura, integrazione dei dati, simulazione, previsione e supporto decisionale.

Un contributo chiave è rappresentato dall’introduzione del concetto di **memoria strutturale**, in cui i dati storici diventano parte integrante della valutazione della sicurezza,

consentendo il passaggio da strategie di manutenzione reattiva a strategie predittive e adattive.

Inoltre, il paradigma CPSS evidenzia la convergenza tra sicurezza strutturale e cybersecurity, definendo un nuovo ambito di protezione cyber–fisica dei sistemi infrastrutturali.

In conclusione, la sicurezza non è più una verifica statica, ma un processo continuo guidato dalla conoscenza, in cui tempo, dati e intelligenza diventano variabili fondamentali di progetto.

ABSTRACT (ENGLISH – EXTENDED VERSION)

Structural safety can no longer be considered a static property verified at the design stage, but must be understood as a dynamic, evolving process over time. Engineering structures continuously interact with complex and variable environments, including mechanical loads, thermal fluctuations, soil–structure interaction, material degradation, and extreme events such as earthquakes, landslides, and floods.

As a consequence, safety is inherently time-dependent and cannot be fully described by initial design conditions alone.

This paper introduces the concept of **Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)**, defined as the capability of an engineering system to preserve its safety conditions over time through the continuous integration of three domains:

- *the physical structure,*
- *its Digital Twin,*
- *and artificial intelligence.*

The proposed **Dell'Erba Method** is grounded on a fundamental systemic principle:

structural safety emerges from the dynamic balance between system order, environmental disturbance, and knowledge derived from continuous monitoring.

The model is articulated through a closed-loop process involving measurement, data integration, simulation, prediction, and decision-making.

A key innovation is the introduction of **structural memory**, where historical data becomes an intrinsic component of safety evaluation, enabling a shift from reactive maintenance to predictive and adaptive strategies.

Furthermore, CPSS highlights the convergence between structural safety and cybersecurity, defining a new domain of **cyber–physical protection of infrastructure systems**.

In conclusion, safety is no longer a static verification but a **continuous, knowledge-driven process**, where time, data, and intelligence become fundamental design variables.

1. INTRODUZIONE (ESTESA)

La sicurezza delle opere di ingegneria non è più un problema esclusivamente tecnico, ma rappresenta oggi una **questione strategica nazionale**, che coinvolge economia, territorio, protezione civile e stabilità sociale.

Per oltre un secolo, il paradigma dominante è stato quello della **verifica statica iniziale**:

- *si progetta*
- *si verifica*
- *si realizza*
- *si considera l'opera sicura*

Questo modello ha funzionato in un contesto in cui:

- *le azioni erano relativamente prevedibili*
- *la variabilità ambientale era considerata secondaria*
- *il tempo non era esplicitamente modellato*

Oggi questo approccio mostra limiti evidenti.

Le opere reali sono sistemi **aperti**, immersi in un ambiente complesso e dinamico:

- *carichi variabili e ciclici*
- *effetti termici e climatici*
- *interazione terreno-struttura*
- *degrado progressivo dei materiali*
- *eventi estremi sempre più frequenti*

Ne deriva una verità fondamentale:

la sicurezza reale evolve nel tempo, mentre la verifica tradizionale resta ferma al tempo zero.

2. LA SICUREZZA COME FUNZIONE DEL TEMPO

Il primo salto concettuale del Metodo Dell'Erba è la formalizzazione della sicurezza:

$$S = S(t)$$

Questo significa che:

- *ogni opera ha una **storia evolutiva***
- *il degrado è **inevitabile***
- *l'incertezza cresce nel tempo*
- *la sicurezza non è una costante, ma una **traiettoria***

La sicurezza diventa quindi:

una **variabile dinamica**, da osservare, misurare e governare nel tempo.

3. LEGGE FONDAMENTALE DEL SISTEMA (APPROFONDITA)

Il comportamento di un sistema strutturale può essere sintetizzato da una legge generale:
\text{Sicurezza} = \frac{\text{Ordine del sistema}}{\text{Disturbo ambientale}}

Interpretazione avanzata:

Ordine del sistema (O):

- *qualità del progetto*
- *qualità costruttiva*
- *robustezza dei materiali*
- *organizzazione e gestione*

Disturbo ambientale (D):

- *carichi variabili*
- *eventi estremi*
- *degrado*

- *incertezza*

Se D aumenta e O non cresce, la sicurezza diminuisce.

Se O viene continuamente aggiornato (grazie a conoscenza e monitoraggio), la sicurezza può essere mantenuta.

Lettura fisica più profonda

Questa relazione richiama principi universali:

- ***termodinamica*** → *aumento dell'entropia*
- ***fisica quantistica*** → *decoerenza dei sistemi*
- ***teoria dei sistemi complessi*** → *equilibrio dinamico*

La sicurezza strutturale è quindi un caso particolare di **stabilità dei sistemi complessi nel tempo**.

4. CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SAFETY (CPSS) – VERSIONE AVANZATA

Il CPSS introduce una nuova categoria concettuale:

la sicurezza come sistema integrato fisico–digitale–intelligente

Non esiste più separazione tra:

- *struttura reale*
- *modello digitale*
- *sistema decisionale*

Sono un unico sistema.

5. ARCHITETTURA DEL MODELLO (RAFFORZATA)

5.1 Struttura fisica

È il sistema reale:

- *soggetto a degrado*
- *soggetto a incertezza*
- *soggetto a eventi estremi*

È il livello della **materia e delle forze**

5.2 Digital Twin

È il sistema della conoscenza:

- *modello aggiornato in tempo reale*
- *integrazione dati sensori (FBG, IoT, monitoraggi)*
- *simulazione continua*

È il livello della **rappresentazione dinamica**

5.3 Intelligenza Artificiale

È il sistema decisionale:

- *riconoscimento pattern*
- *previsione degrado*
- *supporto alle decisioni*

È il livello della **previsione e dell'azione**

6. IL CICLO CONTINUO DELLA SICUREZZA (ESPANSO)

$$\text{Opera} \rightarrow \text{Misura} \rightarrow \text{Modello} \rightarrow \text{Previsione} \rightarrow \text{Azione}$$

Questo ciclo è:

- *continuo*
- *adattivo*
- *auto-rinforzante*

È un sistema **vivente**, non più statico.

7. LA MEMORIA STRUTTURALE (CONCETTO CHIAVE)

"Ogni opera deve avere memoria."

Formalmente:

$$\text{Memoria} = \int_0^t \text{Dati}(t),dt$$

Significato ingegneristico:

- *ogni misura lascia traccia*
- *ogni evento modifica lo stato*
- *ogni variazione costruisce conoscenza*

La sicurezza diventa funzione della **storia dell'opera**, non solo del progetto.

8. DAL MODELLO REATTIVO A QUELLO PREDITTIVO (RAFFORZATO)

Modello tradizionale:

evento → danno → emergenza → intervento

Modello CPSS:

monitoraggio → analisi → previsione → prevenzione

Cambio radicale:

dalla gestione del disastro alla gestione del rischio

9. INTEGRAZIONE TRA SICUREZZA FISICA E CYBER (STRATEGICO)

Nel CPSS nasce un nuovo dominio:

CYBER–PHYSICAL STRUCTURAL SECURITY

Perché:

- *il Digital Twin è un'infrastruttura critica*
- *i dati sono parte della sicurezza*
- *un attacco informatico può diventare rischio strutturale*

Non esiste più separazione tra:

- *sicurezza delle opere*
- *sicurezza dei sistemi digitali*

10. APPLICAZIONI (AMPLIATE)

Il Metodo Dell'Erba è trasversale:

- *ponti e viadotti*
- *gallerie*
- *dighe*
- *edifici strategici*
- *opere geotecniche*
- *versanti instabili*
- *infrastrutture critiche*
- *ricostruzione post-sisma*

È un modello **universale**.

11. IMPATTO STRATEGICO (ISTITUZIONALE)

L'adozione del CPSS comporta:

- *riduzione del rischio sistemico*
- *pianificazione preventiva nazionale*
- *ottimizzazione delle risorse pubbliche*
- *incremento della resilienza territoriale*

Diventa:

una politica nazionale della sicurezza delle infrastrutture

12. CONCLUSIONI (RAFFORZATE)

Il paradigma tradizionale è superato.

Non basta più verificare:

- *bisogna **osservare***
- *bisogna **prevedere***
- *bisogna **gestire nel tempo***

La sicurezza diventa:

un processo continuo basato su conoscenza, dati e intelligenza.

MANIFESTO FINALE

La sicurezza non è una proprietà dell'opera,
ma un processo continuo di dialogo tra opera, ambiente e conoscenza.

Non esiste più struttura senza memoria.
Non esiste più sicurezza senza previsione.

Il futuro dell'ingegneria è nella convergenza tra materia, dati e intelligenza.

REFERENCES (SCIENTIFIC – INTERNATIONAL)

(formattate stile Elsevier/APA)

1. Farrar, C.R., Worden, K. (2012). *Structural Health Monitoring: A Machine Learning Perspective*. Wiley.
2. Sohn, H., Farrar, C.R., Hemez, F.M. et al. (2004). *A review of structural health monitoring literature*. Los Alamos National Laboratory.
3. Doebling, S.W., Farrar, C.R., Prime, M.B. (1998). Damage identification and health monitoring of structural systems. *Shock and Vibration Digest*, 30(2), 91–105.
4. Fuller, A., Fan, Z., Day, C., Barlow, C. (2020). Digital Twin: Enabling technologies, challenges and open research. *IEEE Access*, 8, 108952–108971.
5. Tao, F., Zhang, M. (2017). Digital Twin Shop-Floor: A new paradigm. *IEEE Access*, 5, 20418–20427.
6. Kritzinger, W., Karner, M., Traar, G. et al. (2018). Digital Twin in manufacturing: A review. *IFAC-PapersOnLine*, 51(11), 1016–1022.
7. Glaessgen, E., Stargel, D. (2012). The Digital Twin paradigm for future NASA systems. *AIAA*.
8. Worden, K., Cross, E.J. (2018). On switching response surface models. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 98, 746–767.
9. Boller, C., Chang, F.K., Fujino, Y. (2009). *Encyclopedia of Structural Health Monitoring*. Wiley.
10. Chatfield, C. (2000). *Time-Series Forecasting*. CRC Press.
11. LeCun, Y., Bengio, Y., Hinton, G. (2015). Deep learning. *Nature*, 521, 436–444.
12. Goodfellow, I., Bengio, Y., Courville, A. (2016). *Deep Learning*. MIT Press.
13. O'Connor, A.J., Lynch, J.P. (2014). Cyber-physical systems for civil infrastructure. *Structure and Infrastructure Engineering*, 10(12), 1457–1472.
14. Spencer, B.F., Hoskere, V., Narazaki, Y. (2019). Advances in SHM using AI. *Engineering Structures*, 199.
15. Frangopol, D.M., Soliman, M. (2016). Life-cycle of structural systems. *Structure and Infrastructure Engineering*, 12(1), 1–20.

Ing. Diego Dell’Erba

Ingegnere Nucleare – Multidisciplinare

PROFILO

Ingegnere con oltre 50 anni di esperienza nella progettazione, direzione lavori e sicurezza di opere complesse in ambito strutturale, in Italia e all’estero.

Specializzato nella gestione di infrastrutture in contesti critici, quali aree sismiche, dissesto idrogeologico e ricostruzione post-sisma.

Ideatore del **Metodo Dell’Erba**, basato sull’integrazione tra **Digital Twin, monitoraggio strutturale, manutenzione predittiva e intelligenza artificiale**.

Promotore del paradigma:

Cyber–Physical Structural Safety (CPSS)

sicurezza dinamica e tempo-dipendente delle opere di ingegneria.

COMPETENZE CHIAVE

- Progettazione strutturale
- Direzione lavori
- Monitoraggio strutturale (FBG)
- Digital Twin e IA applicata
- Manutenzione predittiva
- Sicurezza delle infrastrutture

ESPERIENZA

- Attività professionale in Italia e in ambito internazionale
- Progettazione e realizzazione di opere complesse
- Interventi su frane, fondazioni profonde e infrastrutture

- *La sicurezza non è una verifica iniziale,*
ma un processo continuo basato su conoscenza, dati e previsione.