CYBER PHYSICAL ENGINEERING / LA NUOVA INGEGNERIA

Dalla ricostruzione alla manutenzione predittiva

Gestione tecnico-amministrativa di un fabbricato residenziale
con Digital Twin e intelligenza artificiale
Casi di Colleposta · Cantieri Marina e Ionni



Ing. Diego Dell'Erba

Relazione tecnica • Novembre 2026

www.ingdiegodellerba.it

GESTIONE DEL CANTIERE

Progettare oggi i controlli di domani

Il caso guida è la ricostruzione di un fabbricato residenziale. Il monitoraggio va previsto prima che fondazioni, solai e altri punti critici diventino inaccessibili.



Figura 1. Rilievo e documentazione di cantiere. Illustrazione concettuale.

Prima dell’apertura

Il progettista definisce gli elementi da osservare e le misure utili. Il capitolato specifica posizione e accessibilità dei punti di misura, prestazioni, prove di accettazione e formati di consegna. Il computo include posa, messa in servizio, aggiornamento del modello e formazione. Il cronoprogramma coordina questi passaggi con le lavorazioni.

Durante i lavori

Il direttore dei lavori collega ogni controllo al codice dell’elemento e alla revisione del progetto. Prima di chiudere le opere, acquisisce fotografie, posizione effettiva dei sensori e risultati delle prove previste. L’impresa documenta la posa. Il coordinatore per la sicurezza interviene secondo il proprio incarico, ove previsto.

> **Quando cambia il progetto**
> Registrare motivo, elaborati interessati, effetti su costi e tempi, approvazioni e conseguenze sul monitoraggio. Nei cantieri assistiti da contributo, verificare l’ammissibilità della spesa secondo la pratica e le disposizioni applicabili.

DIGITAL TWIN E MONITORAGGIO

Il gemello digitale dell’edificio

Il modello aggiornato a quanto costruito collega ogni elemento ai documenti, alle misure e agli interventi. Il tecnico può ricostruire l’origine del dato prima di interpretarlo.

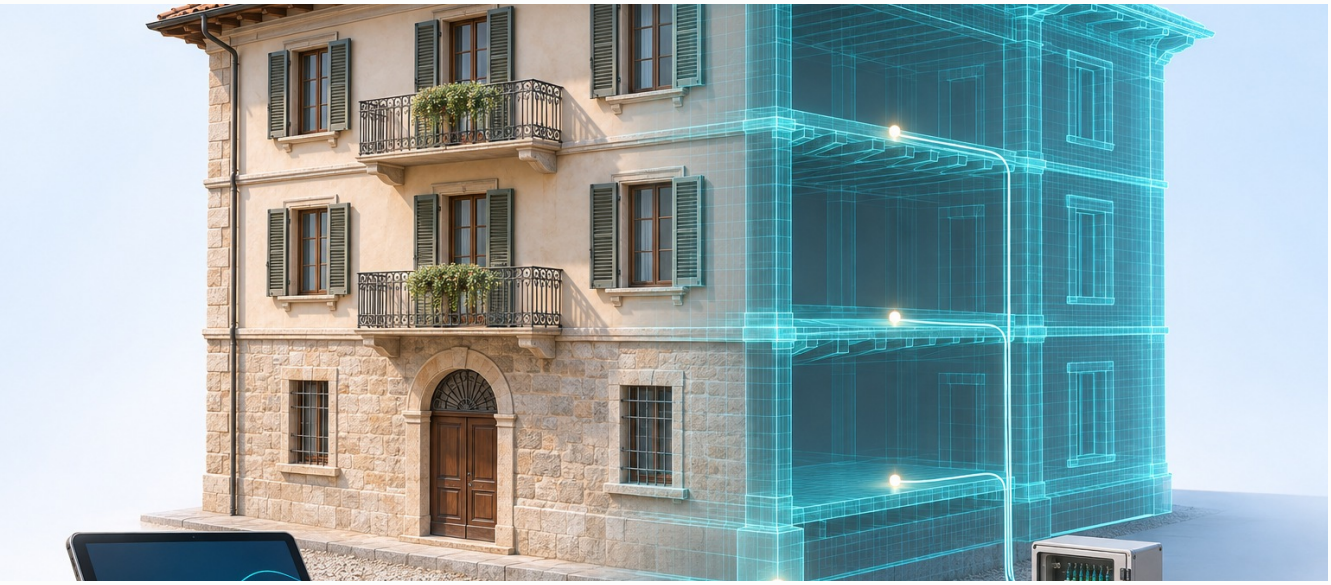


Figura 2. Edificio residenziale e rappresentazione del suo gemello digitale. Illustrazione concettuale.

Fenomeno	Misura o riscontro	Decisione da istruire
Cedimento differenziale	Capisaldi e livellazione periodica	Ripetere il rilievo o disporre un approfondimento geotecnico
Variazione di una lesione	Fessurimetro, temperatura e foto datate	Anticipare un’ispezione se lo scostamento persiste
Deformazione strutturale	Sensori a fibra ottica FBG o SOFO, se idonei	Confrontare la risposta osservata con quella attesa
Infiltrazioni	Umidità e ispezione dopo la pioggia	Verificare scarichi, copertura o impermeabilizzazione

Per ogni canale si registrano codice del sensore, posizione effettiva, unità di misura, riferimento iniziale, frequenza di acquisizione e regole di segnalazione. La scheda distingue le misure valide da quelle mancanti o inattendibili. Droni e dati satellitari possono integrare il quadro con rilievi esterni o informazioni sul territorio, secondo disponibilità e idoneità alla scala del problema.

CALCOLO APPLICATIVO 1

Dal computo al SAL

Esempio illustrativo con importi al netto dell’IVA. Il SAL rappresenta il valore contabilizzato delle lavorazioni. L’importo da liquidare si determina secondo contratto e regole applicabili.

Controllo	Dato	Riscontro
Calcestruzzo fondazioni	24 m³ nella bozza	21 m³ confermati dal direttore dei lavori
Prezzo unitario contrattuale	€ 185,00/m³	Voce a misura, per l’esempio
Rettifica della voce	(24 − 21) × € 185,00	€ 555,00 da sottrarre alla bozza
SAL cumulato in bozza	€ 120.000,00	Prima della rettifica
SAL cumulato corretto	€ 120.000,00 − € 555,00	€ 119.445,00
SAL cumulato precedente	€ 58.000,00	Importo già contabilizzato
Avanzamento del periodo	€ 119.445,00 − € 58.000,00	**€ 61.445,00**

Come si contabilizza il monitoraggio

Il direttore dei lavori collega la voce di computo all’elemento del modello e al verbale di verifica. Distingue la fornitura dalla posa e dalla messa in servizio secondo le condizioni contrattuali. Alla chiusura del SAL controlla quantità, unità, prezzi, progressivi e documenti a supporto.

> **Il controllo assistito dall’IA**
> L’IA confronta il libretto delle misure con il SAL in bozza e i SAL precedenti. Indica il documento, la pagina e la voce della discordanza. Il direttore dei lavori verifica la misura e registra l’esito. Gli importi si ricalcolano con formule verificabili.

Per la ricostruzione privata post-sisma, il prospetto della spesa contrattuale va riconciliato con decreto, computo ammesso ed eventuali varianti autorizzate prima della richiesta di erogazione.

CALCOLO APPLICATIVO 2

Quanto costa gestire il monitoraggio

Scenario illustrativo per un intervento residenziale. Gli importi servono a mostrare il metodo di calcolo e si intendono al netto dell’IVA.

Voce	Importo	Contenuto
Lavori di ricostruzione	€ 400.000	Base di confronto, senza il sistema di monitoraggio
Sensori e posa	€ 6.000	Strumentazione, cablaggio e installazione
Acquisizione e comunicazione	€ 3.500	Apparati, collegamento e configurazione
Integrazione nel Digital Twin	€ 3.000	Associazione delle misure agli elementi e gestione dei dati
Prove e consegna	€ 1.500	Avviamento, prove funzionali e formazione
Investimento iniziale	**€ 14.000**	Somma delle quattro voci del sistema
Gestione annua ipotizzata	**€ 2.500**	Piattaforma, assistenza e verifiche periodiche

> **Incidenza iniziale e costo su dieci anni**
> **Incidenza** = € 14.000 ÷ € 400.000 × 100 = **3,5%**.
> **Costo del sistema su dieci anni** = € 14.000 + 10 × € 2.500 = **€ 39.000**.

Come si usa la stima

Il calcolo decennale è a prezzi costanti e senza attualizzazione. Nel preventivo reale si quotano a parte eventuali sostituzioni straordinarie e aggiornamenti. La scelta del sistema dipende dagli elementi critici da seguire, dalla frequenza dei controlli e dalle risorse disponibili in esercizio.

CALCOLO APPLICATIVO 3

Quando anticipare un’ispezione

Esempio illustrativo. Si osserva una lesione vicino al vano scala in condizioni ambientali comparabili, con misure verificate nelle prime sei settimane.

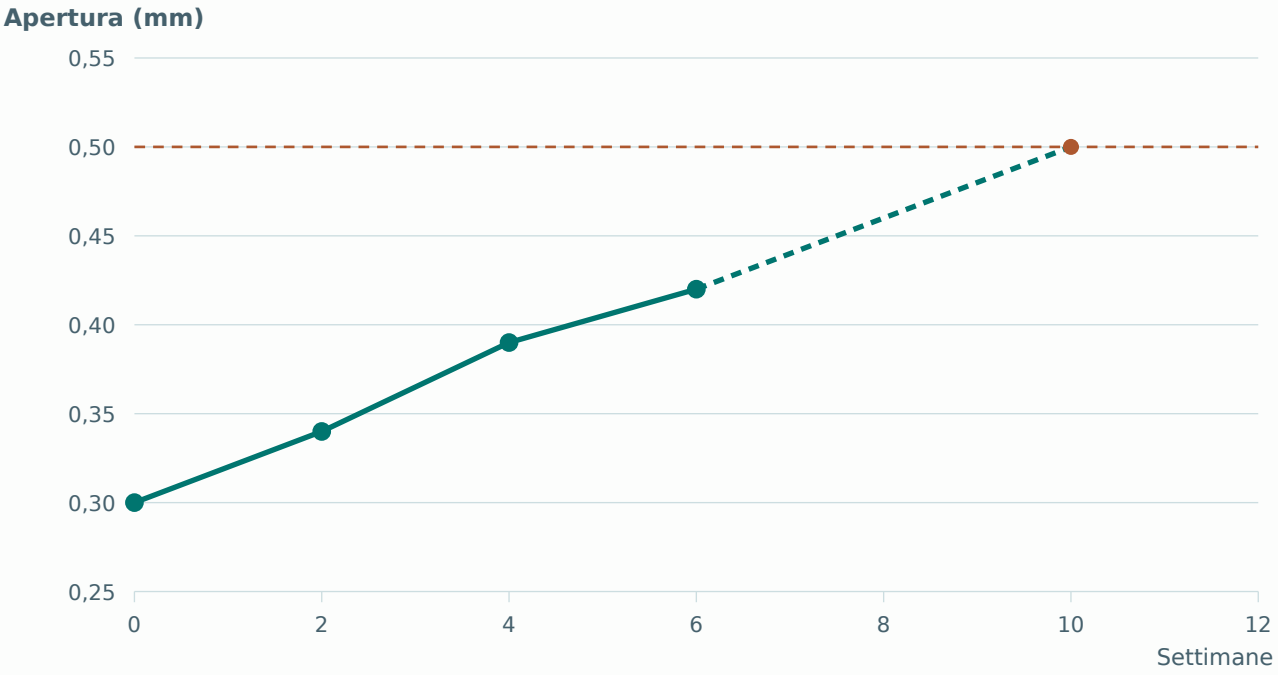


Figura 3. Punti pieni turchesi = misure. Tratto obliquo discontinuo = proiezione lineare. Linea orizzontale arancione = soglia illustrativa.

Calcolo del tempo di avvicinamento alla soglia
Velocità media = (0,42 − 0,30) ÷ 6 = **0,020 mm/settimana**.
Tempo stimato = (0,50 − 0,42) ÷ 0,020 = **4 settimane dall’ultima misura**.
Con velocità ipotizzate di 0,015 e 0,025 mm/settimana, il tempo varia tra circa **3,2 e 5,3 settimane**.

Decisione operativa. Verificare il sensore e le condizioni ambientali, confermare la misura in opera e valutare un sopralluogo anticipato. La soglia di 0,50 mm è un valore didattico di attenzione. L’intervallo illustra la sensibilità alla velocità ipotizzata. Una serie breve richiede riscontri prima di usare la proiezione nelle decisioni.

Esempio di misura della deformazione media. Per una base di 1.200 mm e un allungamento corretto di 0,12 mm, ε = 0,12 ÷ 1.200 = 0,0001 = **100 με**. L’interpretazione richiede la conoscenza della posizione, dell’orientamento e delle condizioni di misura.

COLLEPOSTA / CASO 1

Cantiere Marina

Fabbricato residenziale Marina Fabri, Colle Marzolo, frazione Colleposta, Accumoli (RI). Procedimento USR Lazio ID 9464.

Dal verbale al fascicolo di chiusura

Il verbale del 3 giugno 2026 registra facciate in fase avanzata, struttura lignea principale della copertura completata, protezioni controterra osservate e finiture interne in corso. Per il sopralluogo a campione dell'USR Lazio del 4 settembre 2026, gli elaborati, la contabilità e le fotografie erano organizzati per SAL. La relazione di novembre indica il cantiere in fase di chiusura.

Parte del fabbricato	Documenti da collegare	Controllo da programmare
Copertura lignea	Elaborato aggiornato, foto e verbale dei dettagli accessibili	Raccordi, eventuali infiltrazioni e zone ispezionabili
Protezioni controterra	Tavole, foto disponibili prima della chiusura e registri di posa	Riscontri su umidità e punti accessibili, secondo il progetto
Facciate e finiture	Archivio fotografico, esiti dei sopralluoghi e voci di contabilità	Confronto con le condizioni iniziali in caso di nuove lesioni

Come predisporre il Digital Twin

Attribuire un codice a ogni elemento rilevante e collegarlo a tavola, revisione, foto, verbale e voce di computo. L'IA può confrontare gli indici e segnalare i documenti che mancano prima del saldo. Il direttore dei lavori riscontra le evidenze e chiude le verifiche di propria competenza. Un rilievo con laser scanner o drone può integrare la geometria visibile, se previsto.

> **Monitoraggio proposto per la fase di esercizio**
> Per eventuali sensori FBG o SOFO, verificare la presenza di un piano di misura, dei registri di posa, delle prove e delle letture iniziali. La documentazione consultata attesta l'archivio fotografico digitale. L'attivazione del monitoraggio e del gemello digitale richiede i relativi riscontri.

Ruoli documentati. Progettista e direttore dei lavori Ing. Diego Dell'Erba. Impresa Cricchi Costruzioni S.r.l., con Ing. Sara Cricchi come responsabile tecnico di cantiere. Coordinatore della sicurezza in esecuzione Ing. Maurizio De Marco, delegato al sopralluogo USR.

Fonte del caso: relazione «La Nuova Ingegneria nei cantieri del sisma 2016», p. 4, riferimenti [4–5].

COLLEPOSTA / CASO 2

Cantiere Ionni

Fabbricato residenziale di Colleposta, Accumoli (RI). La scheda usa la grafia «Ionni» riportata nella documentazione tecnica. Progettista e direttore dei lavori Ing. Diego Dell’Erba.



Figura 4. Fotografie di cantiere. A sinistra il prospetto, a destra il raccordo tra gronda e pluviale. Fonte: rassegna preliminare riprodotta nella relazione sui cantieri del sisma 2016, p. 5.

Dalle fotografie al sopralluogo

La rassegna fotografica preliminare alla visita del 12 novembre 2026 documenta prospetti color ocra, copertura, gronde, pluviali e ponteggi. Il dettaglio di gronda e pluviale individua un punto da controllare in sito. Il sopralluogo previsto comprende anche i raccordi dei serramenti, le finiture interne, gli accessi e le sistemazioni esterne.

Esempio di scheda digitale per gronda e pluviale

Nel modello, associare al raccordo un codice, il prospetto, la foto iniziale e il verbale di controllo. In sito verificare continuità, fissaggi e recapito delle acque. Registrare esito, eventuale correzione, responsabile e prossima verifica. Le fotografie successive, riprese dallo stesso punto, permettono di confrontare il dettaglio nel tempo.

> **Manutenzione basata sulle condizioni osservate**
> Se dopo più piogge si osservano aloni o umidità nello stesso punto, il tecnico confronta le evidenze con il riferimento iniziale e decide se anticipare l’ispezione. Un sensore di umidità è un’opzione da valutare dopo il riscontro in sito. Una stima predittiva richiede uno storico sufficiente e criteri di interpretazione verificati.

Fonte del caso: relazione «La Nuova Ingegneria nei cantieri del sisma 2016», p. 5, riferimento [6].

APPLICAZIONE AI DUE CANTIERI

Due verifiche, due cantieri

Due applicazioni di metodo con dati ipotetici. Le grandezze utilizzate servono a mostrare i passaggi di calcolo.

Marina · Completezza del fascicolo prima del saldo

Si ipotizzano 20 evidenze richieste dalla lista di controllo interna per una fase di chiusura. Di queste, 18 risultano acquisite e verificate. Ogni evidenza è collegata all'elemento interessato e alla voce di contabilità, ove pertinente.

> **Indicatore interno di completezza**
> 18 ÷ 20 × 100 = **90%**. Restano 2 evidenze da acquisire. Il direttore dei lavori verifica quali sono e se sono richieste ai fini della chiusura o dell'erogazione. L'indicatore aiuta a seguire la raccolta documentale.

Ionni · Stima indicativa del deflusso verso un pluviale

Per illustrare l'ordine di grandezza della portata, si ipotizzano 90 m² di superficie di copertura in proiezione orizzontale tributaria di un pluviale, un'intensità di pioggia di 80 mm/h e un coefficiente di deflusso pari a 0,90.

> **Portata indicativa**
> Q = 0,90 × 90 × 80 ÷ 3.600 = **1,8 L/s**. Un millimetro di pioggia su un metro quadrato corrisponde a un litro. Per il dimensionamento servono la geometria rilevata, la pioggia di progetto locale e le verifiche del sistema di raccolta e smaltimento.

Passaggio	Marina	Ionni
Evidenza documentata	Verbali, archivio fotografico e documenti organizzati per SAL	Rassegna fotografica prima della visita
Prima applicazione proposta	Collegare opere eseguite, verifiche e documenti di chiusura	Creare la scheda digitale del raccordo gronda–pluviale
Dati per la gestione futura	Condizioni alla consegna ed eventuali letture iniziali documentate	Esiti delle ispezioni e confronti dopo le piogge

CONSEGNA ED ESERCIZIO

Dai dati alle decisioni

La gestione in esercizio comincia con il passaggio di responsabilità dal cantiere al proprietario o al condominio.

Consegnare un fascicolo utilizzabile

Il direttore dei lavori coordina la consegna, secondo gli incarichi, degli elaborati aggiornati, dell’inventario dei sensori, dei verbali delle prove e delle misure iniziali. Il fascicolo riporta scadenze, recapiti, accessi, modalità di esportazione e riferimenti per assistenza e ripristino.

Assegnare ogni segnalazione

Il proprietario o l’amministratore organizza il servizio e affida la valutazione a un tecnico. Il tecnico verifica qualità e contesto delle misure, indica gli approfondimenti e registra l’esito. In caso di sisma o segnalazione urgente si attiva la procedura prevista per l’edificio, con le verifiche sul posto dei soggetti competenti.

Usare l’intelligenza artificiale con fonti verificabili

L’IA confronta serie di misure, evidenzia anomalie e prepara rapporti con riferimenti alle fonti. Il professionista verifica gli output e firma gli atti di propria competenza. Per i documenti e le serie di misure si definiscono accessi per ruolo, copie di sicurezza e registrazione delle modifiche.

Riferimenti

Ing. Diego Dell’Erba, La Nuova Ingegneria nei cantieri del sisma 2016, pp. 4–5 e 12

Norme tecniche per le costruzioni, D.M. 17 gennaio 2018

Sisma 2016, Testo Unico della Ricostruzione Privata

ISO 19650-3:2020, gestione informativa nella fase di esercizio

ENEA, monitoraggio strutturale mediante sensori in fibra ottica

NIST, A Human-centered Framework to Update Digital Twins

Copertina e figure 1–2 sono illustrazioni concettuali. La figura 4 contiene fotografie di cantiere. I calcoli impiegano dati esemplificativi.

Ing. Diego Dell’Erba