

Il retrofit sismico strutturale di un fabbricato Dagli isolatori sismici al sistema di monitoraggio integrato - (2^a parte) Il monitoraggio digitale

Introduzione

L'implementazione di un sistema di monitoraggio dinamico strutturale completo di un'opera, permette la rilevazione in continuo di una serie di parametri in campo dinamico, parametri impiegati nella verifica della corrispondenza del comportamento strutturale alle previsioni progettuali, e della costanza del comportamento nel tempo.

I risultati di tali verifiche costituiscono quindi uno strumento di fondamentale importanza per il controllo di validità del piano di manutenzione programmata dell'opera, o per la definizione di modifiche dedicate ed efficaci da apportare allo stesso. Un idoneo monitoraggio strutturale permette di evidenziare con elevata attendibilità la presenza di eventuali danni alla struttura e di localizzarne posizione ed estensione e valutare l'integrità strutturale a seguito di eventi accidentali.

In particolare, il monitoraggio può fornire informazioni utili sull'evoluzione del degrado della struttura nel tempo, permettendo di mettere in atto azioni preventive per ripristinarne la corretta funzionalità.

Vista la particolarità e delicatezza dell'intervento, nel caso in esame, si è reso necessario tenere sotto controllo l'edificio e le condizioni al contorno mediante un sistema di monitoraggio sia statico che dinamico. **Tale sistema è**

costituito da accelerometri, inclinometri e sensori di temperatura, utilizzando in particolare:

- **4 Terne accelerometriche (X,Y,Z)** per la registrazione di accelerazioni durante le fasi di cantiere e per un'eventuale caratterizzazione dell'input sismico;
- **8 Terne inclinometriche** in corrispondenza degli spigoli del fabbricato e dei muri di contenimento limitrofi, per registrare eventuali anomalie o rotazioni eccessive durante le operazioni di sbancamento e di retrofit.

La rete di sensori diventa quindi un vero e proprio impianto integrato alla costruzione e acquisisce i dati in maniera continua: a seguito di un evento calamitoso è possibile effettuare in maniera quasi immediata una stima delle condizioni di salute del manufatto attraverso una diagnosi approfondita, avendo a disposizione le esatte accelerazioni subite dalla struttura.

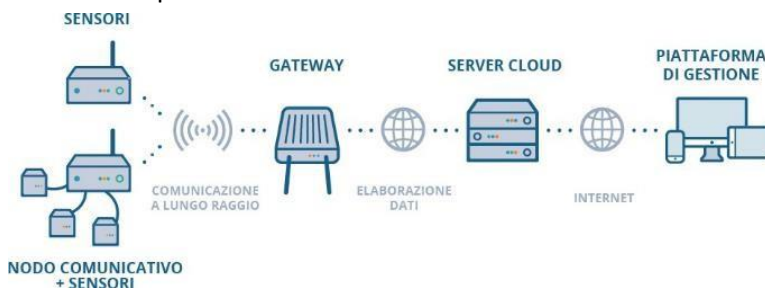


Fig. 1 - Architettura generale Sensori/Sistema di gestione.

Il sistema di monitoraggio, mediante la valutazione della risposta strutturale in tempo reale, fornisce inoltre informazioni utilizzabili nel processo decisionale per valutare lo stato di salute dell'edificio. Nel caso di evento di ridotta intensità la valutazione dell'assenza di danni, supportata dal sistema di monitoraggio, consentirebbe una ripresa immediata dell'attività con evidenti vantaggi economici e commerciali.

I sensori hanno un funzionamento completamente wireless e alimentato a batteria. Entrambi i dispositivi, grazie alla tecnologia LoRaWAN hanno una portata adeguata e supportata da un *gateway*, incaricato di trasferire i dati verso la piattaforma Cloud, che ne permette poi l'analisi, la consultazione in ogni momento, e cosa più importante, lanciare eventuali allarmi di *early warning*.

I dati raccolti possono pertanto essere visualizzati in tempo reale con l'ausilio della Piattaforma Web, attraverso la quale è possibile assegnare numerosi parametri operativi, tra cui frequenze di campionamento, risoluzione, soglie di attivazione, soglie di allarme ed altro ancora.

Il sistema garantisce un monitoraggio continuo dello stato di salute della struttura, e la creazione di registrazioni storiche dei dati raccolti a cui si può accedere in qualsiasi momento. La piattaforma consente inoltre di gestire i sensori installati, analizzare, graficizzare e visualizzare le serie temporali dei dati acquisiti.

Monitoraggio accelerometrico

Al fine di tenere sotto controllo l'edificio condominiale da un punto di vista dinamico sono state installate 4 terne accelerometriche wireless.

L'Accelerometro è in grado di misurare l'accelerazione sui tre assi ed in alta risoluzione, del punto nodale di installazione.



Fig. 2 - Collocazione in situ degli accelerometri.

Tutti gli Accelerometri installati sono sincronizzati tra loro senza l'impiego di cablaggi, e grazie a questa caratteristica è possibile misurare le frequenze di oscillazione ed effettuare l'analisi modale della struttura. In questo caso i sensori sono stati utilizzati al fine di registrare eventi di picco delle vibrazioni potenzialmente dannose all'edificio, oltre che tutelare le proprietà limitrofe da possibili danneggiamenti strutturali causati dalle lavorazioni.

L'accelerometro 14E23 è stato posizionato sul pilastro esterno del corpo scala condominiale, a cui si ha accesso dal terrazzo comune situato all'ultimo piano, mentre L'accelerometro 154EA è stato posizionato sul solaio del sottotetto, ad uso esclusivo del proprietario del terzo piano.



I sensori hanno fornito durante tutte le fasi del cantiere informazioni utili riguardo i livelli di vibrazione raggiunti. In particolare i sensori hanno permesso di registrare gli eventi sismici che hanno colpito l'Italia centrale (Evento sismico ML 3.3 del 29/05/2021 ore 06.42, Evento sismico ML 4.0 del 11/07/2021 ore 12.56).

Si riportano di seguito per completezza di informazione, le accelerazioni e i contenuti in frequenza più significativi, acquisiti da uno dei sensori installati.

Fig. 3 – Accelerometro triassiale

I livelli di vibrazione registrati hanno consentito di eseguire una diagnosi quasi istantanea a seguito dell'evento sismico, che è risultato di lieve entità e non



Fig. 4 - I grafici dell'INGV con la registrazione degli eventi sismici 29/05/2021 e del 11/07/2021.

Il retrofit sismico strutturale di un fabbricato, Dagli isolatori sismici al sistema di monitoraggio integrato

- Seconda parte. - A cura di A.Pierdicca e R.Pierdicca

INGENIO-WEB.IT - © 2023

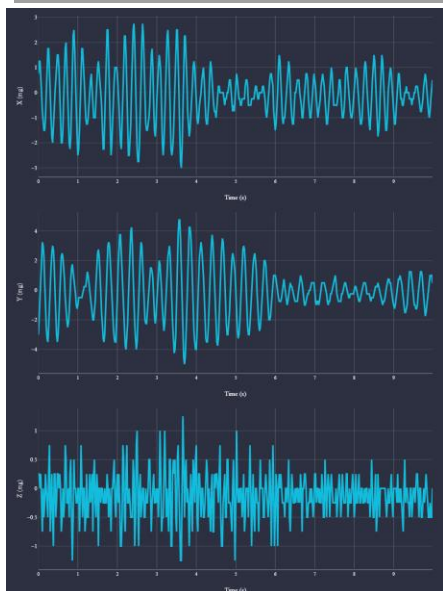


Fig. 5 - Acquisizione dinamica del sistema 154EA. pk to pk max 9.75 mg (11 Luglio 2021).

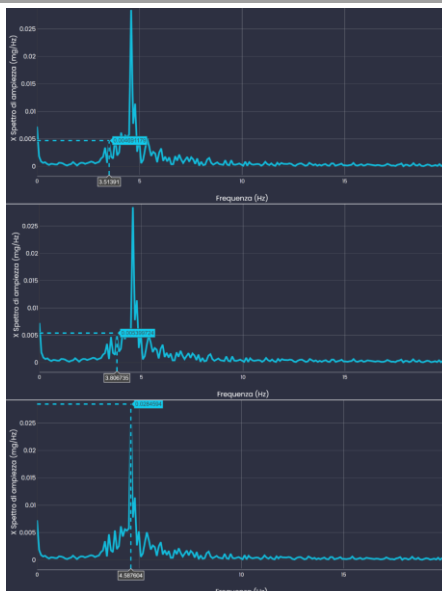


Fig. 6 - Contenuti in frequenza dei segnali

ha compromesso la stabilità della struttura. L'evento ha colpito la struttura prima dell'intervento di adeguamento sismico.

Monitoraggio inclinometrico

Oltre al monitoraggio accelerometrico, le misure inclinometriche in continuo sono state eseguite al fine di tenere sotto controllo diverse porzioni dell'edificio e delle proprietà limitrofe. Sono state posizionate diverse terne inclinometriche, in corrispondenza della parete del fabbricato e sul muretto di confine, adiacente alle operazioni di scavo per la realizzazione di una

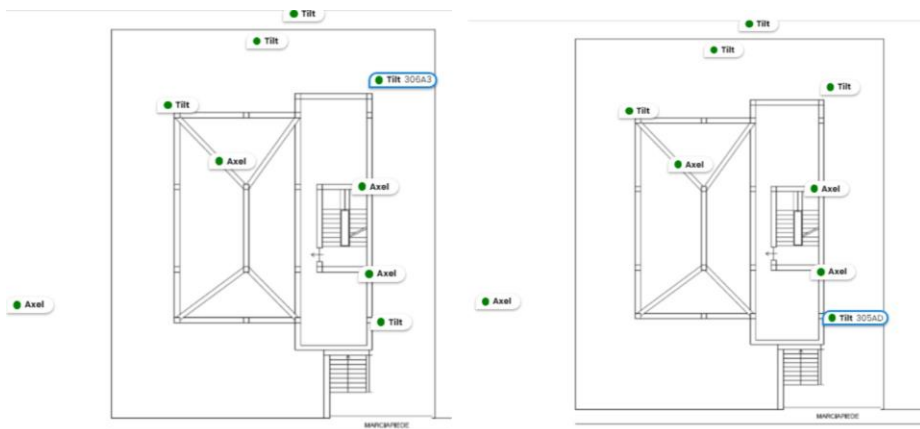


Fig. 7 - Collocazione generale degli inclimetri.

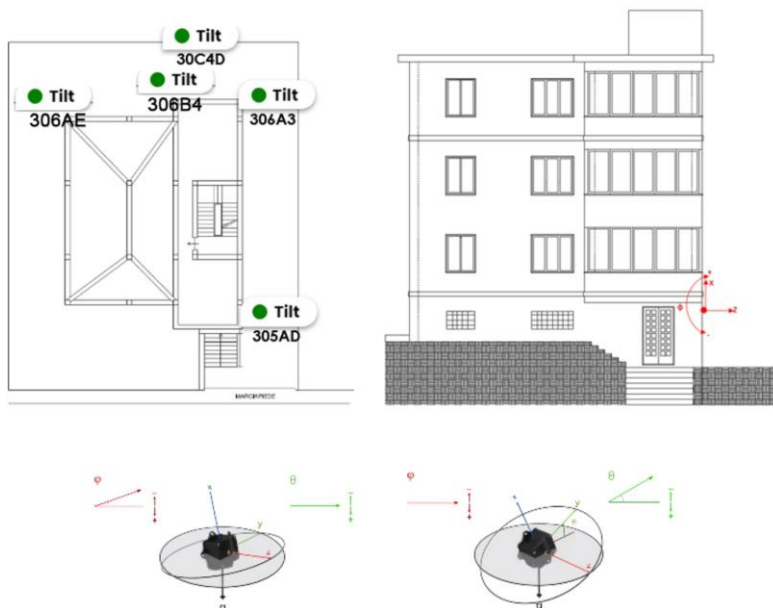


Fig. 8 - La collocazione dei sensori inclinometrici.

Il retrofit sismico strutturale di un fabbricato, Dagli isolatori sismici al sistema di monitoraggio integrato

- Seconda parte. - A cura di A.Pierdicca e R.Pierdicca

INGENIO-WEB.IT - © 2023

palificata, e con il fine di monitorare eventuali rotazioni e spostamenti sensibili.

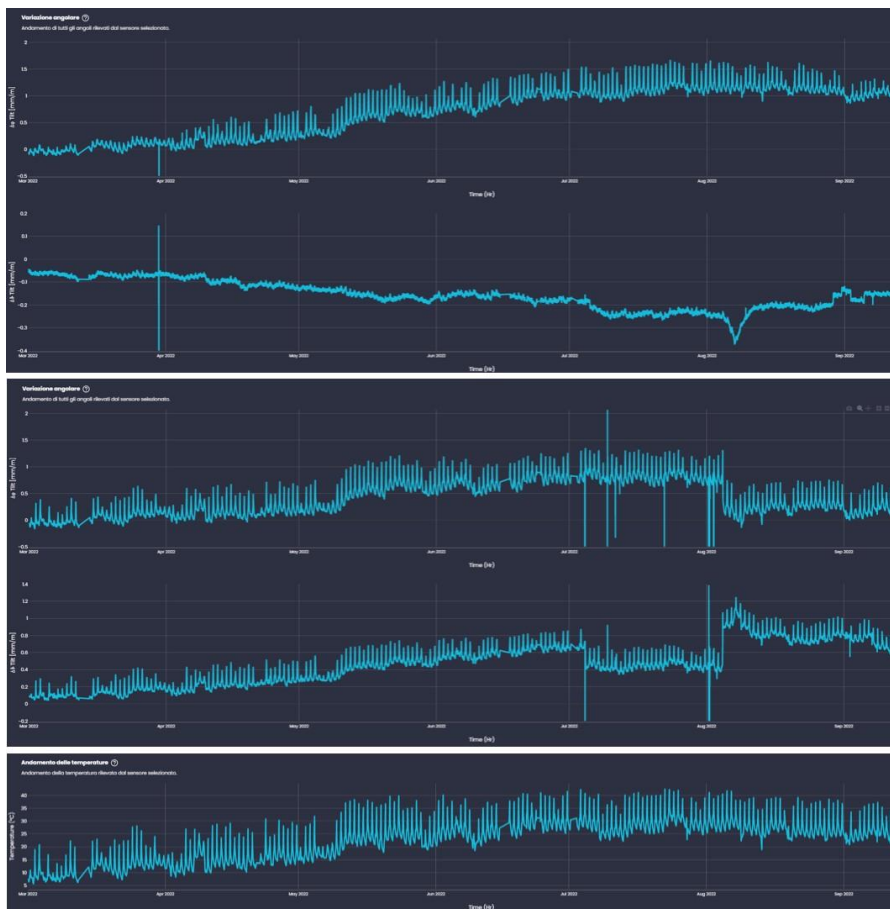


Fig.9 - Dall'alto verso il basso i grafici delle Variazioni angolari sensore 306B4, 306AE e 305AD, e grafico della temperatura.

Il retrofit sismico strutturale di un fabbricato, Dagli isolatori sismici al sistema di monitoraggio integrato

- Seconda parte. - A cura di A.Pierdicca e R.Pierdicca

INGENIO-WEB.IT - © 2023

Il monitoraggio ha fornito dati interessantissimi su tutta la durata dell'intervento, di cui si riportano sinteticamente le fasi salienti.

- **Fase di trivellazione dei pali in c.a.** a realizzazione della paratia perimetrale;
- **Demolizioni** dei garage esistenti al piano terra;
- **Fasi di demolizione interna** localizzate nelle cantine al piano seminterrato;
- **Incamicature dei pilastri esistenti** in c.a.;
- **Fasi di installazione degli isolatori sismici e taglio dei conci dei pilastri**

Si riportano di seguito alcuni grafici e risultati relativi alle misurazioni eseguite; in alcuni sensori sono stati registrati valori angolari di deriva che in alcuni casi, hanno richiesto l'intervento tecnico e alcuni approfondimenti in cantiere. In particolare, a seguito degli scavi attorno alla paratia, si sono manifestate delle lievi rotazioni dell'immobile, confermate anche dalle letture topografiche eseguite. Tali deformazioni sono state comunque contenute e non hanno determinato criticità a seguito dell'intervento di adeguamento.

Il Monitoraggio topografico

Un'ultima tecnica di monitoraggio impiegata è stata quella del monitoraggio topografico.

Lo scopo delle misurazioni topografiche è quello di monitorare lo stato conservativo del manufatto nonché verificarne la geometria assoluta in termini di delta x, delta y, delta z. L'attività di monitoraggio topografico è stata avviata in data 29/01/2022, dalle ore 10:00 circa, utilizzando una stazione totale robotizzata MS05A TOPCON posizionata su treppiede in legno e n. 7 mini-prismi per l'attività di controllo periodico.



Fig. 10 - Inquadramento generale del manufatto che ha generato il case application.

Inizialmente è stata creata la cosiddetta “soglia zero”, basata su tre cicli di misura, acquisiti in modalità dritto e coniugato sugli angoli orizzontale, verticale e distanza inclinata. Attraverso la procedura di elaborazione dati è stato possibile estrapolare le misure grezze relative ai prismi misurati.

Pertanto, è stata effettuata la messa in stazione, con il calcolo delle coordinate della stazione stessa, attraverso l’ausilio dei capisaldi **N** (Nord); **E** (Est); **O** (Ovest), nonché alla misura di zero dei punti **A**, **B**, **C** e **D** da monitorare sul fabbricato, e posizionati in prossimità degli inclinometri triassiali (sotto di essi, tranne che per il punto C) ovvero:

- prisma A: installato sotto l’inclinometro triassiale 305AD;
- prisma B: installato sotto l’inclinometro triassiale 306A3;
- prisma D: installato sotto l’inclinometro triassiale 30C4D.



Fig. 11 - A sinistra lo stato di un nodo della struttura. A destra una delle postazioni di misura.

La seconda misura topografica è stata eseguita il giorno 27-04-2022. La terza lettura topografica è stata eseguita il giorno 29-06-2022. La quarta lettura è stata eseguita il giorno 24 agosto 2022 (prima della posa degli isolatori sismici). L'ultima lettura è stata eseguita il giorno 20 settembre 2022 (dopo la posa degli isolatori sismici).

Durante le prime letture, andando ad analizzare i punti monitorati **A-B-C-D** si può dedurre che filtrando l'errore non si riscontrano anomalie e spostamenti rilevanti, eccetto che nel punto D (muro di confine a monte edificio). In questo punto sono riscontrabili cedimenti di circa $-3/4$ mm.

Conclusioni

Il lavoro descritto in questo articolo ha presentato soluzioni innovative e tradizionali a supporto della sicurezza sismica e del monitoraggio strutturale. In particolare, le soluzioni proposte riguardano da un lato l'installazione di isolatori sismici in un edificio urbano, dall'altro un sistema complesso ed integrato di tecniche di monitoraggio al fine di garantire sicurezza strutturale sia in fase di cantiere che per l'intero *life cycle* dell'edificio stesso. Diverse considerazioni possono emergere da quanto mostrato. In primis, il lavoro è stato svolto da un team inter-disciplinare nel quale strutturisti, topografi, progettisti e sviluppatori hanno contribuito alla messa a sistema di tecniche di rilievo e controllo diametralmente opposte ma l'una propedeutica all'altra per fornire una fotografia chiara di ogni fase di cantiere. Laddove il metodo di monitoraggio cablato si è rivelato il più accurato per l'identificazione del comportamento dinamico dell'edificio, metodi più speditivi e low cost con il monitoraggio topografico e quello wireless in continuo hanno permesso la redazione di una reportistica costante e comunque puntuale di ogni fase del cantiere, dalle fasi di scavo a quella di installazione degli isolatori. Intervenire in un contesto urbano su edifici a civile abitazione comporta ovviamente delle complicazioni logistiche, economiche e anche sociali. Se è vero che il controllo di infrastrutture viarie più imponenti richiede la messa a regime di un nutrito numero di sensori, in un ambito cittadino il controllo deve essere assolutamente capillare al fine di garantire la massima sicurezza sia di chi abiterà l'edificio, sia degli edifici circostanti; il sistema ha infatti permesso di effettuare un controllo vibrazionale e di avere degli alert in tempo reale qualora delle attività sismiche si verificassero. Se si volesse ripartire dal gemello digitale, questo articolo dimostra che, almeno in termini di controllo e monitoraggio, i nuovi paradigmi dell' IOT sono una valida soluzione che *out-of-the-shelves*, a basso costo e di indubbia utilità almeno per un primo screening, rimandando interventi più invasivi a valutazioni più approfondite.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano fortemente per il supporto al progetto, l'Arch. A. BELLUCCI e l'Ing. G. MENTINI, i quali hanno collaborato per la parte progettuale e per il processo e gestione del cantiere.

[LINK Prima Parte](#)