

MASTER Magazine

Rivista ufficiale dell'Associazione MASTER
Materials and Structures Testing and Research



Il **MASTER Magazine** è una rivista a carattere tecnico-scientifica pubblicata dall'Associazione MASTER. La collaborazione è aperta a tutti.

Direzione e redazione:

Stefano Bufarini - Vincenzo D'Aria - Salvatore Menditto - Domenico Squillacioti

Comitato Scientifico:

Stefano Bufarini - Vincenzo D'Aria - Santo Mineo - Sandro Pariset - Domenico Squillacioti - Alessandro Zizzi

Articoli:

- **Controlli su pali di fondazione: il metodo TIP - Thermal Integrity Profiler**
Fabio Mattiauda, Michele Massaccesi, Gianni Lanzetta
- **La transizione digitale nella gestione di ponti e viadotti**
Emerenziana Locatelli
- **Sistemi di monitoraggio innovativi per la manutenzione predittiva delle infrastrutture**
Paolo Sattamino, Ivan Moroni
- **Active Mass Damper: la nuova frontiera della protezione sismica**
Barbara Zulian, Giovanni Rebecchi
- **Uso di data logger e calcolo dell'Umidità Assoluta. Un ampliamento dell'approccio per l'indagine dei fenomeni condensativi con formazione di muffe in ambienti chiusi**
Marco Maria Parrini, Anna Isabella Piazza
- **Profili di responsabilità penale del collaudatore statico**
Raffaele Barra
- **I modelli matematici nell'ingegneria strutturale. Scelte soggettive e profili di responsabilità**
Elio Lo Giudice
- **Prove di caratterizzazione statica e dinamica sul Ponte Forgia: un'opera ferroviaria a travata reticolare della tratta Trapani-Palermo**
Elio Lo Giudice, Giuseppe Navarra, Giuseppe Mugnos

E' concessa la riproduzione degli articoli purché venga citata la fonte e rispettata la sua integrità.

Controlli su pali di fondazione: il metodo TIP - Thermal Integrity Profiler

Fabio Mattiauda^{a*}, Michele Massaccesi^b, Gianni Lanzetta^c

^a Client Account Manager - DRC srl

^b Product Manager - DRC srl

^c Sales Manger - DRC srl

* Corresponding author: fabiomattiauda@drcitalia.net

Abstract:

Il Thermal Integrity Profiling (TIP) è un metodo non distruttivo utilizzato per valutare l'integrità dei pali di fondazione gettati in opera e realizzati con qualsiasi tecnica costruttiva (pali trivellati, CFA, FDO, micropali ecc.). Questo metodo di prova viene utilizzato sempre più frequentemente e sta diventando uno standard nel settore delle costruzioni civili private, pubbliche e delle grandi opere. La metodologia di prova TIP sfrutta il calore generato durante il processo di idratazione del calcestruzzo/malta per valutare l'integrità del palo di fondazione lungo tutta la sua lunghezza. Grazie alla misurazione delle temperature nel tempo, viene generato un modello dell'effettivo raggio del palo al variare della profondità. Il modello è influenzato dai dettagli costruttivi del palo analizzato e dalla corretta interpretazione dello scambio termico palo-terreno.

Le componenti chiave dell'analisi TIP includono valutazioni sia qualitative che quantitative. Dal punto di vista qualitativo, variazioni o forti riduzioni dei profili di temperatura possono indicare potenziali regioni anomale. Dal punto di vista quantitativo, è possibile stabilire una correlazione tra le temperature misurate e i raggi effettivi stimati del palo per la successiva valutazione dell'integrità. E' inoltre possibile valutare gli eventuali disallineamenti della gabbia di armatura dall'asse teorico del palo.

Nel presente articolo vengono presentate le peculiarità della metodologia TIP, vengono forniti cenni sulla teoria alla base delle tecniche di elaborazione e delle interpretazioni dei risultati ottenuti, compresa la scelta del momento ottimale per l'analisi, la normalizzazione del profilo termico e la corretta interpretazione di potenziali regioni anomale. Sono forniti inoltre esempi derivanti da casi reali e cenni ad applicazioni del metodo in casi particolari (micropali e soil nailing).

Keywords:

Thermal Integrity Profiling; TIP; Fondazioni profonde; Pali di fondazione trivellati; Micropali; Soil Nailing; NDT

1. Introduzione

I pali di fondazione trivellati vengono largamente utilizzati grazie alla loro alta portanza assiale e laterale. Quando i pali sono trivellati a secco è possibile ispezionare il foro prima del getto; questo costituisce un controllo basilare della geometria del palo ma tuttavia non ne garantisce la conformità in assenza di ulteriori indagini da effettuarsi dopo il getto di calcestruzzo.

Quando le trivellazioni sono eseguite in terreni instabili, vengono usati solitamente fanghi di trivellazione per sostenere le pareti laterali. Questo rende difficoltosa l'ispezione del foro prima o durante il getto.

Esistono diversi metodi di prova (non distruttivi) per verificare l'integrità dei pali gettati in opera. Ciascuno di questi metodi presenta vantaggi e limitazioni. Alcuni metodi consentono di ottenere informazioni (geometriche) principalmente sulla parte corticale (prova PIT - Pile Integrity Test), altri consentono di analizzare la porzione di calcestruzzo compresa all'interno dei tubi di accesso pre-installati (prova Cross-hole), senza poter indagare la parte corticale - copriferro.

Il metodo TIP è l'unica metodologia in grado di testare l'intero volume di calcestruzzo di cui è costituito il palo; grazie alla misurazione della temperatura generata durante il processo di idratazione del calcestruzzo, sia all'interno che all'esterno della gabbia di armatura. A questo scopo, le sonde di temperatura (cavi preconfezionati con sonde poste ad una distanza di 30 cm una dall'altra) devono essere pre-installate (solidarizzate) alla gabbia di armatura prima del getto. I cavi sono quindi da considerarsi "a perdere". [1]

Il Thermal Integrity Profiling (TIP) ha la capacità di valutare l'intera sezione trasversale dell'elemento in prova per tutta la sua lunghezza; compresa quindi la parte corticale di copriferro e l'eventuale disallineamento della gabbia di armatura. L'analisi dei dati restituisce il raggio effettivo del palo ed eventuali anomalie geometriche per tutta la sua lunghezza, consentendo ai progettisti di valutare al meglio l'accettabilità dei pali testati.

Rapporti diametro/lunghezza del palo che possono talvolta limitare l'efficacia di alcuni metodi non distruttivi di controllo (come ad esempio il PIT), non costituiscono un limite per la metodologia TIP. Inoltre, il metodo TIP non presenta limitazioni nel caso di grandi non-uniformità della sezione trasversale che possono verificarsi per errori di progettazione, realizzazione in cantiere o cause accidentali.

La metodologia è applicabile senza limitazioni a qualsiasi tipo di palo fondazione "gettato in opera" indipendentemente dalla tecnica costruttiva utilizzata (pali trivellati, pali CFA, pali FDP, micropali).

2. Cenni storici

I primi tentativi di utilizzare una misura di temperatura per la correlazione con possibili difetti presenti su pali gettati in opera risale alla metà degli anni 80. L'Università della Florida misurò, per la prima volta in quegli anni, la temperatura del terreno circostante a pali trivellati rilevando un innalzamento della temperatura a seguito del getto di calcestruzzo.

Nei primi anni '90, nella stessa Università, si propose di posizionare le termocoppie all'interno del getto di calcestruzzo; l'idea venne scartata per gli alti costi realizzativi dell'epoca. Verso la fine degli anni '90, il dipartimento delle autostrade americane (US Highway Department) accettò la metodologia Cross Hole (CSL - Crosshole Sonic Logging) e ne incentivò l'utilizzo. I tubi di accesso utilizzati per le prova CSL potevano quindi essere utilizzati anche per le sonde di temperatura. La prima prova di questo tipo venne di fatto eseguita nel 2000. Il primo decennio degli anni 2000 fu dedicato allo studio di sonde di temperatura inglobabili nel getto di calcestruzzo e alla definizione di un algoritmo in grado di descrivere correttamente lo scambio termico tra palo e terreno circostante.

Nel 2009 la Pile Dynamics Inc sviluppò e commercializzò il primo cavo con sonde di temperatura inglobabili in un getto di calcestruzzo e nel 2012 fu lanciata ufficialmente la strumentazione TIP – Thermal Integrity Profiler ed il relativo software di analisi TIP-R.

2.1 *Normativa attuale*

Attualmente la metodologia TIP - Thermal Integrity Profiler è normata dalla ASTM D7949-14 (2014) “Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete Deep Foundations” [2].

Tale norma indica due metodologie distinte di prova. Il METODO A prevede l'utilizzo di una sonda di temperatura ad infrarossi da far avanzare in un tubo di accesso pre-allestito, il METODO B prevede l'utilizzo di sonde di temperatura da inglobare nel getto di calcestruzzo (solidarizzate alla gabbia di armatura e quindi “a perdere”). La strumentazione TIP presentata in questo articolo utilizza il METODO B. Di fatto, la pratica quotidiana ha pressoché abbandonato il METODO A, a causa principalmente della minor accuratezza dei risultati ottenibili.

3. **Strumentazione del palo ed esecuzione della prova TIP**

3.1 *Descrizione dell'attrezzatura TIP*

La strumentazione TIP è costituita da:

- Unità centrale (figura 1).

Mediante l'unità centrale è possibile impostare tutti i parametri di prova e visualizzare l'andamento dei profili termici acquisiti. Quest'ultima operazione viene eseguita a prova terminata, scaricando sull'unità centrale i dati provenienti dalle varie unità di acquisizione TAP/TAG. Se tuttavia i dati sono già stati inviati al cloud in tempo reale durante le acquisizioni, questa operazione è superflua (si vedano i paragrafi successivi per i dettagli necessari).

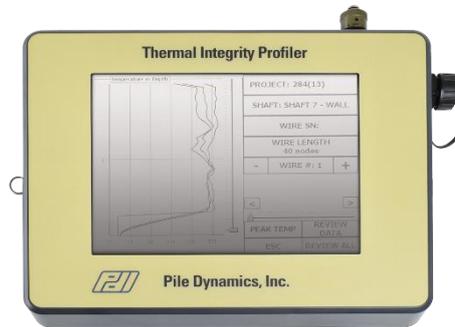


Figura 1 - unità centrale

- Cavi con sonde di temperatura integrate (di seguito indicati come “cavi”); tipicamente le sonde di temperatura sono posizionate a 30 cm una dall’altra. Vengono forniti in cantiere della lunghezza richiesta (a seconda della lunghezza del palo da strumentare), tuttavia i cavi possono essere facilmente allungati utilizzando appositi connettori. Questo consente di facilitare le operazioni di cantiere anche nei casi in cui la gabbia di armatura non venga fornita in un unico troncone. Ogni cavo (figura 2) fornito è dotato di un numero seriale univoco (tracciabile con tecnologia NIST). Il seriale viene riconosciuto automaticamente dalle unità di acquisizione e salvato insieme alle misure effettuate garantendo una tracciabilità completa della strumentazione installata.



Figura 2 - cavo con sonde di temperatura

- Unità di acquisizione TAP (Thermal Access Port – figura 3); una per ogni cavo installato.
- Unità di comunicazione con il cloud TAG (Thermal Aggregator Unit – figura 4) - opzionale; una per ogni palo strumentato, da utilizzarsi nel caso si voglia avere a disposizione i dati in tempo reale su piattaforma cloud.



Figura 3 - unità TAP



Figura 4 - unità TAG

- Software per analisi dati – TIP-R (TIP Reporter Software)

Il software consente di; visualizzare i profili termici acquisiti per ciascun cavo (grafico T vs Lunghezza del palo), stimare il raggio del palo in ogni sezione, stimare il copriferro e restituire una visualizzazione 3D del palo in funzione della stratigrafia del terreno (figura 5).

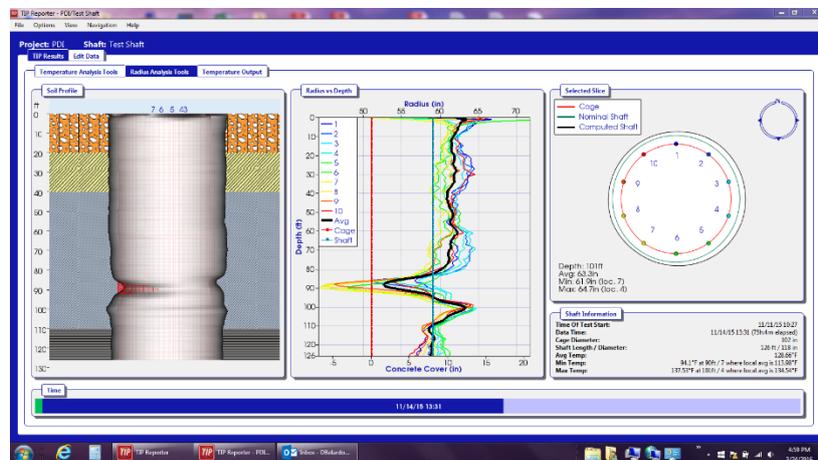


Figura 5 - schermata software TIP-R

3.2 Disposizione dei cavi sulla gabbia di armatura

La prima operazione da eseguire consiste nel solidarizzare i cavi alla gabbia di armatura. Questa operazione viene eseguita in cantiere a piè d'opera prima della movimentazione della gabbia stessa all'interno del foro trivellato. I cavi andranno disposti longitudinalmente per tutta la lunghezza della gabbia di armatura utilizzando come supporto le barre longitudinali.

Il fissaggio dei cavi può essere fatto in maniera molto agevole e speditiva utilizzando delle semplici fascette di plastica da posizionare a cavallo delle sonde di temperatura (poste solitamente a 30 cm una dall'altra) - figure 6 e 7.

Solitamente i cavi vengono acquistati (e forniti) della lunghezza opportuna per il palo da strumentare. Se necessario, è tuttavia possibile prolungarli in cantiere collegandoli tra loro mediante opportuni connettori forniti con l'attrezzatura. Con lo stesso tipo di giunzioni è possibile gestire i casi di cantiere in cui le gabbie di armatura vengono fornite in più spezzoni da assemblare a piè d'opera (figure 8 e 9).



Figura 6 - fissaggio dei cavi lungo la gabbia di armatura

Proper Installation Method:

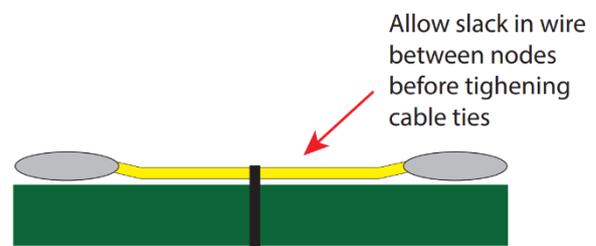


Figura 7 - schema corretto fissaggio del cavo all'armatura

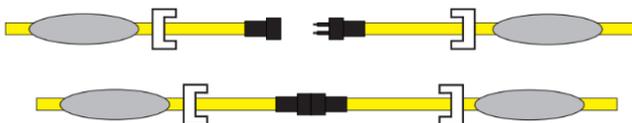


Figura 8 - connettori per cavi

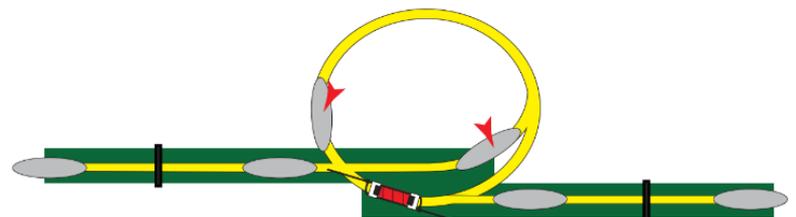


Figura 9 - schema di collegamento in corrispondenza della giunzione della gabbia di armatura

3.3 Numero di cavi da installare

Il numero minimo consigliato di cavi da installare è 4. L'indicazione nasce dal fatto che, installando 4 cavi diametralmente opposti sulla circonferenza della gabbia di armatura, è possibile ottenere informazioni sull'eventuale eccentricità della gabbia stessa.

Il numero di cavi da installare può aumentare al crescere del diametro del palo in prova. Le indicazioni di letteratura prescrivono di utilizzare un cavo ogni 30 cm di diametro del palo in prova [3]. Ad esempio, un palo con un diametro di 1.2 m andrà strumentato con 4 cavi (secondo le indicazioni di letteratura). Viene inoltre consigliato di utilizzare un numero pari di cavi, in modo da poterli disporre equi-distanziati e diametralmente opposti lungo la circonferenza. Quest'ultima indicazione è ancora una volta legata alla possibilità di ottenere informazioni sull'eventuale eccentricità della gabbia (anche nei casi con più di 4 cavi).

3.4 Verifica della corretta installazione dei cavi

Prima della movimentazione della gabbia di armatura all'interno del foro trivellato è possibile verificare il funzionamento di ciascun cavo installato utilizzando lo strumento Thermal Wire Tester Box fornito a corredo della strumentazione TIP (figura 10). Questo rapido controllo preliminare fornisce la certezza che le acquisizioni avverranno in modo corretto dopo il getto di calcestruzzo.



Figura 10 - modulo Thermal Wire Tester Box

3.5 Collegamento con le unità di registrazione

Una volta terminata la fase di strumentazione della gabbia di armatura, questa può essere movimentata all'interno del foro ed è possibile passare alla fase di getto del calcestruzzo con le normali procedure a seconda del tipo di palo. La presenza dei cavi non costituisce un problema da questo punto di vista.

Terminato il getto, sarà sufficiente collegare una unità di acquisizione (TAP) per ciascun cavo installato. Nel caso in cui si voglia utilizzare il cloud per salvare e visualizzare i dati in tempo reale, occorrerà prevedere una unità di aggregazione (TAG) per ciascun palo strumentato. Si noti che l'eventuale TAG utilizzato, deve essere collegato ad uno dei cavi; consentendo di risparmiare una unità TAP. Il modulo TAG, infatti, è in grado non solo di raccogliere i dati derivanti da tutti i TAP ed inviarli sul cloud, ma anche di gestire le misure derivanti dal cavo a cui è collegato come una normale unità TAP (si veda la figura 11). L'acquisizione dei dati (da parte dei moduli TAP e TAG) avviene automaticamente ed immediatamente dopo il collegamento dei moduli ai rispettivi cavi (solitamente il sistema viene impostato per eseguire una acquisizione ogni 15 minuti).



Figura 11 - collegamento dei cavi alle unità TAP e TAG

4. Elaborazione ed interpretazione dei risultati

4.1 Teoria di base - profili termici teorici

Come già detto, il metodo TIP sfrutta il fenomeno esotermico prodotto dal processo di idratazione del cemento che si genera nelle prime ore dal getto. Il calore di idratazione così generato, si traduce in un aumento della temperatura all'interno del getto; aumento che si esaurisce con l'esaurirsi della reazione di idratazione e il conseguente raggiungimento di un picco di temperatura. Le temperature sono acquisite ad intervalli regolari di tempo dalla strumentazione TIP per tutta la lunghezza del palo.

Si definisce profilo termico di un elemento di fondazione il grafico delle temperature registrate in funzione della profondità, ad un certo istante di tempo. Il profilo termico teorico (figura 12) costituirà il riferimento con il quale confrontare i profili termici raccolti durante una prova TIP reale.

La figura 12 mostra altresì come il calore di idratazione si dissipa nell'ambiente circostante; La distribuzione della temperatura all'interno di un palo ha la classica forma "a campana", con temperature più elevate al centro del palo e temperature più basse sulla periferia in corrispondenza con l'interfaccia palo-terreno. E' stato dimostrato che il

gradiente di temperature che si genera all'interno del palo durante il processo di idratazione è circa otto volte superiore al gradiente di temperatura che il terreno circostante può dissipare dopo il raggiungimento del picco massimo. [4]

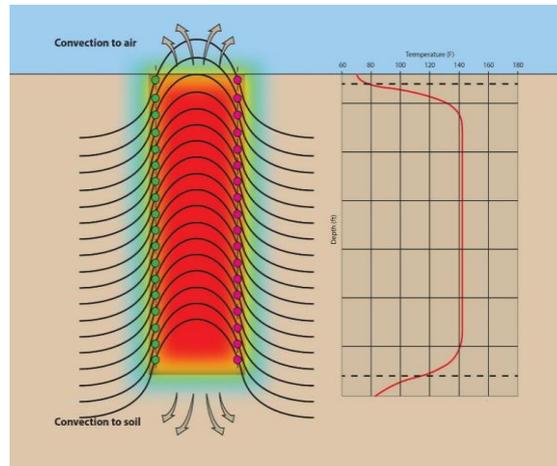


Figura 12 - profilo termico teorico - scambio termico con terreno circostante

E' possibile notare come il trasferimento di calore sia radiale per la maggior parte della lunghezza del palo; mentre diventa longitudinale in corrispondenza della testa (scambio con l'aria ambiente) e del piede (scambio con il terreno).

Assumendo che le condizioni al contorno siano uniformi lungo tutta la lunghezza del palo, il profilo termico teorico risultante è rappresentato dalla linea rossa riportata in figura 12. Un palo perfettamente cilindrico restituirà perciò un profilo di temperatura perfettamente verticale ad eccezione delle zone vicine alla testa e al piede, dove le condizioni di scambio termico variano a causa delle differenti condizioni al contorno. Solitamente questa porzione di profilo viene approssimata con un andamento iperbolico. [5]

Come detto, i dati TIP raccolti da una prova reale sono confrontati con il profilo teorico e le differenze rispetto al profilo teorico possono indicare non uniformità nella sezione trasversale o anomalie qualitative del palo.

Poiché le temperature sono campionate in corrispondenza della gabbia di armatura, eventuali spostamenti della gabbia stessa sono facilmente identificabili. In questo caso assisteremo ad un aumento della temperatura media dal lato in cui la gabbia si è spostata verso il centro e ad una diminuzione della temperatura dal lato diametralmente opposto (dove la gabbia si è spostata verso l'interfaccia palo-terreno); figura 13.

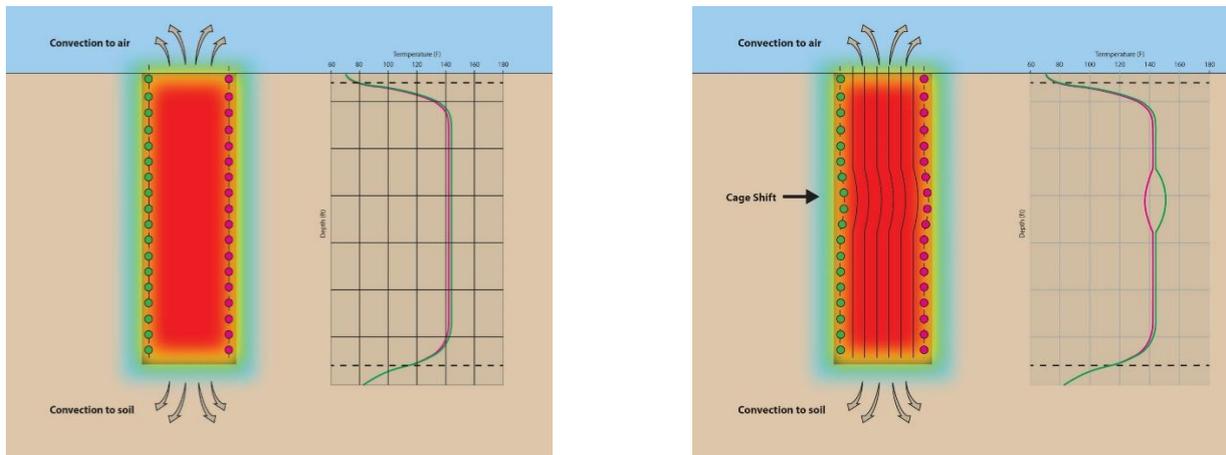


Figura 13 - profilo di temperatura teorico vs profilo con spostamento della gabbia di armatura

In modo analogo, una variazione di sezione ad una certa profondità (restringimento nell'esempio riportato) produrrà una diminuzione di temperatura dal lato del restringimento e nessuna variazione nel profilo termico dalla parte diametralmente opposta; figura 14.

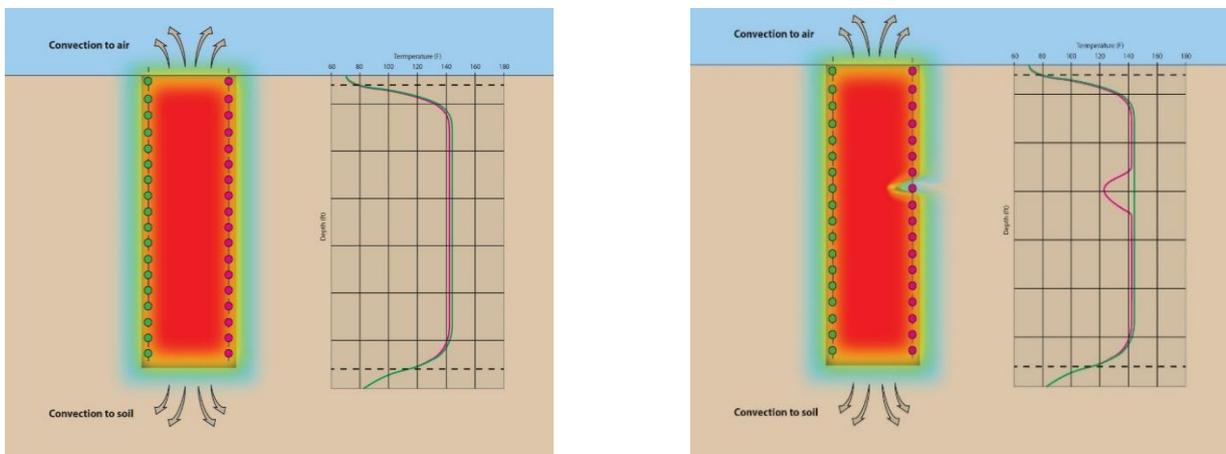


Figura 14 - profilo di temperatura teorico vs profilo con variazione di sezione

I profili termici ottenuti possono essere convertiti in andamenti del raggio effettivo (R_{efc}) utilizzando il fattore di correlazione tra raggio e temperatura (fattore T-R) ricavato dal raggio medio (R_{avg}) e dalla temperatura media (T_{avg}). Detto V il volume di calcestruzzo utilizzato per il getto e L la lunghezza del palo; il raggio medio viene calcolato dalla formula:

$$R_{avg} = \sqrt{\frac{V}{\pi \cdot L}} \quad 0.1$$

La temperatura media (T_{avg}) viene calcolata come media su tutta la lunghezza delle temperature misurate all'istante di tempo scelto per l'analisi.

Le temperature puntuali misurate ai nodi (punti in cui è posizionata ogni singola termocoppia lungo il cavo) sono quindi moltiplicate per il fattore T-R producendo così il profilo del raggio effettivo del palo lungo l'intera lunghezza (R_{efc}). Il raggio effettivo (in ogni nodo) è definito quindi come il raggio di calcestruzzo intatto che produce la temperatura misurata (nel medesimo nodo) [5].

Impostando nel software il diametro della gabbia di armatura utilizzata, è possibile ottenere perciò informazioni su copriferro (oltre che su eventuali disassamenti della gabbia stessa). Il software restituirà una rappresentazione grafica dei raggi effettivi calcolati come rappresentato in figura 15.

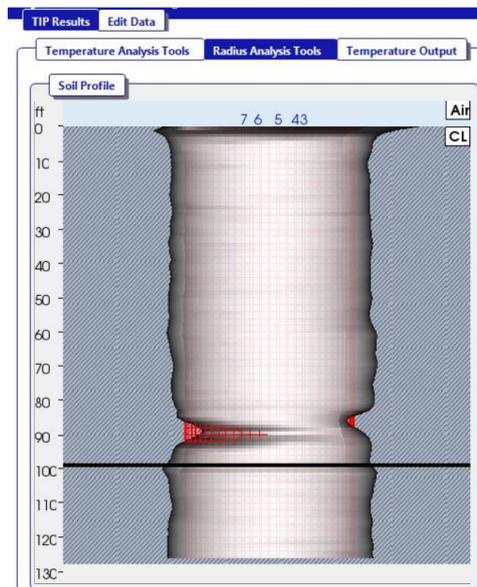


Figura 15 - rappresentazione grafica del raggio effettivo calcolato

4.2 Profili termici reali - casi notevoli

Una valutazione qualitativa più accurata è spesso necessaria per derimere zone anomale più complesse. Inconvenienti nelle fasi di posizionamento della gabbia e/o nelle fasi di getto del calcestruzzo (ad esempio disassamento della gabbia, deformazioni/rotture della gabbia, segregazione del calcestruzzo, inclusioni di terreno/cedimento delle pareti del foro, ecc.) possono causare zone anomale che influiscono sulla sezione trasversale del palo, sulla qualità del calcestruzzo e sulla dimensione del copriferro.

L'installazione di più cavi e l'analisi dell'andamento delle temperature nel tempo possono aiutare a identificare le zone anomale in modo più efficace. In figura 16 sono riportati quattro casi reali in cui l'installazione di 4 cavi ha consentito di identificare le zone anomale e le cause che le hanno prodotte. Di seguito si riportano alcuni brevi commenti.

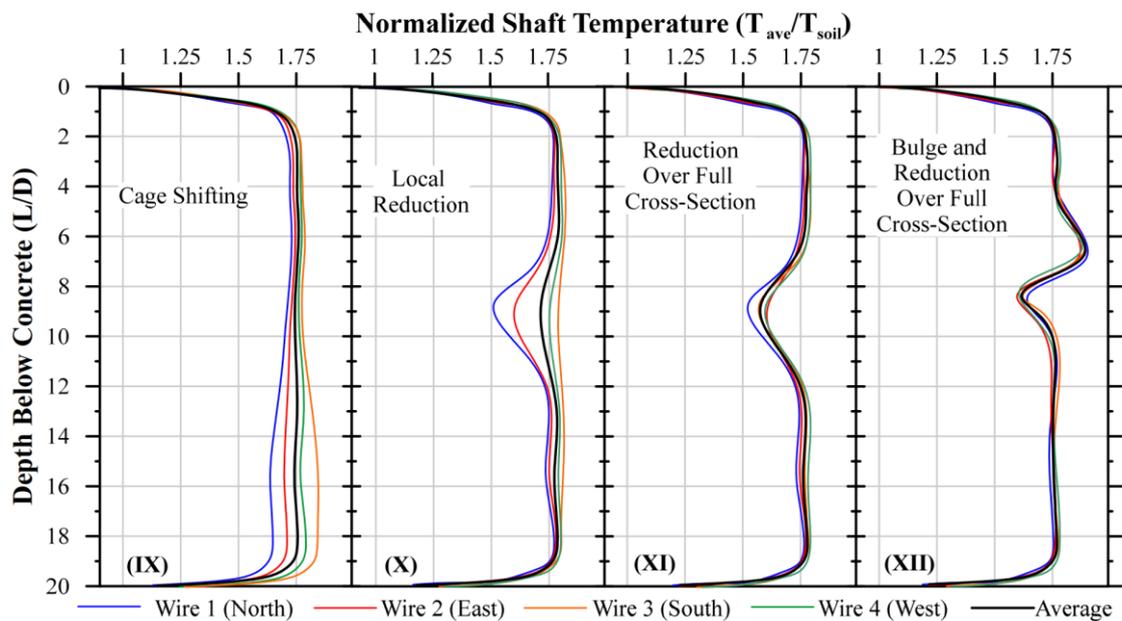


Figura 16 - esempi di profili termici reali relativi a pali con 4 cavi installati

4.2.1 Caso IX

L'esempio riporta il caso di una gabbia di armatura che risulta correttamente posizionata nella parte iniziale ma sempre più disallineata dal centro, quando ci si sposta verso il piede del palo. Distanziatori inadeguati o in numero insufficiente, diametro di trivellazione eccessivo o irregolare sono generalmente le cause di questo tipo di problema. L'identificazione precoce attraverso la metodologia TIP permette di implementare le opportune azioni correttive per la restante parte del cantiere.

Bruschi disallineamenti possono anche essere causati da variazioni del terreno di scavo. Come, ad esempio, il passaggio da terreno a roccia o il passaggio da zona confinata a zona libera. Implementare le indagini con l'utilizzo di altri metodi, come ad esempio la valutazione della geometria del foro con strumentazione SHAPE® della Pile Dynamics, può aiutare ad approfondire le cause di questa tipologia di difetto.

4.2.2 Caso X

Non-uniformità localizzate possono essere identificate grazie alle variazioni di temperatura misurate da ciascun cavo. Inclusioni di terreno lungo la gabbia di armatura possono creare zone difettose localizzate, come indicano le riduzioni di temperatura evidenziate dai cavi 1 e 2 ad una profondità $L=9*D$.

In questi casi è importante scegliere il tempo al quale eseguire la valutazione. Può succedere che, nell'area potenzialmente difettosa, la differenza di temperatura sia molto grande nelle prime ore dal getto per poi tendere a normalizzarsi al raggiungimento del picco di temperatura. La valutazione nel tempo dei profili di temperatura è quindi fondamentale e la valutazione eseguita prima del raggiungimento del picco massimo, può portare ad una sovrastima delle zone difettose. [3]

4.2.3 Caso XI

L'esempio riporta l'andamento delle temperature registrate al raggiungimento del picco massimo. Tutti i cavi mostrano, a questo istante di tempo, una variazione di temperatura; indice di una zona anomala che interessa l'intera sezione. Questo caso può presentarsi per esempio a causa di una rottura del tubo getto o errori di posa del calcestruzzo. Come nel caso precedente, maggiori informazioni di cantiere (ritardi nei getti, registrazioni di possibili anomalie ecc.) possono aiutare nella corretta attribuzione delle cause.

4.2.4 Caso XI

Incrementi di temperatura possono indicare sbulbature localizzate o maggiori quantità di calcestruzzo in corrispondenza della sezione anomala. Le informazioni sulla stratigrafia del terreno, l'analisi dei detriti di scavo e le informazioni sui volumi di calcestruzzo utilizzati nel getto, possono aiutare nel distinguere i casi di non-uniformità geometrica da quelli di bassa qualità del calcestruzzo.

Il caso riportato di un aumento di temperatura seguito immediatamente da una diminuzione, è molto spesso indice di una rimozione errata (oltre al livello di calcestruzzo) del tubo forma in un terreno debole. In un caso come questo, dove il volume di calcestruzzo che ha riempito la sbulbatura è confrontabile con il volume che non ha potuto occupare le zone interessate dal cedimento di materiale, i dati relativi al calcestruzzo impiegato non avrebbero dato informazioni (consumo corretto). Allo stesso modo, se la riduzione di sezione rimane all'esterno della gabbia di armatura nessuna altra metodologia avrebbe potuto identificare questa zona anomala.

4.3 Tempi di esecuzione della prova

Il Thermal Integrity Profiling (TIP) si basa sulla misurazione della temperatura durante le prime ore (giorni) dopo la posa del calcestruzzo ed è eseguito in conformità con ASTM D7949-14. A causa del processo di idratazione del calcestruzzo, si genera un calore significativo rispetto alle condizioni ambientali circostanti e si crea quello che viene chiamato un profilo termico per la fondazione.

La produzione di calore aumenta fino a raggiungere una temperatura massima o "picco", per poi normalizzarsi al raggiungimento di un equilibrio termico con l'ambiente circostante [6]. Il tempo necessario a raggiungere il picco di temperatura per i pali trivellati è generalmente inferiore alle 48 ore dopo il getto; tuttavia, questo periodo di tempo può essere influenzato da una serie di fattori, tra cui le dimensioni del palo, la tipologia di miscela di calcestruzzo, gli eventuali additivi utilizzati e le condizioni ambientali. Sono stati documentati, ad esempio, casi di micropali (con diametri di 30 cm) in cui il picco di temperatura è stato raggiunto dopo 6 ore dal getto e casi di pali di grande diametro (> 3 m) in cui il picco è stato raggiunto dopo 72 ore dal getto. [3]

Per individuare potenziali anomalie, i dati sulla temperatura devono essere raccolti durante la fase iniziale di idratazione ossia quando l'aumento di temperatura rispetto all'ambiente circostante si evidenzia sino al suo picco. Dati raccolti dopo questo periodo di tempo, (es. durante la fase di normalizzazione) potrebbero non essere affidabili o essere difficilmente interpretabili a causa di un profilo termico "piatto". Si ricorda che l'ipotesi di base è avere

una miscela di calcestruzzo omogenea lungo il palo, il che comporta un profilo (teorico) di temperatura omogeneo lungo il palo stesso. [7]

In sintesi: la valutazione dei dati TIP viene spesso effettuata al raggiungimento del picco di temperatura; tuttavia, una prima indicazione critica sull'integrità del palo in prova può essere fatta prima del raggiungimento del picco, anche a poche ore dal getto. [3]

4.4 Salvataggio dei dati su cloud ATLAS

Una volta collegati i cavi alle relative unità di acquisizione TAP, la registrazione parte in automatico (tipicamente con una lettura ogni 15 minuti). I dati memorizzati all'interno dei moduli TAP possono essere visualizzati (e scaricati) in qualsiasi momento collegando l'unità centrale TIP.

Tuttavia, è possibile, utilizzando un modulo di aggregazione TAG per ogni palo, inviare i dati registrati direttamente sul cloud proprietario PILE Dynamics denominato ATLAS. I dati, in questo caso, vengono aggregati ed inviati al cloud una volta ogni ora. Questo rende molto facile e agevole monitorare a distanza ed in tempo reale i risultati derivanti anche da cantieri diversi e a qualsiasi distanza dal proprio ufficio (figura 17).

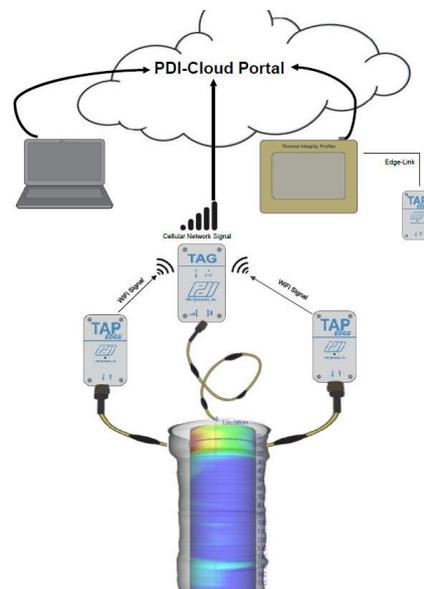


Figura 17 - schema di comunicazione Cloud vs unità centrale TIP

4.5 Casi reali

Di seguito si riportano, a titolo di puro esempio, alcuni profili di temperatura ed alcune immagini provenienti da casi realmente riscontrati in cantiere. Non vengono approfondite le cause che possono aver causato i difetti riportati. A tale scopo si rimanda a quanto accennato al paragrafo 4.2 e alla letteratura disponibile.

4.5.1 Esempio 1

L'esempio riporta il caso di una riduzione di sezione localizzata con conseguente perdita del copriferro e segregazione del calcestruzzo. La figura 18 riporta i profili termici, la restituzione 3D del profilo del palo e la controprova ottenuta con i carotaggi eseguiti.

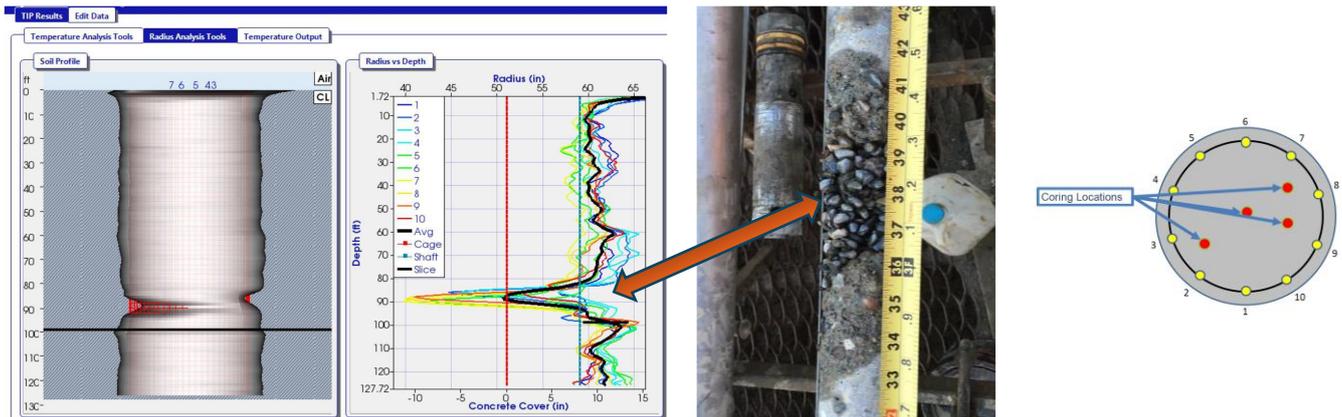


Figura 18 - riduzione di sezione

4.5.2 Esempio 2

L'esempio riporta il caso di una "mancanza" e cattiva qualità del calcestruzzo in corrispondenza del piede del palo. La figura 19 riporta i profili termici, la restituzione 3D del profilo del palo e la controprova ottenuta con i carotaggi eseguiti.

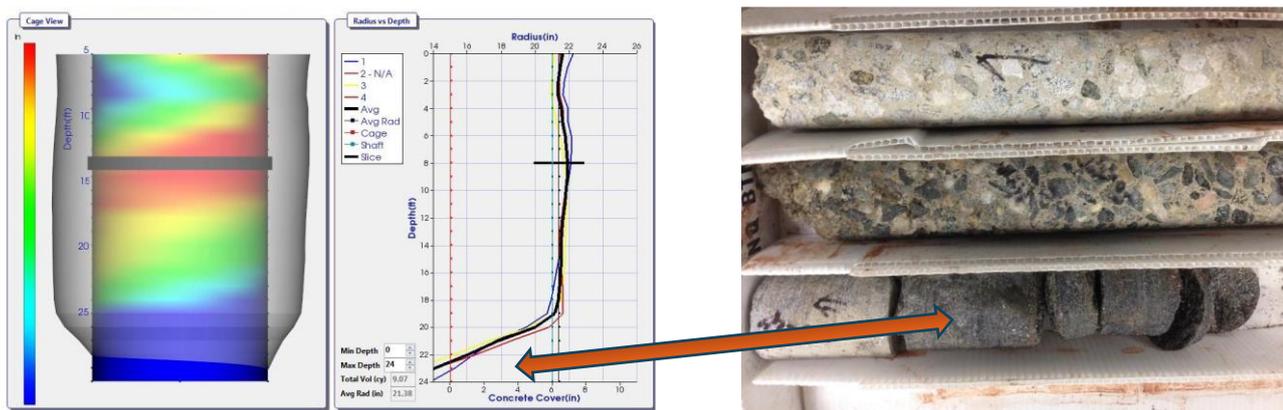


Figura 19 - mancanza di calcestruzzo al piede del palo

4.5.3 Esempio 3

L'esempio riporta il caso di una "mancanza" e cattiva qualità del calcestruzzo in corrispondenza della testa del palo. La figura 20 riporta i profili termici, la restituzione 3D del profilo del palo e la controprova ottenuta con gli scavi eseguiti.

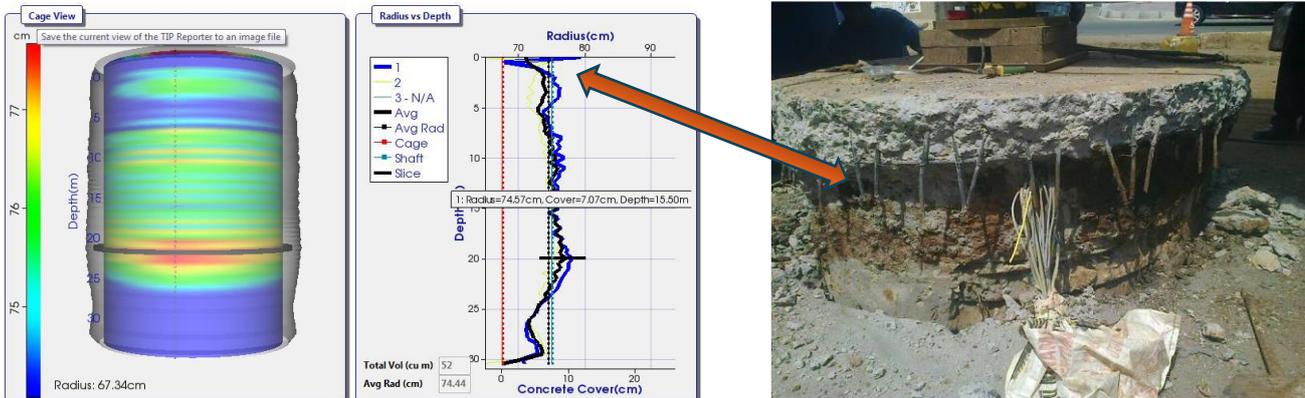


Figura 20 - mancanza di calcestruzzo alla testa del palo

5. Applicazioni particolari - Micropali e Soil Nailing

In ultimo, ma tutt'altro che secondario, questa metodologia può essere efficacemente utilizzata anche nel caso di micropali dove, come noto dalla letteratura, non è quasi mai possibile eseguire prove di integrità PIT poiché gli elementi da indagare non rispettano il limite fisico geometrico per l'applicabilità di tale metodo: ossia rapporto lunghezza /diametro palo inferiore a 30. [8]

Nel caso di micropali, un unico cavo viene solidarizzato ad una barra di armatura che verrà inserita al centro del micropalo immediatamente dopo il getto di calcestruzzo. Per garantire un corretto posizionamento assiale, è sufficiente utilizzare appositi distanziali disposti lungo la barra. Nei casi in cui sia prevista una barra centrale cava filettata (es. barra Diwidag), la barra strumentata con il cavo può anche esser inserita all'interno del foro (figura 19).

Una unità TAP (o TAG) viene poi collegata al cavo e l'acquisizione ha inizio come descritto nei paragrafi precedenti.



Figura 21 - installazione cavo con sonde di temperatura su micropalo

Anche in questi casi è consigliabile valutare i risultati solo dopo il raggiungimento del picco di temperatura. Nota la quantità di calcestruzzo utilizzata per il getto, le informazioni termiche possono portare a valutazioni geometriche

del profilo del palo, velocizzando il processo di identificazione di possibili difetti (tipicamente 24 - 48 ore dal getto) - (figura 20). Se poi questi difetti dovessero essere riconducibili a errate procedure costruttive (errori di messa in opera), il controllo precoce si ripercuoterebbe positivamente anche nella maggiore velocità delle azioni correttive e di conseguenza nella maggior velocità di avanzamento dell'opera.

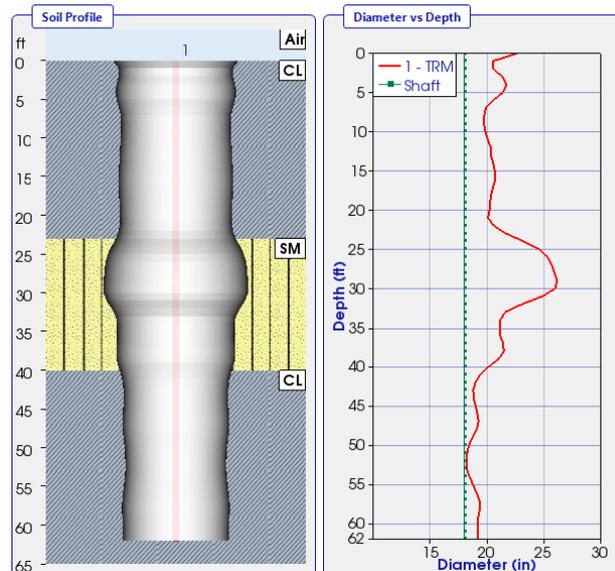


Figura 22 - esempio di profilo TIP di un micropalo

Allo stesso modo è possibile strumentare le barre di tesatura dei tiranti utilizzati per esempio nei consolidamenti (Soil Nailing) ed ottenere informazioni circa il corretto riempimento del foro da parte della boiaccia; informazione molto difficile da ottenere con altre metodologie di prova. Anche in questi casi la prova viene eseguita installando un solo cavo avendo l'accortezza di utilizzare appositi distanziatori per garantire l'assialità della barra rispetto al foro. La barra viene inserita prima dell'iniezione, cioè senza modificare le usuali operazioni di cantiere.

Piscalko et al. hanno a questo proposito pubblicato un interessante caso studio in cui due difetti artificiali sono stati riprodotti su una barra di tesatura strumentata e monitorata con la strumentazione TIP dopo il getto. I difetti sono stati riprodotti utilizzando due sacchi di sabbia opportunamente sagomati e solidarizzati alla barra prima del suo inserimento all'interno del foro.

Le figure 21 e 22 riportano rispettivamente la barra ed il grafico ottenuto a 24 ore dal getto in cui si vedono chiaramente le mancanze di boiaccia iniettata, causate dai difetti riprodotti artificialmente. [9]

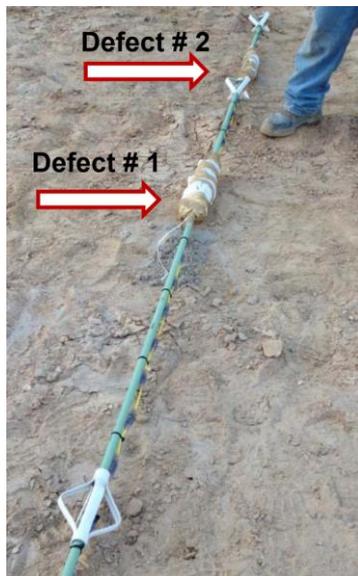


Figura 23 - riproduzione difetti su barra di tesatura

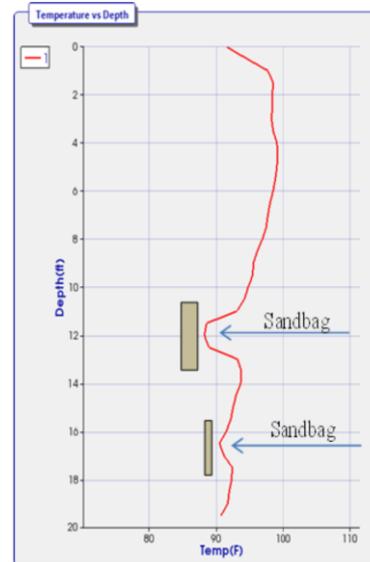


Figura 24 - profili termici TIP ottenuti

6. Conclusioni

Il Thermal Integrity Profiling (TIP) è un metodo non distruttivo utilizzato per valutare l'integrità dei pali di fondazione gettati in opera indipendentemente dalla tecnica costruttiva utilizzata (pali trivellati, pali CFA, pali FDP, micropali).

Grazie all'affidabilità dei risultati ottenibili, alla semplicità di esecuzione e alla possibilità di avere tutte le informazioni a poche ore (giorni) dal getto, questo metodo di prova viene utilizzato sempre più frequentemente e sta diventando uno standard nel settore delle costruzioni civili private, pubbliche e delle grandi opere. La metodologia di prova è descritta dalla Norma ASTM D7949-14 (2014).

Sono stati proposti alcuni cenni sulla teoria di base e alcuni casi reali con le relative interpretazioni dei profili termici sia dal punto di vista qualitativo che quantitativo. Alla luce di quanto esposto è possibile proporre le seguenti considerazioni:

- I. Un elemento chiave della metodologia TIP è la misura delle variazioni di temperatura relativa per l'intera lunghezza del palo di fondazione. Questa informazione, insieme ai dati costruttivi e alle condizioni al contorno "palo-terreno-ambiente", consentono di identificare la qualità del calcestruzzo e le potenziali zone di disuniformità geometriche. La valutazione qualitativa il profilo termico può iniziare a poche ore dal getto di calcestruzzo, accelerando il processo di Controllo Qualità e il monitoraggio in tempo reale dell'Opera in corso.
- II. Tra i metodi proposti dalla ASTM D7949-14 (2014), quello con sonde inglobate nel getto di calcestruzzo (METODO B), è da preferirsi per la capacità di monitorare la temperatura puntuale ed esaminare la sua variazione nel tempo. L'utilizzo di più cavi su uno stesso palo (disposti in numero pari e diametralmente opposti) può dare informazioni circa l'allineamento della gabbia di armatura e possibili difetti nella sezione.

- III. Lo scambio termico in corrispondenza della testa e del piede del palo possono essere approssimati da una funzione iperbolica. Aggiustamenti dei profili di temperatura in queste zone possono essere necessari per una corretta valutazione qualitativa del calcestruzzo in tali aree. Eventuali deviazioni dei profili reali da quelli teorici possono indicare zone anomale quali terreni soffici al piede del palo o bassa qualità del calcestruzzo in corrispondenza della testa.
- IV. I profili termici ottenuti possono essere convertiti in andamenti del raggio effettivo (R_{efc}) utilizzando il fattore di correlazione tra raggio e temperatura (fattore T-R) ricavato dal raggio medio (R_{avg}) e dalla temperatura media (T_{avg}). Completando queste informazioni con i dati ingegneristici relativi alla costruzione del palo (volume di calcestruzzo utilizzato, tecnologia di trivellazione, dati geologici del terreno ecc.) è possibile ottenere una differenziazione tra le non conformità della geometria e la qualità del calcestruzzo.
- V. In ultimo, ma tutt'altro che secondario, questa metodologia può essere efficacemente utilizzata anche nel caso di micropali dove, come noto dalla letteratura, non è quasi mai possibile eseguire prove di integrità PIT poiché gli elementi da indagare non rispettano il limite fisico geometrico per l'applicabilità di tale metodo: ossia rapporto lunghezza /diametro palo inferiore a 30. Il metodo può essere inoltre efficacemente applicato anche nei casi di consolidamento (Soil Nailing) per la valutazione della corretta iniezione di malta nei fori trivellati.

7. Ringraziamenti

Si ringrazia la Pile Dynamics Inc. per il supporto tecnico e la gentile concessione delle immagini e delle tabelle contenute nel presente articolo. In particolare si ringraziano George Pisciak P.E. (President - Pile Dynamics Inc.) e Anna Sellountou - PHD-P.E. (Director of global sales – Pile Dynamics Inc.) per la condivisione della bibliografia riportata.

8. Bibliografia

- [1] G. Piscalko, G. Likins and G. Mullins, “DRILLED SHAFT ACCEPTANCE CRITERIA BASED UPON THERMAL INTEGRITY PROFILING,” 2024.
- [2] *ASTM Standard D7949-14 (2014) - “Standard Test Methods for Thermal Integrity Profiling of Concrete,* 2014.
- [3] D. Belardo, S. Robertson and T. Coleman, “INTERPRETATION AND EVALUATION OF THERMAL INTEGRITY PROFILING MEASUREMENTS,” 2022.
- [4] G. Mullins, K. Johnson, D. Winters, H. Hilferding e K. Kupselaitis, «Selection of Thermal Integrity Data Regression Parameters,» *Geotechnical Testing Journal*, vol. 44, 2020.
- [5] G. Mullins e K. Johnson, «Optimizing the Use of the Thermal Integrity System for Evaluating Auger-Cast Piles,» Final Report submitted to the Florida Department of Transportation, 2016.
- [6] G. Mullins e S. Kranc, «Thermal integrity testing of drilled shafts - final report,» Florida Department of Transportation, 2007.
- [7] M. L. Becker and A. Ryberg, “COMPARING CONFLICTING CONCLUSIONS FROM DIFFERENT INTEGRITY TESTING METHODS ON THE SAME DRILLED SHAFTS,” 2022.
- [8] G. Likins and F. Rausche, Recent advances and proper use of PDI low strain pile integrity testing, Vols. *Application of Stress-Wave Theory to Piles*, Rotterdam: Niyama&Beim, 2000, pp. 211-218.
- [9] G. Piscalko, C. Alvarez, D. Belardo e M. Galvan, «Using Thermal Integrity Profiling to evaluate the structural integrity of soil nails,» in *Deep Foundations Institute*, 2014.

La transizione digitale nella gestione di ponti e viadotti

Ing. Emerenziana Locatelli^{a*}

^a Inbee srl

* Corresponding author: e.locatelli@inbee.it

Abstract

Le Linee Guida Ponti e Viadotti hanno introdotto un nuovo percorso di sorveglianza per le infrastrutture esistenti, oltre che un approccio digitale nella raccolta e gestione dei dati. Quest'ultimo deriva da una concreta necessità di porre i dati al centro del processo decisionale in fase di gestione dell'opera da parte degli Enti gestori: è importante non solo conoscere le proprie opere ma anche avere piena padronanza del dato. Per questo, gli strumenti digitali possono essere di fondamentale supporto, agevolando sia la fase di raccolta dei dati che quella di riletture e analisi. Tra i diversi sistemi applicativi per la gestione digitale delle opere, la piattaforma web INBEE si presenta come una soluzione completamente conforme alle Linee Guida, qualificata da ACN (Agenzia della Cybersicurezza Nazionale) e compatibile con il portale Ministeriale AINOP (Archivio Informatico delle Opere Pubbliche). Lo scopo del presente articolo è quello di delineare il contesto in cui operano gli Ispettori e gli Enti gestori, evidenziando le necessità e illustrando le soluzioni adottate nella realizzazione di INBEE.

Keywords:

Linee Guida Ponti e Viadotti; Ponti e Viadotti; BMS; Sistemi Informativi; Piattaforma Digitale; Digitalizzazione; Archivio informatico opere pubbliche; AINOP; ACN

1. Introduzione: La Transizione Digitale nelle Linee Guida Ponti e Viadotti

Per il contesto tecnico-normativo italiano, inerente alla manutenzione e alla gestione dei ponti, il 2020 è stato un anno importante: per la prima volta, infatti, sono state adottate le Linee Guida Ponti e Viadotti (DM n. 578 del 17/12/2020).

Redatte ed emanate da ANSFISA (Agenzia nazionale per la sicurezza delle ferrovie e delle infrastrutture stradali e autostradali), le Linee Guida hanno l'obiettivo di fornire le direttive per la gestione delle infrastrutture in Italia: agli Enti gestori viene chiesto di seguire un percorso preciso e definito per la classificazione e gestione del rischio, per la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio delle opere, mettendo le basi per una valutazione omogenea e sicura di tutti i ponti sul territorio nazionale.

Oltre a fornire indicazioni precise circa le modalità di valutazione e gestione delle opere, impongono il passaggio da una gestione analogica ad una digitale dei processi, attraverso l'adozione di software che consentono l'archiviazione e l'elaborazione dei dati. Esse richiedono una graduale transizione verso una gestione digitale del ciclo di vita delle infrastrutture.

In diversi passaggi delle Linee Guida, infatti, si fa riferimento a “*l’adozione progressiva di modelli informativi dell’infrastruttura, ovvero l’insieme di contenitori di informazione strutturata e non strutturata [...] che consentono una gestione efficace e trasparente del cespite attraverso l’utilizzo di ambienti di condivisione dati e piattaforme interoperabili dei dati*” anche al fine di creare “*progressivamente una banca dati digitale aperta di tutti i ponti e viadotti, da rendere disponibile ai competenti uffici del Ministero delle infrastrutture e dei Trasporti*” come illustrato nelle Linee Guida Ponti e Viadotti et al. [§1.6 - MODELLI INFORMATIVI].

2. I Sistemi Informativi: un supporto per la gestione e le ispezioni delle opere

L’introduzione dei sistemi informativi da parte del legislatore ha diversi obiettivi. Da un lato, si mira alla creazione di una banca dati digitale capace di raccogliere tutte le informazioni relative a ponti e viadotti, rappresentando un passo fondamentale verso la digitalizzazione del patrimonio infrastrutturale italiano. Dall’altro, si intende semplificare la gestione delle Linee Guida Ponti e Viadotti. La raccolta, l’archiviazione e l’elaborazione di grandi quantità di dati sulle infrastrutture richiedono infatti strumenti e metodologie adeguati a garantirne accuratezza e usabilità. I sistemi informativi possono risolvere molte di queste problematiche, offrendo soluzioni che semplificano la gestione e ottimizzano i processi.

Il processo di digitalizzazione dà sempre più spazio a software che consentono di realizzare un inventario delle opere, di archiviare accuratamente grandi quantità di informazioni e di elaborarle istantaneamente. La finalità è quella di ottenere indicatori che siano in grado di sostenere l’Ente gestore nella fase decisionale, ossia quella di stesura di strategie per il controllo delle opere.

Ma l’utilizzo di applicativi digitali può essere un grandissimo supporto anche nella fase di raccolta dati, attraverso software e applicazioni mobile che facilitano la compilazione delle schede ministeriali di ispezione delle opere, riducendo il rischio di errori e migliorando la tracciabilità delle informazioni. In questo modo, le difficoltà legate alla gestione manuale delle ispezioni vengono superate, favorendo una gestione più efficiente e trasparente delle opere infrastrutturali.

3. La Gestione delle Linee Guida Ponti e Viadotti con INBEE

Tra i diversi sistemi applicativi per la gestione digitale delle opere, INBEE è conforme al 100% alle Linee Guida ministeriali, nata con l’obiettivo di supportare Enti Gestori ed Ispettori nell’intero processo di valutazione di sicurezza delle opere.

INBEE, è una piattaforma web per la raccolta digitale delle informazioni relative alle opere, con tools e funzionalità che supportano l’Ente Gestore nella gestione di Ponti e Viadotti, ma è anche un’App Mobile dedicata alla fase ispettiva sul campo, per ottimizzare la raccolta delle informazioni direttamente in digitale.

Essendo qualificata ACN (Agenzia per la Cybersicurezza Nazionale), INBEE è conforme al Regolamento Unico per le infrastrutture e i servizi cloud della Pubblica Amministrazione, garantendo così i requisiti di sicurezza e

affidabilità richiesti e affermandosi come strumento idoneo e conforme alle esigenze degli Enti.

Infine, la piattaforma dialoga direttamente con AINOP (l'archivio informatico delle opere pubbliche), per contribuire alla costruzione della banca dati a livello nazionale voluta da ANSFISA.



Figura 1 - INBEE è utilizzabile sia su piattaforma che su App mobile

3.1 Le funzionalità del digitale che supportano Enti Gestori e Ispettori

La piattaforma INBEE include al suo interno molteplici funzionalità pensate per agevolare il lavoro dei due principali attori del processo delle Linee Guida Ponti e Viadotti. Tra le più importanti e rilevanti:

3.1.1 Visualizzazione immediata dello stato di salute delle opere

L'Ente gestore ha necessità di visualizzare in modo immediato e semplice lo stato delle opere, per questo in INBEE le opere vengono localizzate e visualizzate sulla mappa con indicazione visiva della Classe di Attenzione e dello stato in cui si trovano le ispezioni in corso.



Figura 2 - INBEE: visualizzazione complessiva dello stato di salute delle opere

3.1.2 Archivio filtrabile dei media delle ispezioni

Nella compilazione del censimento e dell'ispezione vengono raccolti diversi dati e documenti relativi alle opere. Per gli Ispettori e gli Enti gestori diventa fondamentale poter ritrovare facilmente nel tempo queste informazioni. Per questo INBEE ha al suo interno un archivio documentale e uno fotografico navigabili e ricercabili attraverso numerosi filtri: una memoria storica consultabile di tutte le attività svolte.

3.1.3 Compilazione delle schede di Livello 0 e 1 direttamente in digitale e con App Mobile

La fase ispettiva di raccolta delle informazioni del Livello 1 può essere molto articolata. Per questo INBEE non solo ha digitalizzato tutte le Schede di Livello 0 e 1, ma ha anche realizzato un'apposita App Mobile dedicata alle ispezioni sul campo, utilizzabile anche in modalità offline, così da evitare errori di trascrizione e ridurre i tempi di esecuzione dell'ispezione.

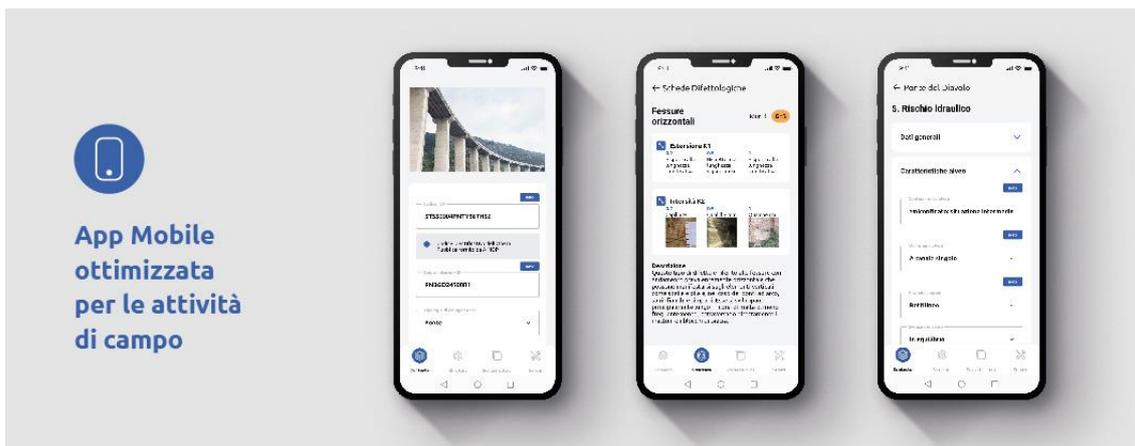


Figura 3 - INBEE dispone anche di un'App Mobile utilizzabile anche offline

3.1.4 Interfaccia intuitiva e pannelli informativi per la compilazione guidata

Per ciascun campo presente nelle Schede di Livello 0 e 1 delle Linee Guida, INBEE supporta l'Ispettore mediante Pannelli informativi testuali e fotografici, presenti sia sulla piattaforma che sull'App, che guidano nella comprensione del singolo campo.

3.1.5 Calcolo automatico della Classe di Attenzione

Il calcolo della Classe di Attenzione è solo il punto di inizio per il lavoro dell'Ente Gestore. Per questo INBEE, oltre a calcolare in automatico, secondo le indicazioni normative, le 4 CdA di rischio specifico e la CdA complessiva, restituisce graficamente le CdA, consentendo facilmente di individuare i parametri che hanno condizionato il valore finale.

3.1.6 Reportistica chiara e visiva

La gestione delle opere si basa sui dati raccolti, per questo l'Ente Gestore deve poter avere uno strumento di sintesi che raggruppa le informazioni più rilevanti per ogni opera. Su INBEE le informazioni raccolte sono sintetizzate e rappresentate visivamente in modo intuitivo attraverso grafici, dashboard e schede di sintesi.

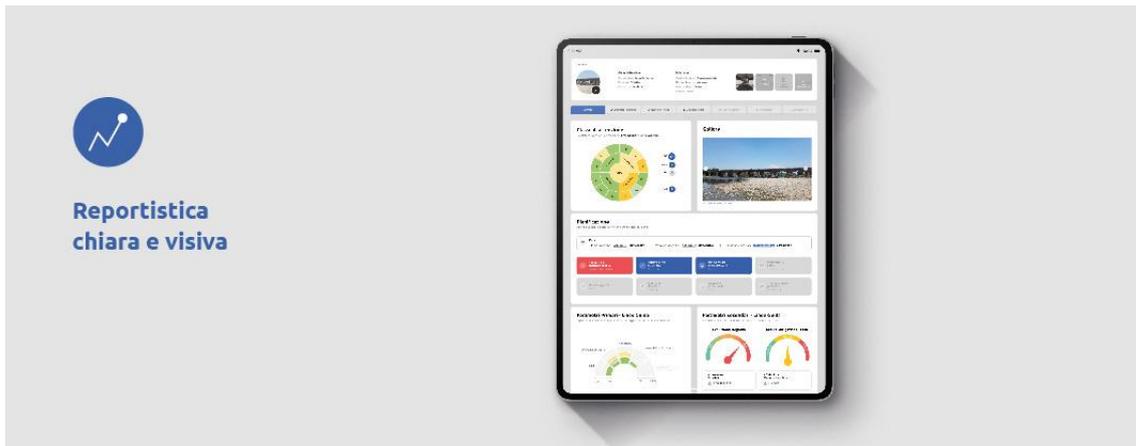


Figura 4 - INBEE rappresenta i dati di raccolti con grafici, dashboard e schede di sintesi

3.1.7 Esportazioni complete e personalizzabili

INBEE consente di esportare i dati di ciascuna opera in differenti formati: report di sintesi, relazioni complete per gli ispettori, file .csv per gli Enti Gestori e le schede ministeriali già compilate in tutte le loro parti.

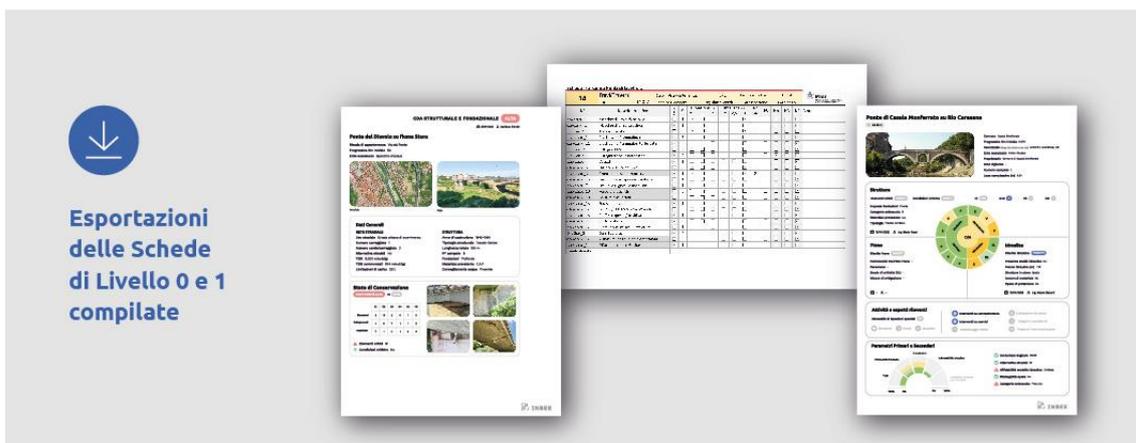


Figura 5 - INBEE permette di esportare i dati in differenti formati

3.1.8 Collaborazione multidisciplinare

Per la compilazione delle Schede di Livello 0 e 1 le Linee Guida indicano di affidarsi a personale di adeguate competenze e, poiché la valutazione viene svolta tenendo conto di 4 tipologie di rischio differenti (Strutturale, Sismica, Idraulica e Frane), è necessario agevolare la collaborazione tra diverse professionalità per l'ispezione dell'opera. Per facilitare questa stesura a più mani, INBEE consente ai differenti professionisti di lavorare sulla stessa ispezione, tenendo traccia di chi ha collaborato alla raccolta e valutazione dei dati.

3.1.9 Aggiornamenti normativi

Le Linee Guida, adottate per la prima volta nel 2020, hanno già subito degli aggiornamenti. INBEE garantisce l'aggiornamento degli algoritmi di calcolo di pari passo con lo sviluppo della normativa. Pertanto, in caso di ulteriori aggiornamenti, le CdA e gli indicatori verranno ricalcolati in automatico e saranno subito resi disponibili senza dover inserire nuovamente i dati, già presenti nel BMS.

4. Conclusioni

Le Linee Guida Ponti e Viadotti sono solo il primo passo della transizione digitale che riguarderà le opere infrastrutturali. L'utilizzo di archivi digitali, di applicativi per la raccolta di informazioni e di piattaforme per l'elaborazione dei dati, come INBEE, cambieranno il modo di gestire Ponti e Viadotti, riducendo i margini di errore, agevolando le scelte degli Enti Gestori e migliorando il lavoro degli ispettori. Questo passaggio è fondamentale per una maggiore padronanza dei dati e una migliore gestione delle opere al fine di accrescerne sempre più la sicurezza.

Sistemi di monitoraggio innovativi per la manutenzione predittiva delle infrastrutture

A. Ing. Paolo Sattamino^{a*}, B. Ivan Moroni^b

^a Partner, General Manager Technical – Harpaceas Srl

^b Chief Executive Officer - Tokbo

* Corresponding author: sattamino@harpceas.it

Abstract: Nel contesto della crescente complessità delle infrastrutture moderne, affiancata da sempre maggiori esigenze di mobilità, la sicurezza rappresenta un aspetto centrale per garantire la sostenibilità e la resilienza delle infrastrutture. L'avvento della digitalizzazione nel settore delle Costruzioni può rappresentare un valido ed efficace supporto al fine di assicurare questi obiettivi. Nel presente articolo si descrive l'utilizzo di tecnologie BIM e *digital twin*, in particolare *Trimble Connect* e *Tokbo* come strumenti a supporto del monitoraggio dello stato di salute delle infrastrutture, ed in grado anche di abilitare una manutenzione di tipo predittivo. Tra i molteplici vantaggi che vengono evidenziati viene approfondito il tema dell'ottimizzazione della gestione della manutenzione e dei relativi costi, e l'efficacia in termini di incremento della sicurezza dell'opera. Si riporta poi un caso di studio allo scopo di meglio evidenziare l'importanza di dotare le infrastrutture di sistemi di monitoraggio all'avanguardia, nonché la necessità di rivolgersi ad aziende con esperienza già consolidata, al fine di progettare la piattaforma di supporto al monitoraggio più appropriata.

Keywords:

Monitoraggio; Innovazione; Digitalizzazione; Infrastrutture; Manutenzione predittiva; BIM; Digital Twin; IoT

1. Introduzione

Nel contesto della crescente complessità delle infrastrutture moderne si sta assistendo ad una sempre maggiore esigenza di mobilità; questo sta mettendo sempre più sotto pressione i sistemi esistenti.

La sicurezza è da sempre un aspetto centrale da parte dei gestori di questo tipo di opere; a questo tema ormai da qualche anno si aggiungono aspetti quali la sostenibilità e la resilienza delle infrastrutture, temi che non possono più essere trascurati tenuto conto dell'impatto che la crisi di un'infrastruttura può provocare nelle nostre città e nei nostri territori.

L'avvento della digitalizzazione nel settore delle Costruzioni può rappresentare un valido ed efficace supporto al fine di assicurare questi obiettivi.

Le tecnologie (e metodologie) innovative stanno guidando nuovi modi di pensare e opportunità. La diffusione del BIM (Building Information Modeling)¹, ormai intrapresa da alcuni anni e sempre in fase di evoluzione, ha senz'altro portato importanti cambiamenti; ma la digitalizzazione del settore edilizio va ben oltre il BIM, e il *digital twin*² ne è senz'altro uno dei protagonisti.

La crescita dell'utilizzo dei gemelli digitali riguarda tutti i settori, ad esempio l'automotive, dove le aziende stanno creando veicoli virtuali riuscendo a svolgere test a costi sempre più contenuti; l'aerospaziale, dove i produttori di compagnie aeree hanno raggiunto tassi di miglioramento record grazie all'adozione di piattaforme basate su gemelli digitali; il settore manifatturiero, dove molti team di lavoro utilizzano tecnologie basate su *Augmented Reality* e *Virtual Reality*³ per risolvere i problemi della *supply chain*.

Il mercato globale del *digital twin* è enorme: si prevede che le dimensioni del mercato globale raggiungeranno oltre i sessanta miliardi di dollari. Anche nel settore delle infrastrutture è ormai avviato un chiaro processo di digitalizzazione; sempre più ci si sta focalizzando su questo tipo di tecnologia; il *digital twin* sta rivoluzionando il modo in cui progettiamo, gestiamo e monitoriamo ponti, strade, ferrovie e altre opere civili.

Le infrastrutture sono soggette a molte variazioni di comportamento causate in particolare da agenti esterni. Innanzitutto, le condizioni atmosferiche, come la corrosione nel caso delle strutture metalliche, o i cambiamenti di temperatura che possono provocare dilatazioni o contrazioni nei materiali. È poi essenziale tenere in considerazione eventi correlati alla funzione di tali costruzioni, come le vibrazioni derivanti dal passaggio di veicoli, convogli ferroviari, ecc., che possono raggiungere valori di sollecitazione anche molto importanti. Questi fattori, unitamente ad altri, possono nel tempo arrivare a compromettere la sicurezza e la stabilità delle opere.

La digitalizzazione offre strumenti fondamentali per affrontare queste sfide. Attraverso un approccio basato su dati precisi e integrati, è possibile implementare modelli predittivi, automatizzare processi di ispezione e pianificare interventi di manutenzione in modo predittivo, minimizzando i rischi per la sicurezza e garantendo una maggiore longevità delle opere.

Monitorare le infrastrutture è un aspetto essenziale che si pone come scopo quello di tenere sotto costante controllo l'andamento delle variabili critiche nel tempo, prevenendo rischi legati alla sicurezza o alla stabilità di tali strutture e ottimizzando gli interventi di manutenzione e, di conseguenza, i relativi costi.

L'articolo esplorerà come le tecnologie digitali stiano trasformando il settore delle infrastrutture, mettendo in evidenza i benefici, le sfide e le opportunità di questa rivoluzione tecnologica per garantire una sicurezza sempre più avanzata e sostenibile.

¹ "Il Building Information Modeling (BIM), in particolare il modello informativo di progetto e di asset, funge da repository centralizzato che ospita i dati grafici, alfanumerici e di documentazione legati ai progetti di costruzione e agli asset durante il loro ciclo di vita." [1].

² "Il *digital twin* (o "gemello digitale", ndr.) è una rappresentazione digitale completa di un singolo prodotto. Include le proprietà, le condizioni e il comportamento dell'oggetto reale attraverso modelli e dati. Il *digital twin* è un insieme di modelli realistici in grado di simulare il comportamento effettivo del prodotto nell'ambiente di utilizzo. Il gemello digitale viene sviluppato insieme al gemello fisico e rimane la sua controparte virtuale durante l'intero ciclo di vita del prodotto." [2].

³ "*Augmented Reality* (AR): realtà fisica in cui i partecipanti vedono anche elementi virtuali [...]
Virtual Reality (VR): rappresenta un mondo sintetico in cui il partecipante è completamente immerso." [3].

In particolare, viene descritta una piattaforma che integra un ambiente di condivisione dati e modelli informativi opportunamente personalizzata per potersi collegare a sensoristica IoT⁴, con particolare riferimento al monitoraggio del comportamento di giunzioni bullonate.

2. Digital twin: introduzione, ambiti e tecnologie abilitanti

Un gemello digitale è la rappresentazione digitale di un oggetto appartenente al mondo reale, è qualcosa in grado di restituire, in un ambiente virtuale, informazioni (in tempo reale) e dati, di diversa natura, relativi ad un'opera reale; è la Combinazione di un modello computazionale e di un Sistema nel mondo reale.

Stiamo parlando di un nuovo livello di sofisticazione; in particolare se lo si paragona ai modelli BIM, tipologia di modelli ormai abbastanza diffusa nel settore AECO (*Architecture, Engineering, Construction and Operation*). Un gemello digitale non è un modello statico dove i dati possono evolvere solo nel momento in cui un utente interviene per aggiornarli. A partire da un primo set di dati, il gemello digitale evolve in continuo; ha modo di maturare man mano che seguiamo il ciclo vita dell'asset; mentre una simulazione replica cosa potrebbe accadere in un oggetto/sistema/asset, un *digital Twin* replica cosa sta accadendo in un oggetto fisico reale, fornendo informazioni sul suo stato lungo tutto il suo ciclo vita (figura 1).

In un gemello digitale convergono diverse tecnologie: l'*Internet of Things* (IoT), cioè dispositivi fisici interconnessi (sensori, telecamere, dispositivi wearable) che raccolgono e scambiano dati tra di loro attraverso Internet; *Intelligenza Artificiale* (AI), vale a dire sistemi e programmi in grado di eseguire compiti che richiedono intelligenza umana; *Cloud* e *Big Data*, la possibilità cioè di gestire una sempre più crescente mole di dati, che possono essere elaborati *in Cloud* per permettere di prendere decisioni sulla base dei dati forniti da dispositivi IoT. I gemelli digitali non sono necessariamente rappresentazioni realistiche, sono bensì astrazioni rilevanti della risorsa fisica. Lo sviluppo di questo tipo di oggetti virtuali deve essere pensato come “adatto allo scopo” che ci si prefigge; il livello di fedeltà varia a seconda dei casi d'uso. I gemelli digitali non devono necessariamente tentare di rispecchiare tutto ciò che riguarda il sistema originale.

⁴ “L'*Internet of Things* (IoT) è un quadro in cui tutte le cose hanno una rappresentazione e una presenza in Internet. Più specificamente, l'*Internet of Things* mira a offrire nuove applicazioni e servizi a cavallo tra il mondo fisico e quello virtuale, in cui le comunicazioni Machine-to-Machine (M2M) rappresentano la comunicazione di base che consente le interazioni tra gli oggetti e le applicazioni nel cloud.” [4].

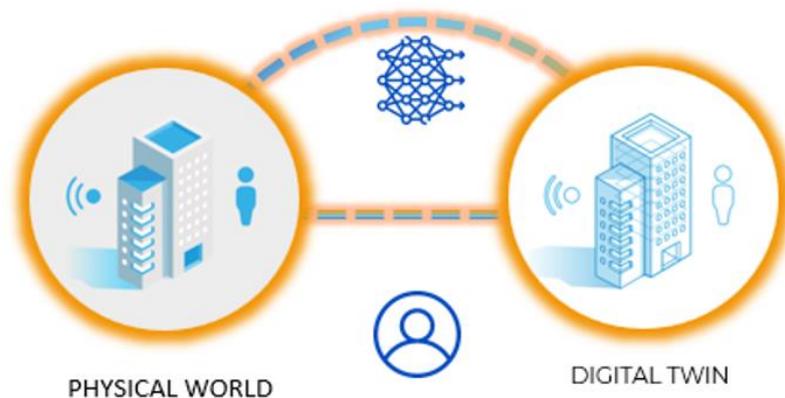


Figura 1 - Relazione schematica tra *digital twin* e mondo reale (“*physical world*”)

Risulta evidente cosa sia diverso o, meglio, nuovo o, meglio ancora, evoluto, rispetto a ciò che gli attori della filiera delle costruzioni stanno finora affrontando ed utilizzando. Siamo di fronte alla possibilità di meglio gestire, archiviare e recuperare dati, disporre di maggiore efficacia nell’abbinare approcci incentrati sui dati che comprendono componenti tecniche, ambientali, sociali, poter meglio stabilire criteri concorrenti e svolgere valutazioni combinate di impatto (economico, in termini di sicurezza, sostenibilità, ecc.), poter sfruttare la connessione in tempo reale con i dati al fine di predire il comportamento di un oggetto fisico.

Possiamo parlare di fusione di modelli e dati diversi. Per poter gestire tutto questo è necessario un (ulteriore) cambiamento (o, addirittura, evoluzione) nella cultura del lavoro, e non solo nelle capacità tecniche; è essenziale sviluppare un forte approccio metodologico data-centrico.

Un gemello digitale ha un suo ecosistema di riferimento; esso può variare in dimensione, ambito, scala e complessità.

La dimensione è la granularità della rappresentazione (quanto è accurata la scala spaziale e temporale, per esempio); l’ambito è la porzione del mondo reale considerata; scalabilità e complessità significano adattabilità a diverse applicazioni e settori; fornire informazioni dettagliate sia a livello di componente, sia a livello di sistema, adattarsi alle risorse computazionali disponibili; gestire la connettività con altri sistemi e sensori, indipendentemente dal numero di dispositivi collegati.

Un *digital twin* non deve poi per forza fare riferimento ad un unico repository di dati; i gemelli digitali devono anche essere in grado di elaborare e analizzare dati significativi strutturati in un formato gestibile.

Appare dunque chiaro come realizzare un gemello digitale sia un’attività non standardizzabile; siamo di fronte ad una vera e propria attività di *System Integration*.

3. Le piattaforme Trimble Connect e Tokbo per la generazione del gemello digitale

Parlare di *digital twin* può far pensare a strumenti che useremo nel prossimo futuro; in realtà molte cose si possono già realizzare, tramite lo sfruttamento di diverse tecnologie abilitanti.

Volendo menzionarne alcune tra le più significative, si può senz'altro partire da quelle basate sull'utilizzo di modelli BIM. Si tratta dell'approccio tecnologico che prevede l'adozione di specifiche tecnologie BIM dedicate alla collaborazione tra i modelli BIM corredate da *workflow* di dati ben strutturati.

Pensando al progetto o all'attività di monitoraggio di un'opera esistente, un tipico flusso di lavoro "digitale" prevede, innanzitutto, la realizzazione di un modello informativo che sia in grado di contenere informazioni dettagliate dell'opera. In questa fase di lavoro, è sempre più di maggiore interesse l'utilizzo di tecniche di modellazione parametrica dei singoli componenti, che consentono di simulare rapidamente l'asset, al fine di produrre un modello informativo in grado di favorire l'assemblaggio dei componenti con estrema precisione e accuratezza.

Questa fase di lavoro di solito è seguita dall'importazione del modello (o dei modelli) digitale/i in un ambiente di dati "aperto" e connesso, volto a promuovere una collaborazione tra il team di progetto multidisciplinare tale da garantire un'unica fonte dei dati. Il modello informativo così realizzato e condiviso tra tutti gli *stakeholder* è disponibile per eseguire controlli di varia natura.

Un modello 3D può essere "trasformato" in un *digital twin* sfruttando questo tipo di tecnologie che permettono la collaborazione tra modelli informativi. Si tratta di creare un'applicazione progettata per visualizzare e gestire risorse o asset, che permetta di includere una vasta gamma di elementi, oltre ai modelli 3D come immagini, video, audio, documenti e altro ancora, che consenta di semplificare l'accesso ai dati di altri strumenti, organizzare e categorizzare le risorse, visualizzare e modificare i metadati ed infine, che permetta di collegarsi a sensoristica IoT, la più varia possibile. Importante è anche la possibilità di personalizzare l'aspetto e le impostazioni dell'applicazione (la cosiddetta *experience*) in base alle esigenze ed all'obiettivo prefissato.

Nella figura 2 si riporta un possibile schema di un gemello digitale dove vengono evidenziati differenti tipologie di database rispetto ai quali il modello digitale può collegarsi.

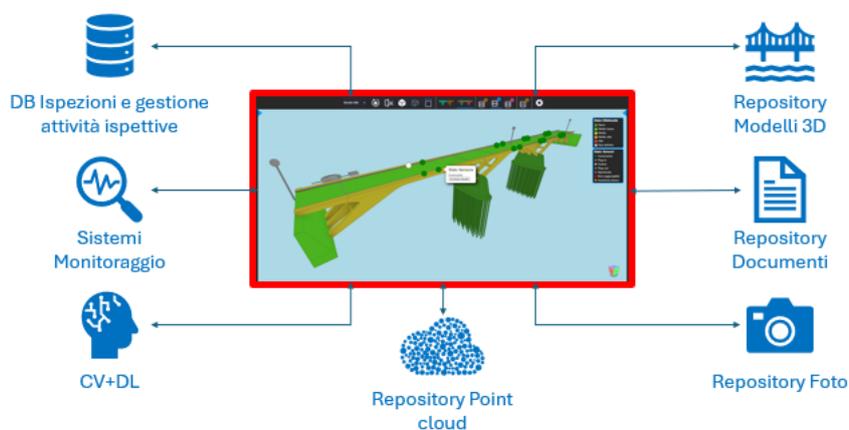


Figura 2 - Differenti tipologie di database a cui un *digital twin* può collegarsi

L'applicazione per la gestione dei modelli digitali e l'abilitazione del gemello digitale che viene descritta in questo articolo è *Trimble Connect*.

L'approccio di generazione del gemello digitale che si può realizzare in questa piattaforma vede uno step essenziale relativo alla fase di "arricchimento" del modello IFC. Alle informazioni derivate dal file IFC vengono aggiunte quelle relative ai sensori installati sull'opera; i sensori vengono rappresentati tramite oggetti inclusi in un apposito file IFC. La visualizzazione dei dati relativi al modello può essere personalizzata in base alle esigenze dell'Utente. È possibile, ad esempio, ottenere rappresentazioni su scala cromatica e/o numerica di molteplici indicatori di grandezze fisiche o anche relativi a livelli di ammaloramento determinati a seguito di visite ispettive.

È anche possibile creare una connessione con il funzionamento di sensori di varia natura. Strumenti quali *Trimble Connect* garantiscono livelli di *experience* molto elevati perché sono pensati per essere fruibili da parte di categorie di Utenti molto diversi tra loro, dall'Utente più esperto a quello che ha bisogno di avere poche informazioni in poco tempo e molto chiare e semplici. La piattaforma è del tutto agnostica rispetto al tipo di oggetto fisico che viene rappresentato e rispetto al tipo di sensoristica che si vuole connettere.

È utile precisare come in un progetto gestibile con questo tipo di ambiente di collaboration, vengono caricati tutti i dati disponibili, tutti gli stakeholder ricevono autorizzazioni per connettersi alla piattaforma sul web, ciascuno secondo specifici accessi/autorizzazioni. Potranno quindi accedere ai dati in base alle loro competenze ed al ruolo che hanno all'interno delle diverse organizzazioni coinvolte.

Potranno fare affidamento ad un database attendibile e unico dei processi di ispezioni, rilievo, controllo strutturale, gestione, manutenzione, ecc. In termini più pratici l'interazione tra i vari professionisti avviene attraverso la gestione di *ToDo* (informazioni esportabili come report in formato BCF), che permettono di creare ed assegnare attività specifiche alle singole persone.

AL fine di rendere questo strumento ancora più efficace nell'ambito delle attività di supporto al monitoraggio di infrastrutture, *Harpaceas*, azienda fornitrice di soluzioni digitali per il settore delle costruzioni, ha sviluppato un *plug-in* per *Trimble Connect* denominato *Document Controller* (figura 3). Si tratta di un *add-on* sviluppato per incrementare ulteriormente le già ampie funzionalità disponibili nell'ambiente *Trimble Connect*. *Document Controller* garantisce molteplici aggiuntive funzionalità; tra queste possiamo menzionare il caricamento e il collegamento di documenti ai singoli oggetti del modello, la possibilità di collegarsi a schede ispettive digitali, la possibilità di associare schede prodotte dall'esecuzione delle prove in situ, infine la possibilità di integrare piattaforme IoT.

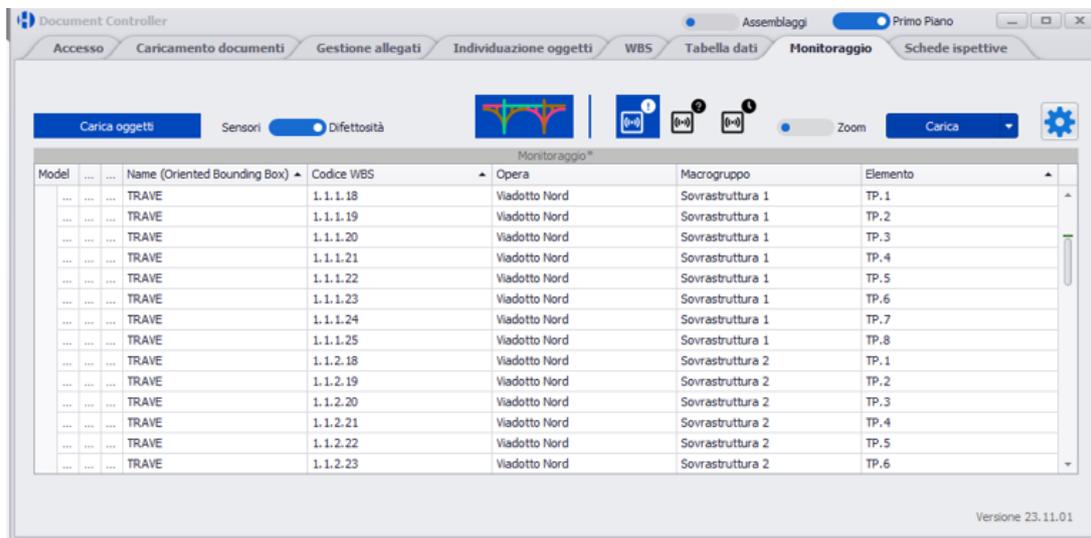


Figura 3 - Il *Document Controller* all'interno della piattaforma *Trimble Connect*

Con particolare riferimento al collegamento con piattaforme *IOT*, in questo articolo si fa riferimento al particolare link realizzato con la soluzione sviluppata da *Tokbo*.

Tokbo è un sistema di monitoraggio all'avanguardia che prevede l'installazione di un insieme di sistemi di fissaggio sensorizzati, dai bulloni alle rondelle, adattandosi al tipo di giunzione utilizzata dal cliente.

I sensori sono stati progettati per consentire il monitoraggio di più dimensioni, per una panoramica completa sullo stato dei giunti. Dunque, non solo la forza di serraggio, il cui monitoraggio consente di verificare eventuali decadimenti nel tempo, ma anche la temperatura (per poter leggere i dati al netto delle variazioni climatiche esterne), lo stato oscillatorio (per una puntuale analisi delle vibrazioni) ed infine inclinometrico (per identificare variazioni nella posizione del giunto).

I sistemi di fissaggio sensorizzati (figura 4) vengono connessi ad un *gateway*, il quale invia costantemente e in tempo reale i dati sulle rilevazioni alla piattaforma proprietaria di *Tokbo* o integrandoli in piattaforme cliente, dove vengono immagazzinati, visualizzati ed analizzati, e messi a disposizione sia del team di *Tokbo* che del cliente, per un'agile consultazione. Il tutto, supportato da modelli di intelligenza artificiale in grado di rilevare pattern di anomalie allarmanti, prevedendo il guasto prima che si verifichi.

Con *Tokbo* è possibile impostare soglie di tolleranza personalizzate oltre le quali si rischia di incorrere in problemi strutturali. Superate tali soglie, il sistema invia in automatico due tipi di notifiche, *warning* e *alert*, a seconda del livello di gravità, per segnalare al cliente la necessità di inviare una squadra di manutenzione e intervenire per tempo, evitando che l'evento dannoso si manifesti, o contenendone l'impatto.

Si tratta di una personalizzazione che parte dalla varietà di sistemi di fissaggio sensorizzabili, all'installazione realizzata nei punti critici dell'infrastruttura monitorata, fino alla regolazione delle soglie di tolleranza per *alert* e *warning*. Una soluzione pensata e sviluppata per rispondere alle mutevoli esigenze del cliente.

Il sistema è disponibile nelle versioni *wired* e *mild-wireless*; la prima si connette direttamente alla rete elettrica a disposizione, e consente di collegare fino a 256 sensori; la seconda, invece, comprende un sistema di cablaggio diretto dove l'alimentazione è fornita mediante dei pannelli solari, svincolandosi dalla necessità di una rete elettrica a cui connettersi.



Figura 4 - Alcuni esempi dei diversi tipi di sistemi di fissaggio sensorizzabili da Tokbo

4. Il caso in esame: ponte ferroviario in acciaio su un canale artificiale

4.1 La struttura e il sistema di monitoraggio installato

L'esperienza che si vuole condividere in questo articolo riguarda il caso di un ponte ferroviario, che presenta una struttura in acciaio ad arco su un canale d'acqua artificiale (figura 5). Il cliente ha avviato una sperimentazione per poter studiare il comportamento del ponte ed introdurre l'impiego di sensori innovativi sulle giunzioni imbullonate.



Figura 5 - Foto del ponte in esame su cui è avvenuta l'installazione Tokbo

Essendo un'installazione di tipo sperimentale, il cliente ha concordato con *Tokbo* l'installazione di alcuni sensori sulle giunzioni delle piattebande e sui tiranti di connessione di entrambi gli appoggi.

Il posizionamento dei 32 sensori è avvenuto in una sola giornata, a novembre 2023, da parte di una squadra di tecnici *Tokbo*. Il team ha predisposto 3 centralini *gateway* alimentati da pannelli solari come da progettazione (in modo da rendere il sistema indipendente rispetto a una connessione elettrica, nonché in ottica sostenibile), così come il posizionamento dei sensori, con lo smontaggio e il seguente rimontaggio dei bulloni, nel frattempo sensorizzati, aventi pari caratteristiche a quelli definiti nel progetto.

Il montaggio ha seguito le coppie di serraggio indicate nel progetto e con il valore aggiunto di poter verificare anche successivamente, grazie ai sensori *Tokbo*, il carico di serraggio in tempo reale, avendo la certezza di mantenere i carichi previsti, indipendentemente da attrito e irregolarità della carpenteria del ponte.

Parallelamente è stato realizzato un modello digitale dell'opera facendo uso del software *Tekla Structures*, software di modellazione BIM (figura 6), pensato per affrontare qualsiasi problematica relativa al BIM in ambito Strutturale. Grazie alla specializzazione di questo strumento all'ambito strutture ed alla sua flessibilità è molto semplice riuscire a realizzare modelli BIM di infrastrutture esistenti anche a partire da dati di rilievo quali ad esempio le nuvole di punti. In questo modello BIM sono stati inseriti, con un adeguato livello di dettaglio, i sensori *Tokbo* (figura 7).

Il modello BIM è stato poi importato sfruttando il formato interoperabile IFC nell'ambiente *Trimble Connect*.

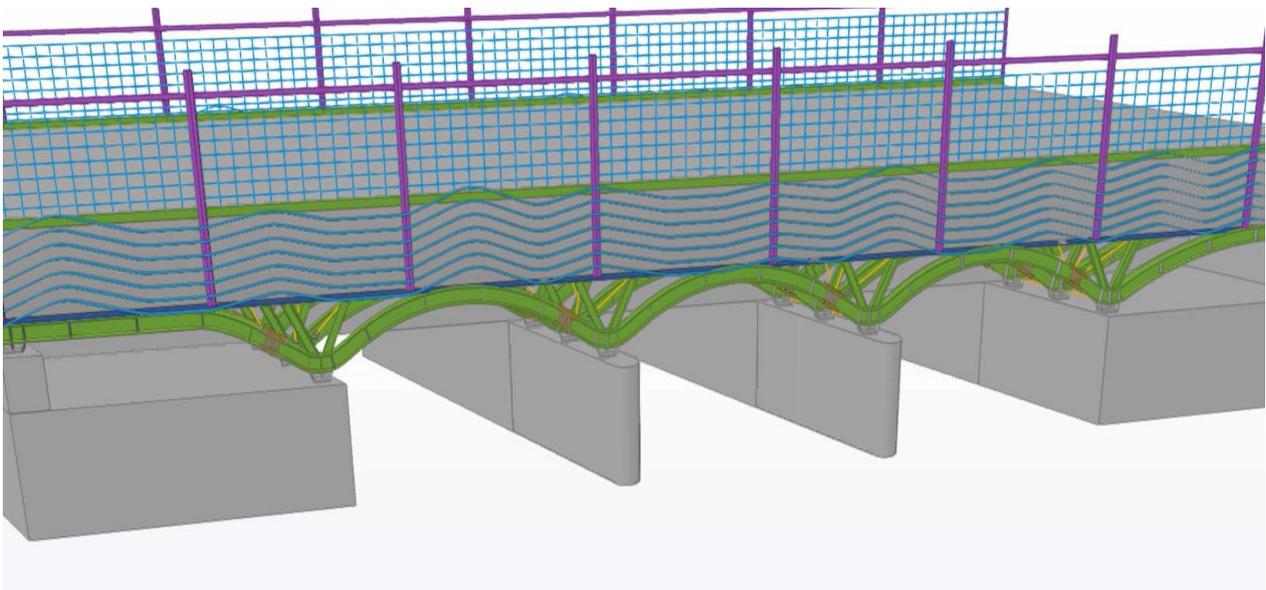


Figura 6 - Modello 3D del ponte

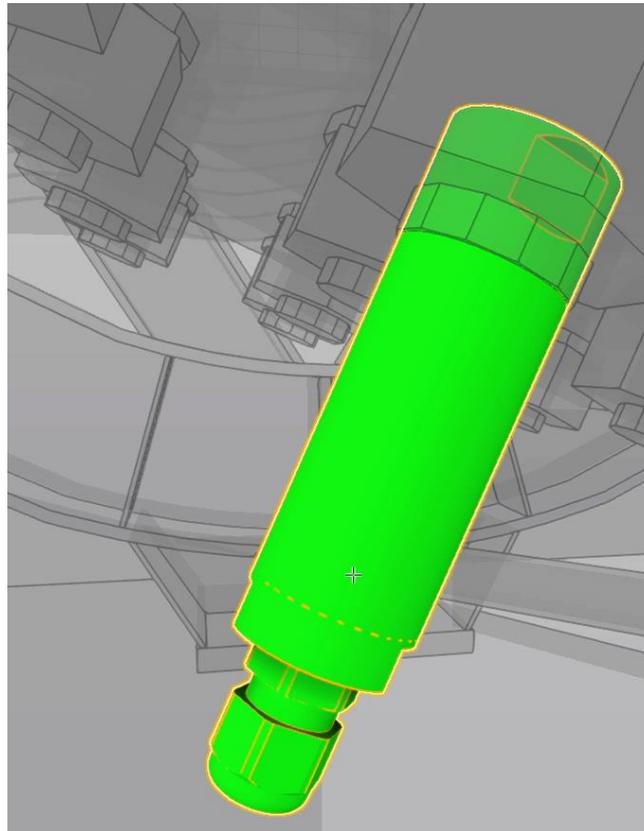


Figura 7 - Modello 3D semplificato del sensore.

4.2 *Le risultanze dall'attività di monitoraggio*

Il sistema di monitoraggio installato è stato operativo sin dal giorno stesso dell'installazione. Nonostante la ridotta luce a cui è soggetto il ponte in esame, il sistema, avendo i bulloni strumentati solidali alla struttura e grazie all'elevato carico dovuto al serraggio, è stato in grado di leggere fin da subito diversi parametri relativi ai bulloni ed indicanti lo stato di salute dell'infrastruttura su cui sono stati installati. Oltre alla forza di serraggio, infatti, il sistema rileva anche la temperatura e le accelerazioni dovute al transito dei treni, così come le eventuali modifiche delle relative inclinazioni, primi sintomi dell'insorgenza di un problema strutturale.

Entrando nel vivo del monitoraggio, si evidenzia che il sistema ha registrato una variazione delle frequenze e vibrazioni dovute al cambiamento del traffico operativo a partire da gennaio 2024.

A cavallo della fine di gennaio 2024 è stato inoltre registrato un decadimento anomalo della forza di diversi bulloni (8 su 12) con casi di perdita di carico fino al 17% in un solo giorno.

Il sistema ha dunque portato all'attenzione del team *Tokbo* e del cliente il verificarsi di un'anomalia; pertanto, è stata organizzata un'attività di ispezione mirata.

In seguito alle dovute verifiche con il cliente ed appurato che non erano avvenute attività di manutenzione straordinaria, l'attenzione si è spostata sul livello dell'acqua del canale. Ciò è stato conseguenza dell'esperienza di *Tokbo* precedentemente accumulata mediante il monitoraggio di ponti ferroviari su corsi d'acqua in Sud America.

Il sistema di monitoraggio di Tokbo aveva notificato prontamente un'anomalia connessa al repentino riempimento del corso d'acqua sopra cui si trovava il monte, prima che l'inclinazione dei piloni di sostegno del ponte potesse trasformarsi in un rischio di scalzamento.

Tramite questo nuovo focus di attenzione, è stato così possibile scoprire che era avvenuto uno svuotamento del canale per manutenzione e pulizia. Questo aveva portato il terrapieno su cui insiste l'appoggio ad esercitare una maggior spinta, venendo meno la reazione della pressione dell'acqua. Inoltre, dal cambiamento del segnale della curva ad ultrasuoni, i tecnici *Tokbo* hanno rilevato una riduzione dello sforzo di taglio agente su alcuni bulloni.

Viste le conseguenze strutturali, si è posta particolare attenzione sul monitoraggio del periodo di riempimento, attraverso cui è stato rilevato un ulteriore decadimento di forza, con una variazione fino all'11%, stavolta relativi ai bulloni di serraggio dei tiranti di connessione.

Di fatto, si è registrato come le variazioni di altezza idrometrica possano influire sui ponti, prevalentemente sulle connessioni vicine alle zone di appoggio al terrapieno.

Questa esperienza ha creato un punto di attenzione, soprattutto alla luce dei cambiamenti climatici, su tutte quelle infrastrutture che oggi sono soggette a repentine inondazioni dopo periodi di secca (come accaduto in Emilia-Romagna o Valencia, solo per citarne alcuni).

Con buone probabilità, l'adozione di sensoristica e sistemi di monitoraggio potrebbe consentire una misurazione e una sorveglianza costante sulle infrastrutture, garantendone il controllo e supportando la manutenzione predittiva, con un conseguente miglioramento della sicurezza.

Mitigando il rischio dell'impatto dei cambiamenti climatici sulle innumerevoli infrastrutture, in molti casi anche in stati avanzati del loro ciclo di vita, diventerebbe così possibile prolungarne la durata e posticipare importanti investimenti di rinnovo, con una spesa in sistemi di monitoraggio inferiore all'1% del costo di realizzazione di una nuova struttura.

4.3 La piattaforma Trimble Connect - Tokbo

Volendo descrivere alcune delle funzionalità principali della piattaforma *Trimble Connect - Tokbo* si fa riferimento al caso applicativo sopra descritto. Disponendo del modello BIM arricchito con la posizione dei sensori, dei dati relativi ai sensori per ogni intervallo temporale è possibile attivare lo strumento *Document Controller*.

Grazie questo tool è possibile instaurare un link bidirezionale modello digitale/sensore, creando di fatto un gemello digitale. Grazie a questa sinergia è possibile sfruttare un doppio livello di informazioni.

In tempo reale, si può visualizzare lo status di ogni sensore tramite una specifica colorazione associabile ad ogni sensore presente nel modello digitale (figura 8); aprendo l'apposita TAB del Documento Controller si può evidenziare in modo chiaro valori quali la clamping force, l'orientation e l'oscillation; si può prendere visione se la forza di serraggio è corretta, rispetto ad una soglia prestabilita (messaggio OK/WARNING sulla tabella relativa ai

dati sensori); infine cliccando sul singolo sensore è possibile realizzare uno zoom a livello di modello sul sensore specifico.

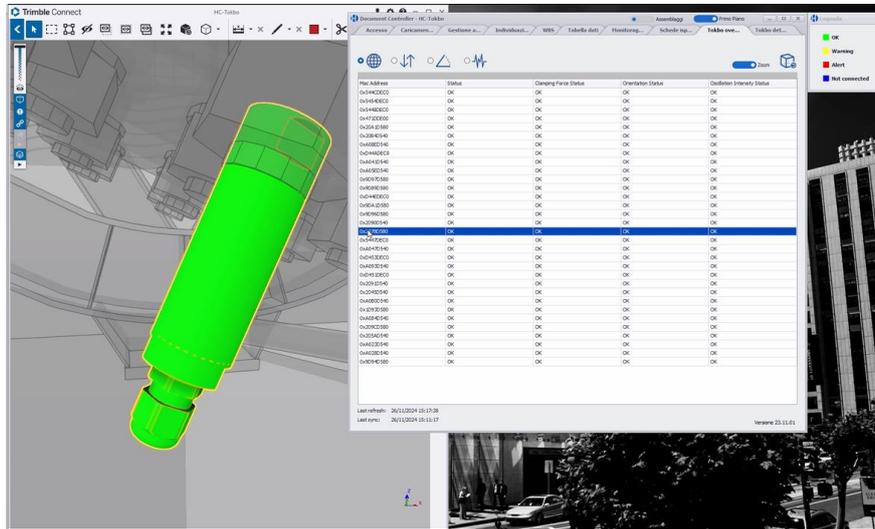


Figura 8 - Dettaglio del modello 3D e collegamento ai dati del sensore Tokbo

Volendo aumentare il livello di interazione tra le due piattaforme, a partire da un sensore, è possibile accedere alla piattaforma Tokbo visualizzando la pagina web contenente tutte le informazioni di dettaglio e le Time Series. L'intervallo all'interno del quale poter visualizzare i dati è personalizzabile (figure 9 e 10).

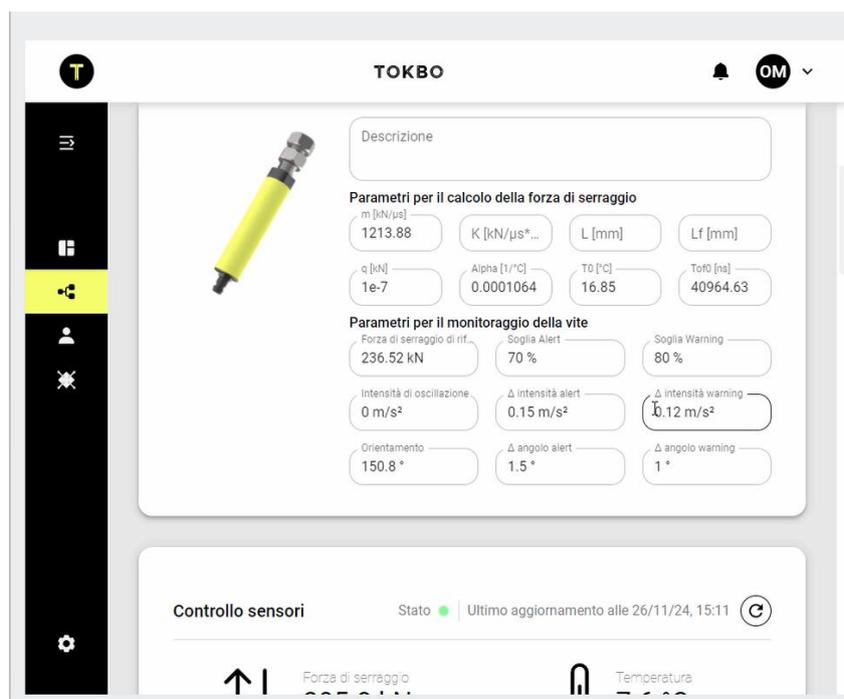


Figura 9 - Accesso alla piattaforma Tokbo

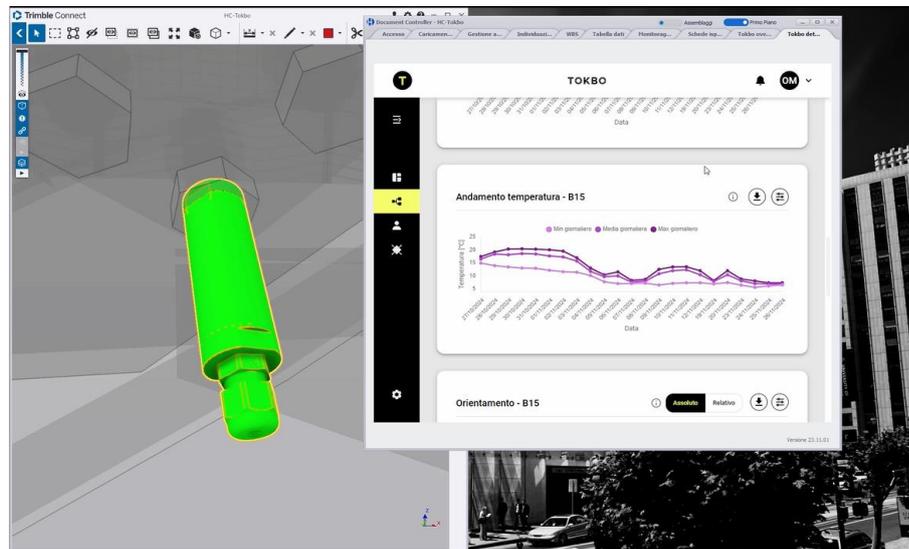


Figura 10 - Evidenza delle Time Series del sensore selezionato nell'intervallo prescelto

Cliccando sui diversi sensori è possibile vedere direttamente sia il posizionamento all'interno dell'opera sia il recupero dell'informazione del sensore.

Le informazioni relative ai sensori hanno un tempo di refresh definibile, l'aggiornamento dei dati in finestra è istantaneo. Nel caso di sensori che superino per alcune delle grandezze i valori di soglia stabiliti, il sensore nel modello cambia stato (colore) ed è possibile verificare a livello di valori numerici il momento temporale ed i valori raggiunti nella situazione critica (figura 11).

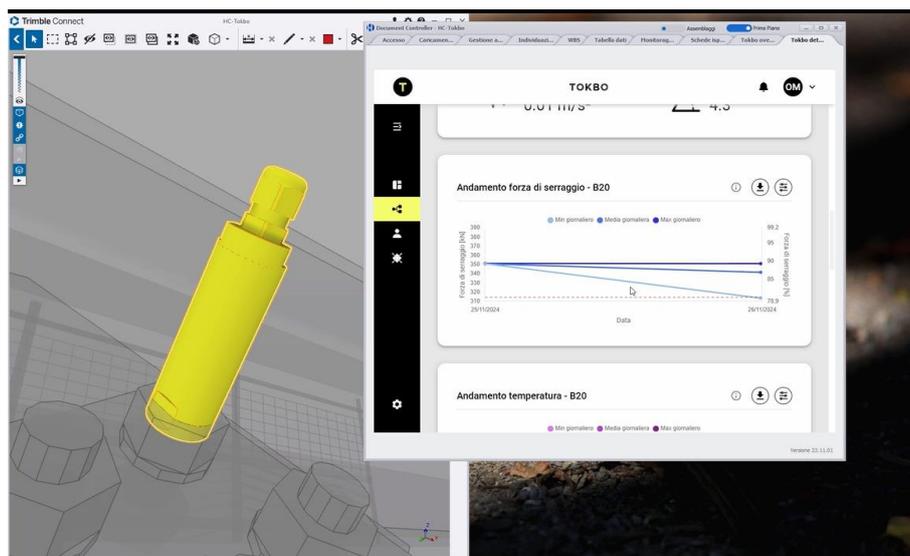


Figura 11 - Evidenza del sensore in condizione anomala, Evidenza dei valori sopra o sottosoglia nel grafico

5. Conclusioni

5.1 Sicurezza e Sostenibilità

Monitorare è già obbligatorio in molti ambiti, con una cadenza temporale che purtroppo, in diversi casi, non corrisponde alle reali esigenze di controllo delle strutture.

Queste possono subire modifiche consistenti del loro comportamento anche in relazione ad eventi concentrati in periodi di tempo molto brevi. Dotarsi di un sistema di monitoraggio in tempo reale e continuato è un'esigenza sempre più imprescindibile.

Il tipo di piattaforma descritta sopra abilita una manutenzione di tipo predittivo. Consente di interpretare i dati per anticipare i problemi, permette di gestire l'invio di squadre di manutenzione solo in caso di effettiva rilevazione di anomalie. Un team di lavoro che possa contare su questo tipo di strumento, e che sia già a conoscenza della tipologia e della localizzazione specifica del problema, può senz'altro disporre di un maggior numero di informazioni, che si traduce nella possibilità di svolgere interventi più rapidi ed efficaci.

Tutto ciò ha una ricaduta considerevole anche in termini economici: basti pensare ai costi legati alla manutenzione a seguito del verificarsi di danni e ai costi relativi alla conseguente inattività. Anche in caso di interventi di prevenzione, spesso i costi sono considerevoli e le risorse limitate non sono impiegate in modo efficace.

La manutenzione predittiva costituisce il giusto equilibrio tra costi di manutenzione, sostenuti solo quando e dove serve, e l'investimento mirato in un sistema di monitoraggio.

Si tratta di una soluzione in grado di garantire la sicurezza, di offrire una gestione più efficiente dei costi, porta senz'altro un valore aggiunto all'asset su cui è installato ed è sfruttabile per il suo intero ciclo di vita.

5.2 Un'esperienza già consolidata

Con un conteggio di 38 installazioni e più di 400 sensori estesi dall'intera Italia fino in Sud America, *Tokbo* sta accumulando un'esperienza senza precedenti in molteplici campi di applicazione, da porti, navi, aeroporti, gru e impianti industriali fino alle infrastrutture, tra cui si annoverano già diverse installazioni su ponti, autostrade, ferrovie e metropolitane.

Diversi sono i *case study* in fase di realizzazione da cui emergono interessanti rilevazioni in ambito infrastrutturale. Oltre al caso preso precedentemente in esame relativo al ponte ferroviario, si cita il *case* relativo all'ambito ferroviario urbano. Il sistema di monitoraggio *Tokbo* applicato all'interno della rete di una Metropolitana è stato in grado di rilevare non solo un guasto sullo scambio monitorato, ma anche un'anomalia nel materiale rotabile che vi transitava.

5.3 Digitalizzazione delle infrastrutture: da necessità a realtà

Nel presente articolo è stata descritta l'importanza relativa all'introduzione della digitalizzazione nel settore della costruzione con particolare riferimento all'obiettivo di aumentare la sicurezza di infrastrutture.

E' stato evidenziato come, tra le varie tecnologie che si stanno imponendo, quella relativa al *Digital Twin* è tra le più importanti ed efficaci. Al fine di mostrarne alcune innovative applicazioni sono state descritte due tecnologie molto innovative: *Trimble Connect* e *Tokbo*.

Tramite queste soluzioni è possibile digitalizzare le infrastrutture, in particolare generare e gestire *digital twin* a supporto del monitoraggio dello stato di salute delle stesse. Tali soluzioni offrono interessanti e molteplici ambiti di applicazione, permettono di salvaguardare ed incrementare i livelli di sicurezza delle opere e garantiscono l'ottimizzazione dei costi di gestione. Questo tipo di strumenti si inseriscono perfettamente nel filone relativo ad una sempre maggiore attenzione sulla necessità di svolgere controlli preventivi su opere d'arte, anche in virtù dell'evidente estremizzazione dei fenomeni climatici.

La proposta di un sistema di monitoraggio all'avanguardia come quello di *Tokbo* e di piattaforme di gestione di gemelli digitali quali *Trimble Connect* si inserisce poi in pieno all'interno della spinta, sempre più evidente, presente nel mercato delle costruzioni verso l'introduzione della digitalizzazione delle infrastrutture.

Bibliografia

- [1] Sompolgrunk A., Banihashemi S., Golzad H., Le Nguyen K. Strategic alignment of BIM and big data through systematic analysis and model development. *Automation in Construction*. 168.A, 105801, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2024.105801>.
- [2] Haag S., Anderl R. Digital twin – Proof of concept. *Manufacturing Letters*. 15.B, 64-66, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mfglet.2018.02.006>.
- [3] Arena F., Collotta M., Pau G., Termine F. An Overview of Augmented Reality. *Computers*. 11.2, 28, 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers11020028>.
- [4] Mouha, R. Internet of Things (IoT). *Journal of Data Analysis and Information Processing*, 9, 77-101, 2021. DOI: 10.4236/jdaip.2021.92006.

Active Mass Damper: la nuova frontiera della protezione sismica

Barbara Zulian^a, Giovanni Rebecchi^{a*}

^a ISAAC srl

* Corresponding author: giovanni.rebecchi@isaacsrl.com

Abstract:

Gli Active Mass Damper (AMD) rappresentano una soluzione innovativa per la protezione sismica di strutture esistenti, combinando efficacia tecnica e approccio non invasivo. Questa tecnologia, sviluppata da ISAAC, sfrutta sistemi di controllo attivo in tempo reale per mitigare gli effetti di eventi sismici, riducendo significativamente gli spostamenti relativi ed incrementando lo smorzamento delle strutture.

Il documento illustra i principi di funzionamento degli AMD e la loro evoluzione tecnologica, soffermandosi su applicazioni pratiche validate da prove sperimentali e simulazioni numeriche. Il caso di successo presentato, retrofit antisismico di un edificio scolastico in c.a., ha infatti dimostrato miglioramenti significativi nella sua prestazione dinamica al sisma, con riduzioni degli spostamenti fino al 50% e un aumento delle capacità di dissipazione energetica. Inoltre, il sistema ha garantito un'installazione non invasiva che ha preservato l'operatività delle strutture, eliminando i costi indiretti associati.

Grazie a strumenti di progettazione avanzati, come l'approccio di analisi in ambiente FEM ed il software Check Forces Tool (CFT), insieme alla flessibilità applicativa modulare del sistema, è possibile implementare nei progetti una soluzione sostenibile ed efficiente per il retrofit sismico. Questo approccio innovativo consente di incrementare la sicurezza e la resilienza del patrimonio edilizio, posizionando gli AMD come una tecnologia di riferimento nel settore della protezione sismica.

Keywords:

Active Mass Damper, AMD, Protezione sismica, Dissipazione, Innovazione, Retrofit

1. Introduzione

Il rischio sismico è un problema di primaria importanza a livello globale, con particolare rilevanza in regioni come l'Italia, dove eventi sismici significativi hanno provocato gravi danni strutturali, perdite economiche e, in molti casi, conseguenze drammatiche sulla popolazione. Il patrimonio edilizio italiano, costituito per circa il 50% da edifici in calcestruzzo armato e per il restante da fabbricati in muratura e altre tipologie costruttive, è spesso inadeguato a fronteggiare sollecitazioni sismiche. Questo è dovuto principalmente al fatto che molti edifici sono stati progettati con criteri superati o in assenza di normative antisismiche, privilegiando la resistenza ai carichi verticali e trascurando quelli orizzontali.

Per affrontare questa criticità, negli ultimi decenni sono state sviluppate numerose strategie per il miglioramento della sicurezza sismica delle strutture. Tra queste, i sistemi di controllo strutturale hanno acquisito crescente importanza grazie alla loro capacità di modificare la risposta dinamica di un edificio, riducendo le oscillazioni e migliorandone le prestazioni in caso di terremoto. In particolare, le tecnologie di controllo attivo, come gli Active Mass Damper (AMD), si distinguono per la loro efficacia nel mitigare le sollecitazioni sismiche attraverso l'applicazione di forze inerziali generate da masse mobili movimentate da un attuatore sulla base di una legge di controllo che processa dati cinematici campionati in tempo reale. Rispetto ai dispositivi passivi o semi-attivi, gli AMD offrono un controllo più preciso e adattivo, garantendo prestazioni superiori anche in scenari complessi.

ISAAC s.r.l., una start-up italiana fondata nel 2018 presso il Politecnico di Milano, si è affermata come leader nella progettazione e produzione di sistemi di controllo attivo per la protezione sismica. La missione dell'azienda è sviluppare soluzioni innovative, non invasive e altamente efficaci per ridurre la vulnerabilità sismica degli edifici, sia esistenti che di nuova costruzione. Grazie al suo approccio modulare e alla flessibilità applicativa, la tecnologia ISAAC si rivolge a una vasta gamma di mercati, dalla protezione di edifici residenziali a strutture pubbliche e industriali. Uno degli aspetti distintivi delle tecnologie sviluppate da ISAAC è la possibilità di installazione rapida e senza interventi invasivi, preservando l'integrità architettonica e garantendo la continuità d'uso delle strutture protette.



Figura 1 - Concept di un intervento di retrofit antisismico con tecnologia AMD:
l'installazione in copertura di un determinato numero di dispositivi consente di aumentare la sicurezza del fabbricato in modo del tutto non invasivo

Le soluzioni offerte da ISAAC si basano sull'utilizzo di algoritmi di controllo semplici e robusti, e su componenti tecnologicamente avanzati che garantiscono una risposta rapida ed efficiente alle sollecitazioni sismiche. Attraverso una combinazione di sviluppo prodotto, sperimentazioni su tavola vibrante, simulazioni numeriche e case histories

di successo, l'azienda ha dimostrato l'efficacia dei propri sistemi e si è posizionata come punto di riferimento nel settore delle tecnologie antisismiche, fornendo soluzioni innovative per la protezione di un patrimonio edilizio sempre più esposto alle sfide del cambiamento climatico e delle emergenze naturali.

2. Sistemi Active Mass Damper

Gli Active Mass Damper (AMD) rappresentano una tecnologia avanzata per il controllo delle oscillazioni strutturali generate da forze dinamiche come terremoti o vento. Il loro funzionamento si basa sull'uso di attuatori elettromeccanici, che muovono una massa inerziale per generare forze contrarie alle oscillazioni della struttura. Grazie alla capacità di adattarsi in tempo reale alle condizioni operative, gli AMD migliorano significativamente la risposta dinamica delle costruzioni rispetto ai dispositivi passivi.

Il principio di funzionamento degli AMD è simile a quello dei Tuned Mass Damper (TMD), una delle soluzioni passive più diffuse. I TMD utilizzano una massa accordata su una specifica frequenza naturale della struttura per dissipare energia attraverso il movimento relativo. Sebbene efficaci in condizioni stabili e prevedibili, i TMD sono limitati dalla loro natura passiva: non possono adattarsi a variazioni della frequenza naturale della struttura durante eventi sismici complessi o in presenza di danni strutturali (Figura).

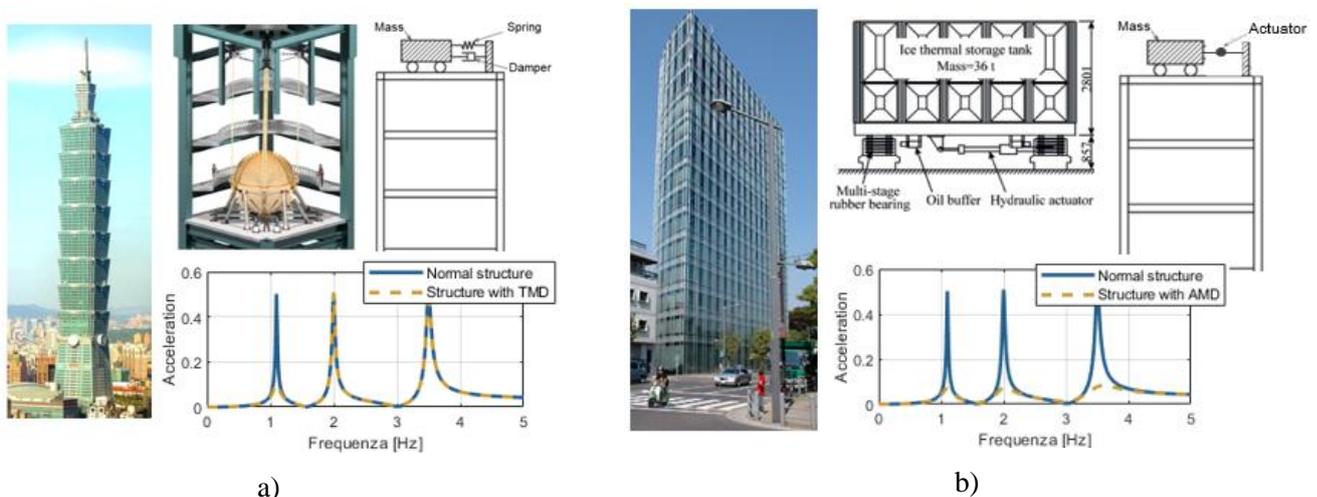


Figura 2 - Esempi di applicazione delle tecnologie TMD ed AMD: a) TMD installato sul Taipei 101, Taiwan (2004), il contributo allo smorzamento è solo sulla prima frequenza propria; b) AMD installato sul Sendagaya Intes, Takenaka Corporation, Tokyo (1991), il contributo allo smorzamento agisce su un più ampio range di frequenze

Gli AMD superano queste limitazioni grazie alla loro capacità di controllo attivo. Utilizzando algoritmi avanzati, possono modificare in tempo reale le loro prestazioni, adattandosi rapidamente ai cambiamenti delle sollecitazioni dinamiche ed anche a quelle della struttura che proteggono. Questo consente loro di operare efficacemente anche in condizioni imprevedibili e di proteggere strutture con geometrie complesse o in aree ad alta sismicità.

Durante un evento sismico, infatti, il sistema AMD entra in funzione raccogliendo i dati provenienti dai sensori distribuiti sulle facciate dell'edificio. Questi vengono elaborati in tempo reale e determinano la forza ottimale che il sistema deve applicare. Il motore lineare sincrono muove con precisione la massa mobile, generando una forza inerziale in grado di contrastare efficacemente le oscillazioni (Figura). Questo meccanismo riduce gli spostamenti relativi tra i piani (interpiano) e protegge sia gli elementi portanti della struttura che quelli non strutturali, come tamponature e impianti.

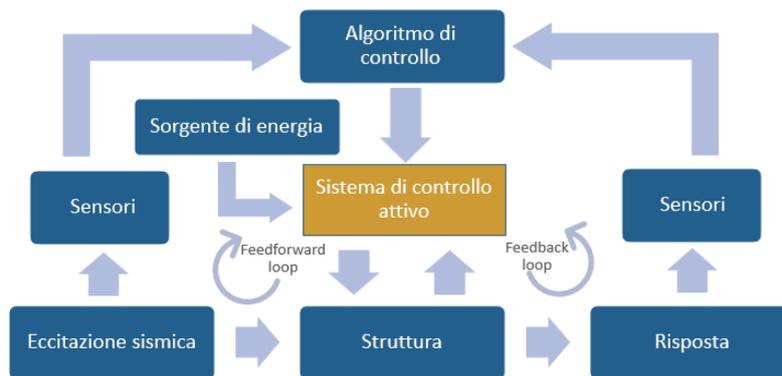


Figura 3 - Flusso di funzionamento di un impianto di controllo attivo

3. Electro-Pro 20x: funzionamento e componenti

Il sistema di controllo attivo sviluppato da ISAAC, Electro-Pro 20x, ha il significativo vantaggio di essere scalabile; infatti, è stato progettato per essere modulare e consentire un'installazione non invasiva sulla sommità delle strutture, anche sui tipici fabbricati esistenti e non solo skyscrapers, senza produrre disturbi o interromperne l'operatività (Figura).

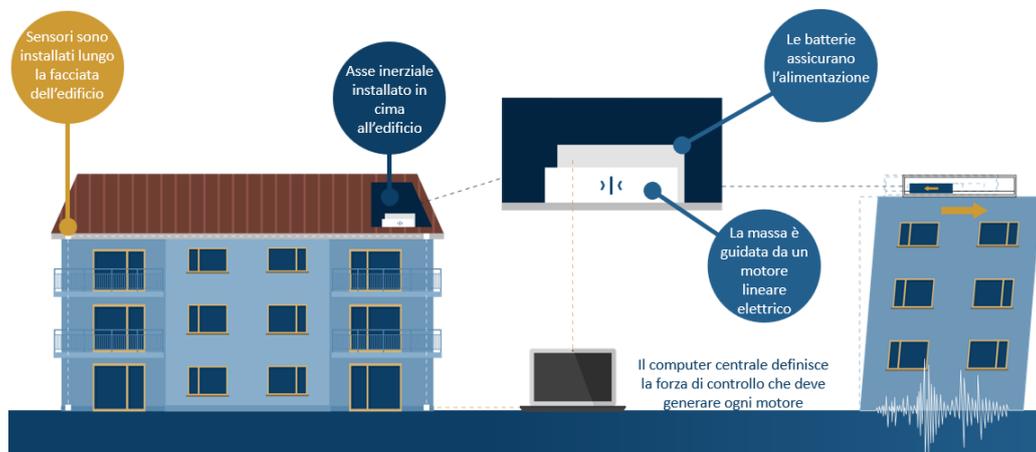


Figura 4 - Applicazione dell'impianto di controllo attivo ISAAC ad un tipico edificio.

Electro-Pro 20x rappresenta la seconda generazione dei sistemi Active Mass Damper sviluppati da ISAAC. Nel seguito si approfondiranno le sue componenti hardware e software.

3.1 I componenti hardware

Al centro del sistema si trova l'unità macchina, o Asse inerziale, che integra il motore lineare sincrono; completano la massa mobile e un insieme di sensori progettati per monitorare in tempo reale il comportamento dinamico della struttura. Il motore lineare è in grado di generare forze fino a 20 kN. La modularità e scalabilità del dispositivo consentono di adattarne le caratteristiche dinamiche alle esigenze specifiche di ciascun edificio, con masse variabili da 250 a 1000 kg e una lunghezza totale del sistema compresa tra 2 e 4 metri (Figura).

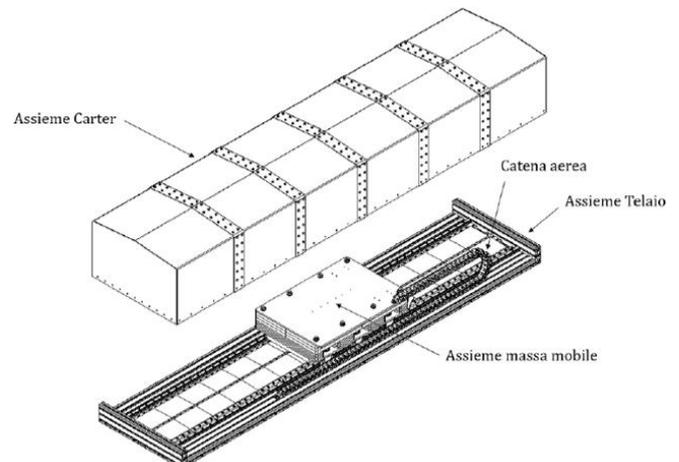


Figura 5 - Asse inerziale di Electro-Pro 20x: immagine da un cantiere e rappresentazione tecnica

I dati misurati in tempo reale dai sensori vengono trasmessi al computer centrale, il cuore del sistema. Questo componente implementa l'algoritmo di controllo "Sky-Hook", che elabora le informazioni ricevute per determinare i movimenti della massa mobile necessari a contrastare le vibrazioni della struttura.

Per garantire la continuità operativa anche in situazioni di emergenza, il sistema è inoltre supportato da un sistema di alimentazione dotato di un gruppo di continuità (UPS). Questo dispositivo è in grado di alimentare l'intero sistema per almeno 24 ore in caso di interruzione di corrente, assicurando così che Electro-Pro 20x rimanga pienamente operativo anche durante emergenze prolungate.

3.2 Legge di Controllo: Algoritmo Sky-Hook

Il funzionamento del sistema Electro-Pro 20x si basa sull'algoritmo di controllo diretto di tipo "Sky-Hook", una legge di controllo che calcola in tempo reale la forza necessaria per ridurre le oscillazioni dinamiche indotte sulla

struttura. Questo algoritmo è particolarmente adatto per applicazioni sismiche, in quanto dipende solo da un parametro di calibrazione (G , Gain) e dalla risposta cinematica della struttura all'input.

La forza di controllo generata F viene infatti determinata in base alla seguente relazione:

$$F_{control} = -G \cdot (\dot{x}_{roof} - \dot{x}_G) \quad (1)$$

dove:

- $F_{control}$: rappresenta la forza di controllo trasferita alla sottostruttura dal movimento della massa mobile dell'asse inerziale;
- G : rappresenta il guadagno del sistema (Gain), è il parametro libero dell'algoritmo di controllo, calibrato opportunamente durante la progettazione e permette di ottimizzare sia le prestazioni che la stabilità del sistema.
- x_{roof} e x_G : rappresentano le misure di velocità campionate in tempo reale dai sensori posizionati al suolo ed in prossimità di ciascun asse inerziale.

L'algoritmo è progettato per garantire prestazioni ottimali in una vasta gamma di condizioni operative, dai limiti di servizio agli stati limite di danno o collasso. Questo approccio consente di adattare dinamicamente la risposta del sistema alle variazioni nelle condizioni operative, come i cambiamenti nella frequenza o ampiezza delle oscillazioni durante un evento sismico.

Come si vedrà nel capitolo 5, grazie al controllo Sky-Hook, Electro-Pro 20x può essere assimilato a uno smorzatore viscoso equivalente, in virtù della perfetta analogia tra la formulazione dell'algoritmo e la legge costitutiva di un dissipatore viscoso lineare.

4. I test sperimentali condotti

I sistemi ISAAC sono stati testati attraverso simulazioni numeriche e sperimentali su tavola vibrante presso il laboratorio EUCENTRE di Pavia, i quali hanno permesso di certificarne il comportamento ed identificare con successo la relativa strategia progettuale.

4.1 Test su struttura in c.a., Eucentre 2021

I primi test di funzionamento del sistema sono stati svolti su il sistema I-Pro 1, primo prototipo sviluppato da ISAAC. I-Pro 1 è stato progettato, prodotto e testato preliminarmente presso il Politecnico di Milano, in Italia (per maggiori dettagli, si veda [1]). L'attuatore poteva generare una forza lineare fino a 220 kN, con una velocità massima e un'ampiezza di spostamento di 5 m/s e $\pm 0,5$ m, rispettivamente.

Le prove sperimentali su edifici gemelli in cemento armato a grande scala sono state condotte sulla tavola vibrante del laboratorio Eucentre di Pavia, Italia [2]. Come riportato nella pubblicazione di riferimento, i test sono stati eseguiti per indagare le prestazioni dell'AMD installato sull'edificio, esplorando al contempo l'efficienza dell'intero sistema di controllo attivo, inclusa la stabilità dell'algoritmo di controllo e l'elaborazione dei segnali.

Le prove sono state condotte su due edifici a scala reale, identici dal punto di vista geometrico e costruttivo, composti da telai in cemento armato con pareti di tamponatura in muratura. Uno degli edifici è stato dotato del sistema I-Pro 1, installato sul tetto, mentre l'altro è stato mantenuto nella configurazione originale come riferimento per il confronto. I test sono stati effettuati utilizzando una tavola vibrante unidirezionale, simulando diverse intensità del moto sismico. Il protocollo includeva l'applicazione della componente est-ovest del terremoto di Irpinia del 1980, scalata in intensità dal 10% fino al 137% del moto originale, per un totale di 19 test.

La campagna ha dimostrato che l'AMD è estremamente efficace nel migliorare le prestazioni sismiche dell'edificio. In particolare, l'AMD ha consentito riduzioni degli spostamenti dell'ordine del 70% ed è stato in grado di assorbire oltre il 60% dell'energia totale in ingresso (Figura). Il programma di ricerca ha anche portato allo sviluppo delle migliori pratiche per la modellazione FEM e l'implementazione del sistema AMD.

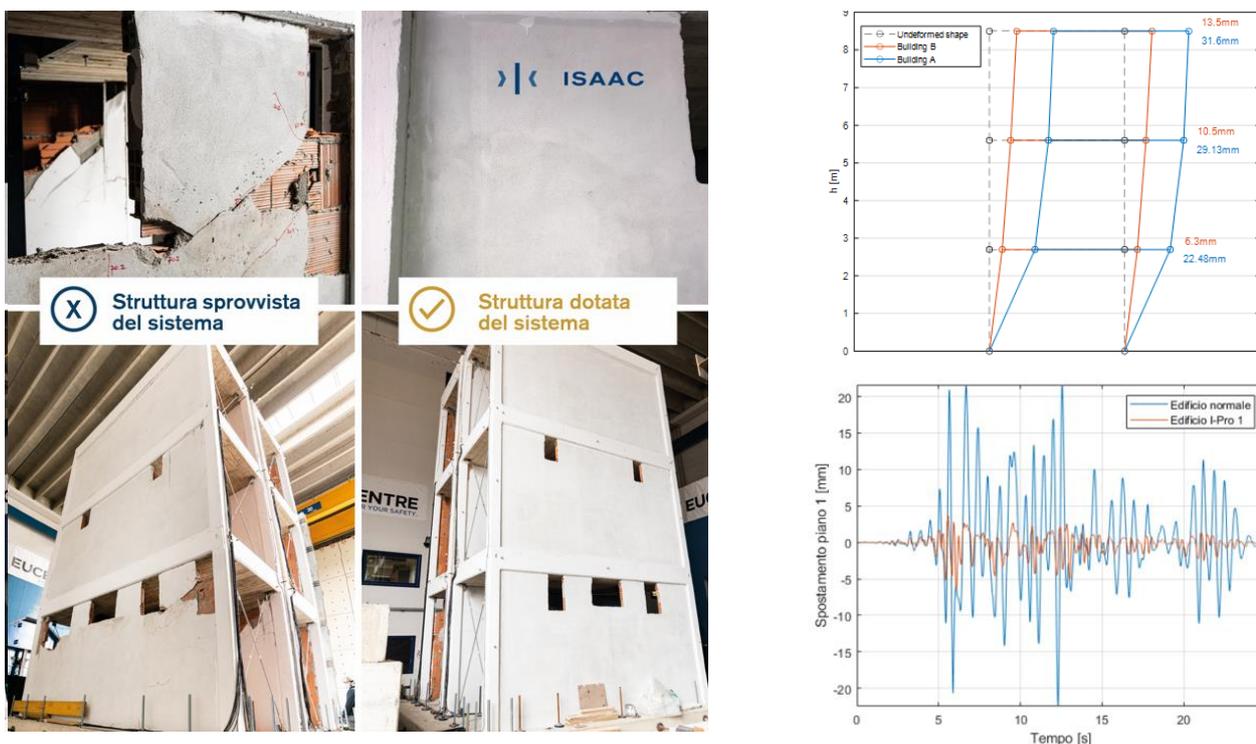


Figura 6 - Evidenze sperimentali ottenute dalla campagna sperimentale in Eucentre 2021: confronto tra i danneggiamenti evidenziati e tra gli spostamenti rilevati tra edificio controllato e non controllato

4.2 Test su campanile in muratura, Eucentre 2024

Il secondo set di prove sperimentali condotte presso il laboratorio EUCENTRE di Pavia in collaborazione con MAPEI, nel 2024, ha avuto l'obiettivo di valutare l'efficacia del sistema Electro-Pro 20x nell'incrementare la sicurezza sismica di un campanile in muratura. La struttura, realizzata a scala reale, è stata sottoposta a una serie di test dinamici su tavola vibrante, sia nella configurazione originale (struttura non controllata NC) che con

l'installazione del sistema AMD (struttura controllata C). Successivamente, sono stati effettuati interventi locali di rinforzo strutturale per migliorare ulteriormente la risposta sismica della struttura.

Il campanile testato presentava una pianta quadrata di 2,4 x 2,4 m e un'altezza di 10,6 m. La muratura era composta da mattoni pieni con uno spessore di 39 cm (tre teste), che si riduceva a 25 cm (due teste) nella cella campanaria. La massa totale della struttura, inclusa la fondazione in c.a. di 9,1 tonnellate, era pari a 61,2 tonnellate. La cella campanaria era dotata di due campane in bronzo, installate su putrelle in acciaio ammortate nella muratura, per riprodurre fedelmente la distribuzione di massa tipica di queste strutture storiche. In corrispondenza della base della cella campanaria, è stata collocata un'unità di Electro-Pro 20x solidale all'asse di vibrazione della tavola vibrante.

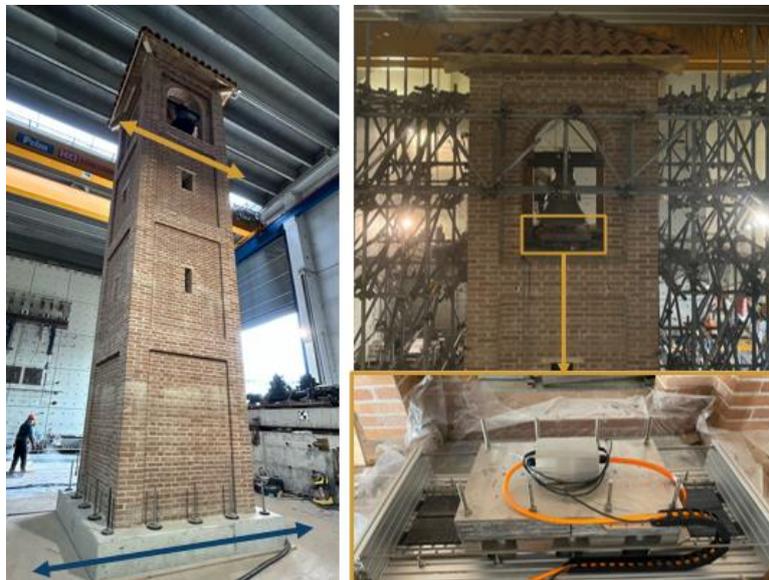


Figura 7 - Il campanile oggetto di prova dinamica su tavola vibrante con indicazione del sistema Electro-Pro 20x nella cella campanaria

Le prove dinamiche condotte sul campanile in muratura hanno considerato l'utilizzo di accelerogrammi derivati dal terremoto dell'Emilia del 2012, e, in una seconda fase, quelli derivanti dal terremoto del Montenegro del 1979, scalandoli secondo un preciso protocollo di prova. Nella prima fase, la struttura è stata sottoposta a test dinamici con il sistema AMD attivo, senza però alcun intervento di rinforzo. Le intensità del sisma dell'Emilia sono state incrementate dal 10% al 60% del segnale originale. Questi test hanno permesso di isolare l'effetto del sistema AMD sulla risposta dinamica della struttura. Ogni ciclo di test è stato accompagnato da prove di caratterizzazione dinamica, utili a monitorare le frequenze naturali e lo smorzamento modale della struttura.

La seconda fase ha introdotto rinforzi strutturali MAPEI, applicati principalmente alla cella campanaria e ai pilastri d'angolo. In questa configurazione, sono stati ripetuti i test con intensità sismiche più elevate, raggiungendo fino al 130% del segnale originale per il sisma dell'Emilia, mentre, per il sisma del Montenegro, si è operato su un range

compreso tra il 25% e il 110% del segnale originale. L'obiettivo era verificare l'efficacia combinata di AMD e rinforzi nel migliorare le prestazioni sismiche e ridurre i danni strutturali.

I test sperimentali hanno evidenziato miglioramenti significativi nella risposta dinamica della struttura. Con l'implementazione del sistema AMD, il campanile ha mostrato una riduzione delle oscillazioni e degli spostamenti massimi fino al 40% rispetto alla configurazione senza dispositivo attivo. Questa mitigazione ha comportato una diminuzione diretta delle sollecitazioni dinamiche, migliorando la stabilità e il comportamento globale della struttura. Un ulteriore risultato rilevante è stato l'aumento dello smorzamento modale, che ha raggiunto incrementi fino al 70% grazie all'attivazione del sistema AMD. Questa capacità di dissipazione energetica ha consentito di limitare i danni strutturali, riducendo l'apertura di fessure nella muratura. Durante i test, il campanile ha mantenuto un comportamento integro, con fessurazioni leggere concentrate principalmente nella cella campanaria, anche per intensità sismiche elevate. Le ispezioni effettuate tra i test hanno mostrato un'evoluzione del danno significativamente più contenuta nei test con AMD attivo. Le fessurazioni rilevate nella muratura sono rimaste minime fino a intensità del 40%. In assenza del dispositivo, la struttura ha invece subito danni più significativi, tra cui l'apertura di fessure diagonali ai piani superiori e nei pilastri d'angolo e alla base, con un'evidente compromissione della stabilità.

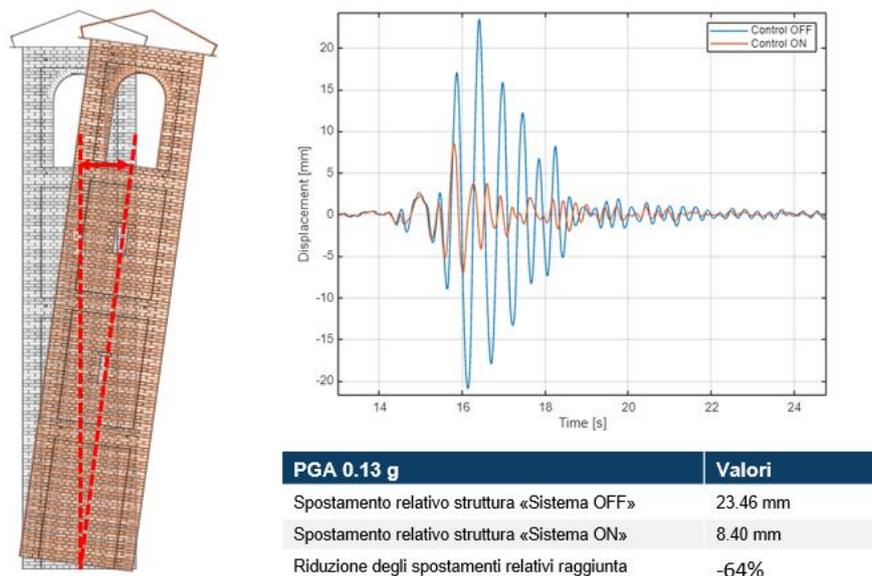


Figura 8 - Evidenze sperimentali a seguito della prima fase di sperimentazione: confronto tra struttura controllata e non controllata in corrispondenza del 60% dell'azione sismica di riferimento

L'aggiunta di rinforzi strutturali nella seconda fase di test ha ulteriormente migliorato le prestazioni, riducendo gli spostamenti in sommità fino al 70% rispetto alla configurazione originaria e prevenendo l'insorgere di danni significativi anche per intensità sismiche superiori al 100% dell'input registrato.

Questi risultati hanno dimostrato l'efficacia del sistema Electro-Pro 20x nel migliorare la risposta sismica delle strutture in muratura, rendendolo una soluzione innovativa per la protezione sismica di edifici storici e monumentali. La combinazione del sistema AMD con interventi di rinforzo localizzato rappresenta un approccio versatile e non invasivo per la mitigazione dei rischi sismici.

5. Il metodo di progettazione di sistemi AMD-ISAAC

Come menzionato in precedenza, i test sperimentali condotti in Eucentre 2021 su I-Pro 1 hanno guidato lo sviluppo di un metodo di calcolo basato su software FEM per la progettazione dei sistemi AMD con un controllo velocity-feedback, Eq. (1). Questa pratica, basata su un'analisi di pre-processing ed una di post-processing, è fondamentale per gestire la progettazione degli interventi di retrofit degli edifici con sistemi di controllo attivo.

5.1 Analisi di pre-processing con software FEM

Considerando la logica implementata negli AMD di ISAAC, è importante notare che l'effetto dell'azione di un asse inerziale del sistema AMD può essere simulato tramite un semplice smorzatore viscoso equivalente. Infatti, la legge costitutiva di uno smorzatore viscoso esprime una proporzionalità lineare diretta tra la velocità del punto di installazione appartenente alla struttura e la forza di controllo attraverso il suo coefficiente di smorzamento

$$F = c \cdot v^\alpha = c \cdot v \quad (2)$$

Grazie a questa analogia, l'effetto della forza di controllo di un sistema AMD con logica di controllo a feedback in velocità può essere modellato in un'analisi strutturale FEM attraverso un equivalente smorzatore viscoso "ancorato al cielo", in cui il Guadagno Gain G dell'Eq. (1) è rappresentato dalla costante c (Figura).

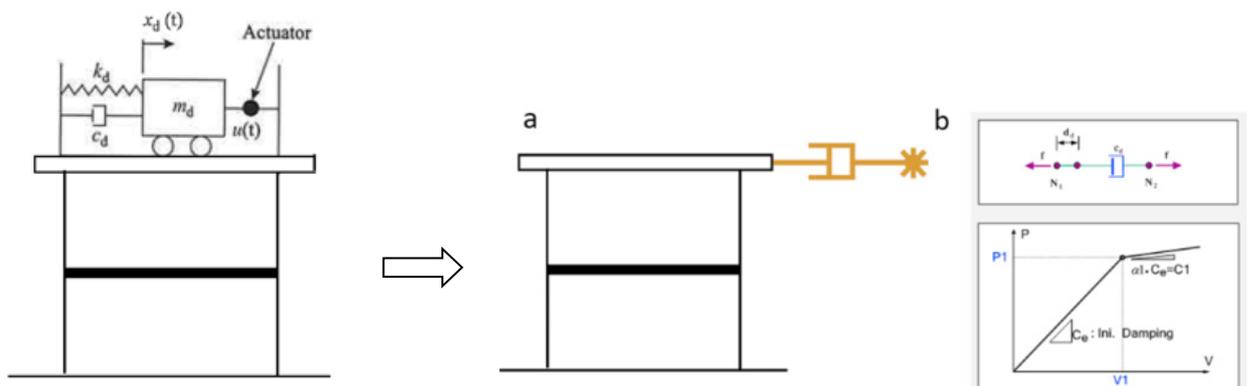


Figura 9 - Analogia tra il sistema AMD con legge Skyhook e un dissipatore viscoso equivalente:

a) utilizzo di link dashpot in un software FEM; b) impostazione dei parametri del link

L'affidabilità di questo approccio è dimostrata in [3] e in [4], dove i risultati della campagna sperimentale in Eucentre 2021 sono stati confrontati con quelli numerici, ottenuti da un modello FEM della struttura, utilizzando l'analogia sopramenzionata. La figura 10 mostra che i risultati della simulazione numerica relativi agli spostamenti orizzontali dei solai dell'edificio sono in eccellente accordo con i risultati sperimentali raccolti.

Se il software lo permette, è anche possibile fissare al dashpot-link un limite superiore alla forza massima erogabile dall'AMD che si sta simulando, corrispondente al dato di targa dell'asse inerziale (22 kN per Electro-Pro 20x). Chiaramente, l'analisi di riferimento per la progettazione dei sistemi AMD è la time history analysis.

Inoltre, in [5] stato descritto un test di laboratorio condotto presso l'ISAAC Lab per confrontare la forza di controllo erogata da un AMD simulato in un'analisi FEM con la forza di controllo reale erogata dal corrispondente prototipo reale di AMD. L'AMD è stato testato in condizioni quasi reali ed è stato dimostrato che la simulazione dell'AMD tramite un collegamento tipo smorzatore (dashpot-link) nell'analisi FEM riproduce esattamente la forza di controllo erogata dal corrispondente AMD reale.

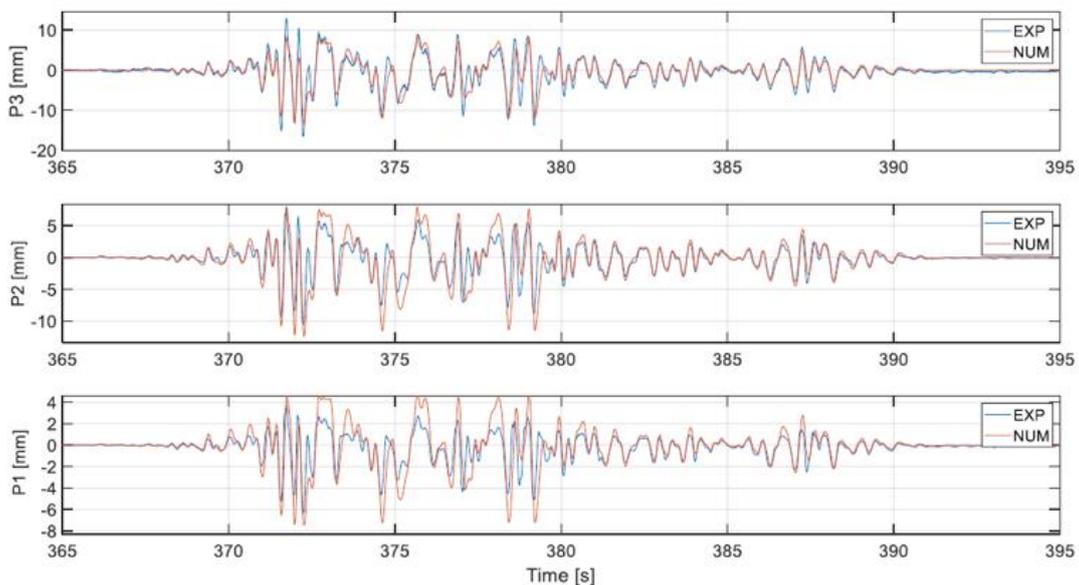


Figura 10 - Estratto da [3]: campagna Eucentre 2021, ottimo accordo tra i risultati sperimentali vs. numerici ottenuti tramite analisi FEM che adotta il metodo di calcolo qui presentato

5.2 Analisi di post-processing con Check Forces Tool (CFT)

Dal momento che l'approccio di modellazione con un dashpot link in ambiente FEM è teso a simulare semplicemente l'effetto che l'asse inerziale trasferisce alla sottostruttura in termini di forza di controllo, si può affermare che non si tenga conto delle prestazioni della massa mobile dell'asse in termini di spostamento e velocità durante l'intera analisi della storia temporale. Questi limiti cinematici non possono essere superati in condizioni operative reali perché dipendono strettamente dalle caratteristiche del motore impiegato, quindi, se l'effetto ideale simulato richiede prestazioni dell'attuatore e della macchina non consentite, la forza di controllo reale erogata potrebbe ridursi significativamente, il sistema AMD potrebbe perdere efficienza e, come conseguenza più importante, l'analisi FEM eseguita perderebbe affidabilità. In tal caso, poiché la forza reale erogabile non coincide con quella ideale simulata, l'analisi FEM non sarebbe più predittiva.

Per queste ragioni, il processo di progettazione deve considerare un'analisi aggiuntiva con il software CFT. La forza di controllo simulata viene elaborata in questo software per derivare le richieste di velocità e spostamento massimi

della massa mobile durante i terremoti di progetto. Questi parametri cinematici descrivono le richieste di movimento della massa mobile tramite semplici integrazioni del segnale di accelerazione.

Tutte le specifiche tecniche della macchina vengono considerate e il comportamento reale dell'AMD viene simulato cercando di riprodurre il profilo di forza in ingresso ricevuto. Durante il processo, una serie di output relativi alle prestazioni del dispositivo, come forza effettiva, massa, accelerazione e velocità, tensione e corrente richiesta, vengono calcolati.

Questo consente agli utenti di verificare se il collegamento tipo smorzatore nel modello FEM rappresenta accuratamente il dispositivo reale, valutando l'affidabilità dei risultati. Inoltre, la conoscenza della domanda massima di spostamento della massa mobile per ogni analisi della storia temporale consente di progettare la lunghezza corretta della corsa della macchina. Più pesante è la massa mobile adottata, più corta sarà la lunghezza della corsa della macchina. Infine, una volta validate le analisi strutturali FEM, il progettista può calcolare le azioni sismiche sugli elementi strutturali e procedere con le verifiche di sicurezza relative allo scenario dello Stato Limite considerato nell'analisi (figura 11).

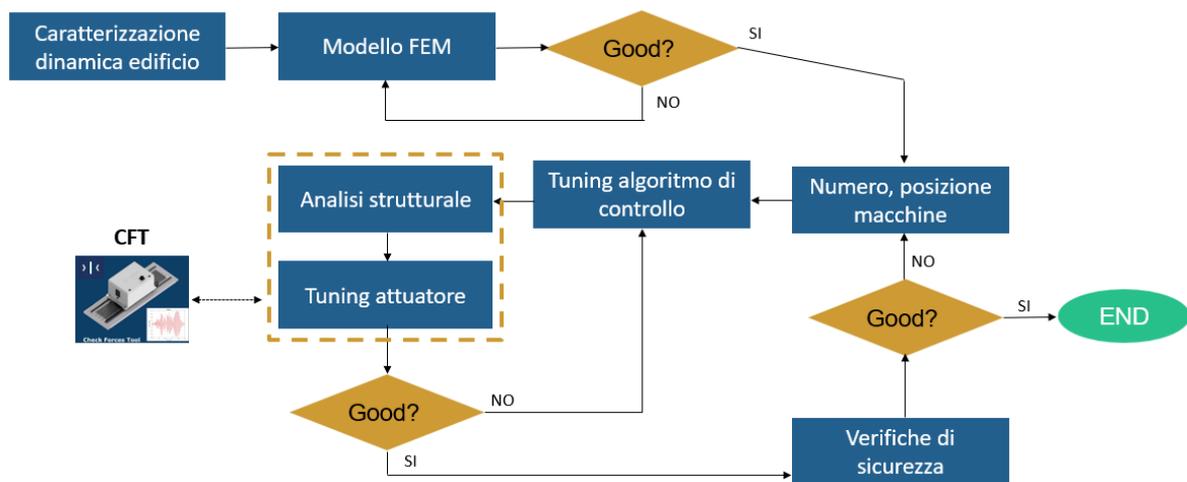


Figura 11 - Diagramma di flusso del metodo di progettazione

Il software CFT è scaricabile liberamente dal sito di ISAAC antisismica ed è fruibile da tutti gli utenti. ISAAC offre supporto nell'analisi strutturale relativa all'intervento con AMD e dimensiona in prima persona l'impianto e gli assi inerziali del sistema in progettazione.

6. Caso applicativo: retrofit antisismico di un edificio scolastico

6.1 Descrizione del contesto e dell'edificio

Grazie alla capacità di miglioramento la sicurezza sismica degli edifici esistenti, in modo sostenibile, rapido e non invasivo, gli interventi di miglioramento o adeguamento sismico eseguiti da ISAAC rientrano nel Piano Nazionale di Ripresa e Resilienza (P.N.R.R.) italiano. Nello specifico, si riporta di seguito l'intervento di miglioramento eseguito sulla scuola primaria "F. Di Bartolo", situata nel comune di Buti (PI), Italia.

L'edificio presentava diverse carenze sismiche. Il fattore di rischio sismico iniziale, ξ_E (definito secondo il §8.3. del Codice delle Costruzioni italiano, D.M. 17/01/2018), prima di qualunque intervento, era pari a 0,51. L'obiettivo dell'intervento era di raggiungere un fattore di rischio pari a 0,60, miglioramento sismico. Per approfondire la dinamica strutturale, è stata condotta un'analisi modale sperimentale.

Il complesso scolastico si compone di tre edifici distinti: il corpo principale, identificato come edificio A, una struttura di ampliamento, edificio B, e la palestra. Gli interventi di adeguamento sismico e l'installazione dei dispositivi di controllo attivo hanno interessato esclusivamente gli edifici A e B, mentre la palestra è rimasta esclusa dal programma di retrofit. L'edificio A, che costituisce il corpo centrale dell'intero complesso scolastico, costruito nel 1965, presenta una pianta rettangolare con dimensioni di 33 x 14 m, per una superficie complessiva di 462 m² per piano. La struttura si sviluppa su tre piani fuori terra, raggiungendo un'altezza totale di 11 m, ed è caratterizzata da una copertura a falde inclinate con la presenza di un sottotetto. L'edificio B, ampliamento realizzato nel 1979, ha una pianta di forma irregolare, inscrivibile in un rettangolo di 11 x 9 m, con una superficie media di circa 100 m² per piano. La struttura si articola su due piani fuori terra e si distingue per una copertura piana. I due edifici sono separati da un giunto termico di 5 cm, ma la loro vicinanza ha richiesto un'attenta valutazione delle potenziali interazioni dinamiche durante eventi sismici (figura 12).



Figura 12 - Immagine satellitare della scuola e prospetto dell'edificio principale (edificio A)

6.2 Progettazione dell'intervento di retrofit

Il cuore dell'intervento di adeguamento ha riguardato il collegamento rigido tra gli edifici A e B e l'installazione di otto dispositivi AMD sulla copertura dell'unità strutturale risultante. Gli AMD sono stati posizionati come illustrato nella configurazione presentata in Figura , con quattro dispositivi (AMD 1, 2, 3 e 8) di lunghezza pari a 2,50 m e i restanti quattro con una lunghezza pari a 3,50 m. Per tutti, la massa mobile è pari a 750 kg ciascuno.

Attraverso le analisi condotte, si è dimostrato che questa configurazione non solo è in grado di raggiungere l'obiettivo di indice di vulnerabilità sismica, ξ_E , pari a 0,60, ma lo supera, portandolo a un valore di 0,85.

L'installazione degli AMD è stata progettata per essere non invasiva: i dispositivi sono stati collocati nel sottotetto dell'edificio A e sul tetto piano dell'edificio B, evitando interferenze con le normali attività scolastiche. Per garantire il raggiungimento delle prestazioni richieste, sono stati inoltre implementati interventi locali di rinforzo su elementi strutturali chiave dell'edificio A, tra cui sei pilastri a tutta altezza e due travi dell'ultimo piano. Questi elementi sono stati rinforzati utilizzando malta cementizia fibrorinforzata ad alte prestazioni, progettata per ripristinare e migliorare la capacità resistente degli elementi danneggiati (Figura).

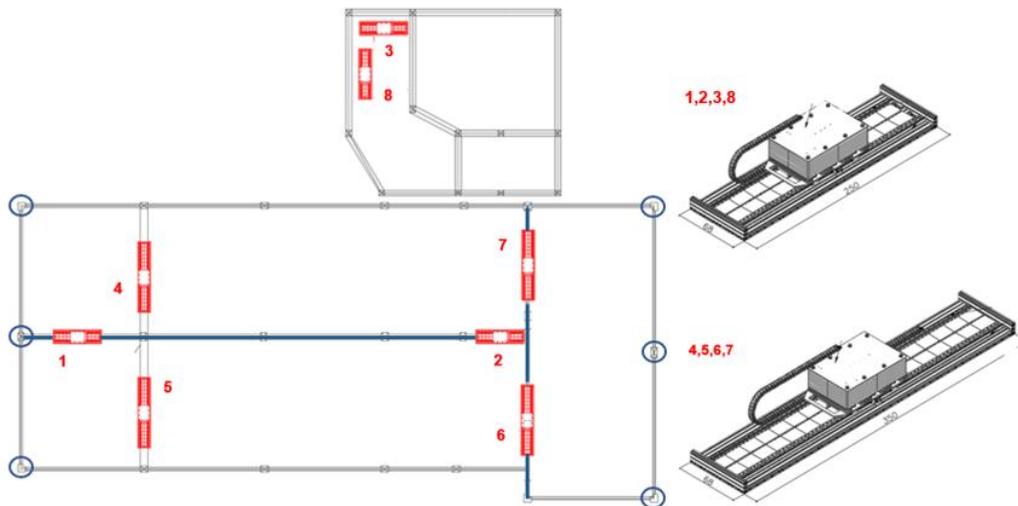


Figura 13 - Posizionamento dei dispositivi sulla pianta del tetto (sinistra) con interventi locali evidenziati in linea/cerchio blu; dispositivi da 2,50 m e dispositivi da 3,50 m (destra)

L'approccio adottato ha permesso di ridurre significativamente l'invasività dell'intervento rispetto ai metodi tradizionali, come l'inserimento di pareti controvento o sistemi di controventamento, garantendo al contempo una rapida esecuzione e una minima interruzione delle attività operative. Complessivamente, l'installazione ha richiesto una durata di 5 settimane (figura 14).



Figura 14 - Immagini dal cantiere: AMD nel sottotetto del corpo A ed in copertura del corpo B

6.3 Aspetti numerici e progettuali

Al fine di conoscere il reale comportamento della struttura con il sistema di controllo attivo applicato, si sono eseguite una serie di analisi dinamiche non lineari. La pericolosità sismica del sito è stata valutata utilizzando i parametri spettrali definiti dalle NTC18, considerando il sottosuolo classificato come categoria "B" e le condizioni topografiche "T2". Per ogni stato limite (operativo - SLO, di servizio - SLD e ultimo - SLV), sono stati generati set di sette accelerogrammi artificiali di 25 secondi ciascuno, con un passo temporale di 0,005 s. Questo approccio, pur aumentando i tempi di calcolo, permette di considerare i valori medi dei risultati, come previsto dalle normative. Le accelerazioni al suolo di picco (PGA) utilizzate per ciascuno stato limite sono $PGA_{SLV} = 0.20$, $PGA_{SLD} = 0.085g$.

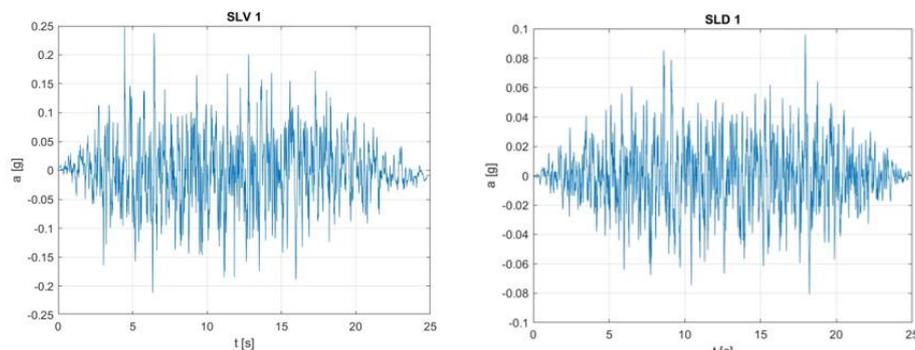


Figura 15 - Esempi di accelerogrammi impiegati nell'analisi strutturali

Il modello della configurazione pre-retrofit è stato sviluppato utilizzando dati sui materiali e informazioni ottenute da test sul campo. Gli edifici A e B sono stati modellati come strutture separate, con otto elementi "gap-link" per simulare eventuali effetti di martellamento durante eventi sismici. Le analisi dinamiche sul campo, incluse le

analisi modali operative, sono state utilizzate per calibrare il modello, considerando l'effetto delle tamponature e la rigidità dei solai.

Nella configurazione post-retrofit, gli edifici A e B sono stati considerati un'unica struttura rigida, collegati da un sistema di connessione progettato per assorbire le forze trasmesse. Gli AMD sono stati inclusi nel modello numerico tramite elementi dashpot, che rappresentano un ammortizzatore viscoso non lineare.

Gli elementi strutturali principali, come travi e pilastri, sono stati modellati con un approccio a non linearità distribuita per rappresentare il comportamento del calcestruzzo e dell'acciaio. Anche i diaframmi rigidi sono stati inclusi nel modello, questo per garantire una rappresentazione accurata della risposta globale della struttura, e sono stati modellati con elementi diagonali calibrati per riprodurre il comportamento osservato nei test dinamici sul campo. La Figura mostra una vista tridimensionale del modello FEM post-retrofit e il dettaglio della connessione rigida tra gli edifici.

Sfruttando la possibilità di programmare la legge di controllo del sistema AMD a seconda del livello di intensità del sisma considerato, la costante di proporzionalità (Gain, G) è stata calibrata in modo da ottimizzare la risposta degli assi inerziali per ciascuno degli Stati Limite di riferimento. I valori di G utilizzati per le analisi sono riportati nella Tabella 1.

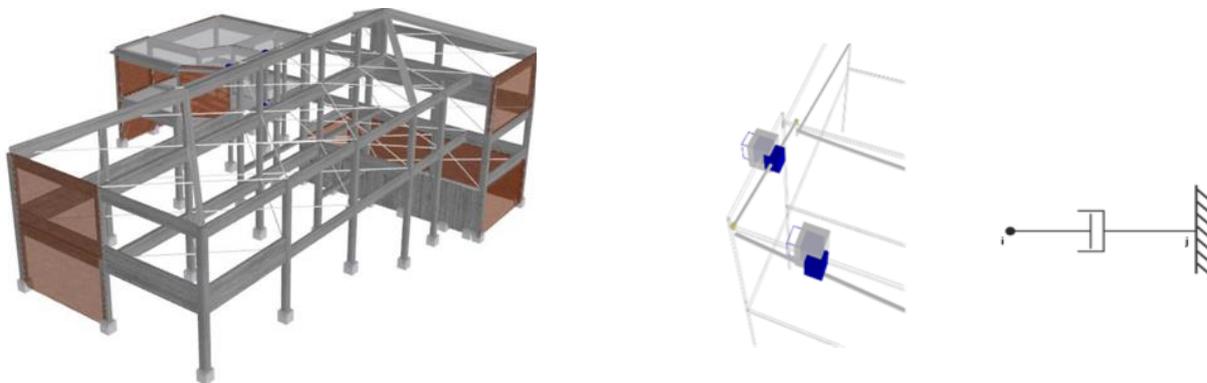


Figura 16 - Modello FEM per l'analisi strutturale e modellazione degli AMD attraverso dashpot link

Tabella 1. Valori del Gain per gli AMD in direzione X e Y ottimizzati per ciascun Stato Limite.

Limit State	SLO	SLD	SLV
G_x [kNs/m]	310	300	240
G_y [kNs/m]	240	230	180

Le analisi non lineari del tempo sono state condotte per i tre stati limite (SLO, SLD, SLV) nelle configurazioni pre e post-retrofit. In fase pre-retrofit, i due edifici sono stati analizzati separatamente con giunti gap-link, evidenziando un indice di rischio sismico (ξ_E) pari a 0,51 per l'edificio A e 0,77 per l'edificio B, con il valore più basso utilizzato per le verifiche di vulnerabilità. Nella configurazione post-retrofit, che include il collegamento rigido tra gli edifici

e il sistema AMD, l'analisi ha mostrato un incremento significativo dell'indice di rischio, raggiungendo un valore di 0,85, superiore all'obiettivo progettuale di 0,60.

Le analisi SLV sono state utilizzate anche per determinare le forze di impatto tra gli edifici nella configurazione pre-retrofit e progettare i collegamenti rigidi nella configurazione post-retrofit. In quest'ultima, i collegamenti sono stati modellati con otto AMD, e la forza assiale massima durante l'analisi è stata di 240 kN. Anche le analisi SLD e SLO hanno confermato il miglioramento delle prestazioni strutturali. In particolare, le analisi SLO hanno mostrato una significativa riduzione degli spostamenti inter-piano (drift), come illustrato nella La riduzione degli spostamenti inter-piano post-retrofit, evidenziata per entrambi gli edifici, conferma l'efficacia del sistema AMD.

Tabella 2. Valori di drift per lo SLD: pre-retrofit e post-retrofit

Piano	Drift medio Pre-retrofit	Drift medio Post-retrofit	Differenza	Riduzione
	[mm]	[mm]	[mm]	[%]
P2	6.69	3.00	3.69	55%
P1	6.96	4.63	2.34	34%
P0	3.29	2.74	0.55	17%

Gli AMD sono stati simulati come smorzatori, ed è stato necessario verificare se i dispositivi reali avessero potuto sostenere le forze calcolate senza superare i limiti tecnici. Mediante il software ISAAC CFT si è quindi analizzata la storia temporale delle forze ottenute dai dashpot links, simulando il comportamento reale degli AMD e calcolando parametri chiave (forza, velocità, accelerazione). Questo ha permesso di validare la corrispondenza tra modello numerico e dispositivo reale, garantendo affidabilità (figura 17).

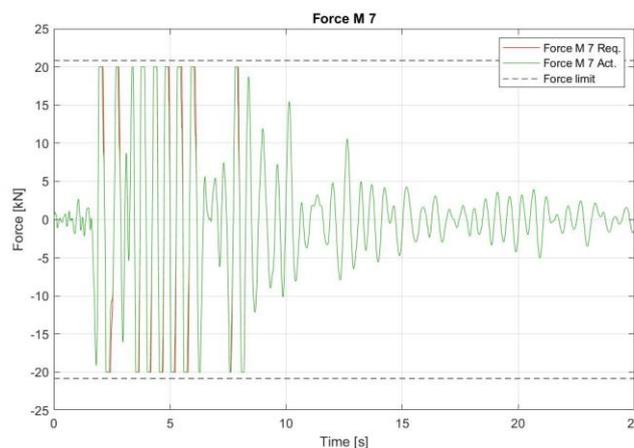


Figura 17 - Esempio di forza effettiva (curva verde) generata dal dispositivo reale simulato con CFT e curva ottenuta dal modello FEM (curva rossa). La sovrapposibilità indica la corretta progettazione dell'AMD e la predittività dell'analisi FEM condotta

6.4 Aspetti economici

In un'analisi costi-benefici, i costi del retrofit sismico comprendono sia le spese dirette che quelle indirette. I benefici principali derivano dai risparmi associati alla riduzione dei potenziali danni da terremoto, considerando sia eventi sismici probabili sia i costi legati all'interruzione delle attività dell'edificio. Per gli edifici residenziali, i costi indiretti includono il trasferimento temporaneo degli occupanti, mentre per quelli non residenziali riguardano la perdita di opportunità economiche (hotel, magazzini, scuole, ospedali, ecc.).

Un approccio reale dovrebbe quindi stimare i costi indiretti includendo le spese per il trasferimento degli occupanti, le valutazioni tecniche, la progettazione e l'esecuzione degli interventi. Nel caso specifico, il sistema AMD di ISAAC ha eliminato i costi indiretti legati al trasferimento all'interruzione di attività della struttura, distinguendosi come una soluzione più economica (588.800 €) rispetto ad altre tecnologie di retrofit, che avrebbe comportato comportano spese indirette significative (superiori a 1 M€).

7. Conclusioni

Gli Active Mass Damper rappresentano una soluzione innovativa e versatile per il miglioramento della sicurezza sismica degli edifici. Grazie alla loro capacità di adattarsi in tempo reale alle sollecitazioni dinamiche, gli AMD si distinguono per l'efficacia nel ridurre gli spostamenti relativi, incrementare lo smorzamento e minimizzare i danni strutturali. Le prove sperimentali e le simulazioni numeriche condotte hanno validato il sistema, confermandone l'affidabilità e la predittività in diverse configurazioni strutturali e condizioni operative. Inoltre, la tecnologia sviluppata da ISAAC garantisce interventi non invasivi e rapidi, eliminando costi indiretti associati alle interruzioni delle attività e al trasferimento degli occupanti, soprattutto per le strutture strategiche come ospedali, edifici industriali e scuole, come il caso applicativo presentato. Questo approccio rende gli AMD una scelta sostenibile ed economicamente vantaggiosa per il retrofit sismico, contribuendo a migliorare la resilienza del patrimonio edilizio.

Bibliografia

- [1] Rosti M, Cii S, Bussini A, Calvi PM, Ripamonti F. “Design and validation of a hardware-in-the-loop test bench for evaluating the performance of an active mass damper”. *Journal of Vibration and Control*, 2022. DOI:10.1177/10775463221111262.
- [2] Rebecchi G., Calvi P. M., Bussini A., Dacarro F., Bolognini D., Grottoli L., Rosti M., Ripamonti F., Cii S. Full-scale shake table tests of a reinforced concrete building equipped with a novel servo-hydraulic active mass damper, *Journal of Earthquake Engineering*, 2022. DOI: 10.1080/13632469.2022.2121338
- [3] Rebecchi G., Bussini A. La protezione sismica attiva: prove sperimentali, simulazioni numeriche e strumenti per la progettazione. *Progettazione sismica – Eucentre*. 2021. Vol. 13, N. 6. E-ISSN 2532-1560. <https://doi.org/10.7414/PS.13.1.6>.
- [4] Rebecchi G., Menardo F., Rosti M., Bussini A., Calvi P.M. Full-scale shake table tests of a r.c. building equipped with an active mass damper: experimental results and numerical simulation, *Compdyn 2023, 9th ECOMAS Thematic Conference on Computational Methods in Structural Dynamics and Earthquake Engineering*, Athens, Greece, 12-14 June 2023.
- [5] Menardo F., Rebecchi G., Rosti. M., Cii S., G. Ducoli, G. D’Agostino, A. Bussini, P.M. Calvi, M.A Lenzi, A novel active control system for the seismic protection of structures: technology and application. (2024). 18th World Conference on Earthquake Engineering, 30th June-5th July 2024, Milan, Italy.

Uso di data logger e calcolo dell'Umidità Assoluta. Un ampliamento dell'approccio per l'indagine dei fenomeni condensativi con formazione di muffe in ambienti chiusi

Ing. Marco M. Parrini^a, Arch. Anna Isabella Piazza^a

^a Studio di Ingegneria Parrini

* Corresponding author: studio@marco-parrini.com

Abstract: Si presenta in questo articolo, in continuità con quello dal titolo “*Uso di data logger per l'indagine dei fenomeni condensativi con formazione di muffe in ambienti chiusi*”, pubblicato sul numero 7 (anno 2020) del medesimo Magazine, un ulteriore passaggio, consistente nel calcolo dell'Umidità Assoluta, a partire da dati rilevati tramite sonde datalogger¹.

Si tratta quindi di un affinamento ed approfondimento in merito all'uso di questi dispositivi per le indagini dei sopracitati fenomeni all'interno di spazi chiusi con, inoltre, una particolare attenzione all'inquadramento della gestione degli ambienti da parte dell'utenza.

Si presenta anche un caso studio applicativo in ambito residenziale.

Keywords:

Condensa; Muffa; Temperatura ambiente; Umidità assoluta

1. Premessa

Nel precedente articolo pubblicato su MASTER Magazine del luglio 2020 [1], si era fatto riferimento all'individuazione di una corretta metodologia di indagine, svolta con gli strumenti appropriati, per la valutazione dei fenomeni condensativi, in casi di formazione di muffa in edifici esistenti, valutando soprattutto i parametri di temperatura dell'aria, temperatura di rugiada e umidità relativa.

Con un particolare focus sul comportamento dell'utenza, in questo articolo, si farà riferimento all'introduzione di un ulteriore parametro, ossia l'umidità assoluta.

Il punto di partenza è sempre un'elaborazione di dati forniti da sonde data logger, tralasciando l'aspetto relativo alla temperatura di rugiada; l'abbinamento dell'utilizzo di una termocamera per l'individuazione di ponti termici è sempre considerato.

¹ Nel testo si fa sempre riferimento esclusivamente alle sonde data logger monitoranti la temperatura dell'aria, la temperatura di rugiada e l'umidità relativa. In particolare, sono stati utilizzati data logger marca Lascar, modello EL USB.

La metodologia di indagine precedentemente presentata [1] risulta quindi impreziosita da un parametro, l'umidità assoluta, che, seppur calcolato in modo semplice – e quindi non particolarmente dispendioso né dal punto di vista della laboriosità dell'indagine né da quello economico – risulta particolarmente efficace per un confronto con i limiti imposti a livello normativo.

2. Metodo

Come riportato nel precedente articolo [1], lo sviluppo iniziale dei fenomeni fungini negli ambienti interni è interessato da due momenti principali: il deposito delle spore e la proliferazione dei funghi.

Entrambe le situazioni sono strettamente legate al parametro dell'umidità presente nell'ambiente.

Sulle superfici, infatti, le spore si depositano dove vi è presenza di umidità; dalle spore si sviluppano poi funghi che proliferano nel momento in cui l'umidità relativa sulla superficie del materiale si mantiene per un tempo prolungato attorno ad un valore pari a circa il 70%.

Le sonde datalogger sono particolarmente utili per valutare i parametri ambientali, poiché permettono di rilevare:

- Temperatura dell'aria (T)
- Temperatura di rugiada (T_{rugiada})
- Umidità relativa (UR)

A fronte dei dati ricavati dai datalogger, particolarmente efficace per la valutazione della gestione dell'unità immobiliare per mezzo di un solo parametro che associa temperatura dell'aria (T) ed umidità relativa (UR%), ossia il valore di Umidità Assoluta (UA) [2].

Noti, infatti, i valori di T (temperatura) e UR (umidità relativa) possiamo calcolare il valore di x (umidità assoluta) per ciascun istante della misura dei nostri datalogger.

Di seguito si presenta una spiegazione per il concetto di UA e la differenza con quello di UR.

Se consideriamo l'aria presente all'interno di un ambiente in esame come composta solo da aria secca ed umidità (vapore acqueo), in tal caso l'**umidità assoluta** (indicata con il termine "x") è la variabile che misura quanti grammi di vapore acqueo sono contenuti all'interno di 1 Kg di aria ad una Temperatura e ad un valore di Pressione noti.

Si ha la seguente relazione:

$$x = (18/28,96) \cdot (P_{\text{vap}} / (P_{\text{atm}} - P_{\text{vap}})) \cdot 1000$$

dove:

18/28,96 rappresenta il rapporto dei pesi molecolari (g/mol) dell'acqua (H₂O) e dell'aria secca rispettivamente²

P_{vap} è la pressione parziale del vapore d'acqua nella miscela misurata in Pa

P_{atm} è la pressione della miscela misurata pari alla pressione atmosferica = 101.325 Pa

² L'aria secca è considerata una miscela dei seguenti gas: 78,084% azoto molecolare (N₂), 20,9476 di ossigeno molecolare (O₂), 0,934% di Argon (Ar), 0,0314% di anidride carbonica (CO₂), 0,003% di altre componenti trascurabili.

L'**umidità relativa** può essere definita come il contenuto di vapore percentuale nell'aria rispetto al massimo contenuto possibile alla stessa temperatura ed è data dalla seguente relazione:

$$UR\% = P_{\text{vap}} / P_{\text{sat}}$$

dove:

P_{sat} è la pressione a cui (a temperatura costante) l'aria diviene satura di vapore di acqua. Si misura in Pa ed è ricavabile in funzione della Temperatura dell'aria misurata in °C con la formula (valida per $T \geq 0^\circ\text{C}$)

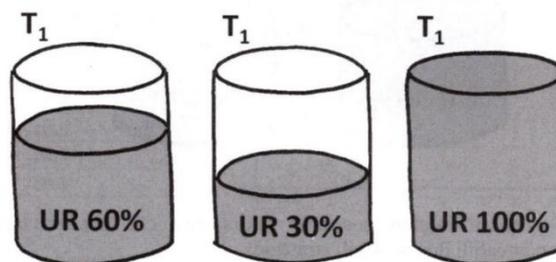
$$P_{\text{sat}} = 610,5 \cdot e^{[(17,269 \cdot T) / (237,3 + T)]}$$

L'utilizzo del valore di x , in luogo di UR%, consente di verificare, a parità di valore di umidità assoluta, come varia il valore di UR% in funzione di una variazione di Temperatura.

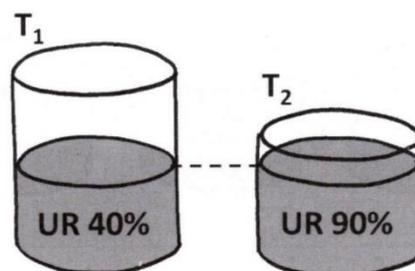
Per spiegare questi valori, consideriamo innanzitutto un volume di aria umida ad una certa temperatura: questo concetto può essere paragonato a quello di un recipiente con una certa altezza (la quale rappresenta la temperatura dell'aria), con all'interno una certa quantità d'acqua (che rappresenta la quantità di vapore contenuta nell'aria)³.

Con riferimento alle figure seguenti possiamo dire che nel primo caso il recipiente è pieno al 60%, nel secondo al 30%, nel terzo il recipiente è pieno al 100%.

La percentuale di liquido contenuta nel recipiente rispetto al massimo possibile rappresenta il concetto di **umidità relativa**.



Per quanto riguarda il concetto di **umidità assoluta**, immaginiamo di prendere due recipienti con altezze differenti (rappresentanti due condizioni climatiche a diversa temperatura dell'aria): in questo caso la stessa quantità di liquido occupa una percentuale differente nei due contenitori. Ciò sta a rappresentare come, a parità di quantità di valore (umidità assoluta), se la temperatura è diversa, si ottengono valori diversi di umidità relativa.



³ Op. cit, pagg. 7-8 [2].

Ciò che è interessante dei valori di umidità assoluta all'interno di un ambiente, calcolati a partire dai dati di temperatura e umidità relativa rilevati dai dispositivi datalogger, è che questi possono essere confrontati con i limiti di legge.

È infatti possibile calcolare i valori limite di Umidità Assoluta, tramite i parametri di Temperatura e Umidità Relativa definiti a livello legislativo, come di seguito indicato:

- limite definito dalla Legge 10: livello di concentrazione di vapore equivalente per un ambiente con 20°C e 50% di UR;
- limite definito dal DLgs 192/05 e s.m.i.: livello di concentrazione di vapore equivalente per un ambiente con 20°C e 65% di UR.

3. Caso studio

Si riporta un caso studio interessante, considerando soprattutto la necessità di valutare la gestione dell'utenza per la ricerca della causa principale del fenomeno condensativo e di formazione di muffa che si era presentato.

Il sito è un appartamento residenziale, all'interno di un condominio, in posizione di angolo nord-est, al quinto e sesto piano (corrispondente al piano sottotetto).

La proprietà ne aveva lamentato presenza di muffa, che durante il sopralluogo era risultata concentrata nel locale igienico del quinto piano e nel sovrastante locale lavanderia al piano sesto. Gli ambienti interessati dalla muffa risultavano esposti a nord e, di fronte, non vi erano edifici o altri elementi caratterizzati da un'altezza in grado di creare alcun tipo di schermatura.

Il condominio, nel suo complesso, risultava avere periodo di costruzione attorno al 2007-2009 ed era dotato di riscaldamento termo autonomo per ciascuna unità immobiliare a destinazione residenziale.

Considerando che era stato commissionato, da parte dell'Amministrazione dell'Immobile, di verificare la sola unità immobiliare in oggetto, risultava poco probabile che ci si trovasse di fronte ad una situazione relativa a cattiva progettazione dell'involucro esterno dell'edificio (in quanto, in questo caso, sarebbe stato ragionevole riscontrare la presenza di diverse unità immobiliari soggette alla formazione di muffa), quanto piuttosto ad una situazione specifica relativa alla singola unità immobiliare.

Il sopralluogo è stato svolto a fine gennaio, quindi nel periodo migliore dell'anno per le analisi su muffe, a causa delle alte differenze di temperatura tra interno ed esterno dell'edificio (considerando le basse temperature esterne invernali e il riscaldamento acceso all'interno degli ambienti residenziali).

Si è quindi valutato opportuno eseguire una indagine igrometrica, al fine di indagare sia lo stato dell'immobile, sia la gestione dell'utilizzo dell'unità immobiliare da parte dell'utenza.

Sono state, pertanto, eseguite le seguenti attività:

- rilievi termografici (effettuati durante il sopralluogo a fine gennaio);
- posizionamento di sonde datalogger per la misura puntuale della temperatura e dell'umidità relativa all'interno dei locali con presenza di muffa e in corrispondenza dello sbarco al piano sesto della scala interna di collegamento tra i due piani dell'unità immobiliare. Il settaggio dei datalogger è stato fatto impostando rilevamenti di temperatura e di umidità relativa a partire dal 30 gennaio fino al 21 febbraio (in modo da avere un periodo di rilevamento congruo), ogni 2 minuti: avere dati con cadenza così ristretta permetteva infatti di rilevare in modo preciso tutti i cambiamenti dei parametri misurati.

Indagine Termografica

L'indagine è stata condotta con termocamera marca FLIR, modello: E 96, num. serie: 90201272. Ne risultò che negli ambienti analizzati erano presenti diversi ponti termici (in particolare in corrispondenza degli infissi e dei nodi tra murature verticali e solai orizzontali) i quali, osservando l'immagine termografica eseguita all'esterno, si può dire caratterizzassero il condominio nel suo complesso, essendo comuni a tutte le unità immobiliari.

Riscontrando il problema della formazione di muffa nella sola unità immobiliare oggetto del presente testo, non risultava possibile imputare la problematica alla sola presenza di ponti termici (comuni a più unità): era necessario quindi ricercare una concausa, valutando innanzitutto l'adeguatezza o meno della gestione da parte dell'utenza per la singola unità immobiliare.

Sonde datalogger

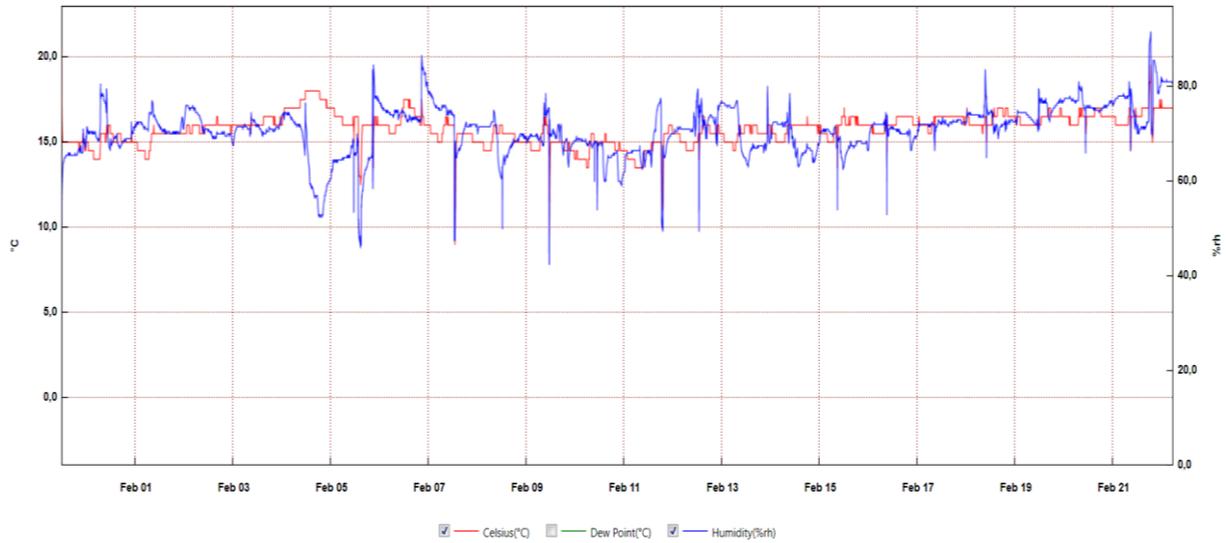
Al fine di identificare le cause della presenza di muffa vennero posizionate diverse sonde tipo datalogger marca Lascar, modello EL-USB 2 per la misura delle seguenti caratteristiche climatiche:

- Temperatura (T)
- Umidità relativa (UR%)

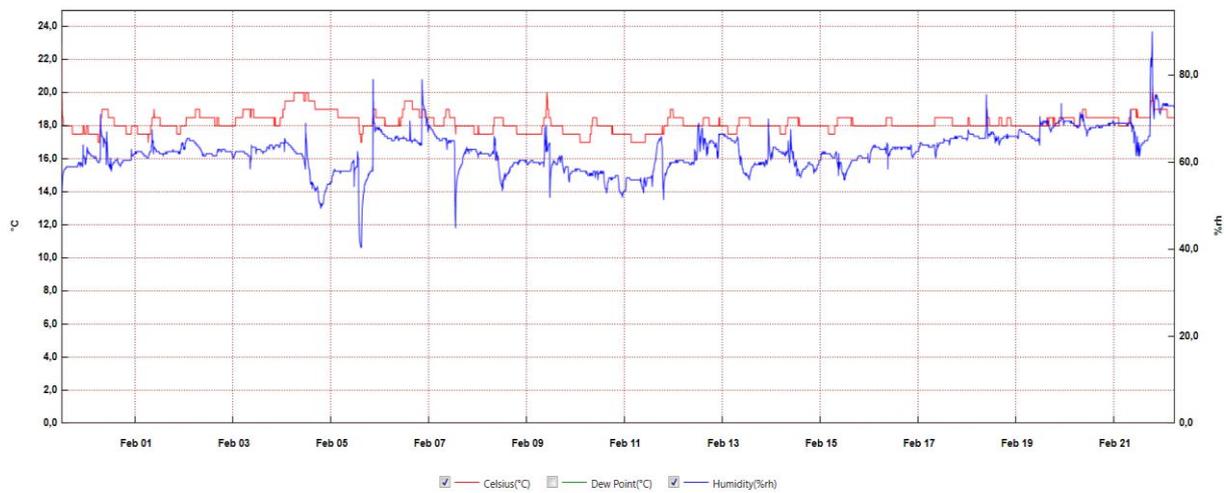
In particolare, n.2 sonde sono state posizionate all'interno del locale igienico del piano quinto, n.1 sonda a ridosso dello sbarco della scala (piano sesto), n.3 sonde nel locale lavanderia al piano sesto, a diverse altezze rispetto al pavimento (a seconda della disponibilità di avere un piano stabile su cui poggiarle).

Di seguito si riportano i risultati delle misure dei 6 datalogger posizionati all'interno dell'unità immobiliare; in rosso vengono indicati i valori della Temperatura, in blu quelli relativi all'Umidità Relativa.

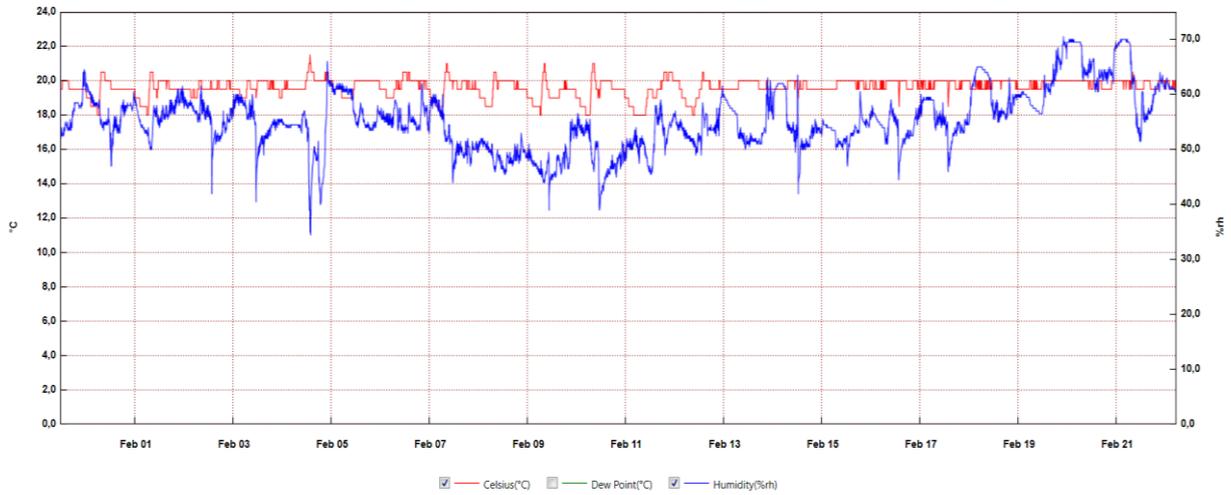
Risultati dalla sonda 1 (finestra bagno, h 100 – piano 5):



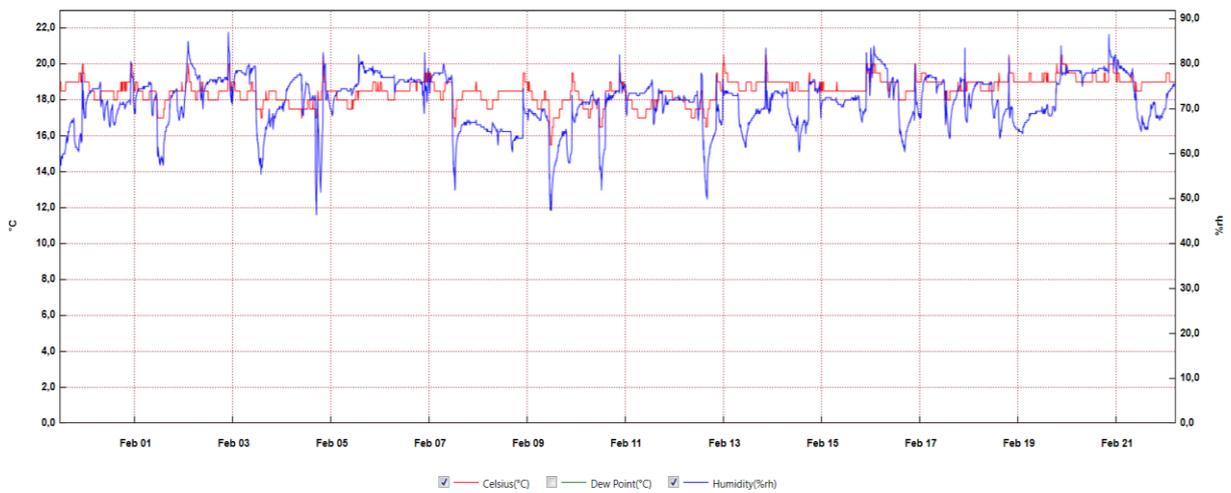
Risultati dalla sonda 2 (vicino a porta bagno, h 100 - piano 5):



Risultati dalla **sonda 3** (sbarco scala, h 90 - piano 6):



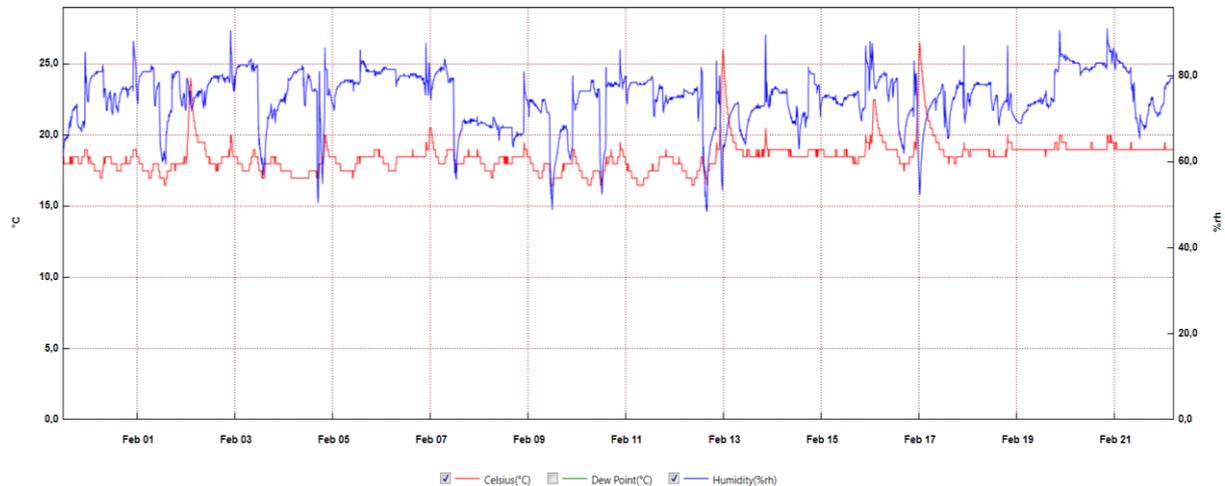
Risultati dalla **sonda 4** (vicino a wc lavanderia, h 70 - piano 6):



Risultati dalla **sonda 5** (su parete confinante con esterno della lavanderia, h 10 cm - piano 6):



Risultati dalla **sonda 6** (su parete confinante con esterno della lavanderia, h 100 cm - piano 6):

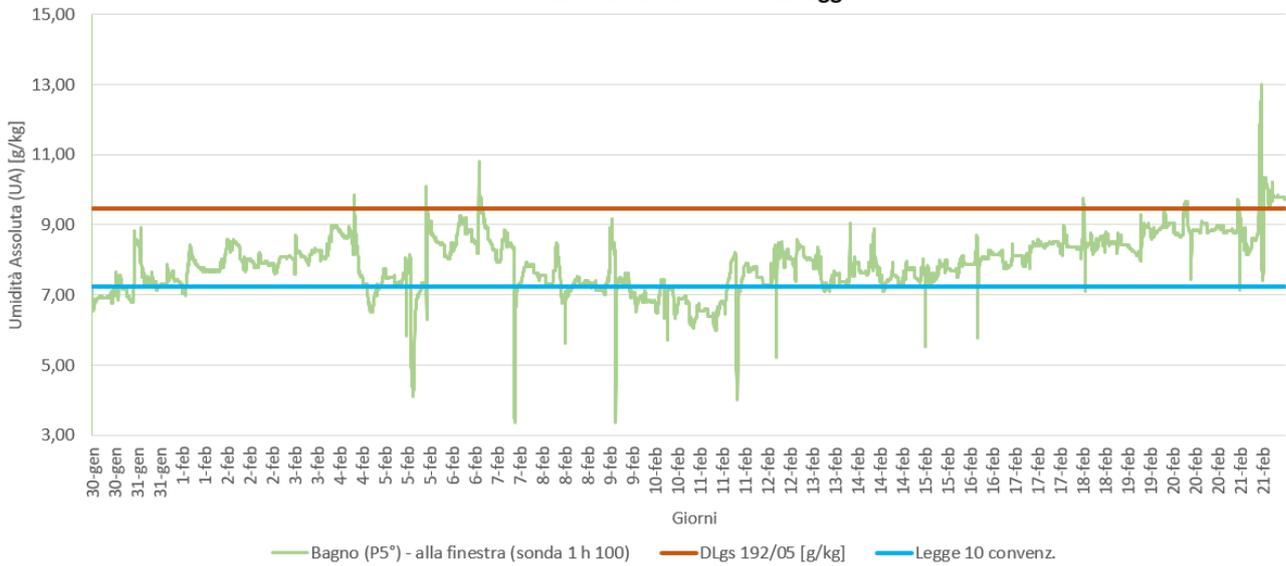


In particolare si sottolinea che, come si può vedere dai grafici sopra riportati, negli ambienti del bagno e della lavanderia, le sonde datalogger hanno spesso rilevato una temperatura che difficilmente tendeva a raggiungere i 20°C, attestandosi in diversi momenti anche al di sotto dei 18°C (con discese fino a 15°C), a differenza di quanto registrato dalla sonda 3 (posizionata sullo sbarco della scala di accesso al piano 6°), dove la temperatura si è attestata più regolarmente attorno ai 20°C.

Di seguito si riportano, per ciascuna sonda datalogger installata, i risultati ottenuti rielaborati in termini di Umidità Assoluta, e confrontati con i limiti legislativi, definiti calcolando l'Umidità Assoluta tramite i parametri sia del D.lgs. 192/05, che della Legge 10/91, riferimenti legislativi vigenti all'atto della costruzione dell'immobile.

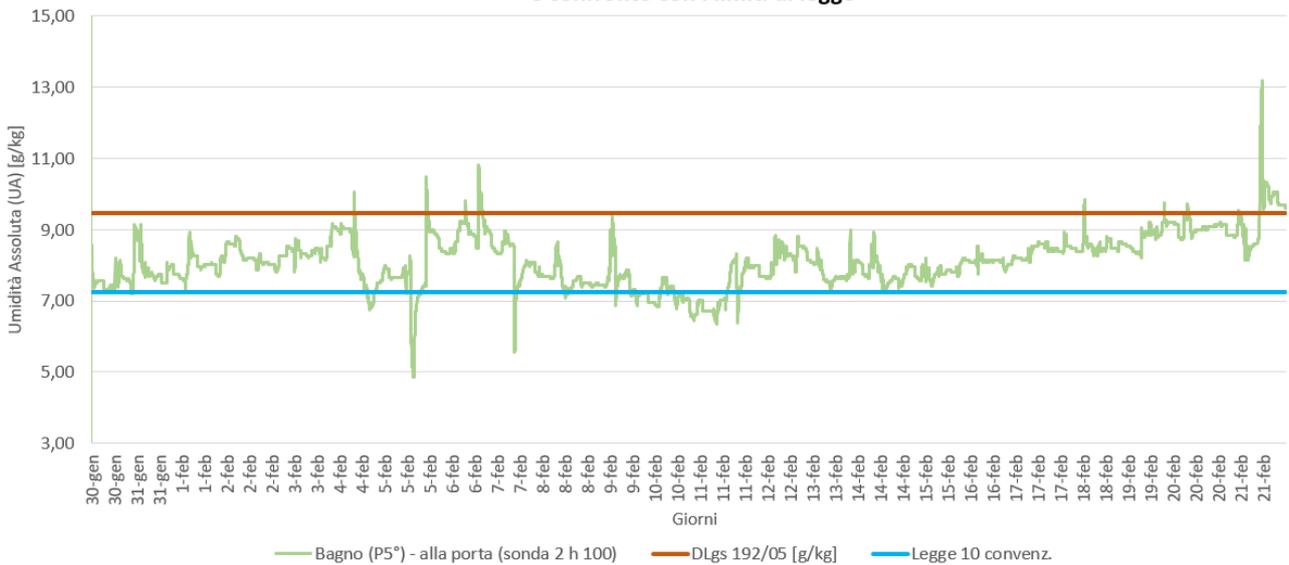
SONDA 1 (Bagno piano 5°, vicino alla finestra)

Umidità Assoluta calcolata per SONDA 1 (Bagno piano 5°, h 100)
e confronto con i limiti di legge



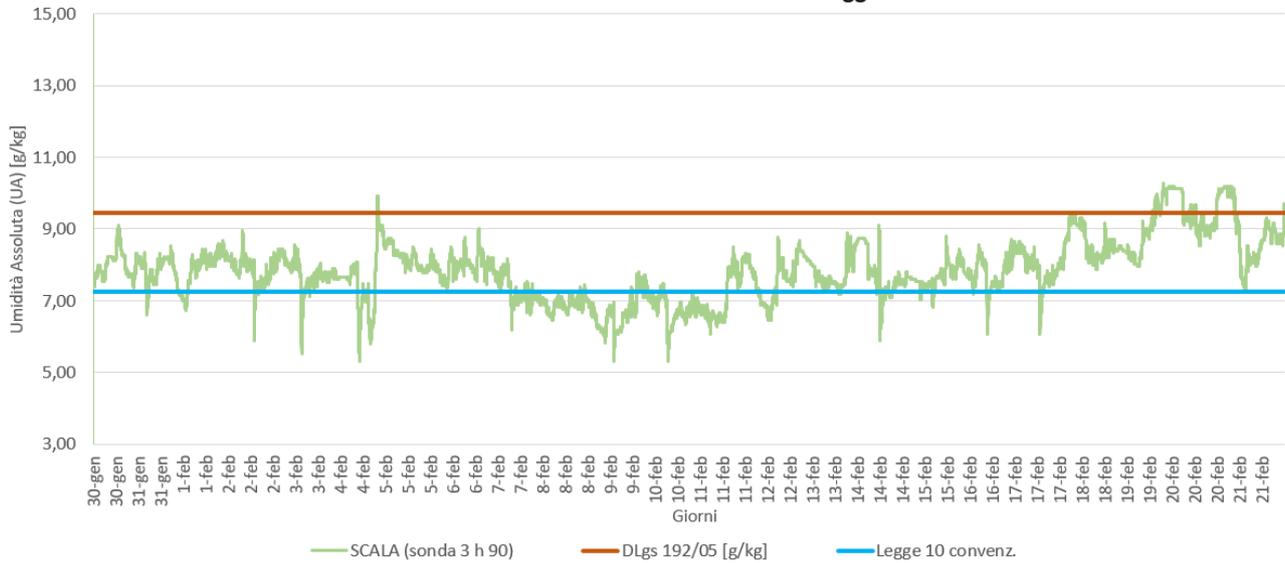
SONDA 2 (Bagno piano 5°, vicino alla porta)

Umidità Assoluta calcolata per SONDA 2 (Bagno piano 5°, h 100)
e confronto con i limiti di legge



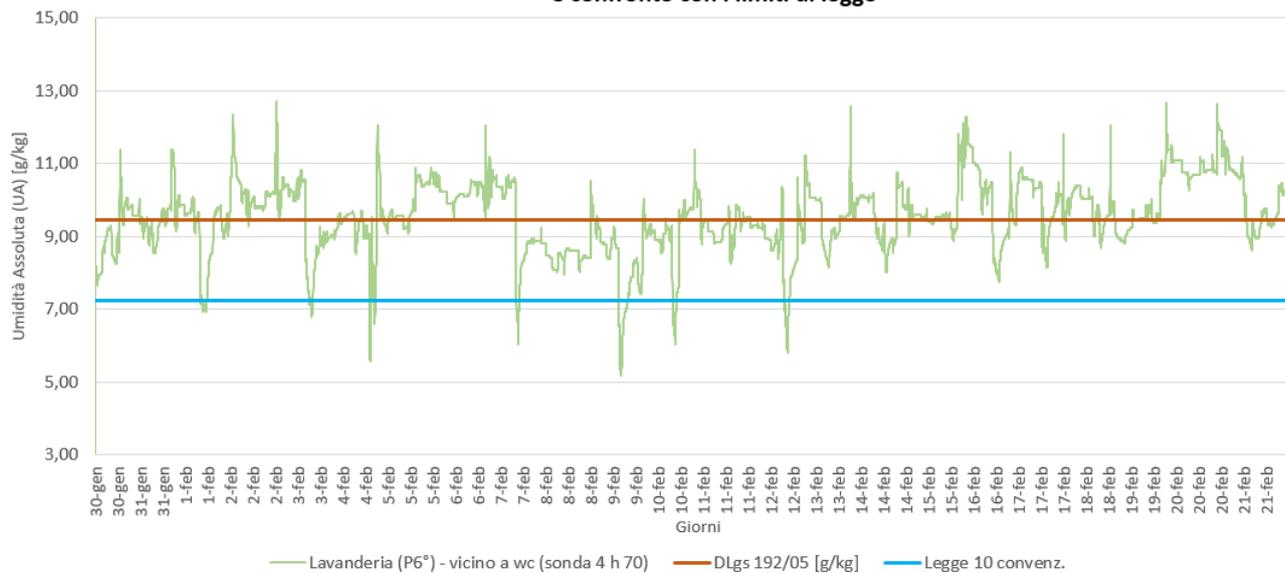
SONDA 3 (Sbarco scala piano 6°)

Umidità Assoluta calcolata per SONDA 3 (Sbarco scala piano 6°, h 90)
e confronto con i limiti di legge



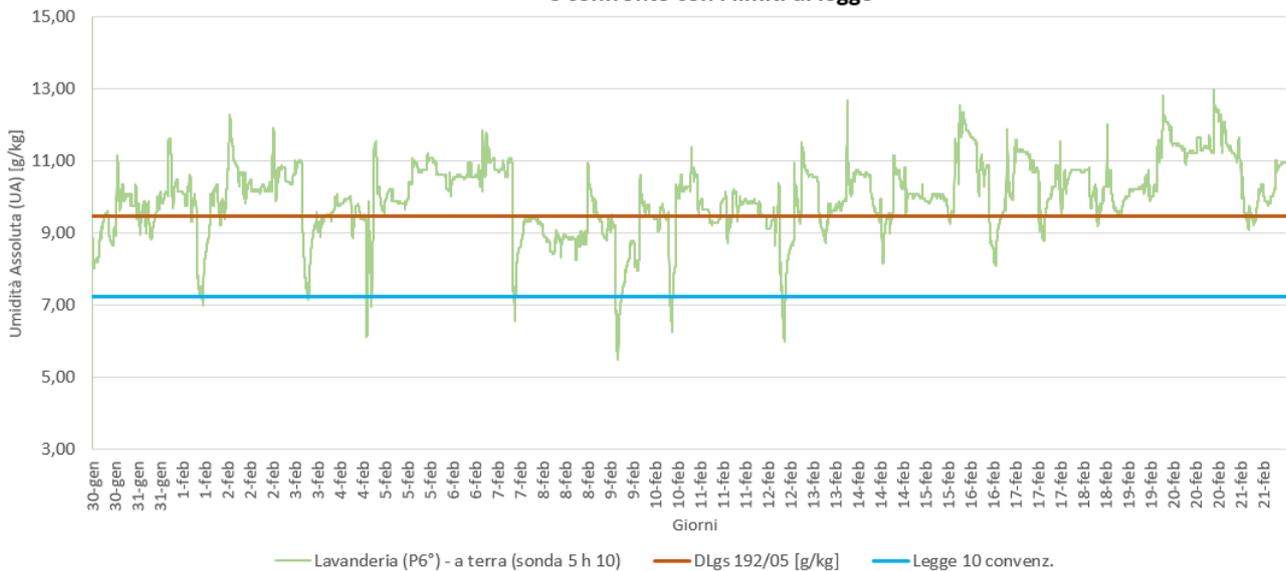
SONDA 4 (Lavanderia piano 6°, vicino a wc)

Umidità Assoluta calcolata per SONDA 4 (Lavanderia piano 6°, h 70)
e confronto con i limiti di legge



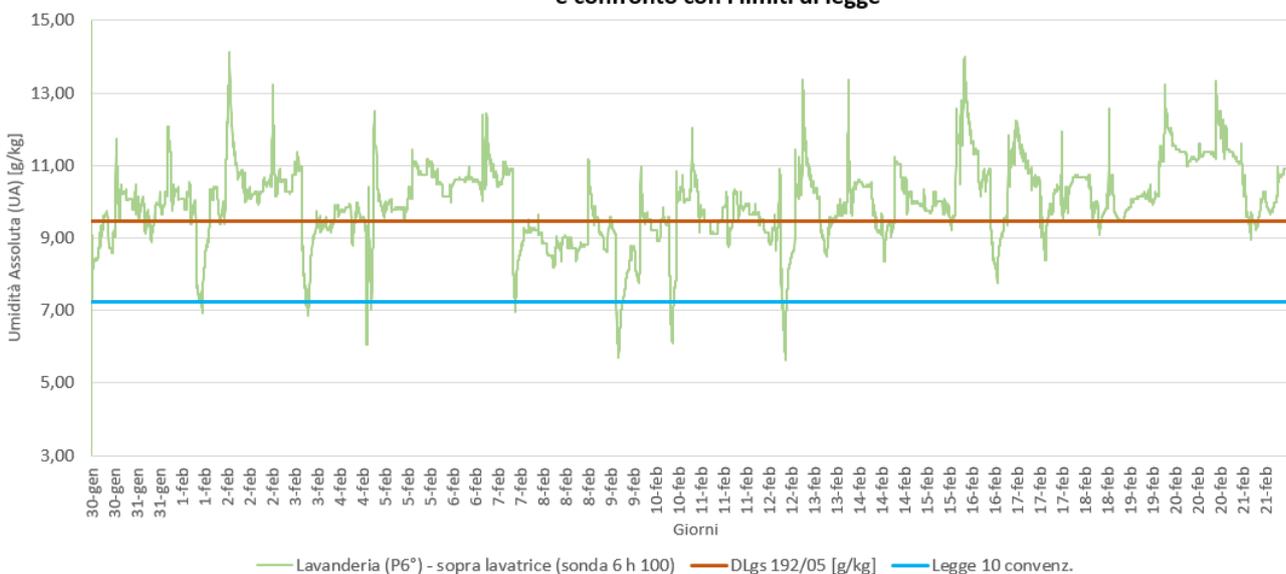
SONDA 5 (Lavanderia piano 6°, a terra)

Umidità Assoluta calcolata per SONDA 5 (Lavanderia piano 6°, h 10) e confronto con i limiti di legge



SONDA 6 (Lavanderia piano 6°, su lavatrice)

Umidità Assoluta calcolata per SONDA 6 (Lavanderia piano 6°, h 100) e confronto con i limiti di legge

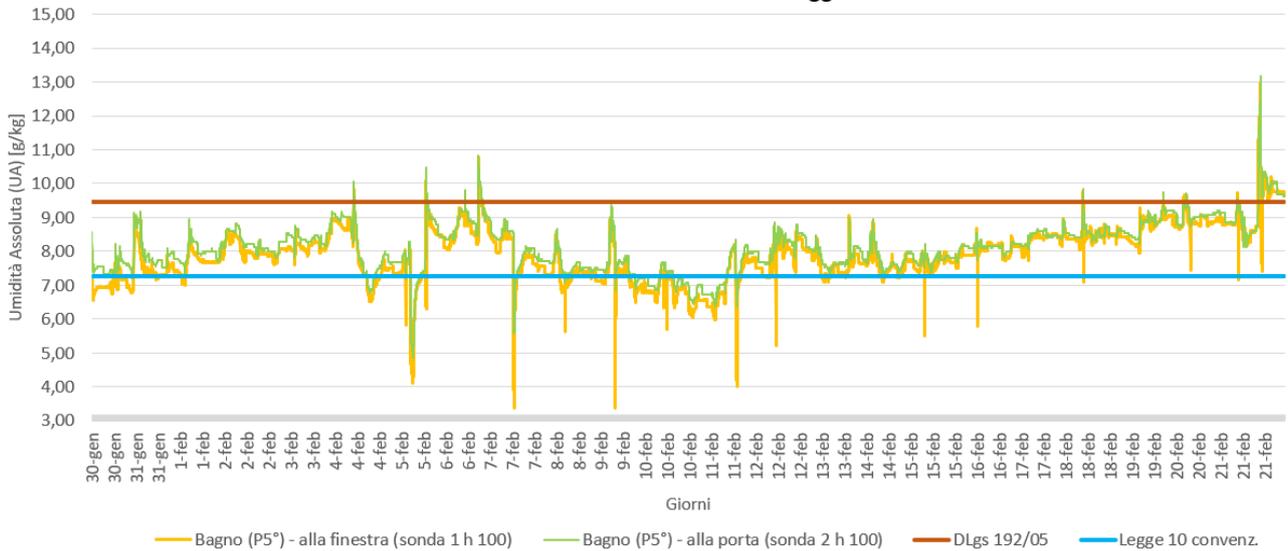


Di seguito si riportano dei grafici, per ciascuno dei due locali igienici osservati, che mettono a confronto i dati rilevati da sonde posizionate all'interno del medesimo locale, ad altezza simile.

Tale indagine è stata svolta al fine di valutare se i valori rilevati fossero riferibili alla posizione della singola sonda (eventualmente soggetta ad interferenze o a specifiche condizioni puntuali), oppure se fossero validi per la stanza nel suo complesso.

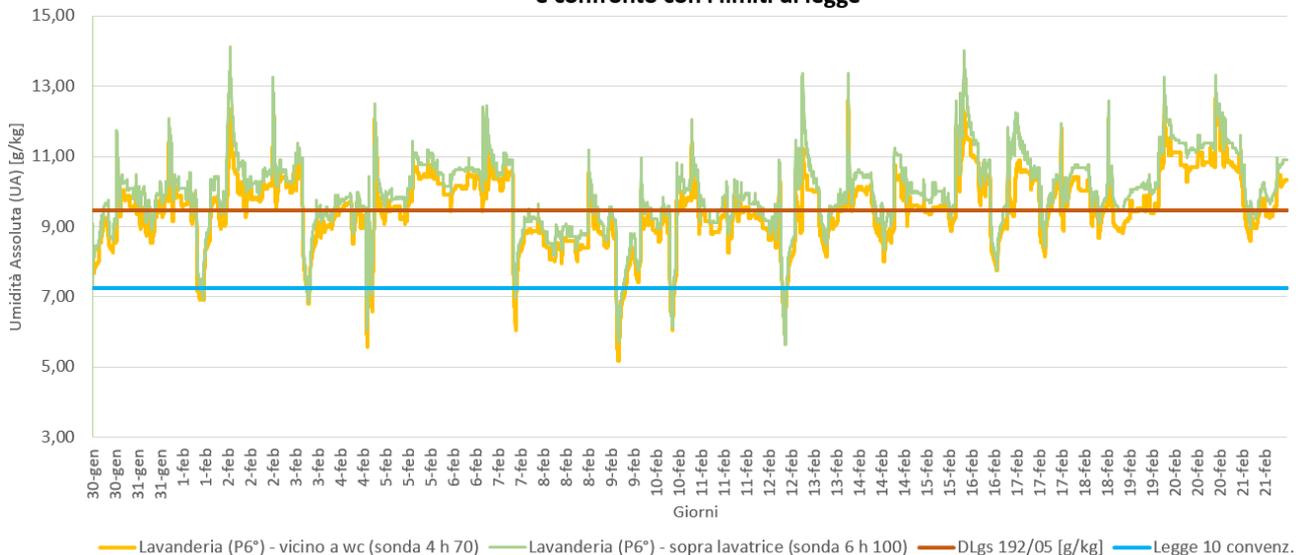
CONFRONTO - SONDA 1 E SONDA 2 (Bagno piano 5°)

**CONFRONTO Umidità Assoluta calcolata per SONDA 1 e SONDA 2 (Bagno piano 5°, h 100)
e confronto con i limiti di legge**



CONFRONTO - SONDA 4 E SONDA 6 (Lavanderia piano 6°)

**CONFRONTO Umidità Assoluta calcolata per SONDA 4 e SONDA 6 (Lavanderia piano 6°, h 100 circa)
e confronto con i limiti di legge**



4. Conclusione

Dai grafici sopra riportati, si evince che, per gli ambienti analizzati, la concentrazione di umidità assoluta era mediamente superiore ai valori limite definiti a livello legislativo (con particolare riguardo ai limiti indicati nella L10/91), in particolare per l'ambiente lavanderia al piano 6°.

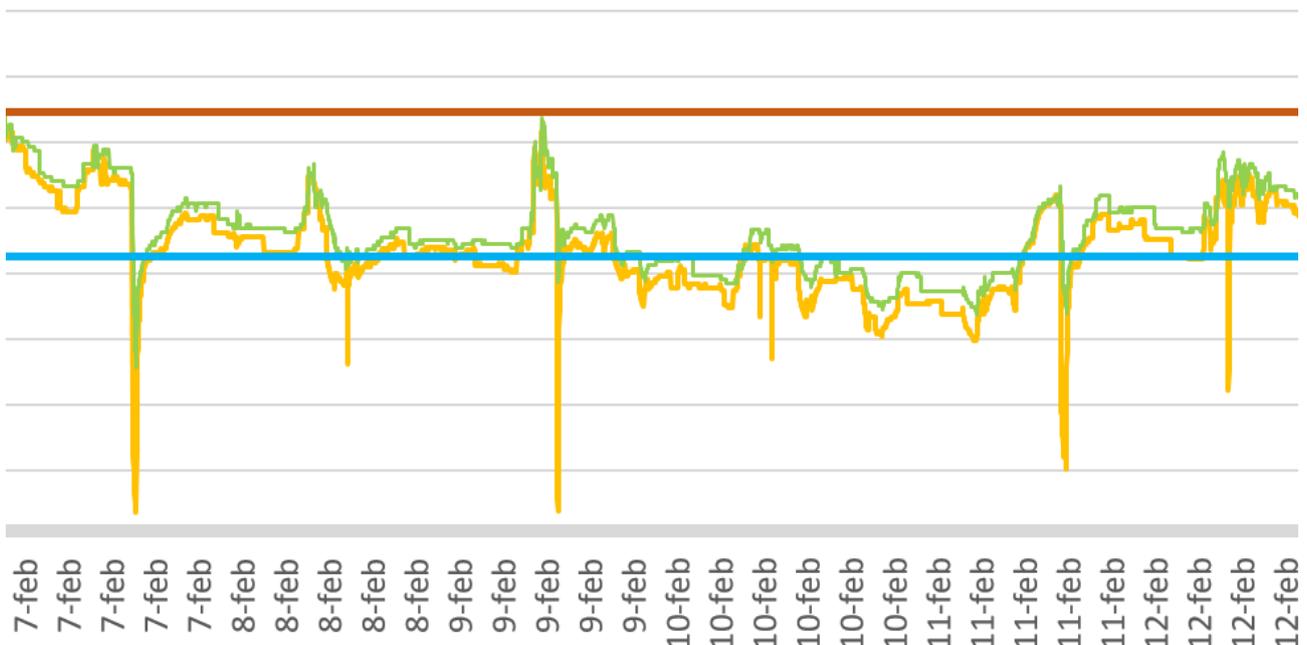
Si riportano inoltre due ulteriori considerazioni:

Prima considerazione: Come si riscontra dal grafico di confronto per la sonda 1 e la sonda 2 poste nel bagno del quinto piano, la sonda 1, posta vicino alla finestra, in certi giorni ha registrato delle riduzioni dei valori di umidità assoluta maggiori rispetto a quelli registrati dalla sonda 2, posta sul lato opposto, in fondo alla stanza.

La riduzione repentina del valore di concentrazione del vapore assoluto è, con alta probabilità, da imputare all'apertura della finestra del locale: in questo caso, però, il tempo di apertura della finestra non è stato sufficiente a far variare la concentrazione del vapore in tutto l'ambiente (tant'è che la sonda 2, di norma, non ha registrato il medesimo livello di riduzione del valore di UA).

Si riporta di seguito un dettaglio del grafico di confronto delle sonde 1 e 2, e un esempio dei dati specifici per la giornata del 9 febbraio, dove si può vedere che l'abbassamento dei valori UA per la sonda 1 risulta durare pochi minuti, mentre la sonda 2 ha rilevato una variazione decisamente molto lieve.

Dettaglio del grafico di confronto delle sonde 1 e 2, per la giornata del 9 febbraio 2023



N° misurazione	Data	Ora	SONDA 1	SONDA 2
			misura UA	misura UA
7170	9-feb	10:22:18	8,20	8,47
7171	9-feb	10:24:18	8,20	8,47
7172	9-feb	10:26:18	8,26	8,47
7173	9-feb	10:28:18	8,20	8,47
7174	9-feb	10:30:18	8,20	8,47
7175	9-feb	10:32:18	8,26	8,47
7176	9-feb	10:34:18	8,26	8,47
7177	9-feb	10:36:18	8,20	8,54
7178	9-feb	10:38:18	8,26	8,54
7179	9-feb	10:40:18	8,26	8,54
7180	9-feb	10:42:18	8,26	8,54
7181	9-feb	10:44:18	8,26	8,54
7182	9-feb	10:46:18	7,82	8,34
7183	9-feb	10:48:18	4,74	8,14
7184	9-feb	10:50:18	4,59	7,53
7185	9-feb	10:52:18	3,56	7,20
7186	9-feb	10:54:18	3,37	6,93
7187	9-feb	10:56:18	4,58	6,86
7188	9-feb	10:58:18	5,70	7,00
7189	9-feb	11:00:18	5,93	7,13
7190	9-feb	11:02:18	6,13	7,27
7191	9-feb	11:04:18	6,46	7,33
7192	9-feb	11:06:18	6,42	7,40
7193	9-feb	11:08:18	6,59	7,47
7194	9-feb	11:10:18	6,81	7,47
7195	9-feb	11:12:18	6,89	7,47

Seconda considerazione: per il locale lavanderia si può notare che i valori di concentrazione di vapore assoluti sono, per gran parte del tempo di rilevazione, ben al di sopra dei valori limite definiti a livello legislativo.

In accompagnamento a quanto sopra detto, si potrebbero svolgere ulteriori approfondimenti, come ad esempio la valutazione dei flussi di vapore all'interno delle pareti perimetrali, studiandone la stratigrafia ed eseguendo simulazioni dinamiche di calore e umidità per le condense interstiziali e il pericolo muffa, eventualmente realizzati tramite appositi software (quale, ad esempio, WUFI Pro [3]).

Si può dire che, ad ogni modo, il metodo sopra riportato ha permesso di identificare i fenomeni condensativi interni come non riferibili a infiltrazioni esterne, e di dimostrare la non corretta gestione dell'unità immobiliare da parte dell'utenza, con costi ridotti e strumentazione non invasiva.

Bibliografia

- [1] Marco M. Parrini, Isabella Anna Piazza: “Uso di datalogger per la valutazione dei fenomeni condensativi con formazione di muffe in ambienti chiusi” – MASTER Magazine luglio 2020, numero 1, Anno XI.
- [2] AA. VV. (Associazione Nazionale per l’Isolamento Termico e acustico), *Muffa, condensa e ponti termici*, Guida completa all’analisi igrotermica degli edifici - Vol. 4, 2021.
- [3] WUFI Pro –Software di calcolo dedicato al calcolo dinamico termoigrometrico delle condense interstiziali e il pericolo muffa di elementi costruttivi omogenei⁴.

Ulteriore bibliografia

- UNI EN ISO 13788: 2013 – Prestazioni igrometrica dei componenti e degli elementi per l’edilizia – Temperatura superficiale interna per evitare l’umidità superficiale critica e la condensazione interstiziale – metodi di calcolo.
- UNI EN 15026: 2023 - Prestazione termoigrometrica dei componenti e degli elementi di edificio - Valutazione del trasferimento di umidità mediante simulazione numerica.
- Marco Argiolas: *Muffe e condense negli edifici – Diagnosi e sistemi correttivi* – Maggioli editore 2016
- www.arpalombardia.it: sito per la richiesta dei dati ARPA Lombardia (Agenzia Regionale per la Protezione dell’Ambiente della Regione Lombardia).

⁴ Nel calcolo vengono considerati in maniera dinamica (fino a un time-step di calcolo a minuti) l’umidità di cantiere, pioggia battente, irraggiamento solare, perdita di calore superficiale radiante, trasporto capillare, condensazione estiva. È stato il primo a essere validato per la normativa UNI EN 15026. In tale senso sostituisce la normativa UNI EN ISO 13788 in caso di conflitto.

Profili di responsabilità penale del collaudatore statico

Raffaele Barra

Avvocato del Foro di Agrigento

Corresponding author: barra.raffaele@virgilio.it

1. Introduzione

A fronte dell'importanza del collaudo statico e della delicatezza degli adempimenti in cui esso si sostanzia, è di intuitiva evidenza la necessità che il professionista che lo esegue, ingegnere o architetto, sia pienamente consapevole degli obblighi cui deve adempiere per evitare che il suo operato, anche a distanza di anni dalla conclusione dell'incarico, sia soggetto a rilievi e addebiti di natura penale a seguito della verifica di eventi drammatici – si pensi ad esempio ai crolli di costruzioni – lesivi di fondamentali beni giuridici quali l'incolumità pubblica e comunque la vita o l'incolumità individuale delle persone.

Di seguito, con un approccio di tipo casistico, si analizzeranno talune fattispecie concrete da cui è possibile trarre significative indicazioni in ordine alla natura, l'oggetto e l'estensione del collaudo statico e sulle quali si è espressa la Suprema Corte di Cassazione nell'ambito di procedimenti penali instaurati, tra gli altri soggetti coinvolti, anche nei confronti di professionisti che nelle vicende di volta in volta oggetto di esame avevano rivestito la funzione di collaudatori statici di opere civili.

2. Terzietà del collaudatore statico e obblighi di verifica e controllo discendenti dalla funzione svolta.

La prima decisione della Suprema Corte su cui ci si soffermerà contiene diversi passaggi argomentativi utili a delineare ruolo e obblighi del collaudatore statico.

La sentenza in parola è stata emessa nel 2016¹ in relazione al crollo di un edificio in occasione di un violento sisma verificatosi nel 2009, edificio che era stato interessato da lavori che sulla carta erano di ristrutturazione e di risanamento conservativo, ma che in realtà avevano comportato plurimi elementi di appesantimento operanti su tutti i piani della struttura.

Si tratta di una pronuncia molto articolata e che prende diffusamente in esame sia la posizione dei progettisti e direttori dei lavori, sia la posizione del collaudatore statico, tutti imputati dei reati di disastro colposo, omicidio colposo plurimo e lesioni personali plurime.

Ciò che in questa sede interessa porre in risalto è che al collaudatore, un architetto, era stato contestato di aver posto in essere diverse condotte, connotate non solo da colpa specifica – cioè da violazione di leggi, regolamenti, ordini e discipline – ma anche da colpa generica, consistita cioè in negligenza, imprudenza e imperizia.

In particolare, l'imputato era stato chiamato a rispondere, in veste di presidente della commissione di collaudo dei

¹ Cass. pen., sez. IV, 11 maggio 2016 (dep. 2017), n. 6604, in *DeJure*.

lavori di “*restauro e risanamento*” dell’edificio poi crollato nonché di responsabile dell’area tecnica dell’ADISU dall’anno 2001 e anche di r.u.p., delle seguenti condotte omissive:

- i) per avere omesso di vigilare sull’adeguatezza statica e sismica delle strutture dell’edificio sia in relazione alla originaria (e deficitaria) consistenza strutturale dello stesso sia in relazione a tutti quegli interventi succedutisi nel corso degli anni e che erano consistiti in attività di ristrutturazione, restauro, risanamento conservativo, manutenzione straordinaria che mai avevano però valutato l’adeguatezza statica e sismica delle strutture dell’edificio anzidetto e senza che mai si fosse proceduto alla verifica del dimensionamento strutturale del progetto originario;
- ii) per non avere garantito, a fronte della realizzazione di tutte le opere di progetto per manutenzione straordinaria, recupero o ristrutturazione, il rispetto delle esigenze relative alla sicurezza e alla prevenzione antisismica;
- iii) per avere omesso di disporre lo sgombero dell’edificio o, quanto meno, di segnalare la necessità di tale provvedimento al direttore o al presidente dell’ente proprietario, così inducendo gli occupanti (si trattava di studenti) a non lasciare l’edificio nonostante gli evidenti segni di instabilità del medesimo;
- iv) per avere proceduto alla visita finale di collaudo tecnico-amministrativo, ai sensi del D.P.R. 21 dicembre 1999, n. 554 (allora vigente), in assenza del collaudo statico e del deposito dei progetti presso gli uffici del Genio civile, in violazione del D.P.R. 22 aprile 1994, n. 425 (anche questo, applicabile *ratione temporis*).

Va precisato, sul punto, che all’architetto, in quanto presidente della commissione di collaudo dei lavori che erano stati svolti nell’edificio in questione, era stato affidato dall’ente committente il compito di collaudo sia statico sia tecnico-amministrativo e che, mentre il secondo venne effettuato, il primo fu invece omesso.

Ciò evidenziato, va in sintesi rilevato che la Cassazione ha ritenuto congrue le argomentazioni articolate dalla Corte di appello che, nel confermare la sentenza di condanna emessa in primo grado, aveva sostenuto che gli interventi edilizi via via realizzati su quell’edificio non erano stati rivolti a conservare l’organismo edilizio ma, al contrario, i lavori posti in essere nel corso degli anni avevano determinato il definitivo e formale mutamento della destinazione d’uso dell’immobile.

Pertanto il collaudo, affidato proprio ad una commissione di tecnici, avrebbe dovuto valutare la regolarità delle opere realizzate, non solo sotto il profilo formale, ma in relazione alle ripercussioni sulla staticità dell’edificio, considerata anche la sismicità della zona.

La valutazione richiesta al collaudatore, quindi, avrebbe dovuto necessariamente prescindere dalla definizione data dai progettisti e direttori dei lavori e che non rispecchiava la realtà, dovendo, invece, operarsi un’analisi oggettiva dei lavori.

In una parola, come già sottolineato dalla Corte di appello e poi ribadito dalla Cassazione, la commissione di collaudo non poteva “fidarsi” delle asseverazioni e della documentazione proveniente dai progettisti e direttori dei lavori, il cui operato doveva viceversa essere sottoposto a controllo.

L'imputato, cioè, non si sarebbe dovuto fermare al dato formale ma, per la sua qualità di collaudatore, avrebbe dovuto invece svolgere una valutazione obiettiva delle opere indipendentemente dalla denominazione utilizzata da altri soggetti (progettisti e direttori dei lavori) ed indipendentemente dai titoli abilitativi rilasciati.

La sua veste di collaudatore – e dunque la sua posizione e funzione di terzietà – imponevano pertanto un obbligo di controllo e verifica dell'operato di coloro che avevano progettato e realizzato le opere, non soltanto sotto il profilo formale o tecnico-amministrativo ma anche in relazione alle ripercussioni sulla staticità dell'edificio; obbligo tanto più doveroso e stringente se si considera che in realtà tali opere (in particolare, ma non solo, con l'aumento dei carichi) avevano modificato l'immobile sotto il profilo statico e sismico e di conseguenza, nella fase del collaudo, sarebbe stato necessario porre in essere le dovute verifiche tecniche.

In quest'ottica, va pure sottolineato come il collaudatore si fosse difeso sostenendo anche di non essere stato incaricato di svolgere il collaudo statico ma solo quello amministrativo.

La Cassazione ha però ritenuto del tutto infondata tale prospettazione, e ciò in quanto, da un lato, ai sensi del D.P.R. n. 554/1999 (testo normativo allora vigente) nell'oggetto del collaudo di opere pubbliche rientra sia il collaudo statico (attività di accertamento tecnico-specialistico per la verifica della sicurezza) sia il collaudo amministrativo (controllo sulla verifica del rispetto delle clausole contrattuali), adempimenti che, complessivamente considerati, la dottrina specialistica denomina collaudo tecnico-amministrativo e, dall'altro, nessun elemento positivamente emerso indicava che l'amministrazione di appartenenza avesse inteso affidare all'imputato soltanto il collaudo amministrativo e non già anche quello statico.

Sul punto, la Suprema Corte ha in particolare osservato che nessun fondamento aveva la pretesa del collaudatore di distinguere, nel senso dallo stesso auspicato, un collaudo meramente amministrativo o amministrativo-contabile (art. 187, comma 1, secondo periodo, D.P.R. n. 554/1999), essenzialmente teso a verificare se *“i dati risultanti dalla contabilità e dai documenti giustificativi corrispond(a)no fra loro e con le risultanze di fatto, non solo per dimensioni, forma e quantità, ma anche per qualità dei materiali, dei componenti”* e la regolarità, per così dire, burocratica, da un collaudo *“vero e proprio”*, cioè statico con oggetto l'esecuzione *“a regola d'arte e secondo le prescrizioni tecniche”* dei lavori, attività di accertamento tecnico-specialistico per la verifica della sicurezza, ove, in tesi, soltanto il primo sarebbe stato affidato dall'ente committente alla commissione di cui l'imputato era presidente ed il secondo, invece, agli ingegneri coimputati.

Tale distinzione, infatti, secondo la Corte di legittimità non trovava appigli testuali nel provvedimento amministrativo istitutivo della commissione di collaudo né nel richiamato testo di legge.

D'altra parte, la Suprema Corte ha pure messo in rilievo che l'installazione delle porte REI 60 antistanti l'ascensore dei piani dal primo al quarto, ancorché opere - di per sé - non strutturali, aveva influenzato direttamente il regime statico dell'edificio ed in particolare delle strutture sulle quali insistevano, modificando ed amplificando le conseguenze del sisma.

E tale possibilità sarebbe dovuta essere evidente *ictu oculi* ai progettisti, prima di tutto, e al collaudatore, in

secondo luogo.

Quanto poi alla sussistenza, nell'agire del collaudatore, di profili di colpa non soltanto specifica ma anche generica (vale a dire consistita in negligenza, imprudenza e imperizia), di seguito si riporta un passaggio della sentenza di legittimità che risulta di eloquente chiarezza in proposito (tenendo sempre presente che tra le cause del crollo dell'edificio i giudici di merito avevano anche individuato l'appesantimento della copertura):

“(...) è proprio dal contenuto dei verbali in data 14.03.2002 e 23 aprile 2002 relativi alle visite di collaudo che si trae la prova che l'imputato salì personalmente sul terrazzo di copertura dell'edificio, senza tuttavia rilevare, nonostante la qualifica professionale di architetto che possedeva ed il qualificato ruolo di presidente della commissione di collaudo che rivestiva, i pur vistosi appesantimenti della copertura (...)”.

Nel caso di specie, dunque, l'imputato aveva eseguito le visite di collaudo ma, secondo i giudici di merito e di legittimità, non si era colpevolmente accorto degli appesantimenti della copertura dell'edificio; se ne fosse accorto e si fosse attivato, le conseguenze non sarebbero state così drammatiche come invece quelle che in effetti si verificarono per effetto del sisma.

3. Collaudo statico ed errori progettuali o di costruzione.

Anche alla luce di quanto si è esposto nella parte finale del paragrafo precedente, un rilevante profilo da approfondire concerne l'eventuale responsabilità penale del collaudatore statico nel caso di errori progettuali o di costruzione.

Su questo specifico punto si è in particolare espressa la Corte di Cassazione con una pronuncia, emessa nel 2011² riguardo al crollo di un ponte su un fiume durante la prova di carico.

Nella specie, il ponte era stato realizzato con l'adozione di una variante in corso d'opera non denunciata, nel senso che detta variante non era stata mai ufficialmente approvata dalla Provincia – ente appaltante, ma era stata portata comunque a conoscenza del direttore dei lavori.

Venivano pertanto chiamati a rispondere del crollo, in sede penale, il direttore tecnico della ditta appaltatrice dei lavori nonché il direttore dei lavori ed il collaudatore tecnico e statico in corso d'opera, entrambi nominati dall'ente appaltante.

In particolare, nel corso del processo penale veniva accertato che il crollo del ponte era dipeso dal fatto che la struttura era stata appunto realizzata con l'adozione di una variante in corso d'opera non denunciata e, soprattutto, di cui non era stata verificata l'idoneità tecnica, ciò che sarebbe stato assolutamente necessario, posto che il progetto di variante conteneva gravi errori di calcolo.

L'assunto di base, ritenuto fondato nei due gradi di giudizio di merito e successivamente condiviso anche dalla Cassazione, è che se il direttore dei lavori e il collaudatore avessero sottoposto il progetto di variante a verifica, evidenziandone gli errori – soprattutto di calcolo – il crollo non si sarebbe verificato.

² Cass. pen., sez. IV, 15 dicembre 2011 (dep. 2012), n. 6965, in *DeJure*.

Ma soprattutto, per quello che maggiormente qui interessa, la Suprema Corte ha rimarcato che in linea di principio può anche condividersi la tesi che tende ad escludere una conseguente ed automatica responsabilità del collaudatore nel caso di errori progettuali o di costruzione, non potendo, invero, il verificatore interferire sulle scelte tecniche adottate dal progettista e dal costruttore dell'opera tanto più se, come nel caso in esame, la stessa opera (nella specie, il ponte) sia soggetta, per essere utilizzata da una comunità indistinta di persone, a controlli e collaudi di natura pubblicistica.

Tuttavia, detta regola incontra un limite nei casi in cui l'errore di progettazione o di costruzione appaia evidente ed evidenti siano i rischi derivanti da un errore siffatto, intendendosi il concetto di evidenza in senso relativo, nel senso cioè che tale debba apparire a chi, per le sue competenze e per le cognizioni tecniche di cui è in possesso, sia destinatario di funzioni di verifica di idoneità e sia in grado di avvertire la presenza di anomalie suscettibili di rendere non sicura la struttura della costruzione.

In questo caso – cioè ove si tratti di errori di progettazione o di costruzione che siano evidenti – il professionista che esegue il collaudo ha l'obbligo di verificare l'idoneità tecnica del progetto e, comunque, quello di segnalare in ogni caso al committente e all'esecutore dell'opera le caratteristiche che possono renderne instabile la struttura.

Secondo la Cassazione si tratta, in tali evenienze, di adempiere ad ordinarie regole di prudenza e diligenza, mentre nell'ipotesi in cui, malgrado l'evidenza dell'anomalia, il verificatore non se ne renda conto, la violazione si concretizza in un'imperizia fondante l'elemento soggettivo del reato di crollo colposo, per colpa c.d. generica.

Se non adempie a questi obblighi, cioè, il collaudatore risponde degli eventi dannosi verificatisi secondo le regole ordinarie sulla causalità omissiva (ex art. 40, comma 2 c.p.) incombendo su di lui l'obbligo di impedire l'evento, posto che i collaudi sono diretti, anche contrattualmente, proprio a scopi di prevenzione.

E nella vicenda che ha portato il giudice di legittimità ad esprimere i principi sopra sintetizzati, era stato accertato che il collaudatore non aveva sorvegliato l'esecuzione dei lavori, recandosi in cantiere durante le fasi principali; se lo avesse fatto, si sarebbe sicuramente accorto che la struttura che si stava realizzando era totalmente difforme dal progetto originario e quindi egli sarebbe stato nelle condizioni di porre in essere tutte le necessarie verifiche e di attivarsi, evitando che il ponte crollasse durante la prova di carico.

Nel caso di specie la verifica era stata dunque distratta e superficiale, poiché il collaudatore non aveva prestato alcuna attenzione alla modifica apportata alla struttura del ponte e che avrebbe dovuto porlo in allarme: in una parola, sarebbe bastato che lo stesso collaudatore avesse portato la propria attenzione su quella modifica per rendersi conto del grave errore progettuale che era stato commesso.

Da qui la sua responsabilità, in cooperazione con gli altri imputati, per il reato di crollo colposo di costruzioni ex artt. 449, comma 1 in relazione all'art. 434, comma 2 c.p..

4. Puntualizzazioni sull'oggetto del collaudo statico.

Una recente decisione di legittimità³ ha definito in maniera puntuale l'oggetto del collaudo statico, in particolare facendovi rientrare, ove residuassero dubbi, anche le recinzioni e i cancelli.

4.1 Il caso concreto e il processo penale che ne è seguito.

Si tratta di una sentenza che è stata emessa dalla Corte di Cassazione in relazione ad una vicenda nella quale si era verificata la morte di una persona, avvenuta a seguito di gravissime lesioni al cranio, al torace e agli arti inferiori, in quanto, mentre, quale addetto ai servizi di custodia, stava chiudendo il cancello ad azionamento manuale con ante scorrevoli contrapposte installato presso uno degli accessi ad un complesso fieristico, l'anta destra era uscita dalla guida e si era ribaltata addosso al portiere addetto.

In relazione a tale fatto, i giudici di primo e di secondo grado ritenevano penalmente responsabili del reato di omicidio colposo, aggravato dalla violazione delle norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro, più soggetti, tra i quali anche il collaudatore in corso d'opera e finale di strutture e opere civili del complesso fieristico in questione.

In proposito, occorre in sintesi premettere che nel caso in esame la lettera d'incarico al collaudatore prevedeva, oltre al collaudo "statico" (ex L. n. 1086/1971) delle strutture delle opere (tranne alcune) del complesso fieristico, pure il collaudo tecnico di tutte le opere civili di quest'ultimo, da intendersi – anche alla luce del certificato di collaudo delle opere civili a firma dello stesso imputato – come valutazione di "*conformità delle opere alle prescrizioni progettuali, alle normative vigenti e alle regole del buon costruire*".

Il collaudatore aveva inoltre assunto l'impegno di rapportarsi con la committenza – tramite il coordinatore dei collaudatori – e di garantire una sua adeguata presenza in cantiere.

A fronte di ciò, secondo la tesi accusatoria poi condivisa dai giudici dei due gradi di giudizio di merito, tuttavia il collaudatore non comunicava/contestava alla committenza, alla direzione lavori e alla società appaltatrice – pur essendosi impegnato contrattualmente a "*...valutare la conformità delle opere alle prescrizioni progettuali, alle normative vigenti...*" (tra cui il D.P.R. n. 380/2001) – la palese difformità del cancello in costruzione rispetto al progetto edilizio autorizzato in variante dalle competenti autorità comunali, consentendo così che il manufatto fosse realizzato senza autorizzazione.

Né, in tal modo, segnalava la conseguente inagibilità del medesimo manufatto al fine di impedirne l'illegittima e pericolosa messa in servizio.

Non venivano inoltre segnalati dal collaudatore l'assenza di un progetto esecutivo e costruttivo completo del cancello in discorso e, in particolare, di un sistema di fermo corsa in chiusura conforme alle norme tecniche di settore, atte a garantirne la sicurezza; l'incongruenza del cancello come costruito rispetto alla documentazione di progetto disponibile e rispetto alla documentazione di "as built" ("come costruito"), in quanto visibilmente dotato

³Cass. pen., sez. IV, 14 dicembre 2023, n. 51097, in *DeJure*.

di accessori di fermo-corsa (paracolpi, piastre e contropiastre terminali) dei quali non v'era alcuna indicazione né sugli elaborati grafici né sulla restante documentazione di progetto, lasciando così che il cancello fosse realizzato e messo in servizio sebbene i relativi sistemi di sicurezza fossero sprovvisti di qualsiasi comprova progettuale di sufficiente resistenza meccanica e di idoneità antinfortunistica; la palese incapacità dei sistemi di ammortizzazione del cancello in chiusura di evitare urti inopportuni della piastra di fermo-corsa, come invece richiesto esplicitamente dalla norma tecnica UNI EN 12604:2002 (urti la cui ricorrenza era immediatamente rilevabile nell'ambito delle dovute prove di collaudo in corso/fine opera a semplice ispezione visiva e diretto riscontro uditivo mediante chiusura di un'anta alla velocità di collaudo prevista dalla norma tecnica UNI EN 12605:200176); la mancata certificazione della conformità del prodotto costruito alle norme tecniche applicabili ai cancelli previste dalla Direttiva Prodotti da Costruzione, se del caso anche mediante applicazione della marcatura CE e rilascio della corrispondente Dichiarazione di Conformità CE del cancello, così come richiesto dalle relative Norme Tecniche contrattuali della committenza.

In conclusione, nonostante le criticità sopra riassunte, nel certificato di collaudo delle opere civili da lui redatto, l'imputato attestava la collaudabilità del cancello di cui trattasi, e così l'assenza di vizi e difetti tali da precluderne l'accettazione e l'uso, cooperando colposamente con i coimputati alla verifica del sinistro e dell'evento mortale.

Ne derivava pertanto, come detto, una pronuncia di condanna per il reato di cui agli artt. 113, 589, commi 1 e 2 c.p. emessa dal Tribunale e confermata dalla Corte di appello.

4.2 Il ricorso per cassazione proposto nell'interesse del collaudatore.

Nel ricorso per cassazione presentato avverso la sentenza d'appello, la difesa del collaudatore, tra i plurimi motivi di doglianza dedotti, aveva anche sostenuto che il collaudo statico non troverebbe applicazione con riferimento al cancello, ma solo alle opere civili e quindi ai manufatti edilizi; inoltre i cancelli rientrerebbero nei prodotti da costruzione e non sarebbero sottoposti al collaudo statico ai sensi della L. n. 1086/1971.

La difesa, inoltre, aveva pure dedotto l'insussistenza dell'aggravante contestata (quella, di cui all'art. 589, comma 2 c.p., del fatto commesso con violazione delle norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro) in quanto nessuna delle regole cautelari di cui si ipotizzava la violazione risulterebbe connessa alla tutela dell'ambiente di lavoro.

Secondo la prospettazione difensiva, unica norma richiamata nel capo di imputazione era infatti la L. n. 1086 del 1971, mentre la norma tecnica UNI EN 12604:2002 sarebbe destinata ai produttori ed avrebbe ad oggetto l'incolumità pubblica di utenti e pedoni non quella specifica del lavoratore.

All'esclusione della circostanza aggravante conseguiva, sempre secondo la difesa del collaudatore, l'illegittimità della sentenza impugnata in relazione alla mancata declaratoria della prescrizione del reato di omicidio colposo in

data anteriore alla decisione emessa dalla Corte di appello, stante, appunto, la dedotta non configurabilità dell'aggravante contestata, per difetto dei suoi presupposti⁴.

4.3 *La decisione della Suprema Corte.*

Nel rigettare il ricorso, e circoscrivendo l'esame alle specifiche questioni che qui rilevano, la Corte di Cassazione ha ritenuto congrue anche quelle argomentazioni della sentenza di secondo grado che a proposito della posizione del collaudatore avevano valorizzato la circostanza che il “*Certificato di collaudo opere civili*”, sottoscritto dall'imputato, non conteneva alcun riferimento a recinzioni e cancelli, tra i quali quello che si era ribaltato, che al pari degli altri cancelli e recinzioni era ricompreso nel collaudo statico costituente l'oggetto dell'incarico conferitogli.

A tal riguardo, la Suprema Corte ha rimarcato che i cancelli rientrano nelle opere civili e come tali devono essere oggetto di collaudo, trattandosi di “forniture” che vengono incorporate nei manufatti edilizi.

Pertanto il cancello deve essere considerato non già come un corpo a sé stante, ma come un elemento del manufatto edilizio che deve perfettamente integrarsi nel complesso dell'opera per il suo corretto funzionamento e la sua necessaria staticità.

La Cassazione ha quindi ribadito che il collaudo statico e tecnico attribuito all'imputato (dal quale erano escluse le sole opere già attribuite ad altro collaudatore) comprendeva specificamente anche la recinzione in discorso ed ha puntualizzato che il fatto che nella relazione di ultimazione delle opere redatta dalla direzione dei lavori e trasmessa per il collaudo non fosse menzionata la “Porta” a chiusura della quale era posto il cancello poi ribaltatosi, non significava affatto che essa fosse esclusa dal collaudo.

E ciò in quanto, hanno sottolineato i supremi giudici, oggetto del collaudo affidato al ricorrente era appunto tutta l'opera realizzata, a prescindere dalle indicazioni e specificazioni, più o meno corrette, fornite dalla direzione dei lavori, le cui eventuali mancanze non avevano alcun valore di esenzione da un collaudo che anzi avrebbe dovuto evidenziare le criticità riscontrate rispetto “*alle prescrizioni progettuali, alle normative vigenti e alle regole del buon costruire*”.

Per la Cassazione, pertanto, la mancanza di segnali di allarme - pur dovuti - da parte degli altri soggetti destinatari di obblighi di verifica non esimeva affatto il collaudatore, nella sua “finale” opera di controllo, anzi valorizzava il suo ruolo di dover evidenziare ogni criticità rilevante.

Da ultimo, va segnalato che con la decisione in esame è stato rigettato anche il motivo di ricorso con il quale la difesa aveva eccepito l'insussistenza dell'aggravante della violazione delle norme antinfortunistiche e, per l'effetto, l'intervenuta prescrizione del reato di omicidio colposo.

⁴ La sussistenza della circostanza aggravante, prevista dall'art. 589, comma 2 c.p., della violazione della normativa antinfortunistica, ha infatti diretta incidenza sul termine di prescrizione del reato di omicidio colposo, raddoppiandolo ai sensi di quanto previsto dall'art. 157, comma 6 c.p..

Sul punto, la Suprema Corte ha sottolineato come le omissioni anche del collaudatore avessero consentito, nella catena causale, al costruttore e ai subappaltatori di progettare non adeguatamente, di realizzare e mettere in servizio un cancello scorrevole manuale in realtà privo di un sistema di fermo-corsa in chiusura delle ante mobili, in quanto non costruito a regola d'arte, e ciò in disapplicazione delle norme antinfortunistiche di cui all'art. 3, D.Lgs. n. 626/1994 al tempo vigente, delle norme di fabbricazione del cancello, attrezzatura di lavoro secondo le vigenti normative di sicurezza, e delle specifiche disposizioni sulla sicurezza dei prodotti di costruzione 89/106/CEE.

Di conseguenza, è stata ribadita anche in sede di legittimità la sussistenza della circostanza aggravante del fatto commesso in violazione delle norme per la prevenzione degli infortuni sul lavoro, di cui all'art. 589, comma 2 c.p., con il connesso raddoppio – ex art. 157, comma 6 c.p. – del termine di prescrizione del reato di omicidio colposo, termine che, nel caso di specie, non era dunque ancora decorso⁵.

5 Conclusioni

Anche alla luce della breve rassegna giurisprudenziale sopra svolta, è del tutto evidente che, in ossequio a stringenti obblighi di prudenza e diligenza nell'espletamento dell'incarico di collaudatore statico e in virtù delle competenze che un professionista come l'ingegnere o l'architetto deve necessariamente possedere, determinate anomalie o situazioni di non conformità alle regole dell'arte costruttiva non possono non essere constatate e devono essere senz'altro rilevate, mentre eventuali omissioni in tal senso risultano idonee a fondare un addebito di responsabilità penale a titolo di colpa in caso di crollo di costruzioni (fattispecie di reato, questa, prevista e punita dall'art. 449, comma 1 in relazione all'art. 434, comma 2 c.p.) o comunque di verifica di eventi mortali o lesivi dell'incolumità individuale causalmente riconducibili a quelle omissioni.

Peraltro, ed è un aspetto non secondario pure agli effetti pratici, può esservi uno stacco temporale anche lungo tra la condotta in ipotesi colposa del professionista – nella specie, il collaudatore – e il crollo della costruzione⁶ e/o la morte ovvero la lesione personale di uno o più soggetti, ciò che rende difficoltoso, nell'ambito del procedimento penale eventualmente instaurato in relazione a quel determinato evento, sia l'accertamento processuale dei fatti sia, in ultima analisi, l'efficace espletamento dell'attività difensiva.

⁵ Va tenuto presente, per completezza, che successivamente al deposito della sentenza n. 51097/2023 in commento, il collaudatore ha proposto alla Corte di Cassazione ricorso straordinario ex art. 625-bis c.p.p. deducendo che la sentenza anzidetta fosse viziata da errata percezione delle risultanze processuali e da errori di fatto; il ricorso è stato dichiarato inammissibile (cfr. Cass. pen., sez. III, 9 ottobre 2024, n. 38887, in *DeJure*).

⁶ Cass. pen., sez. IV, 6.02.2024, n. 10652, in *DeJure*, emessa nell'ambito di procedimento per un crollo di edifici durante il terremoto di Amatrice, ha ribadito che, dal punto di vista ontologico, per il delitto di disastro colposo, previsto dall'art. 449 cod. pen., il momento di consumazione del reato coincide con l'evento tipico della fattispecie e quindi con il verificarsi del disastro, da intendersi come fatto distruttivo di proporzioni straordinarie dal quale deriva pericolo per la pubblica incolumità e non con riferimento alle condotte che costituiscono la serie causale e che possono in ipotesi assurgere anche a distinte ed autonome violazioni.

I modelli matematici nell'ingegneria strutturale. Scelte soggettive e profili di responsabilità

Elio Lo Giudice^{a*}

^a Studio Lo Giudice & Mugnos - Laboratorio DISMAT.

* Corresponding author: ing.eliologiudice@gmail.com

Keywords:

Schematizzazione; Modellazione.

1. Prologo

Recenti accadimenti, talvolta drammatici, di crolli e danneggiamenti di strutture hanno indotto ad una riflessione sui concetti di schematizzazione e modellazione inerenti i problemi tecnici nel campo della Meccanica delle Strutture. Riflessione a cui conferiremo quel carattere culturale così efficacemente espresso da Giorgio Israel nel suo splendido saggio dedicato ai modelli matematici [1], che nel seguito, sarà più volte richiamato.

Occorre subito precisare che limiteremo le considerazioni all'ambito di quesiti tipici della pratica corrente di ogni professionista che si trovi a fornire soluzioni, a formulare ipotesi o a proporre strategie di intervento su casi concreti; e, sebbene l'area così definita sia perimetrata, essa occupa un vasto campo di intervento, il più delle volte di tipo multidisciplinare, le cui regole sono scritte con linguaggi propri a seconda della natura dei problemi stessi. Così l'Economista adotterà un linguaggio diverso da quello dell'Ingegnere e questo sarà diverso da quello del Biologo e così via; tuttavia, ogni qual volta Essi dovranno fornire sintesi interpretative e quantitative dei fenomeni o degli accadimenti che stanno osservando o analizzando, sarà necessario tradurre i vari processi mentali con un linguaggio formale, universale potremmo dire, ed in questo non potranno che far uso del formalismo matematico. Questa traduzione comporta inevitabilmente delle decisioni e delle scelte riguardanti le grandezze o gli elementi che influenzano il fenomeno esaminato; in altre parole, il Tecnico, nello svolgimento della sua attività dovrà intuire e selezionare le variabili che Egli ritiene, almeno in prima istanza, essenziali per descrivere il fenomeno osservato, salvo poi, a valle di un processo di sintesi, correggere o aggiustare le iniziali valutazioni.

Tale approccio metodologico dovrebbe essere seguito anche nei casi in cui si palesa la necessità di esaminare un determinato problema sotto l'aspetto sperimentale. Nel campo della Tecnica della Sperimentazione, si dovrebbe privilegiare un approccio per fasi, comprendente: una prima fase conoscitiva delle variabili che possono interessare il problema, condotta sulla scorta di esperienze precedenti e sullo studio della letteratura tecnica di riferimento; una seconda fase, tipicamente sperimentale, limitata ad indagare aspetti poco noti o che si ritengono determinanti, cui far seguire la fase di approfondimento e di verifica. Significativo in tal senso appare l'approccio metodologico adottato da un grandissimo Scienziato Italiano, Enrico Fermi, il quale nell'ambito delle sue ricerche sperimentali era solito *cominciare con l'eseguire qualche semplice misura proprio là in quelle situazioni dove vi era maggiore*

ignoranza, e successivamente il tentativo di interpretare i risultati ottenuti, a sua volta, avrebbe suggerito nuove misure [2]. È immediatamente percepibile che nella interpretazione di un fenomeno o di un evento ci sia una forte componente soggettiva, basti pensare ai problemi di Economica, alla Diagnostica medica o a alla diagnosi dei dissesti statici in ambito strutturale, solo per citare alcuni esempi.

Da queste brevi considerazioni si evince come la fase di interpretazione di un dato fenomeno, inteso nella accezione più ampia del termine, non può prescindere da una selezione degli aspetti che l'osservatore ritiene fondamentali per tentare di descriverne il comportamento; e che solo a valle di tale selezione egli tenterà di fornire una descrizione quantitativa mediante formule matematiche, ovvero di adattarvi un modello matematico.

Nel suo saggio, Giorgio Israel, premettendo che *un modello matematico è la rappresentazione formale di idee o conoscenze relative ad un dato fenomeno*, fornisce una descrizione di quelle che Egli ritiene debbano essere le caratteristiche di un modello matematico, sintetizzandole *in tre punti fondamentali non separabili l'uno dall'altro*:

- a) *un modello matematico è la rappresentazione di un fenomeno;*
- b) *tale rappresentazione non è discorsiva o a parole, ma formale, espressa cioè in linguaggio matematico;*
- c) *non esiste una via diretta dalla realtà alla matematica. In altri termini il fenomeno specifico studiato non determina la sua rappresentazione matematica; ciò che invece fa è di tradurre in formule idee e conoscenze relative al fenomeno.*

Cercheremo con un esempio semplice di fissare le idee, si tratta da un caso concreto, riguardante la costruzione di un semplicissimo modello matematico utile alla interpretazione e alla previsione a breve termine dell'andamento della produzione nell'ambito di una attività di laboratorio prova materiali e strutture. In particolare si voleva verificare il sospetto che si stesse manifestando un calo di fatturato inerente le attività di “prove esterne” di uno speciale settore di intervento, allo scopo si chiese all'ufficio amministrativo di restituire su un grafico le registrazioni delle fatture riguardanti tali attività imputabili all'anno 2024, ciò che venne fuori allarmò il responsabile di settore in quanto la rappresentazione grafica sembrava confermare la temuta ipotesi; nella “**Figura 1**” viene riportato quanto fu consegnato con una certa superficialità, come avremo modo di scoprire tra poco:

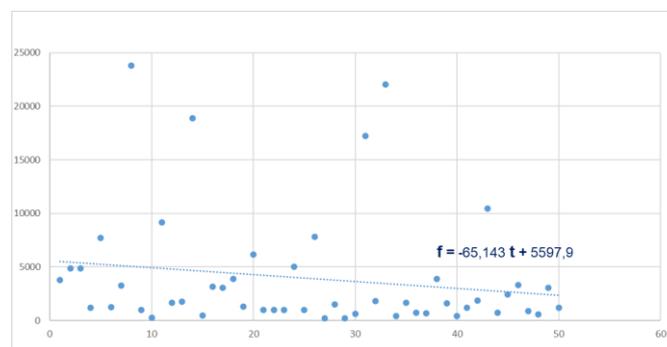


Figura 1 - Registrazioni delle fatture riguardanti le attività di “prove esterne” imputabili all'anno 2024

Superato il primo momento di perplessità, è stata avviata una fase di analisi dei dati, da cui sono emerse una serie di rilievi:

1. il primo riguardava l'organizzazione dei dati in diagramma, infatti in ascissa non compariva il tempo;
2. il secondo riguardava la distribuzione dei valori più elevati che mostravano una scarsa frequenza, pertanto potevano essere tecnicamente considerati, almeno in prima istanza, come *outlayers*;
3. Infine emergeva con evidenza immediata che la maggior parte degli importi di fatturazione si collocava sotto i 5.000 euro.

A questo punto si chiese il file dati d'origine, e qui la sorpresa, l'amministrazione aveva inserito tra i dati di competenza dell'anno 2024 anche quelli relativi all'ultimo trimestre del 2023.

Inserendo correttamente i dati e depurandoli dagli *outlayers* si è ottenuto il seguente diagramma “**Figura 2**”:

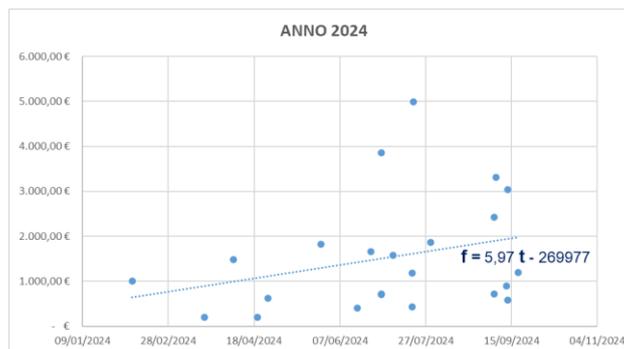


Figura 2 - Dati depurati dagli outlayers

In entrambi i casi si è ipotizzato di descrivere l'andamento del fatturato mediante un semplice *modello matematico lineare*, del tipo (1):

$$f = at + b \quad (1)$$

Dove f rappresenta il fatturato al tempo t , mentre i coefficienti a e b dipendono dai dati e saranno determinati mediante una opportuna tecnica di statistica matematica, in questo caso impiegando il metodo dei minimi quadrati. Questo esempio, pur nella sua estrema semplicità, mette in luce alcune delle fasi caratteristiche del processo di analisi e sintesi che a partire da una osservazione quantitativa di un fenomeno conduce alla ipotesi di comportamento o di tendenza a breve termine. Sembra tutto finito, ma non è così, non sarà sfuggito che abbiamo imposto alle risultanze l'obbedienza ad un modello matematico particolare: il modello lineare; nel far questo non solo abbiamo tentato di interpretare la realtà, ma viepiù abbiamo costruito un modello predittivo, e grazie ad esso si potrà prevedere quale sarà il fatturato alla fine dell'anno. Non fugge l'estrema banalità del ragionamento connessa principalmente dall'ingenua ipotesi di trattare quantità fluttuanti con leggi deterministiche e per di più

adottando una modellistica rudimentale. Si tratta di assunzioni di primo tentativo, di scandaglio, che potranno tornare utili per ragionare sul proseguo delle indagini ed orientare le scelte successive ma che non possono essere assunte come rappresentazione di una realtà complessa seppur semplice. Inoltre la legge di variazione determinata dovrà superare il vaglio della verifica di affidabilità, infatti il modello potrebbe risultare incapace di spiegare l'andamento del fatturato al di fuori del periodo considerato.

Generalizzando, si può affermare che per poter esprimere una valutazione circa l'affidabilità di modello matematico occorre aspettare nuovi dati e valutare lo scarto sulla previsione o, se si preferisce, la bontà di rappresentazione del fenomeno osservato e la sua capacità di previsione. E d'altra parte, preme sottolineare, che il modello, sebbene risulti efficace, possiede una sua validità solo nello stretto ambito del segmento di conoscenza in cui lo stesso è stato partorito; al fuori di esso, una sua estensione, ancorché arbitraria, potrà risultare esiziale, sia sotto il profilo tecnico sia sotto quello delle responsabilità giuridiche.

Il semplice esempio appena illustrato, sebbene rappresenti un tipo di analisi di diffusa applicazione, quasi domestica, fornisce, tuttavia, un archetipo di modellazione. Si può tentare, sfidando le taglienti osservazioni di Israel, di proporre un diagramma di flusso del processo che, partendo dal fenomeno osservato, giunge alla formulazione di un modello attendibile che lo descriva, ovvero che possa essere interpretativo e predittivo del fenomeno stesso “**Figura 3**”.

È prassi comune a tutte le attività scientifiche e tecniche, in cui si devono affrontare problemi di previsione o problemi di interpretazione di un dato fenomeno, fare ricorso ad una strategia standard che contempla una fase preliminare di raccolta di dati empirici o di informazioni sul fenomeno indagato, su cui eseguire, in una seconda fase, un'Analisi Qualitativa e Quantitativa. Da qui, attraverso un Processo Decisionale di Sintesi e di Semplificazione, si potrà, a seconda delle necessità, operare una Riduzione del Numero delle Variabili interessate alla caratterizzazione del fenomeno. Su ciò che rimane dopo la riduzione, cioè allo Schema, si tenterà di adattare, di imporre appunto, un Modello Matematico.

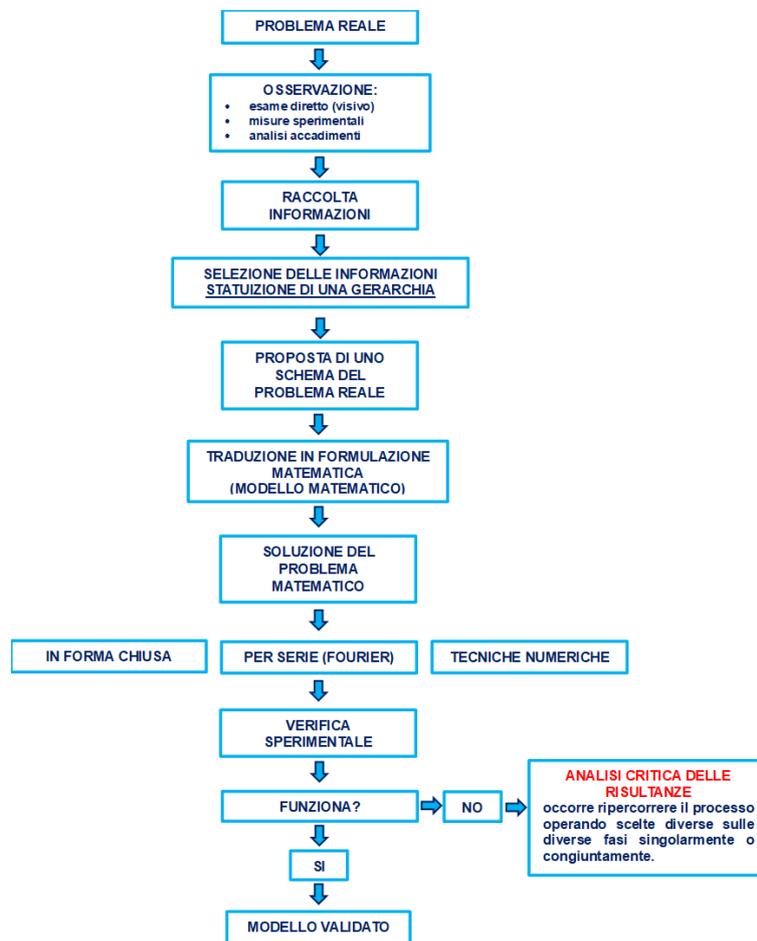


Figura 3 - Diagramma di flusso del processo

Sul piano strettamente operativo il contesto in cui ci si muove riguarda la possibilità di creazione di un modello matematico e segnatamente la costruzione di un modello riguardante un fenomeno osservato; vedremo più avanti una seconda e forse più interessante possibilità di costruzione. Quindi dalla osservazione del fenomeno si raccolgono le informazioni inerenti le variabili che intervengono e la loro eventuale e reciproca dipendenza o influenza. L'analisi di questi dati dovrà condurre, sulla base di proprie intuizioni, di ipotesi, di esperienze pregresse e di studi precedenti, ad un ordinamento degli stessi in funzione della rilevanza presunta che esse assumono nel fenomeno osservato; nel fare questo si stabilisce una gerarchia di importanza delle informazioni raccolte. Fissata, quindi, la catalogazione ragionata delle variabili in gioco, ne seguirà una selezione delle stesse, ovvero per il tramite di un Processo Decisionale, si compiranno delle scelte che porteranno a trascurare talune di esse rispetto ad altre.

Con la riduzione del numero di variabili che caratterizzano il fenomeno si proietta il fenomeno dal mondo reale ad una sua rappresentazione soggettiva, ovvero si costruisce uno schema di ciò che riteniamo possa essere la rappresentazione del fenomeno. Solo a questo punto, sul problema ridotto, sarà possibile proporre una formulazione matematica del problema, generalmente retta problemi formati da equazioni differenziali alle derivate

parziali. Tali problemi sono spesso di complessa soluzione e possono essere risolti in forma chiusa solo in casi particolari, in tutti gli altri casi occorrerà trovare soluzioni approssimate; queste possono essere di natura analitica, per esempio mediante l'impiego delle serie di Fourier, oppure di natura numerica mediante le tecniche di calcolo numerico. Raggiunta la soluzione occorrerà verificare se effettivamente il modello costituisce una rappresentazione attendibile del fenomeno reale e non del fenomeno così come costruito attraverso il processo di schematizzazione. Se la descrizione, sulla base di un opportuno criterio, risulterà soddisfacente, il modello matematico potrà ritenersi valido altrimenti occorrerà reiterare il processo intervenendo sui vari livelli di decisione.

Si ritiene opportuno insistere sull'aspetto della validazione in quanto, molto spesso, nella pratica corrente e, duole dirlo, in molti processi che riguardano complessi e talvolta drammatici eventi, si confonde il modello, o meglio ciò che il modello fornisce con la realtà fattuale. D'altra parte occorre avvertire che spesso i concetti di schema e di modello sono intesi come sinonimi; abbiamo, invece, mostrato che si tratta di costrutti mentali differenti in quanto attinenti, tra l'altro, ad ambiti disciplinari diversi, il primo alla Teoria delle Decisioni, il secondo alla Modellistica Matematica. Volendo sintetizzare si riporta un semplice rappresentazione grafica "Figura 4" che sintetizza le fasi essenziali al fine di rendere più semplice la lettura dei nessi tra la schematizzazione, la modellazione ed il problema reale:

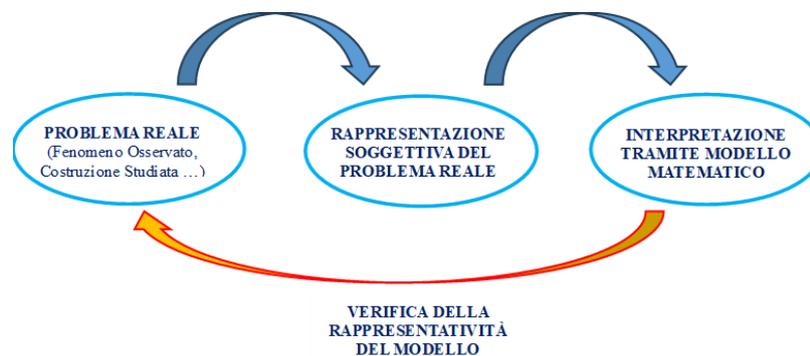


Figura 4 - Fasi essenziali dei nessi tra la schematizzazione, la modellazione ed il problema reale.

Abbiamo fatto cenno alla possibilità di pervenire ad un modello matematico prescindendo da fenomeni osservati o accadimenti o analisi di oggetti; ci si riferisce alla possibilità di costruzioni puramente teoriche, a costrutti mentali, che, nel rispetto dei rigorosi percorsi della logica matematica conducono alla formulazione di teorie, *la mente umana ha la libertà di esplorare anche problemi di matematica che non sembrano a priori applicabili* [3]. Ripetiamo: esse prescindono da fenomeni osservati; pur tuttavia la storia delle scienze naturali è costellata dal successo di tali teorie; in quanto a posteriori hanno fornito supporto essenziale per la interpretazione di fenomeni osservati sperimentalmente.

2. L'Analisi Strutturale - dallo Schema al Modello

Il processo di analisi e sintesi, che conduce dal fenomeno osservato o dall'oggetto progettato, cioè dalla realtà, alla schematizzazione e quindi alla sua modellazione matematica, descritto nei suoi aspetti generali nel paragrafo precedente è suscettibile di essere specializzato anche all'ambito dello studio e della progettazione di Sistemi Strutturali dell'Ingegneria Civile. Si definisce Struttura l'insieme degli elementi solidi che fanno di una Costruzione un complesso idoneo a resistere alle azioni cui essa sarà sottoposta nel corso della sua Vita Utile mantenendo nel tempo le prestazioni richieste [4].

L'estensione delle considerazioni svolte sulla schematizzazione e la modellazione al campo della meccanica strutturale "Figura 5" prenderanno spunto, per evidenti ragioni di semplicità espositiva, dallo studio di un ordinario edificio con struttura intelaiata in calcestruzzo armato, tuttavia, le argomentazioni, ancorché riferite ad un caso particolare, posseggono carattere di generalità, risultando così valide per tutte le altre Tipologie Strutturali. Il processo di semplificazione, ovvero il passaggio dalla Costruzione, intesa come oggetto materializzato mentalmente grazie al progetto completo in ogni sua parte alla sua Struttura Portante, implica quindi, sulla scorta di un Giudizio Soggettivo, la statuizione di una Gerarchia della Importanza delle informazioni raccolte, ovvero, nel nostro caso, delle funzioni svolte dalle varie componenti tecnologiche dell'Edificio. Solo a valle della definizione della gerarchia è possibile selezionare le informazioni e quindi trascurare taluni elementi rispetto ad altri ai fini del contributo offerto alla resistenza globale dell'edificio.

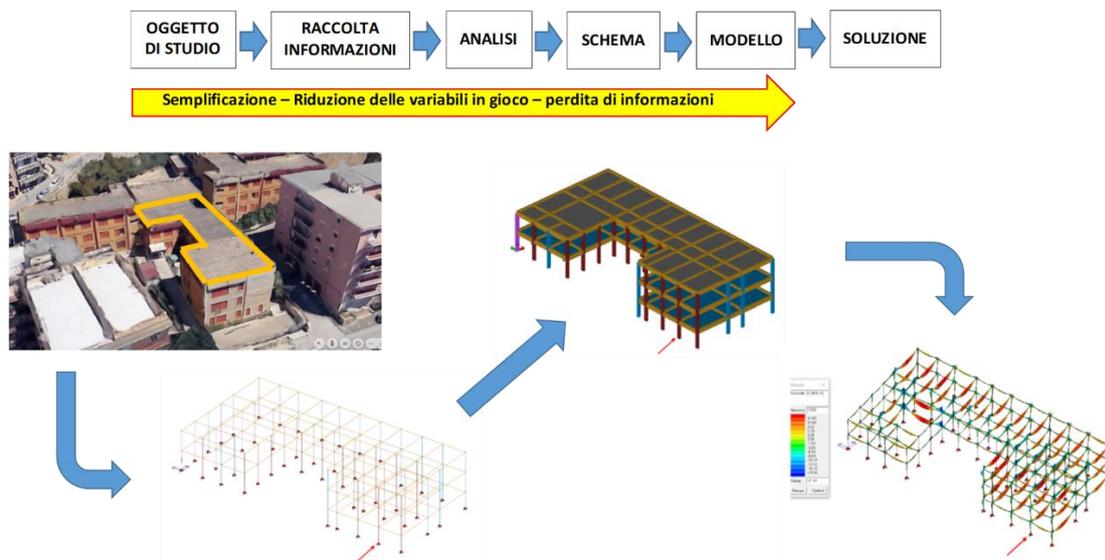


Figura 5 - Schematizzazione di meccanica strutturale

Seguendo lo schema logico del processo di semplificazione, da cui discende lo schema strutturale, si evince come esso comporti una perdita di informazioni; perdita che deve essere monitorata per evitare di escludere quelle parti, la cui eliminazione potrebbe portare ad una distorsione delle previsioni del funzionamento statico di una struttura, e

quindi ad una descrizione non cautelativa del comportamento effettivo che, a sua volta, potrebbe generare conseguenze esiziali per la stabilità della costruzione. Un esempio classico, che ha prodotto innumerevoli disastri in caso di sisma, è quello riguardante gli edifici con struttura in calcestruzzo armato che presentano la prima elevazione destinata a porticato, ossia priva di tamponamenti. Trascurare nella fase di schematizzazione **“Figura 6”**, come troppo spesso è accaduto ed accade, la presenza di tamponamenti ai piani superiori, distorce le previsioni di comportamento statico inducendo il progettista ad eseguire i calcoli modellando uno schema errato; il risultato, di tale mancanza di diligenza e perizia tecnica, con le drammatici esiti conseguenti è mostrato nelle foto **“Figura 7”**.

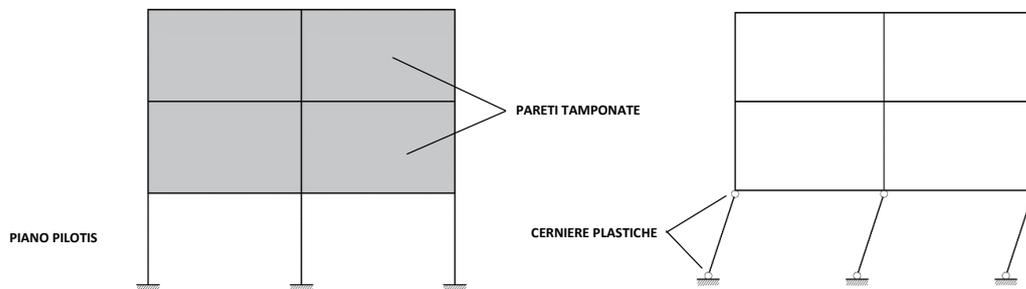


Figura 6 - Schema di piano soffice



Figura 7 - Foto di crolli in occasione del sisma in Abruzzo 2009 (fonte Reluis 2009)

L'ingegnere deve operare sempre a favore di sicurezza e, nei casi di incerta schematizzazione, è opportuno che Egli adotti schematizzazioni limite “**Figura 8**”, scelte in modo che tra esse sia plausibilmente contenuto il comportamento reale [5].

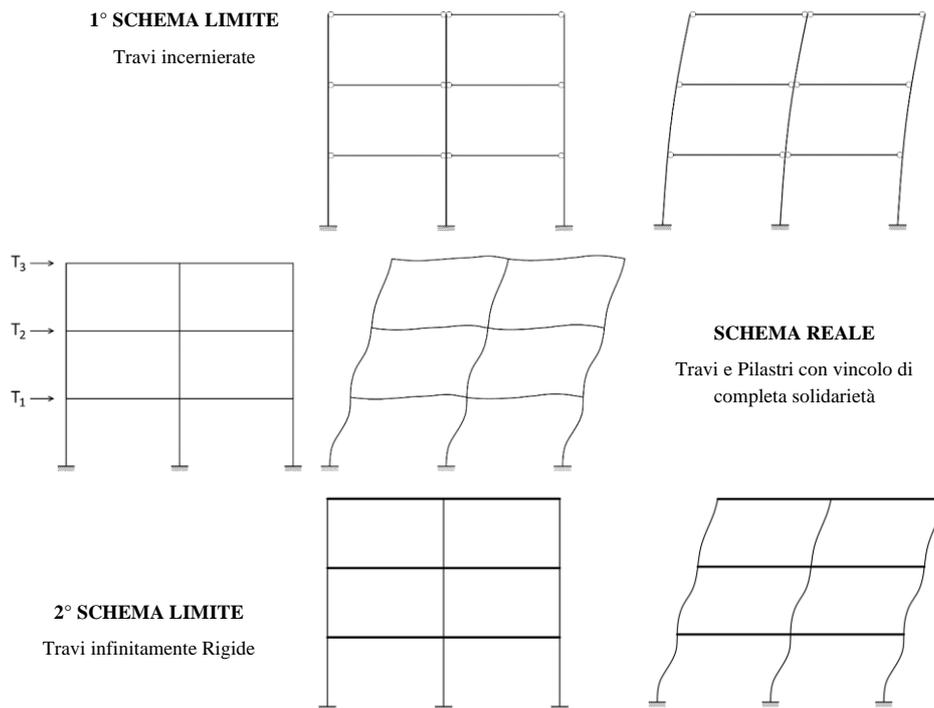


Figura 8 - Casi limite nello studio dei telai piani:
a) con travi infinitamente rigide tipo Shear Type;
b) travi infinitamente flessibili

In ogni caso la perdita di informazioni comporta una Incertezza nella valutazione del comportamento della struttura - incertezza sullo schema - che deve essere contenuta sotto un prefissato livello di soglia stabilito dal progettista. D'altra parte, il Giudizio Soggettivo, in quanto tale, è influenzato da una certa arbitrarietà di valutazione dell'Ingegnere, ed è proprio qui, nell'esercizio di scelte o decisioni consapevoli, che per il Professionista si instaura in concreto un carico di Responsabilità Giuridica. Nelle sue scelte l'ingegnere progettista di strutture, dovrà operare con Diligenza, Perizia e Prudenza, avendo cura di fornire, ove possibile, riscontro oggettivo mediante lo studio di casi analoghi, testando il modello mediante analisi di sensitività al fine di stimarne la bontà in senso numerico e nei casi più complessi mediante la verifica sperimentale. Dovrà inoltre conoscere il complesso Regole che disciplinano il settore di competenza al fine di cautelarsi nei confronti dei rischi che derivano da una loro mancata applicazione o adozione.

Ma per ottenere uno schema rappresentativo affidabile del comportamento reale della Costruzione basterà agire sulla quantità delle informazioni? Evidentemente no. Occorre valutare anche la Qualità delle Informazioni. Due esempi tratti dalla pratica corrente chiariranno il concetto: nella corretta progettazione di una fondazione è indispensabile acquisire informazioni affidabili e puntuali sulle caratteristiche del terreno di sedime, evitando indagini sbrigative e assunzioni arbitrarie, o peggio incaute estrapolazioni, come purtroppo troppo spesso è accaduto, le cui conseguenze possono indurre a danni permanenti e, nei casi più gravi possono produrre crolli; similmente, nella valutazione della sicurezza statica e della Vulnerabilità sismica di Edifici Esistenti, il ruolo svolto dalla conoscenza del manufatto: per storia costruttiva, per geometria e per materiali, risulta determinante .

In generale, nell'ambito dei processi di sintesi, nasce la necessità di stabilire un Criterio di Valutazione della Qualità delle Informazioni che sia premiante ai fini del raggiungimento di prefissati obiettivi; è ciò che accade, per esempio, nello studio della sicurezza statica di una costruzione o dello studio della sua vulnerabilità sismica.

In tutto il processo che dalla Costruzione Progettata conduce allo schema, occorre tener presente che trattiamo di grandezze che per loro natura sono affette da incertezze di misurazione, si pensi, per restare al tema del modello elastico, alla stima del modulo di Young, a queste alee si sommano quelle dovute alle valutazioni su schema e quelle riguardanti il modello. A questa già complesso insieme di valutazioni si dovrà aggiungere la possibilità che lo schema scaturito da tutte le attività finora trattate risulti, in termini di funzionamento statico, talmente complicato da poter essere affrontato solo con potenti mezzi di calcolo automatico. Ma talvolta ciò non basta, la complessità del problema strutturale può essere tale da comportare un livello così elevato di incertezza da pregiudicare ogni valutazione numerica, in questi casi si ricorrerà a Modelli Fisici [6]. Famosi in tale ambito scientifico sono le applicazioni che ne fece il grandissimo ingegnere italiano Pier Luigi Nervi intorno alla metà degli anni '30 del secolo scorso. Nervi nell'affrontare lo studio di un ardito progetto per aviorimesse da realizzarsi ad Orbetello **“Figura 9” “Figura 10”** si trova di fronte ad un tema strutturale così difficile e complesso da farlo indugiare sulla sua fattibilità, appaiono significative le parole dello stesso Nervi: *è evidente che la struttura così progettata raggiunge una complessità iperstatica tale da rendere impossibile un esatto studio teorico.* Dunque impotente nei riguardi della soluzione del problema statico con i metodi matematici e i mezzi di calcolo disponibili all'epoca, il grande Ingegnere si confida con un grandissimo studioso Italiano, il prof. Arturo Danusso, che proprio in quegli stessi anni aveva allestito un importante laboratorio presso il politecnico di Milano dotato di una sezione “prove modelli e costruzioni”. Grazie all'intervento del professor Danusso e del suo brillante allievo Guido Oberti, Nervi può dare pace ai tormenti che lo attanagliavano, infatti le aviorimesse *erano state definite da calcoli orientativi derivanti da ipotesi semplificative sulla cui base sarebbe stato molto imprudente passare alla fase realizzativa.* Lo studio sperimentale che ne seguì fu un successo di portata mondiale, che consacrò Nervi come grande progettista e la Scuola Italiana di Danusso ed Oberti come una tra le più avanzate al mondo.

Questo racconto, al di là del valore storico, è funzionale allo svolgimento delle nostre riflessioni sul tema della modellazione, in quanto risulta paradigmatico di un certo modo di fare ingegneria. Se da un lato la sperimentazione

consentì al Nervi la determinazione sperimentale dello stato di sollecitazione fornendo il porto sicuro alla verifica statica e quindi alla progettazione, dall'altro trovò in essa la conferma delle sue intuizioni progettuali, infatti *fu trovato che la valutazione di massima fornita dai calcoli preliminari impiegati nella costruzione del modello era tale da non richiedere pressoché alcuna modificazione.*

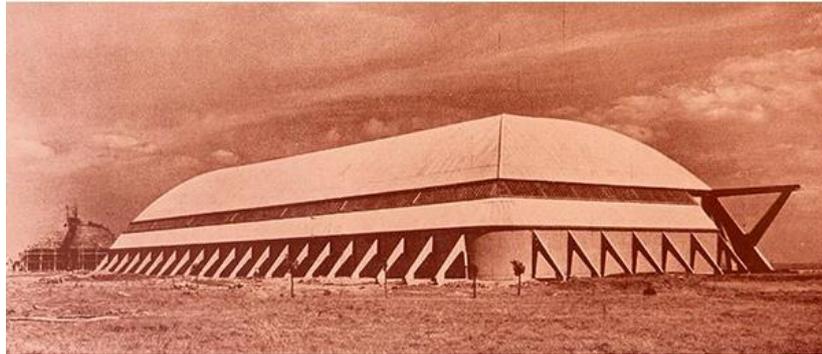


Figura 9 - Ing. P.L. Nervi - Le Aviorimesse di Orbetello - foto del cantiere

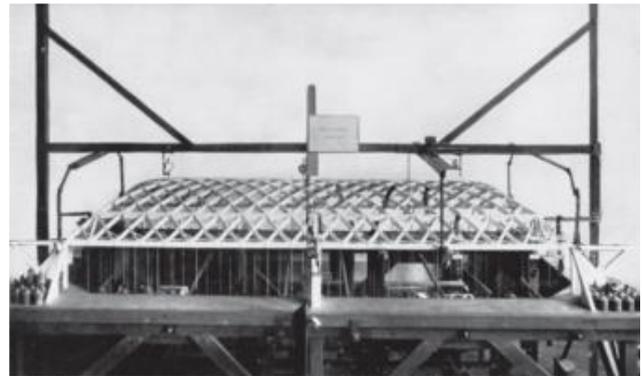


Figura 10 - Ing. P.L. Nervi - Le Aviorimesse di Orbetello foto del Modello

Il tema della verifica sperimentale delle deduzioni teoriche in campo strutturale assorbì tante energie in campo scientifico e rappresentò un *modus operandi* adottato ogni qualvolta il tema risultava complesso o innovativo. Negli anni '50 del secolo scorso un altro grande ingegnere italiano, Riccardo Morandi, fece ricorso alla sperimentazione per lo studio statico delle strutture del ponte sul Polcevera a Genova. Crollato nel 2016 “**Figura 11**”.

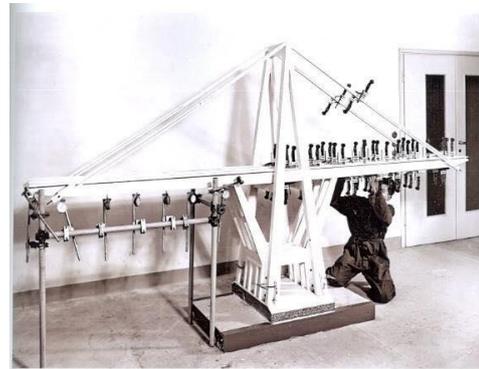


Figura 11 - Ing. Riccardo Morandi - L'Antenna e il cantilever del ponte sul Polcevera e il relativo modello in scala

Oggi, come in passato, si fa ricorso alla sperimentazione su modello o su prototipo nello studio di sistemi il cui comportamento sfugge o risulta di dubbia valutazione mediante le analisi numeriche condotte anche mediante sofisticati codici di calcolo automatico, tipico è il caso delle strutture assoggettate ad uno stato di coazione mediante cavi tesi esterni alla struttura (precompressione esterna) **“Figura 12”**.



Figura 12 - DISMAT – Consolidamento mediante precompressione esterna di un impalcato di viadotto in CAP - Modello in Laboratorio

Chiudiamo il paragrafo citando un pensiero profondo del prof. Danusso: *Costruire significa operare nella realtà, e se la realtà è – come ogni giorno ci appare dalle esperienze fisiche - estremamente complessa e concatenata, mentre la scienza, per la povertà dei suoi strumenti, è costretta a procedere a furia di limitazioni e di semplificazioni, lasciando fra sé e la realtà un abisso, bisogna pure che l'ingegnere trovi nel suo spirito una forza che lo animi a varcare in qualche modo quell'abisso, perché la sua opera sorga sicura e prenda fra le altre il suo posto con dignità di forma e di sostanza [7].*

3. Conclusioni

Avviandoci alla conclusione di queste semplici riflessioni si può sostenere che le fasi di schematizzazione, prima, e di modellazione matematica, dopo, rappresentano un ausilio fondamentale, ormai indispensabile, per l'Ingegnere Strutturista, ma occorre aver chiaro che essi non possono essere condotti *oltre i confini segnati dalle ipotesi che li legittimano e oltre i compiti che ad essi son propri* [8].

Nella progettazione delle strutture sono numerosi i fattori che giocano ruoli decisivi e tra questi: la valutazione quantitativa della sicurezza, che deriva, appunto, da un processo complesso di schematizzazione, modellazione e calcolo, svolge un ruolo decisivo ai fini della garanzia della pubblica incolumità; tuttavia occorre rammentare, con le parole del Pozzati, che l'arte del costruire non può essere ridotta ad un complesso di operazioni analitiche.

Benché si sia tentato di illustrare, sia pure in forma elementare, le difficoltà e le insidie che possono nascondersi nelle pieghe dei processi mentali concernenti la soluzione di problemi in ambito tecnico in generale e nell'ingegneria delle strutture in particolare, corre l'obbligo di segnalare che la rappresentazione e la simulazione di fenomeni naturali, ancorché limitata ad ambiti specifici, come quello qui considerato, è materia in continua evoluzione sia sotto il profilo puramente metodologico che su quello filosofico. Le semplici argomentazioni illustrate meritano considerazione ed approfondimento, ragioni di spazio, non ne hanno consentito adeguato sviluppo, tuttavia, ritengo opportuno lasciare un graffito, segnalando alcuni temi aperti:

1. Le incertezze inevitabilmente che si manifestano nei vari stadi del processo conoscitivo che dalla realtà conduce ad una sua rappresentazione inquinano i risultati del calcolo; esistono dei criteri di controllo di tali incertezze? in altre parole, esistono dei criteri per valutare se il modello su cui abbiamo eseguito le nostre deduzioni numeriche è rappresentativo della realtà fisica?
2. Gli effetti della complessità dello schema possono avere rilevanza sull'affidabilità del modello e del calcolo?
3. Esistono metodologie efficaci e sperimentalmente robuste di validazione dei risultati?
4. La fiducia eccessiva nei risultati delle analisi può provocare una deresponsabilizzazione del professionista?
5. Le tecniche di Calcolo e i produttori di Software quali la responsabilità assumono nei processi descritti? Ed ancora quali sono le conseguenze di eventuali errori presenti nei Codici di Progettazione commercializzati?

Bibliografia

- [1] Giorgio Israel, *Modelli Matematici - Introduzione alla Matematica Applicata*, - Muzzio Editore, 2009.
- [2] Giuseppe Bruzzanti, *Enrico Fermi* – Einaudi 2007.
- [3] Tommaso Ruggeri, Conferenza tenuta presso l'Università Luiss - Roma 11/10/2010.
- [4] R. Baldacci - *Scienza delle Costruzioni* – UTET 1983.
- [5] CNR 10024/86.
- [6] S. Longo, *Analisi Dimensionale e Modellistica Fisica* – Springer-Verlang 2011.
- [7] A. Danusso, *Scienza delle Costruzioni* - Tamburini editore, Milano 1946.
- [8] Piero Pozzati: "Teoria e Tecnica delle Strutture" - UTET 1972.
- [9] Gabriele Neri, "Capolavori in miniatura", Mendrisio Academy Press, 2014

Prove di caratterizzazione statica e dinamica sul Ponte Forgia: un'opera ferroviaria a travata reticolare della tratta Trapani-Palermo

Elio Lo Giudice^a, Giuseppe Navarra^a, Giuseppe Mugnos^a

^a Laboratorio DISMAT - Canicattì

* Corresponding author: info.dismat@gmail.com

Abstract: Il presente lavoro illustra il complesso di attività sperimentali eseguito sul ponte Forgia, un'opera ferroviaria della tratta Trapani-Palermo, nei pressi del centro abitato del comune di Balestrate. L'opera supera, in prossimità della foce, il torrente Forgia dal quale prende il nome, mediante due travate reticolari in acciaio, una configurazione progettuale che coniuga resistenza meccanica e leggerezza costruttiva. La vicinanza alla costa marina espone le strutture metalliche, particolarmente vulnerabili alla corrosione, a condizioni ambientali molto aggressive che hanno innescato e accelerato tale fenomeno, in particolare nei giunti bullonati. Questo ha reso necessario un intervento di manutenzione straordinaria, che ha previsto la sostituzione di tutti i bulloni dei giunti, la sabbiatura di tutti gli elementi metallici e la successiva verniciatura protettiva. Al fine di stimare l'efficacia degli interventi manutentivi, è stata pianificata una campagna di indagini sperimentali condotta sia prima sia dopo l'intervento, consentendo una valutazione comparativa delle prestazioni della struttura. Il programma ha incluso prove di carico statiche, con rilevazione delle inflessioni e dello stato tensionale sulle sezioni rappresentativi degli elementi principali, e prove di caratterizzazione dinamica finalizzata alla individuazione delle frequenze fondamentali, delle forme modali e alla stima dei coefficienti di smorzamento. A completamento del programma sperimentale, sono state eseguite prove non distruttive per la caratterizzazione meccanica dei materiali e per verificare le coppie di serraggio dei bulloni. Questo approccio integrato ha permesso di costruire una base di riferimento essenziale per futuri monitoraggi e modellazioni strutturali.

Keywords:

Monitoraggio; Dinamica strutturale; Operation Modal Analysis; Experimental Modal Analysis; Caratterizzazione statica; Caratterizzazione dinamica.

1. Descrizione dell'opera

La tratta ferroviaria Trapani-Palermo attraversa il territorio del Comune di Balestrate (PA) in cui insiste il manufatto ferroviario, sulla foce del torrente Forgia, a poche decine di metri dalla battigia marina. Tale posizione espone l'opera ad un ambiente particolarmente aggressivo, rendendo indispensabile una costante e accurata manutenzione ai fini della salvaguardia della vita utile.



Figura 1 - Ponte Forgia vista dall'alto

La struttura del ponte Forgia si presenta a travata metallica di tipo reticolare con schema alla Warren a via inferiore, dotata di controventi superiori. La luce della travata, misurata tra gli assi degli appoggi, è pari a 39.930 mm. Gli elementi della struttura sono realizzati in profili laminati, collegati mediante giunti bullonati, tecnologia molto frequente nel campo ferroviario dell'epoca [1] [2] [3]. La larghezza del ponte, definita come l'interasse tra le due travate reticolari, è di 5.200 mm, mentre l'altezza delle travate è pari a 6.900 mm.

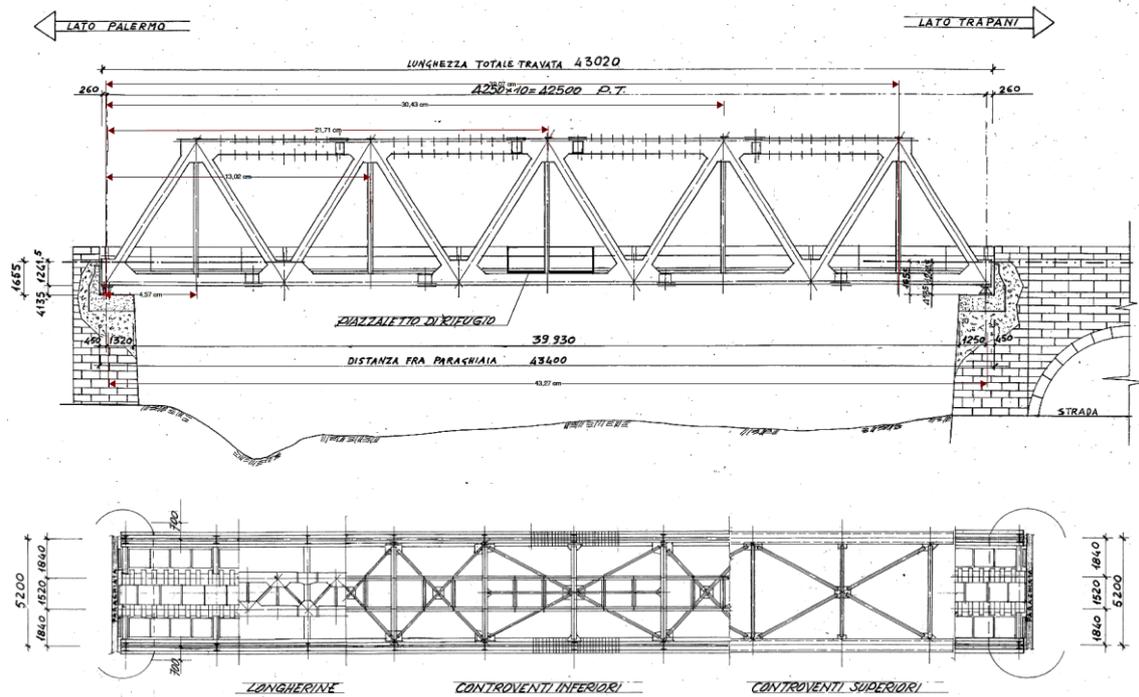


Figura 2 - Schema di insieme ponte Forgia

Le pile in muratura, in conci di tufo, mostrano tracce di un assetto strutturale preesistente, probabilmente di analogia tipologica strutturale, di cui tuttavia non si hanno informazioni documentali.



Figura 3 - Vista laterale del Ponte Forgia

2. Descrizione del degrado ed intervento manutentivo

L'ambiente marino rappresenta una delle condizioni più sfavorevoli per le strutture in carpenteria metallica, a causa dell'elevato livello di salinità e dell'umidità costante. Nel caso del ponte in esame, la vicinanza al mare ha innescato un processo di corrosione, localizzato nelle zone di unione (giunzioni) e particolarmente concentrato sui bulloni di collegamento.



Figura 4 - Corrosione sui giunti bullonati

In alcuni casi, la corrosione ha ridotto significativamente la sezione resistente dei bulloni, compromettendo l'efficienza dei giunti e, di conseguenza, la sicurezza globale della struttura. Per ovviare a queste criticità, RFI ha pianificato un intervento di manutenzione straordinaria che ha previsto:

- La sostituzione di tutti i bulloni presenti;
- La sabbiatura degli elementi metallici per rimuovere la corrosione;
- La verniciatura con prodotti specifici per proteggere la struttura da future aggressioni ambientali.

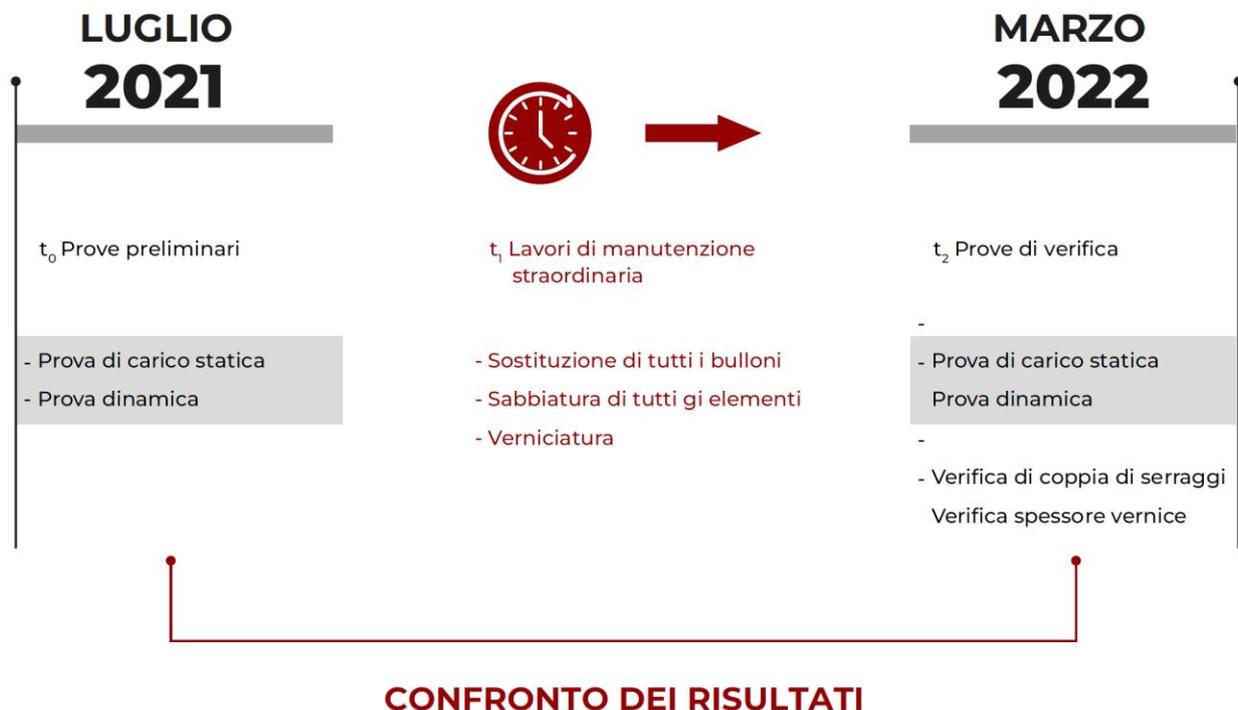
Obiettivo dell'intervento è stato di ripristinare la sicurezza strutturale del ponte e prolungarne la vita utile residua assicurando durabilità e funzionalità.

3. Piano di indagini

Il piano di indagine è stato formulato dai tecnici di RFI, che hanno anche dettato le modalità e i tempi di esecuzione, prevedendo un protocollo articolato in due fasi, corrispondenti a due campagne di prove: la prima, condotta nel luglio del 2021, ha avuto luogo prima dell'intervento di manutenzione straordinaria; la seconda, realizzata nel marzo del 2022, è stata eseguita al termine dei lavori. Questa doppia fase di indagine ha permesso di confrontare le condizioni della struttura prima e dopo l'intervento, fornendo dati oggettivi sull'efficacia delle operazioni effettuate. Le prove effettuate si sono concentrate su:

- La caratterizzazione statica della struttura, mediante prove di carico;
- La caratterizzazione dinamica, attraverso misurazioni delle frequenze naturali, delle forme modali e dei coefficienti di smorzamento;
- Verifiche complementari, come il controllo della coppia di serraggio dei bulloni nuovi e la misura dello spessore della vernice applicata.

Tale protocollo offre anche la possibilità di predisporre un monitoraggio futuro sulla base dei dati di riferimento ottenuti durante la campagna del 2022. In questo studio sarà posta particolare attenzione alle sole prove statiche e dinamiche e all'interpretazione dei risultati ottenuti.



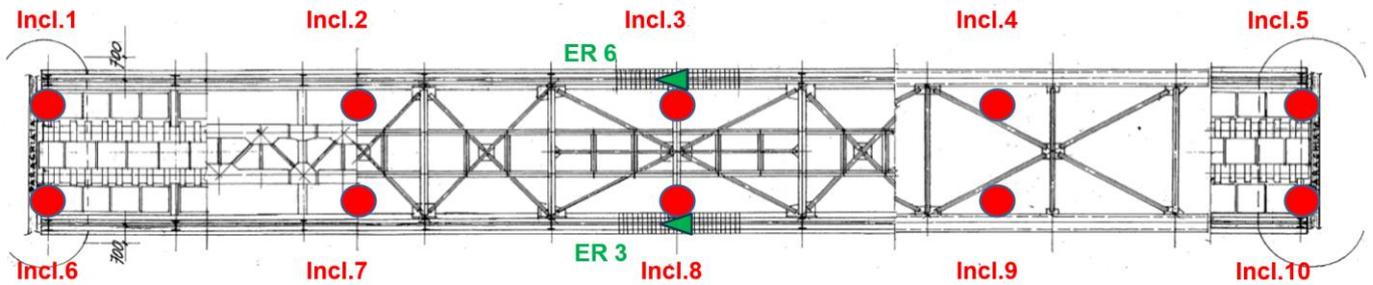


Figura 6 - Layout della strumentazione di monitoraggio

Per la stima delle frecce è stato utilizzato il metodo inclinometrico, installando dieci inclinometri biassiali sui punti indicati nella figura che precede, orientati lungo le due direzioni principali: direzione dell'asse longitudinale e trasversale del ponte. Tale metodo ha permesso di strumentare l'impalcato dall'estradosso, semplificando notevolmente le fasi operative e di epurare automaticamente i cedimenti agli appoggi alla configurazione deformata dell'impalcato. Per la misura delle deformazioni invece sono stati utilizzati due estensimetri elettrici a resistenza da 6 mm, collegati alla centralina di acquisizione a quarto di ponte, uno sull'intradosso del corrente inferiore della trave reticolare di valle (ER 3) e uno su quello di monte (ER 6).



Figura 7 - Strumentazione inclinometrica

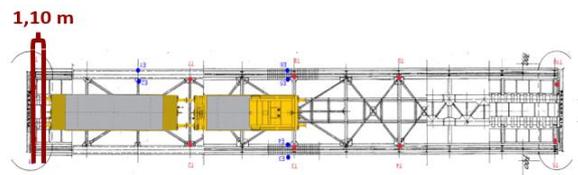


Figura 8 - Strumentazione estensimetrica

Per motivi di sintesi, non si è ritenuto necessario riportare tutti i grafici delle deformate statiche dell'impalcato per ciascuno schema di carico considerato. In particolare si renderanno note, con le figure che seguiranno, gli schemi di carico da 1 a 3 che rappresentano il transito del carico viaggiante sull'impalcato ferroviario nella direzione Trapani-Palermo, fino allo scarico per entrambe le campagne di prova.

Per ogni configurazione, sono illustrate le deformate delle due travate reticolari, la posizione del carico sull'impalcato e il valore massimo della freccia registrata, fornendo così una visione chiara e sintetica delle condizioni più significative rilevate dalla strumentazione inclinometrica.

Tabella riassuntiva delle letture											
Campagna	Situazione	Lato Trapani (inclinometri)					Lato Palermo (inclinometri)				
		1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
	Carico di riferimento	0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00	12,81	21,35	29,89	42,70
Luglio 2021	scanco	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,30	7,72	4,45	0,00	0,00	7,20	7,66	4,74	0,00
	Respingente a 1,30 m lato Trapani	0,00	7,17	7,44	4,68	0,00	0,00	8,88	7,48	4,78	0,00
	Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,27	7,92	4,86	0,00	0,00	6,68	7,68	4,78	0,00
	Respingente a 1,70 m lato Trapani	0,00	7,39	7,82	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,58	0,00
	Respingente a 1,90 m lato Trapani	0,00	7,50	7,92	4,74	0,00	0,00	6,92	7,21	4,58	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Palermo	0,00	0,01	0,18	0,35	0,00	0,00	7,82	3,58	2,54	0,00
	Respingente a 1,30 m lato Palermo	0,00	0,10	0,18	0,28	0,00	0,00	7,89	3,50	2,58	0,00
	Respingente a 1,50 m lato Palermo	0,00	7,81	6,94	6,14	0,00	0,00	7,85	3,57	2,58	0,00
	Respingente a 1,70 m lato Palermo	0,00	7,81	6,84	6,14	0,00	0,00	7,85	3,57	2,58	0,00
Settembre 2021	scanco	0,00	0,82	0,04	-0,45	0,00	0,00	1,74	1,75	6,81	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	0,87	0,18	-0,05	0,00	0,00	1,59	1,81	6,58	0,00
	Respingente a 1,30 m lato Trapani	0,00	0,87	0,18	-0,05	0,00	0,00	1,59	1,81	6,58	0,00
	Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,71	8,80	6,14	0,00	0,00	8,99	10,88	7,83	0,00
	Respingente a 1,70 m lato Trapani	0,00	7,88	6,70	6,05	0,00	0,00	8,54	11,12	7,78	0,00
	Respingente a 1,90 m lato Trapani	0,00	7,88	6,70	6,05	0,00	0,00	8,54	11,12	7,78	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Palermo	0,00	7,83	7,73	4,73	0,00	0,00	8,74	9,86	6,21	0,00
	Respingente a 1,30 m lato Palermo	0,00	7,88	6,91	4,87	0,00	0,00	8,58	9,78	5,97	0,00
	Respingente a 1,50 m lato Palermo	0,00	7,88	6,94	5,18	0,00	0,00	8,61	9,60	6,12	0,00
	scanco	0,00	1,18	0,88	-0,20	0,00	0,00	1,05	2,45	1,87	0,00



Schema di carico n°1 - respingente a 1,10 dall'appoggio lato TP

TP ← → PA

PROVE STATICHE, Luglio 2021

Freccia massima 8,12 mm

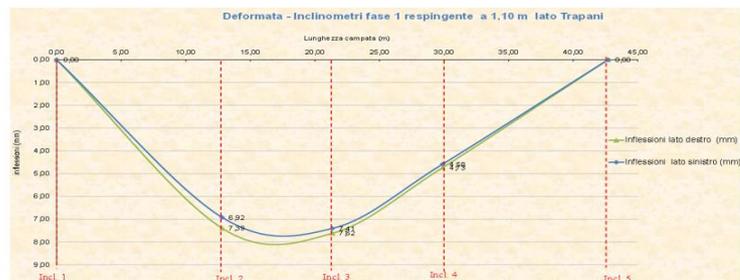
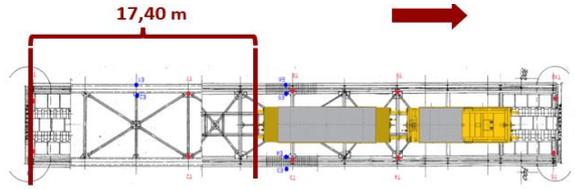


Figura 9 - Schema di carico n° 1 - Prove del Luglio 2021

Tabella riassuntiva delle letture										
Stato	Inclinometri lato sinistro					Inclinometri lato destro				
	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00
Inclinometri lato destro (mm)										
scarcio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,30	7,72	4,06	0,00	0,00	7,20	7,66	4,74	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,17	7,44	4,06	0,00	0,00	6,89	7,45	4,78	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,27	7,62	4,06	0,00	0,00	6,92	7,41	4,59	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,29	7,62	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,59	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	8,01	8,18	6,36	0,00	0,00	7,82	9,36	6,54	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	8,10	8,18	6,36	0,00	0,00	7,89	9,50	6,56	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,04	6,14	0,00	0,00	7,85	9,57	6,56	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,04	6,14	0,00	0,00	7,85	9,57	6,56	0,00
scarcio	0,00	0,02	0,18	-0,45	0,00	0,00	1,59	1,81	0,56	0,00
scarcio	0,00	0,02	0,18	-0,45	0,00	0,00	1,59	1,81	0,56	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,71	8,80	8,14	0,00	0,00	8,99	10,98	7,83	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,89	8,70	6,05	0,00	0,00	9,04	11,12	7,78	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,99	8,70	6,05	0,00	0,00	9,04	11,12	7,78	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,63	7,73	4,73	0,00	0,00	8,74	9,86	6,21	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,88	8,01	4,87	0,00	0,00	8,68	9,78	5,97	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,98	8,28	6,18	0,00	0,00	8,81	9,80	6,12	0,00
scarcio	0,00	1,18	0,69	0,20	0,00	0,00	1,85	2,45	1,37	0,00
scarcio	0,00	1,21	0,69	0,35	0,00	0,00	2,19	2,24	1,11	0,00



Schema di carico n°2 - respingente a 17,40 dall'appoggio lato TP

TP ← PA

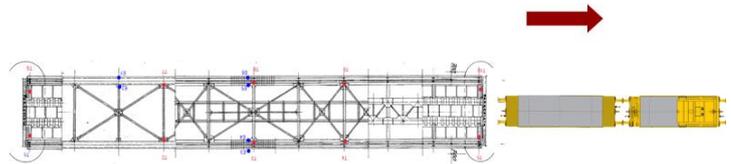
PROVE STATICHE, Luglio 2021

Freccia massima 9,61 mm



Figura 10 - Schema di carico n° 2 - Prove del Luglio 2021

Tabella riassuntiva delle letture										
Stato	Inclinometri lato sinistro					Inclinometri lato destro				
	1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00
Inclinometri lato destro (mm)										
scarcio	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,30	7,72	4,06	0,00	0,00	7,20	7,66	4,74	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,17	7,44	4,06	0,00	0,00	6,89	7,45	4,78	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,27	7,62	4,06	0,00	0,00	6,92	7,41	4,59	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,29	7,62	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,59	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	8,01	8,18	6,36	0,00	0,00	7,82	9,36	6,54	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	8,10	8,18	6,36	0,00	0,00	7,89	9,50	6,56	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,04	6,14	0,00	0,00	7,85	9,57	6,56	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,04	6,14	0,00	0,00	7,85	9,57	6,56	0,00
scarcio	0,00	0,02	0,18	-0,45	0,00	0,00	1,74	1,75	0,61	0,00
scarcio	0,00	0,02	0,18	-0,45	0,00	0,00	1,59	1,81	0,56	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,88	8,70	6,05	0,00	0,00	9,04	11,12	7,78	0,00
Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,88	8,70	6,05	0,00	0,00	9,04	11,12	7,78	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,63	7,73	4,73	0,00	0,00	8,74	9,86	6,21	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,88	8,01	4,87	0,00	0,00	8,68	9,78	5,97	0,00
Respingente a 1,50 m lato Trapani	0,00	7,98	8,28	6,18	0,00	0,00	8,81	9,80	6,12	0,00
scarcio	0,00	1,18	0,69	0,20	0,00	0,00	1,85	2,45	1,37	0,00
scarcio	0,00	1,21	0,69	0,35	0,00	0,00	2,19	2,24	1,11	0,00



Schema di carico n°3 - ponte scarico - tramoggia lato PA

TP ← PA

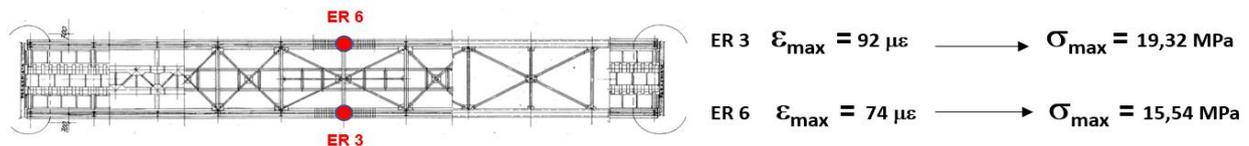
PROVE STATICHE, Luglio 2021

Freccia massima 1,84 mm



Figura 11 - Schema di carico n° 3 - Prove del Luglio 2021

Il grafico che segue rappresenta l'andamento delle deformazioni ad ogni fase di carico, il valore della deformazione massima registrata dai due estensimetri e la stima delle tensioni associate. Si ritiene opportuno precisare che le tensioni sotto riportate sono relative e dunque riconducibili al solo carico aggiunto.



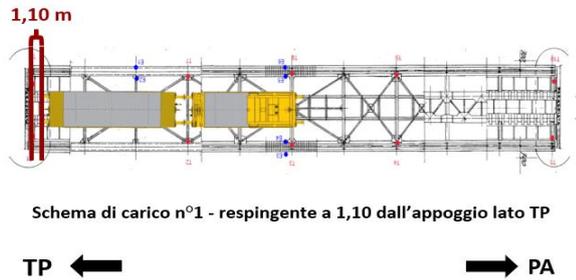
PROVE STATICHE, Luglio 2021



Figura 12 - Risultati dati estensimetrici della prova di Luglio 2021

I risultati presentati fino a questo punto fanno riferimento alle prove preliminari condotte prima dell'esecuzione degli interventi di manutenzione straordinaria. Nei passaggi successivi, invece, verranno illustrati i risultati delle prove di verifica eseguite successivamente agli interventi, con particolare attenzione al confronto tra i valori delle frecce massime registrate durante le prove preliminari (luglio 2021) e quelle di verifica (marzo 2022). Tale confronto permette di valutare l'efficacia degli interventi effettuati, evidenziando eventuali miglioramenti nelle prestazioni strutturali dell'impalcato.

		Tabella riassuntiva della lettura									
		Lato appoggio lato Trapani					Lato appoggio lato Palermo				
Sito		1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
Distanza inclinometro		0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00	12,81	21,35	29,89	42,70
Inclinometro		Inclinometro									
scario		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lato appoggio lato Trapani	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,30	7,72	4,88	0,00	0,00	7,00	7,66	4,71	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,17	7,44	4,88	0,00	0,00	6,88	7,43	4,78	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,27	7,65	4,88	0,00	0,00	6,88	7,43	4,78	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,36	7,62	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,38	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,36	7,62	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,38	0,00
Lato appoggio lato Palermo	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	8,01	8,18	6,38	0,00	0,00	7,82	8,38	6,54	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,34	6,14	0,00	0,00	7,85	8,57	6,86	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,34	6,14	0,00	0,00	7,85	8,57	6,86	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,88	8,70	6,05	0,00	0,00	8,04	11,12	7,78	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,88	8,70	6,05	0,00	0,00	8,04	11,12	7,78	0,00



Schema di carico n°1 - respingente a 1,10 dall'appoggio lato TP

TP ←

→ PA

PROVE STATICHE, Marzo 2022

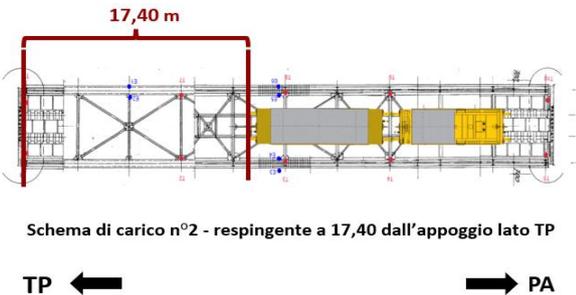
2021
Freccia massima 8,12 mm

2022
Freccia massima 4,88 mm



Figura 13 - Schema di carico n° 1 - Prove del Marzo 2022 e confronto

		Tabella riassuntiva della lettura									
		Lato appoggio lato Trapani					Lato appoggio lato Palermo				
Sito		1A	2A	3A	4A	5A	1B	2B	3B	4B	5B
Distanza inclinometro		0,00	12,81	21,35	29,89	42,70	0,00	12,81	21,35	29,89	42,70
Inclinometro		Inclinometro									
scario		0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00
Lato appoggio lato Trapani	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,30	7,72	4,88	0,00	0,00	7,00	7,66	4,71	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,17	7,44	4,88	0,00	0,00	6,88	7,43	4,78	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,27	7,65	4,88	0,00	0,00	6,88	7,43	4,78	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,36	7,62	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,38	0,00
	Respingente a 1,10 m lato Trapani	0,00	7,36	7,62	4,73	0,00	0,00	6,92	7,41	4,38	0,00
Lato appoggio lato Palermo	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	8,01	8,18	6,38	0,00	0,00	7,82	8,38	6,54	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,34	6,14	0,00	0,00	7,85	8,57	6,86	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,91	8,34	6,14	0,00	0,00	7,85	8,57	6,86	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,88	8,70	6,05	0,00	0,00	8,04	11,12	7,78	0,00
	Respingente a 17,40 m lato Trapani	0,00	7,88	8,70	6,05	0,00	0,00	8,04	11,12	7,78	0,00



Schema di carico n°2 - respingente a 17,40 dall'appoggio lato TP

TP ←

→ PA

PROVE STATICHE, Marzo 2022

2021
Freccia massima 9,61 mm

2022
Freccia massima 9,58 mm



Figura 14 - Schema di carico n° 2 - Prove del Marzo 2022 e confronto

A seguito dei lavori di manutenzione la struttura ha subito un miglioramento sul piano statico deducibile non solo dalla riduzione delle frecce massime a pieno carico ma soprattutto dal valore di quelle residue dopo lo scarico.

5. Prove dinamiche

Le prove dinamiche sono state condotte con l'obiettivo di caratterizzare le proprietà vibrazionali della struttura sia prima che dopo gli interventi di manutenzione. Per queste indagini sono stati utilizzati sei sensori accelerometrici (PCB 393-A03) orientati lungo l'asse verticale e uno sull'asse orizzontale trasversale all'impalcato e uno lungo l'asse lognitudinale, collegati ad una centralina di acquisizione a 24 bit con convertitore Analogico/Digitale (N.I. C-Daq 9172+4 USB9234), posizionati in punti chiave dell'estradosso dell'impalcato: due in corrispondenza della mezzeria e quattro ai quarti di luce, rispettivamente lato monte e lato valle. La scelta della posizione è legata alla necessità di cogliere tutte le forme modali attese, sia flessionali che torsionali.

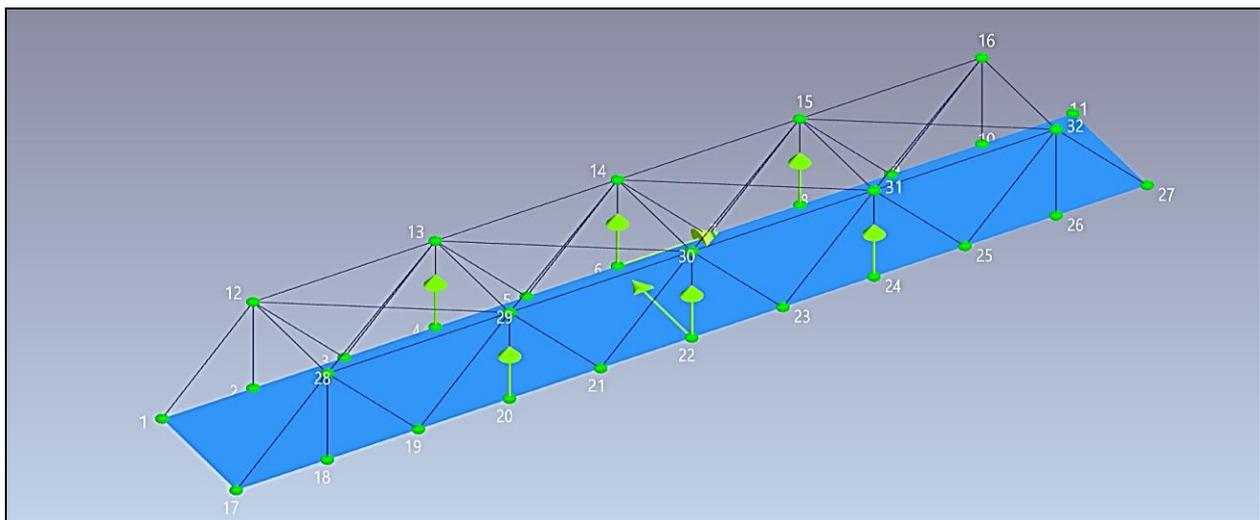


Figura 25 - Schema disposizione della strumentazione

Le misurazioni sono state effettuate utilizzando due approcci:

- **Operative Modal Analysis (OMA)**, sfruttando le eccitazioni ambientali come sorgente naturale di vibrazione. Questo metodo è stato particolarmente utile per individuare le frequenze naturali della struttura e le forme modali.
- **Experimental Modal Analysis (EMA)**, condotta mediante un martello strumentato per generare una forzante nota. Questa tecnica ha permesso di integrare i dati dell'OMA e determinare con maggiore precisione i coefficienti di smorzamento.

La frequenza di campionamento, in entrambe le modalità di acquisizione, è stata fissata a 100 Hz, garantendo un'elevata risoluzione temporale e una frequenza di Nyquist sufficiente a catturare le prime quattro frequenze fondamentali [4]. Nell'ambito dell'Analisi Modale Operazionale, sia che si utilizzi un approccio classico sia che si

utilizzi la tecnica FDD, operando nell'ipotesi che la forzante non nota abbia le caratteristiche di un rumore bianco, è necessario scegliere accuratamente la lunghezza totale delle registrazioni. Generalmente, in letteratura, la durata delle acquisizioni viene scelta pari a 1000÷2000 volte il primo periodo di vibrare della struttura [5], circostanza, questa, che richiede la conoscenza del valore del primo periodo fondamentale non sempre possibile. Precedentemente al caso in esame, gli autori hanno avuto la possibilità di svolgere numerose prove dinamiche su impalcati con caratteristiche strutturali e geometriche simili. Tali esperienze ha permesso loro di raccogliere una vasta raccolta di dati, riferiti ai risultati delle elaborazioni dinamiche, in cui il periodo fondamentale è sempre stato inferiore a 1,00 sec (prima frequenze propria maggiore di 1,00 Hz). Per la scelta della durata del tempo di acquisizione ci si è posti nelle condizioni estreme, ponendo il primo periodo fondamentale pari a 1,00 sec e di adottare una durata di acquisizione pari a 2000 volte tale periodo, corrispondente a 30 minuti per le acquisizioni in ambito OMA. Per le acquisizioni in ambito EMA, invece, utilizzate per la valutazione dello smorzamento in oscillazione libera, dopo l'impulso generato dal martello strumentato, bastano pochi secondi di acquisizione; nel caso in esame le acquisizioni hanno avuto durata pari a 20 secondi, sufficiente a catturare le risposte transitorie indotte dalla forzante nota.

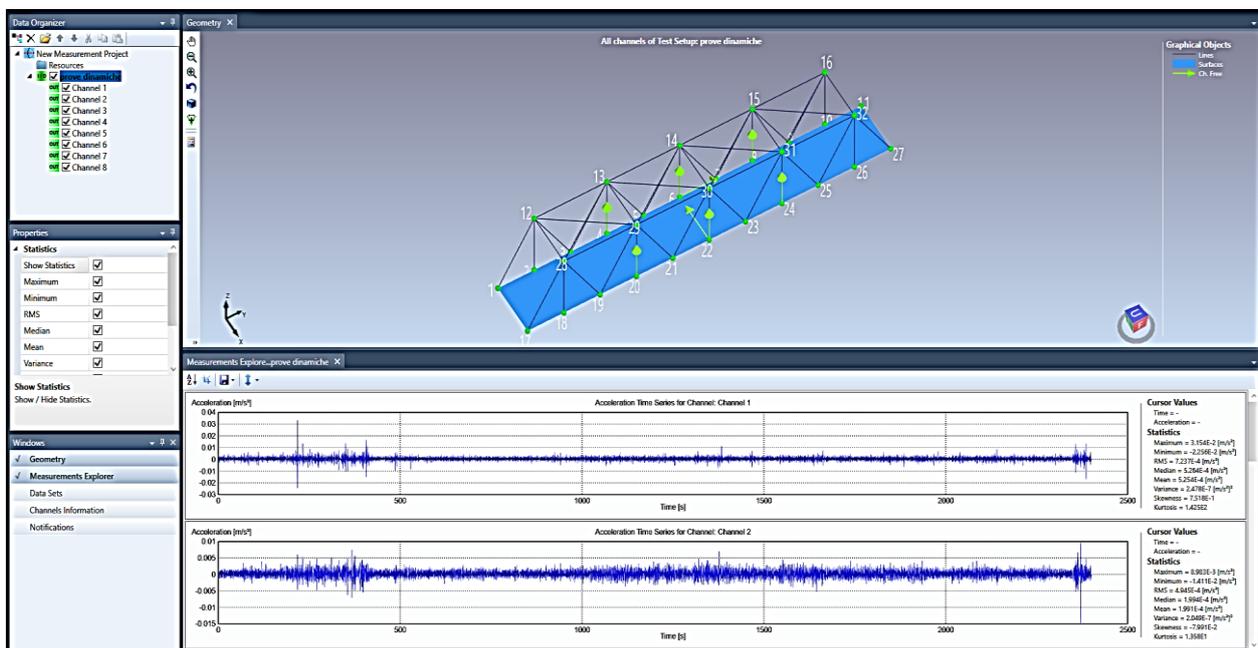


Figura 26 - Esempio di assegnazione di un segnale al relativo DOF

A seguire si riportano i valori singolari delle matrici Densità Spettrale di Potenza, in cui sono evidenziate le frequenze individuate, ottenute dall'elaborazione delle due campagne prova.

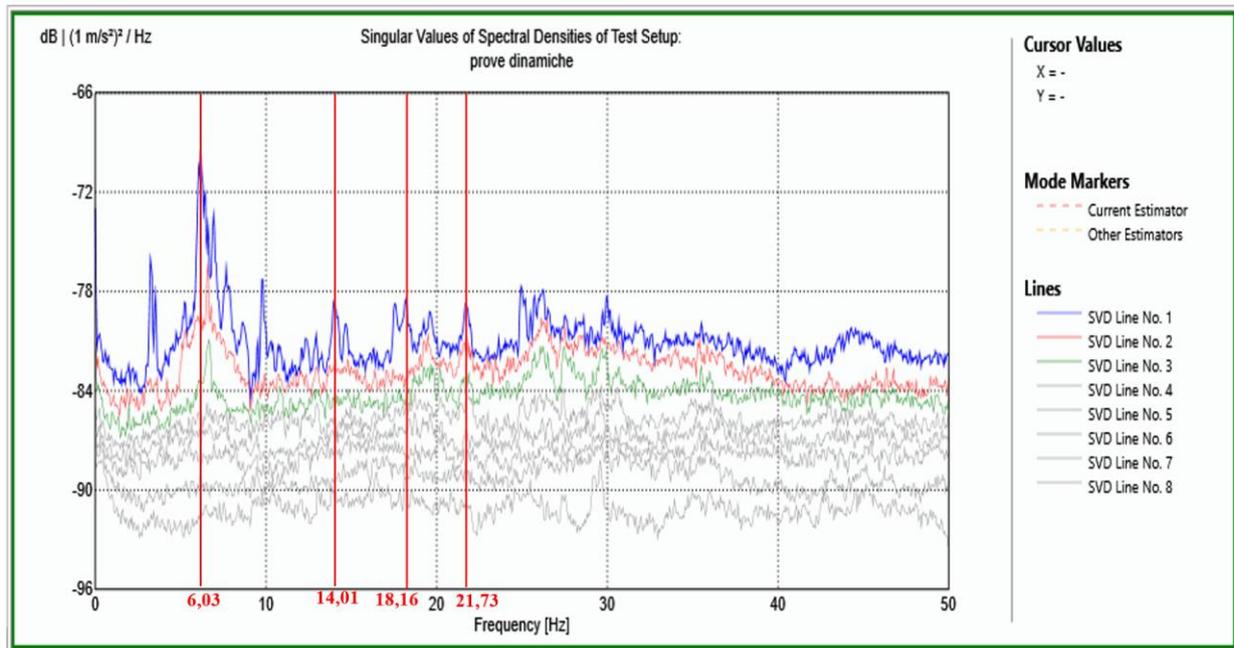


Figura 19 - Valori Singolari della matrice Densità Spettrale di Potenza - prova del 14/07/2021

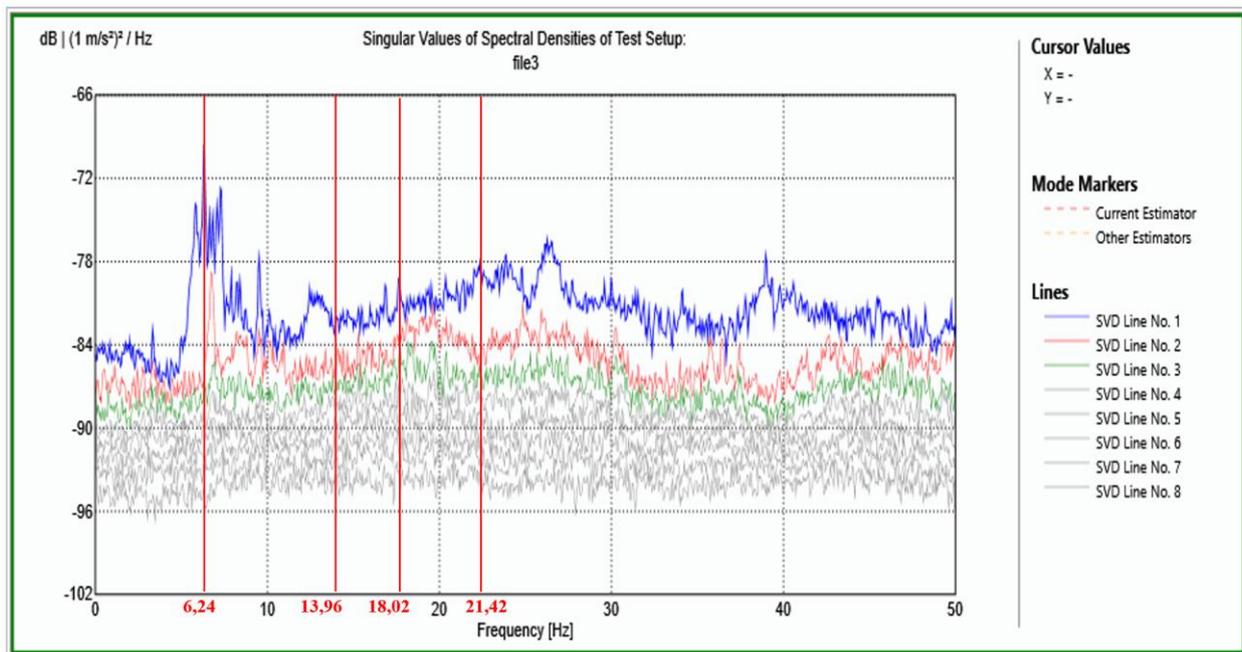


Figura 20 - Valori Singolari della matrice Densità Spettrale di Potenza - prova del 23/03/2022

La stima del coefficiente di smorzamento è stata valutata sulle acquisizioni in oscillazione libera di cui si riportano le Time History analizzate con il software di elaborazione che restituisce lo smorzamento in percentuale.

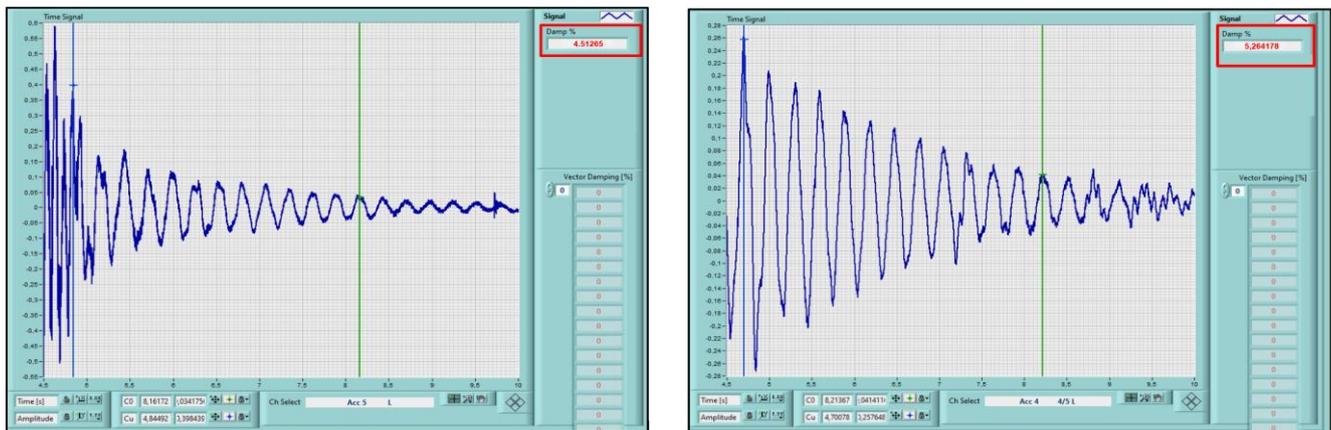


Figura 21 - Stima del coefficiente di smorzamento sull'acquisizione in oscillazione libera
- prove del 14/07/2021 a sx e prove del 23/03/2022 a dx.

A seguire si riporta un quadro riepilogativo dei risultati ottenuti in termini di frequenza, di forme modali e anche di smorzamento.

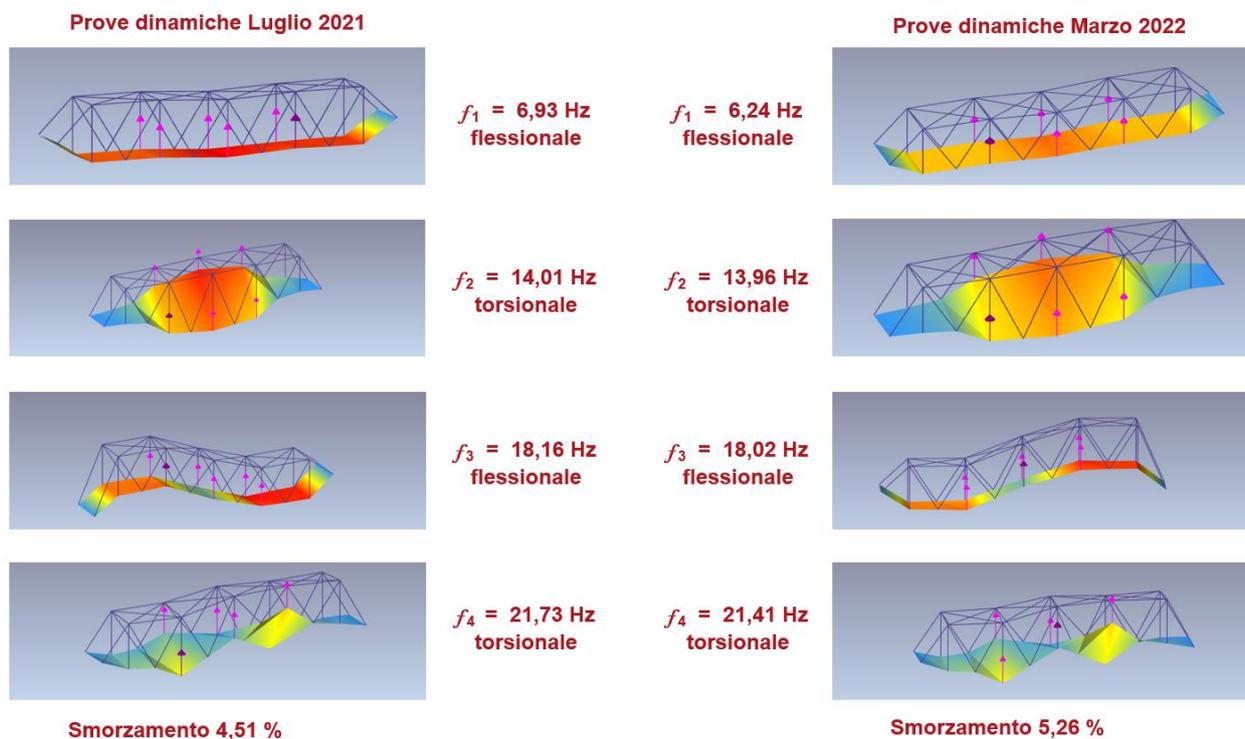


Figura 22 - Confronto tra i risultati delle prove dinamiche

Il confronto tra le forme modali determinate nelle due campagne di prova è stato effettuato attraverso il calcolo del Modal Assurance Criterion (MAC), una misura utilizzata per verificare il grado di corrispondenza tra le singole forme modali identificate in ciascuna analisi. Tale confronto consente di valutare la coerenza delle forme modali

rilevate in diverse condizioni operative, garantendo un'adeguata caratterizzazione dinamica della struttura. A seguire, viene riportato il grafico tridimensionale del MAC, in cui sono rappresentate sulle due dimensioni del piano le frequenze proprie rilevate nelle due campagne di prova e, sull'asse verticale, i valori numerici del coefficiente MAC. Questo grafico permette di visualizzare immediatamente le corrispondenze modali tra le prove, evidenziando i casi in cui il valore del MAC si avvicina a 1, indicativo di un'ottima corrispondenza tra le forme modali.

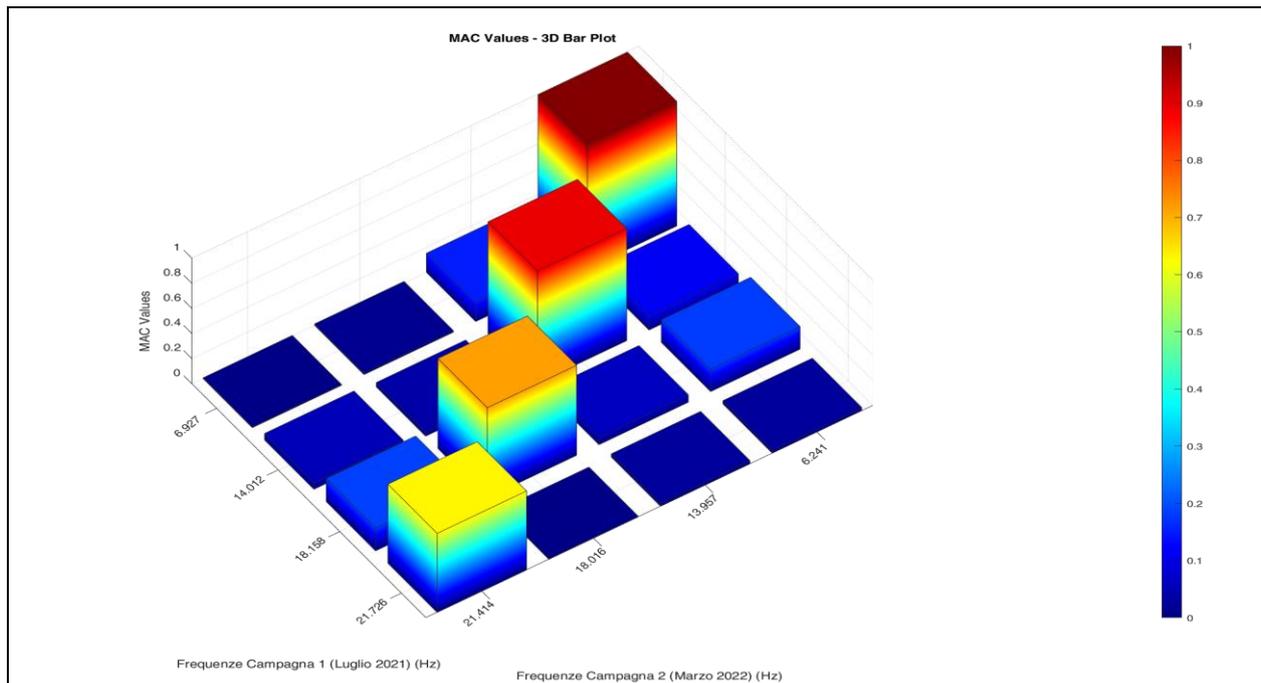


Figura 23 - Confronto tra i modi delle due campagne di prova attraverso il MAC

È stato più volte anticipato che le campagne di prova sono state condotte al fine di statuire un confronto tra le due; questa fase di valutazione non è solitamente compito del tecnico di laboratorio che esegue ed elabora la prova che invece si limita, solitamente, a fornire i risultati in maniera asettica, cioè senza dare interpretazioni o giudizi. Dal punto di vista scientifico però, lo studio non assume lo stesso valore se non si forniscono anche gli aspetti diagnostici.

Un'analisi poco attenta porterebbe ad asserire che tra lo scenario ante e post operam non c'è stata nessuna variazione sensibile dei risultati, soprattutto in termini di frequenze. Una valutazione più attenta, invece, farebbe emergere una leggera diminuzione delle prime quattro frequenze a seguito dei lavori di manutenzione straordinaria. Lo scarto non va letto solo sul piano numerico, l'attenzione infatti va posta sulle condizioni climatiche poiché le prove preliminari sono state condotte in piena stagione estiva con una temperatura media di 35°C, mentre nel 2022 la prova è stata eseguita a marzo e la temperatura media era 7°C. La temperatura ha una forte influenza sul comportamento dinamico di una struttura ancor più se quest'ultima è in carpenteria metallica e quindi molto più

vulnerabile alle variazioni termiche. Se anche la seconda prova fosse stata eseguita a temperature elevate come le precedenti, lo scarto di frequenze sarebbe stato molto più marcato.

La considerazione immediata che il lettore starà facendo è: sarebbe stato opportuno condurre le prove nello stesso periodo dell'anno per ripetere le condizioni climatiche. Ci accodiamo a tale considerazione e rispondiamo che il protocollo è stato stilato e programmato dai tecnici di RFI che basandosi su esigenze non solo tecniche, hanno imposto i tempi di esecuzione.

Gli interventi sulle strutture, sia che essi siano mirati ad incrementarne le capacità o semplicemente volte alla conservazione dell'opera e al prolungamento della vita utile, hanno un'influenza sulle caratteristiche dinamiche che tendenzialmente è opposta a quanto riscontrato in questo studio. Il motivo di questo risultato è che la corrosione ha modificato le condizioni di vincolo originarie irrigidendo le giunzioni e riducendo gli scorrimenti relativi tra le parti di esse. I lavori di manutenzione hanno ripristinato le condizioni preesistenti rimuovendo le parti ossidate mediante la sabbiatura e sostituendo tutti i bulloni. Gli scorrimenti relativi nei giunti, nell'ambito dei micro spostamenti, hanno reso la struttura più deformabile influenzando non solo sulle frequenze che si sono abbassate ma anche sulle capacità dissipative, infatti il coefficiente di smorzamento ha subito invece un incremento di quasi il 17%.

6. Conclusioni

Il protocollo di indagine è stato studiato al fine di verificare l'influenza dei lavori di manutenzione straordinaria sulle prestazioni strutturali del Ponte Forgia. Le prove statiche hanno confermato un miglioramento significativo del comportamento in campo elastico della struttura, mentre le prove dinamiche hanno messo in luce che gli interventi hanno avuto un'influenza anche sulle condizioni di vincolo che ne hanno definito una maggiore capacità dissipativa.

Questo approccio ha permesso inoltre ottenere i dati sperimentali utili per la validazione di un modello FEM e di definire la base per un monitoraggio futuro.

L'approccio seguito evidenzia l'importanza di un monitoraggio sistematico per garantire la sicurezza e la durabilità delle infrastrutture, soprattutto in contesti ambientali particolarmente aggressivi. Il ponte Forgia rappresenta un caso studio significativo, dimostrando come interventi ben progettati e indagini strutturali accurate possano preservare il patrimonio infrastrutturale e garantire la sicurezza del servizio.



Figura 24 - Foto del ponte Forgia a lavori ultimati

Bibliografia

- [1] F. De Miranda: *Ponti Ferroviari a Struttura in Acciaio*, Monografia ILVA Ed. 1989.
- [2] F. De Miranda: *Ponti a struttura d'acciaio*. Monografia Italsider
- [3] F. De Miranda: *Ponti a struttura d'acciaio* in *Manuale di Ingegneria Civile*, Zanichelli 1991.
- [4] Chopra, A. K.: *Dynamics of Structures: Theory and Applications to Earthquake Engineering* (2017).
- [5] Ventura, C. E., & Brincker, R.: *Introduction to Operational Modal Analysis I* (2008)