



**Politecnico
di Torino**

**DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA STRUTTURALE, EDILE E
GEOTECNICA (DISEG)**

TESI DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA CIVILE

**IDENTIFICAZIONE DEL DANNO IN OPERE
STRUTTURALI MEDIANTE FEM: VERSO IL
DIGITAL TWIN**

Relatori:

Prof. Ing Rosario Ceravolo

Candidato:

Marco Carere

Corelatori:

Ing. Gaetano Miraglia

Ing. Stefania Coccimiglio

Ing. Giorgia Coletta

Abstract

L'alterazione delle condizioni di salute dei manufatti è un fenomeno che si sviluppa in modo spontaneo durante la vita degli stessi: innescata proprio dalle situazioni di utilizzo ed esercizio dei fabbricati, è una condizione intrinseca ed inevitabile che interessa tutte le costruzioni. Essa si può manifestare a differenti scale, in modo più o meno rapido e soprattutto con sintomi più o meno evidenti, e risulta sempre in quello che viene definito danno strutturale. La manutenzione e l'intervento si realizzano nel predisporre e strumentare adeguatamente la struttura al fine di fornirle la possibilità di comunicare il proprio stato di salute all'utenza qualificata. In questa chiave, può essere interessante associare alla pratica dello *structural health monitoring* il concetto del digital twin: una simulazione ad alta fedeltà di una realtà fisica che si presenta come un'evoluzione della classica modellazione agli elementi finiti, in quanto interseca l'approccio classico con i campi dell'intelligenza artificiale, del *machine learning* e le pratiche di ottimizzazione e del *decision support*.

Indice

Introduzione	5
Capitolo 1 – Structural Health Monitoring	8
1.1 Danno Strutturale e Structural Health Monitoring	8
1.2 Structural Health Monitoring	10
1.2.1 EMA & OMA	11
1.2.2 Approccio all’individuazione del danno	13
1.2.3 Fasi del processo SHM	15
Capitolo 2 - Digital Twin	22
2.1 Cyber-Physical Systems	22
2.2 Internet of Things	23
2.3 Digital Twin	24
2.3.1 Struttura del Digital Twin	28
2.3.2 Workflow del Digital Twin	38
Capitolo 3 – Monitoring della Struttura Reale	44
Premessa	44
3.1 Impostazione del procedimento	45
3.2 Telaio reale	46
3.3 Modellazione agli elementi finiti	48
3.3.1 Vincoli	51
3.3.2 Caratteristiche dei materiali	52
3.4 Campagna di monitoraggio	53
3.4.1 Simulazione del monitoraggio	53
3.4.2 Identificazione modale tramite algoritmo SSI	60

Capitolo 4 – Simulation Digital Twin	70
4.1 Model Updating	70
4.2 Formulazione e simulazione degli scenari di danno	72
4.2.1 Formulazione	73
4.2.2 Simulazione	75
4.3 Training del <i>digital twin</i>	82
4.4 Configurazioni danneggiate	86
4.4.1 Introduzione del danno	86
Capitolo 5 – Analisi dei Risultati	89
5.1 Pattern di frequenza sperimentali	90
5.2 Classificazione del danno	99
5.2.1 Analisi di <i>precision & recall</i> per la classificazione del danno	103
Capitolo 6 – Conclusioni	105
6.1 Sviluppi	107
BIBLIOGRAFIA	109





Introduzione

Tutte le strutture civili, dai ponti alle grandi dighe, dagli edifici storici alle autostrade, sono soggette a un deterioramento che si sviluppa e acuisce nel tempo come effetto non solo e non tanto di inattese azioni eccezionali come terremoti o alluvioni, quanto come conseguenza alle stesse sollecitazioni di esercizio per cui sono state progettate [23]. I ripetuti carichi da traffico cui è sottoposto un viadotto sono, sul lungo periodo, causa di collasso per fatica: la nascita dei quadri microfessurativi dovuti alla dissipazione di energia fa sì che, dopo un certo numero di cicli di carico, il sistema entri in crisi per valori di sollecitazione e tensione più bassi rispetto alla soglia resistente dei materiali. Un ponte situato in prossimità di acque salmastre vede il proprio cemento armato sotto costante attacco da parte degli agenti chimici ambientali, i quali si combinano naturalmente con la calce dando vita a un ambiente depassivante per l'acciaio, che si ossida, con conseguente aumento di volume e riduzione dell'area resistente.

L'alterazione delle condizioni di salute dei manufatti è un fenomeno che quindi si sviluppa in modo spontaneo durante la vita degli stessi: innescata proprio dalle situazioni di utilizzo ed esercizio dei fabbricati, è una condizione intrinseca e inevitabile che interessa tutte le costruzioni. Essa si può manifestare a differenti scale, in modo più o meno rapido e soprattutto con sintomi più o meno evidenti, e risulta sempre in quello che viene definito *danno strutturale*. La manutenzione e l'intervento volti a prevenirne l'apparizione sono degli imperativi che vanno pertanto presi in considerazione dalle parti interessate (dai finanziatori ai progettisti) fin dalla fase di concettualizzazione e progettazione delle opere. Ciò si realizza nel predisporre e strumentare adeguatamente la struttura al fine di fornirle la possibilità di comunicare il proprio stato di salute all'utenza qualificata, mettendo quest'ultima nella posizione di poter notare e

individuare i segnali precursori del danno con sufficiente anticipo. In termini più o meno tecnici, la pratica di implementare una strategia di questo tipo si identifica sotto il nome di *structural health monitoring* (SHM), che nell'ambito dell'ingegneria civile sta a indicare il processo che attua l'identificazione del *danno* [24].

Il concetto è quello di sfruttare un sistema di misurazione da apporre sul manufatto e utilizzarlo per l'osservazione delle prestazioni dello stesso e il loro mutare nel tempo. Tale rete di dispositivi è necessaria per l'operazione di osservazione della struttura e permette la raccolta periodica di misure che consentono l'estrazione di caratteristiche sensibili al danno e, in seguito all'analisi di queste, la valutazione del corrente stato di salute della struttura [24].

Il ventaglio delle metodologie e dei dispositivi che vengono impiegati nello *structural health monitoring* può essere molto ampio e la loro applicazione varia a seconda delle grandezze fisiche che devono essere misurate; le procedure di rilevamento del *danno* sono di tipo visivo o di tipo sperimentale, vedono l'utilizzo di strumentazione di tipo acustico / ultrasonico, l'impiego di metodi che coinvolgono campi magnetici o ancora apparecchi radiografici o campi termici.

Nel ramo dell'ingegneria civile, il monitoraggio che è oggetto di interesse per la presente tesi è quello di tipo dinamico, ovvero un monitoraggio volto al riconoscimento del comportamento dinamico delle costruzioni attraverso l'identificazione delle caratteristiche fisico-meccaniche che lo influenzano, che nella fattispecie sono rappresentate dalle grandezze fisiche di *massa* e *rigidezza*. È noto, infatti, come una struttura soggetta a un carico che non è costante ma che è funzione del tempo oscilli secondo dei *modi* prestabiliti, i quali sono attributi propri della struttura, governati appunto da massa e rigidezza e caratterizzati ciascuno da valori di frequenza, smorzamento e forma modale specifici. Per un *SHM* che abbia questo orientamento, gli apparecchi da implementare sono tutto sommato abbastanza

classici, trattandosi sostanzialmente di accelerometri: essi misurano appunto le accelerazioni che gli elementi del fabbricato subiscono in risposta al rumore ambientale o a prefissate eccitazioni artificiali, a seconda del tipo di analisi.

I recenti progressi nelle tecnologie informatiche e dei sensori degli ultimi due decenni hanno poi permesso una forte espansione dello *SHM* nell'ambito delle infrastrutture, sia dal punto di vista quantitativo che in termini tecnico-operativi. Da un lato è incrementato il numero di manufatti monitorati, includendo costruzioni sia storiche che nuove, gallerie, ponti, impianti industriali, impianti di produzione, piattaforme petrolifere offshore, strutture portuali, fondazioni e scavi; dall'altra, lo sviluppo dei dispositivi ha offerto una valida alternativa *data-driven* per incorporare l'effettivo comportamento strutturale globale attraverso le metodologie *SHM* basate sulle vibrazioni.

In questa chiave, può essere molto interessante fare un ulteriore passo avanti e, date queste premesse, provare ad associare alla pratica dello *structural health monitoring* il concetto del *digital twin*. Un *digital twin* è una simulazione ad alta fedeltà di una realtà fisica, che sfrutta dati da questa forniti in tempo reale per pianificare scenari di manutenzione e intervento a priori in modo più o meno autonomo. Esso, applicato all'ambito dell'ingegneria civile, si presenta come un'evoluzione della classica modellazione agli elementi finiti, in quanto interseca l'approccio classico, che può essere sia *model-driven* che *data-driven*, con i campi dell'intelligenza artificiale, del *machine learning* e le pratiche di ottimizzazione e del *decision support*, arricchendone le potenzialità e allargandone i risvolti applicativi.

Capitolo 1 – Structural Health Monitoring

1.1 Danno Strutturale e Structural Health Monitoring

Con il termine *danno strutturale* può essere definito, in termini generali, un cambiamento introdotto nel sistema che ne influenza negativamente le attuali e future prestazioni [24]. Implicito in questa definizione è il fatto che il concetto di *danno* sia effettivamente privo di significato fintanto che non ha luogo un confronto tra due differenti configurazioni (o stati) del sistema in esame, una delle quali è assunta essere la *configurazione non danneggiata*. In una struttura in stato danneggiato, il danno si presenta generalmente in termini di cambiamento a livello delle seguenti caratteristiche:

- materiali;
- proprietà geometriche del sistema;
- configurazione di vincolo;
- condizioni al contorno.

Su scala temporale, il danno può accumularsi incrementalmente attraverso lunghi periodi di tempo, come nel caso del deterioramento per fatica, corrosione, creep, oppure può manifestarsi in tempi molto più brevi, ad esempio come risultato di eventi discreti programmati, quali l'atterraggio di un aeroplano, o non programmati, come terremoti o altre calamità naturali. Considerando invece la scala spaziale, qualsiasi tipo di danno nasce inizialmente a livello dei materiali. Essi, infatti, sono sempre caratterizzati dalla presenza di *difetti*, come le *dislocazioni* per gli acciai, i quali possono crescere sotto opportuni scenari di carico e fondersi tra loro a diverse velocità fino a dar vita a danni sia alle singole componenti che al sistema intero. In quest'ottica, va però tenuto conto del fatto che il termine *danno*

strutturale non sta necessariamente a indicare una configurazione del sistema prossima alla totale perdita di funzionalità, ma si riferisce più in generale a un sistema la cui operatività ottimale è stata alterata da tale danneggiamento. Si pensi per esempio a un nodo trave-pilastro di una struttura industriale che, secondo le prescrizioni progettuali, deve simulare un incastro perfetto, e se ne immagini poi l'indebolimento per fatica dovuta alla presenza di una macchina rotante che grava sulla trave. Se il *danno* presente nel vincolo sarà tale da trasformarne il comportamento da incastro a cerniera, esso non porterà a collasso, ma influenzerà il comportamento dell'elemento strutturale in questione: con una maggiore lunghezza libera d'inflessione, la frequenza di vibrazione della trave sarà diversa da quella prospettata in fase di progettazione, potendo presentare, per esempio, problemi di risonanza con la macchina rotante.

Il *danno strutturale* ha quindi come conseguenza la modifica di alcune caratteristiche del sistema e dei suoi elementi, come la loro rigidità. Se a questo proposito si prende la classica espressione dell'equazione del moto per un sistema sollecitato da un set di forze F :

$$[M]\ddot{y}(t) + [D]\dot{y}(t) + [K]y(t) = F(t)$$

si può notare facilmente come la risposta di questo sia funzione della rigidità, e che quindi una variazione nella matrice che la rappresenta induca un cambiamento nel comportamento dinamico della struttura in questione.

Monitorare la risposta dinamica del fabbricato, ovvero effettuare misurazioni su grandezze che la coinvolgono, è pertanto un punto di partenza per poter risalire a quelle modifiche che la struttura ha subito e che si sono finora identificate con il termine *danno strutturale*. Lo *structural health monitoring* in campo civile utilizza, in generale, misure di accelerazione, spostamento o deformazione rilevate sulle

strutture, dati che vengono successivamente elaborati e somministrati ad algoritmi che permettono di estrapolare alcuni attributi del sistema, come le sue matrici di massa e rigidità oppure le forme modali, in quel procedimento che viene definito *identificazione strutturale*. Una differenza in queste grandezze rispetto ai loro valori nella configurazione non danneggiata indica la presenza di un danno strutturale.

1.2 Structural Health Monitoring

Lo *SHM* rappresenta uno strumento molto potente, duttile ed efficace per l'individuazione del danneggiamento in una struttura. La conoscenza di un danno, tuttavia, è un campo caratterizzato da un perimetro abbastanza ampio, e come esito dell'applicazione di metodi di monitoraggio può essere raggiunto a diverse profondità. In altre parole, i risultati che si possono ottenere tramite lo *SHM* si presentano con livelli diversi di informazione, e ciò dipende dalla peculiarità di ciascun caso, dalla strumentazione a disposizione, dalle conoscenze pregresse, dalle condizioni dello stato di fatto ma anche dalla complessità del sistema oggetto di indagine. Per fare chiarezza, si fa riferimento a quanto scritto da Worden, il quale enuncia quattro livelli di profondità che classificano la conoscenza del danno [30]:

- Livello 1: esistenza del danno;
- Livello 2: localizzazione geometrica del danno, ovvero se si è individuata la porzione/componente della struttura ad essere danneggiata;
- Livello 3: definizione della severità del danno, dove per severità è intesa la quantificazione dell'estensione dello stesso e/o la sua ingenza;
- Livello 4: stima della vita utile rimanente.

È interessante sottolineare come i primi tre livelli rappresentino una conoscenza di tipo *diagnostico* del danneggiamento, ovvero ne individuano la tipologia e la magnitudo, mentre se si raggiunge il Livello 4 si è in grado di formulare una vera e propria *prognosi* per la struttura in questione.

1.2.1 EMA & OMA

Il nucleo del processo dello *structural health monitoring* è costituito dal calcolo e dalla determinazione delle grandezze che manovrano il comportamento dinamico del sistema osservato, e pertanto l'analisi modale gioca un ruolo a dir poco centrale. Per mezzo del disaccoppiamento delle equazioni del moto, è possibile rappresentare la struttura come un insieme di oscillatori semplici, ciascuno dei quali dotato di uno specifico modo vibrazionale, il quale porta con sé i parametri modali d'interesse per lo *SHM*, ossia una frequenza, un valore di smorzamento e una forma modale specifici.

Lo studio, a livello teorico, ha quindi come punto di partenza le equazioni del moto, le quali coinvolgono gli attributi della struttura, in termini di massa, rigidità e smorzamento, espressi dalle rispettive matrici, i caratteri della sua risposta dinamica, nella fattispecie i vettori di spostamento, velocità e accelerazione, ed infine l'eccitazione. All'interno di una logica di *structural health monitoring*, e quindi di analisi modale sperimentale, le proprietà fisiche del sistema non sono però note, anzi, costituiscono l'obiettivo del monitoraggio, e la risoluzione delle equazioni del moto deve realizzarsi a partire dai vettori, i quali vanno riempiti con i dati rilevati dal sistema di misurazione. Per quel che riguarda invece l'azione sollecitante, si è di fronte ad uno spartiacque: in letteratura si parla di *Experimental Modal Analysis* oppure di *Operational Modal Analysis*.

EMA è un acronimo che raccoglie le tecniche di identificazione dei parametri del comportamento dinamico di una struttura a partire dalle

misure della forza esercitata e della relativa risposta in termini di vibrazione. Si tratta di un insieme di metodi che si fondano sull'applicazione di un'eccitazione controllata e misurabile che stimoli la reazione del sistema, solitamente tramite l'uso di vibrodine o attuatori di impatto, e che consentono di monitorare la struttura in condizioni straordinarie. Procedure di questo stampo sono state ampiamente sfruttate negli ultimi decenni in campi di applicazione quali l'ingegneria dell'automotive, l'ingegneria aerospaziale, la meccanizzazione industriale e l'ingegneria civile; attualmente, quindi, l'*experimental modal analysis* costituisce uno strumento ben consolidato, che vanta un solido background teorico [29]. L'identificazione dei parametri modali per mezzo di metodologie *EMA*, tuttavia, può rivelarsi impegnativa nel campo civile, dal momento che l'applicazione di forze artificiali ad un edificio può risultare pratica piuttosto complessa da realizzare a livello tecnico. Per questa ragione, la comunità degli ingegneri civili ha recentemente focalizzato l'attenzione sulle opportunità offerte dall'*Operational Modal Analysis*. Si tratta di quella che può essere definita una procedura che permette la stima sperimentale dei parametri modali di una struttura a partire esclusivamente dall'osservazione della sua risposta vibrazionale. L'idea che sta dietro alla metodologia *OMA* è quella di approfittare dell'eccitazione naturale e liberamente accessibile dovuta alle azioni offerte dall'ambiente e dai carichi di esercizio (vento, vibrazioni dovute al traffico, micro-vibrazioni) e sfruttarla al posto della sollecitazione artificiale. Questa peculiarità permette di effettuare le misurazioni mentre la struttura si trova in condizioni operative, senza alterarne il funzionamento e usufruendo di una risorsa naturalmente disponibile; inoltre, le misure riguardano esclusivamente la risposta del sistema, e pertanto le tecniche *OMA* vengono spesso chiamate con il nome di *output-only modal analysis*. La maggior parte di queste, comunque sia, sono state derivate a partire dalle procedure *EMA*, e pertanto ne

condividono buona parte dell'impianto matematico e teorico; a separarle è la formulazione dell'input, che è noto e misurabile per l'EMA mentre è di tipo stocastico per l'OMA. I connotati che rendono l'*operational modal analysis* così attraente per il campo dell'ingegneria civile sono sicuramente la facilità e il costo relativamente contenuto del set-up sperimentale e della sua installazione, alle quali però si aggiunge il fatto che i test si attuino senza bisogno di interferire con il regolare funzionamento dell'edificio e, conseguentemente, i parametri modali così identificati siano rappresentativi dell'effettivo comportamento della struttura in condizioni operative.

1.2.2 Approccio all'individuazione del danno

La conduzione di uno studio di *structural health monitoring* può avvenire essenzialmente secondo due diversi approcci, che Worden et al. [31] riportano con gli appellativi di *Model-Driven Approach* e *Data-Driven Approach*. Il primo formula il procedimento di identificazione come problema inverso, ovvero a partire da un modello della struttura supposta priva di danno si utilizza la teoria dell'ottimizzazione per relazionare i cambiamenti registrati dai trasduttori con delle modifiche nei parametri fisici della struttura. Il *data-driven approach* invece fa uso degli algoritmi *supervised* o *unsupervised learning*, i quali assegnano ai dati misurati sul sistema d'interesse una specifica classe di danno.

1.2.2.1 Model-Driven Approach

Si tratta di un metodo che si innesca a partire da modelli matematici, e sul loro utilizzo in luogo dei dati storici catturati dal monitoraggio, carattere che dà la possibilità di far fronte a situazioni nuove e impreviste grazie alla capacità di simulazione di una vasta gamma di scenari anche se questi non sono stati osservati sulla struttura reale. Nel momento in cui si nota uno scostamento dello stato del sistema

dall'andamento operativo previsto, allora i parametri fisici del modello che descrivono la nuova situazione vengono aggiornati tramite *model updating*, in modo da poter continuare a lavorare su un modello che rispecchia le caratteristiche attuali del sistema.

La procedura operativa può essere schematizzata nel seguente modo [31]:

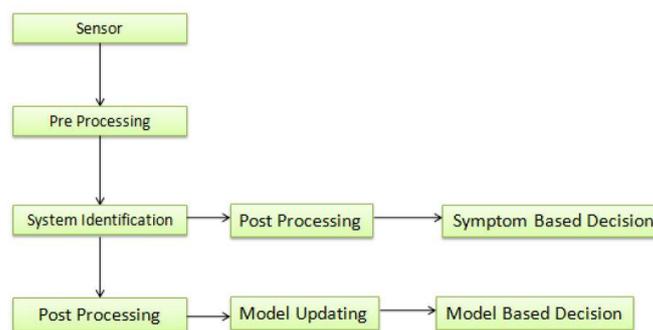


FIGURA 1: FASI DEL MODEL-DRIVEN APPROACH [31]

Al modello iniziale si assegnano delle caratteristiche fisico meccaniche di primo tentativo, che vengono aggiornate tramite il *model updating*, procedura che si fonda sull'identificazione del sistema reale e sulla teoria di ottimizzazione, e che ha lo scopo di mantenere il modello il più fedele possibile alla struttura. Sull'*updated model* è allora possibile valutare le decisioni da prendere.

1.2.2.2 Data-Driven Approach

L'approccio *data-driven* si basa anch'esso sull'uso di un modello di riferimento della struttura, ma, diversamente dalla sua controparte, esso attua il riconoscimento del danno per mezzo dell'implementazione di algoritmi di identificazione del modello volti ad attribuire una classe di danneggiamento ai dati raccolti. Tali algoritmi si basano sulla comparazione tra la situazione della struttura sotto controllo, espressa dalle misurazioni, e lo stato di altri eventi conosciuti. Il danno viene quindi riconosciuto quando il

comportamento del sistema monitorato si discosta da quello della simulazione di riferimento.

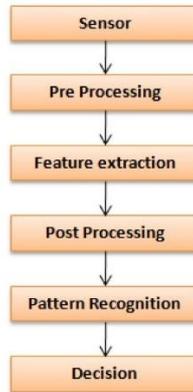


FIGURA 2: FASI DEL *DATA-DRIVEN APPROACH* [31]

1.2.3 Fasi del processo SHM

Per illustrare brevemente il processo del monitoraggio, ci si può rifare a quanto scritto da Farrar et al. [26]. Gli autori ne schematizzano il procedimento, individuando quattro macro-fasi a cui fare riferimento. Queste si organizzano nel seguente modo [26]:

- valutazione operativa;
- acquisizione, normalizzazione e *cleansing* dei dati;
- identificazione delle caratteristiche;
- sviluppo dei modelli statistici per la quantificazione del danno;

All'interno di ciascuna sezione operativa, Kullaa J. [27] riconosce delle funzioni prettamente pratiche per mezzo delle quali ognuna delle fasi si realizza e completa. In *Functions of a Structural Health Monitoring System* (2008), l'autore le schematizza nel seguente modo:

1.2.3.2 Acquisizione e *data cleansing*

Questa porzione del processo di *structural health monitoring* interessa la selezione del tipo di sensori e della loro matrice spazio-temporale, la scelta del metodo di somministrazione dell'eccitazione e infine l'acquisizione, trattamento e stoccaggio dei dati. Le decisioni che vengono prese in questa fase si fondano in larga parte sulle considerazioni formulate durante la valutazione preliminare, modellate attorno alla specificità di ciascun caso, alle quali si aggiungono spesso limitazioni e direttive di tipo economico.

1.2.3.2.1 Strumentazione

La scelta della strumentazione è una delle funzioni individuate in [27] ed è associata alla prima fase di valutazione; è opportuno far notare come altri autori riconducano tale porzione operativa allo step successivo, ossia all'acquisizione e trattamento dei dati.

La misurazione delle grandezze fisiche di interesse costituisce un aspetto critico del processo di *SHM*. La progettazione del sistema di osservazione richiede una chiara e concettuale comprensione del fenomeno da misurare che va tradotta in alcune scelte pratiche da operare [28]:

- scelta dei trasduttori: a seconda della grandezza fisica che si deve osservare, delle caratteristiche della struttura e delle possibilità logistiche vanno scelti gli strumenti appropriati da installare sulla struttura;
- *spatial resolution*: va progettata la matrice spaziale del sistema di misurazione. Il numero dei sensori è da scegliere in funzione della complessità della struttura e delle caratteristiche da rilevare (*sensor density*), mentre la loro dislocazione va determinata con riferimento alla posizione degli elementi più importanti e/o sensibili alle grandezze d'interesse, e può essere supportata dall'utilizzo di modelli agli elementi finiti con i quali

poter anticipare gli scenari di danno. La cattura della risposta di un fabbricato di grande altezza alle sollecitazioni del vento richiederà una disposizione ed un numero di trasduttori diversi da uno studio interessato invece ai cedimenti di lungo periodo in fondazione;

- *time resolution*: si tratta della calibrazione dei periodi e delle frequenze di misurazione da assegnare al sistema di monitoraggio. In generale, misure continue a basse frequenze (cadenza oraria) sono efficaci per la cattura dei *trend* relativi a fenomeni input di tipo prettamente ambientale, come il vento o la radiazione solare; allo stesso modo, misurazioni programmate oppure ad innesco intermittente si applicano per periodi più brevi e con frequenze di campionamento alte, e risultano più adatte all'individuazione dei parametri strutturali.

La scelta della strumentazione è quindi di fondamentale importanza al fine di perseguire l'identificazione del *danno strutturale*, e le sue caratteristiche variano sensibilmente in funzione degli scopi del monitoraggio ma anche delle peculiarità del sistema in oggetto. Ad esempio, l'identificazione della nascita di crack da fatica nelle saldature richiede una scansione continua dell'elemento per mezzo di sensori acustici a frequenze dell'ordine dei MHz che sovrascrivano i dati non rilevanti fino al verificarsi di un evento d'interesse. Se invece si ha la necessità di scandagliare eventi eccezionali di grossa scala, sarà più opportuno l'impiego di sensori passivi da interrogare occasionalmente, congiuntamente con test programmati [28].

1.2.3.2.2 Eccitazione, acquisizione e *data cleansing*

Per innescare una risposta di qualsiasi tipo nella struttura oggetto del monitoraggio, è necessario che questa sia soggetta ad un'eccitazione. Questa può dividersi essenzialmente in due tipologie: a seconda dell'obiettivo del monitoraggio, la forzante somministrata può essere

di tipo artificiale, e quindi fornita tramite l'uso di vibrodine o simulatori d'impatto, oppure naturale, cioè ottenuta sfruttando il vento, le vibrazioni da traffico o eventi sismici.

Il tipo di monitoraggio, poi, può essere condotto con riferimento a due diverse tipologie di osservazione: se gli algoritmi che si utilizzeranno per l'identificazione sono di tipo *input-output*, allora sono necessarie le misure sia dell'eccitazione che della risposta del sistema, viceversa, se si ha a che vedere con metodologie *output-only*, allora è richiesta la conoscenza della sola reazione dinamica della struttura in esame. L'acquisizione dei dati consiste quindi nella conversione, da parte dei trasduttori, della quantità misurata in un segnale elettrico analogico che rappresenta le serie temporali delle osservazioni effettuate.

Siccome i dati possono essere misurati in condizioni più o meno variabili, l'abilità di normalizzarli diventa di importanza centrale nel procedimento di ricerca del danno; tale pratica si realizza nella distinzione tra i cambiamenti nelle letture degli strumenti dovuti al danno da quelli invece causati da una variazione nelle condizioni operative ed ambientali, che quindi non saranno rilevanti per la valutazione della salute della struttura. È fondamentale riuscire a limitare, minimizzare il più possibile le sorgenti di disturbo nel processo di acquisizione dei dati. Per chiudere la fase di trattamento delle misure è necessario performare quello che viene chiamato *data cleansing*, ossia una scelta selettiva dei dati da conservare rispetto a quelli da scartare basata essenzialmente sull'esperienza dell'utenza qualificata [26]. Per fare un esempio, se un'ispezione del set-up sperimentale individuasse la presenza di uno strumento mal installato, sarebbe allora compito del professionista giudicare la validità e l'utilizzabilità delle misure registrate da quel dispositivo.

1.2.3.3 Identificazione delle caratteristiche

È la funzione che permette di individuare gli attributi dei dati accumulati necessari e funzionali al riconoscimento, alla distinzione tra la configurazione non danneggiata e quella danneggiata della struttura. I metodi di estrazione sono svariati [24]: si può far riferimento alla correlazione fra la risposta del sistema misurata, che può comprendere quantità come le ampiezze o le frequenze di vibrazione, e la prima osservazione dello stato di degrado; alternativamente è possibile applicare dei difetti di ingegneria, simili a quelli che ci si aspetta nella struttura in condizioni operative, a sistemi fittizi, e sviluppare una preliminare comprensione dei parametri sensibili al danno previsto. In quest'ottica, l'utilizzo di strumenti analitici sperimentalmente convalidati, come i modelli ad elementi finiti, costituisce un vantaggio, in quanto essi permettono di perpetrare l'applicazione del danno per mezzo di simulazioni numeriche.

1.2.3.4 Sviluppo dei modelli statistici

Lo sviluppo dei modelli statistici è la fase del processo di *SHM* che concerne l'implementazione degli algoritmi che trattano ed operano sulle *features* estratte nello step precedente, con lo scopo di quantificare lo stato di danno del sistema. Tali algoritmi sono volti ad innescare e/o approfondire la conoscenza del danno rispondendo a cinque punti basilari, che richiamano chiaramente i Livelli postulati da Worden et al. [24]:

- *esistenza*: è presente del danno nel sistema?
- *posizione*: dov'è situato il danno all'interno del sistema?
- *tipo*: qual è la tipologia di danno in questione?
- *estensione*: qual è la severità del danno?
- *prognosi*: quanta vita utile rimane alla struttura?

Gli algoritmi utilizzati in questa fase si possono dividere sostanzialmente in due famiglie, le quali sono distinte in base alla conoscenza che si ha riguardo gli stati danneggiato e non danneggiato della struttura. Nel caso in cui siano disponibili le osservazioni, di entrambe le configurazioni, allora si parla dell'impiego dei cosiddetti algoritmi di *supervised learning*: dal momento che il tipo di danno con cui si sta avendo a che fare è noto, e quindi si è già almeno ad un Livello 1 o Livello 2, l'algoritmo è indirizzato ad approfondire tale grado di conoscenza. Viceversa, quando i dati a disposizione contengono solamente informazioni riguardo lo stato non danneggiato, ovvero si sta avendo a che fare con una struttura ancora sana, gli algoritmi si dicono di *unsupervised learning*, e mirano ad individuare almeno la *presenza* e la *posizione* del danno.

È necessario sottolineare come lo studio e l'applicazione dei modelli statistici allo *SHM* costituisca una parte del processo che vede una trattazione relativamente scarsa in letteratura.

Capitolo 2 - Digital Twin

2.1 Cyber-Physical Systems

Il concetto di *cyber-physical system*, abbreviato *CPS*, nasce per la prima volta nel 2006, formulato da James Truchard, il quale, con questa definizione, voleva essenzialmente identificare, introdurre un oggetto che fosse in grado di fondere la realtà fisica con il mondo virtuale, basandosi su un'integrazione di processi computazionali e fisici [20]. A quindici anni di crescita tecnologica dal loro avvento, e seppur ancora nel cuore del loro sviluppo, i *CPS* hanno la forma di una rete di unità che interagiscono con input e output fisici in modo simile ad una rete di sensori, e vedono applicazione in svariati ambiti, dalla produzione alla sanità [20]. Il loro funzionamento muta a seconda dei contesti d'impiego, ma, in generale, si realizza secondo uno schema piramidale proposto da J. Lee (et al.) [21] sulla base di una serie di requisiti che abbraccia quattro aree: la necessità di integrare modelli di differente origine progettuale, la capacità di correlare questi ultimi con i dati osservati attraverso i sensori fisici del *CPS*, la possibilità di imparare dalle informazioni accumulate, con conseguente incremento dell'affidabilità di tali modelli e infine l'utilizzo degli stessi per sviluppare previsioni e supportare il *decision making* [11]. La piramide vede alla sua base le operazioni di generazione dei dati da parte dello spazio fisico e la successiva connessione e trasmissione di questi allo spazio digitale; il secondo blocco si occupa di trattare, analizzare e tradurre le informazioni rendendole interpretabili ai dispositivi digitali del terzo livello, i quali li confrontano con lo storico passato a scopo di individuare trend e variazioni. Il livello 4 elabora delle simulazioni sul lavoro dei blocchi precedenti, gli output delle quali, al livello 5, sono soggetti ad azioni correttive allo scopo di fornire all'utenza risultati

affidabili che rendano le decisioni del management più semplici possibili.

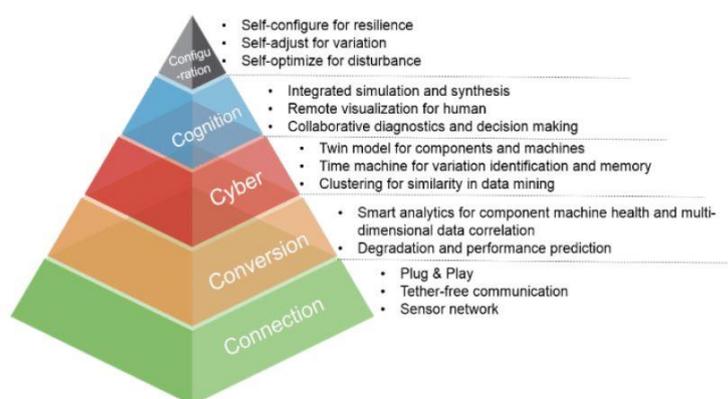


FIGURA 4: ARCHITETTURA A 5 LIVELI PER I SISTEMI CPS [21]

È fondamentale specificare come il *CPS* sia tutt'ora un mezzo tecnologico ancora nella sua fase di sviluppo, e che alcune delle capacità appena illustrate, quali l'applicazione del *machine learning* oppure l'implementazione dell'autonomia decisionale, siano ancora delle potenzialità in gran parte teoriche. Ciò che però rimane al centro dell'interesse è il concetto di sistema *ciberfisico*, ovvero uno strumento che può dar vita a sistemi di produzione, servizi di informazione o di controllo *intelligenti* attraverso l'utilizzo di metodi computazionali, comunicazioni e tecnologie di monitoraggio fra loro in stretta collaborazione.

2.2 Internet of Things

Fin dall'avvento di *internet*, la possibilità di interconnettere calcolatori è diventata una realtà che si è via via tradotta da dominio prettamente elitario-scientifico a pratica quotidiana di uso pubblico. Con lo sviluppo delle tecnologie di comunicazione e l'evoluzione dei network in reti sempre più vaste, ha preso forma l'idea che possano essere le cose stesse (da qui *things*) a poter interconnettersi, poter *parlare* sfruttando la rete; è il concetto di riuscire a portare gli oggetti che

circondano l'utente da un ambiente reale allo spazio digitale, dando vita ad una fusione tra le realtà virtuale e fisica [20]: questa visione ha preso il nome di *Internet of Things*. Vi sono dunque dei veri e propri oggetti alla base dell'*IoT*, denominati *smart objects*, che in quanto tali devono rispondere a dei requisiti che permettano loro di compiere le funzioni richieste dalla struttura *IoT*; tra questi si possono individuare dispositivi radio di identificazione (RFID), sensori e database di vario tipo, microprocessori, laser scanner, ma anche automobili ed elettrodomestici. Le proprietà che devono costituire il comune denominatore e accomunare gli *smart objects* si distinguono in due categorie essenziali [22]:

- **identificazione** – per accedere al mondo digitale, l'oggetto deve essere dotato di un identificativo univoco, come per esempio un indirizzo IP; non solo, parte dell'identificazione riguarda la capacità di comunicare informazioni su sé stesso, come il proprio stato di funzionamento e la localizzazione, e sulle condizioni dell'ambiente con cui è in relazione;
- **connessione** – è la condizione basilare che deve permettere all'oggetto di collegarsi alla rete per trasmettere le informazioni di cui è in possesso.

2.3 Digital Twin

Fatto questo preambolo, il *Digital Twin* può essere identificato in prima battuta come una specifica tipologia tecnologica che fa parte della vasta famiglia dei *cyber-physical systems*, e che si appoggia al concetto di *Internet of Things* sfruttandolo come mezzo comunicativo. Il concetto di *DT* si riferisce alla rappresentazione, comprensiva delle dimensioni fisica e funzionale, di una componente, di un prodotto oppure di un sistema, che ne includa pressoché tutte le informazioni rilevanti al fine di riuscire a descrivere ciascuna fase della vita di tale oggetto [8]. Una descrizione che però non è statica, ma che invece si

evolve parallelamente all'evoluzione e trasformazione dell'entità reale, e che sia mezzo per la formulazione di soluzioni, basate su simulazioni, per l'ottimizzazione operativa e la prevenzione di scenari di danno e situazioni di criticità [8].

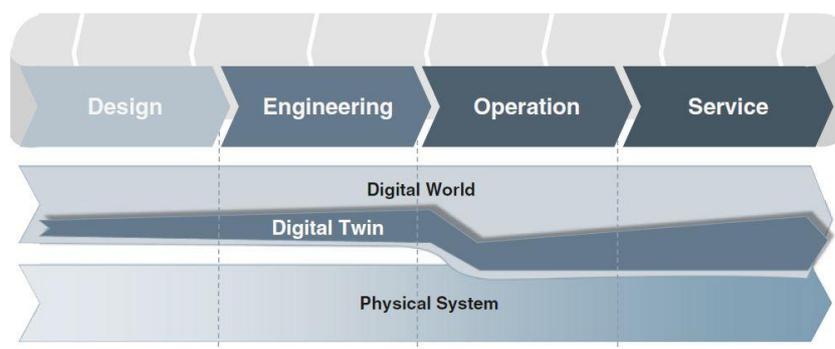


FIGURA 5: EVOLUZIONE DEL DT E INTEGRAZIONE NELLE OPERAZIONI [8]

In base a questa premessa, si parta dunque dal punto di arrivo, ovvero la definizione formale di DT proposta da Barricelli, Casiraghi e Fogli [1]: *“il DT può essere definito come una macchina, oppure un modello informatico, che simula, emula, riflette nella sua interezza la vita dell'entità fisica, la quale può essere un oggetto, un processo oppure parte di questi. Un DT è più di un semplice modello o simulazione: è un modello vivente ed intelligente che segue il ciclo di vita della propria controparte fisica, monitorandone, controllandone ed ottimizzandone i processi e le funzioni”*. L'enunciato ruota attorno alla parola chiave *vita*, la quale è rappresentativa ed esplicativa della differenza concettuale che distingue il *DT* dai più classici modelli/simulazioni; si è scelta quindi l'analisi di tale concetto come punto di partenza per risalire a ritroso e sviscerare le caratteristiche che un *DT* deve presentare.

In che modo è dunque intesa la *vita* della realtà fisica? Per rispondere a questa domanda si deve tener conto del fatto che il *DT* è una tecnologia che sta vedendo sempre maggior impiego in diversi campi dell'industria, della produzione, ma anche della gestione di risorse e

attività, e pertanto la *vita* del processo oggetto di modellazione assume diverse declinazioni a seconda del diverso dominio di applicazione.

Tra questi, spicca il ramo dell'industria manifatturiera, il quale per esempio, tra i molteplici livelli di articolazione, richiede un'efficiente organizzazione degli impianti di produzione. La progettazione di una fabbrica è un processo che ha come fini l'ottimizzazione della produttività ed il taglio dei costi, e pertanto interessa lo sviluppo del concept della stessa, il design del suo layout e della configurazione ottimale dei macchinari, nonché la progettazione del controllo logistico e l'integrazione di tutti gli equipaggiamenti lungo la linea di produzione. Si tratta quindi di una complessità che richiede frequenti modifiche durante la propria vita, dalla versione iniziale a quella finale. Zhang, in [2], propone un'applicazione del *DT* per far fronte a questa necessità: sfruttando tale tecnologia si può simulare virtualmente il sistema fabbrica mentre le idee dei progettisti vengono testate ed eventualmente ottimizzate. L'approccio modulare e parametrico del *DT* prospettato da Zhang permette inoltre l'implementazione di "funzioni generiche", da calibrare a seconda dei problemi che occorre risolvere: facilita la rapida applicazione di cambiamenti e variazioni che subisce la fabbrica grazie alla modifica mirata di un ristretto numero di moduli, agevola infine la collaborazione di più utenti nello sviluppo dell'impianto. Il gemello virtuale inizia quindi a *vivere* in parallelo alla bozza iniziale dei progettisti e continua a rifletterla e ad evolversi assieme ad essa, fino allo stage finale, in cui replica interamente lo stabilimento pronto per essere costruito. Una volta che la fabbrica è in uso, la struttura modulare e l'accumulo di dati registrati e comunicati al *DT* ne permettono una facile riconfigurazione nel caso di cambiamenti necessari lungo la linea di produzione. Non solo, è esso stesso che, per mezzo di simulazioni e proiezioni basate sulle

informazioni acquisite, supporta il *decision making* e prospetta eventuali modifiche.

Il DT è stato impiegato in maniera simile anche nel campo della sanità e nella gestione degli equipaggiamenti e delle strutture ad essa inerenti: inizialmente sfruttato come mezzo di perfezionamento dei dispositivi medici in termini di consumo energetico e velocità operativa, ha in seguito conosciuto applicazione anche in qualità di ottimizzatore della *vita* e delle attività degli ospedali. *Siemens Healthineers* ha sviluppato un DT per ottimizzare il Mater Private Hospitals (MPH) di Dublino [5], il quale doveva far fronte a problematiche come la richiesta di degenze in costante aumento con conseguente carenza di spazi, l'invecchiamento dell'infrastruttura, la crescita dei tempi di attesa, la necessità di una migliorata articolazione delle cliniche e l'avanzamento delle tecnologie mediche, che esigeva l'installazione di nuovi equipaggiamenti. La controparte digitale messa a punto dai due enti simula l'intero reparto di radiologia del MPH, e tutte le operazioni ad esso collegate, e ha in prima battuta permesso la sua completa riprogettazione, per poi facilitarne l'ottimizzazione tramite la simulazione dei workflow relativi alle varie attività e il test di differenti layout e di differenti scenari operativi.

Se nei rami manifatturiero e della sanità il Gemello Digitale è maggiormente apprezzato per le sue capacità di accelerazione della produttività e ottimizzazione, il campo dell'aviazione è invece terreno fertile per l'applicazione dello stesso come mezzo per la *manutenzione predittiva* (che comprende diagnostica, ottimizzazione e *decision support*). Essa si concretizza nel rilievo di pericolose mutazioni strutturali che subisce il velivolo durante e/o come contingenza dovuta al suo utilizzo e nel conseguente innesco di meccanismi e strategie di *self-healing*. Il DT del velivolo descritto da Yang in [3] sfrutta un'acquisizione di dati denominata *automatic image tracking* che permette di ottenere informazioni riguardo la deformazione dei *crack*

tips e il comportamento delle leghe di alluminio ed acciaio in fase di espansione delle fratture. Con tali informazioni il modello informatico *DT* è in grado di prevedere i meccanismi di propagazione della frattura dovuti ai cicli di fatica durante l'intera *vita* dell'aeroplano, consentendo di pianificare la manutenzione in anticipo con conseguente taglio dei costi. Zakrajsek e Mall allargano il ventaglio di caratteristiche del *DT* nel loro lavoro [4], ovvero mettono in luce come la controparte virtuale *DT* di un intero sistema debba spesso interagire con molteplici altri modelli che ne rispecchiano specifiche componenti in particolari momenti della loro *vita*. Il *DT* in questione emula gli pneumatici dell'aeromobile ed è stato costruito dagli autori sfruttando solamente dati di test ad alta fedeltà, col fine di migliorare la capacità di previsione del logoramento delle gomme in fase di atterraggio. Siccome il *flat tire* (letteralmente *pneumatico piatto*) è un fenomeno causato in larga parte da approcci non ideali con l'asfalto, il modello informatico sviluppato governa i principali parametri di atterraggio, come per esempio la velocità di avvicinamento, il rateo di discesa, l'angolo d'imbardata, attraverso il calcolo della probabilità di fallimento per diverse distribuzioni di tali parametri.

2.3.1 Struttura del Digital Twin

La vita dell'entità fisica quindi, come già anticipato e alla luce degli esempi fin qui illustrati, si presenta sotto diverse accezioni: può essere intesa come l'intero intervallo di tempo che va dalla bozza di progettazione fino all'ottimizzazione e riarrangiamento delle linee di produzione di una fabbrica, oppure corrisponde alla manciata di secondi che coincide con l'atterraggio di un aeromobile. In entrambi i casi però è evidente il comune denominatore, ossia lo sviluppo del processo nel tempo e con esso l'evoluzione della realtà fisica: ciò porta il *DT* ad essere un concetto che si fonda sull'idea di dar forma ad un modello virtuale dinamico capace di replicare un particolare sistema

per contesti d'interesse che mutano attraverso il tempo [6]. La presenza di intelligenza artificiale e di un continuo (o quantomeno periodico) scambio di dati in tempo reale tra il gemello fisico e quello digitale [1] diventano quindi due requisiti imprescindibili per poter concretizzare questo tratto distintivo; non basta, il *DT* deve essere implementato e deve poi svilupparsi integrando l'esperienza e le conoscenze dei progettisti con una mole di dati storici raccolti [1], i quali non solo serviranno per descrivere le caratteristiche fisiche e il comportamento dell'entità reale, ma anche per derivarne previsioni e soluzioni future [8][9].

Questo peculiare orientamento delle finalità del *DT* lascia trasparire un set di obiettivi che si rivelano connotanti, quali l'analisi di dati in tempo reale, l'uso di questi come riferimento per l'iterazione di simulazioni oppure ancora la capacità di elaborare soluzioni di prevenzione. Tale insieme di mire viene razionalizzato da Wagg (et al.) [16] attraverso un'organizzazione gerarchica, la quale è imperniata sulla complessità dell'output desiderato e dà vita ad una prima ossatura logica che, come si vedrà, suggerisce ed anticipa la vera e propria struttura archetipale del *DT*. Le finalità vengono inizialmente distinte in base al grado di sofisticatezza da esse stesse richiesto, risultando così suddivise in cinque categorie; queste vengono poi ordinate secondo lo stesso criterio in cinque livelli detti *levels of sophistication* [16]:

- **Livello 1: *supervisory***; costituisce il livello di complessità base richiesto al gemello digitale, ovvero esso deve essere in grado di analizzare e trattare i dati in tempo reale, fornendo informazioni riguardo lo stato attuale con lo scopo di permettere la *supervisione* della realtà fisica da parte dell'utenza;
- **Livello 2: *operational***; il *DT* è in grado di comprendere e riconoscere le informazioni maggiormente rilevanti all'interno della mole di dati che esso riceve, supportando direttamente le

decisioni operative dell'utenza con informazioni selezionate e significative. È bene sottolineare come i primi due livelli vengano considerati *pre-DT*, stando ad indicare il fatto che un sistema dotato di tale grado di sofisticatezza ha le potenzialità per diventare un gemello digitale, ma non è ancora in possesso di tutte le caratteristiche necessarie;

- **Livello 3: *simulation***; alle doti di *pre-DT* illustrate ai due livelli precedenti ora si aggiunge la capacità di simulare il gemello fisico sulla base un connubio tra modelli e dati. Ciò comporta un repentino incremento delle funzionalità che il *DT* deve garantire [6]: l'integrazione con modelli FEM e CAD che permettano i necessari aggiornamenti in tempo reale del modello digitale, la navigazione attraverso una rappresentazione gerarchica del comportamento fisico a diverse scale, la formulazione e il test di multipli scenari con lo scopo di prevedere risvolti futuri e l'annessa quantificazione del grado di fedeltà dei risultati, una facile visualizzazione e comprensione degli output da parte dell'utenza;
- **Livello 4: *intelligent DT***; seppur ancora un'aspirazione, il quinto *level of sophistication* vede un gemello digitale in grado di imparare dai dati tramite algoritmi di *machine learning*, con un conseguente aumento delle sue capacità di pianificazione degli scenari e di *decision support*;
- **Livello 5: *autonomous DT***; a questo livello il gemello digitale è in grado di ultimare in completa autonomia il *decision making*, e riesce a gestire la salute del physical twin con il minimo intervento umano.

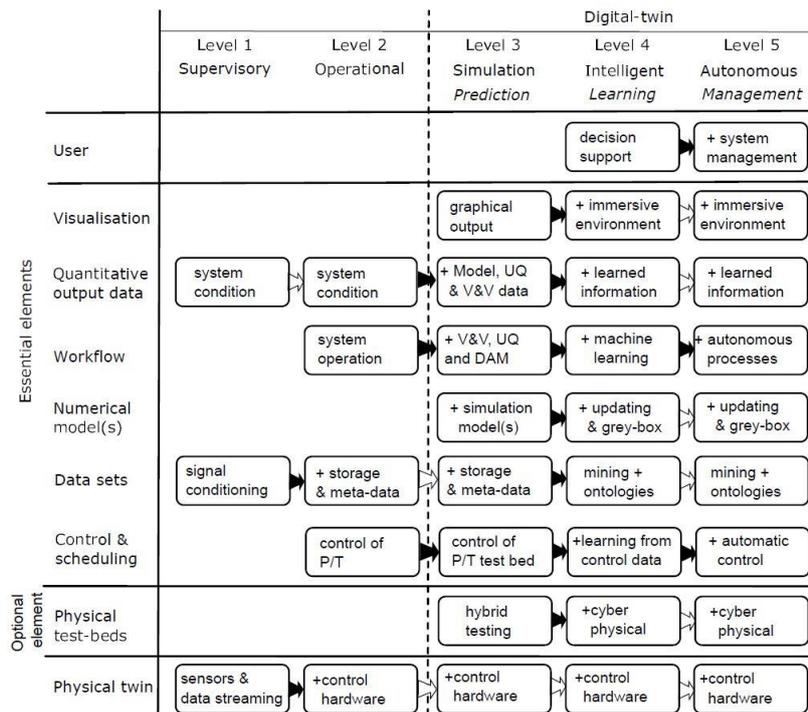


FIGURA 6: RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DEI BLOCCHI RICHIESTI PER I 5 LIVELLI DEL DT [16]

Fin dal livello *supervisory*, ossia il più basso in termini di complessità, si ha a che fare con un dispositivo digitale che ha la capacità di accompagnare l'entità fisica per tutta la durata della sua *vita* d'impiego; ciascuno dei blocchi successivi non fa altro che costruire ed ampliare le proprie performance conservando questa caratteristica iniziale. Se inizialmente il *DT* è capace di fornire semplicemente informazioni utili al monitoraggio, gli stadi di complessità più avanzati permettono di pianificare a priori la manutenzione e la prevenzione di scenari potenzialmente nocivi durante l'arco di *vita* del gemello fisico; avvalendosi della capacità di imparare dai dati accumulati, l'affidabilità delle previsioni ne risente positivamente ed in modo quantificabile e, teoricamente parlando, il *DT* ha l'abilità di pronosticare tutte le fasi a cui l'entità fisica andrà incontro fino alla sua dimissione.

Dei cinque livelli stilati da Wagg et al. il terzo è però quello di maggior interesse: esso costituisce l'attuale stato dell'arte per quanto riguarda la tecnologia in questione, e contiene quella rosa di caratteristiche e capacità che possono definirsi necessarie e sufficienti affinché il *DT*

possa definirsi tale. È infatti con l'introduzione delle doti di simulazione, associate al loro fondarsi su dei dati dinamici, e di formulazione di scenari a priori che il gemello digitale assume forma e significato indipendenti e si scosta da tutti i modelli e simulazioni intesi in senso classico.

Si prenda l'esempio proposto da Tuegel (et al.) in [19], che ritrae il *simulation DT* di un aeromobile: esso ha il compito di mimare il comportamento della sua controparte fisica concentrandosi sulla nascita e propagazione di microfratture sotto diversi scenari di carico. In primo luogo, la distribuzione e la tipologia dei difetti sono informazioni indispensabili e punto di partenza per una simulazione di questo tipo, e richiedono che le caratteristiche dei materiali e del loro processo produttivo siano note ed integrate in un modello FEM che fa parte del *DT* e che viene direttamente utilizzato da esso. In secondo luogo, Tuegel tiene conto del fatto che la generazione di fratture è un meccanismo che può avere comportamenti diversi a seconda della scala alla quale è osservato, e pertanto fornisce il suo *DT* del cosiddetto *multiscale modeling* (modellazione multiscala). Ciò che ne risulta è una simulazione dell'evoluzione del crack che parte dalla *stress-analysis* su un *component-scale structural design* volta a localizzare i punti critici, per poi applicare i modelli della meccanica della frattura a scale via via più piccole riproducendo incubazione, nucleazione e microfessurazione. Alla fine del processo simulativo il gemello digitale produce come output le distribuzioni statistiche dei ratei di crescita delle microfratture: se queste si rivelano al di sopra di una certa soglia, allora la fessura viene etichettata come *attiva* e ha luogo una seconda simulazione, questa volta di propagazione del crack, che ha come risultato una distribuzione statistica della *vita* della componente dell'aeroplano analizzata.

A questo punto è evidente il fatto che gli obiettivi del *DT* si fondino necessariamente su un'architettura e su un ventaglio di caratteristiche

diversi da quanto si riscontri invece in modelli e simulazioni nella loro accezione più comune. La descrizione di impronta finalistica proposta da Wagg [16] può essere quindi ampliata ed approfondita, ed in questo frangente Barricelli, Casiraghi e Fogli in [1] hanno raccolto molti riferimenti della letteratura pregressa e hanno dato forma ad una struttura, generale e paradigmatica, e ad un corredo di qualità che rendono tali le performance di un DT.

Il modello proposto da Michael Grieves, formalizzato in [10] nel 2002, presenta una configurazione semplice ed essenziale fatta di tre elementi primari:

- **spazio reale** – ovvero lo spazio contenente la realtà fisica/processo che è oggetto della modellazione;
- **spazio virtuale** – ambiente contenente l’oggetto virtuale;
- **link** – collegamento fra i due spazi;

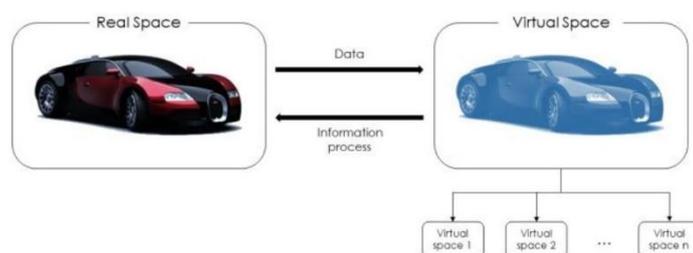


FIGURA 7: MODELLO CONCETTUALE DEL DT, ADATTATO DA GRIEVES [1]

Quest’ultimo elemento è la nota caratterizzante del DT e si realizza nell’abilitazione del dialogo tra le controparti fisica e virtuale. Due sono i requisiti connotanti e distintivi che il *link* deve soddisfare:

- garanzia di comunicazione in due direzioni – flusso di dati dallo spazio reale a quello virtuale e scambio di informazioni provenienti invece dal digitale alla realtà fisica;
- *seamless connection* – devono essere quanto più assenti le interruzioni di continuità nel suddetto flusso;

Entrambe le entità, fisica e virtuale, devono pertanto essere equipaggiate con dispositivi di rete che assicurino il continuo scambio di dati, e di conseguenza la costante sincronizzazione tra il gemello digitale e quello reale; ciò può avvenire sia attraverso comunicazioni fisiche dirette, sia per mezzo di connessioni indirette *cloud-based* [1]. Il DT ha bisogno di ricevere continuamente dati dinamici provenienti dal gemello reale (*dynamic physical twin data*) e dall'ambiente che lo circonda (*dynamic environment data*), rilievi e registrazioni di informazioni che descrivono il suo comportamento, il suo stato attuale e la sua evoluzione all'interno del contesto nel quale è inserito. Non solo: una volta condotte le analisi e le simulazioni programmate, il DT ha il compito di corrispondere, di restituire al PT, all'utente ed eventualmente ad altri DT collegati all'oggetto/processo, rapporti, previsioni e prescrizioni per la manutenzione e l'ottimizzazione delle funzioni collegate a quest'ultimo.

Si è dunque sottolineato come il dialogo tra le due controparti, fisica e digitale, costituisca un connotato distintivo proprio della tecnologia legata al DT e che la separa da tipologie di modello/simulazione più classiche. Il *link*, d'altra parte, è il garante di tale flusso bidirezionale di informazioni, e come tale fa sì che questa discrepanza concettuale si traduca in una diversità sensibile anche a livello di architettura di base. Se si pensa infatti alla grandissima quantità di dati che il DT accumula costantemente e senza soluzione di continuità e al fatto che esso li deve utilizzare per produrre previsioni, è evidente che anche lo spazio virtuale, ambiente comune a tutti i modelli informatici per definizione, debba presentare alcune singolari e necessarie specifiche che dilatano ulteriormente il gap. La sfera digitale non può costituirsi esclusivamente della ricostruzione che riprende le caratteristiche fisiche dell'oggetto/processo in questione, ma deve avere l'abilità di integrare diversi *design models*, di correlarli ed integrarli ai dati raccolti e di sfruttarli infine come base per previsioni e *decision-making* [11].

L'intera mole di dati scambiati va immagazzinata in un sistema di archiviazione facilmente accessibile dal *DT*; assieme ai dati dinamici, ovvero quelli scambiati in tempo reale con la realtà fisica, il deposito di dati deve contenere *historical static data*, i quali riflettono la memoria del gemello fisico e riportano informazioni di tipo storico provenienti dall'esperienza umana o da precedenti operazioni, e *descriptive static data*, che invece descrivono importanti caratteristiche del *PT* che non devono mutare nel tempo (per esempio dei vincoli) [12].

Una volta garantito l'accesso, il *DT* deve essere in grado di trattare questa enorme quantità di dati, classificando, raggruppando, e comprendendo gli *input* del *PT*. A tale scopo entra in gioco l'intelligenza artificiale: le IA delle quali è fornito sono tali da perfezionarsi continuamente in base ad algoritmi di *supervised/unsupervised learning* [1], i quali permettono una capacità di previsione dell'IA che vada via via affinandosi man mano che essa processa le informazioni ricevute dall'entità fisica. Del ventaglio di algoritmi di cui si avvale l'intelligenza artificiale devono far parte anche metodi che supportino le attività di *selezione* ed *estrazione* dei dati, utili al fine di ridurre la dimensione delle informazioni conservandone allo stesso tempo quelle fondamentali. Lo svolgimento di tali funzioni incrementa le prestazioni del *DT* poiché ne riduce l'impatto sia in termini di costo computazionale che di archiviazione, ma soprattutto aumenta l'efficienza e l'efficacia della sincronizzazione in tempo reale fra spazio virtuale ed oggetto reale [1].

Restando in tema di efficienza ed efficacia delle prestazioni del *DT*, queste risultano crescere esponenzialmente se ad esso viene data una struttura parametrizzata e suddivisa in blocchi/unità. D'altronde si era già accennato in precedenza a questa caratteristica, nel riferimento al *DT* proposto da Zhang [2], che equipaggia lo spazio virtuale con un'architettura modulare, capacità di *self-adaptation* e *self-*

parametrization, facilitando il suo compito di ricalcare il *PT* durante tutto il suo ciclo di *vita*:

- **modularità** – permette al DT di apportare modifiche alla propria configurazione manipolando solamente i rispettivi blocchi interessati e senza influenzarne direttamente altri. Questa caratteristica è utile sia per il suo utilizzo in fase di analisi predittiva/ottimizzazione che in termini di doti di adattamento del gemello digitale, per la facilità di rispecchiare i cambiamenti che avvengono nello spazio reale;
- **parametrizzazione** – facilita l'applicazione delle modifiche ai singoli moduli; l'implementazione di funzioni/algoritmi parametrici favorisce la riduzione e la semplificazione delle operazioni necessarie all'attuazione delle variazioni sui moduli, con conseguente incremento dell'efficienza e della velocità di esecuzione da parte del *DT*.

Quelle descritte finora sono sostanzialmente le caratteristiche del quale il *DT* deve avvalersi per poter leggere, comprendere ed in generale trattare i dati provenienti dallo spazio fisico che immagazzina in tempo reale. Queste informazioni devono poi essere utilizzate per simulare, pronosticare situazioni future e fare previsioni riguardo scenari d'interesse per l'entità fisica in oggetto, in altre parole espletare la funzione principale del gemello digitale.

C'è dunque bisogno di un'IA che sia in grado di sviluppare una certa capacità di intuizione nei confronti delle informazioni, e ciò si realizza nell'implementazione di metodi detti *predictive analytics*: tale definizione comprende una grande varietà di tecniche che riescono a predire risultati ed esiti futuri sulla base dell'analisi dei dati, sia storici che attuali. Tali tecniche si occupano in prima battuta dell'analisi dei dati al fine di riconoscere *pattern* e relazioni significative esistenti

all'interno di questi, per poi farne uso come base per le proiezioni su scenari futuri [13]. Più nello specifico, *predictive analytics* sono dei processi di sintesi di tipo *data-driven*, ovvero algoritmi che derivano le caratteristiche chiave del modello a partire dai dati stessi piuttosto che da ipotesi formulate dagli analisti: si dice che essi danno forma ad un modello *indotto* dai dati. Il meccanismo di induzione può comprendere, nel caso del *DT*, l'identificazione di variabili da includere nel modello, di parametri rilevanti che lo definiscono, di pesi e/o coefficienti da assegnare ad esso per arrivare, a seconda della fattispecie, fino alla forma stessa che il modello deve assumere [14]. Per fare un esempio, i cosiddetti algoritmi *decision trees* riescono ad individuare, tra tutti gli input, il candidato che ottimizza la previsione di una variabile *target*, in aggiunta all'identificazione dei valori da assegnare alla variabile stessa e sui quali costruire poi le proiezioni. I metodi *predictive analytics* hanno quindi la funzione di formare la conoscenza dell'utente nei confronti delle evoluzioni del sistema fisico, e la concretizzano fornendo non un solo possibile *future outcome*, ma dando frutto a molteplici.

Il loro potenziale, tuttavia, si esaurisce in questa operazione, ed è allora chiaro come il solo fatto di formulare previsioni, alla fine dei conti, sia condizione necessaria ma non sufficiente per il compito di supporto nel *decision making* che spetta al *DT*. In altre parole: di tutti gli scenari generati, come fa l'utenza a scegliere quello ottimale? La risposta risiede nell'implementazione di *prescriptive analytics*. Essi entrano in gioco subito dopo la fase di previsione, e si concentrano sul fornire indicazioni per trarre vantaggio dalle opportunità future individuate o mitigare rischi ed implicazioni legate a ciascuna potenziale scelta [15]. Il *DT*, quindi, fa uso dei risultati prodotti dalle tecniche *descriptive* (ossia di classificazione e filtrazione dei dati) e *predictive* come input per i *prescriptive analytics*, i quali stilano computazionalmente un set di alternative o di azioni in accordo a dei

parametri di scelta, che, nella maggior parte dei casi, consistono nei vincoli descritti dagli *static data* oppure obiettivi e richieste della committenza [1].

Attraverso questa fase di analisi prescrittiva il *DT* dà quindi forma e corpo a delle informazioni che l'utenza specializzata deve interpretare e poi applicare concretamente al gemello fisico, ed esiste pertanto la necessità di potervi accedere, di poter leggerle e assimilarle in modo chiaro e quanto più immediato. E allora a completamento dell'architettura, come chiusura del cerchio che partiva dalla realtà fisica e che arriva adesso a restituire previsioni altrettanto reali, vanno implementate applicazioni, siano di rendering o di modellazione e simulazione, che supportino una rappresentazione dello stato attuale e degli scenari prospettati che sia esposta in maniera realistica, chiara e naturale.

2.3.2 Workflow del Digital Twin

Le finalità per le quali nasce il *DT* e gli intenti con cui esso viene ideato e costruito (replicare la *vita* della realtà fisica) si sono quindi visti riflettersi in modo incisivo sulla sua struttura e sulle sue caratteristiche: l'architettura di questo oggetto virtuale risulta infatti drasticamente diversa, sensibilmente più profonda ed articolata quando confrontata con quella dei modelli computazionali più classici. La descrizione finora condotta presenta questi connotati sotto una luce prevalentemente descrittiva, inquadrandone le tipologie, illustrandone i compiti e delineandone, come conseguenza, gli specifici ruoli all'interno del sistema *DT* in termini più che altro "teorici".

Alla luce di ciò, si è quindi fatta una considerazione: per quanto quest'analisi strutturale risulti sufficiente a tracciare un profilo definito e nitido della realtà digitale in questione, essa è ancora monodimensionale e pertanto non del tutto esaustiva. Da qui nasce la necessità di metterla in prospettiva, il che significa sviscerare e capire

le modalità in cui la struttura e le sue peculiarità si realizzano in senso pratico, i termini in cui i diversi blocchi computazionali influenzano a loro volta l'aspetto operativo dell'applicazione del *DT*. Per usare le parole di Paul Gardner [16], va indagato e discusso il *workflow* del *DT*. Di questo concetto vanno preliminarmente sottolineati tre aspetti: la sua definizione introduce l'ossatura esecutiva che il processo *DT* segue in forza alle sue caratteristiche, ovvero con *workflow* s'intende la sequenza di passaggi archetipali, di step logici operazionali secondo la quale il *gemello digitale* deve lavorare al fine di concretizzare la propria funzione; in secondo luogo va evidenziato che la relazione tra struttura del sistema e *workflow* è di natura duale, nel senso che l'una è la controparte dell'altra, e che quest'ultimo nasce e si forma automaticamente come conseguenza dell'architettura del *DT*, ed ogni fase operativa che lo compone è espressione pratica di ciascun algoritmo implementato. Infine, è necessario evidenziare come questo aspetto del *digital twin* sia di natura fortemente *case-sensitive*, ovvero come la sua articolazione nell'ottica delle funzioni che deve espletare possa mutare notevolmente a seconda dei casi specifici. Il *workflow*, in forza alla sua struttura, deve infatti coordinare e sequenziare i processi richiesti sulla base dei propositi e degli obiettivi dello specifico *digital twin*. Tali processi inquadrano una serie di *building blocks* [6][16] all'interno del *workflow*:

1. ***Physics-based modeling***: qualsiasi ciclo di lavoro da performare all'interno, o attraverso il *digital twin*, deve partire da un modello della realtà fisica oggetto di replica. Questa simulazione *physics-based* deve però tenere conto dei requisiti annessi al *dt*, realizzandosi, da letteratura, sostanzialmente in due modi differenti:
 - a. *combinazione di modelli multipli*: il *digital twin* è costruito attraverso l'integrazione di più modelli della struttura, che

possono catturare diversi processi, a diverse scale e con diverso grado di accuratezza;

b. *costruzione di modelli su misura*: nel momento in cui alcuni scenari richiedono modellazioni specifiche, performance mirate e/o un particolare livello di efficienza, allora si usa allestire dei modelli ridotti che permettano lo svolgimento dei *tasks* in modo più efficiente e con minor impatto computazionale;

2. ***Software integration & management***: il set di modelli *physics-based* ha bisogno di essere gestito e integrato. Si parla di *tight* oppure *loose coupling*: il primo si appoggia all'applicazione di un solo risolutore per amministrare tutti i processi fisici, il secondo invece permette al *workflow* di coordinare e richiamare i diversi pacchetti tramite stralci di codice implementati su misura. Lo scopo delle due opzioni è comunque sempre lo stesso, ossia consentire all'utenza qualificata di dirigere il *workflow* e poter interagire con tutte le componenti del *digital twin* attraverso un'opportuna interfaccia;
3. ***Verification & validation***: operazione da svolgere sugli output delle attività sviluppate sui modelli *physics-based*. In letteratura si fa riferimento a Oberkampf & Roy, i quali hanno razionalizzato le due definizioni nell'ambito dell'implementazione degli algoritmi. In sostanza, a partire da quanto postulato dai due autori, la fase di verifica nell'ottica del *DT* si realizza in una porzione di test dell'interazione delle varie componenti del codice come parti di un software più ampio (*software quality assurance*), e un secondo blocco di verifica della corretta applicazione delle formule e dei metodi matematici impiegati. La validazione, infine, deve riguardare esplicitamente i risultati: misurare quantitativamente la precisione del modello nei confronti dei dati sperimentali, fornire una stima

dell'accuratezza delle previsioni e valutare se queste sono appropriate per il caso specifico;

4. **Uncertainty quantification**: ha l'obiettivo di fornire una misura di quelle che, secondo Kennedy & O'Hagan [32], sono le fonti portatrici di incertezza dalle quali è affetto un modello matematico, e che si distinguono in incertezze dei parametri, discrepanza modello-realtà, variabilità residua e incertezza delle misurazioni. Le operazioni proprie di questa fase possono essere compiute attraverso una varietà di approcci, tra i quali, in letteratura, spiccano l'inferenza Bayesiana e i metodi delle catene di Markov [16], che offrono la possibilità di profilare una dettagliata descrizione delle distribuzioni probabilistiche dei parametri della simulazione, da utilizzare poi per la propagazione dell'incertezza;

5. **Data-augmented modelling**: l'incertezza quantificata viene utilizzata per produrre un risultato *ultra-realistic* tramite l'equazione di modellazione degli errori

$$z(x) = y(x) + e = \eta(x, \theta) + \delta(x) + e$$

dove $z(x)$ sono le osservazioni fatte sugli output del sistema, $y(x)$, le quali sono soggette all'incertezza rappresentata dal termine e . L'equazione dunque afferma che i risultati del modello $y(x)$ si possono esprimere come la somma di modello computazionale $\eta(x, \vartheta)$ e *model discrepancy* $\delta(x)$, dove ϑ rappresenta i parametri della simulazione. Il riconoscimento delle incertezze permette quindi di bilanciare, ritoccare gli output del *digital twin* ed evitare che questo fornisca delle previsioni inaccurate.

6. **Output visualisation**: l'ultimo blocco logico del *workflow* del *digital twin* consiste nell'organizzazione della visualizzazione degli output da esso forniti, tramite opportuna interfaccia grafica.

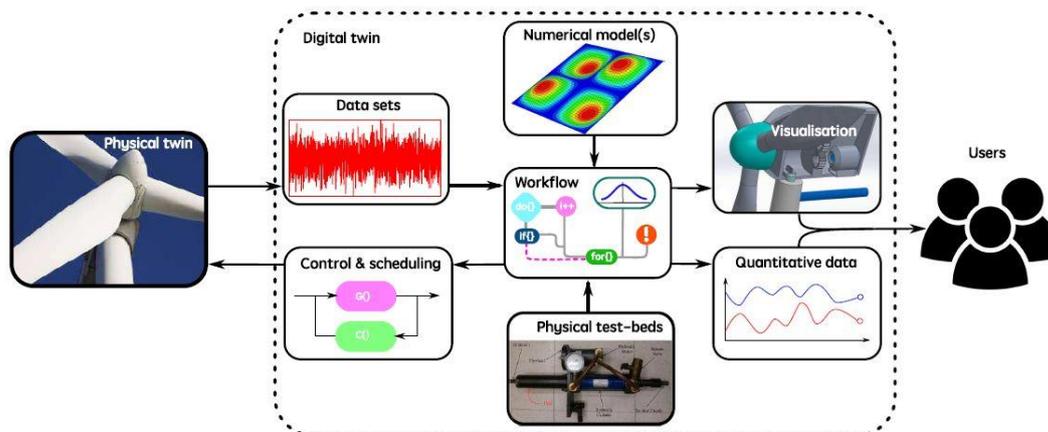


FIGURA 8: RAPPRESENTAZIONE SCHEMATICA DI UN *SIMULATION DT* CON GLI ELEMENTI ESSENZIALI [16]

Alla fine di questa disamina è importante capire come i capitoli del *workflow* appena illustrati siano molto poco specifici, nel senso che rappresentano più che altro delle fasi cardine che un'ideale *digital twin* dovrebbe performare in aggiunta alle altre operazioni specifiche attribuite a ciascun caso.

L'obiettivo del processo di *structural health monitoring*, come ampiamente trattato nei capitoli precedenti, si può riassumere nell'identificazione del danno strutturale, nella sua localizzazione e nella sua quantificazione. La conoscenza di tale danneggiamento si è infatti vista articolarsi su quattro livelli di difficoltà che richiedono ciascuno delle analisi via via più approfondite. La *detection* del danno, ossia il Livello 1 di conoscenza, è un'informazione ottenibile in modo relativamente semplice e senza la necessità di elaborate modellazioni: una volta installato un sistema di misurazione sul fabbricato in oggetto, l'osservazione ad esempio di un decadimento nei valori delle frequenze di oscillazione permette di attestare la certa presenza di un suo qualche ammaloramento. L'utilizzo delle sole frequenze diventa insufficiente già al Livello 2, la localizzazione del danno, in quanto esse sono caratteristiche globali della struttura e pertanto non possono essere d'aiuto nell'individuazione di problemi concentrati in punti

specifici della struttura. Per stare ancora lontani dalla modellazione FEM, in questa fase, si possono sfruttare alcune tecnologie come i sensori a fibra ottica, i quali permettono letture diverse distribuite nello spazio favorendo l'individuazione congiunta dei valori anomali e della loro localizzazione. Ad essere precisi, in termini pratici, il Livello 2 necessita già dell'utilizzo di un modello per interpolare i punti osservati sul fabbricato, ma esso entra in gioco in modo indispensabile nella *quantificazione* del danno (Livello 3). In quest'ottica, il presente lavoro di tesi vuole provare ad inserire l'utilizzo di un *digital twin* all'interno di un processo di *structural health monitoring*, con l'intenzione di raggiungere i primi tre livelli di conoscenza del danno attraverso la sua applicazione. Ciò si ritiene possibile in virtù delle caratteristiche che connotano il *DT*, vale a dire la sua propensione ad evolversi assieme al sistema reale replicato associata alla capacità di riconoscere a priori scenari di danno sulla base delle simulazioni condotte. Il *DT* si evolverà assieme all'evolversi della struttura reale, e sarà in grado di individuare preventivamente la presenza di danneggiamento in essa sulla base dei *pattern* riconosciuti durante la fase di simulazione degli scenari di danno.

Capitolo 3 – Monitoring della Struttura Reale

Premessa

La trattazione esposta finora cerca di mettere in luce i caratteri principali del *digital twin* provando a far risaltare quelle che sono le peculiarità strutturali, ma anche i requisiti e gli obiettivi, che lo rendono un oggetto concettualmente diverso, forse evoluto rispetto all'approccio classico alla modellazione/simulazione. Se tale trattazione può sembrare generica in alcuni passaggi, eccessivamente descrittiva e/o teorica, ciò è in parte dovuto agli attributi fortemente *case-sensitive* che appartengono al *digital twin*. I blocchi logici che ne compongono la struttura sono di fatto un comune denominatore, ma la loro concretizzazione pratica si diversifica molto a seconda del campo di applicazione, e poi tra singoli casi specifici.

Ciò posto, si ritiene opportuno fare una premessa che introduca il lavoro svolto con le dovute anticipazioni: la presente tesi si sviluppa attorno ad un caso studio tutto sommato relativamente semplice, rappresentato, nella sua dimensione fisica, dal modellino di un telaietto a tre piani, con colonne, solai e diagonali controventanti. Nella struttura del *digital twin* costruito come controparte di tale sistema, si noterà l'assenza di alcuni blocchi procedurali riportati invece nell'illustrazione del capitolo precedente. Ad esempio, le caratteristiche dei vincoli tra piedritti ed orizzontamenti del telaio, dal punto di vista dei risultati che l'analisi persegue, sono ininfluenti, e liberano pertanto il gemello dalla necessità di disporre del *multi-scale multi-physics modeling*, a dimostrare il fatto che la semplicità della struttura, congiunta con gli obiettivi dello studio, ha permesso di tralasciare alcuni livelli di articolazione che non risultavano indispensabili.

3.1 Impostazione del procedimento

Si riporta di seguito, in maniera schematica e riassuntiva, un prospetto del lavoro svolto, suddiviso in marco-fasi operative. La struttura dello studio si è pianificata nel seguente modo:

- *Costruzione dei modelli FEM*: si sono inizialmente costruiti due modelli agli elementi finiti della struttura, uno dei quali rappresenta l'entità *reale* oggetto dello studio, mentre l'altro costituisce la parte di modellazione fisica del *digital twin*. I due modelli sono geometricamente identici, ciò che li separa in prima battuta sono le caratteristiche dei materiali: quelle della controparte reale sono supposte sconosciute, mentre all'entità digitale è stato assegnato un valore di modulo elastico di primo tentativo congruentemente con le dispersioni tipiche dell'alluminio trovate in letteratura;
- *Simulazione del monitoraggio*: per la struttura reale si è simulato un procedimento di monitoraggio distribuito su più settimane fittizie, somministrando ad essa diversi set di rumore gaussiano al fine di ricavare le registrazioni dei valori di accelerazione
- *Identificazione del modello reale*: le accelerazioni misurate durante la campagna di monitoraggio sono state utilizzate per l'identificazione delle caratteristiche modali tramite algoritmo SSI;
- *Model updating*: le frequenze e forme modali estrapolate con SSI sono state utilizzate per una fase di calibrazione del modello digitale. Attraverso una funzione obiettivo, si sono confrontate in modo iterativo le frequenze e forme sperimentali con quelle calcolate dal modello numerico, con lo scopo di ottenere una stima ottimale del valore di modulo elastico da assegnare in via definitiva al *digital twin*;

-
- *Simulazione del danno e riconoscimento dei pattern tramite digital twin*: il modello digitale calibrato è stato utilizzato per simulare possibili scenari di danno ancora non verificatisi nella struttura reale. Si è assegnato un danneggiamento progressivamente crescente ad alcuni elementi della struttura e, per mezzo di autoanalisi, si sono estratte le relative caratteristiche modali. Si è poi studiato l'andamento di queste al variare dell'importanza del danno, istruendo il *digital twin* sui pattern riconosciuti in questo modo;
 - *Introduzione del danno nella struttura reale*: al modello che rappresenta la struttura reale è stato applicato un danno di un certo valore e con una certa localizzazione, e si è in seguito simulata un'altra campagna di monitoraggio per misurare le nuove accelerazione e compiere una nuova identificazione delle grandezze modali tramite SSI;
 - *Riconoscimento del danno da parte del DT tramite i pattern*: gli andamenti delle nuove frequenze sperimentali identificate viene confrontato con i pattern individuati in precedenza dal *digital twin*.

3.2 Telaio reale

Come visto e anticipato, il *digital twin* si fonda sulla dicotomia tipica dei *cyber-physical systems*, e quindi ha bisogno di una realtà fisica che ne fondi l'esistenza e giustifichi l'utilizzo. Il *DT* a cui si intende dar vita col presente lavoro di tesi vuole essere la controparte virtuale di una piccola struttura presente al laboratorio del DISEG del Politecnico di Torino: il modellino in questione ritrae una struttura intelaiata dotata di tre piani a pianta quadrata, portati da quattro pilastri posizionati ai vertici e ancorati alla base su una platea. Il materiale predominante è l'alluminio: ne sono composti sia i piedritti che gli orizzontamenti. I

solai si configurano come piastre quadrate di dimensioni 400 x 400 mm, spesse 5 mm, mentre i pilastri sono alti 900 mm e riportano una sezione rettangolare di dimensioni 20 x 3 mm. L'interpiano misura 300 mm. Le due componenti sono tra loro allacciate per mezzo di profilati ad L in acciaio zincato, delle dimensioni di 20 x 20 mm, spessore 2 mm, a ciascun piano, mentre 30 x 30 mm per il vincolo dei pilastri alla platea di base. Al piano terra, infine, è fissato un sistema controventante, composto da due diagonali in alluminio di sezione identica ai pilastri, posizionati sulle facciate orientate lungo l'asse y. Di seguito, si riportano i valori delle caratteristiche fisico-meccaniche dei materiali; si tenga a mente che si tratta di valori caratteristici reperiti in letteratura, e che sono pertanto soggetti a una certa dispersione della quale si è tenuto conto in fase di analisi.

		alluminio	acciaio zincato
modulo di elasticità lineare	[N/mm ²]	69000	210000
modulo di Poisson	[-]	0,32692	0,27
massa volumica	[g/cm ³]	2,7	8



FIGURA 9: TELAIO REALE

È necessario a questo punto fare un'importante precisazione riguardo alle modalità secondo le quali il lavoro è stato condotto. La replica da parte del *digital twin* di un'entità reale, e la sua evoluzione in parallelo

a questa, si sono viste essere uno dei caratteri connotanti dello stesso; tuttavia, in questa sede, si è dovuto lavorare in modo indiretto sul sistema reale, ovvero trasformandolo preliminarmente in una struttura anch'essa digitale su cui eseguire i test e il monitoraggio. Ciò è avvenuto per motivi logistico-operativi, ovvero dovuti principalmente all'impossibilità, una volta calibrato il *dt* e ricercati i *pattern*, di applicare il danno al modellino fisico, ma anche per poter stringere i tempi e avere una maggiore flessibilità nel portare avanti l'analisi.

La piccola struttura fisica del DISEG è quindi stata tradotta in due modelli agli elementi finiti: uno di essi sarà d'ora in avanti il "sistema reale", mentre l'altro costituirà il *digital twin*.

3.3 Modellazione agli elementi finiti

A partire dal telaio fisico si sono costruiti due modelli agli elementi finiti tra loro identici, facendo utilizzo del software ANSYS® Mechanical APDL 2021 R1. Per replicarne il comportamento, si sono scelti tre tipi diversi di *finite elements*, e si sono fatte alcune assunzioni ed approssimazioni che permettessero una conduzione snella dell'analisi senza pregiudicare o influenzare eccessivamente i risultati voluti.

La controparte digitale è stata interamente costruita all'interno del software di calcolo, secondo i seguenti step operativi:

- Inizializzazione dei materiali;
- Costruzione della geometria;
- Implementazione delle tipologie di elementi finiti;
- Definizione della mesh;
- Definizione delle condizioni di vincolo;

Dei passaggi elencati, è necessario specificarne quelli di maggiore interesse, ossia la scelta degli elementi finiti, la scelta delle

caratteristiche meccaniche dei materiali e l'impostazione della configurazione di vincolo. All'interno di tali step sono state effettuate delle semplificazioni e approssimazioni che è opportuno vengano messe in luce.



FIGURA 10: MODELLO FEM DELLA STRUTTURA REALE REALIZZATO CON ANSYS

Gli elementi finiti utilizzati sono:

- **BEAM188**: si tratta di un elemento trave a due nodi alle proprie estremità, con funzioni di forma che possono essere lineari, quadratiche o cubiche e che ha la possibilità di deformarsi assialmente, flessionalmente e torsionalmente. Ciò lo rende dotato di sei gradi di libertà per ciascun nodo, vale a dire le traslazioni nelle tre direzioni e le rotazioni attorno ai tre assi. Il settimo grado di libertà, quello torsionale, è opzionale.

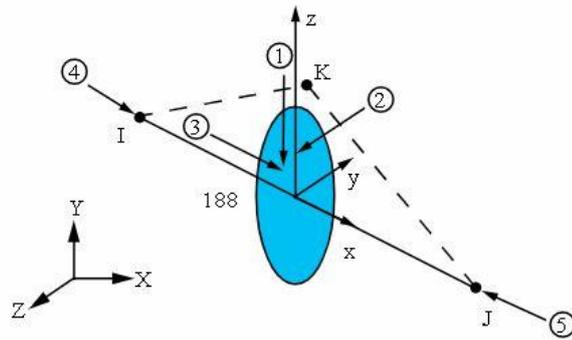


FIGURA 11: CARATTERISTICHE DELL'ELEMENTO BEAM188 DALLA LIBRERIA ANSYS

L'elemento BEAM188 è stato utilizzato per modellare i pilastri, ai quali è principalmente richiesto di comportarsi in modo flessionale.

- SHELL181: elemento piano a quattro nodi posti ai vertici, adatto all'analisi di strutture a guscio più che altro snelle, dotato di sei gradi di libertà per ciascun nodo, ovvero le tre traslazioni lungo x , y e z e le tre rotazioni. Il comportamento a membrana è opzionale.

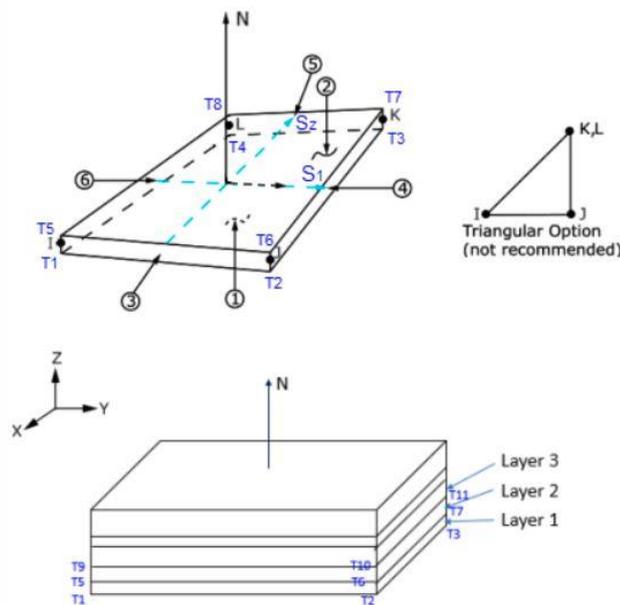


FIGURA 12: CARATTERISTICHE DELL'ELEMENTO SHELL181 DALLA LIBRERIA ANSYS

- LINK180: elemento asta tridimensionale che può essere utilizzato per modellare svariate componenti ingegneristiche,

dai tralicci ai cavi, fino alle molle. Ciascun nodo del LINK180 è dotato esclusivamente dei tre gradi di libertà traslazionali, caratteristica che lo rende un elemento che risponde a tensione di trazione-compressione uniassiale. I gradi di libertà flessionali non sono presenti.

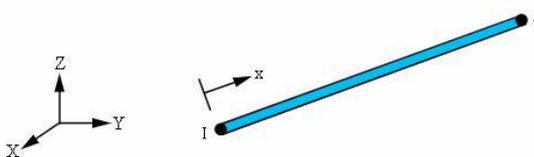


FIGURA 13: CARATTERISTICHE DELL'ELEMENTO LINK180 DALLA LIBRERIA ANSYS

LINK180 è stato utilizzato per rappresentare i due diagonali controventanti posizionati al piano terra del telaio, assegnando ad esso una reazione sia a trazione che a compressione.

3.3.1 Vincoli

Durante la modellazione dei vincoli, si è scelto di trascurare la presenza dei profilati a L in acciaio zincato. Tale decisione è stata presa in seguito ad alcuni test sul modello che hanno portato a due considerazioni: in primo luogo si è notata la scarsa influenza di tali elementi in termini di peso sulle prime frequenze di vibrazione del telaio, le quali variavano, per il primo modo, tra 3,2 Hz e 3,4 Hz; in secondo luogo, si sono confrontati i segnali di accelerazione estratti, e questi sono risultati molto più sporchi e rumorosi rispetto a quelli registrati nella configurazione priva di elementi zincati, tanto rendere più difficoltosa, e talvolta pregiudicare, la riuscita dell'identificazione tramite SSI.

Alla luce di ciò, le componenti profilate sono state modellate con degli incastri, sia alla base di ciascun pilastro, sia alle intersezioni tra gli elementi verticali e i tre solai che compongono gli orizzontamenti della struttura.

Il sistema di controvento, infine, è stato incernierato ai pilastri, facendolo così lavorare esclusivamente a trazione e compressione.

3.3.2 Caratteristiche dei materiali

Come esposto in precedenza, del telaio fisico si sono costruiti due modelli agli elementi finiti separati: uno di questi rappresenta la controparte “reale” dello studio, mentre il secondo costituisce il *digital twin*. Pur essendo essi identici a livello di geometria e condizioni al contorno, a questo punto è necessario fare una distinzione. Per gli scopi della presente tesi, è stato infatti necessario diversificare i due modelli in termini delle caratteristiche meccaniche proprie del materiale alluminio, facendo riferimento alla letteratura per i valori del modulo elastico e della dispersione associata a questa grandezza:

alluminio	valore caratteristico	σ
modulo di elasticità lineare [N/mm^2]	69000	20%

TABELLA 1: CARATTERISTICHE D'INTERESSE DEL MATERIALE ALLUMINIO

Siccome i due modelli virtuali vengono utilizzati nella simulazione di un tipico processo di monitoraggio, e, come si è anticipato, uno di essi rappresenta il telaio reale, allora l'assegnazione del modulo elastico è avvenuta secondo le seguenti considerazioni:

- in un'effettiva campagna di monitoraggio di una struttura, le sue caratteristiche fisico-meccaniche sono ignote. Tramite la misura del suo comportamento dinamico, e con l'applicazione dell'analisi modale, si intende infatti estrapolare una stima di queste grandezze;
- il modello digitale agli elementi finiti deve passare attraverso una procedura di *model updating*, ovvero di aggiornamento e ottimizzazione delle quantità meccaniche di primo tentativo;

Per il modello “reale”, pertanto, si è scelto valore caratteristico del modulo di Young, ossia $69000 N/mm^2$, ma poi, ai fini dell'analisi, tale grandezza è stata considerata sconosciuta.

Il *digital twin*, viceversa, deve avere un modulo elastico iniziale noto, e questo è stato preso all'interno dell'intervallo di dispersione del 20%: in modo casuale, si è scelto il valore $62493,3 \text{ N/mm}^2$, corrispondente ad una riduzione del 9,43%.

Per concludere, va specificata una semplificazione che è stata fatta nella modellazione dei materiali: i profilati in acciaio zincato che lavorano come giunture fra gli elementi verticali e gli orizzontamenti non sono stati presi in considerazione.

3.4 Campagna di monitoraggio

Lo *structural health monitoring* di una struttura fa leva su un'intensa campagna di misurazione e raccolta dati, la quale parte dalla progettazione della dislocazione dei sensori in alcuni punti strategici del sistema e mira a catturare le grandezze fisiche, come accelerazione o spostamento, utili a descriverne il comportamento dinamico. Il caso in esame non fa eccezione, seppur con le differenze dovute al contesto che vanno preliminarmente specificate. La campagna è stata infatti condotta su un telaio virtuale, non reale, come anticipato, e quindi la fase di acquisizione delle misure è stata di fatto simulata; l'intera procedura si è realizzata sulla base di un segnale numerico, il quale ha reso superflui alcuni passaggi tipici del suo pretrattamento.

3.4.1 Simulazione del monitoraggio

Le pratiche di *SHM* prendono diversa forma in base alle metodologie operative sulle quali si fondano, e pertanto, a seconda di quella prescelta, si devono fare alcune specifiche ipotesi e assunzioni. L'intera procedura di monitoraggio svolta per il lavoro qui presentato, e la successiva identificazione strutturale per mezzo dell'algoritmo *SSI*, sono state eseguite secondo un approccio di tipo *operational modal analysis*. Introdotto già nel primo capitolo, l'*OMA* [29] si riferisce a

quella classe di metodi per l'identificazione modale caratterizzati dalla sola misura della risposta dinamica della struttura, effettuando la risoluzione delle equazioni del moto senza la necessità di conoscere l'entità delle grandezze eccitanti il sistema. L'impianto teorico schematizza queste forze come output del cosiddetto *excitation system*, caricato da rumore bianco.

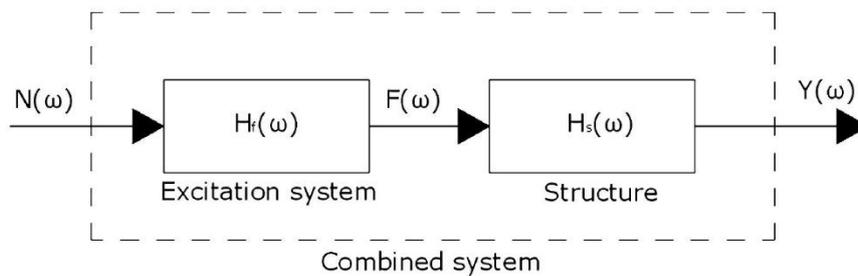


FIGURA 14: SCHEMATIZZAZIONE DEL MECCANISMO INPUT-OUTPUT NELL'APPROCCIO OPERATIONAL

In base a questa assunzione, la risposta misurata può essere interpretata come l'output del sistema combinato, costituito da *excitation system* e dalla struttura stessa, come se fosse soggetto a *rumore bianco Gaussiano*. La fonte di eccitazione, pertanto, che in una vera e propria campagna sarebbe fornita da vibrazioni di tipo ambientale, è stata somministrata, nel caso in esame, sotto forma, appunto, di *Gaussian white noise*. La scelta non è quindi casuale: si tratta infatti di un segnale di input con media nulla e spettro costante, e perciò capace di sollecitare equamente tutti i modi propri del telaio, offrendo un output il cui spettro contiene tutte le informazioni sulla struttura. Ciò è legato alla *power spectral density* del segnale di input, e alla relativa matrice che ne descrive la funzione di autocorrelazione: se infatti è presente un solo input, o ugualmente se gli input sono tutti correlati, allora tale matrice ha rango pari a uno e l'eccitazione non è in grado di far apprezzare, e quindi stimare, modi molto vicini tra loro in termini di frequenza. In aggiunta a questo tratto distintivo, si sono adottate le ipotesi classiche dell'*operational modal analysis* [29]:

- *linearità*: la risposta della struttura a una data combinazione di input è uguale alla combinazione dei singoli output;
- *stazionarietà*: le caratteristiche dinamiche della struttura non mutano nel tempo, e quindi anche i coefficienti delle equazioni differenziali che governano la dinamica del sistema sono indipendenti dal tempo;
- *osservabilità*: il layout dei sensori è stato propriamente progettato per catturare i modi *target*.

Ciò posto, la simulazione del monitoraggio condotta in questa sede si è organizzata secondo la seguente impronta procedurale. I sensori fittizi sono stati assegnati a coppie per ciascun piano, e posizionati ai due estremi di ogni solaio: uno di essi al vertice in prossimità dell'origine, l'altro in posizione opposta lungo la diagonale. I nodi corrispondenti sono individuati dai numeri 2, 24, 45, 65, 85, 105, e per ciascuno di essi si sono registrate le accelerazioni, risultanti come risposta al rumore somministrato, nelle direzioni x e y .



FIGURA 15: LOCALIZZAZIONE DEI PUNTI DI MISURA

Ciò equivale al monitoraggio di un numero di gradi di libertà pari a 12, che si traduce in una matrice dei dati di dimensioni $m \times N$, dove $m=12$ ed N è invece il numero di campionamenti eseguiti.

$$Y = \begin{pmatrix} y_{11} & \cdots & y_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{m1} & \cdots & y_{mN} \end{pmatrix}$$

La cattura dei valori di accelerazione output si è articolata in un anno di osservazioni, con una misurazione compiuta ogni settimana. Nei primi due mesi e per metà del terzo, la struttura è supposta essere in configurazione *non danneggiata*, e pertanto si sono ottenute le prime dieci misure, che saranno quelle utilizzate poi per la calibrazione del *digital twin*. Ciascuna osservazione è durata sette minuti, ed è stata caratterizzata da una frequenza di campionamento pari a 100 Hz, scelta a partire dal criterio di Nyquist. Siccome per la successiva identificazione si è deciso di selezionare come modi *target* i primi due flessionali lungo *y*, direzione di minore inerzia, il primo lungo *x* e il primo torsionale, ed essendo le strutture civili connotate da frequenze tutto sommato basse, che variano tra i 5 Hz e i 25 Hz per i primi modi, Nyquist impone un campionamento teorico ad almeno 50 Hz, esteso poi a 100 per ottenere una maggiore quantità di informazioni riguardo il segnale acquisito.

La campagna così impostata è stata quindi simulata tramite la conduzione di *analisi transienti complete* sul software ad elementi finiti ANSYS® Mechanical APDL 2021 R1; l'applicazione della sollecitazione è avvenuta tramite la costruzione di 12 tavole di carico tra loro indipendenti, riempite con valori estratti da distribuzione Gaussiana, ciascuna delle quali è stata applicata come carico ai nodi di ciascun lato dei tre solai presenti nel telaio reale. Per l'analisi è stato assunto inoltre uno smorzamento tipo *Rayleigh*, come richiesto nelle impostazioni del software. Questa modellazione vede la matrice dello smorzamento formulata come combinazione lineare delle matrici di massa $[M]$ e rigidità $[K]$, con valori estrapolati a partire dai parametri α e β , i quali si calcolano in funzione delle frequenze dei primi due modi di vibrare della struttura:

$$\alpha = \zeta \frac{2\omega_1\omega_2}{\omega_1 + \omega_2} \quad , \quad \beta = \zeta \frac{2}{\omega_1 + \omega_2}$$

dove ζ è il rapporto di smorzamento, impostato pari al 3% nel caso in esame. I due parametri così espressi costituiscono i coefficienti da usare per la combinazione lineare delle due matrici, ottenendo come risultato uno smorzamento che ha la seguente forma:

$$[C] = \alpha[M] + \beta[K]$$

Guardando alle prime due frequenze si sono allora ricavati i due parametri α e β , che valgono, per il caso in esame, 1,10767 e 7,311E-4 rispettivamente. L'analisi transiente completa è stata quindi lanciata secondo queste impostazioni, il segnale di risposta della struttura è stato registrato in termini di accelerazioni in corrispondenza dei nodi sopra specificati, per una durata di sette minuti a ciascuna misurazione e con frequenza di campionamento pari a 100 Hz.

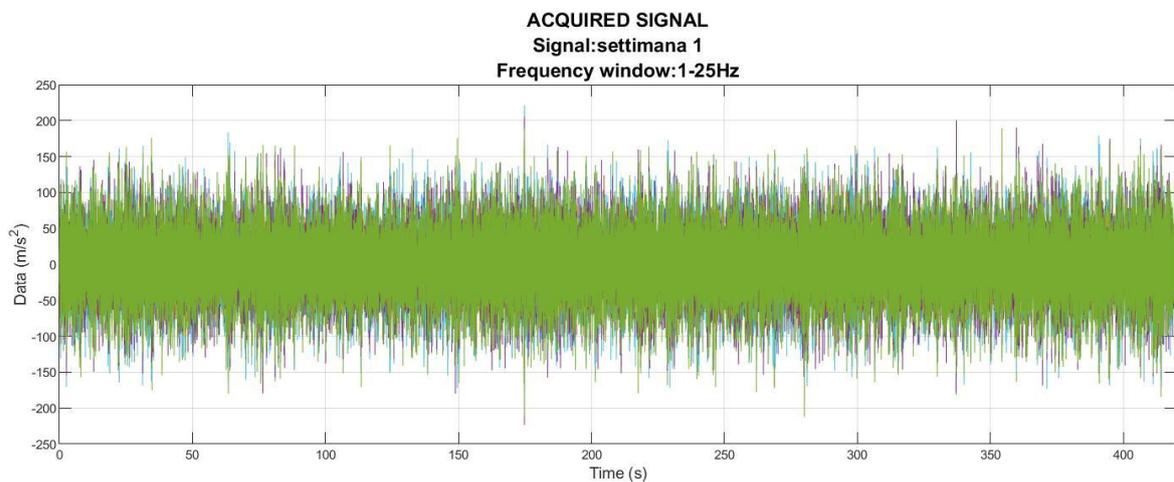


FIGURA 16: SEGNALE ACQUISITO NEL DOMINIO DEL TEMPO

I segnali acquisiti mostrano quindi le tipiche caratteristiche del rumore gaussiano espresso nel dominio del tempo, ovvero media pari a zero e spettro costante. Tali segnali sono stati successivamente pretrattati: l'iniziale ed imprescindibile fase del *treatment* si realizza nella

trasformazione dell'osservazione secondo Fourier, ovvero nel passaggio al dominio della frequenza.

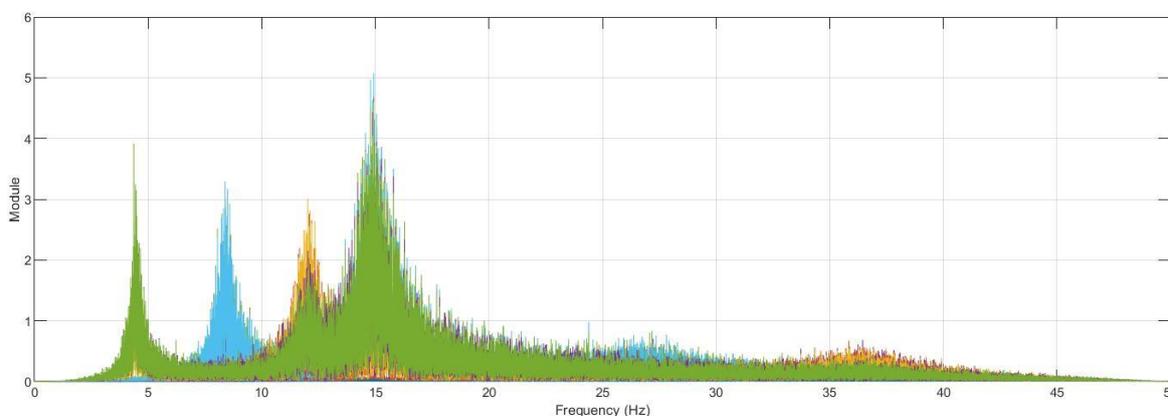


FIGURA 17: SEGNALE ACQUISITO NEL DOMINIO DELLA FREQUENZA (TRASFORMATA DI FOURIER DEL SEGNALE)

Con la trasformata, nonostante la persistenza di una relativa quantità di rumore, il segnale ha rivelato subito le sue caratteristiche, evidenziando quelle che sono le frequenze sollecitate durante la somministrazione del *gaussian white noise*. Si nota infatti come i picchi siano disposti in corrispondenza di alcuni valori specifici di frequenza, i quali rappresentano l'informazione portata dal segnale riguardo i modi secondo cui la struttura naturalmente vibra. La trasformata della serie temporale in questione ha indicato quindi che le frequenze sollecitate si aggirano attorno ai 4.5, 8, 12 e 15 Hz.

Solitamente, la fase di trasformazione del segnale è seguita dalla rimozione della media e dei possibili trend che caratterizzano l'acquisizione; in questo caso, però, data la natura gaussiana dell'input, tale passaggio risulta superfluo, in quanto restituirebbe i dati invariati. Il passo successivo è stato il taglio del segnale tramite l'uso del filtro passa-banda di Butterworth: per mezzo di esso si è selezionata una certa finestra di frequenza d'interesse eliminando la porzione del segnale che non contiene informazioni rilevanti per l'analisi. Nel caso in esame si sono scelti, come limiti della finestra, i valori 1 Hz e 25 Hz, i quali, oltre ad essere tipici nell'ambito delle strutture civili,

permettono anche il pieno apprezzamento delle frequenze evidenziate dalla trasformata di Fourier della serie temporale.

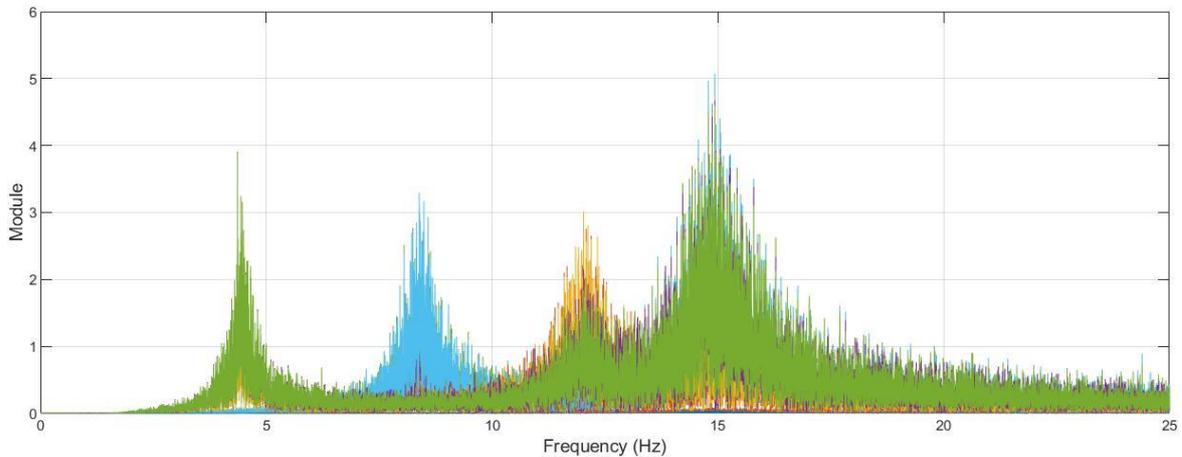


FIGURA 18: TRASFORMATA DEL SEGNALE FILTRATO

Del segnale così rappresentato e tagliato si è infine calcolato e plottato lo spettro di densità di potenza, o *power spectral density PSD*, il quale descrive la distribuzione della potenza del segnale nel dominio della frequenza.

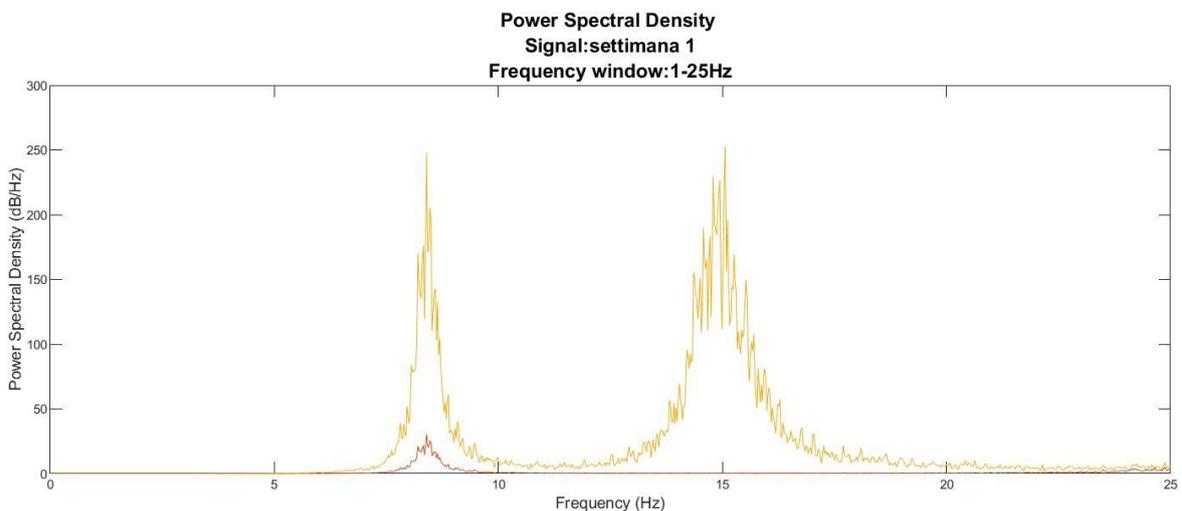


FIGURA 19: SPETTRO DI DENSITÀ DI POTENZA DEL SEGNALE

La matrice dei dati così ottenuta ha quindi dimensioni 12 x 42000, ed è pronta per essere data in pasto all'algoritmo di identificazione strutturale.

3.4.2 Identificazione modale tramite algoritmo SSI

In questa fase, i dati raccolti con le osservazioni sul telaio vengono utilizzati con l'obiettivo di estrapolarne gli attributi che influenzano e descrivono il comportamento dinamico. In una campagna di monitoraggio, infatti, il fabbricato con cui si ha a che fare non è conosciuto sotto questo punto di vista, ovvero le matrici di massa e rigidità sono incognite, ed è pertanto impossibile disaccoppiare le equazioni del moto e condurre un'analisi modale classica.

L'algoritmo prescelto per identificare le caratteristiche modali del telaio oggetto di studio ricade all'interno della famiglia dei cosiddetti *Stochastic Subspace Identification methods* (SSI), gruppo di processi di riconoscimento strutturale che operano all'interno dello spazio delle fasi, e si incentrano sulla proiezione ortogonale di una matrice contenente i dati più recenti su di un sottospazio contenente invece quelli più vecchi [32]. Questa compagine di metodi si divide in due approcci differenti, che sono il *data-driven SSI* e il *covariance-driven SSI*, e che si basano sul trattamento diretto dei dati grezzi oppure sulle correlazioni degli output, rispettivamente; per il caso in esame, si è adottata una tecnica *data-driven SSI*.

L'impianto teorico degli algoritmi di tipo *stochastic subspace identification* è basato sulla rappresentazione nello spazio delle fasi di un sistema lineare a tempo discreto e *time-invariant*: se si considera la risposta del sistema come funzione del tempo

$$y(t) = \{y_1(t) \ y_2(t) \ \dots \ y_N(t)\}^T$$

allora l'equazione del moto nella formulazione classica rappresenta un sistema a m gradi di libertà:

$$[M]\ddot{y}(t) + [D]\dot{y}(t) + [K]y(t) = F(t)$$

ovvero un insieme di m equazioni differenziali del secondo ordine in m incognite. Il passaggio allo spazio delle fasi si concretizza con l'introduzione del vettore

$$x(t) = \{y(t) \dot{y}(t)\}^T$$

contenente gli stati del sistema. Esso fa sì che l'originale sistema di m equazioni del secondo ordine si trasformi in un insieme di $2m$ equazioni del primo ordine che prende la seguente forma:

$$\begin{aligned} \dot{x}(t) &= A_c x(t) + B f(t) \\ y(t) &= C x(t) \end{aligned}$$

dove le matrici A_c e B si esprimono come:

$$\begin{aligned} A_c &= \begin{bmatrix} 0 & I \\ -M^{-1}K & -M^{-1}D \end{bmatrix} \\ B &= [0 \quad M^{-1}]^T \end{aligned}$$

L'algoritmo SSI lavora su un sistema dinamico espresso con questa formulazione, la quale dà il vantaggio di avere la disponibilità immediata di una soluzione in forma chiusa facilmente trasponibile al tempo discreto [33]. Le informazioni che si hanno a disposizione provengono infatti dal monitoraggio, e pertanto sono segnali campionati normalmente rappresentati dalla matrice

$$Y = [y_1 \quad y_2 \quad \dots \quad y_N]$$

di dimensioni $m \times N$, dove m è il numero di gradi di libertà monitorati ed N quello dei campionamenti. Tale matrice è il punto di partenza per la costruzione della *Block Hankel Matrix*: ciascun blocco contiene una parte di Y limitata ad un numero di campioni pari a $N-2s$, dove s è il numero di *traslazioni*. In altre parole, della matrice Y si prendono una

serie di stati progressivi, ossia $2s$ sottomatrici con dimensioni $m \times N-s$, e le si impilano a formare la *BHM*.

$$Y_h = [Y_{(1:N-2s)} Y_{(2:N-2s+1)} \dots Y_{(2s:N)}]^T = [Y_{hp} \ Y_{hf}]^T$$

Sono proprio queste sottomatrici, blocchi della *BHM*, a venire proiettate l'una sull'altra per mezzo della formulazione proposta da Van Overschee & De Moor [34]

$$O = Y_{hf} Y_{hp}^T (Y_{hp} Y_{hp}^T)^{-1} Y_{hp}$$

Questa, a sua volta, è una matrice $sm \times sm$ le cui colonne costituiscono un insieme di *free decays* del sistema relativi alle differenti condizioni iniziali specificate da Y_{hp} . Ciascuna colonna allora viene espressa prima come prodotto tra la matrice di osservabilità Γ_s e gli stati di Kalman X_0 al tempo iniziale, e poi, essendo queste quantità entrambe incognite, attraverso una scomposizione ai valori singolari. Ciò permette di stimare Γ_s e X_0 nel seguente modo:

$$O = \Gamma_s X_0 \quad , \quad O = USV^T$$

$$\rightarrow \begin{cases} \hat{\Gamma} = US^{1/2} \\ \hat{X}_0 = S^{1/2}V^T \end{cases}$$

Note queste due quantità, si possono stimare a loro volta le matrici A_d e C completando le equazioni del sistema nello spazio delle fasi, che può quindi essere sottoposto ad autoanalisi per estrapolarne gli autovalori e gli autovettori, i quali corrispondono alle pulsazioni e alle forme modali proprie della struttura, con i relativi valori di smorzamento.

La linea teorica fin qui illustrata costituisce l'ossatura dell'algoritmo e ne descrive gli step matematici necessari per giungere alla

realizzazione delle matrici del sistema, ma la sua applicazione pratica è leggermente più articolata e necessita di qualche precisazione.

La fase operativa comprende solitamente un ampio numero di identificazioni, attuate sullo stesso segnale ma realizzate facendo variare l'ordine del sistema: ciò implica una diversa dimensione per la *BHM* a ciascun ciclo, e quindi differenti proiezioni dei blocchi *futuro* sui blocchi *passato*. Il risultato sono molteplici frequenze e forme modali identificate ad ogni sequenza, le quali devono essere processate nell'ottica di scremare le soluzioni dette *spurie*, ovvero i modi numerici che l'algoritmo produce ma che non sono corrispondenti a nessuna vibrazione fisica. Le soluzioni *stabili* invece, che si ripresentano ad ogni ciclo con valori di smorzamento e frequenza più o meno stazionari, sono quelle proprie della struttura.

L'algoritmo SSI utilizzato nel caso in esame, prodotto dai professori Saettone e Abbiati in linguaggio MATLAB®, è stato settato per far variare l'ordine del sistema tra 50 e 150, con un incremento pari a 10 ad ogni nuovo ciclo di identificazioni. La scrematura dei modi *spuri* e la distinzione di quelli *stabili* dai rimanenti *instabili* trovano poi espressione nel *diagramma di stabilizzazione*. In esso si riportano in ascisse tutte le frequenze identificate durante i vari cicli, mentre sulle ordinate si fa variare l'ordine del sistema. L'obiettivo del diagramma è evidenziare in modo immediato la distinzione tra le frequenze identificate, pratica che si concretizza sulla base di alcune soglie impostate per le frequenze, lo smorzamento e il *MAC* (Modal Assurance Criterion). Le scelte, in questo frangente, sono state le seguenti:

- variazione di frequenza tra ordini successivi inferiore al 4%;
- variazione del *damping* tra ordini successivi inferiore al 10%;
- esclusione dei modi che presentano *damping* $\zeta > 8\%$ e $\zeta < 1\%$;
- esclusione dei modi con *MAC* $< 95\%$;

Date queste impostazioni, il diagramma di stabilizzazione assume il seguente aspetto:

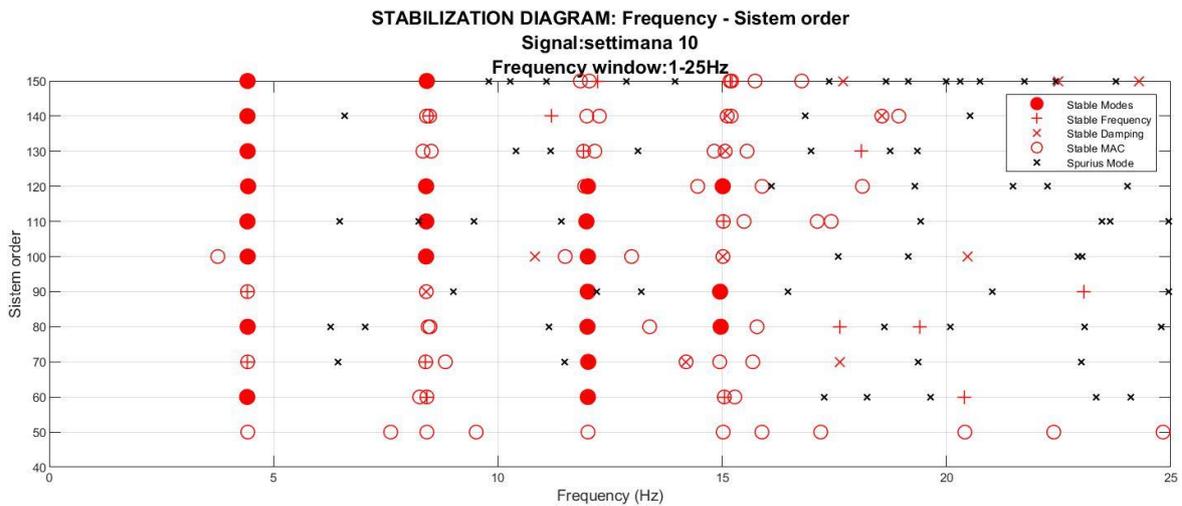


FIGURA 20: DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE

Il grafico riportato contiene i risultati dei cicli di identificazione condotti sui dati di accelerazione della decima settimana di osservazioni, quella che, come si vedrà in seguito al *model updating*, produce il valore di modulo elastico da assegnarsi definitivamente al *digital twin*. Su di esso si può apprezzare il meccanismo di selezione delle frequenze: i modi *stabili* sono considerati tali solo quando soddisfano, al variare dell'ordine, tutti i requisiti di frequenza, smorzamento e MAC, mentre vengono scartati se uno solo di questi non viene rispettato. I modi che superano questo filtro mostrano un addensamento attorno a quattro valori di frequenza, che sono all'incirca 4.3, 8.3, 12 e 15 Hz; inoltre, se si sovrappone allo *stabilization diagram* l'andamento dello spettro di densità di potenza del segnale, si nota che tali valori corrispondono alle frequenze maggiormente energetiche sollecitate dal rumore gaussiano somministrato in precedenza, a riprova del fatto che i modi identificati sono fisici e appartengono alla struttura reale.

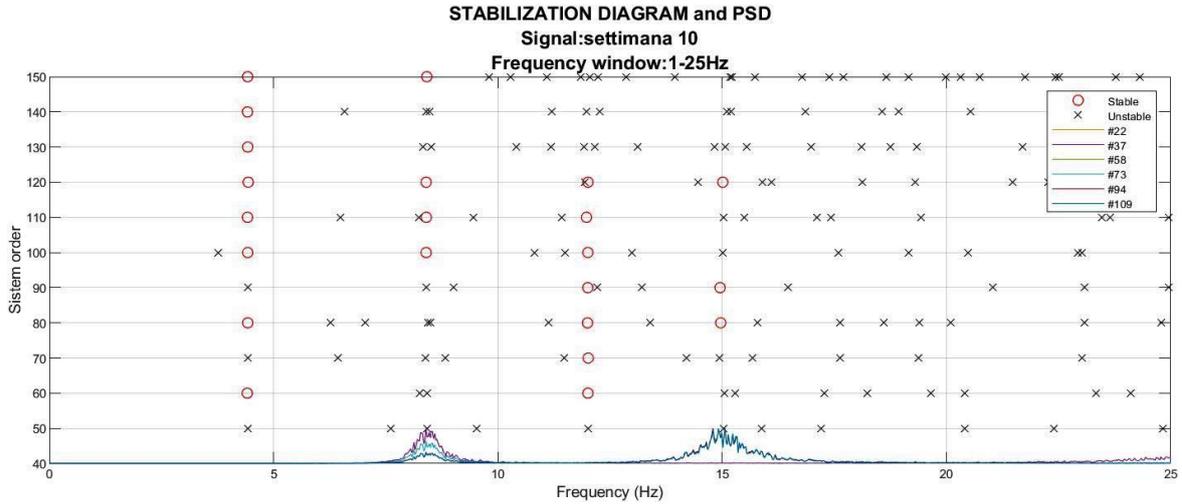


FIGURA 21: DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE E PSD

Il trattamento dei risultati ottenuti prosegue con la *cluster analysis*: una volta selezionati i modi stabili identificati, questi vanno raggruppati in *clusters* secondo criteri simili a quelli che fondano la stabilizzazione. In questo caso, però, le soglie impostate funzionano in direzione sia verticale che orizzontale, ovvero confrontano gli stessi modi ai diversi ordini e modi diversi allo stesso ordine. I limiti impostati sono i seguenti:

- modi identificati con valori di MAC che differiscono di meno del 10% sono stati aggregati nel medesimo *cluster*;
- modi identificati con frequenze che differiscono di meno di 0.3 Hz sono stati aggregati nel medesimo *cluster*;

L'analisi *cluster* ha raggruppato le frequenze identificate come ci si aspettava, ovvero confermando la traccia mostrata dai diagrammi di stabilizzazione e dal grafico della PSD, ed è quindi possibile individuare i quattro valori associati ai quattro modi identificati dall'algoritmo SSI:

f [Hz]	damp [%]	forme modali											
4.3090	0.032	0.0079	0.0077	0.0061	0.0062	0.0047	0.0049	0.0825	0.0791	0.9122	0.9077	0.9947	1.0000
8.3331	0.034	0.9958	1.0000	0.8068	0.8151	0.6363	0.6466	0.0466	-0.0382	0.0183	0.0138	-0.0193	-0.0233
12.0604	0.036	0.0013	0.0006	0.0082	-0.0059	0.0085	-0.0072	0.0773	0.0846	1.0000	0.9995	-0.4211	-0.4182
15.0361	0.038	0.0440	-0.0426	0.8811	-0.8765	0.9738	-0.9695	-0.9988	1.0000	-0.6433	0.6287	-0.9361	0.9362

FIGURA 22: MODI IDENTIFICATI ALLA SETTIMANA 10

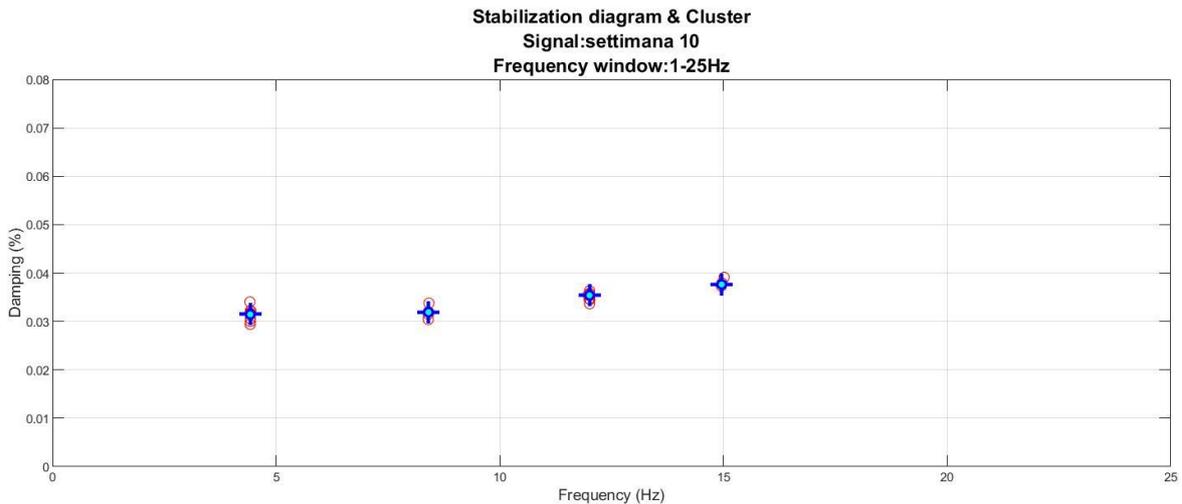


FIGURA 23: DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE E CLUSTER

Per completare l'individuazione dei modi è infine necessario capire la tipologia di spostamenti che li caratterizza, ovvero vanno tracciate ed analizzate le forme modali per ciascuna frequenza.

Il modo corrispondente alla prima frequenza riconosciuta da SSI presenta spostamenti adimensionalizzati di entità crescente in corrispondenza dei tre orizzontamenti propri del telaio; in più, si può notare come quelli in direzione x siano molto più piccoli rispetto a quelli in lungo y . Sulla base di queste due osservazioni si può affermare che il modo identificato con frequenza pari a 4.31 Hz rappresenti la prima vibrazione di tipo flessionale in direzione y della struttura (e individua quindi la direzione di minore inerzia).

Le medesime considerazioni possono essere trasposte al secondo modo identificato, con frequenza 8.33 Hz : SSI attribuisce ad esso spostamenti crescenti e di maggiore entità solo in direzione x , mentre lungo y questi risultano ridotti di due ordini di grandezza. Il modo in questione è dunque il primo di tipo flessionale in direzione x .

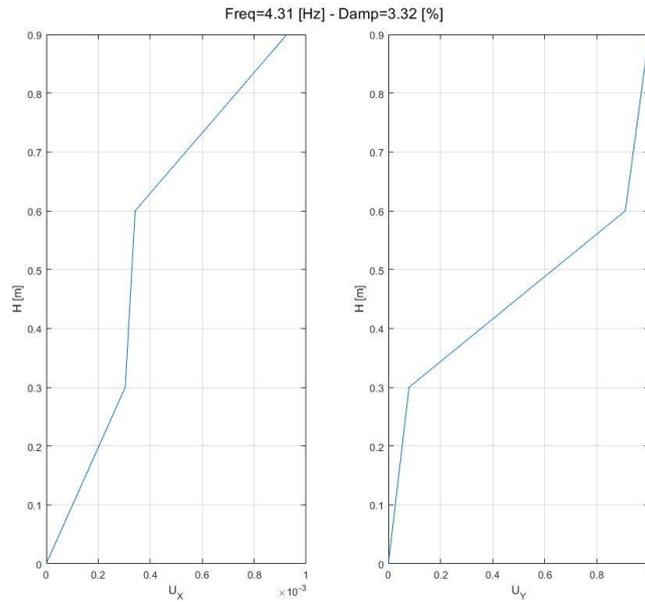


FIGURA 24: PRIMA FORMA MODALE IDENTIFICATA

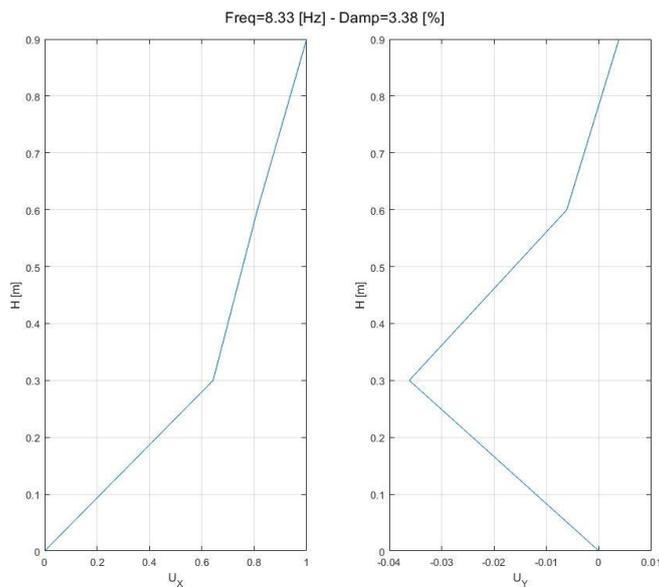


FIGURA 25:SECONDA FORMA MODALE IDENTIFICATA

Una volta riconosciute le prime due vibrazioni flessionali che si sviluppano lungo gli assi, la frequenza pari a 12.06 Hz risulta individuare invece il secondo modo flessionale in y. La relativa forma modale, infatti, mostra la peculiare presenza del singolo flesso, associata allo spostamento massimo normalizzato.

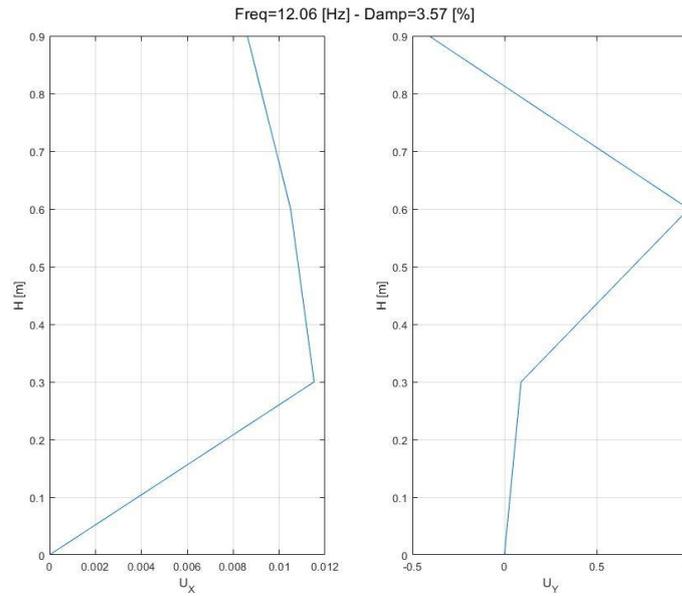


FIGURA 26: TERZA FORMA MODALE IDENTIFICATA

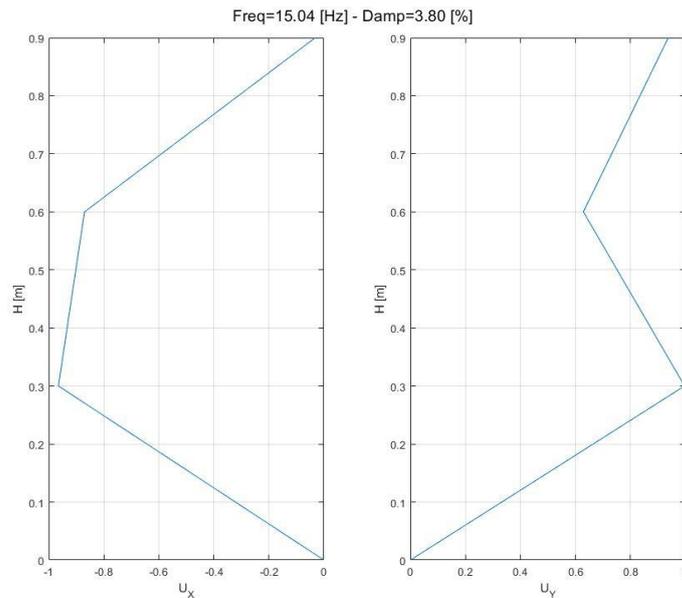


FIGURA 27: QUARTA FORMA MODALE IDENTIFICATA

Si analizza infine la forma modale che SSI associa alla frequenza 15.04 Hz: in entrambe le direzioni e per lo stesso piano è raggiunto lo spostamento massimo, e pertanto il modo in oggetto è il primo di tipo torsionale. Si riassumono quindi i risultati della procedura nella tabella seguente:

f [Hz]	damping [%]	modo	direzione	tipo
4.3090	0.032	flessionale	y	1
8.3331	0.034	flessionale	x	1
12.0604	0.036	flessionale	y	2
15.0361	0.038	torsionale	/	1

TABELLA 2: RECAP DELLE IDENTIFICAZIONI

L'identificazione modale condotta ha quindi fornito un insieme di informazioni sufficientemente ampio ed esaustivo per quanto riguarda i primi quattro modi, che, in campo civile, solitamente costituiscono anche i più importanti per le strutture. I dati sulle relative frequenze e l'associazione di queste alle rispettive forme modali, oltre ad inquadrare la struttura nelle sue caratteristiche dinamiche, costituiscono una conoscenza necessaria e sufficiente alla realizzazione del prossimo step all'interno del procedimento di *structural health monitoring*: sono infatti queste due tipologie di grandezze quelle richieste dagli algoritmi di *model updating* determinare il valore aggiornato di modulo elastico da assegnare al modello numerico oggetto della calibrazione.

Capitolo 4 – Simulation Digital Twin

4.1 Model Updating

L'alto livello di fedeltà nei confronti della controparte reale è, come anticipato nel Capitolo 2, un attributo che nel *digital twin* assume importanza centrale. L'impiego preventivo, legato alla caratteristica *a priori* delle sue prescrizioni, impone un requisito di elevata accuratezza del modello che limiti in partenza la propagazione dell'errore. Non solo, il DT si distingue dalle altre tipologie di modelli per il fatto che ha la capacità di evolversi assieme alla realtà fisica, replicandone le mutazioni e i cambiamenti per l'intero corso della vita della stessa. La necessità di stringere il più possibile la relazione *one-to-one* che è richiesta tra *digital twin* ed entità fisica trova dunque nel *model updating* uno strumento potente, efficace e dotato di un solido background di applicazioni in campo civile. I parametri modali stimati per mezzo del modello FEM, infatti, non godono di completa affidabilità a causa dell'imprecisione legata alla rappresentazione numerica. Quest'ultima non è pertanto rappresentativa del comportamento dinamico della struttura, ma ha invece bisogno di attraversare un processo di *refinement* volto a separare il gap con la realtà e, in definitiva, a validare il modello costruito sul calcolatore [29].

Quella in questione è una tecnica di ottimizzazione sfruttata nei processi di *structural health monitoring* col fine di calibrarne i modelli ad elementi finiti: dal momento che la struttura reale è sconosciuta dal punto di vista delle condizioni di salute e delle prestazioni meccaniche dei materiali e delle componenti, alle sue rappresentazioni numeriche viene assegnato un valore di modulo elastico di primo tentativo, al quale corrisponde un certo corredo di attributi modali; questa quantità viene calibrata, e quindi modificata, sfruttando un confronto

con le informazioni sperimentali estratte con l'identificazione modale. Per mezzo di una funzione obiettivo, il *model updating* restituisce, per ogni identificazione, un valore ottimale E_{OPT} del modulo elastico da assegnare al modello ad elementi finiti.

In questa fase sono pertanto entrate in gioco contemporaneamente le due controparti oggetto del presente studio: da un lato, le identificazioni forniscono un modello modale della struttura reale sottoforma di frequenze e forme modali sperimentali f_e, ϕ_e , dall'altro, per mezzo della modellazione FEM, configurazione embrionale del *digital twin*, si ricavano numericamente le caratteristiche modali del sistema. Questi due gruppi di quantità sono stati messi in relazione l'uno con l'altro attraverso la funzione obiettivo J , che è proporzionale alle differenze fra le frequenze sperimentali e numeriche e fra le rispettive forme modali:

$$J_i \propto \frac{f_{e,i} - f_{n,i}}{f_{e,i}} + (1 - MAC_i)$$

Più le grandezze sono distanti, ovvero più le frequenze e forme modali sperimentali e numeriche differiscono tra loro, maggiore sarà il valore assunto dalla funzione di costo J : minimizzare tale valore corrisponde quindi ad estrapolare il valore di modulo elastico E_{opt} da assegnare al modello FEM affinché questo rappresenti il più fedelmente possibile la struttura reale.

Servendosi delle dieci identificazioni effettuate sui segnali registrati sul modello reale si è quindi aggiornato il modulo di Young del DT per ogni ciclo di *model updating* che produceva come risultato la funzione J di entità minore, fino al valore 2.95839 che corrisponde ad $E_{opt}=6.405E10$ kN/m^2 . Di seguito si riporta la tabella riassuntiva con tutti i risultati per ciascun passaggio:

mese	settimana	E_{in} [kN/m ²]	J_i	E_{opt} [kN/m ²]
gennaio	1	6.24933E10	3.3978	64530000000
	2	64530000000	3.2951	64540000000
	3	64540000000	3.294468	63070000000
	4	63070000000	3.281006	63900000000
febbraio	5	64880000000	2.99134	64880000000
	6	63690000000	2.980087	63690000000
	7	64050000000	2.979328	63160000000
	8	64050000000	2.971594	64080000000
marzo	9	64050000000	2.970268	64060000000
	10	64050000000	2.95839	64050000000

TABELLA 3: RISULTATI CALIBRAZIONE DEL DT

4.2 Formulazione e simulazione degli scenari di danno

La fase di *model updating* ha prodotto un modello accurato ed affidabile, caratterizzato di un comportamento dinamico che ha attributi molto vicini a quelli della struttura reale oggetto del monitoraggio e dell'identificazione condotti. Lo step successivo dell'analisi che si sta dirigendo in questa sede permette finalmente di mettere in gioco alcune delle *features* e delle dinamiche tipiche del *digital twin*, il quale, di fatto, è stato finora solo preliminarmente costruito e calibrato, ma non ha ancora potuto espletare le proprie funzioni più interessanti e connotanti.

Come sottolineato in precedenza, l'obiettivo della presente tesi è quello di implementare l'applicazione del *digital twin* alle pratiche di *structural health monitoring*, cercando di concretizzare tale intento come riconoscimento di un danno strutturale a priori. In base a questa premessa, si sono quindi formulati degli scenari di danneggiamento

del telaio in esame, i quali sono stati oggetto di simulazione sul *digital twin* secondo la seguente scaletta:

- *formulazione*: scelta, da parte dell'utenza, degli scenari di danneggiamento da esplorare, in base all'esperienza e alle esigenze;
- *simulazione*: il modello numerico DT viene utilizzato per simulare la presenza dei danni formulati, ed ottenere informazioni riguardo il comportamento della struttura sotto tali condizioni perturbate;
- *training*: i risultati della fase di simulazione vengono utilizzati per allenare il modello a riconoscere a priori le medesime situazioni una volta che si presenteranno nel telaio reale, tramite un procedimento di *machine learning*.

4.2.1 Formulazione

La formulazione e la pianificazione degli scenari di danno, come anticipato, devono far leva sulle premesse e sugli intenti che ciascuno studio si prefissa. In particolare, per il caso oggetto della trattazione, si vuole conferire al *digital twin* la capacità di individuare a priori la presenza di un danneggiamento nel telaio reale. Questa capacità va però strutturata e impostata in modo sistematico, ovvero è necessaria una concettualizzazione di alcuni aspetti chiave legati al danno strutturale e al suo riconoscimento. A tal fine si è nuovamente sfruttata come punto di partenza la già citata scala di Worden [30] (pp. 9-10) per i livelli di identificazione del danno. Utilizzando tale classificazione come riferimento, si è riconosciuto come aspetto caratterizzante, nonché strumentale agli scopi della presente analisi, la diversificazione del danno nei seguenti termini:

- *localizzazione*: si vuole che *digital twin* individui la posizione del danno in termini di localizzazione dello stesso sullo/i specifico/i elemento/i strutturale/i; è allora necessario che tutti gli scenari pianificati contengano un danneggiamento che riguardi un elemento o una zona circoscritta del telaio;
- *quantificazione / estensione*: all'interno di ciascuno scenario, si vuole che il *digital twin* sia in grado di restituire l'informazione riguardo l'estensione / quantificazione del danno che affligge l'elemento precedentemente identificato; si dovrà quindi fare in modo che le componenti siano non completamente danneggiate o che siano presenti in numero maggiore di 1;
- *intensità*: il *digital twin* dovrà dare informazioni riguardo la gravità del danno individuato, ovvero l'intensità con cui esso si presenta sull'elemento ammalorato.

Facendo riferimento a queste considerazioni, la formulazione degli scenari di danno è stata caratterizzata dalle seguenti scelte:

- I. Scenario 1 – danneggiamento di 1 asta diagonale controventante;
- II. Scenario 2 – danneggiamento di 2 aste diagonali controventanti;
- III. Scenario 3 – danneggiamento di 1 pilastro di base.



FIGURA 28: LOCALIZZAZIONE DANNO

In ciascuno scenario, si è scelto di far manifestare la presenza del danno sottoforma di una riduzione del modulo elastico E ; inoltre, tale decremento è stato introdotto in maniera graduale, sottraendo al modulo di Young una quantità pari al 10% ad ogni simulazione e per ognuno dei tre scenari prospettati.

Con questa impostazione, ammettendo il corretto funzionamento del *digital twin*, si riescono a soddisfare i tre requisiti elencati qualche riga fa: al DT è data la possibilità di riconoscere la localizzazione del problema strutturale, identificando l'elemento diagonale, piuttosto che il pilastro, come componente danneggiata; successivamente, esso può dare informazioni sull'estensione del danno, per esempio indicando che quest'ultimo interessa due diagonali e non uno soltanto. Infine, il *digital twin* può quantificare l'intensità del danno restituendo il valore del modulo elastico con indicazioni riguardo la percentuale di diminuzione.

4.2.2 Simulazione

La simulazione da condurre sul *digital twin* ha lo scopo di fornire come output una o più grandezze in grado di descrivere il danno in termini di effetti e ripercussioni che esso esercita sulla struttura. Queste grandezze vanno dunque scelte nell'ottica delle informazioni riguardanti il sistema reale a cui si ha accesso: a seconda del tipo di sensori installati, è opportuno e funzionale all'analisi che i risultati delle simulazioni siano espressi in modo tale da poter essere comparati con le misure effettuate sulla struttura esistente.

Nel caso in esame, si sono disposti degli accelerometri sul telaio reale e si è di conseguenza in possesso di dati sulla risposta dinamica e sulle caratteristiche modali dello stesso; alla luce di ciò risulta allora funzionale allo studio l'estrapolazione, tramite le simulazioni, di informazioni che descrivano gli stessi attributi della struttura, questa volta nelle configurazioni danneggiate.

Si sono quindi eseguite tre serie di simulazioni, una per ogni tipologia di scenario ipotizzato; all'interno di ciascuna serie il danno è stato introdotto progressivamente, dal 10% fino al 90% del valore iniziale di modulo elastico. Ognuna di queste riproduzioni numeriche, nove per serie e ventisette in totale, ha visto quindi l'utilizzo dell'autoanalisi come mezzo per risalire alle prime quattro frequenze proprie del telaio e per individuare gli effetti da queste subiti a causa del danno implementato. Si riportano di seguito i risultati in tabella:

	danno [%]	E [kN/m ²]	frequenze [Hz]			
			1	2	3	4
I	0	6.405E10	4.3308	8.3067	12.226	15.157
	10	5.7645E10	4.3307	8.3067	12.225	15.152
	20	5.124E10	4.3307	8.3067	12.225	15.146
	30	4.4835E10	4.3306	8.3067	12.225	15.138
	40	3.843E10	4.3305	8.3067	12.224	15.127
	50	3.2025E10	4.3304	8.3067	12.224	15.112
	60	2.562E10	4.3302	8.3067	12.224	15.09
	70	1.9215E10	4.3299	8.3067	12.223	15.054
	80	1.281E10	4.3292	8.3067	12.223	14.983
	90	6.405E09	4.3275	8.3067	12.220	14.781
II	10	5.7645E10	4.3307	8.3067	12.225	15.147
	20	5.124E10	4.3306	8.3067	12.224	15.135
	30	4.4835E10	4.3304	8.3067	12.224	15.119
	40	3.843E10	4.3302	8.3067	12.224	15.098
	50	3.2025E10	4.33	8.3067	12.224	15.068
	60	2.562E10	4.3296	8.3067	12.223	15.025
	70	1.9215E10	4.329	8.3067	12.222	14.955
	80	1.281E10	4.3277	8.3067	12.220	14.82
	90	6.405E09	4.3238	8.3067	12.215	14.459
	III	10	5.7645E10	4.3304	8.2721	12.224
20		5.124E10	4.3301	8.2369	12.224	15.151
30		4.4835E10	4.3297	8.2011	12.224	15.149
40		3.843E10	4.3293	8.1646	12.223	15.132
50		3.2025E10	4.3289	8.1272	12.223	15.076
60		2.562E10	4.3284	8.089	12.222	15.008
70		1.9215E10	4.3279	8.0497	12.222	14.925
80		1.281E10	4.3272	8.0086	12.221	14.819
90		6.405E09	4.326	7.9627	12.220	14.677

TABELLA 4: RISULTATI NUMERICI DELLE SIMULAZIONI

Le simulazioni mostrano un calo delle frequenze abbastanza contenuto, più spiccato nel caso dei modi primo e quarto, meno marcato invece per il terzo modo. Il modo numero due, dal canto suo, presenta una riduzione solo per lo scenario 3, ovvero il caso in cui è il pilastro di base a danneggiarsi. Ciò segue quanto ci si aspettava: il pilastro, infatti, se soggetto a danno strutturale, provoca un abbassamento della rigidezza del sistema in entrambe le direzioni, e conseguentemente le frequenze calano sia per le oscillazioni lungo x che per quelle lungo y. La riduzione di modulo elastico sui diagonalanti è causa invece di una diminuzione dell'inerzia del telaio in una sola direzione, y in questo caso, e pertanto l'effetto si apprezza solo su alcuni modi.

I risultati ottenuti sono stati successivamente normalizzati rispetto al valore di frequenza della configurazione non danneggiata:

$$\Delta f_i = \frac{f_{ND} - f_{D,i}}{f_{ND}}$$

in modo da ottenere il valore percentuale di riduzione delle stesse. Così facendo si sono potuti graficare e confrontare i *pattern* ottenuti per i diversi modi e tra i diversi scenari di danno prospettati.

Sono qui riportati i plot dei *pattern* numerici relativi a ciascuno scenario, ovvero dei grafici che evidenziano la diversa influenza che la specifica tipologia di danno esercita sulle quattro frequenze prese in considerazione. Un trend si ripete per tutti gli scenari, e cioè la scarsa riduzione in frequenza dei primi due modi flessionali in direzione y, ossia i modi 1 e 3, che rasenta il centesimo percentuale. La vibrazione che manifesta maggiormente gli effetti del danneggiamento sugli elementi diagonalanti è invece la quarta, quella torsionale, che perde tra i tre e i cinque punti percentuali in più rispetto alle altre due già citate. Nel caso del pilastro, infine, si nota come è il secondo modo, quello in direzione x a subire l'abbassamento più importante.

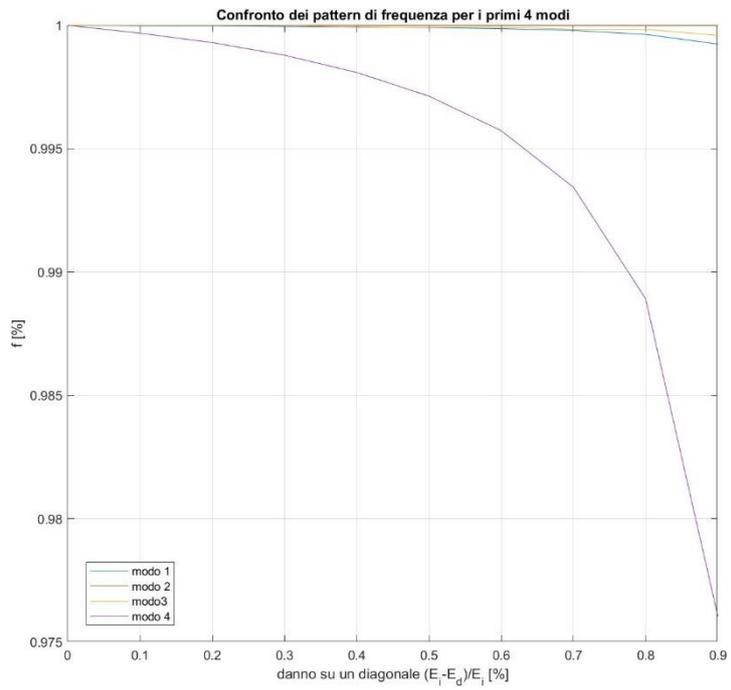


FIGURA 29: PATTERN DI FREQUENZA SCENARIO 1

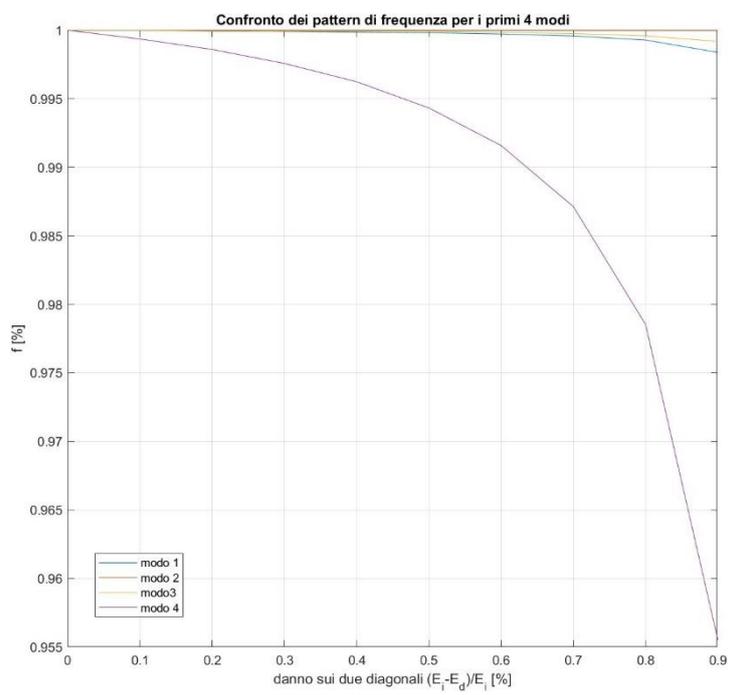


FIGURA 30: PATTERN DI FREQUENZA SCENARIO 2

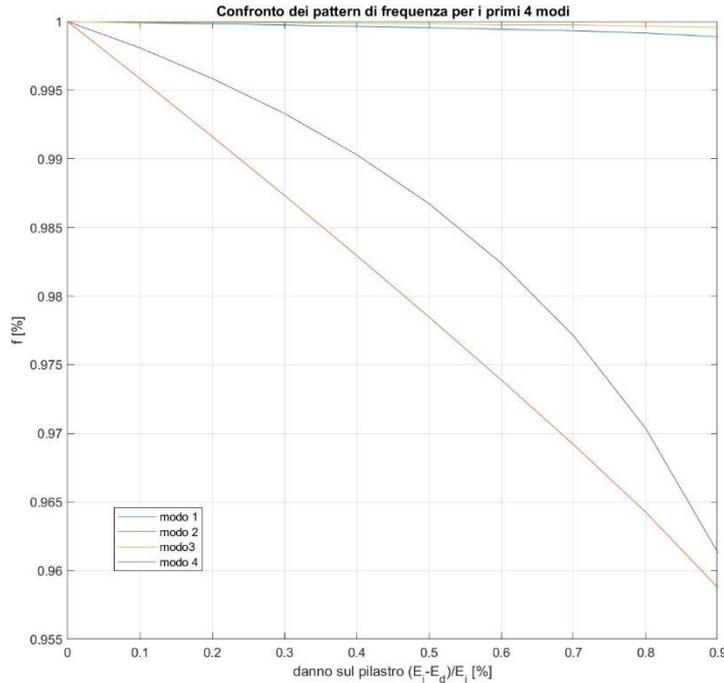


FIGURA 31: PATTERN DI FREQUENZA SCENARIO 3

Successivamente si è condotto un altro confronto, questa volta incrociando i *pattern* degli stessi modi ma per diversi scenari. In altre parole, vengono riportati sullo stesso piano, con modulo elastico normalizzato sulle ascisse e frequenza normalizzata sulle ordinate, i *pattern* del primo modo per tutte e tre le casistiche di danno esaminate; stessa cosa per il secondo, il terzo ed il quarto modo.

Ciò che si evince è una prevalenza degli effetti del danneggiamento su entrambi i diagonali, nel senso che tale tipologia è quella che comporta la maggiore riduzione su tutte le frequenze, escluso come sempre il modo 2, che si sviluppa in direzione x. Tali grafici acquistano comunque maggior interesse in seguito, quando utilizzati per sovrapporre gli *scatter plot* degli andamenti sperimentali delle frequenze una volta che il danno sarà introdotto nella struttura reale.

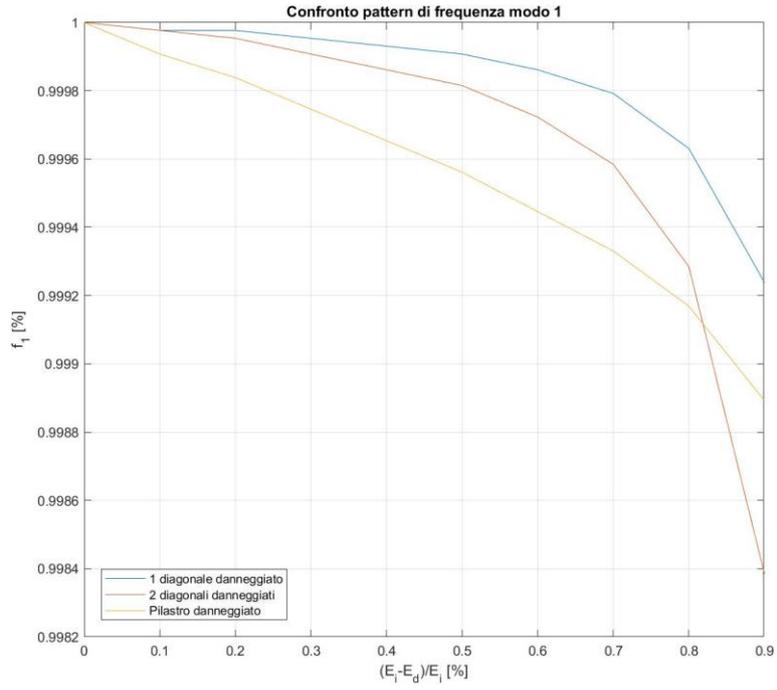


FIGURA 32: CONFRONTO PATTERN MODO 1

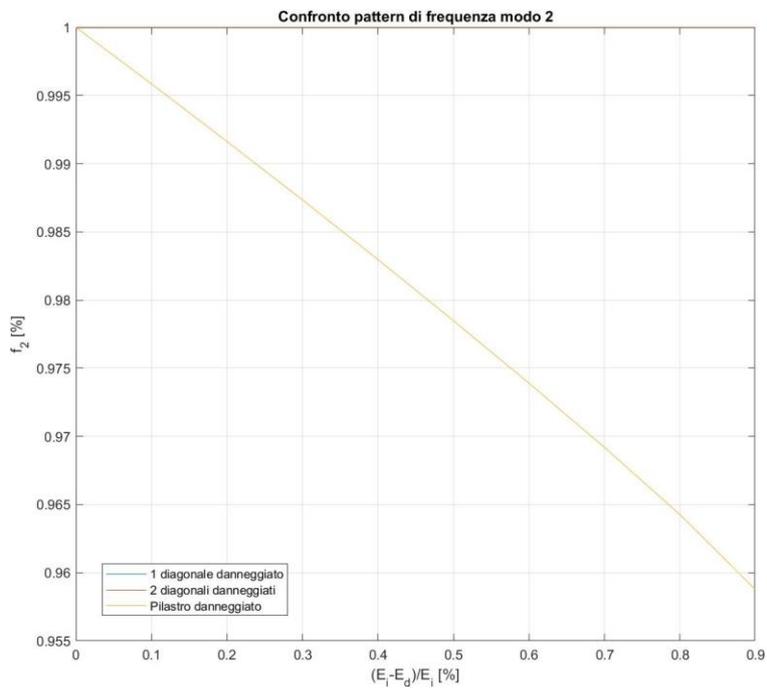


FIGURA 33: CONFRONTO PATTERN MODO 2

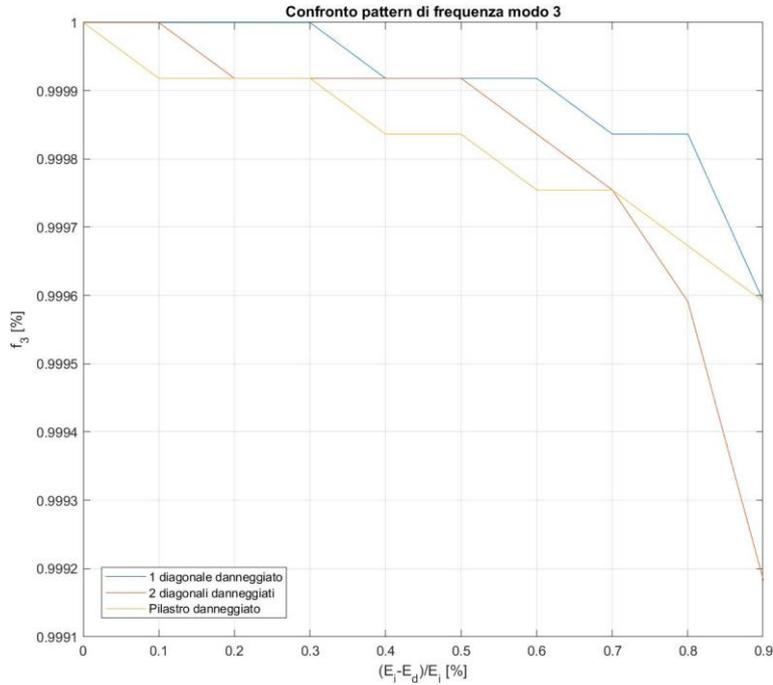


FIGURA 34: CONFRONTO PATTERN MODO 3

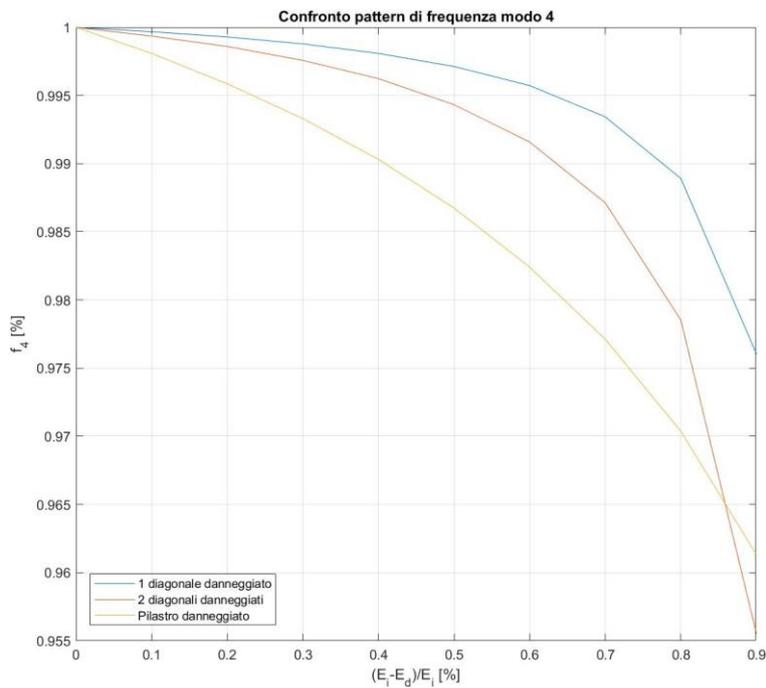


FIGURA 35: CONFRONTO PATTERN MODO 4

La simulazione degli scenari di danno e l'estrapolazione dei *pattern* non esauriscono però il loro scopo in una semplice analisi dei risultati, e devono infatti essere utilizzati come base di confronto e sorgente d'informazione per l'identificazione del danno sulla struttura reale ai

diversi livelli prefissati. Per fare ciò, i valori di modulo elastico e le relative frequenze vengono immessi in un meccanismo di *machine learning* per mezzo del quale il *digital twin* viene allenato ed istruito a riconoscere i medesimi *pattern* una volta che questi si presenteranno sulla struttura reale.

4.3 Training del *digital twin*

Le informazioni estratte nella fase di simulazione condotta dal *digital twin* legano le frequenze dei primi quattro modi agli specifici valori di modulo elastico assunti dal materiale nei tre elementi selezionati per l'introduzione del danno. Tale conoscenza, in uscita dal DT, è quindi strutturata nel seguente modo:

$$\textit{damage type} + \%E \rightarrow \textit{mode frequency}$$

Lo scopo della fase di training è quello di non lasciare tale informazione come punto di arrivo, come output finale del DT, ma di sfruttarla quale materia per l'istruzione dello stesso, funzionale all'innesco del riconoscimento predittivo della salute della struttura. In altre parole:

$$\textit{mode frequency} \rightarrow \textit{damage type} + \%E$$

Si inizia quindi ad articolare quella porzione del processo *digital twin* che mette in gioco i meccanismi di *machine learning* e intelligenza artificiale. Per concretizzare questo step, si è fatto uso dell'applicazione *Classification Learner* già compresa nel codice MATLAB®, dove con il termine *classification learning* si intende uno specifico gruppo di algoritmi di apprendimento automatico che vengono utilizzati nel performare e risolvere problemi di classificazione. Lo scopo della fase di istruzione, infatti, nel caso in esame, si definisce proprio in questi termini: riuscire ad implementare

nel *digital twin* la capacità di classificare (identificare, localizzare, quantificare e misurare) il danno presente a partire dalle osservazioni sperimentali condotte sulla struttura reale.

Nel *Classification Learner* si è quindi introdotta come input una matrice contenente le informazioni estratte nella fase di simulazione, vale a dire i moduli elastici via via deteriorati e le relative frequenze dei primi quattro modi propri del telaio. In tale array si è poi aggiunta una colonna, quella fondamentale per il *training* del DT, portatrice del messaggio istruttivo. Questo è stato espresso sotto forma di quattro diversi indicatori numerici che identificano ciascuno una delle diverse configurazioni assunte dalla struttura:

- 0 → configurazione non danneggiata → modulo elastico e frequenze imperturbati;
- 1 → scenario di danno n.1 → modulo elastico con danneggiamento dal 10% al 90% su un solo diagonale e relative frequenze di vibrazione;
- 2 → scenario di danno n.2 → modulo elastico con danneggiamento dal 10% al 90% su due diagonali e relative frequenze di vibrazione;
- 3 → scenario di danno n.3 → modulo elastico con danneggiamento dal 10% al 90% su pilastro di base e relative frequenze di vibrazione;

6.41E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3308	8.3067	12.228	15.157	0
5.76E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3307	8.3067	12.228	15.152	1
5.12E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3307	8.3067	12.228	15.146	1
4.48E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3306	8.3067	12.228	15.138	1
3.84E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3305	8.3067	12.227	15.127	1
3.2E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3304	8.3067	12.227	15.112	1
2.56E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3302	8.3067	12.227	15.09	1
1.92E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3299	8.3067	12.226	15.054	1
1.28E+10	6.41E+10	6.41E+10	4.3292	8.3067	12.226	14.983	1
6.41E+09	6.41E+10	6.41E+10	4.3275	8.3067	12.223	14.781	1
5.76E+10	5.76E+10	6.41E+10	4.3307	8.3067	12.228	15.147	2
5.12E+10	5.12E+10	6.41E+10	4.3306	8.3067	12.227	15.135	2
4.48E+10	4.48E+10	6.41E+10	4.3304	8.3067	12.227	15.119	2
3.84E+10	3.84E+10	6.41E+10	4.3302	8.3067	12.227	15.098	2
3.2E+10	3.2E+10	6.41E+10	4.33	8.3067	12.227	15.068	2
2.56E+10	2.56E+10	6.41E+10	4.3296	8.3067	12.226	15.025	2
1.92E+10	1.92E+10	6.41E+10	4.329	8.3067	12.225	14.955	2
1.28E+10	1.28E+10	6.41E+10	4.3277	8.3067	12.223	14.82	2
6.41E+09	6.41E+09	6.41E+10	4.3238	8.3067	12.218	14.459	2
6.41E+10	6.41E+10	5.76E+10	4.3304	8.2721	12.227	15.154	3
6.41E+10	6.41E+10	5.12E+10	4.3301	8.2369	12.227	15.151	3
6.41E+10	6.41E+10	4.48E+10	4.3297	8.2011	12.227	15.149	3
6.41E+10	6.41E+10	3.84E+10	4.3293	8.1646	12.226	15.132	3
6.41E+10	6.41E+10	3.2E+10	4.3289	8.1272	12.226	15.076	3
6.41E+10	6.41E+10	2.56E+10	4.3284	8.089	12.225	15.008	3
6.41E+10	6.41E+10	1.92E+10	4.3279	8.0497	12.225	14.925	3
6.41E+10	6.41E+10	1.28E+10	4.3272	8.0086	12.224	14.819	3
6.41E+10	6.41E+10	6.41E+09	4.326	7.9627	12.223	14.677	3

TABELLA 5: INPUT PER TRAINING DEL DT

Fornito l'input al codice MATLAB®, si è iniziata la sessione di training esplorativa, necessaria a scegliere quale tra i modelli di apprendimento automatico già presenti nel software sarà quello che meglio si adatta al campione a disposizione. Di questi, è stato eletto l'*Optimizable Support Vector Machine (OSVM)*, il quale ha presentato un'adattabilità all'insieme di dati caratterizzata da *accuracy* del 96.4%. SVM è un algoritmo di *machine learning* ampiamente utilizzato per scopi di classificazione e regressione e ottiene la massima efficacia nei problemi di tipo binario. La semplicità del caso in esame ha comunque permesso l'applicazione di questo modello anche al presente problema multiclasse, come dimostra la precisione dell'adattamento sopra citata. In breve, l'algoritmo SVM si fonda sull'idea di trovare uno o più iperpiani, a seconda dei casi, che dividano al meglio un set di dati in due o più classi, e dove i *support vectors* altro non sono che i punti dati più prossimi all'iperpiano.

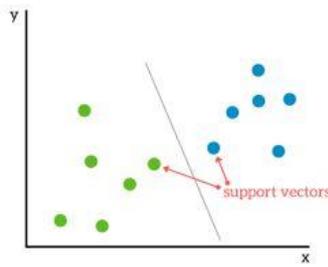


FIGURA 36: SUPPORT VECTORS MACHINE

L'algoritmo fa leva proprio su questi punti e sulla loro posizione all'interno della popolazione per trovare l'iperpiano linearmente separabile che divide i valori di una classe dagli altri. Il limite di decisione (sinonimo di iperpiano) che SVM cerca è però quello ottimo, ovvero quello che presenta il margine più alto nei confronti dei vettori di supporto, e che pertanto distingue al meglio le classi:

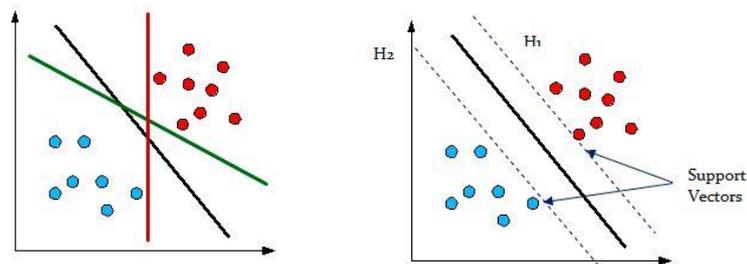


FIGURA 37: MECCANISMO DI SCELTA DELL'IPERPIANO

Completati il *training* e la scelta del modello, va tenuto conto di un particolare: a questo punto del procedimento, non si hanno in mano dei veri e propri risultati prodotti dall'allenamento del DT, e pertanto non è ancora possibile effettuare una validazione su questa fase del processo. Si è quindi in possesso di un *digital twin* all'interno del quale è stata integrata una funzione MATLAB contenente l'algoritmo istruito che sfrutta il *support vector machine* per risolvere le classificazioni. Il passaggio successivo consiste allora nell'introdurre deliberatamente il danno sulla struttura reale, operare una nuova campagna di

misurazione ed utilizzare infine questi nuovi dati di accelerazione per testare le nuove abilità del *digital twin*.

4.4 Configurazioni danneggiate

La trattazione, a questo punto, è arrivata al nocciolo dell'analisi: il *digital twin* è stato abbozzato e costruito, grazie alla prima porzione della campagna di monitoraggio è stato poi calibrato, perfezionando la sua rappresentazione dell'entità fisica e del comportamento di questa, e rendendolo adatto alla conduzione di simulazioni su degli scenari di danno pianificati a priori. Con i risultati di tali proiezioni, il DT è stato infine istruito a riconoscere gli stessi *pattern* nel caso in cui questi si ripresentino nella realtà. Questa abilità è comunque ancora da testare e validare, ed il presente step costituisce pertanto il passaggio cruciale all'interno del *framework* logico dello studio. Esso è stato organizzato nel seguente modo, ripercorrendo di fatto l'impostazione già vista nel lavoro svolto finora:

- introduzione del danno sulla struttura reale;
- monitoraggio e misurazione delle accelerazioni ottenute in risposta alla somministrazione del *gaussian white noise*;
- identificazione delle caratteristiche modali del telaio tramite algoritmo SSI;
- fase di *model updating* del *digital twin*, il quale deve evolversi assieme alla struttura;
- riconoscimento dei pattern di frequenza ed etichettatura del danno da parte del *digital twin*.

4.4.1 Introduzione del danno

Per permettere al *digital twin* di espletare le proprie funzioni di manutenzione predittiva è necessaria quindi la presenza di un

danneggiamento strutturale sul telaio fisico oggetto dello studio; date le circostanze, questo danno deve essere introdotto in modo controllato e pianificato. Le scelte in questo ambito vanno quindi prese sulla base di alcune considerazioni precedentemente elaborate, in special modo durante la fase di simulazione sul DT:

- *tipologia del danno*: il danneggiamento da introdurre deve corrispondere ad uno degli scenari prospettati e simulati, e deve essere tale da permettere al *digital twin* di performarne l'identificazione a tutti i livelli che il presente studio si è prefissato come obiettivo;
- *modalità di introduzione del danno*: esso deve essere somministrato in modo tale da permettere al modello virtuale di riconoscerne a priori la presenza e l'evoluzione.

La scelta è allora ricaduta sullo scenario numero 2, ovvero si è deciso di introdurre il danno su entrambi i diagonali controventanti del piano di base. In questo modo il *digital twin* viene messo nella posizione di poter inizialmente identificarne l'esistenza, localizzarne successivamente la posizione, distinguendolo dal danno sul pilastro, per poi quantificarlo, indicandone la presenza su due elementi anziché uno soltanto, ed infine darne una stima d'intensità tramite il valore di modulo elastico aggiornato. In aggiunta a ciò, si è scelto di predisporre l'immissione del danno sul telaio in modo graduale: così facendo si emula un ammaloramento progressivo dell'elemento interessato e si ricalcano, almeno in parte, le dinamiche prodotte durante la simulazione. Il risultato della programmazione del danneggiamento è riassunto nella seguente tabella:

E [%]				
mese	settimana 1	settimana 2	settimana 3	settimana 4
gennaio	100	100	100	100
febbraio	100	100	100	100
marzo	100	100	80	75
aprile	70	65	65	65
maggio	60	55	50	50
giugno	50	50	50	50
luglio	50	50	50	50
agosto	50	50	45	40
settembre	35	30	25	20
ottobre	15	10	10	10
novembre	10	10	10	10
dicembre	10	10	10	10

TABELLA 6: PIANIFICAZIONE DEL DANNO DA INTRODURRE NELLA STRUTTURA REALE

Si noti che le prime dieci settimane sono in realtà quelle già sfruttate in precedenza a scopo di calibrazione del modello, ma che è utile riportare in quanto facilitano l'apprezzamento della riduzione del modulo elastico una volta che saranno ultimate tutte le identificazioni. Come anticipato, il procedimento a questo punto è analogo a quello condotto durante la calibrazione del *digital twin*: per ogni settimana si effettua una misurazione di durata pari a sette minuti, nella quale sono catturati i valori di accelerazione che si manifestano negli stessi punti osservati durante il primo monitoraggio del telaio; queste osservazioni vengono date, ogni settimana in pasto all'algoritmo SSI, che ne estrapola l'identificazione modale con la restituzione delle frequenze e degli autovettori. Successivamente, queste informazioni vengono utilizzate per aggiornare il *digital twin* tramite *model updating*, permettendogli di evolversi assieme alla struttura reale.

Capitolo 5 – Analisi dei Risultati

La campagna di monitoraggio si conclude alla quarantottesima settimana dell'anno, fornendo un pari numero di registrazioni di accelerazione. Questi dati, dal momento che un danneggiamento è stato introdotto in modo progressivo in uno o più elementi, contengono l'informazione che descrive l'evoluzione della struttura dovuta alla presenza di questo danno. L'estrapolazione di tale conoscenza avviene ancora una volta per mezzo dell'identificazione perpetrata dall'algoritmo SSI, il quale ricostruisce le caratteristiche modali del telaio rivelandone le mutazioni in funzione della presenza e della crescita del difetto. Si tenga inoltre in considerazione che il modulo elastico caratteristico della struttura e il suo cambiamento nel corso delle osservazioni sono, in una reale prestazione di *structural health monitoring*, da ritenersi ignoti dall'utenza; deve essere infatti il *digital twin* a dare indicazioni in questo ambito, in quanto esso evolve assieme all'entità fisica grazie all'aggiornamento continuo dei propri parametri. Ad ogni identificazione, il *model updating* suggerisce un nuovo valore di modulo elastico da assegnare al modello virtuale, in modo che questo rispecchi le frequenze e le forme dei modi individuati, e pertanto questa conoscenza è da considerarsi come prodotta dal *digital twin*. Naturalmente il caso in esame ha in realtà un profilo diverso rispetto a quest'ultima osservazione, in quanto si sta cercando di validare e testare il *digital twin* e quindi il danno è introdotto artificialmente nel telaio reale, ma è sempre bene mettere in prospettiva lo studio e i suoi scopi e tenere conto di alcuni particolari.

Fatta questa introduzione generale al capitolo, i risultati ottenuti dall'analisi sono presentati secondo la seguente organizzazione:

-
- *pattern sperimentali*: vengono tracciati e discussi gli andamenti sperimentali delle frequenze, ricavati dalle identificazioni della struttura sulle quarantotto settimane;
 - *identificazione del danno*: i *pattern* sperimentali vengono sovrapposti a quelli numerici, e viene tracciato e discusso l'output dell'algoritmo di *classification learning*.

5.1 Pattern di frequenza sperimentali

Il tracciamento del profilo delle frequenze sperimentali consiste nel riportare sul piano $t - f$, con le settimane in ascisse e i valori di frequenza sulle ordinate. In questo modo è possibile apprezzare l'effetto progressivo dell'evoluzione del danno sull'andamento cronologico della riduzione delle frequenze di vibrazione, nonché iniziare ad intravedere le similarità tra i profili sperimentali e quelli numerici. I dati necessari alla costruzione di tali grafici sono quindi quelli in uscita da SSI: le misure di accelerazione vengono somministrate all'algoritmo, il quale le tratta in maniera completamente analoga a quanto visto nella prima fase di monitoraggio e calibrazione del modello virtuale. Il pretrattamento del segnale nel dominio del tempo e della frequenza, le scelte in merito all'ordine variabile del sistema, la costruzione del diagramma di stabilizzazione e la conduzione dell'analisi di *clustering* sono tutte operazioni che seguono impostazioni identiche a quelle implementate per le prime dieci settimane di osservazione in cui la struttura si trovava in configurazione non danneggiata. Si riportano i risultati in tabella:

mese	settimana	$f_{1,e}$ [Hz]	$f_{2,e}$ [Hz]	$f_{3,e}$ [Hz]	$f_{4,e}$ [Hz]
gennaio	1	4.3092	8.3016	12.0606	15.0359
	2	4.3087	8.3050	12.0610	15.0345
	3	4.3094	8.3068	12.0630	15.0362
	4	4.3091	8.3050	12.0597	15.0346
febbraio	5	4.3079	8.3041	12.0606	15.0355
	6	4.3089	8.3058	12.0603	15.0368
	7	4.3090	8.3331	12.0604	15.0361
	8	4.3093	8.3308	12.0601	15.0341
marzo	9	4.3087	8.3331	12.0589	15.0361
	10	4.3092	8.3042	12.0621	15.0357
	11	4.3079	8.3089	12.0599	14.9891
	12	4.3088	8.3245	12.0600	14.9682
aprile	13	4.3081	8.2952	12.0598	14.9682
	14	4.3086	8.2946	12.0596	14.9943
	15	4.3082	8.3352	11.9996	14.9943
	16	4.3086	8.3160	12.0592	14.9941
maggio	17	4.3083	8.3353	12.0593	14.9841
	18	4.3078	8.3361	12.0595	14.9328
	19	4.3079	8.3410	12.0587	14.9423
	20	4.3079	8.3219	12.0592	14.9531
giugno	21	4.3081	8.3239	12.0590	14.9497
	22	4.3071	8.3056	12.0582	14.9441
	23	4.3068	8.3349	12.0595	14.9565
	24	4.3077	8.3250	12.0593	14.9520
luglio	25	4.3074	8.3239	12.0592	14.9387

	26	4.3079	8.3066	12.0592	14.9441
	27	4.3081	8.3363	12.0590	14.9544
	28	4.3077	8.3239	12.0582	14.9440
agosto	29	4.3076	8.3366	12.0595	14.9441
	30	4.3079	8.3349	12.0589	14.9387
	31	4.3076	8.3265	12.0583	14.8672
	32	4.3070	8.3354	12.0581	14.8441
settembre	33	4.3072	8.3302	12.0583	14.8688
	34	4.3055	8.2980	12.0553	14.7883
	35	4.3064	8.3187	12.0516	14.7769
	36	4.3031	8.3194	12.0483	14.7104
ottobre	37	4.3020	8.3280	12.0462	14.5550
	38	4.3019	8.3230	12.0449	14.4022
	39	4.3019	8.3230	12.0460	14.3982
	40	4.3010	8.3386	12.0463	14.3895
novembre	41	4.3018	8.3354	12.0449	14.3954
	42	4.3019	8.3230	12.0460	14.4028
	43	4.3018	8.3157	12.0447	14.4035
	44	4.3016	8.3265	12.0456	14.3975
dicembre	45	4.3014	8.3092	12.0444	14.3818
	46	4.3020	8.3230	12.0445	14.3891
	47	4.3020	8.2947	12.0444	14.4007
	48	4.3021	8.3057	12.0445	14.3891

TABELLA 7: PATTERN DI FREQUENZA SPERIMENTALI

Ciò che salta subito all'occhio è una certa dispersione nei valori di frequenza uscenti da SSI, specialmente negli intervalli di tempo in cui

il danneggiamento rimane costante. Questa caratteristica non è anomala, è anzi tipica, ed è da attribuirsi alla tipologia del sistema di eccitazione scelto e somministrato al telaio. Il rumore bianco Gaussiano, infatti, costituisce una sollecitazione dagli attributi stocastici, ed è pertanto sempre diverso e indipendente se implementato correttamente; tale aleatorietà viene quindi rispecchiata dai risultati dell'identificazione. In ogni caso, essa non preclude l'apprezzamento della riduzione dei valori di frequenza nel momento in cui il danno compare sulla struttura: tra le settimane undicesima e diciottesima e tra le settimane trentesima e trentottesima tutti i modi, ad esclusione del secondo, presentano una perdita in termini di *Hertz* sulla propria frequenza di vibrazione. Questo tratto distintivo si evidenzia ancor di più quando i risultati sopra riportati vengono graficati, come anticipato, in funzione del numero di identificazioni:

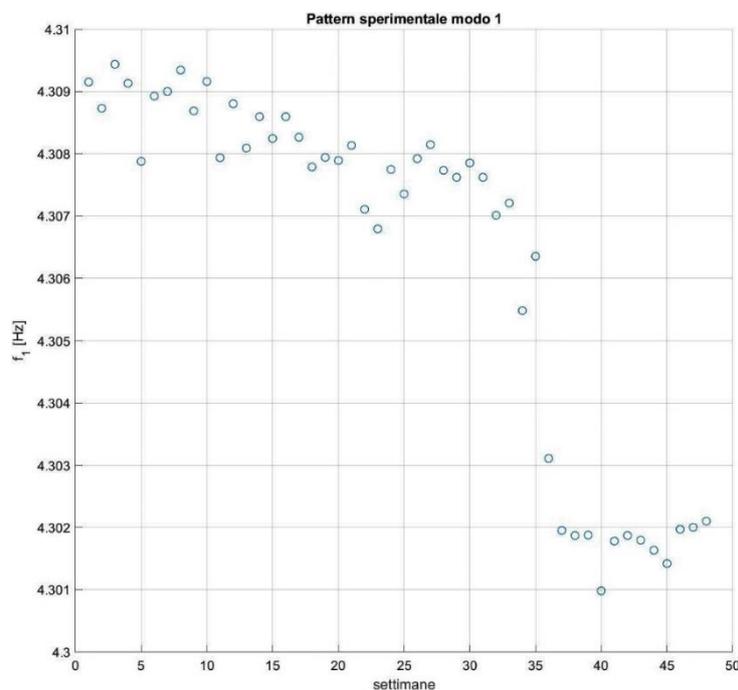


FIGURA 38: SCATTER PLOT PATTERN SPERIMENTALE MODO 1

I grafici confermano quanto suggerito dai risultati numerici: la dispersione è apprezzabile su tutto il campione, ed è particolarmente

facile da notare nei periodi in cui il modulo elastico è stato lasciato invariato, vale a dire le prime dieci, le ultime dieci e le settimane centrali, dalla diciotto alla trenta, quando il danno è rimasto stabile al 50% del modulo E . Il primo modo del telaio mostra un calo molto contenuto, pari a circa un centesimo di Hz , mentre il secondo, come ci si aspettava, dal momento che lo scenario di danno prescelto è il n.2, non subisce alcuna riduzione, rimanendo costante attorno agli $8.32 Hz$ circa.

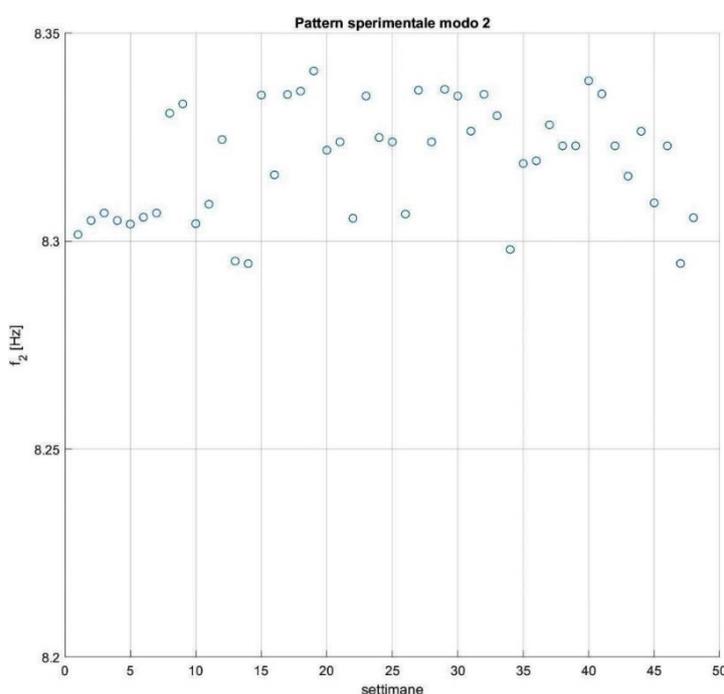


FIGURA 39: SCATTER PLOT PATTERN SPERIMENTALE MODO 2

L'imperturbabilità del secondo modo è un risultato in realtà molto importante e funzionale all'analisi che si sta conducendo, in quanto costituisce un tratto che aiuta ad escludere lo scenario di danno n.3 in fase di classificazione. Il pattern sperimentale tracciato dalle frequenze del terzo modo ripropone quanto notato nel primo grafico, ma con una riduzione ancora minore rispetto alla prima vibrazione, pari circa a $0.002 Hz$. Infine, la vibrazione torsionale, ossia il modo numero quattro, è quella che presenta il calo maggiore rispetto alle altre: tra la decima settimana e la trentottesima, l'abbassamento che si registra è

pari a 0.6 Hz, un ordine di grandezza in più rispetto al primo modo e due rispetto al terzo.

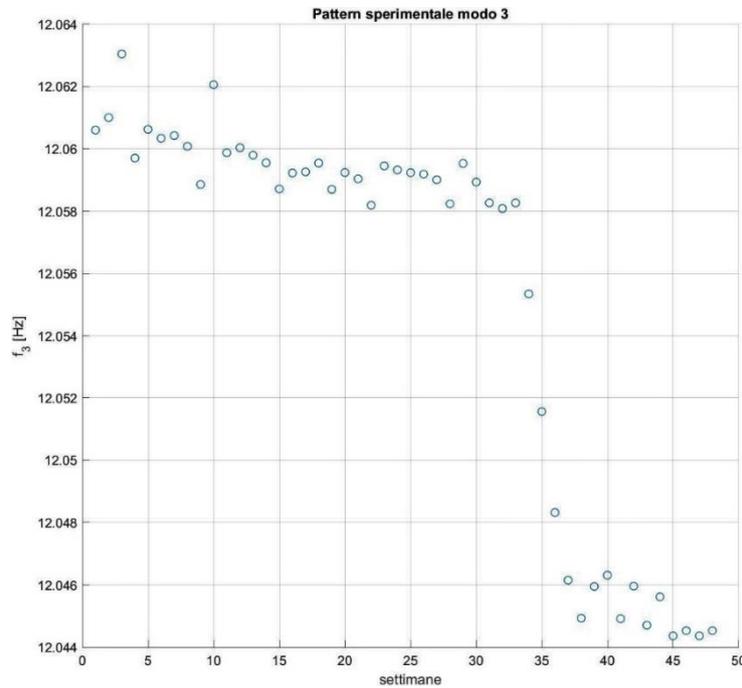


FIGURA 40: SCATTER PLOT PATTERN SPERIMENTALE MODO 3

Un carattere che si nota essere ricorrente in tutti i grafici, o meglio, in quelli che riportano una riduzione di frequenza, è l'intensità di questa variazione ai lati dei *plateau*: tra le settimane decima e diciannovesima, il danno introdotto cresce del 30%, a cui corrisponde un calo del valore di frequenza molto piccolo, quasi impercettibile, come per il caso del terzo modo. Tra le settimane trentesima e trentottesima, invece, a fronte di un incremento del danno di entità simile, ovvero pari al 40%, il *drop* in frequenza assume un valore circa 5 – 6 volte più grande. Questa caratteristica ricorda gli andamenti dei *pattern* numerici, e pertanto è da considerarsi come un altro indicatore preliminare della bontà delle simulazioni svolte dal *digital twin*. I valori in uscita da SSI finora analizzati sono stati poi normalizzati in funzione della rispettiva frequenza massima, così da ottenere una loro espressione in termini percentuali. Si è notato, infatti, che le identificazioni di SSI riportano sempre valori leggermente più bassi

rispetto a quanto estrapolato durante la simulazione degli scenari, e questo passaggio ha quindi permesso un confronto dei *pattern* sperimentali con quelli numerici all'interno dello stesso piano $E - f$.

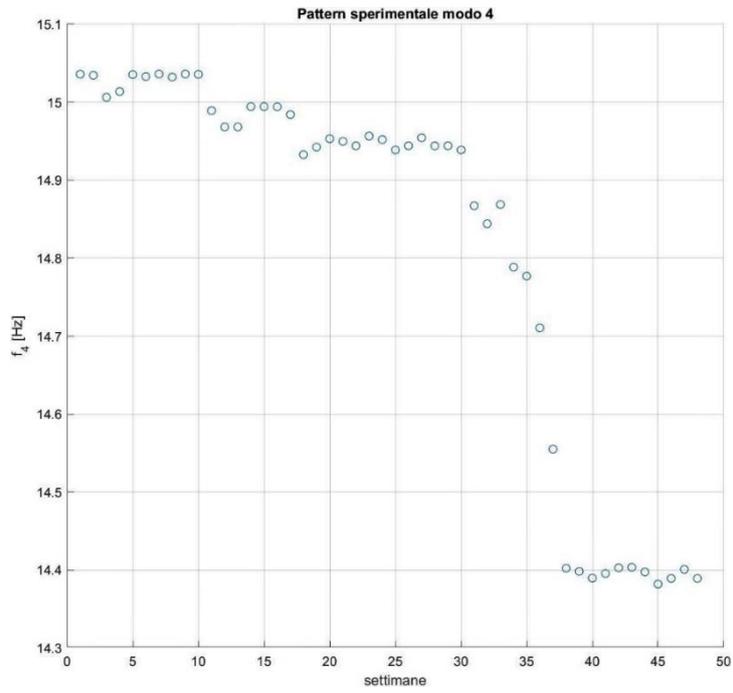


FIGURA 41: SCATTER PLOT PATTERN SPERIMENTALE MODO 4

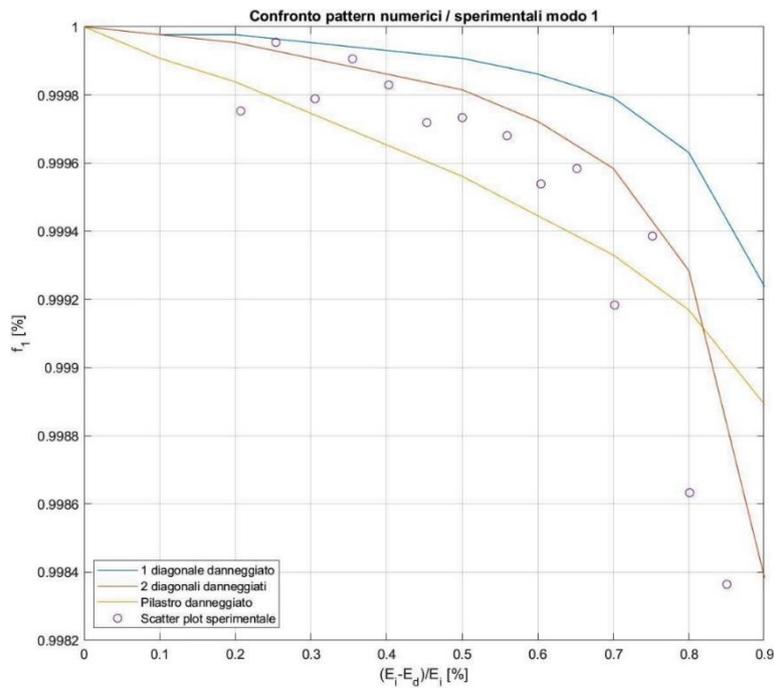


FIGURA 42: CONFRONTO PATTERN SPERIMENTALE / NUMERICO MODO 1

Sono state riportate, in questo caso, solo le frequenze corrispondenti ai periodi in cui il danno evolve, escludendo le settimane che mostrano un valore di modulo elastico stazionario. Il risultato mostra in modo abbastanza evidente, a seconda dei casi, l'adagiarsi degli *scatter plot* registrati sul telaio reale alle curve numeriche estratte nella simulazione dello scenario n.2.

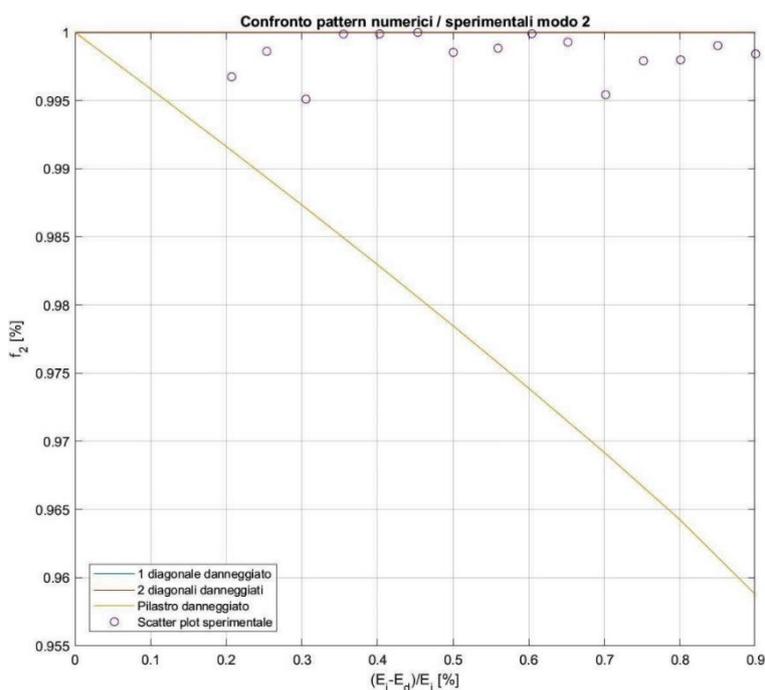


FIGURA 43: CONFRONTO PATTERN SPERIMENTALE / NUMERICO MODO 2

Il modo uno risulta essere il più problematico in questi termini: la nuvola di punti tende infatti a posizionarsi nello spazio compreso fra i *pattern* prodotti dal danno in entrambi i diagonali sopra, e dal danno nel pilastro sotto. Dei primi quattro valori di frequenza riportati, due sono chiaramente più vicini allo scenario n.3, il che fa presagire una possibile difficoltà per l'algoritmo di classificazione nel distinguere i due casi, almeno in questo frangente. Discorso diverso va fatto per il secondo modo: come si è notato in precedenza, i punti del *pattern* sperimentale mostrano una frequenza costante lungo tutto lo sviluppo dell'analisi, e, una volta confrontati con le curve numeriche, la separazione dallo scenario n.3 è evidente.

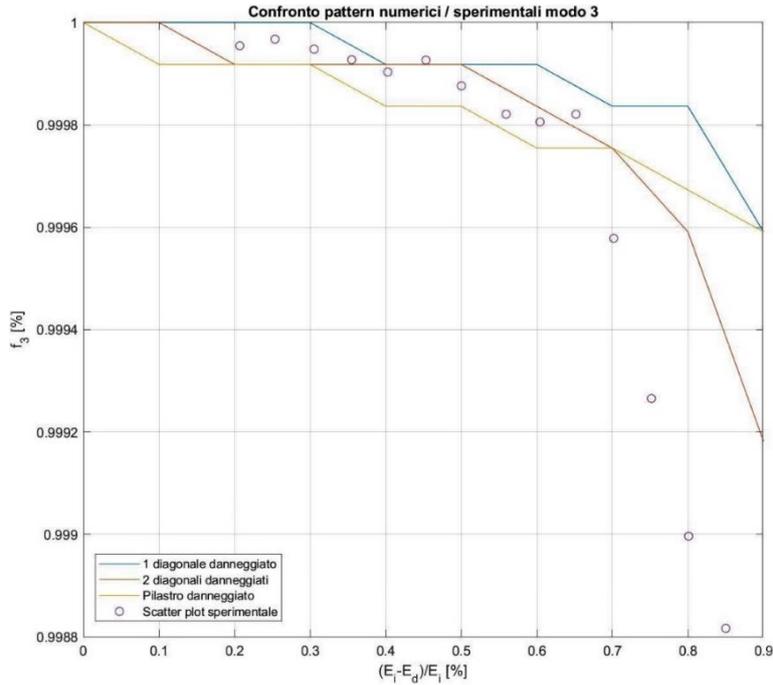


FIGURA 44: CONFRONTO PATTERN SPERIMENTALE / NUMERICO MODO 3

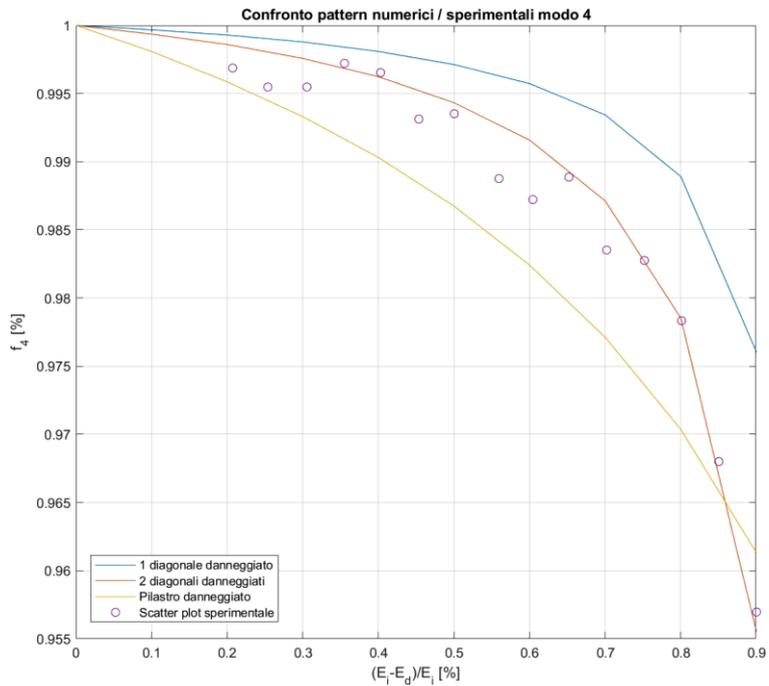


FIGURA 45: CONFRONTO PATTERN SPERIMENTALE / NUMERICO MODO 4

Gli *scatter plot* dei modi 3 e 4 mostrano invece un adattamento migliore alle rispettive curve numeriche rispetto a quanto accade per la prima vibrazione: i punti del terzo modo sono compresi fra i *pattern* degli scenari n.1 e n.3, e quindi ricalcano con discreta precisione quello che è l'andamento prospettato dallo scenario n.2, almeno fino ad una

percentuale di danno pari al 70%, dove calano più velocemente. Il quarto modo è infine quello che meglio ripercorre la rispettiva curva numerica: dopo una lieve dispersione nella prima metà, i valori sperimentali vanno via via adagiandosi sul *pattern* prospettato, fino a ricalcarlo in corrispondenza delle ultime 4 – 6 misurazioni.

5.2 Classificazione del danno

Le informazioni ottenute finora, vale a dire l'intera l'evoluzione dei profili delle frequenze in relazione al progredire del danneggiamento nella struttura, sono state utilizzate per aggiornare continuamente i parametri del *digital twin*, in modo tale da consentire a questo di evolvere parallelamente all'entità fisica in esame. Tale carattere, proprio della tipologia di modello virtuale in questione, è indispensabile per la riuscita dell'identificazione del danno ai livelli che si erano prefissati all'inizio dello studio. Come anticipato, infatti, è il modulo elastico assunto dal *digital twin* alla fine del processo di *monitoring* che darà informazioni riguardo l'intensità del danno presente sulla struttura.

La concretizzazione di questo aspetto è, come illustrato in precedenza, affidata alla pratica di *model updating*. Se però in fase di calibrazione del *digital twin* il parametro da ottimizzare era uno soltanto, ora è stato necessario impostarne ben quattro per l'aggiornamento:

- modulo elastico da ottimizzare per il primo elemento diagonale;
- modulo elastico da ottimizzare per il secondo elemento diagonale;
- modulo elastico da aggiornare per il pilastro di base;
- modulo elastico da aggiornare per il resto della struttura.

Solo in questo modo si può essere certi della validità del risultato che sarà restituito dall'algoritmo di classificazione. Nel caso si fossero

aggiornati solamente i parametri dei due diagonali, o se ne fosse assegnato uno soltanto per entrambi, il modello SVM si sarebbe ritrovato indirizzato verso la soluzione voluta, inficiandone pertanto l'incontestabilità. I risultati del *model updating* vengono riportati in breve nella seguente tabella:

settimana	J_i	$E_{tot,opt}$ [kN/m ²]	$E_{1,opt}$ [kN/m ²]	$E_{2,opt}$ [kN/m ²]	$E_{3,opt}$ [kN/m ²]
10	2.979328	6.316E+10	6.316E+10	6.316E+10	6.316E+10
11	2.985407	6.403E+10	5.042E+10	5.079E+10	6.403E+10
12	2.98368	6.400E+10	4.781E+10	4.752E+10	6.400E+10
13	2.9834	6.401E+10	4.449E+10	4.351E+10	6.400E+10
14	2.983034	6.405E+10	4.027E+10	4.131E+10	6.400E+10
15	2.982055	6.401E+10	4.129E+10	4.128E+10	6.401E+10
16	2.981077	6.400E+10	4.102E+10	4.098E+10	6.405E+10
17	2.980922	6.403E+10	3.810E+10	3.825E+10	6.403E+10
18	2.980318	6.402E+10	3.489E+10	3.501E+10	6.401E+10
30	2.975371	6.400E+10	3.201E+10	3.180E+10	6.400E+10
31	2.975088	6.402E+10	2.822E+10	2.808E+10	6.402E+10
32	2.97494	6.403E+10	2.520E+10	2.535E+10	6.402E+10
33	2.974578	6.396E+10	2.218E+10	2.230E+10	6.399E+10
34	2.973238	6.403E+10	1.910E+10	1.897E+10	6.403E+10
35	2.973105	6.403E+10	1.586E+10	1.590E+10	6.402E+10
36	2.972631	6.401E+10	1.275E+10	1.253E+10	6.397E+10
37	2.972138	6.402E+10	9.600E+09	9.600E+09	6.402E+10
38	2.970283	6.405E+10	6.395E+09	6.388E+09	6.400E+10

TABELLA 8: RISULTATI MODEL UPDATING PER LE CONFIGURAZIONI DANNEGGIATE

Il processo di ottimizzazione ha dato risultati ottimi nell'ottica dello studio e degli obiettivi che sono stati prefissati, e ciò si asserisce notando le variazioni subite dai quattro parametri aggiornati durante il processo. I moduli $E_{tot, opt}$ ed $E_{3, opt}$, corrispondenti alla struttura globale e al pilastro rispettivamente, non subiscono di fatto mutamenti, e si aggirano sempre attorno ai $6.405E10 \text{ kN/m}^2$, ovvero l'entità del modulo elastico che è stata assegnata al *digital twin* alla fine della calibrazione iniziale. I rimanenti $E_{1, opt}$, $E_{2, opt}$ invece, ossia quelli riferiti ai due elementi diagonali, si vedono soggetti ad un aggiornamento che ne comporta una riduzione complessiva da $5.08E10 \text{ kN/m}^2$ a $6.4E09 \text{ kN/m}^2$. Dividendo queste grandezze per il modulo elastico proprio della configurazione non danneggiata, si ottiene l'informazione riguardo l'intensità raggiunta dal danno alla fine del monitoraggio:

settimana	danno assegnato [%]	danno identificato [%]
11	0.2	0.207026
12	0.25	0.253552
13	0.3	0.305386
14	0.35	0.355035
17	0.4	0.40281
18	0.45	0.453396
19	0.5	0.500234
31	0.55	0.560407
32	0.6	0.604215
33	0.65	0.651835
34	0.7	0.701795
35	0.75	0.751756
36	0.8	0.800937
37	0.85	0.850117
38	0.9	0.900062

TABELLA 9: CONFRONTO PERCENTUALI DI DANNO RILEVATE DAL DT

Come si evince dalla tabella sopra riportata, il percorso di danneggiamento introdotto nella struttura reale viene replicato dal *digital twin* in modo fedele. Le percentuali di danno vengono sempre centrate con un errore medio pari a circa lo 0.3%.

A questo punto si sono introdotti tali risultati nel meccanismo di *classification learning* allenato durante la fase di *training* del DT, fornendo ad esso una matrice dalle fattezze simili a quella somministratagli per la sua istruzione. La differenza, questa volta, è l'assenza della colonna di *training* contenente i valori di output richiesti all'algoritmo, che dovrà produrli invece sulla base di quanto "imparato" e in relazione alla nuova mole di informazioni.

6453000000	6453000000	6453000000	4.309153276	8.301629	12.06061	15.03592
6454000000	6454000000	6454000000	4.308732637	8.305008	12.06101	15.03446
6307000000	6307000000	6307000000	4.309437869	8.306821	12.06305	15.03619
6390000000	6390000000	6390000000	4.309133326	8.305008	12.05971	15.03456
6488000000	6488000000	6488000000	4.307878661	8.304132	12.06063	15.03547
6369000000	6369000000	6369000000	4.308928968	8.305789	12.06034	15.03679
6405000000	6405000000	6405000000	4.309001128	8.333053	12.06043	15.03611
6406000000	6406000000	6406000000	4.309344643	8.330794	12.06008	15.03412
6404000000	6404000000	6404000000	4.308689901	8.333053	12.05886	15.03611
6316000000	6316000000	6316000000	4.309162011	8.304246	12.06206	15.03571
5042000000	5079000000	6403000000	4.307937869	8.308932	12.05988	14.98913
4781000000	4752000000	6400000000	4.308805188	8.324491	12.06004	14.96819
4449000000	4351000000	6400000000	4.308091726	8.295248	12.0598	14.96819
4027000000	4131000000	6400000000	4.308597464	8.294648	12.05955	14.99434
4129000000	4128000000	6401000000	4.30824827	8.335166	11.99955	14.99434
4102000000	4098000000	6405000000	4.308597464	8.31598	12.05923	14.99413
3810000000	3825000000	6403000000	4.308266912	8.335315	12.05926	14.98409
3489000000	3501000000	6401000000	4.307789464	8.336099	12.05954	14.93275
3201000000	3187000000	6401000000	4.307943581	8.340955	12.0587	14.94234
3140000000	3153000000	6400000000	4.307894056	8.321904	12.05924	14.95311
3158000000	3200000000	6403000000	4.308135749	8.323896	12.05904	14.94974
3177000000	3140000000	6403000000	4.307110324	8.305552	12.05819	14.94411
3071000000	3098000000	6400000000	4.306796564	8.334936	12.05945	14.95646
3180000000	3203000000	6400000000	4.307748896	8.324955	12.05933	14.95198
3157000000	3200000000	6402000000	4.307357494	8.323896	12.05924	14.9387
3200000000	3190000000	6405000000	4.307923395	8.306552	12.05919	14.94411
3083000000	3139000000	6398000000	4.308149304	8.336345	12.05901	14.95437
3193000000	3201000000	6403000000	4.30773575	8.323896	12.05824	14.94401
3200000000	3197000000	6400000000	4.307623946	8.336552	12.05953	14.94411
3201000000	3180000000	6400000000	4.307853808	8.334936	12.05894	14.9387
2822000000	2808000000	6402000000	4.30762395	8.326494	12.05827	14.86718
2520000000	2535000000	6402000000	4.307014447	8.335353	12.05808	14.84407
2218000000	2230000000	6399000000	4.307209279	8.330212	12.05827	14.86885
1910000000	1897000000	6403000000	4.305482892	8.298026	12.05534	14.78835
1586000000	1590000000	6402000000	4.30635555	8.318712	12.05157	14.77687
1275000000	1253000000	6397000000	4.303109996	8.319375	12.04832	14.71042
9600000000	9600000000	6402000000	4.301952402	8.328202	12.04615	14.55498
6395000000	6388000000	6400000000	4.301872293	8.322956	12.04493	14.40219
6400000000	6379000000	6401000000	4.301878782	8.322964	12.04595	14.39819
6398000000	6339000000	6403000000	4.300985454	8.338612	12.04631	14.38955
6388000000	6384000000	6399000000	4.301783495	8.335445	12.04491	14.39542
6395000000	6400000000	6401000000	4.301872281	8.322956	12.04596	14.40277
6403000000	6377000000	6403000000	4.301796896	8.315679	12.04471	14.40347
6401000000	6400000000	6404000000	4.301635869	8.326466	12.04562	14.39746
6386000000	6400000000	6400000000	4.301422457	8.309236	12.04436	14.38183
6401000000	6401000000	6405000000	4.301972293	8.322956	12.04453	14.3891
6401000000	6401000000	6404000000	4.302004296	8.294669	12.04436	14.40071
6400000000	6401000000	6402000000	4.302102919	8.305679	12.04453	14.38915

TABELLA 10: INPUT FINALE PER L'ALGORITMO DI CLASSIFICAZIONE

La risposta del *digital twin* è di nuovo di ottima fattura, come si evince dal grafico di output riportato di seguito. Il meccanismo di classificazione integrato rileva l'assenza di danno fino alla decima identificazione, con la presenza però di due falsi negativi che suggeriscono uno scenario n.1 alla quinta settimana e n.3 alla nona.

Dall'undicesima in poi il *digital twin* rende noto all'utenza il manifestarsi di un difetto da ricondurre invece allo scenario n.2, che persiste fino all'ultimo dato di osservazione, con la presenza di un solo altro falso negativo alla settimana numero quindici, dove l'algoritmo dà in output una classificazione del danno di tipo 3.

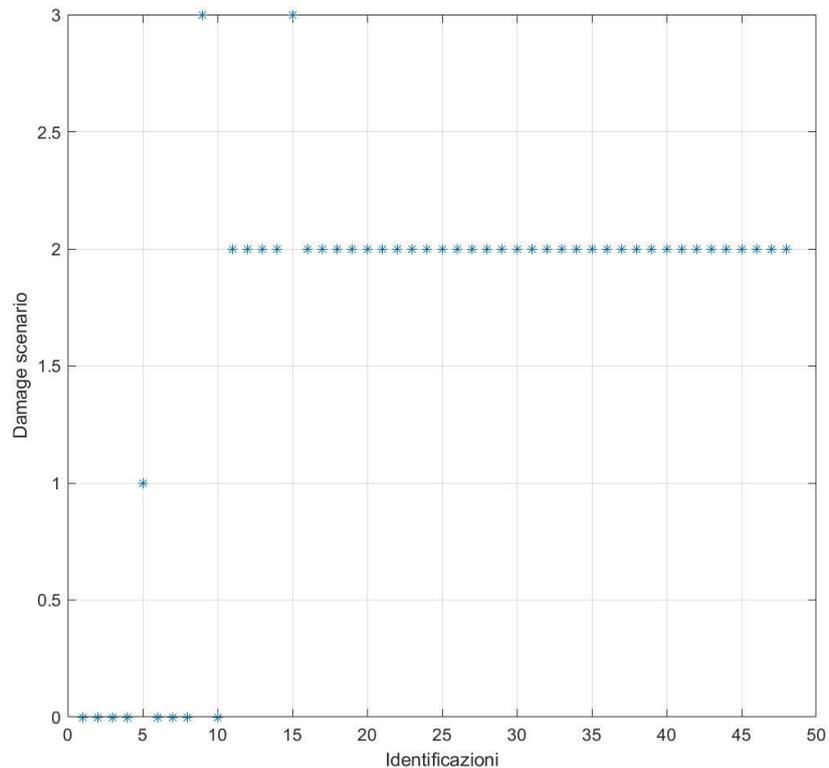


FIGURA 46: OUTPUT FINALE DEL DT

5.2.1 Analisi di *precision & recall* per la classificazione del danno

Del procedimento di classificazione si è condotta un'analisi di *precision & recall*, tecnica di postprocessing dei risultati volta a valutare la capacità dell'algoritmo utilizzato nel recuperare tutti i valori d'interesse e a capire quanti tra quelli recuperati lo siano effettivamente. In altre parole, si cerca di dare una misura immediata che descriva la presenza dei falsi positivi e dei falsi negativi sulla base dell'output del modello SVM.

$$P = \frac{t_p}{t_p + f_p} = \frac{45}{45 + 3} = 93.7\%$$

$$R = \frac{t_p}{t_p + f_n} = \frac{45}{45} = 1$$

L'analisi ha quindi dato ottimi risultati, centrando l'obiettivo prefissato e recuperando tutti i valori d'interesse, dei quali ben il 93.7% risulta essere attinente.

L'alta precisione della procedura non deve però cogliere impreparati: va infatti tenuto conto del fatto che questa è fortemente condizionata dalla natura numerica che in realtà caratterizza la struttura considerata "reale".

Capitolo 6 – Conclusioni

Lo scopo dell'analisi costruita in questa sede è quello di accedere ad un certo tipo di conoscenza e con un prefissato livello di profondità per mezzo dell'applicazione di una tecnologia che nell'ambito d'interesse sta vedendo solo in tempi molto recenti un impiego sistematico a livello professionale. Il *digital twin*, un concetto che è nato e ha trovato principale sviluppo nell'ambito meccanico e della gestione della produzione, è stato infatti utilizzato nel presente lavoro di tesi all'interno di un procedimento di *structural health monitoring* applicato al campo dell'ingegneria civile: l'obiettivo era quello di individuare la presenza di un danneggiamento strutturale.

L'identificazione del danno è un tipo di conoscenza che richiede uno studio dall'impostazione stratificata, in quanto essa stessa risulta essere articolata su più livelli, come postulato da Worden e già citato all'inizio del lavoro finora presentato. Tutte le analisi di questo tipo iniziano necessariamente con un'osservazione dello stato di fatto e delle condizioni della struttura in oggetto: visive o supportate da strumenti, le misurazioni servono ad estrapolare informazioni sulle prestazioni del sistema. Il primo livello, ovvero l'identificazione della presenza di un difetto, può essere raggiunto immediatamente, notando per esempio una discesa nelle frequenze di vibrazione della struttura. La localizzazione di questo difetto costituisce un secondo livello di conoscenza di più difficile accesso: può aiutare l'impiego di sensori a fibre ottiche, i quali riescono a mostrare letture diverse a seconda degli spot in cui vengono posizionati, suggerendo quindi l'allocazione del danno. Se si pensa ad un caso reale però, già in questa fase è necessario l'utilizzo di un modello numerico, in quanto è impossibile disporre i sensori in ogni punto della struttura. Ammesso di aver raggiunto il livello due, la quantificazione del danneggiamento può essere performata solamente a scatola chiusa, per esempio

assegnando al danno un'entità pari in percentuale al calo della prima frequenza di vibrazione. Man mano che ci si addentra nella conoscenza del danno strutturale, si può capire come questa venga inficiata se non addirittura preclusa a causa dell'imprecisione e delle assunzioni che si devono fare.

L'applicazione del *digital twin* è stata condotta proprio in quest'ottica, pensando di sfruttare una tecnologia che permettesse di arginare tali approssimazioni grazie alla sua peculiare struttura e alle sue abilità; in particolare, si è cercato di implementare il DT fornendogli i meccanismi e gli *tool* necessari ad un riconoscimento del danno fino alla stima della sua intensità. La risposta modello virtuale si è rivelata centrata in questo senso:

- *Presenza del danno*: all'undicesima settimana, ovvero quella in cui si è iniziato a danneggiare la struttura reale, il *digital twin* ha riconosciuto la presenza del difetto, classificandolo come appartenente allo scenario n.2. Tale classificazione si è poi estesa fino alla fine dell'analisi;
- *Localizzazione del danno*: insita nell'indicatore "2" fornito dal classificatore, vi è l'informazione che indica all'utente la presenza del danno sugli elementi diagonali di controvento, e quindi ne attesta la localizzazione. Se l'indicatore in output fosse stato "3", infatti, la relativa informazione avrebbe suggerito il danneggiamento di uno dei pilastri di base;
- *Quantificazione del danno*: in ultimo, l'indicatore "2" fornisce informazioni riguardo alla quantificazione del difetto, indicandone la presenza su due diagonali anziché su una soltanto, come avrebbe mostrato invece l'output "1";
- *Intensità del danno*: se infine si esamina la storia di *model updating* che ha caratterizzato il *digital twin*, è possibile apprezzare l'evoluzione del danneggiamento nella struttura

reale. Inoltre, interrogando il modello virtuale sul modulo di elasticità ad una data settimana di osservazioni, esso fornisce la vera e propria entità del danno in termini di percentuale sul parametro E .

Identificazione, localizzazione, quantificazione e stima dell'intensità sono quindi i livelli e i caratteri della conoscenza del danno che si sono raggiunti in quest'analisi e l'applicazione del DT al processo di SHM si può dire quindi completata con successo.

6.1 Sviluppi

L'impiego del *digital twin* condotto e illustrato nel presente lavoro di tesi ha dato risultati soddisfacenti nell'ottica degli obiettivi che ci si era prefissati di raggiungere. Come chiusura di quest'analisi, è però opportuno sottolineare alcuni tratti propri della tecnologia applicata che sono stati trascurati in questa sede, al fine di proporre delle prospettive funzionali a futuri approfondimenti e ampliamenti del lavoro svolto.

In primo luogo, è di grande interesse esplorare la possibilità di dare al *digital twin* della struttura in esame il carattere di modello probabilistico, ovvero condurre un'analisi analoga alla presente ma esprimendo tutte le grandezze in uscita dal DT in termini di distribuzione di probabilità. Secondariamente, si può lavorare sulla profondità dell'identificazione del danno strutturale. Una volta stimata l'intensità del difetto, lo step successivo consiste nel definirne la tipologia: modellando ad esempio la presenza di una frattura, oppure di una cerniera plastica, ed istruendo in questo senso l'algoritmo di classificazione, il livello tre potrebbe essere definitivamente completato. Infine, va prospettata una diagnosi della vita utile rimanente alla struttura in esame: per far ciò è necessario conoscere e modellare la causa scatenante del danno. Una volta

identificata la presenza del difetto, il *digital twin* dovrà essere in grado di simularne l'avanzamento in funzione del danno e ricavarne una proiezione di vita utile.

BIBLIOGRAFIA

- [1] B. R. Barricelli, E. Casiraghi, D. Fogli, *“A Survey on Digital Twin: Definitions, Characteristics, Applications, and Design Implications”*, 2019. DOI: 10.1109/ACCESS.2017, IEEE Access.
- [2] J. Yang, W. Zhang, Y. Liu, *“Subcycle fatigue crack growth mechanism investigation for aluminum alloys and steel,”* in AIAA 2013, 2013. DOI: 10.2514/6.2013-1499.
- [3] B. Bielefeldt, J. Hochhalter, D. Hartl, *“Computationally efficient analysis of sma sensory particles embedded in complex aerostructures using a substructure approach,”* in ASME 2015, 2015. DOI: 10.1115/SMASIS2015-8975.
- [4] A. J. Zakrajsek, S. Mall, *“The development and use of a digital twin model for tire touchdown health monitoring,”* in AIAA 2017, 2017.
- [5] S. Scharff, *“From Digital Twin to Improved Patient Experience”*, siemens Healthineers, 2010, <https://www.siemens-healthineers.com/news/mso-digital-twin-mater.html>.
- [6] D. J. Wagg, P. Gardner, R. J. Barthorpe, K. Worden, *“On Key Technologies for Realising Digital Twins for Structural Dynamics Applications”*, pp 267-271, 2020.
- [7] T. Gabpr, L. Belzner, M. Kiermeier, M. T. Beck, A. Neitz, *“A simulation-based architecture for smart cyber-physical systems,”* in ICAC 2016, pp. 374-379, 2016. DOI: 10.1109/ICAC.2016.29.
- [8] S. Boschert, R. Rosen, *“Digital Twin - The Simulation Aspect,”* Mechatronic Futures, pp. 59-74, 2016.

[9] S. Boschert, C. Heinrich, R. Rosen, “*Next generation digital twin,*” in TMCE 2018, pp. 209-218, 2018.

[10] M. Grieves, “*Digital twin: Manufacturing excellence through virtual factory replication,*” Digital Twin White Paper, 2015. https://research.fit.edu/media/site-specific/researchfitedu/camid/documents/1411.0_Digital_Twin_White_Paper_Dr_Grieves.pdf.

[11] J. Fitzgerald, P. G. Larsen, K. Pierce, “*Multi-modelling and Co-simulation in the Engineering of Cyber-Physical Systems: Towards the Digital Twin*”, pp. 40-55, 2019.

[12] D. Kiritsis, “*Closed-loop plm for intelligent products in the era of the internet of things,*” Computer Aided Design, vol.43, pp 479-501, 2011.

[13] A. Gandomi, M. Haider, “*Beyond the hype: Big data concepts, methods, and analytics,*” International journal of information management, vol. 35, no. 2, pp. 137-144, 2015.

[14] D. Abbott, “*Applied predictive analytics: Principles and techniques for the professional data analyst,*” John Wiley & Sons, 2014.

[15] P. Selvaraj, P. Marudappa, “*A journey from big data towards prescriptive analytics,*” ARPN Journal of Engineering and Applied Sciences, vol. 11, pp. 11465-11474, 2016.

[16] D. J. Wagg, K. Worden, R. J. Barthorpe, P. Gardner, “*Digital twins: State-of-the-art and future directions for modelling and simulations in engineering dynamics applications*”, 2020. DOI: 10.1115/1.4046739.

[17] A. I. Khan, Noor-ul-Qayyum, U. A. Khan, “*An Improved Model for Component Based Software Development*”.

-
- [18] K. K. Lau, F. M. Taweel, C. M. Tran, *“The W Model for Component-based Software Development”*, 2011.
- [19] E. J. Tuegel, A. R. Ingraffea, T. G. Eason, S. M. Spottswood, *“Reengineering Aircraft Structural Life Prediction Using a Digital Twin”*, 2011.
- [20] K. Zhou, T. Liu, L. Zhou, *“Industry 4.0: Towards Future Industrial Opportunities and Challenges”*, 2015.
- [21] W. Jin, Z. Liu, Z. Shi, C. Jin, J. Lee, *“CPS-enabled worry-free Industrial Applications”*, IEEE, 2017.
- [22] F. Wortmann, K. Flüchter, *“Internet of Things – Technology and Value Added”*, 2015. DOI: 10.1007/s12599-015-0383-3.
- [23] D. Adhikari, A. Prakash, S. Yadav, S. Kaloni, *“Structural Health Monitoring”*.
- [24] C. R. Farrar, K. Worden, *“An introduction to structural health monitoring”*, 2007. DOI: 10.1098/rsta.2006.1928.
- [25] E. Ozer, M. Q. Feng, *“Structural health monitoring”*, 2020. DOI: 10.1016/B978-0-12-819946-6.00013-8.
- [26] C. R. Farrar, T. A. Duffey, S. W. Doebling, D. A. Nix, *“A Statistical Pattern Recognition Paradigm for Vibration-Based Structural Health Monitoring”*, 1999.
- [27] J. Kullaa, *“Functions of a Structural Health Monitoring System”*, 2008
- [28] E. Aktan, S. Chase, D. Inman, D. Pines, *“Monitoring and Managing the Health of Infrastructure Systems”*, Proceedings of the 2001 SPIE Conference on Health Monitoring of Highway Transportation Infrastructure, March 2001.

[29] C. Rainieri, G. Fabbrocino, *“Operational Modal Analysis of Civil Engineering Structures: an Introduction and Guide for Applications”*, Springer Science & Business Media New York, 2014.

[30] E. Lenticchia, G. Miraglia, R. Ceravolo, *“Exploring the Perspective of Satellite Interferometric Data for the Seismic Structural Health Monitoring of Existing Buildings and Architectural Heritage”*, Proceedings of the 10th International Conference on Structural Health Monitoring of Intelligent Infrastructure, July 2021.

[31] K. Worden, G. Manson, *“Structural Health Monitoring using Pattern Recognition”*, New trends in Vibration-based SHM, 2008.