

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DEL MOLISE

DIPARTIMENTO DI BIOSCIENZE E TERRITORIO



Dottorato di ricerca in Biologia e Scienze Applicate

Ciclo XXXV Curriculum Scienze Applicate

Tesi di Dottorato

Tecnologie innovative per il monitoraggio di strutture storiche e la gestione degli interventi

SSD ICAR/09

Tutor:

Prof. Giovanni Fabbrocino

Co-Tutor:

Prof. Carlo Rainieri

Coordinatore:

Prof. Filippo Santucci De Magistris

Candidato:

Cieri Luigi

Matricola: 167291

ANNO ACCADEMICO 2022-2023

Ringraziamenti

Il primo ringraziamento va ai miei genitori, mio fratello Remigio, le mie nonne, e soprattutto a chi non c'è più, grazie per avermi sempre sostenuto.

Un ringraziamento va al Prof. Giovanni Fabbrocino e al Prof. Carlo Rainieri che mi hanno accompagnato e supportato/sopportato durante questo percorso.

E poi... ci sono gli altri, ce ne sono veramente tanti ma in particolare vorrei ringraziare quelli che mi sono stati più vicini di tutti.

Anche questa è andata

Grazie

Valutatori:

- *Prof.ssa Marianovella Leone* – Professore Associato (ICAR/09). Ingegneria dell’Innovazione, Università degli Studi del Salento.
- *Prof.ssa Adriana Marra*- RTD/A (ICAR/17). Ingegneria Civile, Edile - Architettura, Ambientale, Università degli Studi dell'Aquila.

Commissione:

- *Prof. Antonio Sandoli* – RTD/B (ICAR/09). Dipartimento di Bioscienze e Territorio, Università degli Studi del Molise.
- *Prof. Nicola Caterino* – Professore Associato (ICAR/09). Dipartimento di Ingegneria, Università degli Studi Parthenope di Napoli.
- *Prof.ssa Assunta Pelliccio* – Professore Associato (ICAR/17). Dipartimento di Lettere e Filosofia, Università degli Studi di Cassino e del Lazio Meridionale

INDICE

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE.....	1
1.1 <i>Obiettivi della ricerca</i>	4
1.2 <i>Organizzazione della tesi</i>	8
CAPITOLO 2 - PROGETTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO DINAMICO PER UN CAMPANILE STORICO IN MURATURA	10
2.1 <i>Introduzione</i>	10
2.2 <i>Introduzione al monitoraggio strutturale</i>	12
2.3 <i>Letteratura indici di danno</i>	16
2.4 <i>Metodi globali e metodi locali</i>	26
2.5 <i>Model driven vs data driven</i>	29
2.6 <i>Monitoraggio basato sulle vibrazioni</i>	33
2.6.1 <i>Indici di danno: variazioni di frequenza.</i>	39
2.6.2 <i>Indici di danno: variazioni delle forme modali</i>	41
2.6.3 <i>Indici di danno: variazioni della curvatura e dell'energia di deformazione modali</i>	43
2.7 <i>Variabili ambientali</i>	45
2.8 <i>Progetto sistema di monitoraggio</i>	49
2.8.1 <i>Campanile di Civitacampomarano</i>	49
2.8.2 <i>Installazione sistema di monitoraggio</i>	51

2.8.3 Prova dinamica.....	53
2.8.3 Monitoraggio in continuo	59
CAPITOLO 3 - IL BIM COME STRUMENTO DI SUPPORTO ALLA GESTIONE DEGLI INTERVENTI	72
3.1 Introduzione	72
3.2 Interoperabilità	73
3.2.1 Standard IFC.....	76
3.2.2 Letteratura.....	78
3.3 Test interoperabilità.....	82
3.3.1 IFC2x3 Coordination View 2.0 (CV 2.0).....	87
3.3.2 IFC4 Design Transfer View (DTV).....	92
3.3.3 Elementi bidimensionali.....	95
3.4 Digital twin	97
3.4.1 Letteratura.....	100
3.4.2 Procedura	103
3.5 Torre delle Nazioni	107
3.6 Discussioni e conclusioni	112
CAPITOLO 4 - SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA SPERIMENTALE DI ANALISI DEL PROCESSO DI MATURAZIONE DI MATERIALI CEMENTIZI	115
4.1 Introduzione	115

4.2 Metodi non distruttivi.....	116
4.3 EMM - ARM in letteratura	121
4.4 Teoria del metodo EMM - ARM.....	127
4.5 Preidratazione.....	129
4.6 Setup di prova.....	131
4.7 Materiali	135
4.8 Risultati	136
4.8.1 Effetto dello stoccaggio	137
4.8.2 Effetto della temperatura.....	140
CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI	143
BIBLIOGRAFIA	148

CAPITOLO 1 INTRODUZIONE

I gravi danni e collassi strutturali verificatisi nel mondo negli ultimi anni in conseguenza di eventi estremi, quali i terremoti, evidenziano la necessità di valutare e migliorare la sicurezza delle strutture esistenti e di adottare efficaci misure di protezione per le costruzioni maggiormente esposte al rischio al fine di ridurre le perdite economiche e di vite umane.

Gli eventi naturali e il degrado dei materiali sono le principali cause che provocano la perdita del patrimonio edilizio storico in tutto il mondo.

La tutela e la conservazione del patrimonio culturale e architettonico rappresentano problemi fondamentali a livello mondiale e richiedono un approccio multidisciplinare. Inoltre, la crescente domanda di sicurezza richiede un'evoluzione del processo di conoscenza e valutazione delle strutture del patrimonio sotto carichi naturali ed eccezionali. Le più recenti norme e normative italiane hanno delineato un percorso coerente per la progettazione degli interventi strutturali tenendo conto delle caratteristiche peculiari delle strutture storiche.

Gli interventi sulle strutture storiche devono essere mirati a individuare materiali e tecniche costruttive che possano aumentare la sicurezza e preservare i valori degli edifici storici.

Tra le tante analisi che è possibile effettuare sul patrimonio costruito, l'analisi storica (Marra et al. 2022) è fondamentale nel processo di conoscenza per la valutazione delle prestazioni strutturali del patrimonio edilizio che supporta la redazione di piani di indagine in situ accurati ed

efficaci, indispensabili per la realizzazione di modelli e analisi strutturali. Attraverso l'analisi storica è possibile effettuare una corretta individuazione di tutte le fasi di trasformazione della struttura e l'individuazione di discontinuità e disomogeneità costruttive relative a danni causati da danni naturali e antropici. È uno strumento che fornisce un valido supporto per la conservazione degli edifici perché aiuta a colmare le incertezze relative a geometria, proprietà dei materiali, tecniche di costruzione e danni causati da eventi passati. Tuttavia, essa non è, in generale, sufficiente, sebbene una scelta ragionata degli interventi non possa prescindere da una conoscenza approfondita e un confronto sistematico tra le regole costruttive degli edifici antichi e le nuove tecnologie costruttive. L'elevata vulnerabilità del patrimonio infrastrutturale, edilizio e monumentale italiano e l'esigenza di un maggior controllo della sicurezza di strutture e infrastrutture strategiche ubicate in zone potenzialmente sensibili, ha spinto la ricerca ad approfondire gli studi per la messa a punto di tecniche sempre più avanzate per il monitoraggio, alle diverse scale, da quella del singolo edificio o infrastruttura a quella territoriale. Un primo passo per raggiungere questo obiettivo è quello di aumentare la conoscenza del comportamento strutturale delle costruzioni storiche e monumentali mediante sistemi di monitoraggio in continuo in grado di fornire informazioni sulle performance e lo stato di salute delle strutture e, quindi, di incrementarne le condizioni di sicurezza.

La conservazione delle strutture storiche e dei monumenti appartenenti al patrimonio culturale rappresenta una sfida significativa dal punto di vista tecnico. Gli interventi di manutenzione e/o ripristino devono essere basati su sistematiche ricerche e ispezioni, controlli, indagini sperimentali e programmi di monitoraggio, al fine di individuare eventuali difetti o fenomeni di degrado e mitigarne gli effetti attraverso opportuni interventi. L'evoluzione delle procedure di analisi, i progressi nelle conoscenze tecniche e nelle tecnologie dell'informazione e della comunicazione hanno fornito nuovi strumenti nuovi per l'analisi quantitativa delle strutture del patrimonio storico. (Barontini et al., 2017)

Le tecniche di monitoraggio basate sulle vibrazioni possono quindi giocare un ruolo rilevante nel campo della conservazione dei beni culturali anche grazie alla loro scarsa invasività (Barontini et al, 2017). Questo obiettivo può essere raggiunto grazie ad un approccio obiettivo che si basa sulle effettive condizioni della struttura e non su una manutenzione programmata.

L'utilizzo di tecniche di retrofitting per gli edifici storici in muratura devono essere attentamente valutate non solo per aspetti riguardanti le prestazioni strutturali, ma anche per rispettare i valori insiti nel tessuto storico e la sostenibilità ambientale.

La verifica dell'efficacia degli interventi di rafforzamento è una tematica primaria che può essere affrontata mediante tecniche avanzate di monitoraggio.

Le prove dinamiche rappresentano una risorsa per la conoscenza del comportamento di elementi in muratura, poiché gli interventi di rinforzo modificano la risposta dinamica degli elementi rinforzati e dell'intera struttura. Le tecniche OMA rappresentano un valido strumento per caratterizzare la risposta dinamica e forniscono i parametri di riferimento per la valutazione, la validazione e l'aggiornamento di modelli agli elementi finiti.

L'identificazione dinamica della struttura rappresenta un modo indiretto per affrontare aspetti che non possono essere rilevati sperimentalmente; infatti, il monitoraggio in continuo delle proprietà dinamiche può essere utilizzato per il rilevamento di fenomeni di danneggiamento o degrado. L'introduzione e l'evoluzione di nuove tecnologie combinate a tecniche di monitoraggio, OMA e model updating ha aperto la strada allo sviluppo di nuovi strumenti integrati per la gestione e manutenzione delle strutture in maniera innovativa, e hanno visto il candidato impegnato nelle attività di ricerca di seguito descritte e svolte nell'ambito di un progetto PRIN finalizzato allo studio di tecniche di intervento e di monitoraggio specifiche per strutture storiche e/o monumentali in muratura.

1.1 Obiettivi della ricerca

Le attività di ricerca sono state svolte nell'ambito del progetto SURMOUNT (Innovative Systems for the UpgRade of MasOnry structUres and Non sTructural elements). Il progetto è incentrato sullo sviluppo di

tecniche innovative per il rinforzo di strutture in muratura volte a migliorare la sicurezza di elementi strutturali come muri e colonne ma anche dei collegamenti tra gli elementi in muratura (strutturali e non strutturali).

Gli obiettivi principali del progetto riguardano essenzialmente:

- il miglioramento della sicurezza strutturale degli edifici in muratura, con particolare attenzione nel caso di edifici storici alla tutela dei loro valori storici e architettonici mediante tecniche di rinforzo a bassa invasività;
- la validazione di materiali e tecniche di rinforzo in grado sia di soddisfare i requisiti di sicurezza che di ecosostenibilità;
- l'utilizzo di avanzate tecniche di monitoraggio per la valutazione dello stato di danneggiamento degli edifici esistenti in muratura e verifica dell'efficacia delle diverse tecniche di rinforzo.

Le attività del progetto sono suddivise in cinque task principali:

1. collegamento tra sistemi di rinforzo innovativi e supporti in muratura;
2. comportamento di pareti in muratura rinforzate con sistemi innovativi avanzati;
3. confinamento di elementi murari con sistemi innovativi avanzati;
4. miglioramento dei collegamenti negli edifici in muratura per elementi strutturali e non strutturali;

5. tecniche di verifica e monitoraggio per la valutazione dell'efficacia dei sistemi di rinforzo.

Per verificare l'efficacia di questi interventi di rinforzo si possono utilizzare tecniche avanzate di monitoraggio non distruttivo basate sulla variazione di rigidità degli elementi rinforzati. Queste tecniche di monitoraggio sono un utile strumento per verificare la variazione in termini di rigidità degli edifici esistenti in muratura causata da danni, per valutare le condizioni delle connessioni degli elementi murari strutturali e non strutturali e l'efficacia delle tecniche di rinforzo.

L'implementazione di adeguate strategie di monitoraggio strutturale richiede da un lato un'approfondita conoscenza delle caratteristiche e delle problematiche connesse alle catene di misura, dall'altro richiede strumenti avanzati per l'immagazzinamento e la gestione dei dati.

Il monitoraggio della salute strutturale (SHM) e l'identificazione dei danni stanno assumendo sempre più grande importanza nell'ingegneria civile, meccanica ed aerospaziale. Il monitoraggio strutturale per costruzioni civili, in particolare, sta diventando sempre più popolare in Europa e nel mondo, anche per le opportunità che esso offre nel campo della gestione e manutenzione delle costruzioni.

I principali vantaggi legati alla realizzazione di tali tecniche sono: la riduzione dei costi d'ispezione; la ricerca, con conseguente possibilità di comprendere meglio il comportamento strutturale sotto carichi dinamici;

la protezione sismica; l'osservazione in tempo reale della risposta strutturale e l'evoluzione di danni; la possibilità di sviluppare scenari post-terremoto e operazioni di salvataggio di supporto. Il sistema di monitoraggio è definito come l'uso in situ di tecniche di indagine non distruttive e di procedure di analisi della risposta strutturale al fine di identificare eventuali fenomeni di degrado o danno, stimare la gravità e valutarne le conseguenze sulla vita residua della struttura (Silkorsky, 1999). Anche se l'introduzione di sistemi di monitoraggio strutturale nell'ingegneria civile è abbastanza recente, la valutazione delle performance strutturali mediante prove e misure sperimentali è una pratica comune, basate su linee guida consolidate nel tempo.

Le attività della tesi sono ricadute all'interno del task numero 5 del progetto SURMOUNT e hanno riguardato principalmente tecniche di sperimentazione e monitoraggio per valutare l'efficacia dei sistemi di rinforzo focalizzando l'interesse su:

- ottimizzazione e applicazione di sistemi di monitoraggio della salute strutturale (SHM) basati sulle vibrazioni per strutture in muratura, nell'ottica dello sviluppo di Digital Twin;
- valutazione del tempo di presa strutturale dei leganti basata sul monitoraggio del modulo di Young della malta in fase di stagionatura e degli effetti della stagionatura sulle proprietà di rigidità.

In questo lavoro combinando tecniche di monitoraggio basate sulle vibrazioni e tecniche OMA è stato possibile studiare la risposta di una struttura storica in condizioni operative e sotto evento sismico. La stessa combinazione di tecniche è in grado di fornire informazioni sull'evoluzione della rigidità di materiali a base cementizia in early age che sono cruciali per le attività di retrofitting. Infine queste informazioni possono essere implementate in un modello BIM per realizzare un gemello digitale di una struttura per conoscere in tempo reale lo stato di salute di una struttura o tramite analisi di model updating ottenere parametri incerti della struttura.

1.2 Organizzazione della tesi

Il lavoro di tesi è organizzato nel seguente modo:

- nel **capitolo 2** verrà effettuata una panoramica sul monitoraggio strutturale e le potenzialità offerte come strumento per il rilievo del danno in strutture in muratura. Verranno discussi gli indici di danno presenti in letteratura. Verrà presentato un caso applicativo di sistema di monitoraggio per una struttura in muratura implementato presso il campanile di Civitacampomariano. Con riferimento a detta struttura è stato progettato e installato un sistema che acquisisce ed elabora in continuo la risposta alle vibrazioni ambientali. Verranno discussi i risultati ottenuti da una prova dinamica e quelli ottenuti dal monitoraggio in continuo in condizioni operative;

- nel **capitolo 3** si discuterà dell'utilizzo BIM come strumento di supporto per la gestione di edifici. Saranno riportati i risultati svolti per verificare l'interoperabilità tra i principali software BIM attraverso il formato aperto IFC e tra questi ed alcuni software di calcolo agli elementi finiti. Verranno quindi valutati i pro e contro dell'utilizzo di questo formato allo stato attuale. Combinando BIM, SHM e model updating verrà proposta una procedura automatizzata innovativa per la realizzazione di un gemello digitale di una struttura storica, in grado di gestire l'intero processo su un'unica piattaforma e se ne discuteranno i vantaggi.
- nel **capitolo 4** risolvendo un problema inverso e utilizzando tecniche di monitoraggio e OMA si valuterà l'evoluzione del modulo di Young relativo a paste cementizie realizzate con cementi pozzolanici e portland ordinario sin dalle primissime fasi di maturazione. Sono stati eseguiti anche alcuni test su una malta premiscelata bicomponente fibrorinforzata. L'estesa campagna di prove è stata eseguita per indagare gli effetti dello storage a differenti mesi sulla stagionatura su cementi pozzolanici e Portland ordinari; sono state effettuate anche delle prove per osservare l'effetto della temperatura.
- nel **capitolo 5** si delineano le principali conclusioni del presente lavoro, nonché gli scenari di ricerca futuri a partire dai risultati ottenuti.

CAPITOLO 2 – PROGETTAZIONE E IMPLEMENTAZIONE DI UN SISTEMA DI MONITORAGGIO DINAMICO PER UN CAMPANILE STORICO IN MURATURA

2.1 Introduzione

Gli edifici in muratura rappresentano una ampia porzione delle strutture esistenti, molte delle quali sono caratterizzate da un valore storico-artistico. Le torri in muratura sono edifici del patrimonio culturale molto comuni in Italia e spesso espongono elevata vulnerabilità alle azioni sismiche, come è stato drammaticamente testimoniato anche dai recenti eventi in Italia, come quelli che hanno colpito la regione Emilia nel 2012 e il Centro Italia nel 2016 (Gentile e Saisi, 2018).

La salvaguardia di tali strutture, anche alla luce dello stato di degrado che spesso le caratterizza, rappresenta dunque una problematica di ampio interesse.

Il monitoraggio strutturale risulta essere fondamentale per la conservazione e riduzione degli interventi per edifici e torri storici in muratura, ma consente anche di valutare l'effettiva entità del danno e di adottare un adeguato programma di manutenzione.

Questa tipologia costruttiva è a prevalente sviluppo verticale e costituisce una parte rilevante del patrimonio costruito in Italia. Il comportamento sismico è funzione di alcuni fattori: la snellezza, l'ammorsamento

delle pareti, l'eventuale presenza di strutture adiacenti che possono fornire un vincolo orizzontale, la presenza in sommità di elementi come celle campanarie e guglie che rappresentano elementi di vulnerabilità, vibrazioni indotte dalle campane o a problematiche in fondazione.

La snellezza è un parametro molto variabile; sono presenti torri molto tozze da considerare strutture tozze e campanili caratterizzati da grande snellezza da considerare come strutture monodimensionali con un comportamento a mensola.

L'ammorsamento delle pareti di una struttura muraria a prevalente sviluppo verticale è funzionale a garantire che questa si comporti come una mensola incastrata alla base, con una rigidità associata all'intera sezione muraria (conservazione della sezione piana). Le tecniche tradizionali per garantire un buon ammorsamento tra le pareti sono: la tessitura dei cantonali; la presenza di cerchiature e catene metalliche; la presenza di orizzontamenti ben collegati. Inoltre, deve essere valutato attentamente l'effetto dovuto alla presenza di spinte, nel caso di volte in muratura.

Molto frequente è il caso di torri o campanili posti a contatto con altre strutture di minore altezza. Alcuni casi tipici sono: campanili inglobati o accostati alla chiesa; torri inglobate in vario modo nel tessuto urbano; torri inglobate nella cinta muraria. La presenza di vincoli orizzontali a diverse quote può mutare profondamente il comportamento della struttura, da una parte limitandone l'effettiva snellezza, dall'altra costituendo

irrigidimenti localizzati e punti di possibile concentrazione degli sforzi. Queste situazioni sono spesso caratterizzate da notevole vulnerabilità. La cella campanaria può rappresentare un elemento di vulnerabilità, in quanto sono presenti ampie aperture con pilastri snelli che possono essere caratterizzati da rottura a taglio per scorrimento. Analoghe considerazioni valgono per gli elementi snelli e sveltanti sulla sommità delle torri; la loro vulnerabilità è in primo luogo dovuta al modesto carico verticale (associato al solo peso proprio), che garantisce un limitato effetto stabilizzante nei riguardi del ribaltamento. Ancora più critico è l'effetto di amplificazione del moto sismico che si verifica nelle parti più alte della costruzione; l'osservazione dei danni ha infatti mostrato come celle campanarie simili si siano comportate in modo molto diverso, a parità di azione sismica alla base del campanile, e ciò a causa della diversa interazione tra sisma, terreno di fondazione, struttura e sovrastruttura.

2.2 Introduzione al monitoraggio strutturale

Il sistema di monitoraggio ha come obiettivo quello di effettuare controlli periodici avvalendosi di nuove tecnologie nel rilevamento, strumentazione, comunicazione e modellazione in modo da integrare i dati ottenuti in un sistema intelligente. La differenza principale rispetto alle prove in situ risiede nella possibilità di effettuare controlli in remoto avvalendosi delle più recenti tecnologie nei campi del rilevamento, della strumentazione, dei sistemi di comunicazione e della modellazione, integrando le

diverse componenti in un sistema intelligente in grado di dare un giudizio sulle condizioni della struttura e fornire un supporto nella definizione degli interventi e delle strategie di manutenzione più appropriati. Il monitoraggio strutturale, quindi, è un settore di attività dal carattere marcatamente multidisciplinare, in cui diverse competenze (sismologia, ingegneria elettronica e civile, informatica) cooperano e si integrano al fine di sviluppare e aumentare le prestazioni e l'affidabilità di tali sistemi.

Al rapido sviluppo di sistemi hardware sempre più affidabili e caratterizzati da prestazioni sempre più elevate non corrisponde, tuttavia, uno sviluppo altrettanto veloce in materia di algoritmi di elaborazione dati, in particolare per quanto riguarda l'affidabilità delle stime relative alla tipologia ed estensione del danno e alla previsione della vita residua della struttura. Le informazioni ottenute da tali sistemi possono essere utili per la manutenzione o la valutazione della sicurezza strutturale di opere esistenti, per una rapida valutazione delle condizioni delle strutture danneggiate dopo il terremoto, per la stima della loro vita residua e per la manutenzione, la gestione o la riabilitazione di strutture storiche. Il monitoraggio strutturale è anche di ausilio a una più profonda comprensione del comportamento strutturale, migliorando così le tecniche e le metodologie di progettazione.

Al fine di ottenere tutti questi obiettivi, un efficace sistema di monitoraggio dovrebbe essere basato sull'integrazione di diversi tipi di sensori in

un'architettura modulare. Inoltre, i progressi nel campo dell'Information and Communication Technology assicurano la trasmissione dei dati anche in condizioni critiche. Vale la pena notare, tuttavia, che la disponibilità di procedure in grado di ridurre i volumi di dati da trattare è un aspetto chiave per l'affidabilità e la sostenibilità di tali sistemi, in particolare quando diverse costruzioni sono monitorate contemporaneamente e gestite da un unico sistema.

L'efficacia di un sistema di monitoraggio strutturale dipende dalla sua capacità di identificare lo stato di danno della struttura con adeguato livello di affidabilità. La scelta della tipologia di sensore dipende dalle esigenze del monitoraggio e dalla struttura. La selezione appropriata dei sensori (estensimetri, accelerometri, sensori FBG, sensori di temperatura, celle di carico, etc.) e la considerazione dei principali problemi relativi all'installazione ed al trattamento di dati (manutenzione sensori, volume di dati, tempo di elaborazione) rappresentano questioni chiave per lo sviluppo e l'implementazione di un efficiente sistema di monitoraggio. Elemento fondamentale per l'acquisizione dei dati è anche la disposizione dei sensori stessi all'interno della struttura monitorata. Il numero di sensori da posizionare per il monitoraggio della struttura è strettamente legato alla quantità e qualità delle informazioni ricercate.

Negli ultimi anni si è avuto, inoltre, un notevole impulso all'utilizzo di dati satellitari per il monitoraggio su scala territoriale: ad esempio, un'interessante applicazione è quella riguardante il rilievo degli abbassamenti

causati dalla subsidenza, grazie anche al numero crescente di satelliti e alla possibilità di acquisire i dati con un'elevata frequenza di campionamento. Ciò ha modificato lo scenario del monitoraggio satellitare evidenziando la possibilità di utilizzarlo anche nel settore dell'ingegneria civile (Gamba et al., 2007; Chini et al., 2009; Cuomo et al., 2018).

Un aspetto di assoluta novità è la possibilità di integrare misure satellitari con misure tradizionali in sito, siano esse di tipo topografico (rilevatori GPS per aumentare la precisione degli spostamenti misurati con la metodologia SAR), statico (inclinometri), o dinamico.

L'acquisizione di dati di qualità non può, tuttavia, prescindere da adeguate soluzioni per l'analisi dei dati. Negli ultimi decenni sono state sviluppate diverse procedure di analisi automatica dei dati: di particolare interesse sono quelle di identificazione dinamica, in quanto le proprietà dinamiche rappresentano per le strutture quelle caratteristiche intrinseche in grado di fornire un quadro oggettivo dello stato di conservazione delle stesse. Il danno, infatti, si traduce spesso in una variazione delle caratteristiche dinamiche della struttura, dalla cui analisi è possibile individuare e localizzare il danno. L'identificazione strutturale risulta, pertanto, vantaggiosa anche per il monitoraggio di strutture esistenti. Ad esempio, essa è stata utilizzata per studiare l'evoluzione del danno strutturale e la definizione di scenari di danno in real-time o quasi real-time per le aree colpite da eventi sismici (Peeters and De Roeck, 2000; Ponzo

et al., 2010; Ditommaso et al., 2012; Vincenzi et al., 2013; Limongelli, 2014; Rainieri et al., 2018).

Le fasi principali del monitoraggio strutturale sono:

- definizione degli obiettivi;
- acquisizione dati;
- elaborazione ed estrazione degli indici di danno;
- identificazione del danno.

2.3 Letteratura indici di danno

Atamturktur et al. (2011) si sono occupati di test di vibrazione per la rivelazione di danni presso Beverley Minster, una chiesa gotica nel Regno Unito. Non sono stati usate tecniche OMA ma l'eccitazione con un martello strumentato. Le ampiezze delle funzioni di risposta in frequenza mostrano una chiara differenza tra gli stati danneggiati e quelli non danneggiati della struttura. Nel dominio del tempo un modello auto regressivo è riuscito a identificare le differenze tra i due stati. Il monitoraggio delle vibrazioni può essere utilizzato come indicatore di danno ma deve essere depurato dalle variabili ambientali.

Radzieński et al. (2011) hanno proposto una tecnica di identificazione del danno basato su parametri modali ottenuti sperimentalmente combinando le modifiche a forme modali e alle frequenze naturali attraverso un danno indotto artificialmente.

Yao e Pakzad (2012) utilizzano algoritmi di riconoscimento di modelli statistici che utilizzano modelli auto regressivi come tecniche di rileva-

mento del danno. Per migliorare le prestazioni dei metodi statistici vengono proposte nuove tecniche di estrazione delle caratteristiche che utilizzano gli spettri del modello e l'autocorrelazione residua insieme a metodi di costruzione della soglia basati sul ricampionamento. Vengono proposti e studiati due algoritmi di rilevamento del danno basati su serie temporali che utilizzano il riconoscimento di modelli statistici. Uno di questi utilizza la statistica Ljung-Box della sequenza residua del modello auto regressivo come indice di danno e l'altro utilizza la distanza spettrale di Cosh dello spettro del modello auto regressivo stimato.

Lorenzoni et al. (2015) si sono occupati del monitoraggio dell'Arena di Verona e la Sala dei Battuti del Duomo di Conegliano. Sono stati installati accelerometri e sensori di spostamento. Sono stati utilizzati modelli autoregressivi per eliminare effetti ambientali per rilevare danneggiamenti e ridurre le incertezze della stima dei parametri modali. L'identificazione dei parametri modali è stata effettuata tramite cluster analysis avanzate.

Saisi et al. (2015) dopo l'evento sismico nel 2012, dato il cattivo stato di conservazione è stato installato un sistema di monitoraggio dinamico in continuo presso La Torre di Gabbia a Mantova per controllare l'evoluzione nel tempo del comportamento della struttura e l'effetto della temperatura sulle frequenze di risonanza. Per l'identificazione è stato utilizzato COV-SSI (Covariance Divren Stochastic Subspace Identification). È

stata osservata una correlazione positiva tra la temperatura e le frequenze di risonanza. A seguito dell'evento sismico c'è stato un drop nelle frequenze a causa del danneggiamento permanente. Un modo locale è caratterizzato da una correlazione negativa con la temperatura che secondo gli autori può essere spiegata da un aumento della spinta di copertura in legna aggiunta sulle pareti portanti.

In Ubertini et al. (2016) viene proposta una tecnica che combina il tracciamento automatico dei modi, MLR (Multiple Linear Regressions), PCA (Principal Component Analysis) e rilevamento novità per identificare automaticamente anomalie del comportamento strutturale successivamente a un evento sismico. È stata valutata la risposta della struttura al vento e anche alle campane plottando i valori massimi RMS (root mean square).

Barontini et al. (2017) introducono il Natural Computing, concentrandosi sulle sue applicazioni in SHM, vengono mostrati e discussi i possibili miglioramenti nella conservazione del patrimonio costruito, suggerendo un quadro generale per la valutazione della sicurezza e l'identificazione dei danni delle strutture esistenti.

Ubertini et al. (2017) utilizzano le frequenze come indicatori dello stato di salute delle strutture, facendo attenzione a rimuovere gli effetti ambientali. Le strutture storiche sono tipicamente strutture murarie massicce ed eterogenee caratterizzate da complesse variazioni delle proprietà dei materiali e caratterizzate da un processo di trasmissione del

calore differenziale. Un sistema di monitoraggio basato sulle vibrazioni è stato installato sul campanile di San Pietro a Perugia. Sono stati utilizzati modelli regressivi statistici lineari (MLR) ottenendo informazioni sulla posizione e numero minimo di sensori da installare. Il sistema è costituito da accelerometri, sensori di temperatura e umidità. Per l'identificazione automatica viene utilizzata la tecnica COV-SSI. I dati di temperatura superficiale interna ed esterna sono stati rilevati per la variabilità dei materiali e i differenti spessori. Anche in questo lavoro è stata trovata una correlazione positiva tra temperatura e frequenze tranne in modo dovuto al rilassamento dei tiranti indotto dalla temperatura. Con l'aumento delle temperature si è rilevato un abbassamento della frequenza del modo torsionale. A temperature al di sotto i 0°C si assiste all'aumento delle frequenze.

Cavalagli et al. (2017) presentano i risultati del monitoraggio di due anni della Torre di Gabbia a Mantova e il campanile di San Pietro a Perugia. Utilizzando tecniche OMA automatizzate è stato possibile evidenziare che entrambi le torri hanno accumulato lievi danni dopo eventi sismici. L'uso di pochi sensori e tecniche di rimozione degli effetti ambientali possono essere utilizzate come un valido strumento per l'identificazione del danno e quindi intervenire per evitare crolli totali o parziali. Scenari di danno realistici sono simulati con un modello agli elementi finiti e il

model updating. Le frequenze identificate e ripulite dai fattori ambientali possono essere utilizzate nel model updating per calibrare parametri incerti del modello.

Cabboi et al. (2017) hanno presentato una strategia per la valutazione del danno per le torri storiche in muratura studiando i dati del monitoraggio dinamico del campanile di San Vittore ad Arcisate. Tale procedura mira non solo a rilevare l'insorgenza del danno ma anche alla sua localizzazione. Vengono applicati modelli di regressione lineare (PCA) per eliminare le fluttuazioni sulle frequenze dovute dalla temperatura.

Chalouhi et al. (2017) hanno presentato un metodo che utilizza l'apprendimento automatico per rilevare e localizzare i danni in un ponte storico in muratura. Vengono raccolti dati di temperatura e accelerazione in diversi punti della struttura in condizioni operative di traffico ferroviario. Attraverso l'uso di reti neurali e processi gaussiani viene classificato lo stato di salute attraverso un confronto tra la risposta prevista e quella misurata.

Li et al. (2017) propongono l'utilizzo dell'inferenza bayesiana per estrarre i parametri modali da grandi set di dati provenienti da sistemi SHM. È stato applicato un algoritmo basato sulla densità spettrale bayesiana per l'identificazione dinamica di un ponte.

Kourtis et al. (2017) propongono un metodo che si basa sulla variazione relativa dello smorzamento modale eseguendo dei test su tavola vibrante

su un edificio in muratura a scala reale utilizzando sia tecniche OMA che EMA.

Masciotta et al. (2017) hanno utilizzato un algoritmo basato sulla densità spettrale di potenza per rilevare e localizzare il danno in una ciminiera storica in muratura. Il lavoro mostra che gli autoparametri ottenuti dalla scomposizione della matrice dello spettro di potenza di risposta sono sensibili ai cambiamenti del sistema causati dall'evoluzione, risultando quindi ottimi indicatori per valutare sia la presenza che la posizione del danno. I risultati vengono confrontati con quelli di altri metodi di identificazione del danno.

In Kita et al. (2018) sono stati indagati gli effetti della temperatura sulla risposta statica e dinamica del Palazzo dei Consoli a Gubbio. Rispetto alle torri in muratura si osserva un andamento decrescente delle frequenze con l'aumentare delle temperature. Data la porosità degli elementi in muratura, questi sono soggetti anche all'influenza della pioggia e dell'umidità relativa. Nelle torri e strutture in muratura più rigide, come chiese e/o cattedrali, sono state verificate correlazioni positive tra temperatura e frequenze. Nelle strutture in calcestruzzo si rileva un andamento invece negativo. È stato effettuato un monitoraggio a lungo termine sia statico (sensori di temperature e spostamento) che dinamico. Per meglio comprendere il comportamento è stato realizzato un modello FEM (Finite Element Method) della struttura e sono state effettuate ana-

lisi di model updating utilizzando le proprietà dei materiali come parametri incerti e calibrati per minimizzare la differenza tra le frequenze numeriche e quelle sperimentali. Sono state utilizzate tecniche MLR per la rimozione degli effetti di temperatura.

Mesquita et al. (2018) si sono occupati del monitoraggio della chiesa di Foz Côa (in Portogallo), una struttura storica danneggiata. Sono stati monitorati per un anno gli spostamenti di elementi strutturali e studiata l'influenza della temperatura e umidità relativa. Sono stati installati sensori di temperatura, umidità, inclinometri e fessurimetri. Rimuovendo gli effetti ambientali, hanno dimostrato come lo spostamento di alcuni elementi non sono dovuti al progredire del danno ma direttamente correlati a parametri ambientali.

Gentile e Saisi (2018) hanno monitorato in continuo la risposta dinamica di tre torri antiche in muratura per indagare gli effetti della temperatura sulle frequenze di risonanza e la rimozione di tali effetti ambientali. Il monitoraggio in continuo della risposta dinamica è particolarmente adatto per le torri antiche perché sensibili alle vibrazioni ambientali esibendo un comportamento dinamico simile a quello di una mensola. Gli Autori utilizzano le frequenze di vibrazione come indici rappresentativi delle condizioni strutturali. Le frequenze di vibrazione delle torri antiche sono sensibili alle condizioni ambientali, specialmente la temperatura, e quindi un approccio di identificazione del danno basato sulle variazioni di frequenza deve includere la rimozione di questi effetti indotti dalla

temperatura. Sono state applicate tecniche di regressione lineare multipla MLR e analisi delle componenti principali (PCA), mostrando come la PCA fornisca risultati migliori. Il comportamento dinamico delle strutture in muratura è diverso da quello mostrato da strutture in calcestruzzo armato, acciaio e cemento precompresso. Una diminuzione della frequenza all'aumentare della temperatura potrebbe essere un sintomo di un cattivo stato di conservazione della struttura. A livello locale, aumenti della temperatura possono portare a un incremento della spinta di elementi strutturali inclinati o a un allentamento dei tiranti che potrebbero portare a una riduzione della frequenza. Inoltre, gli effetti dell'umidità relativa (cioè la diminuzione delle frequenze naturali associate all'assorbimento d'acqua delle murature portanti durante la stagione delle piogge) sono occasionalmente segnalati in letteratura.

Gli autori hanno evidenziato che nei mesi estivi i modi a basse frequenze essendo molto vicini tendono a incrociarsi e ibridarsi con un comportamento flessionale biassiale in entrambe le direzioni.

Per il monitoraggio sono stati utilizzati solo 4 accelerometri e 5 sensori di temperatura. Le oscillazioni indotte da fattori ambientali possono essere più significative rispetto a quelle indotte da piccoli danni.

Gentile et al. (2019) descrive un esempio di monitoraggio strutturale del duomo di Milano come supporto alla manutenzione e per migliorare la conoscenza della struttura storica. Il sistema integra misure statiche (inclinometri, estensimetri, sensori di temperatura e umidità) e dinamiche

(sismometri). In questo lavoro viene proposto il metodo delle forme modali per il rilevamento e la localizzazione del danno perché meno sensibili a fattori esogeni rispetto alle frequenze di risonanza. Attraverso misure quasi statiche hanno valutato l'influenza dei parametri ambientali nei tiranti, nell'inclinazione degli elementi strutturali e delle frequenze di risonanza. Hanno verificato l'invarianza nel tempo delle forme modali e della complessità modale. Per l'identificazione automatica viene utilizzata la tecnica COV-SSI. Contrariamente ad altri lavori in questo caso c'è una correlazione negativa tra temperatura e frequenze. Per gli autori questo comportamento è da attribuire alla complessità del sistema di volte e tiranti.

Cardoso et al. (2019) propongono una tecnica SHM online per il rilevamento in tempo reale senza supervisione per l'identificazione di anomalie strutturali. Tale procedura si basa su una rappresentazione originale dei dati grezzi acquisiti utilizzando un SDO (Symbolic Data Object).

García-Macías e Ubertini (2019) utilizzano l'interferometria sismica come metodo per l'identificazione del danno per torri in muratura storiche. Questa tecnica valuta i tempi di propagazione delle onde sismiche tra coppie di sensori e il danno o degrado possono essere direttamente correlati attraverso i ritardi nelle velocità delle onde. È stato realizzato un modello agli elementi finiti sottoposto a input sismico dimostrando che è possibile identificare, localizzare e quantificare il danno a partire dalla

registrazione delle propagazioni delle onde semplicemente misurando i tempi di percorrenza.

García-Macías e Ubertini (2019) propongono lo studio della Torre Sciri a Perugia utilizzando insieme procedure OMA automatizzate e interferometria sismica e vengono indagati anche gli effetti ambientali sulla distribuzione spaziale delle velocità delle onde. Gli effetti ambientali sulle velocità possono essere rilevati solo utilizzando elevate frequenze di campionamento, è stata trovata una correlazione positiva tra velocità e temperatura coerentemente per quanto accade con le frequenze di risonanza correlata alla chiusura di fessure. Le informazioni provenienti dalle onde hanno permesso di avere dati importanti sulla distribuzione della rigidità della torre.

García-Macías et al. (2020) utilizzano un meta modello agli elementi finiti per l'identificazione di strutture storiche in muratura attraverso la formulazione di un problema di ottimizzazione tenendo conto delle discrepanze tra le frequenze di risonanza numeriche e sperimentali e le forme modali. La localizzazione/quantificazione del danno è resa possibile dall'analisi multivariata dei parametri del modello continuamente identificati. Questa tecnica è stata utilizzata sulla Torre Sciri a Perugia.

Tronci et al. (2020) si sono occupati del monitoraggio della torre civica di Rieti, una struttura mista muratura – calcestruzzo dotata di un sistema di controllo passivo delle vibrazioni, uno smorzatore a massa accordata

non convenzionale. Identificando in continuo le frequenze sono state valutate le dipendenze con la temperatura. Per indagare il comportamento dinamico della struttura è stato utilizzato un eccitatore di vibrazioni ed è stato realizzato anche un modello agli elementi finiti per un confronto dei risultati ottenuti con il monitoraggio delle vibrazioni ambientali. In questo studio è stata trovata una correlazione positiva tra temperatura frequenze.

2.4 Metodi globali e metodi locali

Una classificazione dei vari approcci del monitoraggio strutturale può essere effettuata in funzione dei fenomeni che si vogliono monitorare: metodi globali e metodi locali (Mengelkamp e Fritzen, 2006; Kim, 2010; Lin et al., 2014;).

Nel caso in cui si voglia misurare come una fessura si propaghi, è possibile ricorrere ad un monitoraggio locale. Se invece è necessario studiare il comportamento globale di una struttura, focalizzando l'attenzione su parametri descrittivi della risposta strutturale nel suo complesso, si deve optare per un monitoraggio globale.

I metodi globali possono essere utilmente impiegati anche quando il danno non si è ancora manifestato: in questo caso il monitoraggio avviene in continuo e le anomalie possono essere rilevate da variazioni nella risposta strutturale rispetto allo stato iniziale. Le tecniche di monitoraggio strutturale basate sulle vibrazioni ricadono in questa categoria;

infatti, il danno può essere identificato grazie alla misura di vibrazioni in condizioni di rumore ambientale.

Nei metodi locali, invece, il danno è già stato identificato e ne viene monitorata l'evoluzione nel tempo. Esempi applicativi sono il monitoraggio dell'ampiezza delle fessure o del degrado dovuto alla corrosione.

I metodi basati sull'identificazione del danno dalle risposte registrate sulla struttura presentano il vantaggio di una maggiore rapidità nell'elaborazione dei dati e quindi la possibilità di essere impiegati per valutazioni in tempo reale sullo stato di salute della struttura.

La maggior parte dei metodi di identificazione del danno utilizzano come indici frequenze proprie, coefficienti di smorzamento, forme modali, curvatura modale, derivate delle forme modali, energia di deformazione modale. Gli indici basati sulle frequenze sono influenzati da parametri ambientali come la temperatura o l'umidità che possono provocare variazioni non correlate con il danno, costituendo una possibile fonte di errore nelle procedure diagnostiche. Mentre gli indici basati su coefficienti di smorzamento e forme modali, sono maggiormente influenzati dal rumore presente nei dati registrati e risultano meno affidabili. Questo naturalmente limita la confidenza nelle diagnosi fornite dai metodi che utilizzano questi parametri e le rendono dipendenti dalla qualità dei dati registrati.

I metodi globali sono distinti a loro volta in metodi lineari o non lineari a seconda del tipo di danno individuato.

I metodi lineari possono essere ulteriormente classificati in metodi modello - dipendenti e metodi modello - indipendenti.

I metodi modello-dipendenti presuppongono che la struttura esaminata risponda in alcuni modi predeterminati, che possono essere accuratamente discretizzati in un'analisi secondo il metodo degli elementi finiti (si pensi alla risposta descritta dalla teoria della trave di Eulero-Bernoulli).

Un'ulteriore classificazione dei metodi di individuazione del danno definisce quattro livelli di identificazione (Rytter, 1993):

- Livello 1: determinazione della presenza del danno nella struttura;
- Livello 2: Livello 1 più la determinazione dell'ubicazione geometrica del danno;
- Livello 3: Livello 2 più la valutazione dell'entità del danno;
- Livello 4: Livello 3 più la predizione della vita di servizio rimanente della struttura.

I livelli 1 e 2 sono entrambi metodi di identificazione del danno basati sull'analisi vibrazionale che possono essere determinati senza alcun modello strutturale. Il livello 3, di identificazione del danno, presuppone che i metodi vibrazionali vengano accoppiati con l'utilizzo di un modello strutturale. In tal caso le problematiche sono più complesse per cui non sempre è possibile ottenere tutte le informazioni previste dal livello. Il livello 4 è un livello predittivo associato coi campi di formazione delle fratture, analisi di vita a fatica, o accertamento sul progetto strutturale.

I metodi globali, a cui appartengono i metodi vibrazionali, sono almeno di livello 3.

Un altro sistema di classificazione, per le tecniche di identificazione del danno, distingue tra metodi usati per il monitoraggio continuo delle capacità strutturali e metodi usati per la determinazione del danneggiamento causato da eventi estremi. Per esempio, un sistema che usa misure accelerometriche, continue o intermittenti, provenienti da sensori permanenti montati ad un ponte è diverso, in termini di strumentazione e requisiti di acquisizione dati, da un sistema che non acquisisce dati in modo permanente ma solo durante ed immediatamente dopo un terremoto o un uragano.

2.5 Model driven vs data driven

Nel monitoraggio strutturale sono presenti due approcci per l'identificazione del danno: metodi model driven e metodi data driven (Worden et al., 2007).

I metodi model driven si basano su un modello fisico della struttura, solitamente agli elementi finiti, e prevedono un confronto tra il modello e i dati misurati sulla struttura. Le eventuali variazioni del modello dalle condizioni normali indicano il danneggiamento della struttura. Anche i metodi data driven si basano su un modello, ma si tratta di una rappresentazione statistica del sistema. Gli algoritmi sviluppati per i metodi data driven sono principalmente tratti dalla disciplina del pattern recognition, o più in generale, dal machine learning.

Nei metodi model driven viene risolto un problema inverso attraverso la creazione di un modello della struttura priva di danno e attraverso i dati raccolti vengono calibrate le modifiche ai parametri fisici della struttura attraverso algoritmi basati sull'algebra lineare o sull'ottimizzazione.

I sistemi data driven non richiedono la modellazione numerica della struttura ma si basano su un'analisi statistica dei dati. Possono essere usate tecniche machine learning non supervisionate in cui possibili anomalie vengono identificate dall'algoritmo confrontando i dati correnti con un set di dati di riferimento. Con questo approccio vengono implementati algoritmi in grado di assegnare una classe di danno ai dati raccolti. Viene dunque effettuata una valutazione comparativa tra i dati della struttura monitorata in condizioni operative e dati di altri eventi conosciuti presi come riferimento. Quando i dati registrati si discostano da quelli di riferimento si verifica una condizione di danno nella struttura, è necessaria un'elaborazione dei dati acquisiti.

Le diverse fasi di un monitoraggio data driven sono:

- sensing: i sensori attraverso il segnale elettrico forniscono i dati grezzi;
- pre-processing: i dati raccolti vengono filtrati per le elaborazioni successive attraverso la rimozione del rumore, picchi ed eventuali outliers; si cerca quindi di ridurre le dimensioni dei dati grezzi per evitare ridondanze;
- feature extraction;
- post processing;
- pattern recognition;

- decision.

Tradizionalmente l'SHM ha utilizzato un approccio basato su modelli, in cui un modello ad alta fedeltà di una struttura viene costruito e studiato in dettaglio per rilevare l'insorgenza del danno in base alle variazioni da un modello non danneggiato del sistema. Tuttavia, data la complessità delle strutture e l'incapacità di modellare perfettamente tutti gli aspetti di un sistema, un approccio basato sui dati diventa un'alternativa interessante.

I metodi basati su modelli comportano il rischio che il modello si discosti dal significato fisico reale e sono generalmente costosi dal punto di vista computazionale. I metodi basati sui dati per contro sono limitati dai dati sperimentali disponibili per tutti i probabili scenari di danno e quindi possono essere poco pratici e costosi.

I metodi guidati dal modello sono quelli che utilizzano un approccio inverso applicato a un modello basato sulla legge, il metodo più comune è l'aggiornamento del modello a gli elementi fintiti. I metodi basati sui dati, d'altra parte, utilizzano il riconoscimento di modelli e tecniche di apprendimento automatico che vengono applicate alle rappresentazioni statistiche del sistema dai dati.

L'aggiornamento del modello è il processo di regolazione di alcuni parametri del modello al fine di ridurre il residuo tra misurazioni sperimentali e previsioni del modello. La modifica dei parametri del modello aggiornato può quindi essere utilizzata per dedurre danni nella struttura.

Diversi problemi sorgono quando si utilizzano questi metodi per il rilevamento dei danni. Tra questi c'è la selezione del numero di parametri da utilizzare, che può diventare molto grande quando la posizione del danno è sconosciuta. La corretta parametrizzazione del modello è spesso difficile a causa dei molti potenziali parametri di input per un modello FE. Anche una comprensione accurata della fisica sottostante e la conoscenza che il modello aggiornato non si è discostato dal significato fisico a causa di parametri aggiornati non realistici pone sfide soprattutto quando si utilizzano parametri che influiscono direttamente sulla rigidità per dedurre il danno. Ulteriori sfide sono presentate dall'inevitabile presenza di errori di modello; l'effetto delle incertezze associate ai parametri del modello non calibrati; e la possibile presenza di variabilità nei dati sperimentali 'target' derivanti, ad esempio, dagli effetti ambientali. I metodi sono anche computazionalmente costosi in quanto richiedono più esecuzioni di un modello FE per fare previsioni per un singolo nuovo set di dati.

I metodi basati sui dati, al contrario, eliminano la necessità di una completa comprensione fisica della struttura.

Utilizzando approcci di apprendimento automatico basati su statistiche, le strutture che si discostano dalla condizione normale vengono utilizzate per dedurre il danno. Questi metodi richiedono i dati di ogni stato di danno nell'addestramento del processo di apprendimento automatico

per funzionare in modo efficace. Questa necessità di dati in tutti i possibili stati di danno non è sempre economicamente fattibile in strutture reali e quindi molti di questi metodi non sono pratici.

Una delle sfide chiave in SHM è la difficoltà associata alla raccolta di dati sperimentali da una struttura nel suo stato danneggiato. Questa sfida è particolarmente cruciale per i metodi di apprendimento supervisionato puramente basati sui dati. La modellazione numerica offre il potenziale per superare il problema della mancanza di dati facendo previsioni fisicamente informate su come si comporterà la struttura una volta danneggiata. Tuttavia, la modellazione numerica solleva sfide di per sé, in cui una domanda importante è come incorporare incertezze ed errori derivanti dal processo di previsione del modello all'interno del processo decisionale SHM. Inoltre, la variabilità sorge inevitabilmente nelle risposte sperimentali osservate e anche questa dovrebbe essere incorporata nel processo decisionale. Infine, è auspicabile che il costo dell'errata classificazione sia incorporato nel processo decisionale, con approcci basati sul rischio che rappresentano un'opzione interessante per passare dalla classificazione al processo decisionale.

2.6 Monitoraggio basato sulle vibrazioni

Il monitoraggio strutturale basato su tecniche output-only è diventato una tecnologia matura e onnipresente nella manutenzione preventiva delle strutture. Queste tecniche sfruttano i record dell'accelerazione am-

bientale per estrarre le proprietà modali (frequenze naturali, smorzamento, forme modali) della struttura come caratteristiche sensibili ai danni.

L'uso di un numero limitato di sensori e l'identificazione automatizzata dei parametri modali in SHM implica la scelta delle frequenze naturali come caratteristiche da assumere come rappresentative della condizione strutturale. I parametri modali misurati (frequenze principali, forme modali e fattore di smorzamento) sono funzioni delle proprietà fisiche della struttura (massa, rigidità, smorzamento), quindi, variazioni nelle proprietà fisiche, come riduzioni nella rigidità derivanti dall'insorgere di fessure, provocheranno variazioni delle caratteristiche modali. Queste variazioni nelle proprietà modali possono essere usate come indicatori di danno.

Sviluppi tecnologici recenti come il miglioramento delle capacità computazionali, della tecnologia dei sensori e lo sviluppo del metodo degli elementi finiti, hanno contribuito a notevoli miglioramenti nel campo della ricerca sui metodi globali di identificazione del danno.

Le proprietà modali rappresentano una forma compressa di dati, sono stimate sperimentalmente attraverso la misura di serie temporali misurate in vari punti. Attraverso l'analisi modale sperimentale questa notevole quantità di dati viene ridotta affinché le proprietà modali risultino più facili da visualizzare, interpretare fisicamente e trattare in termini di modelli matematici di sistemi vibranti.

Tipicamente il danneggiamento è un fenomeno locale. La risposta locale è individuata dai modi con frequenze più alte, mentre i modi con frequenze più basse tendono a catturare la risposta globale della struttura e sono meno sensibili alle modifiche locali. Dal punto di vista sperimentale è più difficile eccitare la risposta con frequenza più alta di una struttura, in quanto per produrre delle risposte misurabili è richiesta una quantità di energia maggiore rispetto a quella richiesta dai modi con frequenze più basse.

Un primo aspetto da valutare è la scelta del tipo e l'ubicazione dei sensori e le fonti di eccitazione della struttura. Un'altra importante problematica è quella legata all'elaborazione dei segnali, basata su metodi come analisi di Fourier, l'analisi di tempo-frequenza e l'analisi wavelet. Queste problematiche comportano delle difficoltà nel processo di identificazione del danno.

Risulta evidente come un monitoraggio in continuo delle strutture sia indispensabile per prevenire crolli improvvisi ed individuare stati di danneggiamento. In questo modo si possono calibrare e mirare meglio gli interventi di manutenzione da effettuare con conseguente risparmio in termini economici.

In molti casi il danno può manifestarsi ed accumularsi in un lungo periodo di tempo, come la corrosione o fessurazione per fatica. In altri casi lo stato di danneggiamento avviene in un breve periodo di tempo: è il caso dei terremoti o altri eventi calamitosi.

I sistemi di monitoraggio basati sulle vibrazioni sono usati sia per monitoraggi a lungo termine, per verificare la capacità le prestazioni della struttura anche in presenza di fenomeni di invecchiamento e degrado, sia per una rapida valutazione delle condizioni delle strutture a seguito di eventi calamitosi. Per poter sfruttare i vantaggi legati ai più recenti progressi tecnologici per quanto riguarda i sistemi di misura, i dati acquisiti devono essere continuamente ed automaticamente elaborati al fine di estrarre gli indici di danno.

L'Analisi Modale Operazionale permette l'identificazione dinamica delle strutture in condizioni di esercizio e rappresenta un efficace strumento per il monitoraggio strutturale. Il monitoraggio in continuo basato sulle vibrazioni consiste nell'individuare le proprietà dinamiche delle strutture in termini di frequenze e forme modali, a partire da registrazioni della risposta strutturale in condizioni operative, in presenza della sola eccitazione ambientale. La fonte di eccitazione della struttura, dunque, non è nota. Le variazioni delle stime delle proprietà modali rappresentano gli indici adottati per l'identificazione del danno. Questi possono risentire di alcuni fattori ambientali e operativi quali la temperatura, l'umidità, il livello di vibrazione; l'unica strategia per quantificare questi effetti e distinguerli dalle variazioni indotte da danno e/o degrado è il monitoraggio in continuo. Analizzando le vibrazioni strutturali in condizioni operative è possibile stimare i parametri dinamici della struttura (Rainieri & Fabbrocino, 2014).

Una volta stimati i parametri modali (frequenza principale di vibrazione, forme modali e fattore di smorzamento) della struttura in assenza di danno, essendo le proprietà dinamiche funzione delle proprietà fisiche della struttura (massa, rigidità, smorzamento), è possibile interpretare le variazioni delle proprietà fisiche e, quindi, delle proprietà dinamiche, come indicatori di danno.

L'input in condizioni operative deriva principalmente da fattori naturali e antropici (traffico veicolare, vento, microsismi etc). Il carattere non stazionario dell'eccitazione deve essere debitamente portato in conto. Cambiamenti associati a condizioni operative ed ambientali avvengono ad intervalli regolari: giornalieri (es. traffico veicolare che varia durante le ore del giorno, variazione della temperatura tra il giorno e la notte); settimanali (es. traffico veicolare cambia tra il weekend ed i giorni lavorativi); stagionali (es. la temperatura varia tra le stagioni). Altre variazioni possono essere di tipo random, come calo del traffico a causa di un incidente. A seconda della causa di queste variazioni, si possono registrare cambiamenti più o meno marcati nelle caratteristiche dinamiche della struttura, che non sono necessariamente sintomo di uno stato di danneggiamento (Deraemaeker et. al., 2008).

Risulta quindi fondamentale progettare un sistema di monitoraggio strutturale in grado di depurare le stime dei parametri modali dagli effetti ambientali, in modo da far emergere le sole variazioni dovute a fenomeni di degrado e danno.

Altri inconvenienti legati all'identificazione del danno da misure di vibrazione in condizioni operative riguardano: la necessità di disporre di procedure affidabili per l'analisi automatica dei dati; la necessità di stimare le forme modali in numerosi punti e con tempi minimi di acquisizione; la necessità di stimare anche i modi superiori, in quanto il danno è un fenomeno locale e non può essere colto utilizzando solo i primi modi di vibrare, che sono generalmente adatti per descrivere il comportamento globale della struttura, ciò comporta l'installazione di un numero di sensori, distribuiti sulla struttura, piuttosto elevato.

Le prime analisi e classificazioni sistematiche delle procedure automatiche di identificazione dinamica output-only sono piuttosto recenti. In particolare, è stata proposta una chiara distinzione tra identificazione automatica e tracciamento dei parametri modali. Nel primo caso è sufficiente una singola registrazione per estrarre i parametri modali in assenza di informazioni a-priori sulle proprietà dinamiche della struttura oggetto di indagine. Nel secondo caso, invece, l'osservazione nel tempo dell'evoluzione dei parametri modali della struttura si basa su un insieme di stime di riferimento. I parametri modali di riferimento possono essere forniti sia da procedure manuali sia da algoritmi automatici di identificazione dinamica. A dispetto della loro minore autonomia, le procedure di tracciamento dei parametri modali risultano vantaggiose rispetto alle procedure di identificazione dinamica automatica per tutte quelle applicazioni che richiedono tempi di risposta ridotti e bassi oneri

computazionali. Le tecniche di identificazione dinamica automatica, d'altro canto, sono l'unica opzione possibile quando non sono disponibili stime di riferimento dei parametri modali.

L'efficacia delle procedure di identificazione del danno dipende dall'accuratezza delle stime dei parametri modali. Tuttavia, la maggior parte degli algoritmi di identificazione dinamica automatica disponibili mostra limiti comuni che influiscono negativamente sulla qualità delle stime. Le principali cause di inaccuratezza sono legate all'uso di soglie impostate staticamente e di parametri che richiedono una calibrazione preliminare. Tuttavia, nel caso di modi debolmente eccitati o in presenza di elevati livelli di rumore, una stima affidabile richiede registrazioni molto lunghe con conseguente incremento degli oneri computazionali e dei tempi di risposta.

2.6.1 Indici di danno: variazioni di frequenza.

Osservando le variazioni nelle frequenze naturali è possibile determinare la presenza di danneggiamento in una struttura. Queste variazioni possono non essere sufficienti alla localizzazione del danno poiché difetti simili in punti diversi della struttura possono provocare cambiamenti di frequenza identici. In strutture simmetriche danneggiamenti in punti simmetrici possono avere gli stessi cambiamenti in frequenza, mentre su strutture massive un danneggiamento notevole può causare cambiamenti pressoché minimi nelle frequenze. Se le variazioni misurate sono molto piccole possono essere confuse con l'errore di misura.

Per l'identificazione del danno sono necessarie misurazioni molto precise o grandi livelli di danno. Le frequenze di risonanza presentano statisticamente minori variazioni provocate da errori casuali rispetto ad altri parametri modali.

I metodi basati sulle variazioni di frequenza possono essere classificati in due categorie a seconda che si basino sulla soluzione di un problema diretto o inverso.

Il problema diretto, ricade nella categoria del Livello 1 di identificazione del danno, consiste nel calcolare i cambiamenti di frequenza partendo dalla conoscenza di un danno noto. Tipicamente, il danneggiamento è modellato matematicamente, quindi le frequenze, misurate sperimentalmente, sono comparate con le frequenze, previste nel modello, per ottenere il danno. Si considera un insieme di possibili localizzazioni del danno e si costruisce un termine di errore che mette in relazione i valori di frequenza misurati (per ogni modo considerato) con quelli previsti da un modello basato su una riduzione della rigidità locale nei punti considerati. Per ogni potenziale localizzazione del danneggiamento si considera un certo numero di coppie di modi, e laddove si ha l'errore più basso si può ritenere localizzato il danno. Tale formulazione richiede che venga effettuata una scansione su tutto il modello e non tiene conto di possibili localizzazioni multiple del danneggiamento. Esistono tuttavia

altre applicazioni del problema diretto, basate sul confronto delle frequenze di risonanza ed altre basate sull'impiego di modelli che simulano i possibili stati di danneggiamento.

Il problema inverso, che riguarda tipicamente il livello 2, o il livello 3, di identificazione del danno, consiste nel calcolare i parametri di danno, ad esempio lunghezza delle fessure e/o loro ubicazione, a partire dai cambiamenti di frequenza. Vengono messe in relazione i cambiamenti nelle frequenza con i cambiamenti nella rigidità dei vari elementi strutturali. Una procedura di localizzazione del danno basata sulla soluzione del problema inverso è la seguente:

- identificazione del danneggiamento a livello globale attraverso misure dinamiche;
- modellazione del danneggiamento a livello locale;
- scelta della correlazione tra le misure globali ed i parametri locali di danneggiamento;
- calcolo dei parametri locali del danneggiamento attraverso la soluzione del problema inverso.

2.6.2 Indici di danno: variazioni delle forme modali.

Le forme modali sono maggiormente influenzate rispetto alle frequenze, dal danneggiamento locale, per cui offrono migliori possibilità per l'identificazione e la localizzazione del danno. I cambiamenti delle forme modali e delle loro derivate rispetto al parametro di spostamento possono essere valutati:

$$\varphi_i^* = \frac{\varphi_i^d}{\omega_i^d} - \frac{\varphi_i^u}{\omega_i^u}$$

dove

φ_i = il vettore dell'i-esima forma modale;

ω_i = la frequenza relativa all'i-esima forma modale;

e gli apici "u" e "d" indicano rispettivamente lo stato non danneggiato e lo stato danneggiato.

I cambiamenti di questi parametri sono simulati attraverso una riduzione di rigidità degli elementi strutturali e le variazioni previste vengono confrontate, attraverso metodi di correlazione, con i cambiamenti misurati.

Alcuni metodi, basati sui cambiamenti delle forme modali, operano una discretizzazione della struttura cercando di determinare la riduzione di rigidità in ciascun elemento strutturale. In tal caso si opera uno sviluppo in serie di Taylor arrestato al primo ordine dei parametri modali in parametri elementari. Una volta localizzato il danneggiamento, la sua entità è determinata attraverso una formulazione sul cambiamento dell'energia di deformazione provocato dalla presenza della fessura.

È stato inoltre proposto in letteratura la determinazione di un indice di danno globale, calcolato a partire dai rapporti pesati, fra le frequenze naturali della struttura danneggiata e non. I pesi usati esprimono la sensibilità relativa di ciascun modo al danneggiamento. Quando si manifesta il danneggiamento, viene calcolato un indice di integrità locale per determinare l'area dove è localizzato il danno. Tale indice viene calcolato

a partire da quello globale attraverso ulteriori pesi che tengono conto del quadrato del rapporto fra l'ampiezza dei modi della struttura danneggiata e non danneggiata.

Nei vari metodi di determinazione del danneggiamento, basati sui cambiamenti delle forme modali, il livello di correlazione tra i modi della struttura, danneggiata e non, è di solito determinato attraverso i M.A.C. (Modal Assurance Criterion), Co.M.A.C. (Coordinate Modal Assurance Criterion), Node Line M.A.C.

2.6.3 Indici di danno: variazioni della curvatura e dell'energia di deformazione modali.

Un'alternativa all'utilizzo delle forme modali per ottenere informazioni spaziali circa i cambiamenti nella risposta vibrazionale, è quella di usare forme modali derivate, come la curvatura. Per le travi, le piastre, i gusci, si può scrivere la seguente relazione diretta tra curvatura e tensioni di curvatura:

$$\varepsilon = \frac{y}{R} = \chi \cdot y$$

dove:

ε = deformazione

R = raggio di curvatura

$$\chi = \frac{1}{R} = \text{curvatura}$$

È stato dimostrato che i cambiamenti nella curvatura delle forme modali possono essere buoni indicatori di danneggiamento per i modelli FEM di

strutture composte da travi. I valori della curvatura possono essere calcolati, a partire dai parametri di spostamento delle forme modali, attraverso il seguente criterio approssimato:

$$\varphi''_{q,i} = \frac{\varphi_{q,i} - 2 \cdot \varphi_{q,i} + \varphi_{q+1,i}}{h^2}$$

con riferimento al modo i-esimo relativo al parametro di spostamento q-esimo e dove h è la lunghezza di ognuno dei due elementi compresi fra i parametri (q-1) e (q+1).

Altre applicazioni si basano sul decremento dell'energia di deformazione tra due gradi di libertà della struttura. Tale decremento è definito attraverso la curvatura della forma modale misurata. Per le strutture composte da travi con comportamento elastico lineare, si definisce il parametro β_i = indice di danneggiamento dell'i-esimo elemento definito come:

$$\beta_i = \frac{\sum_{j:1}^n \mu_{ji}^d}{\sum_{j:1}^n \mu_{ji}^u}$$

dove i termini μ_{ji} è l'aliquota di energia di deformazione misurata sperimentalmente per il modo j tra gli estremi a e b dell'elemento i. L'elemento con il valore di β più grande sarà quello probabilmente danneggiato.

È stato inoltre introdotto un parametro basato sui cambiamenti nella deformazione delle forme modali e nella loro frequenza. Questo parametro può essere formulato come:

$$\{\Delta\varphi^*\}_i = \{\varphi^d\}_i \frac{(\omega_i^u)}{(\omega_i^d)} - \{\varphi^u\}_i$$

dove $\{\varphi\}_i$ rappresenta la deformazione dell'*i*-esimo modo. Questo parametro è più sensibile al danneggiamento strutturale rispetto a tutti gli altri parametri equivalenti computati a partire dagli spostamenti.

2.7 Variabili ambientali

Gli indici di danno, come i parametri dinamici, sono influenzati da fattori ambientali (temperatura, vento, umidità) e da fattori operativi (numero di persone all'interno della struttura), infatti il danno è spesso mascherato da fluttuazioni giornaliere; quindi, schemi di monitoraggio a lungo termine sono essenziali per sfruttare appieno il potenziale delle tecniche modali per il rilevamento del danno. Pertanto, è fondamentale rimuovere l'influenza di tali fattori, in modo da poter valutare fenomeni di danneggiamento.

Un possibile approccio per eliminare gli effetti di fattori ambientali e operativi su frequenze naturali e forme modali consiste nella creazione di modelli in grado di rappresentare i fenomeni fisici che sono alla base di tali variazioni. In particolare, è possibile ricorrere a modelli che, a partire dalla misurazione di fattori ambientali e operativi, individuino una correlazione tra questi e le variazioni delle frequenze naturali della struttura. Tuttavia, poiché la selezione di questi fattori non è sempre agevole, è possibile seguire un altro approccio, basato su strumenti statistici che consentono la correzione delle frequenze naturali senza la necessità di misurare fattori ambientali e operativi.

A causa della sensibilità delle proprietà modali ai fattori ambientali, come la temperatura o l'umidità, il danno è spesso mascherato da fluttuazioni giornaliere; quindi, schemi di monitoraggio a lungo termine sono essenziali per sfruttare appieno il potenziale delle tecniche modali per il rilevamento del danno.

Dal lavoro svolto da alcuni autori (Gentile e Saisi, 2018; Kita et al., 2018; Ubertini et al. 2017) si possono osservare diversi effetti determinati dalla temperatura sui cambiamenti di frequenza.

L'aumento delle frequenze naturali con l'aumento della temperatura. Questo comportamento è dovuto dalla chiusura di fessure superficiali e piccole discontinuità murarie indotte dalla dilatazione termica dei materiali. La correlazione tra frequenza e temperatura tende ad essere essenzialmente lineare quando la temperatura supera i 10-15 ° C ma vengono rilevati effetti non lineari nell'intervallo inferiore di temperature;

Con riferimento alle condizioni di gelo, le frequenze naturali aumentano rapidamente e in modo significativo con la diminuzione della temperatura. Tale comportamento è plausibilmente correlato al congelamento del sistema strutturale (compresa la fondazione) e alla presenza di ghiaccio, che riempie e chiude le fessure, provocando un temporaneo irrigidimento della struttura;

Alcuni effetti dell'aumento della temperatura a livello locale potrebbero indurre una riduzione della frequenza con l'aumento della temperatura.

La sensibilità termica delle frequenze risulta essere maggiore per i modi di ordine superiore.

L'aumento dell'umidità relativa porta a una diminuzione delle frequenze naturali.

Al fine di mitigare gli effetti dei parametri ambientali sulle frequenze in letteratura vengono proposti strumenti di regressione lineare multipla (MLR) e analisi delle componenti principali (PCA). Tali metodi non richiedono la misurazione delle variabili ambientali.

Gli indici di danno variano non solo per effetto del danno ma anche per effetto delle variabili ambientali e quindi occorre sviluppare metodi di analisi che compensino questi effetti in modo tale che le variazioni degli indici di danno dipendano solo da danno stesso. Da un'analisi della letteratura scientifica si evince che esistono una serie di tecniche per la compensazione degli effetti ambientali che richiedono la misura delle variabili ambientali rilevanti come ad esempio la temperatura (Saisi et al., 2015; Kita et al. 2018; Tronci et al., 2020). Il problema risiede nel fatto che su strutture reali la temperatura può variare nei vari punti e quindi la scelta del punto di misura influenza enormemente le prestazioni dei metodi considerati e quindi cambia la capacità di rimuovere gli effetti delle variabili rilevanti.

Per la risoluzione di questo problema, sempre in letteratura (Gentile e Saisi, 2018; Ubertini et al., 2017; García-Macías et al.; 2020; Ubertini et al. 2015), esistono metodi alternativi che non necessitano la misura diretta

delle variabili ambientali, ma il problema è che questi metodi non funzionano in presenza di relazioni di tipo non lineare tra indici di danno selezionati oppure tra indici di danno e variabili ambientali.

Tra le varie tecniche di analisi non lineare particolarmente promettente è l'uso della Kernel PCA, l'idea di base è che ai dati originariamente distribuiti in maniera non lineare può essere applicata una trasformazione, una funzione di tipo non lineare che fa sì che i dati siano linearmente distribuiti a seguito della trasformazione in modo da utilizzare le tecniche lineari (regressive e PCA sui dati trasformati).

Rimossi gli effetti delle variabili ambientali è necessario definire delle opportune soglie di allarme per l'identificazione delle anomalie.

Le tecniche di identificazione del danno basate sulle vibrazioni sono state largamente studiate ed impiegate nell'ambito del monitoraggio strutturale, anche con riferimento a strutture collocate in aree a rischio sismico. I principali limiti connessi all'impiego di queste tecniche sono rappresentati dall'influenza di fattori ambientali e operativi sugli indici di danno e la definizione di affidabili soglie di allarme. La scarsa considerazione di tali questioni è in grado di compromettere l'affidabilità dell'informazione dando luogo a seri problemi di falso o mancato allarme.

Lo studio e l'applicazione comparativa di tecniche di compensazione degli effetti ambientali in grado di tener conto anche di relazioni non lineari tra le variabili e la valutazione razionale, anche attraverso modelli statistici avanzati, delle soglie di allarme costituiscono, dunque, elementi di

approfondimento fondamentali al fine di incrementare l'efficacia dei sistemi di monitoraggio basati sulle vibrazioni.

2.8 Progetto sistema di monitoraggio

2.8.1 Campanile di Civitacampomarano

Un sistema di monitoraggio in continuo è stato progettato e applicato ad un campanile storico in muratura del Molise; di seguito verranno mostrati i risultati ottenuti a partire dalla prova dinamica preliminare funzionale al collaudo del monitoraggio in continuo.

Il caso oggetto di studio è il campanile di Civitacampomarano (CB), un piccolo borgo vicino a Campobasso in Molise. Il campanile (Figura 2.1) della distrutta chiesa di Santa Maria Maggiore si trova di fronte alla scalinata di accesso al castello, su Largo Vincenzo Cuoco ed è stato costruito nel XVIII-XIX secolo (Civerra et al. 2007). Il campanile è l'unica parte dell'edificio religioso che si è conservata intatta dopo il terremoto del 4 febbraio 1903. All'interno dell'arco del campanile sono presenti segni di gradini a testimonianza che, prima del terremoto del 1903, in quel punto vi era un terrapieno, un sopralzo della strada. Questa ipotesi è avvalorata dalla presenza sullo stesso lato dell'originario ingresso di Santa Maria Maggiore. Nel 1988 il campanile è stato oggetto di un'ampia opera di restauro e di interventi strutturali per riparare i danni che interessavano la struttura portante della campana e del solaio di copertura.

Il campanile è costruito su un arco a tutto sesto in pietra calcarea ed è caratterizzato da una sezione quadrangolare e la trama muraria esterna presenta blocchi di pietra squadri e irregolari.



Figura 2.1. Campanile di Civitacampomarano

La struttura si sviluppa su tre livelli con una cuspide piramidale terminale con un'altezza massima di 24,33 metri.

2.8.2 Installazione sistema di monitoraggio

La progettazione definitiva del sistema di monitoraggio e la sua installazione hanno richiesto diversi sopralluoghi preliminari volti ad accertare la presenza e la natura di possibili fonti di disturbo dei segnali acquisiti. In particolare, tra queste sono state identificate possibili sorgenti di disturbo connesse alla presenza dei cavi di alimentazione delle campane e dell'orologio. Ad Aprile 2022 è stato installato il sistema di monitoraggio presso il campanile.

Per l'installazione dei sensori sono state impiegate delle piastre in acciaio ancorate alle pareti in muratura (Figura 2.2) dove successivamente sono stati avvitati i sensori.



Figura 2.2. Piastre e sensori ancorati sui muri.

Per poter misurare in maniera adeguata la risposta della struttura che è soggetta a basse vibrazioni ambientali, sono stati scelti dei sensori piezoelettrici con sensibilità 10 V/g, range di fondo scala di $\pm 0,5$ g e una larghezza di banda in frequenza da 0,1 a 200 Hz. Sono stati installati un totale di 10 sensori e il layout è riportato in Figura 2.3.

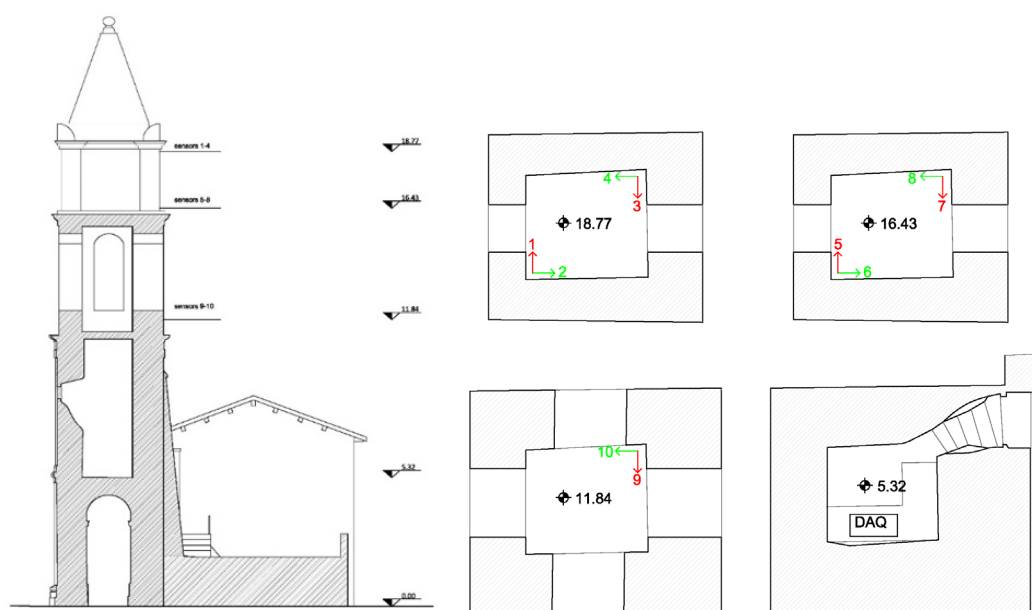


Figura 2.3. Layout sensori.

Alla quota 18,77, alla base della cuspide, sono state installate due coppie di sensori in due angoli opposti (Figura 2.4); a quota 16,43 sono state installate altre due coppie secondo lo stesso allineamento; a quota 11,84 in uno spigolo, sempre allineato, è stata installata l'ultima coppia.

I cavi provenienti dai sensori convergono al livello inferiore a 5,32 m dove è stato installato il sistema di acquisizione composto da PC e centralina CompactDAQ 9184 con una risoluzione in frequenza di 24 bit, range dinamico di 102 dB e filtro anti-aliasing integrato e equipaggiata

con moduli NI 9234. La durata della prova è stata di circa un'ora per poter verificare il corretto posizionamento dei sensori e il corretto funzionamento di tutti i cavi per la fase successiva del monitoraggio in continuo.



Figura 2.4. Sensori 1 e 2 a base della cuspid.

2.8.3 Prova dinamica

I parametri modali sono stati estratti utilizzando tecniche OMA nel dominio della frequenza e del tempo per convalidare l'affidabilità dei risultati ottenuti e delle misurazioni effettuate. Le tecniche utilizzate (Rainieri e Fabbrocino, 2014) sono:

- Frequency Domain Decomposition (FDD);
- Covariance Driven Stochastic Subspace Identification (Cov-SSI);
- Second Order Blind Identification (SOBI).

FDD è un metodo nel dominio della frequenza non parametrico, globale, a singolo stadio e si basa sulla decomposizione del valore singolare della

matrice di densità spettrale (PSD). I picchi di risonanza possono essere identificati grazie ad un grafico dei valori singolari attraverso la selezione dei picchi e il corrispondente vettore singolare fornisce una stima della forma modale.

Cov-SSI è un metodo nel dominio del tempo parametrico globale a singolo stadio basato su una descrizione nello spazio degli stati del problema dinamico. I parametri modali sono estratti dalla matrice di stato e dalla matrice di output della struttura ottenuta misurando la sua risposta alle vibrazioni ambientali. L'estrazione delle proprietà modali con il metodo Cov-SSI si basa sulla scomposizione della matrice di Toeplitz delle covarianze.

SOBI è un metodo nel dominio del tempo non parametrico, globale a doppio stadio. A differenza di altri metodi di identificazione modale che avvengono in due fasi, SOBI fornisce la stima delle forme modali al primo step, mentre frequenze e rapporti di smorzamento vengono ricavati in un secondo momento mediante la post-elaborazione delle sorgenti ottenute.

Le suddette tecniche di analisi risultano implementate in un applicativo software commerciale, S2-OMA (<https://www.s2x.it/s2-oma>), impiegato per il presente studio.

Prima delle analisi è stato effettuato un pretrattamento dei dati grezzi per verificare l'eventuale presenza di anomalie come clipping, spikes e drop-out. Le analisi sono state effettuate utilizzando una serie temporale di

2800 secondi utilizzando una frequenza di campionamento di 100 Hz. La frequenza di campionamento utilizzata è sufficiente a garantire l'osservazione dei modi fondamentali del campanile. Prima dell'elaborazione dei dati, tutte le serie temporali sono state filtrate mediante filtro passa-banda di tipo Butterworth di ordine 6 e frequenza di taglio 0.12-10.00 Hz e successivamente decimate in modo da ottenere una frequenza finale di campionamento di 25.00 Hz.

L'elaborazione dei dati mediante metodi nel dominio della frequenza con FDD è stata effettuata calcolando gli spettri utilizzando una finestra di Hanning, con un overlap del 66%. La durata delle registrazioni è sufficiente ad assicurare numero di medie pari a 78, ottenendo una risoluzione in frequenza nel calcolo degli spettri pari a 0.01 Hz. Il grafico dei Valori Singolari per le serie temporali analizzate è riportato in Figura 2.5.

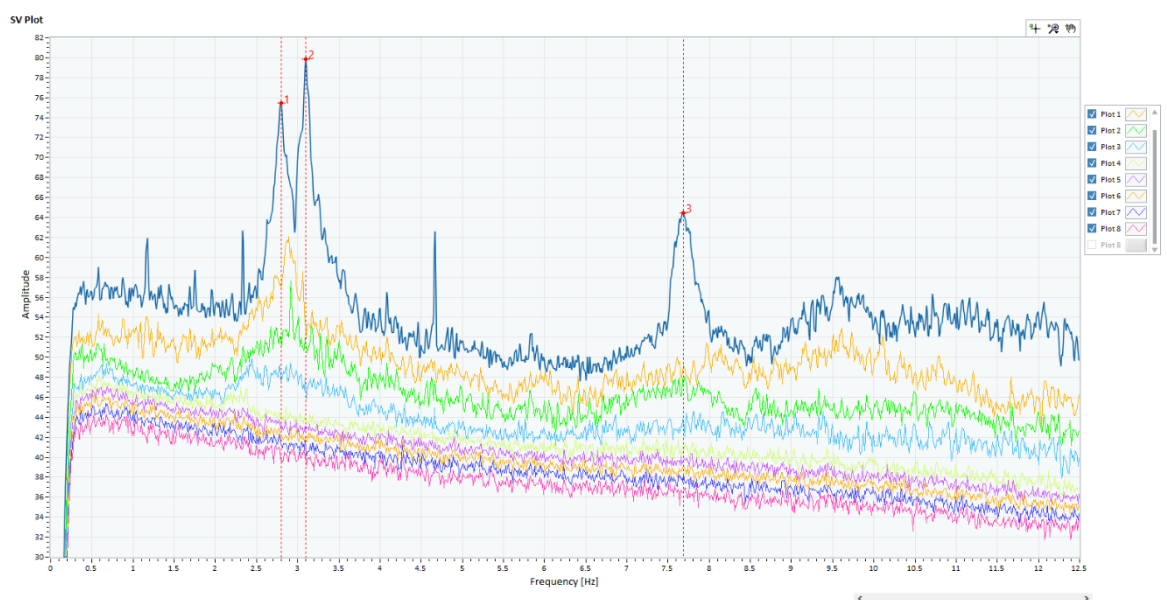


Figura 2.5. Grafico dei valori singolari.

L'elaborazione dei segnali nel dominio del tempo attraverso SOBI è stata condotta considerando un time lag di 500. I grafici delle sorgenti per le serie temporali sono riportati nelle Figure 2.6- 2.8.

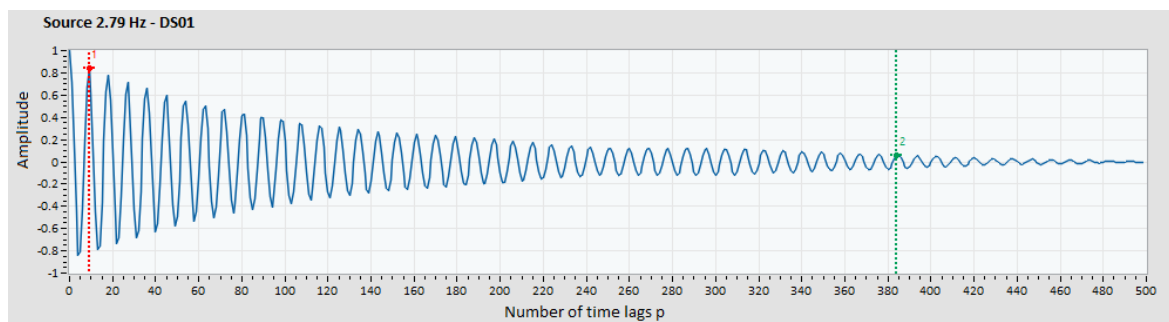


Figura 2.6. Grafico della sorgente alla frequenza di 2.79 Hz.

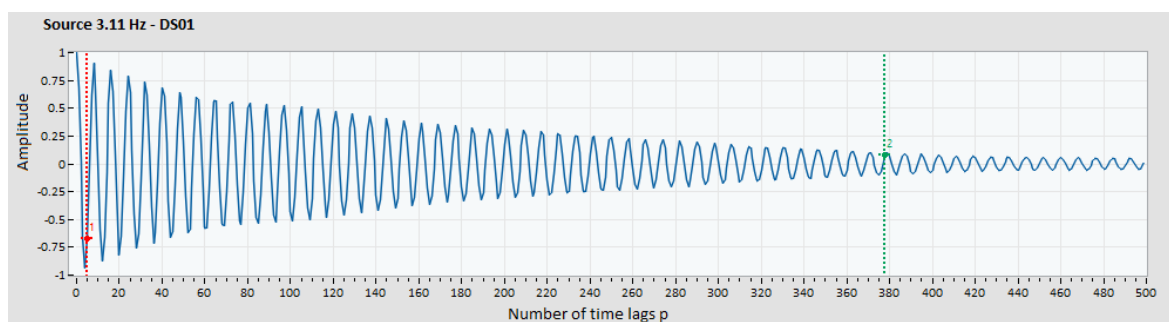


Figura 2.7. Grafico della sorgente alla frequenza di 3.11 Hz.

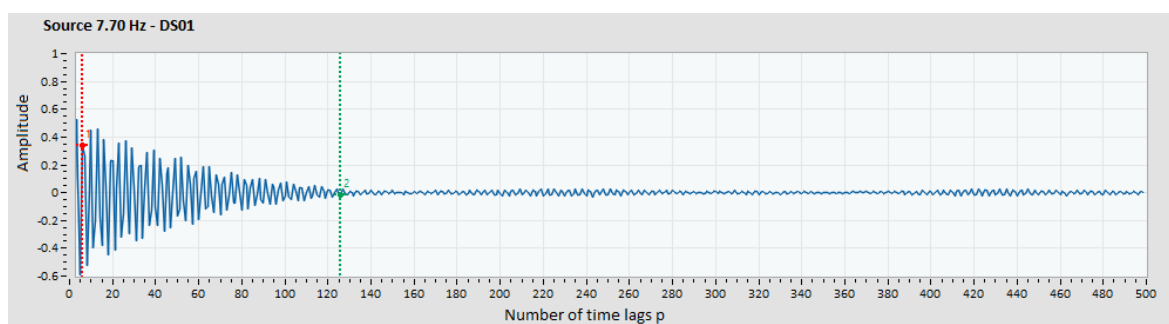


Figura 2.8 - Grafico della sorgente alla frequenza di 7.70 Hz.

L'elaborazione dei dati mediante Cov-SSI è stata effettuata con un numero di block-righe pari a 30 ed il diagramma di stabilizzazione è definito per valori dell'ordine del modello non superiori a 80. Il diagramma di stabilizzazione per le serie temporali analizzate è riportato in Figura 2.9.

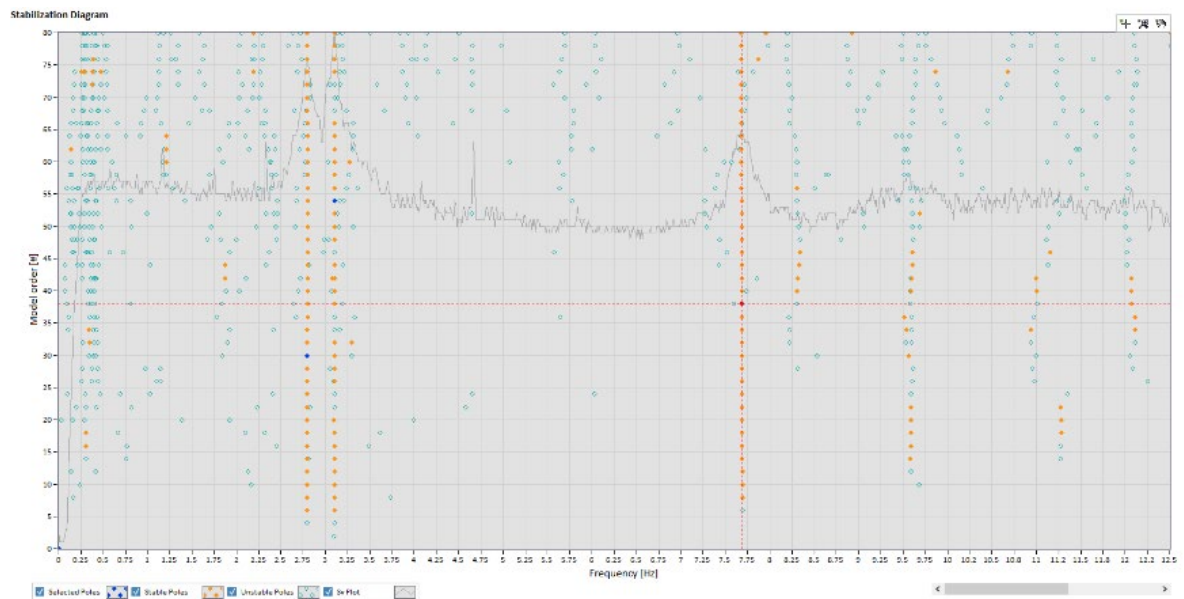


Figura 2.9. Grafico del diagramma di stabilizzazione

In Tabella 2.1 sono riportati i 3 modi identificati con COV-SSI e i relativi rapporti di smorzamento.

n. Modo	f [Hz]	Smorz. [%]
1	2.79	1.27
2	3.10	0.94
3	7.68	0.96

Tabella 2.1 - Frequenze naturali e rapporti di smorzamento.

In Tabella 2.2 sono riportate i valori delle ampiezze modali per ogni canale.

Ch.	Modo 1 2.79 [Hz]	Modo 2 3.10 [Hz]	Modo 3 7.68 [Hz]
Ch.1	1.000	0.764	0.291
Ch.2	-0.678	1.000	-0.542
Ch.3	-0.922	-0.724	1.000
Ch.4	0.660	-0.946	-0.876
Ch.5	0.866	0.627	0.415
Ch.6	-0.614	0.789	-0.576
Ch.7	-0.775	-0.596	0.810
Ch.8	-0.457	-0.301	0.277
Ch.9	0.322	-0.493	-0.255

Tabella 2.2 - Vettori delle forme modali sperimentali

In Tabella 2.3 sono riportati i risultati e i confronti delle analisi effettuate con i tre metodi.

Mode	Type	FDD	Cov-SSI		SOBI	
		f (Hz)	f (Hz)	ξ (%)	f (Hz)	ξ (%)
I	Transl.	2.79	2.79	1.27	2.79	0.95
II	Transl.	3.10	3.10	0.94	3.11	0.74
III	Torsional	7.69	7.68	0.96	7.70	1.33

Tabella 2.3. Confronto analisi effettuate.

Le rappresentazioni grafiche qualitative delle forme modali identificate sono riportate in figura 2.10.

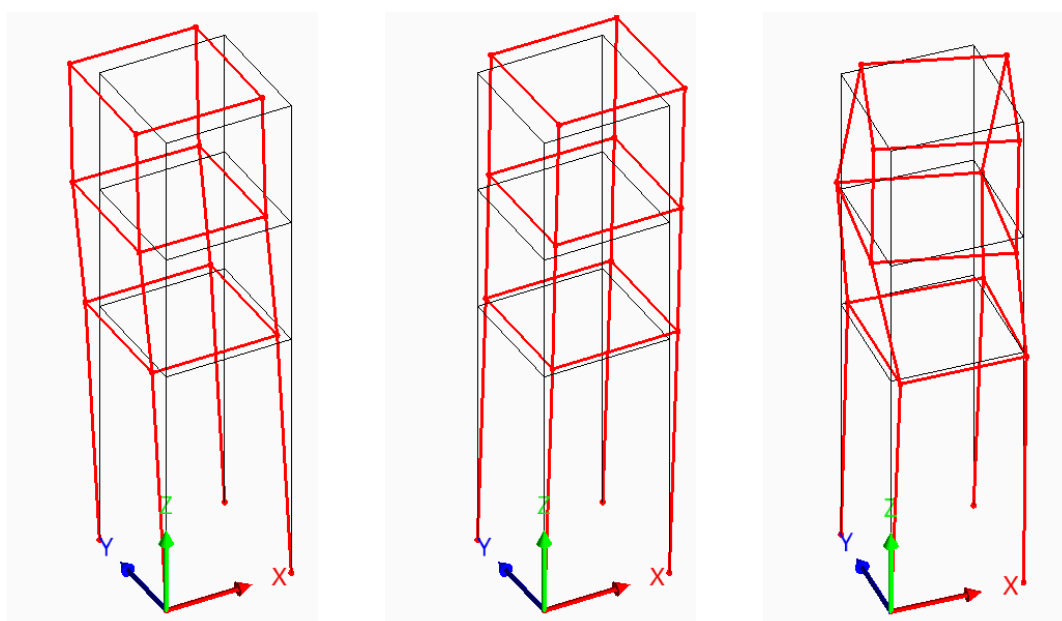


Figura 2.10. Rappresentazione delle forme modali (modi 1- 3 da sinistra verso destra)

La validazione dei risultati dell'identificazione si basa sul calcolo delle funzioni di coerenza tra coppie di segnali, nonché sul calcolo delle matrici AutoMAC e CrossMAC (Figura 2.11), e sulla rappresentazione dei Complexity Plots.

In Figura 2.12 i complexity plots mostrano che tutti i modi identificati sono normali. I primi due modi risultano flessionali diagonali, mentre il terzo modo è torsionale.

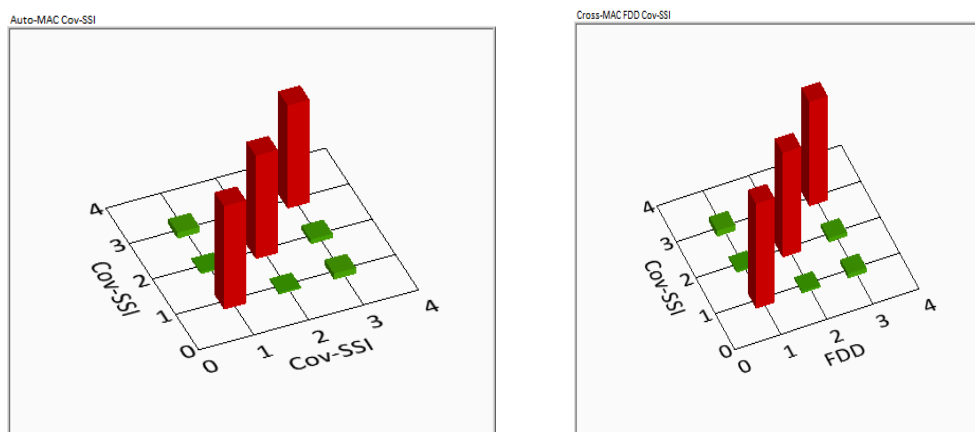


Figura 2.11. A destra la matrice degli AutoMAC tra le forme modali ottenute con Cov-SSI, a sinistra la matrice dei CrossMAC tra le forme modali ottenute dai metodi FDD Cov-SSI.

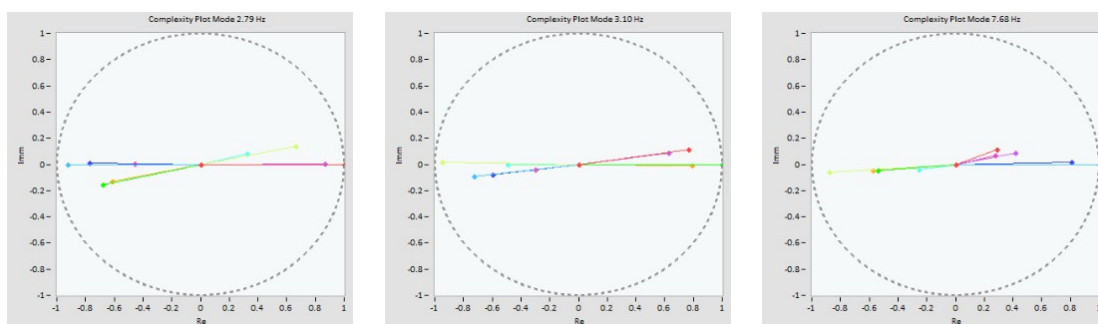


Figura 2.12. Complexity plot: Modi 1 – 3 da sinistra verso destra.

2.8.3 Monitoraggio in continuo

Dal 16 gennaio 2023, a valle della realizzazione di un nuovo impianto elettrico dedicato al sistema di monitoraggio, è iniziato il monitoraggio in continuo del campanile.

Il layout dei sensori non è stato modificato. Dati gli spazi ristretti si è deciso di installare un minipc fanless in un involucro di protezione rispetto a possibili danni da polvere o acque meteoriche e quindi garantire l'acquisizione continua. Il sistema di acquisizione è composto da pc, centralina e gruppo di continuità (Figura 2.13).



Figura 2.13. Sistema di acquisizione.

Per l'identificazione automatica dei parametri dinamici si è impiegato anche in questo caso un pacchetto software commerciale, S2-SHM (<https://www.s2x.it/s2-shm>), in grado di estrarre in maniera completamente automatica i parametri modali della struttura dall'analisi della sua risposta alle vibrazioni ambientali.

Il sistema acquisisce ad una frequenza di 100 Hz e i dati vengono scritti su file ogni 60 minuti. Sullo stesso PC è stato installato il software S2-SHM che elabora i file di acquisizione ottenendo una stima delle frequenze ogni 60 minuti. Per migliorare l'accuratezza e la stabilità delle

stime è stata impostata un'analisi che provvede all'applicazione di un filtro passa-banda Butterworth di ordine 6 tra 0.2 e 3.5 Hz e decimazione ad una frequenza di 10 Hz.

Avendo le stime ogni ora è possibile tracciare l'evoluzione nel tempo dei parametri modali e quindi identificare possibili anomalie nella risposta strutturale che si verificano a seguito di fenomeni di danneggiamento o degrado.

Grazie al tracking giornaliero e la disponibilità di dati di temperatura registrati da una stazione barometriche installata presso il castello, è possibile osservare variazioni delle frequenze durante la giornata.

In Figura 2.14 è riportato il tracking delle frequenze dei primi due modi e della temperatura per il periodo che va dal 16 Gennaio al 20 Febbraio.

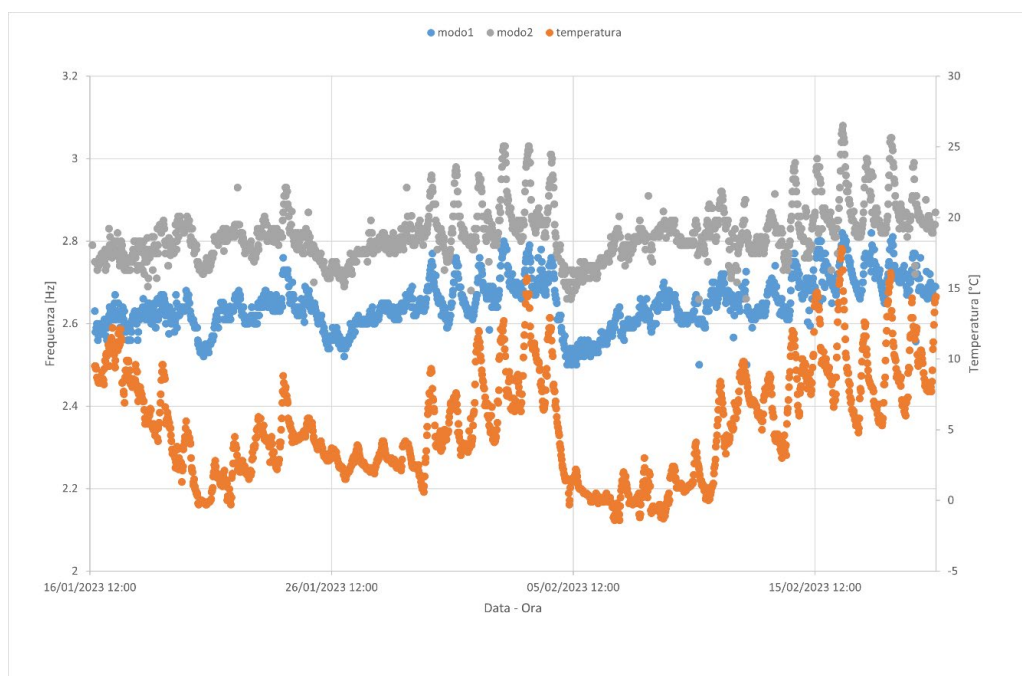


Figura 2.14. Tracking frequenze e temperatura.

L'oscillazione delle frequenze in condizioni operative è direttamente correlata alle variazioni della temperatura.

Il 28 marzo alle 23:52 si è verificato un evento sismico di magnitudo 4.6 a Montagano a 15 Km circa da Civitacampomariano. La risposta del campanile all'evento è stata registrata dal sistema di monitoraggio. In Tabella 2.4 sono riportati i valori massimi di accelerazione, velocità e spostamento di ogni canale. I dati di velocità e spostamento sono stati calcolati attraverso una doppia integrazione con la regola del trapezio.

Sensore	Accelerazione max [g]	Velocità max [cm/s]	Spostamento max [cm]
1	0.212363	17.36088	1.202819
2	0.223871	15.57291	1.045092
3	0.315404	17.55877	1.131679
4	0.222503	14.39911	1.010658
5	0.173445	13.87329	1.009201
6	0.164788	11.92485	0.837747
7	0.227042	13.23762	0.926177
9	0.130931	5.91218	0.468660
10	0.085875	6.362437	0.448250

Tabella 2.4. Valori massimi registrati.

Le accelerazioni massime registrate in testa al campanile sono superiori a 0.31g. Nelle Figure 2.15 – 2.26 sono riportate le serie temporali di accelerazione, velocità e spostamento registrate nella parte superiore del campanile dai sensori 1 – 4.

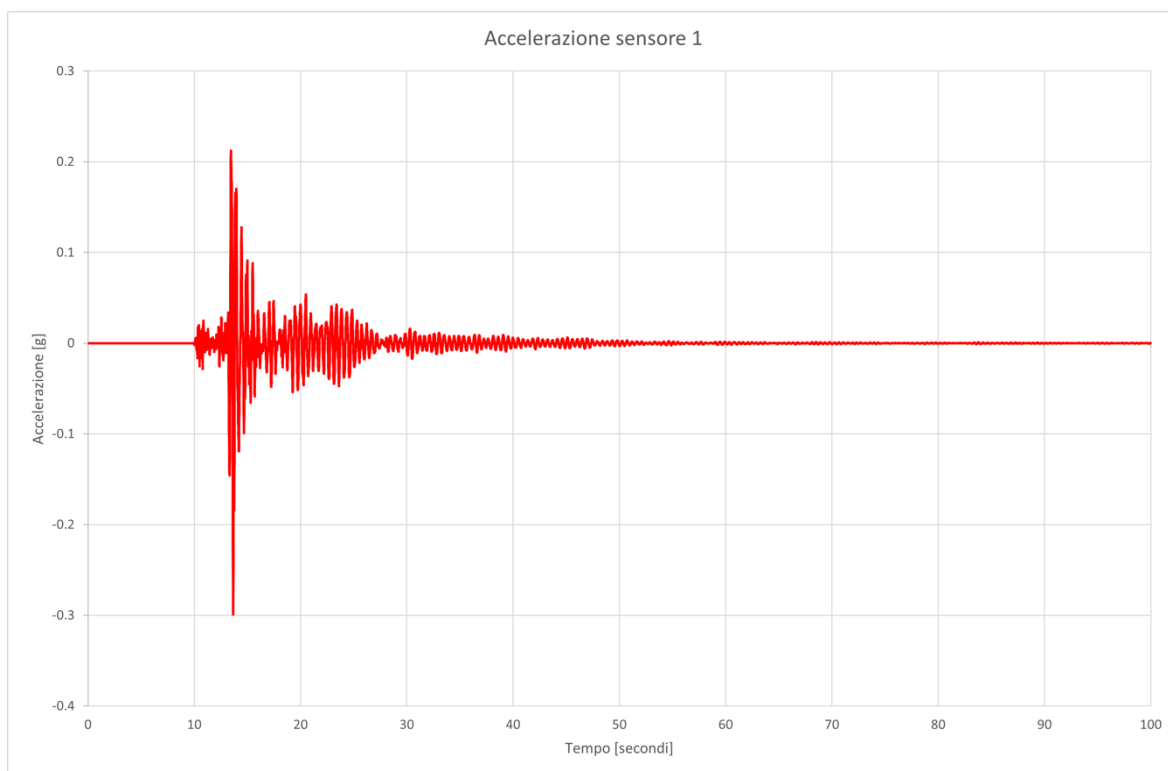


Figura 2.15. Serie accelerometrica sensore 1.

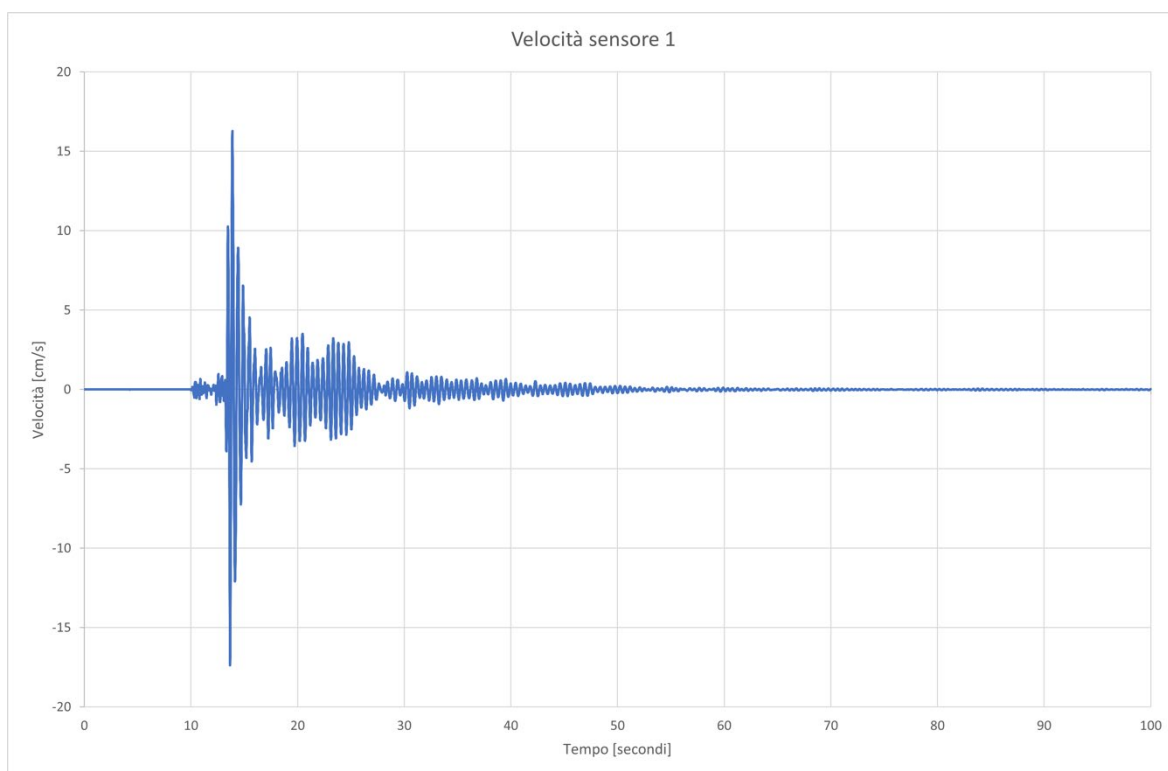


Figura 2.16. Serie temporale velocità sensore 1.

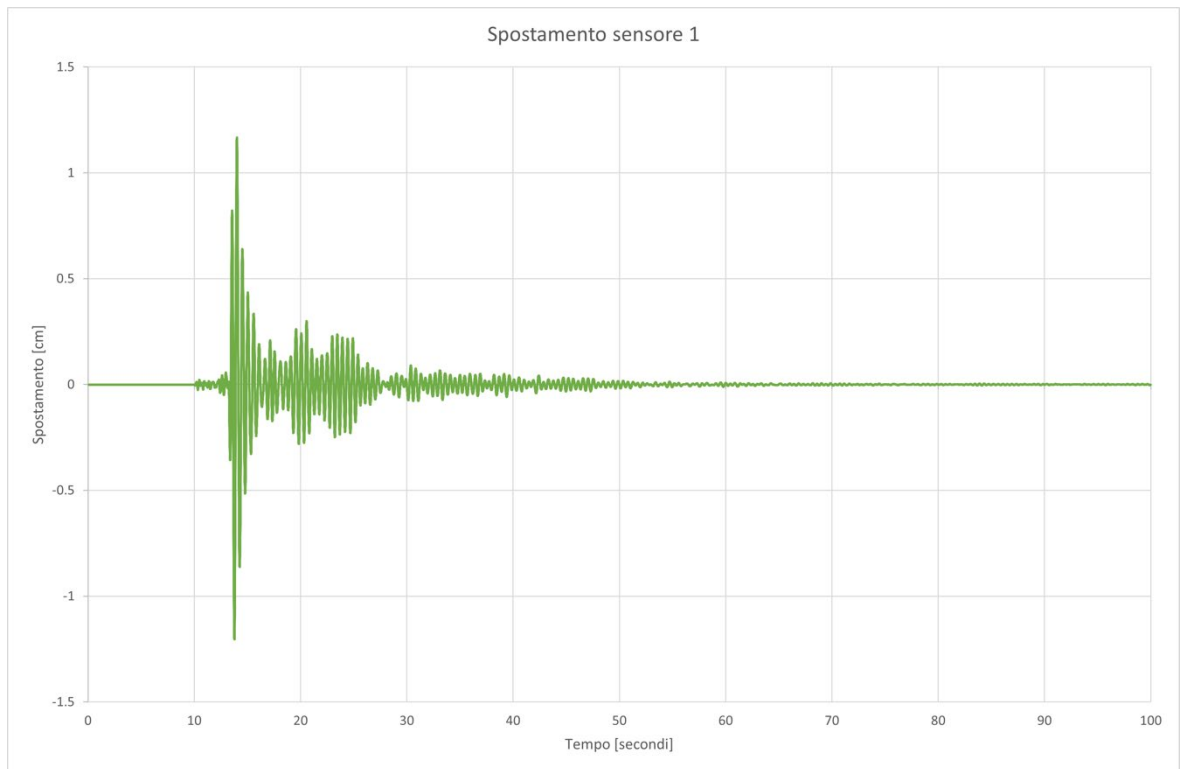


Figura 2.17. Serie temporale spostamento sensore 1.

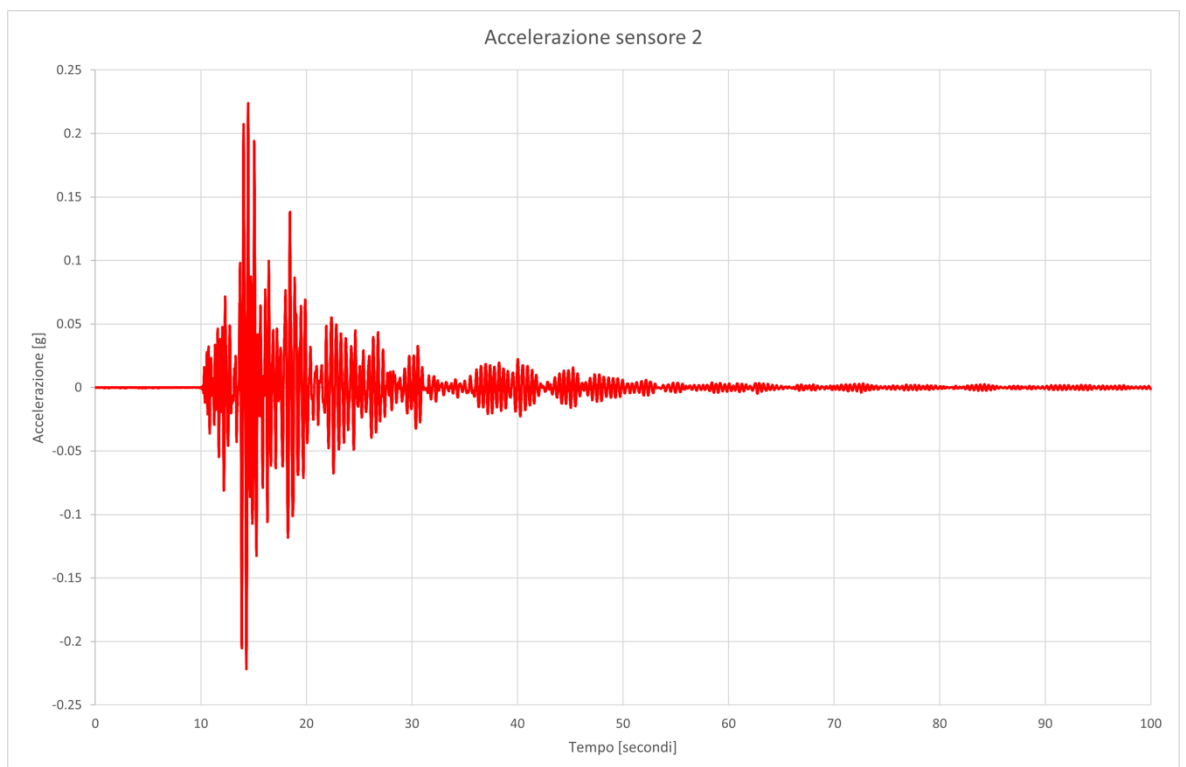


Figura 2.18. Serie accelerometrica sensore 2.

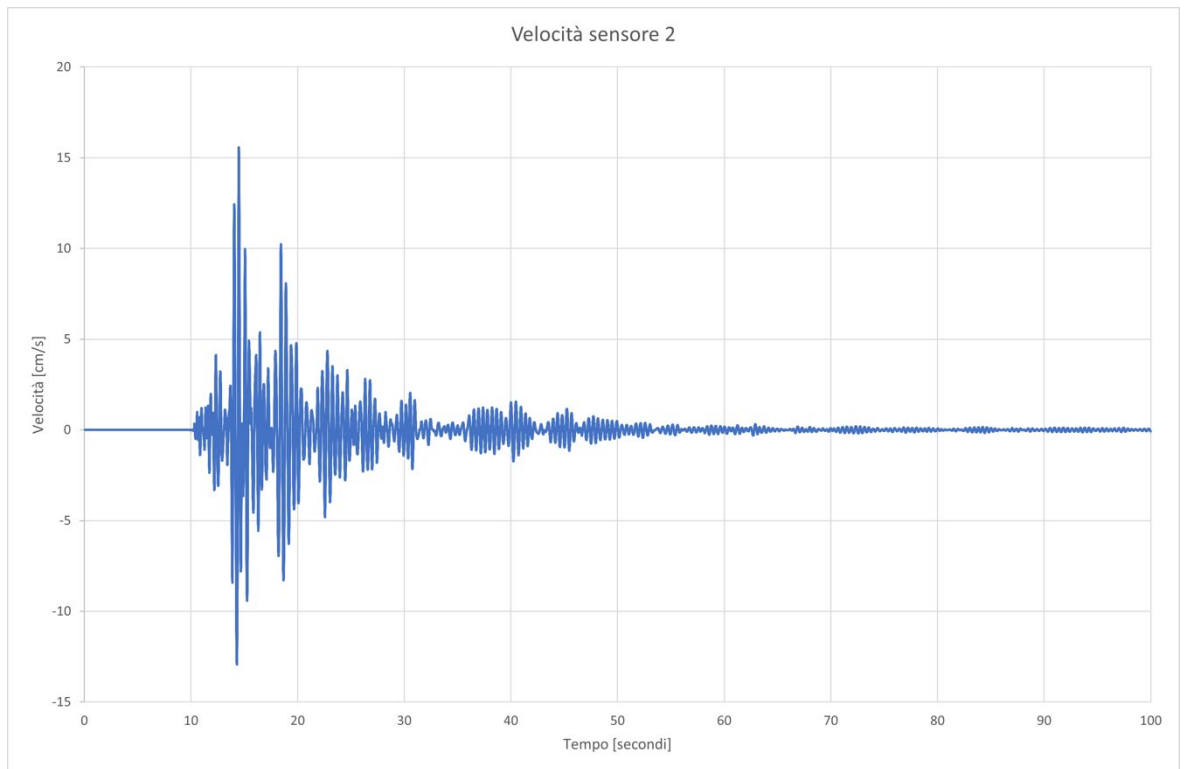


Figura 2.19. Serie temporale velocità sensore 2.

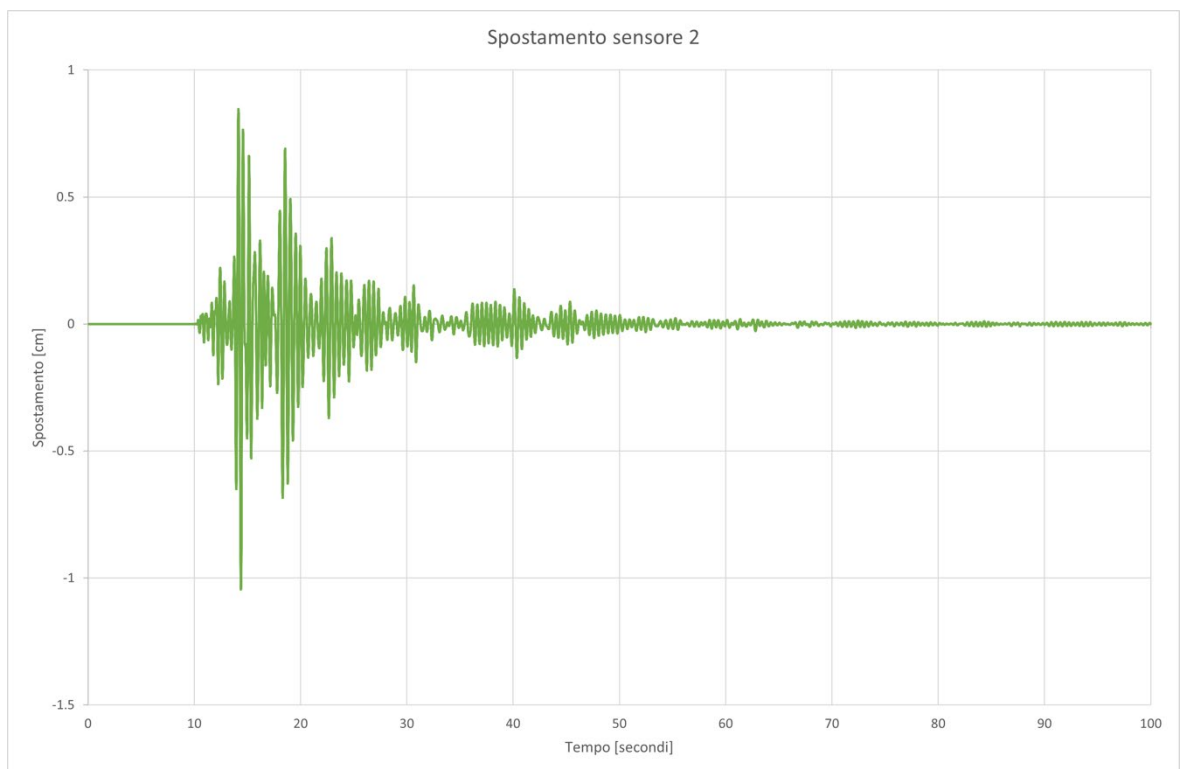


Figura 2.20. Serie temporale spostamento sensore 2.

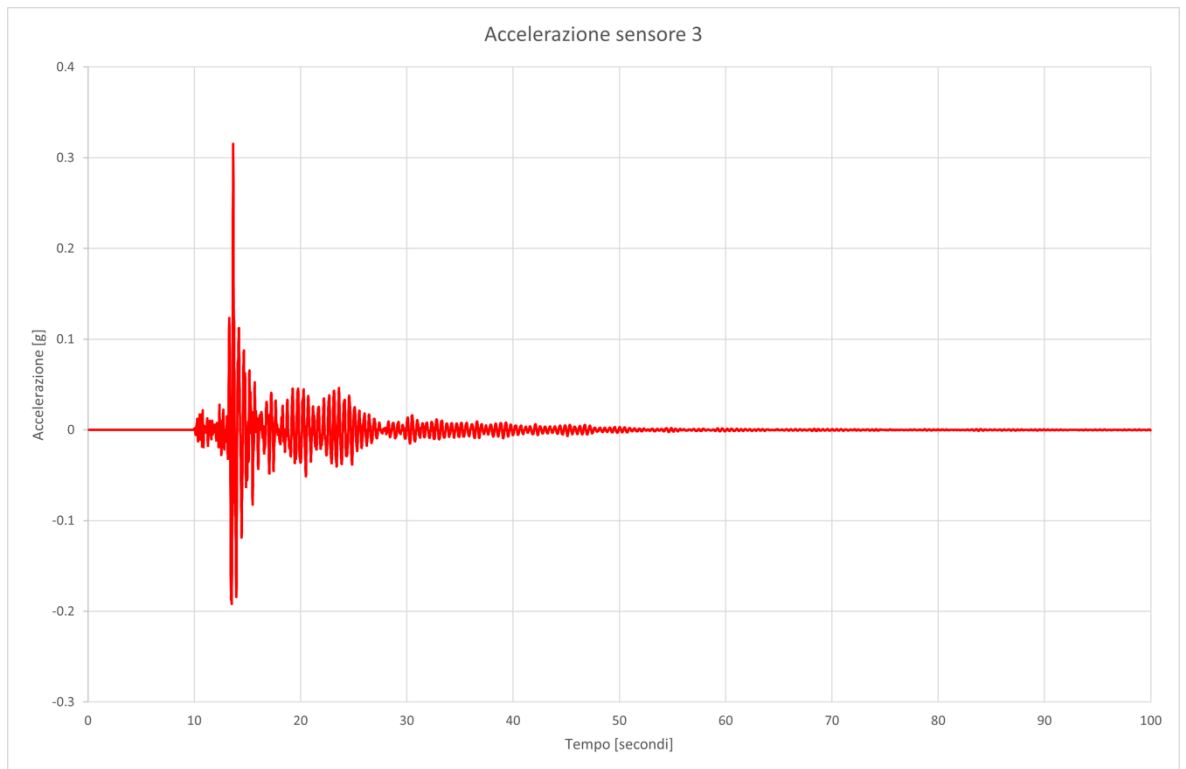


Figura 2.21. Serie accelerometrica sensore 3.

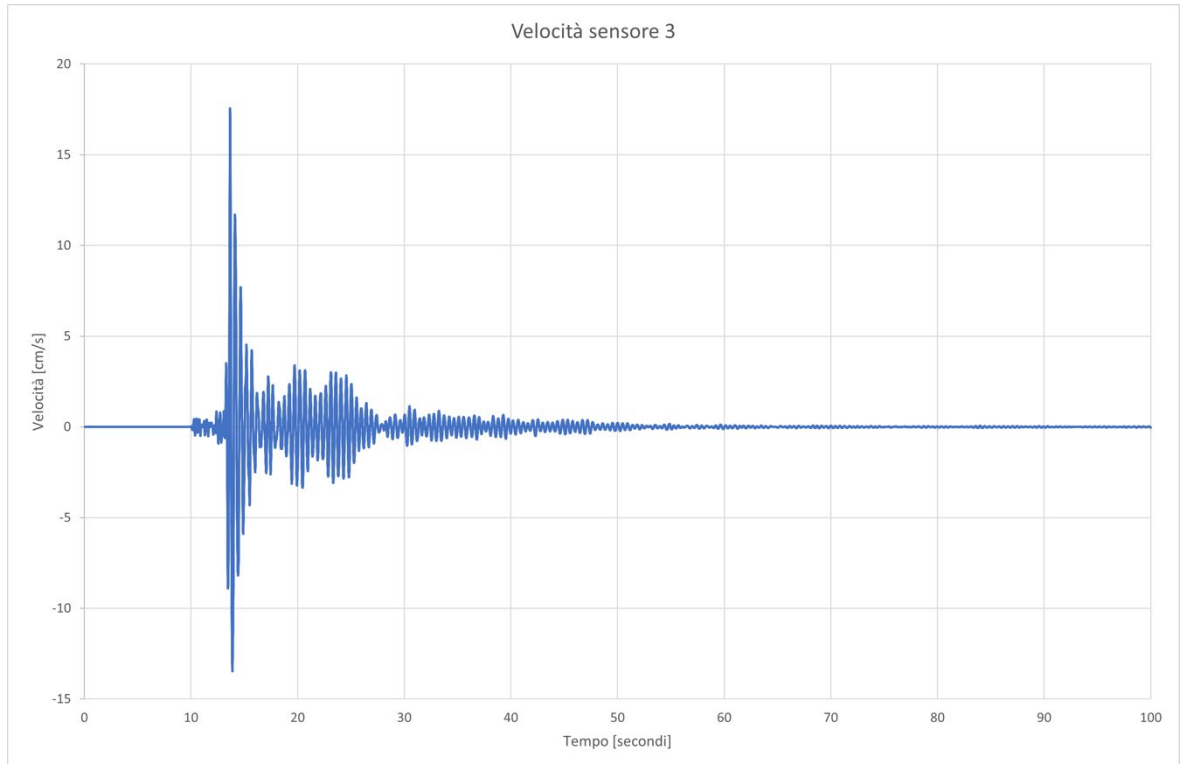


Figura 2.22. Serie temporale velocità sensore 3.

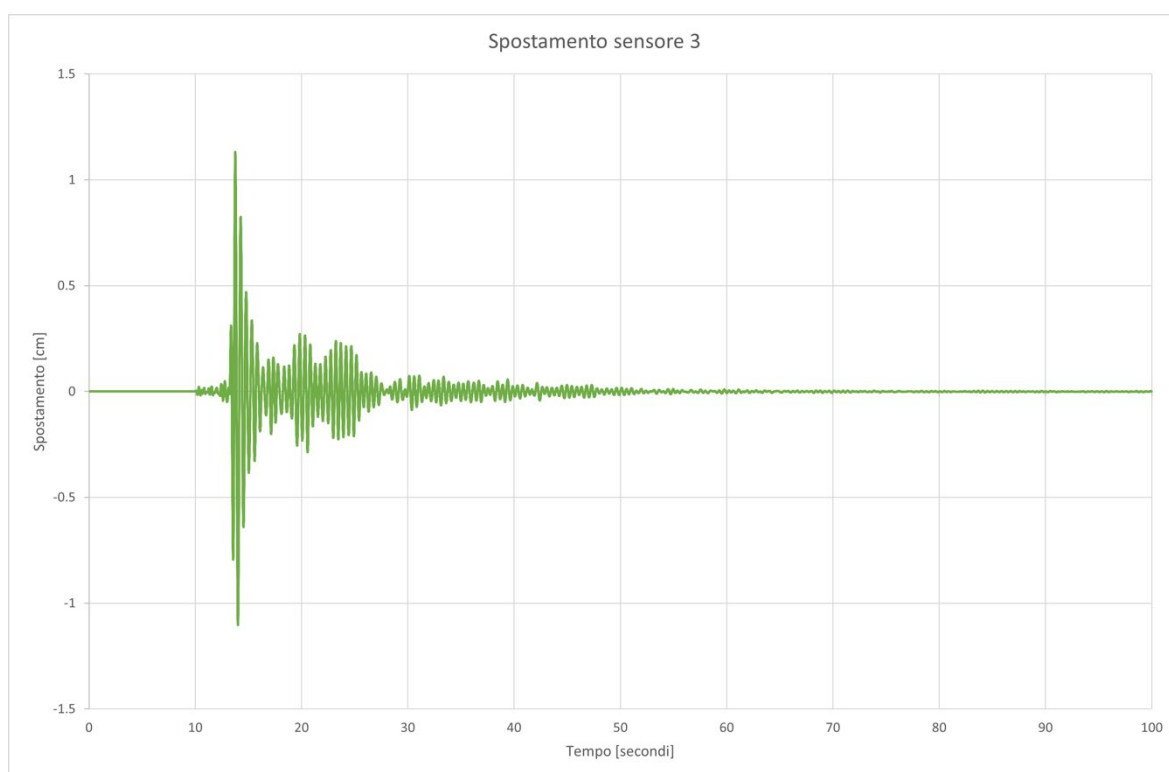


Figura 2.23. Serie temporale spostamento sensore 3.

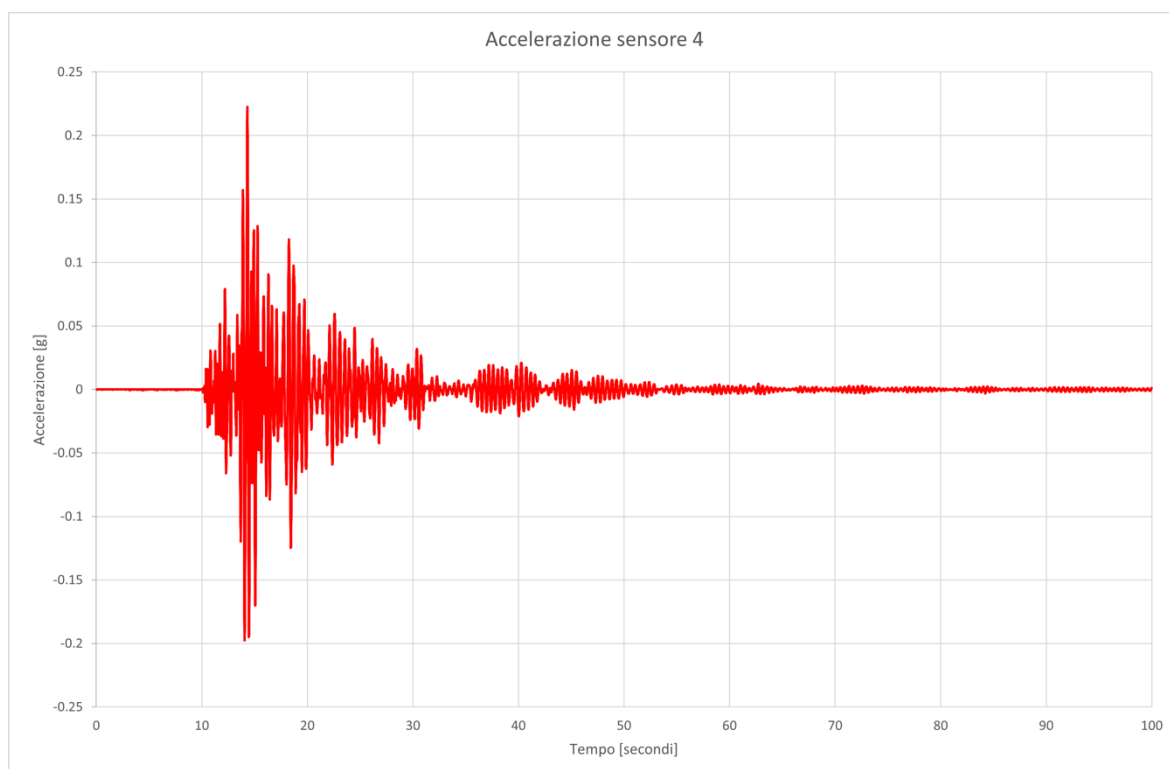


Figura 2.24. Serie accelerometrica sensore 4.

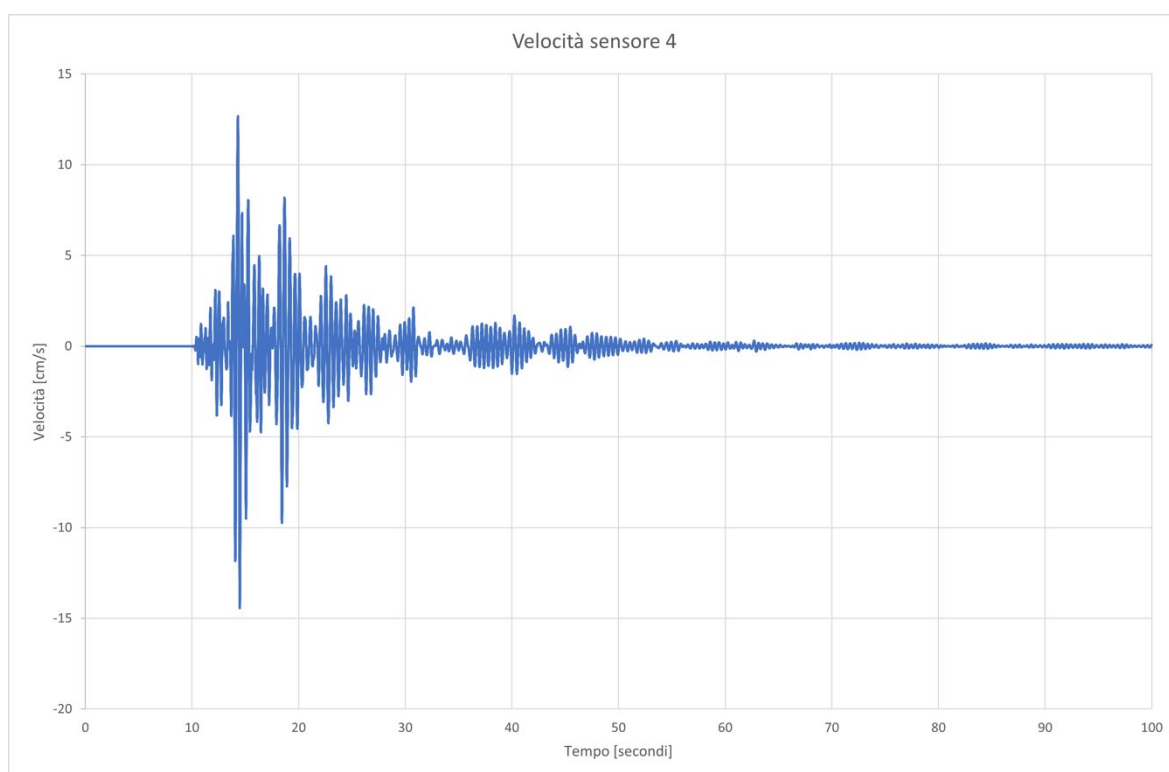


Figura 2.25. Serie temporale velocità sensore 4.

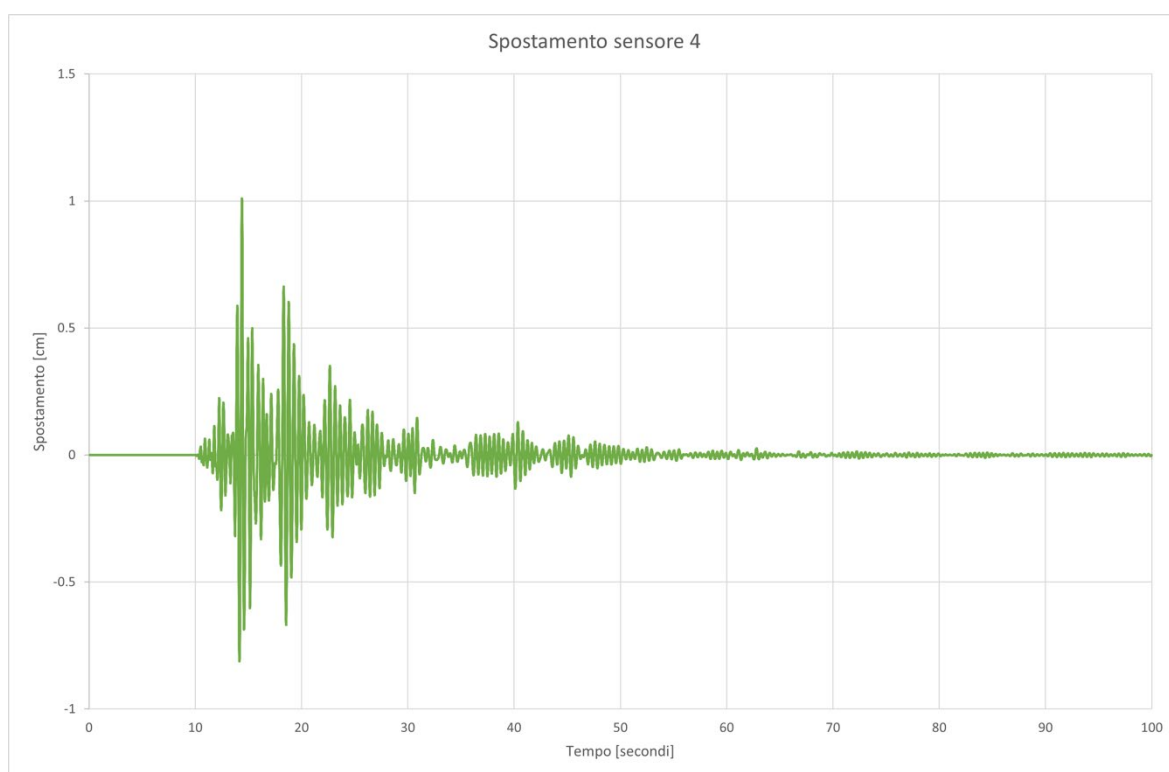


Figura 2.26. Serie temporale spostamento sensore 4.

L'effetto del sisma si può apprezzare anche nella Figura 2.27: infatti, l'avvenimento del sisma è associato ad un brusco abbassamento di entrambe le frequenze fondamentali del campanile.

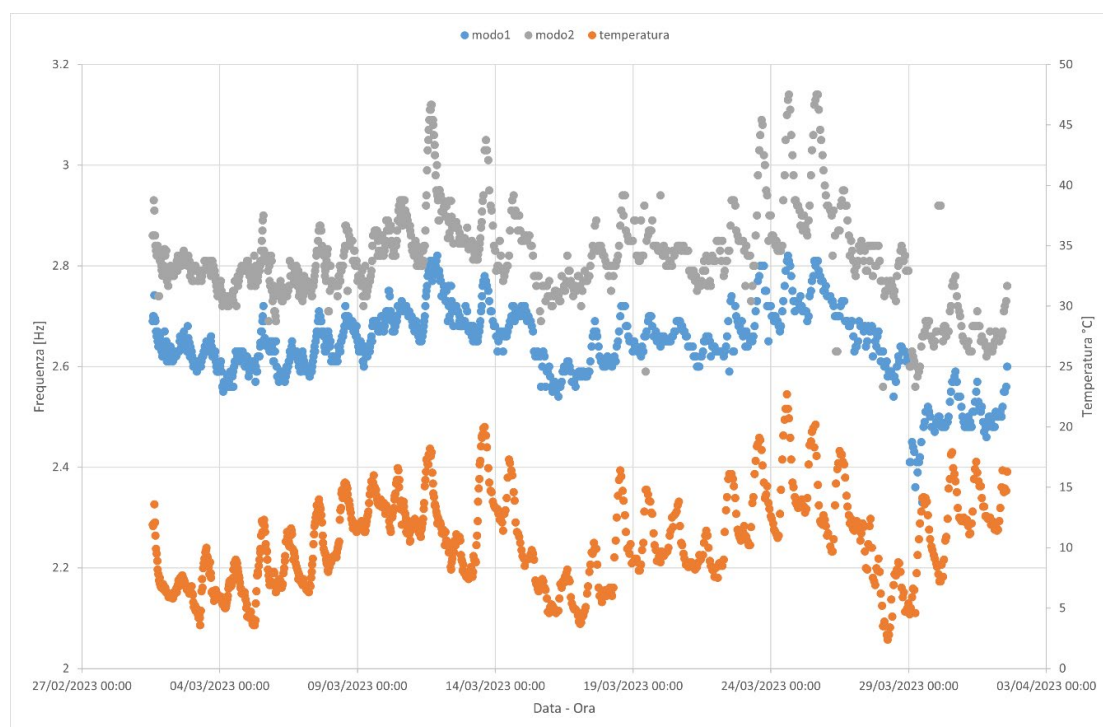


Figura 2.27. Tracking 1 Marzo – 1 Aprile.

L'effetto del terremoto è anche chiaramente visibile quando si tracciano le frequenze naturali in funzione della temperatura locale distinguendo i dati registrati prima e dopo l'evento sismico (Figure 2.28 – 2.29).

I risultati finora ottenuti dal monitoraggio in continuo del campanile di Civitacampomariano in condizioni operative e dopo l'evento sismico non sono sufficienti ad identificare con certezza l'insorgenza di anomalie nella risposta strutturale. Lo studio è tuttora in corso, e i dati in fase di acquisizione, unitamente ad un rilievo di dettaglio della struttura, consentiranno di pervenire a un giudizio sulla salute strutturale a valle dell'evento sismico.

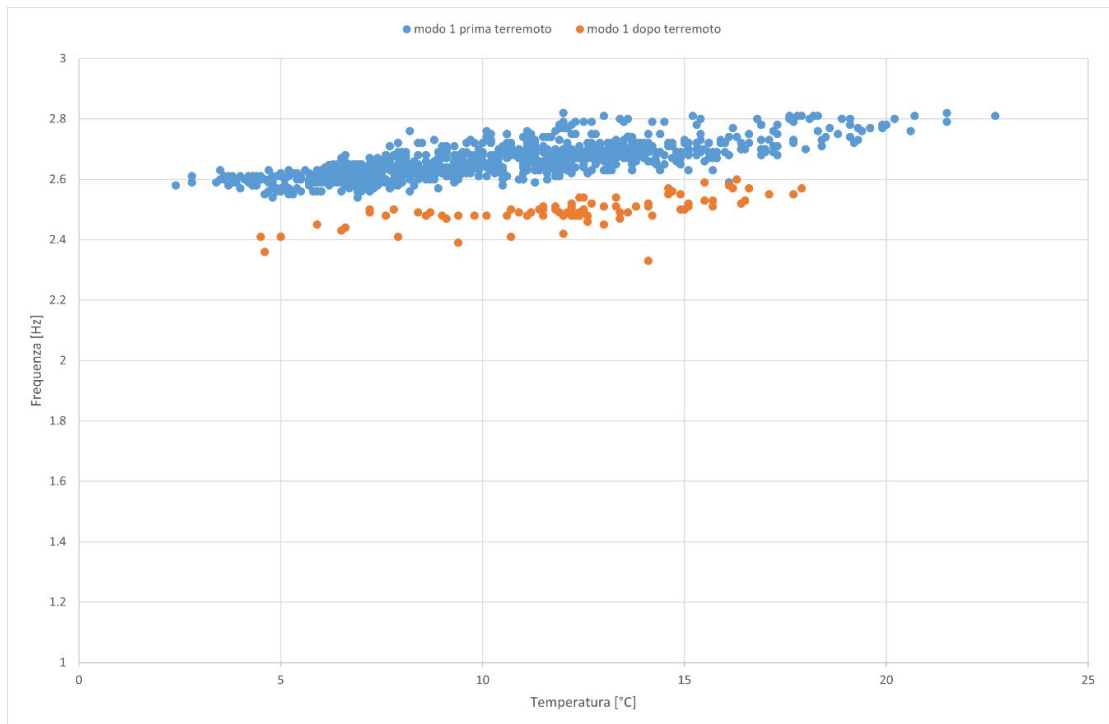


Figura 2.28. Frequenza modo 1 in funzione della temperatura prima e dopo il terremoto.

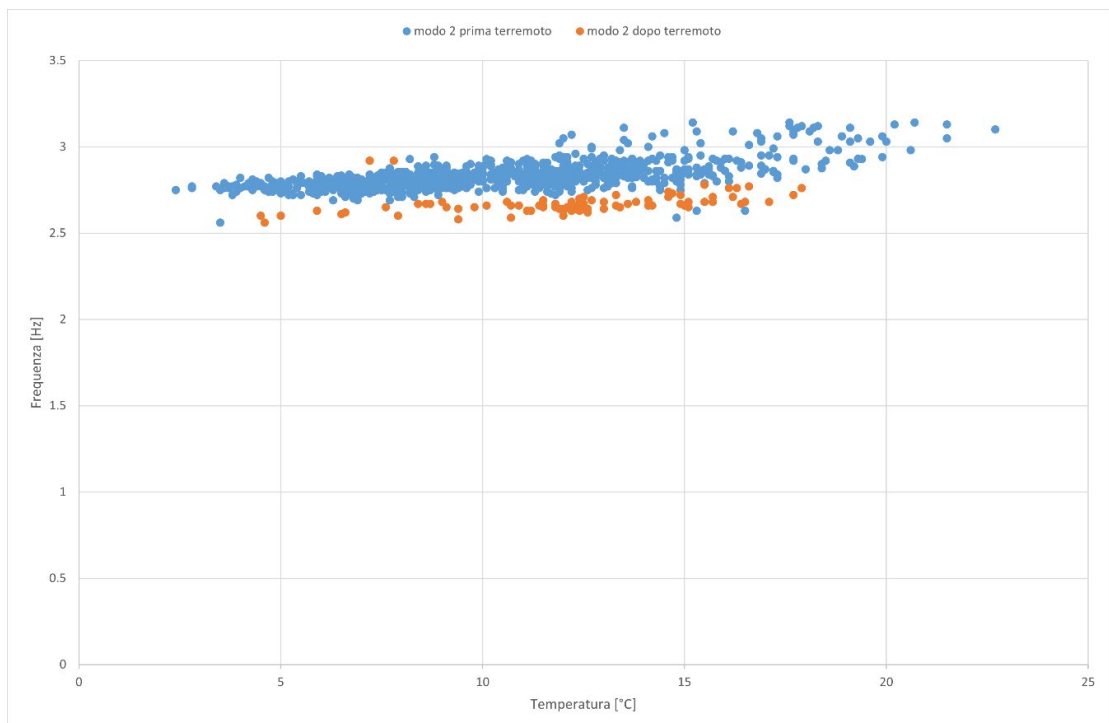


Figura 2.29. Frequenza modo 2 in funzione della temperatura prima e dopo il terremoto.

Il drop osservato a seguito dell'evento sismico sarà oggetto di ulteriori studi verificando i dati acquisiti. Ad ogni modo, la presente applicazione testimonia il ruolo fondamentale che può svolgere un sistema di monitoraggio strutturale in continuo basato sui parametri modali nella valutazione da remoto dello stato di salute delle strutture storiche in zona sismica.

CAPITOLO 3 – IL BIM COME STRUMENTO DI SUPPORTO ALLA GESTIONE DEGLI INTERVENTI

3.1 Introduzione

Le potenzialità attualmente offerte dagli strumenti ICT (Information and Communication Technology) nel settore delle costruzioni e degli appalti pubblici consentono di controllare le fasi realizzative e di indagare e controllare le prestazioni di un manufatto come difficilmente è stato possibile in passato. Ciò è dovuto anche a una serie di normative (Decreto Ministeriale n 560 del 2017 e Decreto Ministeriale n 312 del 2021) riguardanti la progettazione, la costruzione e la gestione delle strutture.

Il Building Information Modeling (BIM) svolge un ruolo primario nel settore AEC (Architecture, Engineering, Construction) poiché rappresenta uno strumento per una transizione completa verso la digitalizzazione del settore delle costruzioni che ha trasformato il modo di fare e approcciarsi agli edifici, nuovi e esistenti.

Si tratta di un processo complesso che nasce per le nuove costruzioni e solo successivamente è stato esteso al costruito, con lo scopo di preservare tutte le informazioni rilevanti relative a qualsiasi fase del ciclo di vita della costruzione e, come tale, richiede diverse ed eterogenee capacità di scambio di dati. La caratteristica chiave di questo processo è l'interoperabilità che rappresenta la capacità di scambiare tipologie di dati eterogenee tra le applicazioni, che rende più fluido il flusso di lavoro e ne può facilitare l'automazione (Eastman

et al. 2011). Il decreto BIM sancisce che le stazioni appaltanti devono utilizzare piattaforme interoperabili con formati aperti non proprietari.

Data la possibilità di poter gestire i dati provenienti dal monitoraggio strutturale attraverso il BIM, sono state realizzate delle analisi di interoperabilità attraverso il formato IFC (Industry Foundation Classes) dei principali software in commercio. La possibilità di scambiare informazioni, senza perdere dati e qualità, assume un ruolo di primaria importanza nell'ottica di integrazione delle varie discipline AEC (Architecture, Engineering and Construction).

La progettazione architettonica viene comunemente eseguita in un ambiente di modellazione definito CAD (Computer Aided Design), mentre la progettazione ingegneristica avviene in un ambiente di simulazione e analisi denominato CAE (Computer Aided Engineering). Pertanto, il passaggio da CAD a CAE è una delle fasi fondamentali del processo BIM. La piena interoperabilità è ciò che ci si aspetta in qualsiasi contesto di progettazione in cui diverse discipline e ambienti software associati convergono.

In letteratura sono noti i problemi di interpretazione del modello (mancanza di informazioni parametriche, elementi non riconosciuti e disgiunti) durante lo scambio di dati CAD-CAD e CAD-CAE.

3.2 Interoperabilità

La possibilità di passare direttamente da un modello CAD a uno CAE può avvenire solo se tutti gli strumenti software sono in grado di condividere le stesse informazioni estratte dal modello.

Vale la pena notare che l'interoperabilità è un concetto complesso e non può essere definito in modo univoco. Una prima distinzione generale viene fatta in base al flusso di lavoro che può essere orizzontale o verticale. L'interoperabilità orizzontale è definita come uno scambio di dati tra due ambienti software BIM architettonici (CAD-to-CAD). L'interoperabilità verticale, invece, si riferisce allo scambio di dati tra ambienti software architettonici e strutturali (CAD-to-CAE) (Chiaia et al 2015). Ciò che è sempre più richiesto è la necessità di lavorare in un ambiente in cui lo scambio di dati può avvenire in maniera bidirezionale da e verso qualsiasi ambiente.

Esistono due modalità di trasferimento (Xu 2009) tra due ambienti di progettazione a seconda di come vengono trasferiti i dati:

- **Direct Link (DL)** dove si utilizza un collegamento automatico tra due diversi ambienti software mediante un plug-in espressamente rilasciato a tale scopo. I dati dell'ambiente di invio vengono mappati per quelli dell'ambiente di ricezione. Lavorando in questo modo, non è necessario alcun traduttore di dati intermedio esterno e il processo di scambio appare altamente efficiente. Purtroppo la diffusione di formati proprietari può rappresentare un limite per l'interoperabilità in quanto i DL, solitamente, funzionano solo in modalità one-to-one. A differenza dei formati aperti, sono caratterizzati da restrizioni o limitazioni d'uso. In ottica di interoperabilità, dove si possono utilizzare diverse soluzioni software, i DL non sembrano essere la soluzione giusta per lo scambio di dati.

- **Neutral Link (NL)** consiste nell'adottare un formato di scambio indipendente e rappresenta l'approccio più appropriato a una metodologia basata sul BIM. La maggior parte dei dati descrittivi degli edifici, relativi alle discipline edilizie e alle varie fasi del ciclo di vita dell'edificio, sono raccolti e gestiti in formato neutro. L'obiettivo principale dei formati neutri è garantire l'accesso a lungo termine ai dati senza incertezza riguardo ai diritti legali o alle specifiche tecniche. Il formato aperto neutro più utilizzato nel BIM è l'Industry Foundation Classes (IFC), sviluppato da buildingSMART. È uno standard che descrive gli oggetti, le loro caratteristiche e le loro relazioni che può diventare uno standard per lo scambio di file con i dati del modello. L'IFC mira a garantire l'interoperabilità, indipendentemente dal software CAD/CAE.

Uno dei principali vantaggi dell'utilizzo di un approccio BIM basato su IFC è la capacità di poter combinare le funzionalità di diverse applicazioni software, di confrontare i risultati tra diversi cicli di analisi e di condividere i materiali del progetto tra diverse discipline e fasi.

L'interoperabilità orizzontale, utilizzando il formato IFC, è molto diffusa e, in pratica, un software CAD basato su BIM nella maggior parte dei casi può gestire adeguatamente le informazioni scambiate di un modello architettonico. Invece, diversi problemi derivano dall'interoperabilità BIM che comporta lo scambio tra software CAD/CAE.

Nel passaggio da un modello geometrico/architettonico ad un modello analitico/strutturale per l'analisi strutturale, l'interoperabilità verticale mostra

tutte le sue carenze, evidenziando come, nonostante il formato IFC possa trattare informazioni strutturali, l'implementazione software di tutte le funzionalità del formato è ancora limitato. Una recente revisione critica relativa all'interoperabilità BIM CAD-to-CAE è riportata da Sibenik e Kovacic (2017). Nessun software testato è stato in grado di garantire la corretta connettività tra gli elementi strutturali.

3.2.1 Standard IFC

L'IFC è un formato aperto di scambio di dati, consolidato in tutto il mondo nel campo del BIM. Il formato consente lo scambio di dati non solo associati alle proprietà geometriche dei componenti, come pareti, travi e colonne, ma anche attributi eterogenei, ovvero le proprietà meccaniche e fisiche, i costi, tempo dei lavori di costruzione e molto altro ancora. Il formato IFC è ciò che rende veramente interoperabile un modello di dati orientato agli oggetti di una struttura tra diversi software legati al settore delle costruzioni. L'architettura interna di IFC si basa sulla struttura dello standard STEP (ISO 10303-21:2016) e buildingSMART mira a sviluppare lo scambio di dati attraverso il formato aperto.

Maggiore è la complessità di un lavoro da realizzare, maggiore è la diversificazione delle competenze professionali coinvolte nel processo e, di conseguenza, maggiore è la quantità di informazioni da scambiare. Spesso, la maggior parte di queste informazioni è ridondante o addirittura inutile per una fase specifica della progettazione o, in generale, per un flusso di lavoro di un progetto edilizio (Lee et al., 2011). I risultati sono una scarsa efficienza nelle

fasi di lavoro e la difficoltà a gestire le tipologie di informazioni scambiate. Tuttavia, questo scambio deve essere supportato dai diversi pacchetti software coinvolti nel processo durante il ciclo di vita di una struttura, pertanto la corretta interpretazione delle informazioni scambiate assume un ruolo fondamentale. Questo concetto è alla base della Model View Definition (MVD), un sottoinsieme dello schema IFC, che consente lo scambio di informazioni in diverse aree del processo di progettazione e costruzione di un edificio e definisce il dataset da trasferire in funzione dell'utilizzo.

Ogni versione IFC è associata a una serie di MVD buildingSMART ufficiali. La Model View più comune è Coordination View 2.0, correlata alla versione IFC2x3, che può trattare sia informazioni architettoniche che strutturali (buildingSMART International). Il CV 2.0 è uno schema ampio che copre sia i dati relativi ai processi CAD che CAE.

Lo Structural Analysis View (SAV) è un MVD appartenente all'IFC2x3 TC1 e ha lo scopo di integrare le informazioni relative all'ingegneria strutturale (buildingSMART International), come i carichi e le condizioni di carico, le condizioni al contorno, i vincoli, i materiali e le connessioni tra gli elementi.

L' IFC4 è la versione più recente ed è consigliata da buildingSMART per tutti gli sviluppi attuali. Questa versione non è ancora supportata e implementata nei vari software. In questa versione sono presenti due MVD: RV e DTV.

La Reference View (RV) ha lo scopo di definire un modello di riferimento sostanzialmente non modificabile. In questo caso lo scambio di dati è unidirezionale, e il suo utilizzo è principalmente legato alla validazione e verifica

del progetto e, in generale, applicato alla risoluzione di problematiche derivanti dalla geometria. Il Design Transfer View (DTV) risponde invece all'esigenza di trasferimento di dati che devono essere utilizzati in diversi contesti, come la progettazione, l'analisi, la stima dei costi e la gestione delle strutture. Il DTV può essere inteso come un CV 2.0 esteso, mentre RV è come il CV 2.0 ma con possibilità limitate di modifiche per i software riceventi.

Una versione molto recente, ma ancora in fase di sviluppo, è IFC4x3 che estende lo schema IFC alle grandi infrastrutture come ferrovie, strade, porti. IFC4 consente la modifica del modello da parte del software ricevente e facilita lo scambio di informazioni, tra cui MEP (meccanico, elettrico e idraulico), analisi strutturale e manutenzione della struttura (buildingSMART International). Il formato IFC4 è stato rilasciato per superare i limiti del formato passato nello scambio di informazioni tra diverse piattaforme.

3.2.2 Letteratura

L'analisi della letteratura sull'interoperabilità dello schema IFC in relazione ai problemi di analisi strutturale e progettazione è schematizzata in Tabella 3.1 considerando una finestra temporale di 10 anni. La tabella, anche se non esaustiva, evidenzia il contributo del presente studio in tale contesto e i suoi aspetti di novità, come la valutazione di IFC4-DTV raramente documentata prima.

Criteria		Geometry	Material	Dimension	Section Type
IFC 2X Add 1	Extended Geometric View			Pazlar and Turk 2008	
IFC 2x3	Coordination View 2.0	Sibenik & Kovacic 2020			
		Lai & Deng 2017			
		Aldegeily et al. 2018	Lai & Deng 2017	Sibenik & Kovacic 2020	Lai & Deng 2017
		Muller et al. 2017	Muller et al. 2017	Lai & Deng 2017	Taher 2016
IFC 2x3	Structural Analysis View	Sibenik 2016	Taher 2016	Sibenik 2016	Ramaji & Memari 2016
		Taher 2016	Ramaji & Memari 2016	Taher 2016	Nizam & Zhang 2015
		Ramaji & Memari 2016	Jeong et al. 2009	Ramaji & Memari 2016	Jeong et al. 2009
		Nizam & Zhang 2015		Jeong et al. 2009	
		Assessed herein	Assessed herein	Assessed herein	Assessed herein
IFC 4	Reference View	Marcolin 2017	Aldegeily et al. 2018	Marcolin 2017	Aldegeily et al. 2018
		Ramaji & Memari 2016	Marcolin 2017	Ramaji & Memari 2016	Marcolin 2017
			Ramaji & Memari 2016		Ramaji & Memari 2016
		Assessed herein	Assessed herein	Assessed herein	Assessed herein
IFC 4	Design Transfer View			Chiaia et al. 2015	
				Assessed herein	
IFC 4	Structural Analysis View			Marcolin 2017	
				Assessed herein	

Tabella 3.1 – Analisi letteratura sull'interoperabilità.

I primi studi (Pazlar e Turk 2008) sull'interoperabilità orizzontale basati sul formato IFC 2x Add1 e Extended Geometric View MVD hanno dimostrato le carenze di questo formato e la perdita di informazioni relativa alla geometria degli elementi, come il mancato allineamento di travi, pilastri e pareti, e alla perdita di proprietà, come il cambiamento di materiali, colori e forma degli elementi.

Con l'evoluzione del formato IFC, passato da IFC2x Add1 a IFC2x3, e la relativa introduzione del nuovo MVD Coordination View v2.0, la perdita di dati continuava a sussistere, e altri casi di studio hanno dimostrato che il problema era legato a una errata interpretazione della geometria degli elementi e dei risultati. Test di benchmark (Jeong et al. 2009) sono stati realizzati utilizzando il formato IFC2x3 riscontrando una mancanza di uniformità nel

modo in cui gli oggetti venivano mappati nello standard IFC. I pacchetti BIM utilizzati includevano Revit, ArchiCAD, Digital Project, Bentley Architecture e Tekla Structures.

Un'analisi dello scambio di dati tra Revit e Tekla, (Nizam e Zhang 2015) ha mostrato la perdita di dati e una rappresentazione errata della geometria e delle tipologie di sezione.

Test sull'interoperabilità orizzontale e verticale (Chiaia et al. 2015) tra software CAD, come Revit e ArchiCAD, e software CAE, come AxisVM, attraverso uno scambio di dati bidirezionale utilizzando lo standard IFC, hanno rilevato una perdita di dati relativi a geometria, sezioni e materiali.

Altri studi di interoperabilità verticale (Sibenik 2016) utilizzando i software AllPlan, Revit e ArchiCAD, lato CAD, e i software di analisi strutturale RFEM e SCIA Engineer, hanno evidenziato problemi come perdite nel trasferimento dei dati, interpretazioni errate di elementi lineari, planari e connettività degli elementi.

Altri test (Taher 2016) hanno evidenziato la mancanza di una corretta comunicazione tra il software BIM e il formato IFC contenente alcune carenze pratiche. Il lavoro è stato realizzato per testare l'uso del BIM nella progettazione strutturale utilizzando diversi software commerciali BIM e Structural BIM Tools (S-BIM Tools) come Revit, Robot Structural analysis, Rhinoceros e Tekla structure.

Un lavoro molto interessante (Ramaji e Memari 2016) ha riguardato la realizzazione di una piattaforma per poter implementare un modello analitico

strutturale partendo dal modello architettonico utilizzando lo standard MVD CV 2.0. La maggior parte dei pacchetti software di progettazione/analisi non era in grado di esportare MVD strutturali. Di conseguenza, la geometria degli elementi era soggetta a modifiche, mentre altre informazioni come i carichi e analisi della struttura non erano trasferibili. Sono stati utilizzati i software SAP2000, Tekla Structures e SCIA Engineering.

Altri test (Marcolin 2017) hanno cercato di implementare l'analisi dinamica della struttura attraverso MVD strutturali specifici sia per IFC2x3 che per IFC4 evidenziando ancora una volta la perdita di informazioni nello scambio di dati tra piattaforme CAD/CAE.

Un altro lavoro (Müller et al. 2017) si è incentrato sulla valutazione dell'interoperabilità nel dominio strutturale. I test con elementi strutturali importati ed esportati attraverso il formato IFC sono stati condotti due volte, con un intervallo di cinque anni. I risultati hanno mostrato che in questo periodo ci sono state evoluzioni delle prestazioni in termini di interoperabilità, ma la maggior parte dei problemi persistevano ancora.

Una serie di prove per testare l'interoperabilità bidirezionale sono state condotte da Lai & Teng (2018). Sono stati utilizzati modelli architettonici, strutturali e MEP per analizzare i problemi nel processo di importazione e riesportazione dei dati tra software eterogenei come ArchiCAD, Tekla Structures e MagiCAD per Revit. I problemi sono dovuti dalla diversa interpretazione degli oggetti nei differenti ambienti.

Altro lavoro sull'interoperabilità verticale (Aldegeily et al. 2018) con l'obiettivo dell'analisi strutturale basata su BIM attraverso il trasferimento di dati tra diversi software, come Revit, Robot Structural Analysis, SAP2000 e ETABS, tramite il collegamento diretto utilizzando un file nativo o un'interfaccia API e un file neutro IFC. Il lavoro ha evidenziato che lo standard IFC non era in grado di garantire un trasferimento completo dei dati rilevanti, come i carichi.

Sibenik e Kovacic (2020) hanno fornito un rapporto completo di valutazione dell'interoperabilità testando IFC2x3 sia per la progettazione architettonica che per l'analisi strutturale utilizzando software CAD come ArchiCAD, Revit, AllPlan e software CAE come RFEM e SCIA. Dopo aver evidenziato le questioni già menzionate in uno studio precedente (Sibenik 2016), gli autori hanno proposto di focalizzare lo scambio di dati su più schemi di dati specifici dei vari ambienti piuttosto che su uno schema integrato su cui si basa lo standard IFC.

3.3 Test interoperabilità

Per valutare lo stato attuale sono stati eseguiti dei test per verificare sia l'interoperabilità orizzontale (CAD – CAD) sia l'interoperabilità verticale (CAD – CAE) ma anche lo scambio di dati bidirezionale tramite IFC tra i pacchetti software CAD / CAE. Sono stati testati elementi monodimensionali quali travi e pilastri.

Nelle analisi sono stati utilizzati i formati IFC 2x3 Coordination View 2.0 e IFC 4 Data Transfer View. La metodologia seguita è stata fondata su un approccio analitico e pratico attraverso il confronto delle capacità del software e dei fattori chiave che differenziano le prestazioni del software.

In Tabella 3.2 sono riportati i software utilizzati, nelle Tabelle 3.3 e 3.4 sono riportati i software che supportano il formato IFC in importazione ed esportazione.

La valutazione dei software è stata valutata con le versioni 2017 ed è stata aggiornata fino alle più recenti release dei software nel 2021, valutando l'evoluzione nel tempo delle prestazioni del software. Le versioni (A) e (B) nella Tabella 3.2 indicano rispettivamente le release di partenza e le release finali dei pacchetti software testati.

Platform	Company	Software	Version (A)	Version (B)
CAD	Autodesk	REVIT	2017	2021
	NEMETSCHKEK	Allplan	2017	2020
	Graphisoft	ArchiCAD	2017	24
	ACCA Software S.P.A.	Edificius	2017	2020
CAE	Autodesk	Robot Structural Analysis	2017	2021
	Trimble Solutions Corporation	Tekla Structures	2018	2020
	Tecnisoft s.a.s.	ModeSt	8.15	8.23
	Dlubal Software	RFEM	5.14.02	5.23
	CSI	SAP2000	19.2.1	22
	ACCA Software S.P.A.	Edilus	2017	2020

Tabella 3.2. Software utilizzati per i test.

Le Tabelle 3.3 e 3.4 riassumono le versioni dei formati IFC supportate da tutti gli ambienti software testati rispettivamente per l'importazione e l'esportazione. Le tabelle mostrano come alcuni software nel corso degli anni hanno implementato il formato IFC, incluso IFC 4, e la capacità di gestire elementi di analisi strutturale in entrambi i formati IFC 2x3 e IFC 4.

Formats		IFC 2X3				IFC 4					
MVD		Coordination View 2.0		Structural Analysis View		Reference View		Design Transfer View		Structural Analysis View	
Software		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
CAD	Revit	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	Allplan	✓	✓	✓	✓	✗	✓	✗	✓	✗	✗
	ArchiCAD	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	Edificius	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
CAE	RSA	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Tekla Structures	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	ModeSt	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	RFEM	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓
	SAP2000	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓
	Edilus	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✓

Tabella 3.3. Software CAD/CAE che supportano l'esportazione nel formato IFC.

Formats		IFC 2X3				IFC 4					
MVD		Coordination View 2.0		Structural Analysis View		Reference View		Design Transfer View		Structural Analysis View	
Software		A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
CAD	Revit	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	Allplan	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	ArchiCAD	✓	✓	✗	✓	✓	✓	✓	✓	✗	✗
	Edificius	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
CAE	RSA	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	Tekla Structures	✓	✓	✗	✗	✗	✓	✗	✓	✗	✗
	ModeSt	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	RFEM	✗	✗	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗
	SAP2000	✓	✓	✓	✓	✗	✗	✓	✓	✓	✓
	Edilus	✓	✓	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗	✗

Tabella 3.4. Software CAD/CAE che supportano l'importazione del formato IFC

Il modello utilizzato per questi test è un telaio (Figura 3.1) costituito da 4 pilastri e 4 travi ed è stato realizzato per ogni software ed esportato in formato IFC per testare l'interoperabilità.

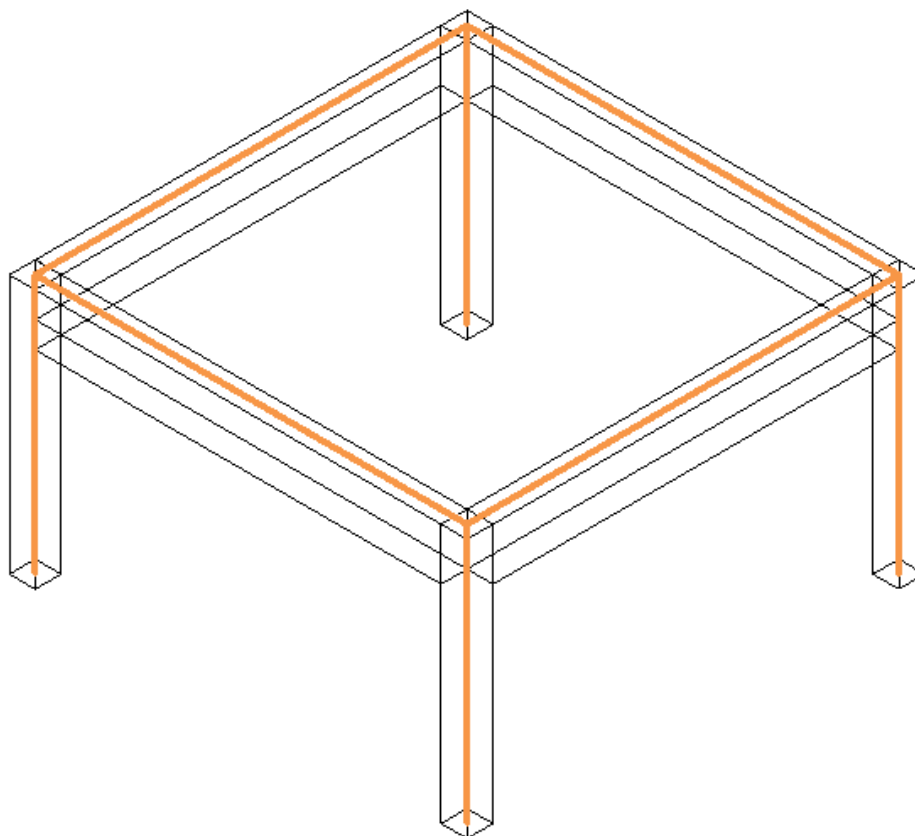


Figura 3.1. Modello utilizzato per i test di interoperabilità.

Prima di esportare il modello CAD, è stato effettuato uno studio preliminare per trovare le migliori impostazioni dei parametri di conversione per ottenere un trasferimento accettabile. Sono state adottate tutte le impostazioni suggerite per ogni ambiente disponibili nelle guide software e quelle consigliate dalle organizzazioni internazionali. La selezione delle opzioni più appropriate prima di tradurre i dati tramite IFC è fondamentale per il corretto interscambio del modello. Diversi ambienti dispongono, inoltre, di opzioni per

la mappatura dei vari elementi e materiali sia per l'importazione che per l'esportazione dei modelli. La maggior parte dei software offre la possibilità di utilizzare e modificare diversi traduttori IFC che possono influenzare il modello risultante.

Per ciascuno degli aspetti considerati è stata realizzata una tabella riassuntiva che riporta i risultati attraverso un sistema di valutazione a cinque livelli di punteggio:

1. **Poor.** Forte mancanza di corrispondenza tra le informazioni scambiate, dati e/o geometrie mancanti o difficilmente ricostruibili nel sistema ricevente, modello affetto da gravi carenze che ne impediscono l'utilizzo.
2. **Fair.** Diverse informazioni perse necessarie per il corretto utilizzo del modello. L'utente deve rimodellare e/o riassegnare i parametri chiave.
3. **Average.** La maggior parte delle informazioni viene conservata. Il modello può essere utilizzato solo dopo alcune modifiche o poche informazioni aggiuntive.
4. **Good.** La corrispondenza delle informazioni è buona e, dopo piccoli aggiustamenti, il modello è pronto per l'analisi.
5. **Excellent.** Corrispondenza perfetta di tutte le informazioni.

Tutti i modelli esportati sono stati controllati con il visualizzatore BIMvision per la verifica della geometria e tutti corrispondevano ai modelli nativi originali. Sono stati effettuati degli autotest per valutare le procedure di mappatura interna adottate dai vari software.

3.3.1 IFC2x3 Coordination View 2.0 (CV 2.0)

Il primo test di export/import, volto a verificare l'interoperabilità sia orizzontale che verticale, è stato realizzato nel formato IFC2x3 CV 2.0.

- **Revit.** Il modello CAD generato in Revit è stato esportato come file IFC e importato in altri ambienti. Per quanto riguarda l'interoperabilità orizzontale, il modello geometrico importato concorda con quello originale, mentre i dati del materiale sono limitati solo al nome del materiale. Per quanto riguarda i parametri, sono state riscontrate alcune differenze. L'autotest ha dimostrato che le dimensioni della sezione non sono completamente modificabili (ovvero solo la lunghezza può essere modificata ma non la dimensione della sezione). Anche alcune dimensioni, come la posizione relativa delle colonne, non possono essere modificate direttamente. Il modello importato in Allplan e ArchiCAD è invece completamente interoperabile. In Edificius il file IFC deve essere importato in un nuovo progetto ma permette di modificare solo pochissime semplici caratteristiche, come colore, trasparenza, snap, ecc; il file importato è essenzialmente un modello di riferimento. Tra gli ambienti CAE, i problemi di geometria si verificano in RSA e SAP2000: le travi appaiono ruotate di 90° attorno ai loro assi (Figura 4.2). Il modello analitico generato in RSA dal modello geometrico mostra elementi disgiunti, che richiedono modifiche aggiuntive nel software di ricezione. Per quanto riguarda RFEM, il software non è in grado di importare le quattro colonne a causa della diversa tipologia di rappresentazione

adottata da Revit. I dati dei materiali possono essere associati agli oggetti solo se il loro nome importato corrisponde alla libreria dei materiali interna. ModeSt, invece, può leggere correttamente il modello in termini di geometria e contenuto informativo sui materiali, mentre alcune caratteristiche parametriche vengono perse (le posizioni parametriche degli elementi). Analogamente a ModeSt, Tekla Structures funziona bene e l'utente può facilmente modificare tutti i parametri geometrici. Il materiale acciaio è associato a tutti i componenti originariamente definiti come cemento armato. EdiLus può importare correttamente il modello ma non sono consentite modifiche parametriche.

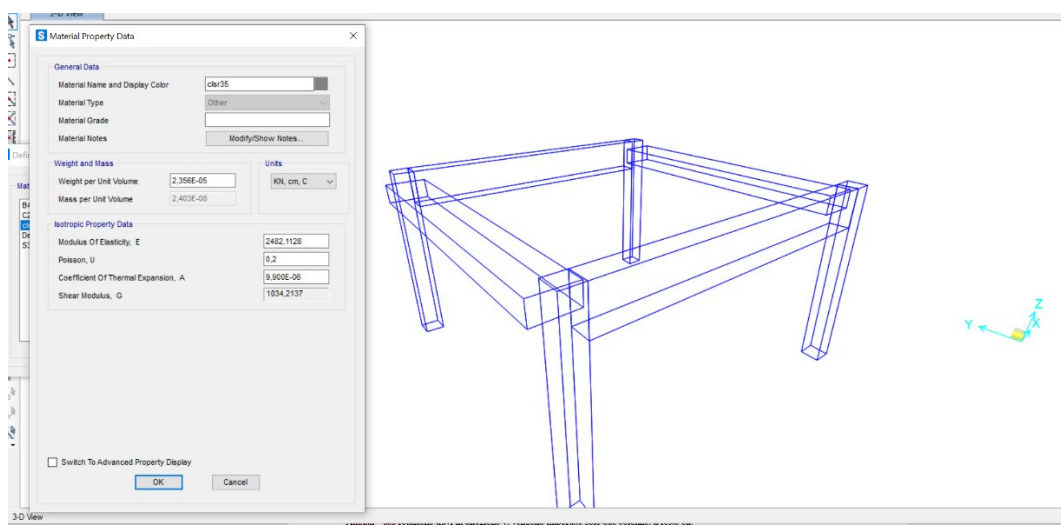


Figura 3.2. Modello realizzato in Revit ed importato in SAP2000.

- **ArchiCAD.** Grazie alla possibilità di scegliere impostazioni IFC preconfigurate per diversi software di input/output, l'utente finale può personalizzare il file di esportazione in base all'ambiente di destina-

zione. Per l'interoperabilità orizzontale non ci sono differenze significative rispetto a Revit, ma l'autotest funziona in quanto il software riconosce anche i materiali assegnati agli oggetti. Con IFC4 anche un nuovo materiale (con proprietà meccaniche personalizzate) è pienamente riconosciuto. Per quanto riguarda l'interoperabilità verticale il comportamento globale è migliore, infatti, RFEM può leggere correttamente il modello IFC in termini di geometria e materiali. Tuttavia, le dimensioni degli oggetti non sono modificabili in modo diretto come per gli oggetti nativi. In SAP2000 le travi sono ruotate di 90°. Per EdilLus valgono le stesse considerazioni fatte per Revit.

- **Allplan.** Questo software funziona in modo simile ad ArchiCAD per l'interoperabilità orizzontale. Le informazioni sul materiale sono limitate al solo nome. I problemi nascono con l'interoperabilità verticale, in RSA e SAP2000 alcune colonne scompaiono e tutti i nodi sono disgiunti. In RFEM le linee degli assi degli elementi non corrispondono al modello originale. Nessun problema si presenta in ModeSt e Tekla Structures. Lo stesso per Edificius, che però consente un'interazione limitata con gli oggetti IFC.
- **Edificius.** Il modello geometrico esportato da Edificius viene importato correttamente negli altri sistemi CAD, e valgono le stesse considerazioni di prima. Nell'autotest non è possibile modificare la dimensione della sezione e la dimensione dell'elemento. In ArchiCAD solo le

dimensioni della sezione della trave possono essere modificate direttamente ma non la lunghezza della trave). Per l'interoperabilità verticale, il modello è stato correttamente importato solo in Edilus (della stessa azienda) e Tekla Structures. Elementi ridotti e nelle posizioni sbagliate possono essere osservati in ModeSt e RSA. RFEM e SAP2000 non riescono a importare il modello.

Per l'interoperabilità CAE - CAE, IFC2x3 CV 2.0 è stato testato focalizzando l'attenzione sullo scambio di informazioni di tipo strutturale. Il modello di riferimento è stato modificato includendo vincoli e carichi (Figura 3.3)

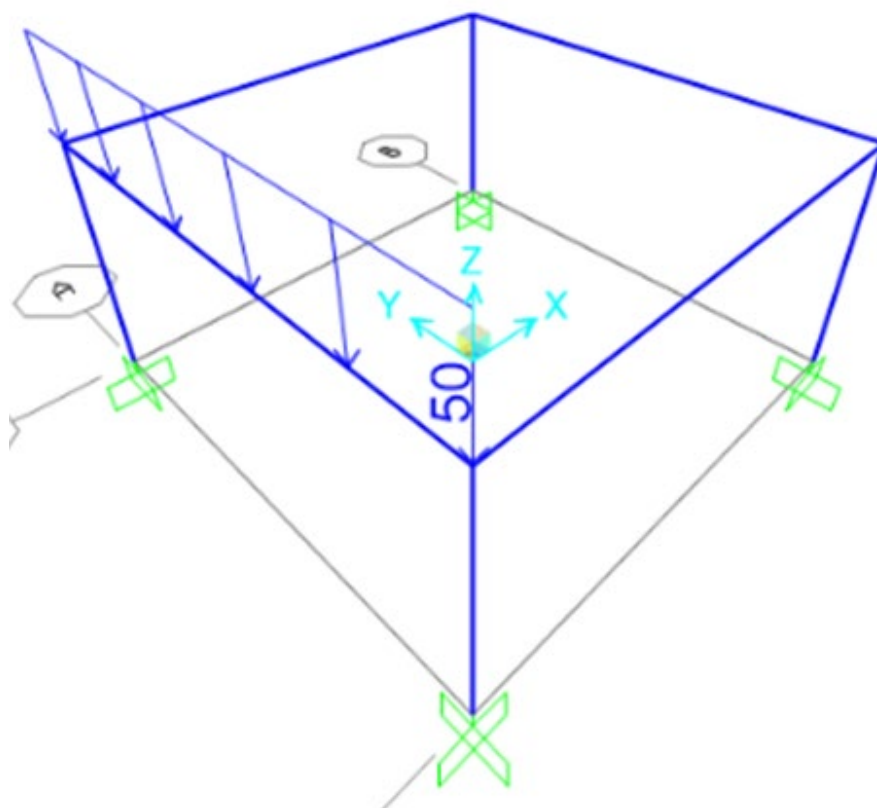


Figura 3.3. Modello modificato con carichi e vincoli.

I modelli analitici sono stati generati in RFEM e SAP2000 ed esportati in ModeSt, RFEM e SAP2000. Gli autotest hanno funzionato bene sia per RFEM che per SAP2000. ModeSt non è stato in grado di importare vincoli e carichi sia da RFEM che da SAP2000, mentre i carichi non sono stati importati in RFEM dal modello generato in SAP2000. Non sono stati riscontrati problemi da RFEM a SAP2000. In Tabella 3.5 sono riportati i risultati dell'interoperabilità orizzontale per quanto riguarda il formato IFC2x3 CV 2.0.

Software	Revit				Allplan				ArchiCAD				Edificius			
	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions
	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B
Revit	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Allplan	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ArchiCAD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Edificius	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Symbol legend	Poor		○	Fair		◐	Average		◑	Good		◒	Excellent		◓	●

Tabella 3.5. Risultati dell'interoperabilità CAD - CAD nel formato IFC2x3 CV 2.0.

In Tabella 3.6 sono riportati i risultati dell'interoperabilità verticale nel formato IFC2x3 CV 2.0.

Software	RSA				ModeSt				RFEM				SAP2000				Edilus				Tekla Structures			
	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions
	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B	A B
Revit	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Allplan	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ArchiCAD	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐	◐
Edificius	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Symbol legend	Poor		○	Fair		◐	Average		◑	Good		◒	Excellent		◓	●								

Tabella 3.6. Risultati dell'interoperabilità CAD - CAE nel formato IFC2x3 CV 2.0.

In Tabella 3.7 sono riportati i risultati dell'interoperabilità CAE - CAE attraverso il formato IFC2x3 SAV.

Software	ModeSt				RFEM				SAP2000											
	Geometry	Materials	Restraints	Loads	Geometry	Materials	Restraints	Loads	Geometry	Materials	Restraints	Loads								
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B				
RFEM	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●	●	●	●	●	○	○	●	●	●	●
SAP2000	●	●	○	○	○	○	○	○	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Symbol legend	Poor		○		Fair		○		Average		○		Good		○		Excellent		●	

Tabella 3.7. Risultati dell'interoperabilità CAE - CAE nel formato IFC2x3 SAV.

3.3.2 IFC4 Design Transfer View (DTV)

I test sono stati effettuati utilizzando il formato IFC4 con lo schema Design Transfer View (DTV) utilizzando lo stesso modello. Non tutti i programmi possono importare/esportare il formato IFC4, quindi il test è stato limitato a poche combinazioni. Questi test sono stati effettuati per cercare di superare i problemi relativi a IFC2x3.

- **Revit.** In generale, non ci sono differenze significative tra IFC4 DTV e IFC2x3 CV 2.0. L'autotest non è ancora completamente riuscito a causa della modifica del numero totale di entità e della perdita delle entità originali ifcBeam e ifcBeamType. ArchiCAD, Allpan e Tekla Structures importano correttamente il modello, ma come blocco singolo non modificabile. RFEM non riesce a importare il modello.
- **ArchiCAD.** Le stesse considerazioni si possono fare per ArchiCAD per l'interoperabilità orizzontale: il modello geometrico è correttamente

importato, ma alcuni parametri (dimensioni o dimensioni della sezione) non sono sempre modificabili. Stesso comportamento di IFC2x3 per il software CAE che riceve il modello IFC4 generato in ArchiCAD. In SAP2000 le travi sono ruotate di 90° attorno al proprio asse.

- **Allplan.** Allplan è in grado di esportare/importare in IFC4 nell'ultima versione testata B (ma non in grado di importare in quel formato nella versione A). Per il formato di esportazione valgono le stesse considerazioni fatte per IFC2x3. In RFEM, nonostante il software possa importare file IFC4 nella versione A, non viene importato alcun dato. Nella versione B lo stesso software può leggere il modello, ma viene generata una posizione imprecisa di colonne e travi.

È stato effettuato un ulteriore test per verificare come il software CAD sia in grado di interpretare le informazioni ricevute dagli ambienti CAE nel formato IFC4 DTV. L'unico software CAE in grado di esportare il formato IFC4 DTV è SAP2000. In tabella 10 sono riportati i risultati del test di importazione nel software CAD compatibile con il formato per entrambe le versioni A e B. Il confronto tra le versioni A e B fornisce un miglioramento delle prestazioni nel trasferimento dei dati; i dati relativi alla geometria vengono correttamente trasferiti ed elaborati dal software CAD ricevente nella versione B.

Si osserva ancora un problema nel trasferimento dei dati del materiale poiché tutte le proprietà strutturali e fisiche vengono perse. Vale la pena notare che in tutti i casi le entità possono essere manipolate e modificate nell'ambiente

CAD ricevente, consentendo l'implementazione di un'effettiva ottimizzazione del processo di progettazione.

In Tabella 3.8 sono riportati i risultati ottenuti per 'interoperabilità orizzontale nel formato IFC4 DTV.

Software	Revit				Allplan				ArchiCAD				Edificius			
	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Revit	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Allplan	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
ArchiCAD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Symbol legend	Poor		Fair		Average		Good		Excellent							

Tabella 3.8. Risultati dell'interoperabilità CAD - CAD nel formato IFC 4 DTV.

In Tabella 3.9 sono riportati i risultati ottenuti per l'interoperabilità verticale nel formato IFC 4 DTV.

Software	RFEM				SAP2000				Edilus				Tekla Structures			
	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
Revit	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Allplan	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
ArchiCAD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●
Symbol legend	Poor		Fair		Average		Good		Excellent							

Tabella 3.9. Risultati dell'interoperabilità CAD - CAE nel formato IFC 4 DTV.

In Tabella 3.10 sono riportati i risultati dei test del modello realizzato in SAP2000 e importato nei software CAD nel formato IFC 4 DTV.

Software	Revit				Allplan				ArchiCAD				Edificius			
	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions
	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B	A	B
SAP2000	●	●	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○	○
Symbol legend	Poor		Fair		Average		Good		Excellent							

Tabella 3.10. Risultati interoperabilità CAE – CAD nel formato IFC 4 DTV.

3.3.3 Elementi bidimensionali

I test eseguiti su elementi monodimensionali hanno evidenziato diverse problematiche:

- riconoscimento del materiale (Figura 3.4);

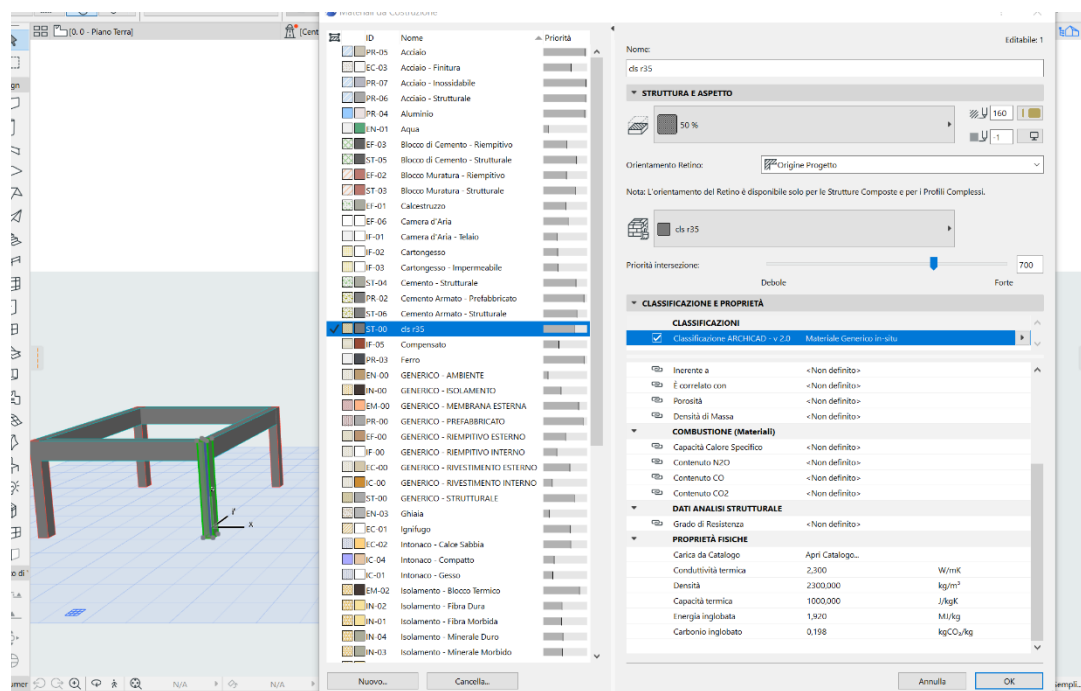


Figura 3.4. Modello realizzato in Revit e importato in Archicad.

- tipologia sezione (Figura 3.5);

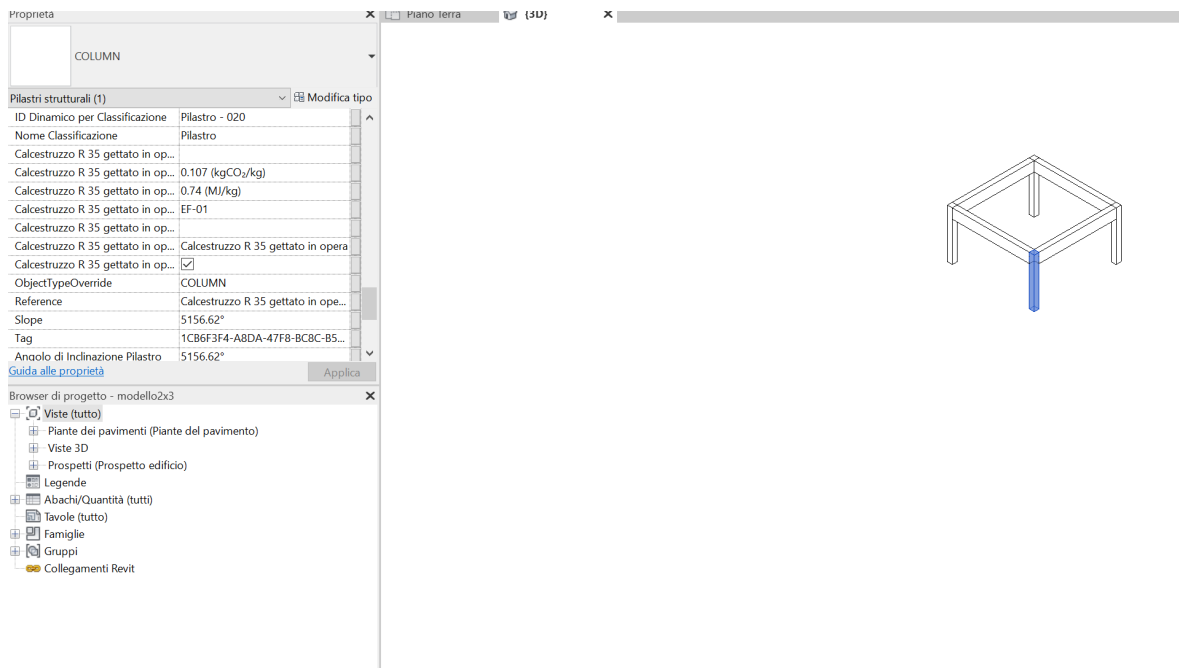


Figura 3.5. Modello realizzato in Archicad e importato in Revit.

- perdita della parametricità degli elementi (Figura 3.6).

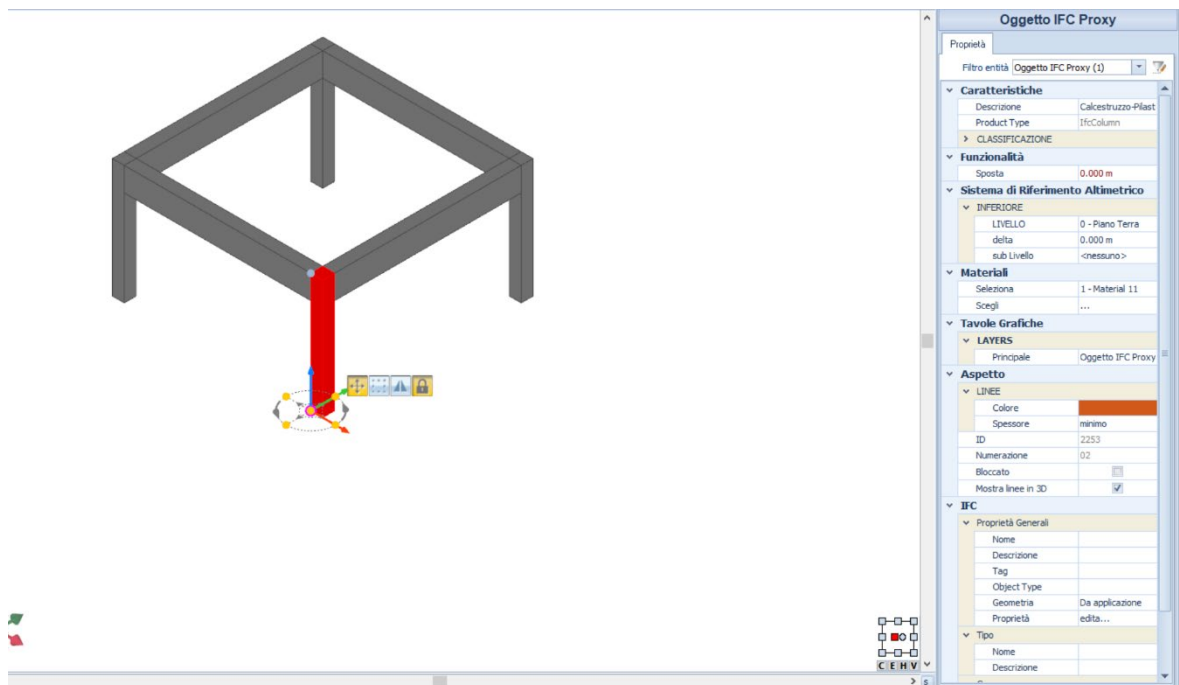


Figura 3.6. Modello realizzato in Revit e importato in Edifius.

Con la stessa metodologia sono stati effettuati test su elementi bidimensionali quali muri, solai, finestre dove non si è riscontrata nessuna problematica e perdita informazione mantenendo la parametricità degli elementi in tutti software. I test sono stati condotti in formato IFC2x3 CV 2.0. In tabella 3.11 sono riportati i risultati per i test condotti per gli elementi bidimensionali.

Software	Revit				ArchiCAD				Allplan				Edificius							
	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions	Geometry	Materials	Section Type	Dimensions				
Revit	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
Allplan	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
ArchiCAD	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
Edificius	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●	●				
Symbol Legend	Poor ○				Fair ◐				Average ◑				Good ◒				Excellent ●			

Tabella 3.11. Risultati interoperabilità CAD – CAD elementi bidimensionali.

Anche per l’interoperabilità verticale non si sono presentati particolari problemi.

3.4 Digital twin

Il BIM sta acquisendo sempre più importanza nel campo dell'ingegneria civile poichè è in grado di gestire una grande quantità di dati eterogenei e può rivelarsi un valido strumento per la gestione e la valutazione a lungo termine delle strutture. Ciò è possibile attraverso la combinazione dei dati geometrici e i parametri derivanti dal monitoraggio strutturale. La combinazione di tecniche avanzate di monitoraggio strutturale (SHM) e i modelli BIM portano a un nuovo approccio per lo sviluppo di strumenti che sono in grado di gestire

in tempo reale lo stato di salute e possono supportare in maniera proattiva la manutenzione e gestione delle strutture.

Attraverso l'uso di tecniche OMA (Operational Modal Analysis) automatiche è possibile trasferire dati e informazioni sullo stato attuale della struttura a un modello BIM e renderli disponibili per analisi di model updating.

L'obiettivo è la realizzazione di un modello in grado di includere le diverse tipologie di sensori con la relativa posizione ed eventualmente fornire l'accesso al database SHM per fornire una rappresentazione interattiva delle misurazioni. In questo modo è possibile realizzare un flusso di dati bidirezionali e rendere dinamico il modello BIM integrandolo con i dati SHM e fornendo informazioni in tempo reale sullo stato di salute e sullo stato delle varie parti della struttura.

Un digital twin può essere definito come: un approccio per connettere un sistema fisico alla sua rappresentazione virtuale attraverso una comunicazione bidirezionale (supervisionato o non nel loop) utilizzando big data aggiornati temporalmente (dati primari raccolti dal sistema fisico e dati supplementari dall'ambiente circostante che interagiscono con il sistema fisico per una conoscenza contestuale) per consentire l'utilizzo dell'intelligenza artificiale e l'analisi di big data per sbloccare il valore attraverso l'ottimizzazione e la previsione dello stato futuro (Sehrawy e Kumar, 2021).

La realizzazione di un gemello digitale può aiutare a identificare parametri di modellazione incerti e per valutare e gestire il comportamento strutturale in condizioni operative per tutto il ciclo di vita della struttura. In letteratura

sono presenti lavori di integrazione tra le tecniche di aggiornamento del modello agli elementi finiti e tecniche di monitoraggio strutturale in ambiente BIM che verranno discussi in seguito. Questa integrazione rappresenta una rete tecnologica all'avanguardia che manca o è stata parzialmente realizzata in letteratura. Sono state presentate metodologie per l'integrazione di dati eterogenei in un gemello digitale, e quindi tra SHM e BIM, ma non è ancora stata presentata una procedura in grado di automatizzare l'intero processo SHM - BIM - FEMU.

Un gemello digitale della struttura svolge un ruolo primario nella valutazione delle condizioni attuali e nel rilevamento delle anomalie a supporto della manutenzione strutturale. Il BIM sta attualmente mostrando un potenziale in questa prospettiva grazie alla possibilità di raccogliere dati e informazioni eterogenee in una piattaforma unificata; tuttavia, dalla revisione della letteratura risulta che la sua estensione al facility management è una questione aperta, in particolare quando i modelli digitali devono essere integrati con i dati provenienti dai sistemi SHM.

In questo lavoro di tesi è stato realizzato un digital twin di una struttura e sono state sfruttate le potenzialità offerte da SHM, FEMU (Finite Element Model Updating) e BIM per realizzare uno strumento integrato di facility management automatizzato in grado di raccogliere e gestire dati eterogenei in un unico ambiente. Il vantaggio di disporre di una procedura completamente

automatizzata è la possibilità di effettuare analisi per la calibrazione del modello aggiornato nel tempo e utilizzabile per future analisi statiche e dinamiche non lineari.

Un modello BIM fornisce informazioni geometriche ed è una rappresentazione digitale delle caratteristiche fisiche e funzionali di un edificio. Consente di integrare informazioni sulla progettazione, la costruzione e il funzionamento dell'edificio che possono essere utilizzate per il coordinamento della progettazione, la pianificazione della costruzione e la gestione durante l'intero ciclo di vita della struttura.

Il passaggio da un modello BIM a un digital twin si rende necessario per poter effettuare analisi e simulazioni utilizzando dati in continuo aggiornamento.

Il Digital Twin può essere considerato come una rappresentazione fisica e dinamica del BIM. Può essere considerato come una replica virtuale di un sistema fisico e viene realizzato utilizzando i dati raccolti da sensori e altre fonti, come i modelli BIM. Viene utilizzato per rappresentare lo stato corrente del sistema fisico. Può essere utilizzato per simulare, analizzare e ottimizzare le prestazioni, le operazioni e la manutenzione del sistema. Queste due tecnologie stanno aprendo la strada alla convergenza di altre tecnologie digitali e forniscono soluzioni innovative per l'industria delle costruzioni.

3.4.1 Letteratura

In letteratura sono numerosi gli studi che evidenziano le potenzialità della combinazione di BIM e SHM per raccogliere dati e monitorare le strutture in

condizioni operative. Nel trasferimento dei dati grezzi provenienti dai sensori SHM al BIM, le finalità applicative e quindi la tipologia di sensori applicati sono differenti.

Delgado et al. (2017) propongono un approccio per la modellazione di sistemi di monitoraggio strutturale in ambiente BIM per la visualizzazione diretta dei dati affrontando interoperabilità, gestione e visualizzazione dei dati e interpretazione dei dati. La visualizzazione di dati in un contesto geometrico facilita e migliora l'interpretazione dei dati. I dati sono processati con software di calcolo e inseriti in file txt o excel per essere importati in ambiente BIM ma non è automatico.

Valinejadshoubi et al. (2017) sottolineano l'importanza nel facility management dell'ambiente BIM per archiviare, condividere e richiamare grandi quantità di dati eterogenei. Inserendo sensori virtuali nel modello Revit e collegando alla famiglia una serie di informazioni aggiuntive.

Theiler et al (2017) hanno proposto un sistema di controllo wireless SHM BIM based attraverso lo standard IFC su un modello in scala.

Valinejadshoubi et al. (2018) hanno realizzato un modello in Revit ed esportato in Etabs per analisi della risposta strutturale per poter determinare il corretto posizionamento di sensori di deformazione. Il modello è stato poi reimportato in Revit per aggiornare il precedente e riesportato in formato IFC per renderlo interoperabile con altri tools.

Delgado et al. (2018) hanno utilizzato lo standard IFC per modellare i sistemi di monitoraggio strutturale inclusi i dati, sviluppato modelli BIM attraverso

metodi parametrici automatizzati (Dynamo) e sviluppato un ambiente BIM basato sui dati e interattivo.

Boddupalli et al. (2019) propongono una piattaforma realizzata con Revit per poter gestire la grande mole di dati provenienti dai sensori e l'uso di Matlab e RSA. Hanno studiato la bidirezionalità tra Revit e Robot e hanno comparato le frequenze sperimentali con quelle derivate dal modello.

Ye et al. (2019) hanno discusso dell'importanza di un digital twin per infrastrutture strategiche come i ponti e l'importanza del suo aggiornamento in tempo reale potendo gestire una grande quantità di dati grazie a una piattaforma BIM based e realizzare così degli scenari di rischio secondo un approccio data-driven.

O'Shea e Murphy (2020) hanno integrato i dati di monitoraggio di diverse tipologie di sensori sia cablati che wireless di un faro all'interno del BIM. La rete di sensori è collegata a un database remoto dove vengono scritti i dati grezzi. I dati sono stati convertiti in formato excel e visualizzati in ambiente BIM attraverso il plugin Dynamo.

Zhao e He (2021) hanno applicato la tecnologia BIM nell'ambito dell'ingegneria navale sviluppando un plugin per Revit in ambiente Visual Studio per realizzare una piattaforma di early warning.

Hou et al. (2021) hanno proposto un sistema di monitoraggio basato su un algoritmo deep learning e IoT in ottica di early warning immagazzinando i dati grezzi in database con la possibilità di visualizzare nel modello BIM la zona danneggiata.

Bouzas et al. (2022) hanno proposto una metodologia basata su un framework che sfrutta la tecnologia dell'HBIM (Heritage Building Information Modeling) per il controllo e monitoraggio della salute di strutture storiche in continuo. Hanno creato un modello architettonico in Revit da cui viene generato automaticamente un modello strutturale. Questo modello può essere esportato in un software di analisi strutturale e viene utilizzato per eseguire una calibrazione del modello basata sulla risposta dinamica della struttura per ottenere un modello che rappresenti adeguatamente il reale comportamento strutturale. Ma tutte le fasi sono scollegate tra loro e non c'è una procedura che renda la tecnologia automatizzata.

Uno studio interessante (Meoni et al. 2022) si è occupato di monitorare le prestazioni strutturali e del confort ambientale di edifici storici in ambiente HBIM andando ad integrare diverse tipologie di sensori statici e dinamici sottolineando l'approccio multidisciplinare e interoperabile nella valutazione della struttura in condizioni operative. La procedura è stata implementata in Revit sviluppando un'interfaccia in Python e i dati grezzi salvati su un server cloud sincronizzato con il computer.

3.4.2 Procedura

Dopo aver revisionato la letteratura sull'interoperabilità e sull'integrazione di sistemi SHM e BIM e digital twin, per la realizzazione della procedura automatizzata sono state fatte delle valutazioni per la scelta dei software più opportuni.

Dai test sull'interoperabilità svolti su elementi monodimensionali e bidimensionali è emersa l'impossibilità di poter utilizzare il formato IFC per le problematiche relative al riconoscimento dei materiali e delle sezioni, della rotazione delle travi e degli elementi disgiunti, rendendo impossibile l'utilizzo del modello per analisi strutturali successive.

Per l'integrazione dei dati SHM in letteratura sono presenti soluzioni che consentono di modellare il sensore come una famiglia Revit e collegare un file di testo o excel per la visualizzazione dei dati, ci sono anche soluzioni che utilizzano database. Per le analisi sono state utilizzate soluzioni online e l'utilizzo di Matlab.

I software utilizzati per l'implementazione della procedura automatica sono:

- Autodesk Revit;
- Dynamo;
- CSiXRevit;
- Sap2000;
- Matlab;
- MySQL.

Il modello realizzato in Revit è stato esportato attraverso il plugin CSiXRevit per essere successivamente importato in Sap2000. L'utilizzo di questo plugin ha permesso di superare i limiti connessi all'utilizzo del formato IFC. Infatti è stato possibile esportare tutte le geometrie correttamente posizionate, materiali, nessuna disgiunzione degli elementi, i carichi assegnati e le shell.

I materiali sono riconosciuti con tutte le proprietà fisiche e meccaniche solo se impostato come isotropo, l'ortotropo non viene riconosciuto. Le shell con una massa distribuita non vengono esportate. I vincoli alla base della struttura non sono riconosciuti ma sono essenziali per poter svolgere le analisi modali in SAP2000.

Per superare il problema dei vincoli è stato realizzato uno script in Matlab che seleziona i nodi alla base e li assegna automaticamente. Risolti questi problemi nella modellazione è stato possibile testare il modello importato in SAP2000 con buoni risultati nelle analisi modali. La struttura importata nel software di analisi è risultata più rigida perché nelle sezioni vengono inserite anche le barre di armatura.

Le analisi di model updating con il metodo Douglas-Reid sono state implementate in Matlab (Rosati et al. 2022).

Grazie all'utilizzo di un database relazionale MySQL è possibile immagazzinare i dati grezzi provenienti dalle varie tipologie di sensori ed essere visualizzati direttamente sul modello BIM. Nel database possono essere conservati i dati provenienti dalle analisi OMA e di model updating.

Tutte le fasi della procedura così presentate risultano non collegate, per renderla completamente automatizzata e unire tutte le fasi è stato utilizzato il plugin Dynamo. Questo strumento è basato su una programmazione di tipo visuale dove è possibile realizzare script personalizzati in Python e cicli per la ripetizione delle operazioni.

Sono stati realizzati script che permettono l'esportazione automatica del modello. Altri sono stati sviluppati per l'interrogazione del database. Grazie ad un nodo personalizzato è stato possibile richiamare tutte le procedure realizzate in Matlab. Si può affermare che Dynamo, grazie alla sua versatilità, è stato il collante che ha permesso di riunire tutte le fasi della procedura e renderla completamente automatizzata. In Figura 3.7 è riportato il workflow della procedura.

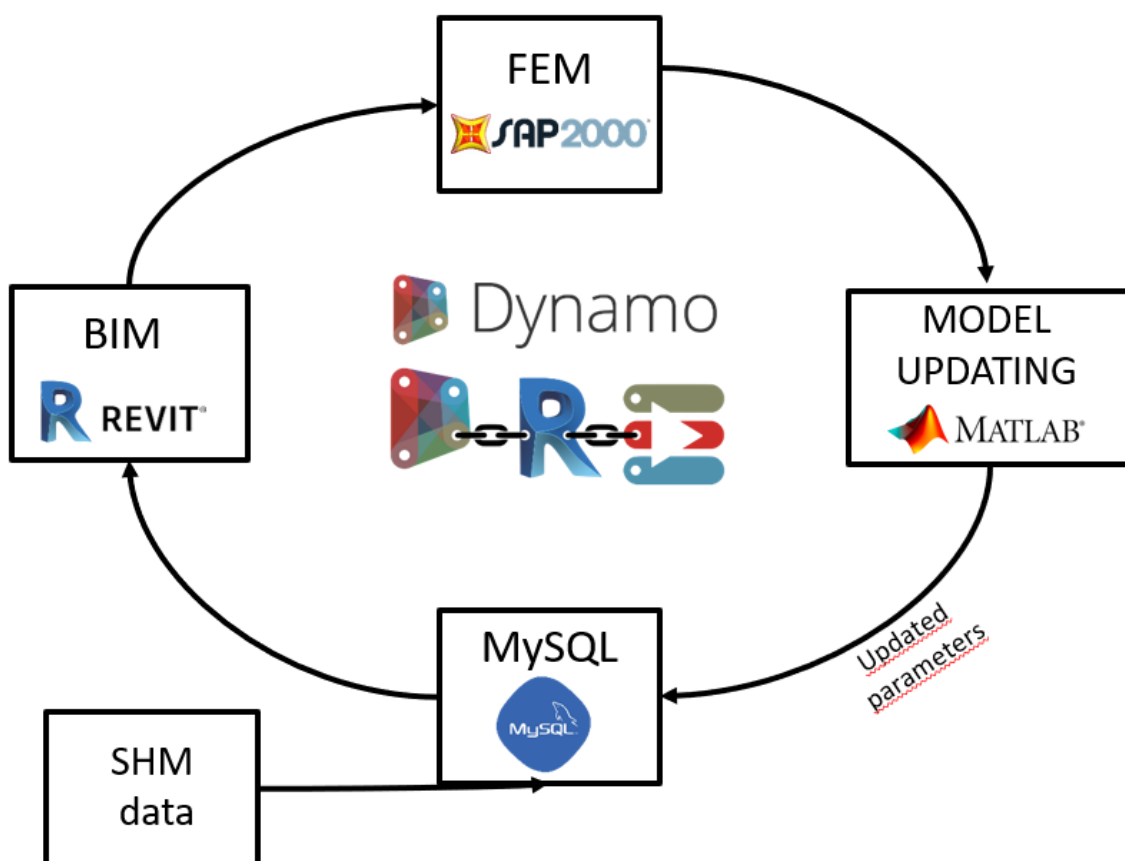


Figura 3.7. Workflow procedura.

I dati provenienti dalle analisi di model updating vengono scritti su database e attraverso una parte del codice in Dynamo è possibile richiamarli per aggiornare il modello BIM e avere informazioni sullo stato di salute in realtime

della struttura. Aggiornato il modello è possibile ripetere la procedura ciclicamente appena sono disponibili nuovi dati.

3.5 Torre delle Nazioni

Il caso studio scelto è Torre delle Nazioni a Napoli (Figura 3.8) presso Mostra D'Oltremare realizzato nel 1940 e alto 46 metri.



Figura 3.8. Torre delle Nazioni.

Per la modellazione CAD è stato utilizzato Autodesk Revit. Sono stati realizzati due modelli: architettonico (figura 3.9) e analitico (figura 3.10).

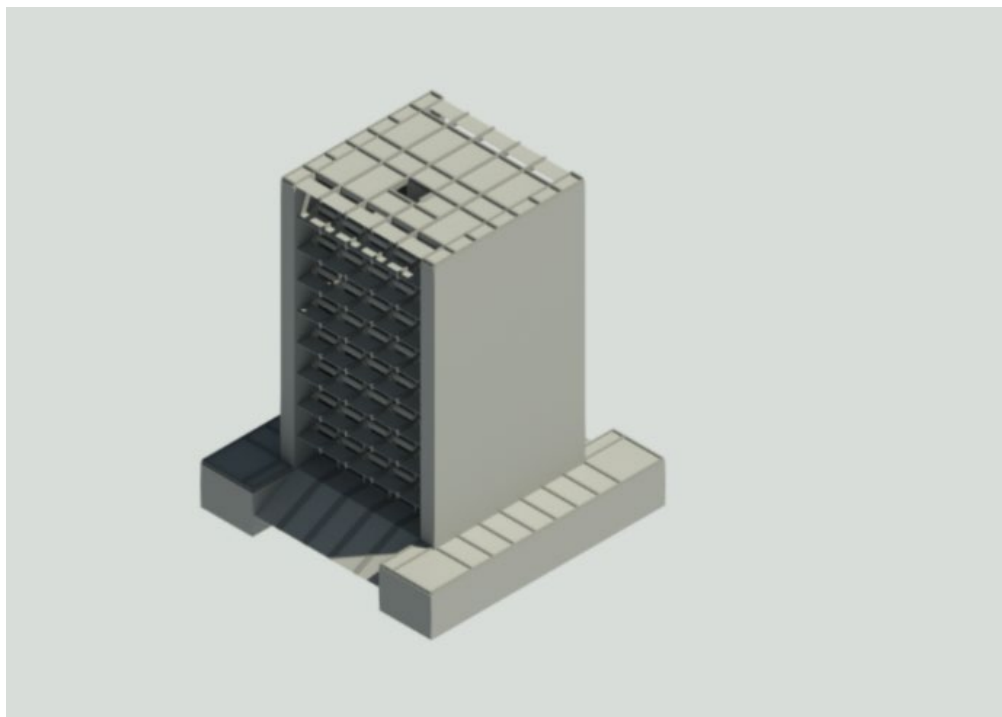


Figura 3.9. Modello architettonico.

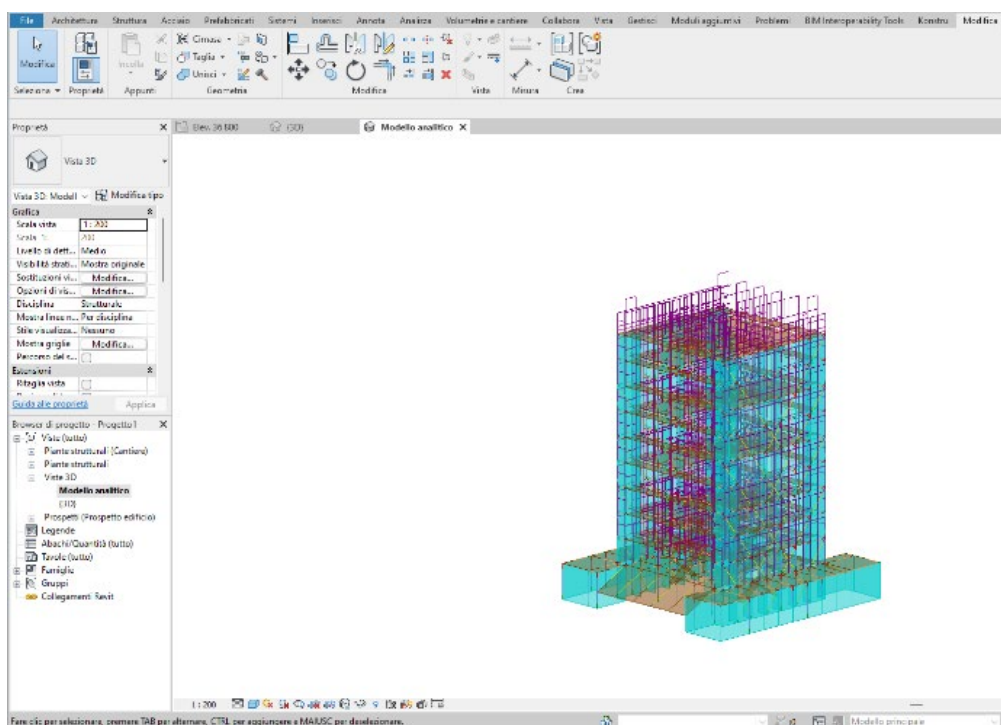


Figura 3.10. Modello analitico.

Per poter integrare i dati SHM con il modello CAD è stata realizzata una famiglia Revit per il sensore dove sono state inserite le caratteristiche principali (fondo scala, sensibilità...) come mostrato in figura 3.11.

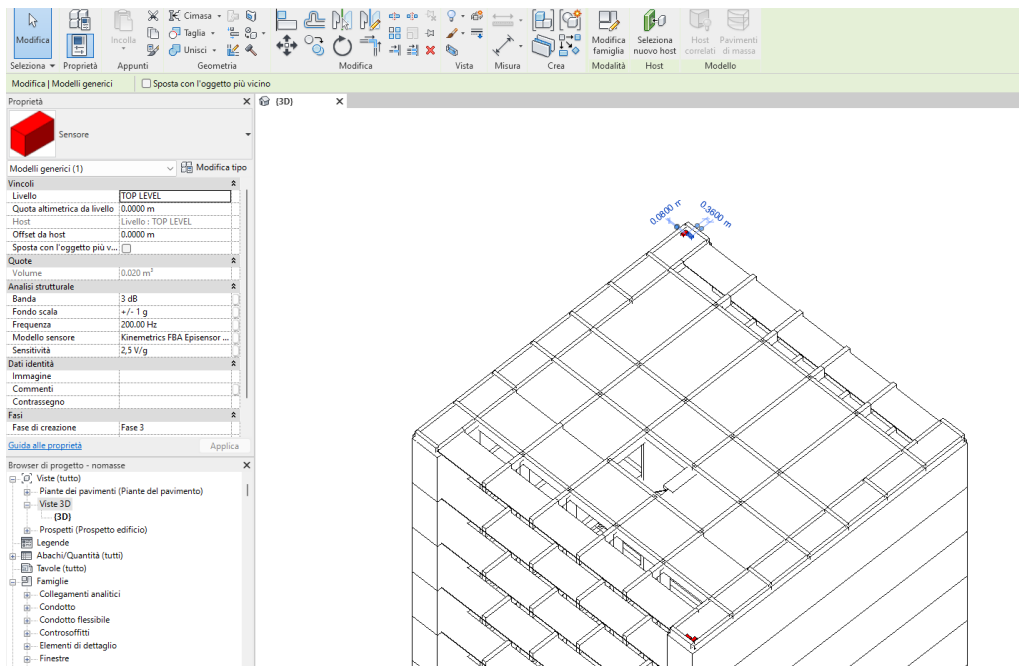


Figura 3.11. Famiglia sensore.

Per poter rendere il BIM una piattaforma unificata dove è possibile gestire i dati, è stato utilizzato l'applicativo Dynamo.

Dynamo è uno strumento di programmazione visiva che permette di definire relazioni e sequenze di azioni per realizzare algoritmi personalizzati.

I dati di accelerazione sono immagazzinati in un database relazionale MySQL e attraverso uno script realizzato in ambiente Dynamo è possibile visualizzarli (figura 3.12).

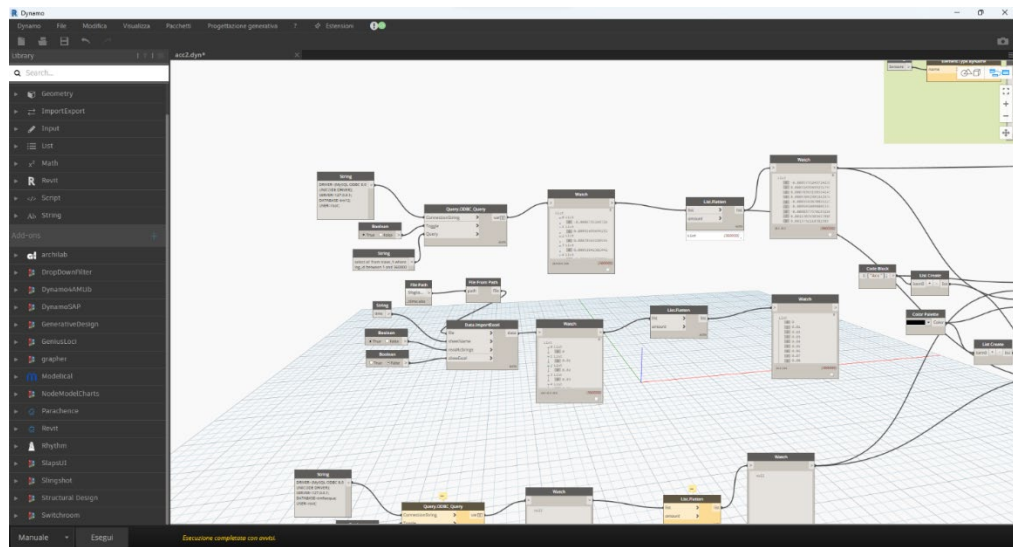


Figura 3.12. Script dati accelerazione.

Il modello analitico è stato poi esportato nel software CAE SAP2000 per poter lanciare analisi di model updating. Attraverso il plugin CSIXREVIT con dei piccoli accorgimenti è stato realizzato il modello per il software CAE. Il problema principale è stato quello di non poter esportare i vincoli alla base della struttura. Il problema è stato risolto scrivendo uno script in Matlab che ha permesso di assegnare i vincoli in maniera automatica al modello CAE (Figura 3.13).

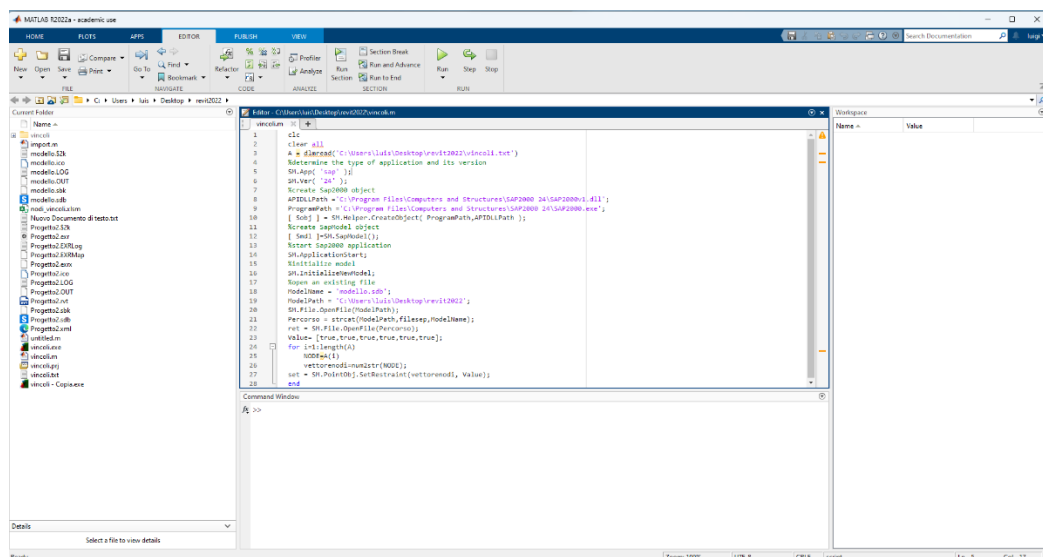


Figura 3.13. Script Matlab assegnazione vincoli.

È stato possibile, attraverso script realizzati in Python, lanciare analisi di modal updating direttamente da Revit. I risultati delle analisi sono scritti su database MySQL e sono quindi visibili in Revit attraverso gli script realizzati in Dynamo (esempio aggiornamento dei parametri di rigidità dei materiali). L'identificazione modale automatizzata può essere integrata con la calibrazione continua del modello FE identificando automaticamente parametri strutturali e parametri elastici incerti della struttura come il modulo di Young dei materiali. Una prima calibrazione del modello può essere eseguita con dati OMA derivanti da prove dinamiche e il monitoraggio continuo può essere utilizzato per eseguire una calibrazione del modello che segue i dati sperimentali.

L'aggiornamento automatico del modello FE può fornire informazioni sulla possibile localizzazione del danno e sulla sua gravità.

Dopo aver esportato il modello in SAP2000 è stata fatta girare la procedura e eseguendo delle analisi modali (tabella 3.12).

Forma modale	Frequenza modello BIM (Hz)
modo 1	0.84
modo 2	1.51
modo 3	1.74
modo 4	3.35
modo 5	4.35
modo 6	5.12

Tabella 3.12. Analisi modali.

3.6 Discussioni e conclusioni

Nel passaggio da un modello geometrico a un modello analitico per l'analisi strutturale, l'interoperabilità verticale mostra tutti i suoi limiti, evidenziando come, nonostante il formato IFC possa trattare le informazioni strutturali, l'attuale implementazione software di tutte le funzionalità del formato risulta essere ancora limitata.

Il livello di interoperabilità raggiunto tramite IFC 2x3 è risultato abbastanza buono in termini di scambio di geometria meno in termini di scambio di proprietà e capacità di modificare parametricamente le dimensioni e la posizione degli elementi tra i sistemi CAD. Durante l'utilizzo del software CAE sono stati riscontrati ulteriori problemi in cui gli elementi potevano essere persi o non essere importati correttamente. All'utente era comunque richiesto di fornire un forte sforzo per generare il modello analitico corretto pronto per l'analisi strutturale. Per l'interoperabilità orizzontale lo studio ha riportato un risultato generalmente soddisfacente, mentre per l'interoperabilità verticale ha evidenziato diversi problemi.

Lo scambio di informazioni bidirezionale tra diversi ambienti di progettazione, come CAD e CAE, senza perdita di informazioni nel flusso di lavoro, può essere supportato solo da un MVD ben strutturato in grado di garantire un import-export del modello il più efficiente possibile attraverso un formato aperto come l'IFC. Sfortunatamente, gli MVD non sono progettati per garantire lo scambio di dati in modo completo e, secondo i risultati dei test effettuati e da studi precedenti, si può affermare che la capacità di importazione

ed esportazione di IFC da un'applicazione all'altra non sia ancora completamente soddisfacente.

I problemi dell'interoperabilità verticale sono connessi a come l'elemento viene mappato per essere esportato in formato IFC. Analizzando il file IFC esportato da Revit è possibile notare due tipi di rappresentazione (figura 3.14):

SweptSolid e MappedRepresentation. Il primo i solidi sono ricavati come scorrimento dell'area per estrusione e rivoluzione, il secondo si basa su una rappresentazione di elementi mappati e come può essere letto come blocco unico.

IfcShapeRepresentation (16)				
Doc				
Id	ContextOfItems	RepresentationIdentifier	RepresentationType	Items
195	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	SweptSolid	(1) IfcExtrudedAreaSolid 185
222	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	MappedRepresentation	(1) IfcMappedItem 220
369	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	SweptSolid	(1) IfcExtrudedAreaSolid 365
377	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	MappedRepresentation	(1) IfcMappedItem 375
466	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	SweptSolid	(1) IfcExtrudedAreaSolid 462
474	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	MappedRepresentation	(1) IfcMappedItem 472
563	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	SweptSolid	(1) IfcExtrudedAreaSolid 559
571	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	MappedRepresentation	(1) IfcMappedItem 569
663	IfcGeometricRepresentationSubContext 116	Body	SweptSolid	(1) IfcExtrudedAreaSolid 659

Figura 3.14. Mappatura elementi in Revit

I pilastri sono rappresentati come SweptSolid e non si hanno problemi nell'importazione in ambiente CAE, mentre le travi sono rappresentate come MappedRepresentation e in ambiente CAE si assiste o alla rotazione rispetto agli assi locali o alla mancata importazione degli elementi.

In questo lavoro di tesi si precisa che è stato utilizzato il software CAD Revit versione 2022 e il software CAE SAP2000 versione 24 e sono state riscontrate

le stesse problematiche rilevate con questi test, l'unica evoluzione che si riscontra è la mancata rotazione delle travi in direzione y ma le problematiche relative a materiali e elementi disgiunti permangono. Il software Acca nella versione 2023 ha implementato l'esportazione nel formato IFC con MVD RV mantenendo le stesse problematiche rilevate con il formato IFC 2x3.

In conclusione, sfruttando le potenzialità offerte da questi strumenti, è possibile gestire tutto il processo solo da Revit realizzando così una piattaforma che aggiorna in continuo il modello agli elementi finiti dai dati SHM.

CAPITOLO 4 - SVILUPPO DI UNA METODOLOGIA SPERIMENTALE DI ANALISI DEL PROCESSO DI MA- TURAZIONE DI MATERIALI CEMENTIZI

4.1 Introduzione

Paste e malte cementizie svolgono un ruolo fondamentale nelle attività di rinforzo e retrofitting delle strutture. Essendo questi materiali a base cementizia è importante valutare il tempo di presa strutturale della malta e gli effetti della stagionatura sulle proprietà di rigidità dei materiali. L'evoluzione della rigidità della malta può essere monitorata attraverso l'identificazione delle proprietà dinamiche di un provino, specificamente realizzato, e risolvendo un problema inverso. Questa tecnica offre l'opportunità di misurare l'evoluzione del modulo di Young immediatamente dopo il getto.

Il monitoraggio strutturale e le tecniche OMA sono efficaci per estrarre le proprietà modali (frequenze naturali, smorzamento, forme modali) della struttura come caratteristiche sensibili al danno, ma offrono anche una valutazione sull'efficacia dei sistemi di rinforzo e degli interventi di adeguamento grazie alle variazioni delle dinamiche proprietà prima e dopo l'intervento.

I materiali cementizi giocano un ruolo primario nel determinare l'efficacia degli interventi di rinforzo, ed è fondamentale conoscere gli effetti della maturazione sulle proprietà di rigidità e conoscere l'evoluzione

del modulo di Young. L'evoluzione delle proprietà meccaniche di un materiale cementizio è molto importante dal punto di vista strutturale, la conoscenza dell'evoluzione del modulo E dalla fase iniziale del getto e durante le successive fasi di presa ed indurimento è di fondamentale importanza per molti campi della scienza dei materiali, in particolare per la previsione dello sviluppo delle proprietà meccaniche delle paste cementizie.

In questo lavoro di tesi sono stati indagati, da un punto di vista sperimentale, gli effetti dello stoccaggio in early age sull'evoluzione del modulo E di impasti realizzati con cemento pozzolanico. Gli effetti di stoccaggio sono stati valutati anche per un cemento Portland. Sono stati effettuati test con diverse temperature di maturazione per valutarne l'effetto. Per valutare l'evoluzione del modulo E dopo il getto è stato utilizzato un metodo non distruttivo basato sull'identificazione della prima frequenza di vibrazione di una trave composita. Sono state introdotte nuove funzionalità per le analisi ed il sistema di bloccaggio della trave rispetto ai metodi proposti in letteratura.

4.2 Metodi non distruttivi

In letteratura sono stati proposti vari metodi distruttivi e non distruttivi per caratterizzare le proprietà meccaniche dei materiali cementizi; si veda a titolo di esempio Azenha et al. (2011), Maia et al. (2014), Silva et al. (2014), Granja et al. (2014), Garijo et al. (2019) e Ramesh et al. (2019). Le prove distruttive di compressione, flessione e compressione ciclica

possono essere eseguite solo a materiale indurito a 7, 14, 21 e 28 giorni di maturazione.

Per comprendere le relazioni tra le reazioni di idratazione e l'evoluzione delle proprietà meccaniche degli impasti cementizi è necessario utilizzare tecniche non distruttive. Per seguire le varie fasi di idratazione si possono studiare le proprietà chimiche, elettriche, fisiche e meccaniche. I cambiamenti nell'idratazione possono essere rappresentati da cambiamenti in queste proprietà. Il modulo E è caratterizzato da un rapido tasso di cambiamento in early age ed è necessario utilizzare tecniche non distruttive per monitorarne l'evoluzione.

In letteratura sono presenti diverse tecniche non distruttive che possono essere utilizzate per la caratterizzazione dei materiali cementizi nell'early age.

I metodi elettrici si basano sull'applicazione di corrente continua o alternata. Mediante le proprietà elettriche dei materiali, come la resistenza elettrica, la costante dielettrica, la resistenza di polarizzazione, ecc., è possibile misurare i cambiamenti nel materiale. I primi studi (Calleja 1952) si sono concentrati sulla resistenza elettrica per studiare il comportamento di presa di paste cementizie Portland, per determinare la densità apparente, la microstruttura dell'interfaccia aggregato - cemento e studiare la corrosione delle armature. Successivamente attraverso il metodo Alternating Current Impedance Spectroscopy (ACIS) (McCarter e Brous-

seau, 1990), utilizzando misurazioni in corrente alternata, è stato possibile studiare la microstruttura di paste cementizie, porosità e monitorare il processo di idratazione.

Le proprietà dielettriche (Van Beek 2000) sono spesso utilizzate per determinare la qualità dei prodotti o per monitorare il processo produttivo in modo non distruttivo. Questi metodi sono spesso basati sul comportamento dielettrico dell'acqua. Le proprietà dielettriche dell'acqua nella pasta cementizia differiscono da quelle delle fasi solide (es. cemento non idratato e prodotti di idratazione). Le variazioni delle frazioni di volume delle fasi nella pasta cementizia e la formazione di una microstruttura determinano variazioni delle proprietà dielettriche del calcestruzzo. Misurando questi cambiamenti nelle proprietà dielettriche del calcestruzzo, è possibile valutare il processo di idratazione e le relative proprietà del calcestruzzo.

I metodi basati sulla propagazione delle onde, spesso chiamati metodi acustici, possono essere divisi in due gruppi principali: i metodi di trasmissione delle onde, che includono i metodi di trasmissione delle onde ultrasoniche e gli elementi bender-extender; e metodi di riflessione delle onde.

Attraverso l'uso di metodi che si basano sulla propagazione delle onde nei materiali è possibile caratterizzare le proprietà elastiche durante la presa e l'indurimento. La velocità delle onde possono essere correlate ai

parametri elastici come il modulo di compressione, taglio, torsione e modulo di Poisson.

I metodi che si basano sulla riflessione delle onde ultrasoniche sono tecniche che si basano sulla riflessione di onde da un'interfaccia formata dal materiale da testare e da un materiale tampone con proprietà note. Il coefficiente di riflessione è un buon indicatore molto sensibile dell'idratazione e rende questa tecnica valida per testare paste cementizie in early age. In modo qualitativo è possibile indagare l'influenza di differenti temperature di maturazione, differenti rapporti di acqua/cemento e l'utilizzo di additivi. I parametri che si ottengono da queste misurazioni ultrasoniche sono legati alle caratteristiche della microstruttura dei materiali durante il passaggio dalla fase liquida (comportamento viscoelastico) alla fase solida (comportamento elastico).

Altre tecniche si basano sulla trasmissione passante delle onde ultrasoniche dove un impulso viene generato su una superficie del campione e l'onda viaggia attraverso il materiale e raccolta sull'altro lato. Esistono diverse varianti di questa tipologia di prova che dipendono da come vengono eccitate le onde, quali tipo di onde (compressione, taglio o una combinazione delle due) e la configurazione dei sensori utilizzati (uso esterno o immersione).

Il metodo di esalazione del radon consiste nello sfruttare le proprietà di questo gas nobile che possono essere utilizzate per monitorare l'idrata-

zione del cemento e le trasformazioni microstrutturali nel sistema cementizio. Il radon contenuto in tracce nel materiale indurente, come altri gas inerti, non interagisce chimicamente con il mezzo circostante e quindi non interferisce con le reazioni chimiche che accompagnano l'idratazione del cemento.

Altro metodo NMR (Nuclear Magnetic Resonance) riguarda lo studio delle proprietà magnetiche.

Negli ultimi due decenni, con l'aiuto del rapido sviluppo della tecnologia informatica, sono stati sviluppati diversi modelli di simulazione numerica di idratazione del cemento per simulare l'evoluzione della microstruttura dei materiali a base di cemento, nonché per prevederne le proprietà meccaniche e la loro evoluzione.

Tra i modelli di simulazione numerica, l'HYMOSTRUC3D (van Breugel, 199; Koenders, 1997; Ye, 2003) ha il vantaggio di considerare esplicitamente l'interazione tra le singole particelle e la cinetica di reazione. Dal modello si possono dedurre le caratteristiche microstrutturali, come la connettività e la percolazione delle fasi.

In questo lavoro di tesi è stato utilizzato un metodo non distruttivo basato sulla frequenza di risonanza per la valutazione e la misurazione dell'evoluzione del modulo E nelle paste cementizie. L'EMM-ARM (E-modulus Measurement through Ambient Response Method) è una tecnica non distruttiva introdotta da Azenha. L'applicabilità del metodo

EMM-ARM è stata ampiamente discussa in letteratura confrontando i risultati con altre tecniche distruttive e non distruttive.

4.3 EMM - ARM in letteratura

L'EMM-ARM è una tecnica che si basa sull'identificazione della prima frequenza di vibrazione. In letteratura sono presenti applicazioni su paste cementizie, malte e calcestruzzo.

La procedura di prova sperimentale è stata introdotta da Azenha et al. (2010) per la misurazione dell'evoluzione del modulo E del calcestruzzo dopo il getto e i risultati sono stati confrontati con prove di compressione. Successivamente questo metodo è stato utilizzato per la valutazione di paste cementizie e miscele con additivi ritardanti e acceleranti (Azenha et al. 2011).

Maia et al. (2011) hanno studiato l'influenza della composizione delle paste cementizie con diversi rapporti a/c, aggiunta di riempitivo calcareo, sostituzione del cemento con ceneri volanti, sostituzione del cemento con fumo di silice e sostituzione del cemento con metacaolino (pozzolana) sull'evoluzione del modulo E è stata studiata utilizzando il metodo EMM-ARM.

Esistono in letteratura applicazioni (Azenha et al., 2012) dove il metodo EMM - ARM viene utilizzato in situ per testare l'evoluzione del modulo E del calcestruzzo su un provino con una tipologia di cassaforma nuova in acciaio, su un provino con tubo in acrilico e su una trave prefabbricata.

Per stimare la frequenza di risonanza dei provini è stata utilizzata la tecnica Stochastic Subspace Identification (SSI).

Sono stati fatti alcuni studi (Silva et al., 2014) per il problema della geometria dello stampo e delle metodologie di campionamento della sabbia-cemento e i risultati sono stati confrontati con i test di compressione ciclica.

Altri studi (Granja et al., 2014) hanno confrontato i risultati ottenuti con il metodo EMM – ARM con altre tecniche non distruttive come la velocità delle onde ultrasoniche e bender – extender elements (BE) e tecniche distruttive come prove di compressione ciclica e resistenza alla penetrazione (Vicat). Le prove sono state effettuate utilizzando differenti materiali e diverse temperature di maturazione.

Altri lavori (Azenha et al., 2016) si sono occupati di realizzare una prospettiva sulle numerose evoluzioni che il metodo EMM – ARM ha subito per le sue applicazioni a terreni stabilizzati. Sono stati affrontati temi su: la geometria e il materiale della cassaforma del provino, le procedure di campionamento per le applicazioni in situ, tecniche di eccitazione e identificazione modale e l'utilizzo di differenti miscele. In questo lavoro, l'eccitazione della trave viene effettuata attraverso un attuatore e la frequenza di risonanza è determinata identificando i picchi delle funzioni di risposta in frequenza.

Un round robin test (Delsaute et al., 2016) è stato effettuato in tre laboratori utilizzando otto tecniche distruttive e non distruttive per una valutazione dell'evoluzione della rigidità del calcestruzzo in early age. Le prove sono state effettuate sempre sulla stessa miscela e a temperatura costante. Sono stati utilizzati metodi della frequenza e propagazione delle onde ultrasoniche confrontate con tecniche distruttive quasi statiche.

Altri studi (Granja e Azenha, 2017) sono stati effettuati introducendo miglioramenti per semplificare il metodo per le applicazioni in situ: è stato utilizzato un nuovo sistema di supporto della trave, un nuovo materiale per lo stampo, riduzione della campata e utilizzato un attuatore elettromagnetico per applicare una forza dinamica alla trave.

Alcuni autori (Velay-Lizancos et al., 2017) hanno studiato l'influenza delle ceneri di biomassa nell'evoluzione del modulo di Young in early age nei calcestruzzi utilizzando la tecnica EMM-ARM utilizzando una temperatura costante durante i test, rilevando che oltre alle proprietà meccanica le ceneri di biomassa influenzano anche la conducibilità elettrica.

Altri lavori (Velay-Lizancos et al., 2018) si sono occupati dell'influenza degli aggregati grossi e fini riciclati sull'evoluzione del modulo elastico nelle fasi iniziali e l'influenza della temperatura di maturazione. Le prove sono state effettuate a una temperatura costante di 40 gradi. I risultati

ottenuti attraverso la tecnica EMM-ARM sono stati confrontati con altre tecniche non distruttive come le prove ultrasoniche e misure elettriche.

In letteratura sono presenti anche studi (Mazaheripour et al., 2018) dove l'evoluzione delle proprietà meccaniche delle paste cementizie è stata studiata attraverso la simulazione della microstruttura della pasta. Sono stati realizzati un modello reticolare 3D e un modello FEM confrontando i risultati ottenuti con la tecnica EMM-ARM.

Il comportamento di malte di calce idraulica naturale è stato studiato (Garijo et al., 2019) utilizzando diversi rapporti acqua/calce in early age utilizzando un attuatore e caratterizzando il modulo E mediante la tecnica EMM-ARM e prove ultrasoniche confrontando successivamente i risultati ottenuti con test distruttivi di compressione ciclica e prove Vicat. L'applicabilità del metodo è stata studiata per malte miste calce-cemento confrontando i risultati con prove soniche e di compressione ciclica (Ramesh et al., 2019). In particolare, è stata studiata l'interazione dei leganti nelle miscele sostituendo il cemento con la calce in diverse proporzioni. La sperimentazione ha dimostrato che la rigidità del materiale diminuisce con l'aumentare della quantità di calce.

Gli stessi autori (Ramesh et al., 2019) hanno indagato l'effetto della temperatura sulla stagionatura di malte di calce e cemento in early age utilizzando tre differenti condizioni di temperatura, utilizzando diversi contenuti di calce per la realizzazione delle malte. In questo studio è stato

dimostrato che le alte temperature durante la stagionatura aumentano la reattività dell'impasto e il periodo dormiente del cemento termina prima. Studi recenti (Dunant et al. 2020) hanno combinato i risultati EMM-ARM e H-NMR per la caratterizzazione dei diversi stati dell'acqua capillare nella pasta cementizia. È stata calcolata la relazione tra porosità e il modulo E e l'evoluzione del gel C-S-H per le paste cementizie.

La Tabella 4.1 riassume i parametri principali degli studi di letteratura sopra descritti riguardanti materiali, condizioni di maturazione, schemi strutturali, variabili sperimentali e tecniche di analisi differenti.

References	Material	Scheme	Temperature - RH	Experimental variables	Analysis techniques
Azenha et al. 2010	Concrete CEM I 42.5 R	Supported beam	Climatic chamber - T= 20 °C and 50% RH	Different beam support conditions	EMM-ARM, standard compressive tests
Azenha et al. 2011	Cement pastes and mortars CEM I 52.5, CEM IV/A 32.5R (FA)	Cantilever	-	Retarding and accelerating additives	EMM-ARM
Maia et al. 2014	Cement pastes CEM I 42.5R	Cantilever	Climatic chamber - T= 20 °C and 50% RH	Different w/c ratios and different contents of limestone filler, fly ash, silica fume and metakaolin	EMM-ARM, isothermal calorimeter, standard compressive tests
Azenha et al. 2012	Concrete CEM I 42.5R	Supported beam	Average T = 9.2 °C	Different mould type	EMM-ARM, SSI, ultra-sound wave velocity
Silva et al. 2014	CEMI42.5R	Cantilever	-	Mould geometry and sampling methodologies	EMM-ARM, Cycle compression (CC)
Granja et al. 2014	Cement Pastes CEM II/B-L 32.5N - CEM I 42.5R	Cantilever	T = 20 °C ; 40° C	Different w/c ratios and temperatures	EMM-ARM, UPV, bender-extender elements (BE), CC, Vicat
Azenha et al. 2016	Mortar CEM I 42.5 R, CEM II/ B-L	Supported beam	-	Different mix of cement	EMM-ARM (PSD, FRF electromagnetic actuator), CC

	32.5N, soil mixtures				
Delsaute et al. 2016	Concrete CEM I 52.5N PMES CP2	Supported beam	$T = 19.2 \pm 0.5 \text{ } ^\circ\text{C}$	Round robin test	EMM-ARM, UPV, quasi-static tests
Granja et al. 2017	Concrete CEM I 52.5 N PMES CP2, CEM II 42.5R, CEM II/A-L 42.5R	Supported beam	$T = 20 \pm 2 \text{ } ^\circ\text{C}$	Mould geometry and different mixes	EMM-ARM (PSD, FRF comm attuatore), CC
Velay-Lizancos et al. 2017	Concrete CEM I 52.5R-SR 3	Supported beam	$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	% biomass ashes	EMM-ARM, Electric conductivity
Velay-Lizancos et al. 2018	Concrete CEM I 52.5 S/SR-3	Supported beam	$T = 20 \text{ and } 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	Different temperature and recycled aggregates ratios	EMM-ARM, Electric conductivity, UPV, Activation energy and maturity method
Mazaheripour et al. 2018	White cement Aalborg Portland	Cantilever	$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	Different w/c ratios	EMM-ARM, HYMO-STRUC3D, Lattice models
Garijo et al. 2019	Hydraulic lime mortars	Supported beam	$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ and 95% RH	Different water/lime ratios	EMM-ARM, Penetration resistance tests, CC, Flexural and compressive strength tests, UPV, Thermogravimetric analyses
Ramesh et al. 2019	Lime-cement blended mortars CEM I 42.5 R - hydrated aerial lime (CL-90S)	Supported beam	$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$ and 60% RH	Different water/lime ratios	EMM-ARM, CC
Ramesh et al. 2019	Lime - cement masonry mortars CEM I-42.5 R	Supported beam	$T = 20; 30; 40 \text{ } ^\circ\text{C}$	Different temperature and mixes	EMM-ARM, Compressive strength, flexural strength, CC, UPV
Dunant et al. 2020	White cement Aalborg Portland	Cantilever	$T = 20 \text{ } ^\circ\text{C}$	Different w/c ratios	EMM-ARM, H NMR relaxometr

					Numerical modelling of micro-structure
--	--	--	--	--	--

Tabella 4.1. Letteratura studi

Nonostante l'applicabilità del metodo EMM-ARM sia stata ampiamente discussa in letteratura, confrontando i risultati con tecniche distruttive e non distruttive, in questo lavoro di tesi sono state condotte sperimentazioni su materiali di prova differenti. Mentre nella maggior parte degli studi sono considerati materiali CEM I e CEM II, nello studio condotto è stato selezionato un materiale di prova CEM IVB, un cemento pozzolanico. La ricerca ha riguardato nello specifico lo studio degli effetti di conservazione in condizioni non controllate, simulando lo stoccaggio del materiale in un comune cantiere e gli effetti che la temperatura può avere sulla maturazione.

4.4 Teoria del metodo EMM - ARM

L'EMM-ARM è una tecnica che fornisce una misurazione continua del modulo E dei materiali cementizi che vengono gettati all'interno di una trave cilindrica acrilica e si basa sulle vibrazioni ambientali per l'identificazione dinamica. Le tecniche di identificazione con un input sconosciuto sono chiamate procedure OMA output only. L'input applicato non può essere misurato ma si assume che sia un rumore bianco gaussiano caratterizzato da uno spettro piatto nella banda di interesse. Attraverso il metodo Peak-Picking è possibile identificare le frequenze di vibrazione della trave composita. La procedura Welch viene applicata su blocchi di dati di 15 minuti e viene utilizzata per ottenere spettri di risposta puliti.

La frequenza di risonanza è correlata al modulo E attraverso l'equazione in oscillazioni libere della trave composita (Eq. 1).

$$EI \frac{\partial^4 v(x,t)}{\partial x^4} + \bar{m} \frac{\partial^2 v(x,t)}{\partial t^2} = 0 \quad \text{Eq. (1)}$$

dove E è il modulo elastico, I è il secondo momento d'inerzia della sezione trasversale composita e \bar{m} è la massa uniformemente distribuita.

Risolvendo l'equazione differenziale, è possibile valutare la forma modale:

$$\Phi(x) = A_1 \cos(ax) + A_2 \sin(ax) + A_3 \cosh(ax) + A_4 \sinh(ax) \quad \text{Eq. (2)}$$

dove:

$$a = \sqrt[4]{\frac{w^2 \bar{m}}{EI}} \quad \text{Eq. (3)}$$

Considerando le condizioni al contorno della mensola incastrata è possibile risolvere l'equazione differenziale:

$$a^3 [\cosh(aL) \cos(aL) + 1] + \frac{w^2 m_1}{EI} [\cos(aL) \sinh(aL) - \cosh(aL) \sin(aL)] = 0 \quad \text{Eq. (4)}$$

dove:

$w = 2\pi f$ è la frequenza angolare e m_1 è la massa del sensore posto sull'estremità libera della trave. Il valore di EI è ottenuto dall'Eq. 4 partendo da una stima della rigidità della trave composita e calcolato attraverso una tecnica risolutiva iterativa. Poiché m_1 è piccolo rispetto alla massa della trave e w può essere approssimato come:

$$w \cong 1.8751^2 \sqrt{\frac{EI}{\bar{m}L^4}} \quad \text{Eq. (5)}$$

la rigidità EI della trave composita può essere stimata come:

$$EI \cong \frac{\bar{m}L^4 w^2}{1.8751^4} \quad \text{Eq. (6)}$$

Dall'equazione 7 è possibile ricavare il modulo elastico del materiale cementizio:

$$EI = E_a \frac{\pi(\phi_e^4 - \phi_i^4)}{64} + E_c \frac{\pi\phi_i^4}{64} \quad \text{Eq. (7)}$$

E_a ed E_c sono rispettivamente il modulo elastico del tubo acrilico e della pasta di cemento, Φ_e e Φ_i diametro esterno ed interno del tubo acrilico.

Se il modulo elastico del tubo acrilico non è disponibile, la procedura descritta può essere eseguita sostituendo il materiale cementizio con acqua e ponendo nell'equazione 8 $E_c = 0$ e ottenendo E_a .

L'equazione 8 permette di mettere in relazione il modulo elastico del materiale cementizio con la frequenza di risonanza.

$$E_c = EI \frac{64}{\pi\phi_i^4} - E_a \frac{\phi_e^4 - \phi_i^4}{\phi_i^4} \quad \text{Eq. (8)}$$

In letteratura (Azenha et. al., 2011), questi test con acqua per valutare il modulo del tubo in acrilico vengono eseguiti una sola volta e il valore E_a ottenuto viene utilizzato per tutti i test. In questo lavoro tutti i tubi in acrilico sono stati caratterizzati con il test con acqua perché in fase di saturazione risultavano molto variabili.

4.5 Preidratazione

La qualità del materiale è molto importante per lo sviluppo delle proprietà fisiche dei materiali cementizi legate al processo di idratazione. L'esposizione del calcestruzzo all'umidità può causare un'idratazione prematura, questo fenomeno è chiamato preidratazione e influisce negativamente sulle prestazioni dei materiali. La preidratazione comporta un notevole ritardo nelle reazioni di idratazione con un aumento del tempo

di presa e una ridotta resistenza alla compressione. I silicati di calcio, gli alluminati di calcio e i solfati di calcio reagiscono con il vapore acqueo formando prodotti di idratazione sulla superficie delle particelle di cemento che riducono la reattività del cemento influenzando il comportamento all'acqua durante la normale idratazione. Si assiste alla formazione di portlandite e gesso che ritardano la formazione di ettringite e quindi la presa.

La preidratazione può avvenire sia durante la fase di produzione che nella fase di stoccaggio quando il cemento viene conservato senza particolari precauzioni per lunghi periodi in ambienti umidi; sia l'umidità relativa che la durata della preidratazione determinano l'entità dell'effetto. In letteratura sono presenti lavori (Dubina et al. 2010, Whittaker et al. 2013, Adamtsevic et al. 2014) sui cementi Portland che dal punto di vista chimico descrivono i processi del fenomeno della preidratazione. In questo studio, gli effetti dello stoccaggio su un cemento pozzolanico e Portland sono stati valutati attraverso un approccio fenomenologico.

La novità in questo studio è rappresentata dalla scelta del materiale di prova cemento pozzolanico, infatti la maggior parte degli studi considera materiali CEM I e CEM II. È stato scelto un cemento pozzolanico CEM IV/B 32.5R perché in Italia è tra i più utilizzati (Massazza e Oberti 1991) in quanto sviluppa un'elevata resistenza iniziale e fornisce una

buona protezione contro gli attacchi chimici, rendendolo idoneo in ambienti aggressivi. I test sono stati eseguiti anche su un calcestruzzo CEM II/A-LL 42,5 R.

4.6 Setup di prova

In questo lavoro è stato utilizzato, come cassaforma per la preparazione dei provini, un tubo acrilico con una lunghezza di 500 mm e con un diametro interno ed esterno $\Phi_i = 16$ mm e $\Phi_e = 20$ mm, rispettivamente.

Sull'estremo libero della trave è stato incollato un tappo in polistirolo di peso inferiore a 0,1 g.

Un sistema di spurgo per espellere l'aria è stato realizzato incollando un dado su una rondella e una barra filettata (Figura 4.1).

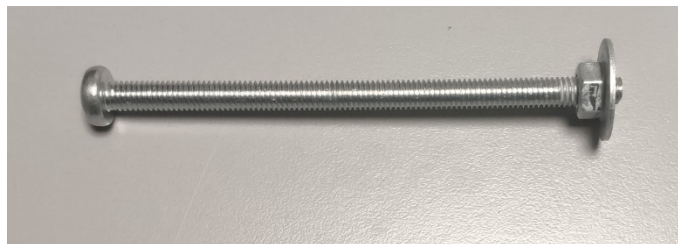


Figura 4.1. Sistema di spurgo.

Il tubo acrilico è stato inclinato di circa 15° e riempito con la pasta di cemento e successivamente è stato vibrato per eliminare vuoti e bolle d'aria. Dopo le operazioni di getto, la trave è stata posta in posizione verticale e fatta riposare per alcuni minuti, successivamente il sistema di spurgo è stato incollato e l'asta filettata è stata avvitata per eliminare l'aria residua.

Il sensore è stato applicato con della colla sull'estremo libero della trave composita.

Quindi la trave è stata posizionata orizzontalmente all'interno del dispositivo di bloccaggio con uno schema strutturale a sbalzo con una luce di 400 mm. Nel metodo Aزهنا il dispositivo ha un foro centrale con un diametro interno uguale al diametro esterno del tubo acrilico, in questo lavoro la piastra è stata modificata come mostrato in Figura 4.2.

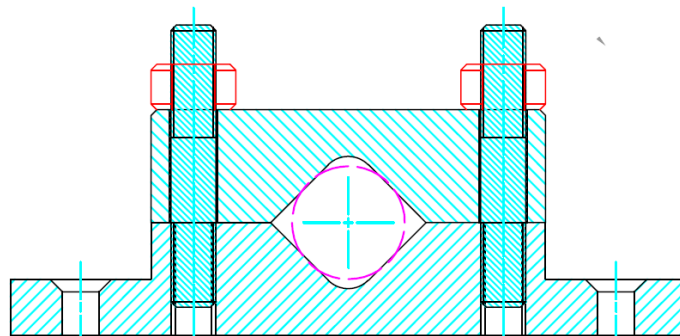


Figura 4.2. Sezione trasversale della piastra di prova.

La scelta della forma romboidale del foro centrale è stata fatta tendo in considerazione le tolleranze dei tubi e quindi per poter meglio applicare le condizioni di vincolo.

Utilizzando questo tipo di piastra è stato possibile realizzare 4 prove dello stesso materiale in contemporanea, verificando in questo modo la ripetibilità delle prove.

Il sistema è composto da due piastre in acciaio, la parte inferiore è stata fissata su una superficie rigida, successivamente è stata inserita la trave e la parte superiore collocata e serrata con una chiave dinamometrica.

Sulla parte superiore sono state realizzate delle asole per permettere l'alloggiamento di bolle per verificare la corretta applicazione del vincolo (Figura 4.3).

La catena di misura è composta da un accelerometro PCB 333B52 con una sensibilità di 1 V/g e una centralina NI Compaq DAQ 9184 9184 con una risoluzione in frequenza di 24 bit, range dinamico di 102 dB e filtro anti-aliasing integrato ed equipaggiata con moduli NI 9234.

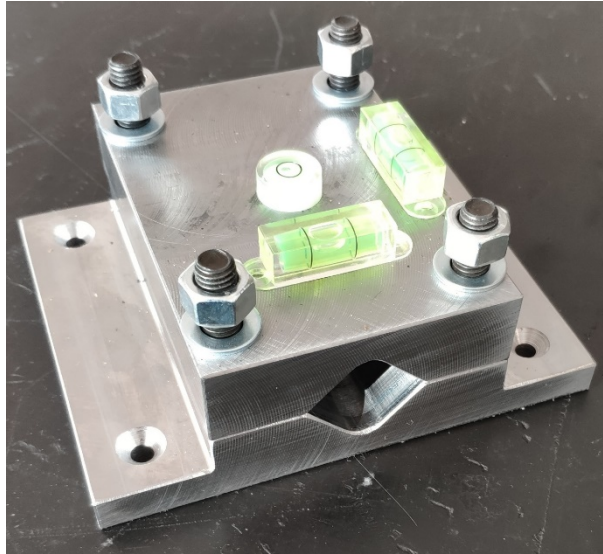


Figura 4.3. Piastra superiore con il sistema di bolle.

Le frequenze osservate erano inferiori a 50 Hz e quindi è stata scelta una frequenza di campionamento di 100 Hz. L'accelerometro è stato incollato all'estremità libera della trave. È stato utilizzato un piccolo ventilatore per migliorare il rapporto segnale/rumore e facilitare l'identificazione della frequenza di risonanza (Figura 4.4).



Figura 4.4. Setup di prova.

I dati grezzi di accelerazione sono stati registrati su un database MySQL ed elaborati alla fine del test. Tutti i test hanno avuto una durata non inferiore alle 120 ore.

La procedura di identificazione dinamica automatica è stata implementata in LabView. I dati sono stati analizzati in blocchi di 15 minuti. Ogni blocco è stato suddiviso in blocchi di 20 secondi applicando la procedura Welch, con il 50% di sovrapposizione e una finestra Hanning per ottenere spettri più puliti. Lo spettro di potenza automatica media dei blocchi è stato calcolato e normalizzato, ottenendo la frequenza di risposta mediato dei 15 minuti di acquisizione dei dati.

Nella procedura proposta da Azezna, è stata utilizzata una media ponderata dei 40 punti ad energia più alta di ogni spettro per ottenere la stima della prima frequenza di vibrazione.

In questo lavoro è stata utilizzata una procedura di rilevamento automatico del picco. Questa procedura automatica si basa su un algoritmo che adatta un polinomio quadratico a gruppi sequenziali di punti dati e impostando un'opportuna soglia. I risultati ottenuti sono stati inseriti in un grafico frequenza-tempo come mostrato in Figura 4.5.

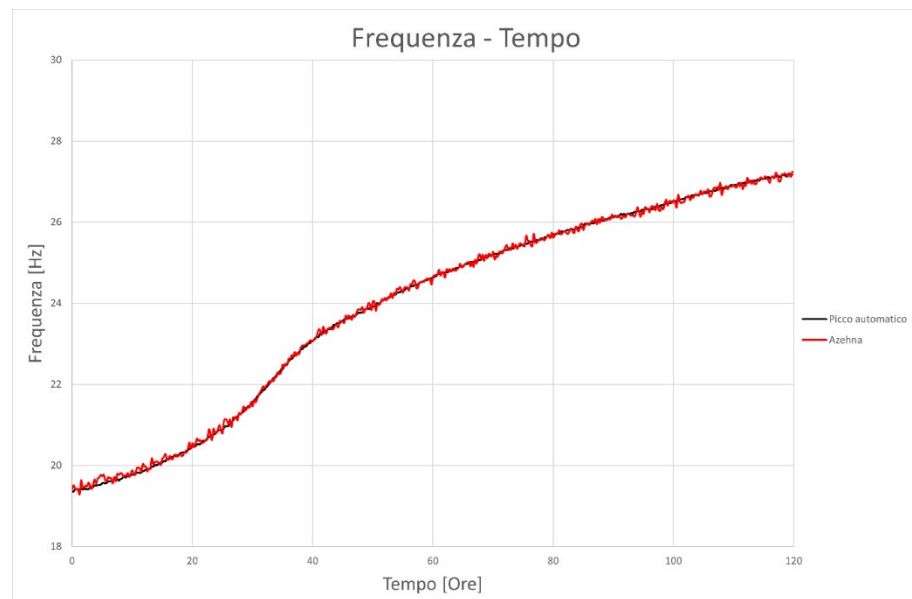


Figura 4.5. Confronto curve frequenza – tempo.

Dalla figura si può notare dalla sovrapposizione delle curve, che la procedura con picco automatico porta agli stessi risultati ma con una curva più pulita e meno frastagliata rispetto a quella realizzata con la procedura proposta da Azehna.

4.7 Materiali

In questo lavoro sono state effettuate una serie di prove su paste cementizie realizzate utilizzando due tipi di cemento: i) CEM II/A LL 42.5 R un cemento Portland calcareo con un contenuto di clinker compreso tra 80% e 94%; ii) CEM IV/B (P) 32,5 R un cemento pozzolanico con un contenuto di clinker compreso tra il 45% e il 64%. È stato utilizzato un additivo stagionante in grado di ridurre il ritiro idraulico e la formazione di microfessurazioni con un dosaggio consigliato per evitare fessurazioni dovute alla ridotta sezione della trave.

L'impasto è stato preparato utilizzando 900 g di cemento, 450 g di acqua e 3 g di additivo. Per ogni prova sono stati realizzati quattro provini della stessa pasta cementizia per garantire la ripetibilità dell'esperimento.

Nella Tabella 4.2 sono riportate le specifiche dei test effettuati a 0, 30, 240 e 360 giorni di conservazione.

Specimen	Material	w/c Ratio	Curing additive (wt %)	Time (day)	Temperature	RH
325_0	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	0	20 ± 0.5	30 %
325_30	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	30	20 ± 0.5	35 %
325_240	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	240	20 ± 0.5	30 %
325_360	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	360	20 ± 0.5	30 %
425_0	CEM II/A-LL 42.5 R	0.5	0.33	0	20 ± 0.5	30 %
425_240	CEM II/A-LL 42.5 R	0.5	0.33	240	20 ± 0.5	40 %

Tabella 4.2. Test effettuati per lo stoccaggio.

La Tabella 4.3 mostra le prove effettuate a diverse temperature di maturazione.

Specimen	Material	w/c Ratio	Curing additive (wt %)	Temperature	RH
325_24	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	24	45 %
325_21	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	21	50 %
325_15	CEM IV/B (P) 32.5 R-SR	0.5	0.33	15	70 %

Tabella 4.3. Test a differenti temperature di maturazione.

4.8 Risultati

I risultati mostrano una riduzione della rigidità del materiale all'aumentare del periodo di stoccaggio. L'effetto di riduzione è più evidente

per i cementi Portland che per quelli pozzolanici. Per temperature inferiori a 20°C si nota una forte riduzione del modulo E ed è maggiore rispetto agli effetti di stoccaggio.

4.8.1 Effetto dello stoccaggio

Nella valutazione degli effetti di stoccaggio del cemento pozzolanico sfuso e del cemento Portland, è stato possibile osservare che le frequenze identificate della trave partono da circa 20 Hz fino a circa 29 Hz dopo 120 per CEM IV/B e 36 Hz per CEM II/A (Figura 4.6).

Nella fase iniziale è previsto un periodo dormiente dell'impasto fino a 4 - 5 ore dall'inizio della prova. Durante la fase di idratazione è stato possibile monitorare l'evoluzione del contributo di irrigidimento del cemento all'aumentare della frequenza di vibrazione naturale della trave.

La Figura 4.7 mostra i risultati per CEM IV/B conservati in condizioni normali senza particolari precauzioni per diversi mesi. Le prove sono state effettuate con un materiale nuovo e conservato a 1, 8 e 12 mesi nelle stesse condizioni di temperatura e umidità relativa. È possibile osservare una progressiva riduzione del modulo E ed un aumento del tempo di presa ed indurimento all'aumentare del tempo di stoccaggio. Dopo 120 ore, il materiale conservato per 1 mese mostra una riduzione del modulo del 4%, il materiale dopo 8 mesi del 14% e il materiale dopo 12 mesi del 19%.

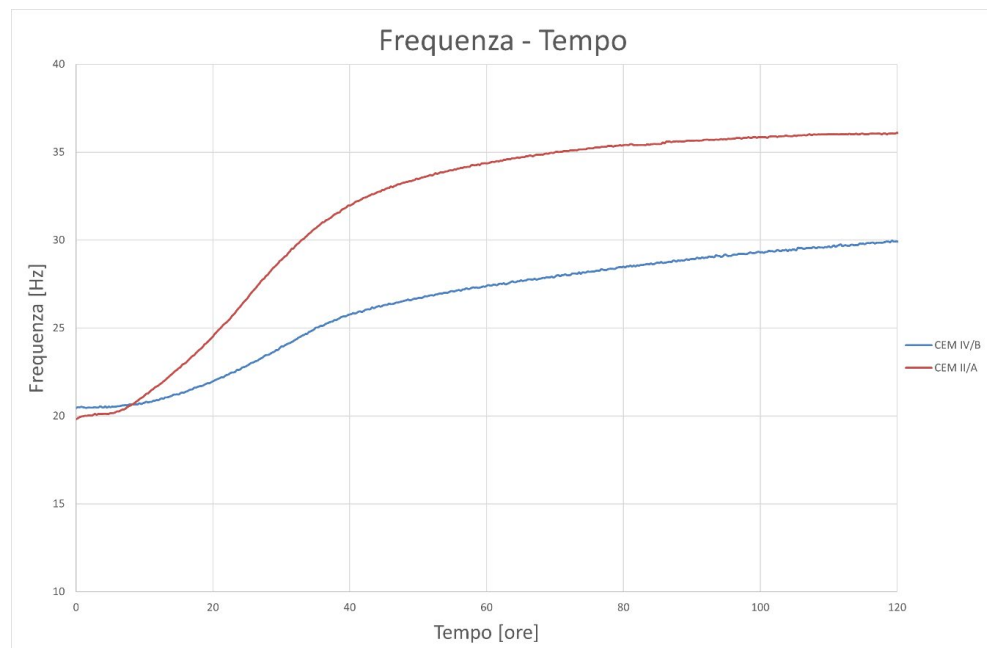


Figura 4.6. Confronto frequenze identificate.

È stato testato anche un materiale CEM II/A con un contenuto di clinker più elevato. I test sono stati eseguiti con materiale nuovo e conservato per 8 mesi. In questo caso la riduzione del modulo E è più significativa a causa del maggior contenuto di clinker che è più sensibile alle condizioni di stoccaggio.

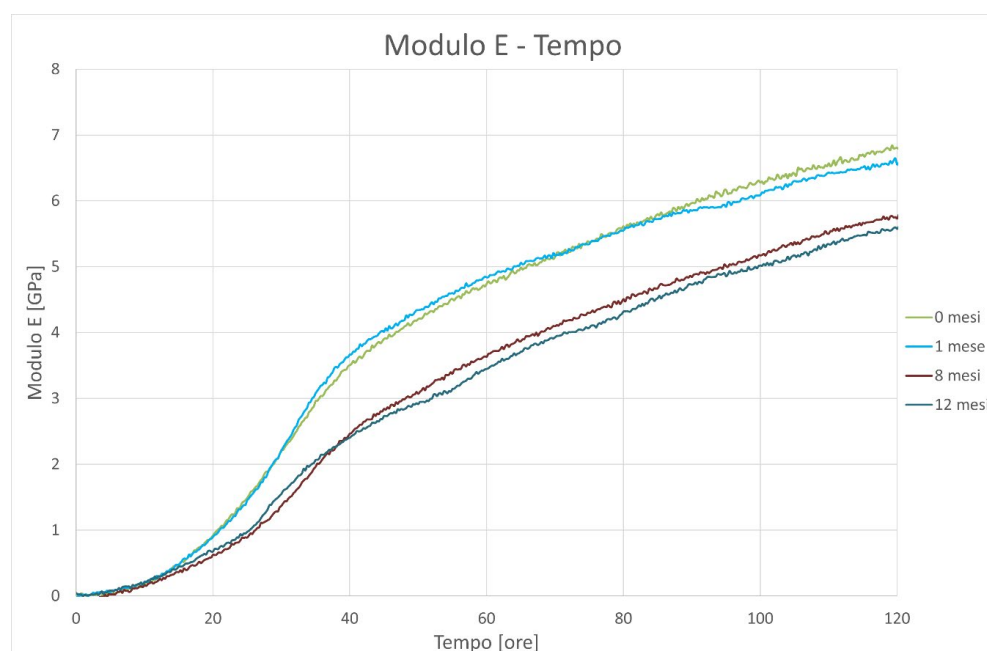


Figura 4.7. Risultati prove di stoccaggio.

In Figura 4.8 sono riportati i risultati ottenuti per il CEM II/A.

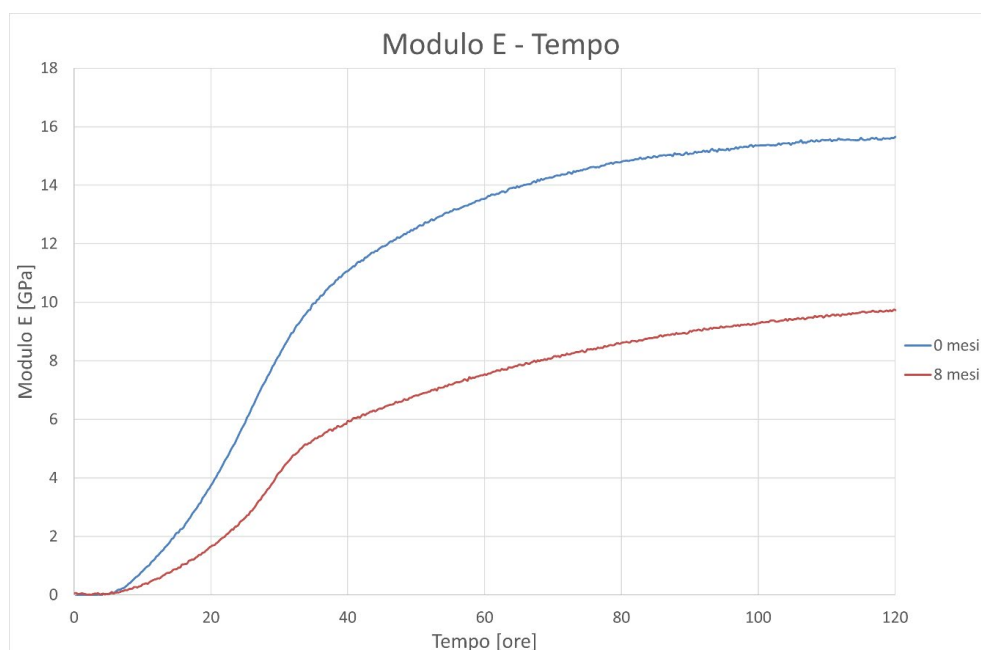


Figura 4.8

Per il materiale immagazzinato dopo 8 mesi si è verificata una riduzione del modulo E del 40% dopo 120 ore.

Il fenomeno è da correlare all'invecchiamento del materiale ma anche alla preidratazione che può verificarsi in ambienti umidi riducendo la reattività del cemento. In questo lavoro è stato dimostrato solo da un punto di vista sperimentale il fenomeno, ed è relativo alla riduzione del modulo E. Nei lavori presenti in letteratura la preidratazione è stata indotta esponendo il materiale ad umidità controllata e riguardavano solo cementi Portland, non esistono prove effettuate su cementi pozzolanici. Il cemento pozzolanico si è rivelato meno sensibile rispetto al Portland al fenomeno della preidratazione.

4.8.2 Effetto della temperatura

I test sono stati eseguiti con diverse temperature di maturazione per il CEM IV/B. In letteratura sono presenti lavori dove sono state effettuate prove con diverse temperature di maturazione (Granja et al. 2014, Velay-Lizancos et al. 2018, Ramesh et al. 2019) con temperature pari e superiori a 20° C.

In questo lavoro le prove sono state effettuate a 15°, 21° e 24 °C.

In Figura 4.9 vengono mostrati i risultati delle prove effettuate. Sopra i 24°C il modulo E aumenta leggermente, ma a 15°C si nota una forte riduzione dei tempi di presa e indurimento.

In accordo con i risultati presenti in letteratura, le reazioni di idratazione e la velocità delle reazioni cinetiche avvengono più rapidamente all'aumentare della temperatura di maturazione.

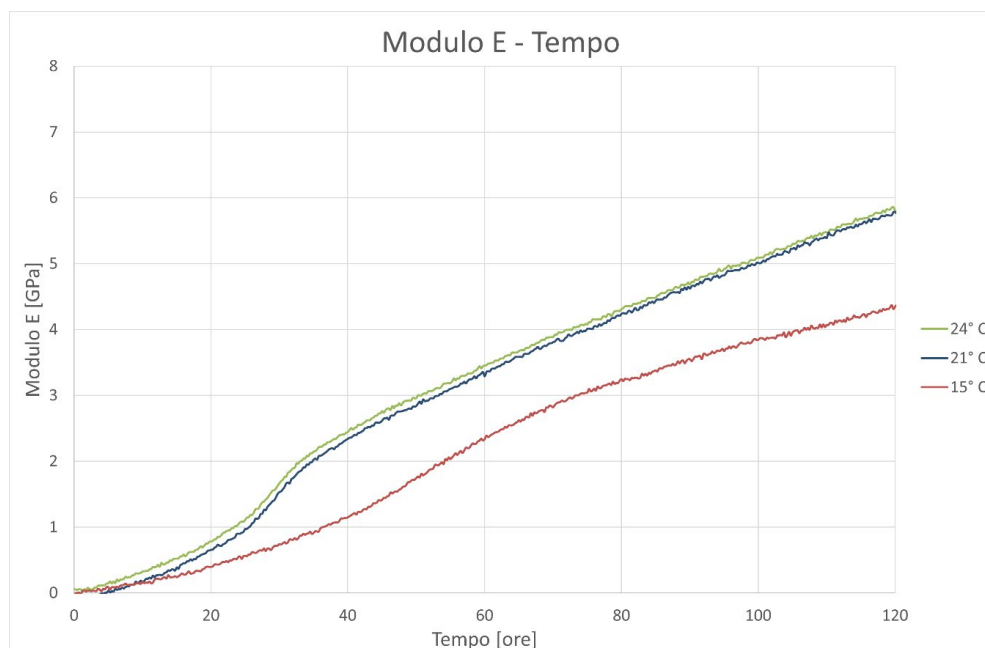


Figura 4.8. Risultati test di temperatura.

La prova a 20°C dopo 120 ore di maturazione mostra una variazione minima inferiore all'1%, mentre la prova a 15°C mostra una variazione del 25%. Un altro fenomeno riscontrato è la riduzione del periodo dormiente del processo di idratazione che si riduce a 3 ore per il test a 24°C.

Nell'ambito del progetto PRIN vengono menzionati gli FRCM (Fiber Reinforced Cement Matrix) e gli FRGM (Fabric Reinforced Green Matrix) come materiale da studiare e testare al fine di proporre tecniche di intervento ecosostenibili e reversibili rispettando la filosofia del minimo intervento per gli edifici storici.

In quest'ottica si è deciso di eseguire una prova su una malta cementizia premiscelata bicomponente a base di leganti a reattività pozzolanica e fibro rinforzata, PLANITOP HDM MAXI.

In Figura 4.9 sono riportati i risultati confrontandoli con quelli ottenuti con le paste di cemento realizzate con CEM II e CEM IV. Il test è stato eseguito con le stesse condizioni di temperatura e stoccaggio per tutti e tre i materiali.

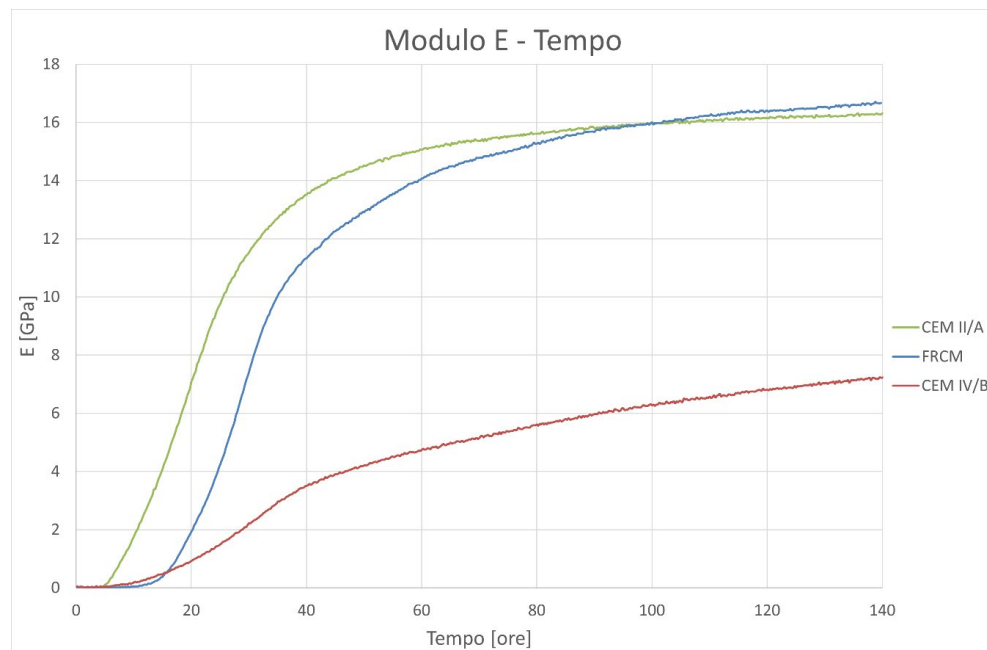


Figura 4.9. Confronto risultati CEM II, CEM IV e FRCM.

Si può notare una fase dormiente superiore per gli FRCM rispetto agli altri materiali, la curva è sostanzialmente simile a quella ottenuta per il CEM II ma a differenza di questa il plateau dopo 140 ore non è stato ancora raggiunto, mentre il CEM II tende a stabilizzarsi e sviluppare le proprietà meccaniche.

CAPITOLO 5 - CONCLUSIONI

Questo lavoro di tesi si è focalizzato sulle tecnologie per il monitoraggio e la gestione degli interventi di strutture storiche.

Il lavoro si è focalizzato su tre tematiche principali:

- monitoraggio strutturale;
- BIM;
- attività sperimentali su materiali cementizi.

Dalla revisione della letteratura è emerso che il monitoraggio basato sulle vibrazioni risulta uno strumento idoneo per la valutazione dello stato di salute delle strutture storiche consentendo un passaggio da una manutenzione programmata a un approccio proattivo. Identificando le proprietà dinamiche della struttura, è possibile valutare anche il risultato di interventi effettuati andando a valutare le modifiche dei parametri modali.

Le variazioni delle frequenze di vibrazione sono risultate un ottimo indicatore per valutare l'insorgere di anomalie strutturali. Essendo sensibili alle variabili ambientali risulta opportuno rimuovere tali effetti grazie all'uso di strumenti statistici.

Poiché le finalità del monitoraggio variano a seconda dell'applicazione e della struttura da indagare, non esiste un unico sistema di monitoraggio adeguato per tutte le tipologie di strutture.

Per il Campanile di Civitacampomariano si prevede di ampliare la catena di misura inserendo altri accelerometri e altri sensori per misure statiche

come inclinometri e termocoppie interne ed esterne. Si cercherà di migliorare i settaggi delle analisi per avere il tracking delle frequenze dei modi superiori.

Verranno integrati strumenti per la rimozione degli effetti ambientali per la valutazione di anomalie strutturali. Dopo l'evento sismico si è rilevato un drop delle frequenze che andrà valutato con i dati acquisiti successivamente.

L'utilizzo di tecniche OMA automatizzate può essere una risorsa anche in ottica di early warning.

L'utilizzo delle tecnologie digitali e dei processi BIM nell'ambito del settore AEC ha aperto nuovi scenari per i processi di gestione e supporto delle decisioni relative al patrimonio costruito. In questo lavoro è stato affrontato il tema dell'interoperabilità che risulta fondamentale per lo scambio di informazioni delle varie discipline, valutando i vantaggi e svantaggi dell'utilizzo del formato IFC.

L'interoperabilità orizzontale è risultato soddisfacente, mentre con l'interoperabilità verticale il formato mostra tutti i suoi limiti. I test effettuati dimostrano come questo formato non sia ancora in grado di trattare informazioni strutturali che sono fondamentali per trasferire il modello ad un programma agli elementi finiti per effettuare analisi statiche e dinamiche.

Valutando i file esportati in formato IFC si nota che i principali software CAD mappano gli elementi in maniera differente creando problemi nell'importazione in formato CAE.

In questo lavoro per lo scambio CAD - CAE è stato utilizzato un plugin proprietario in quanto gli MVD attuali non consentono un flusso di lavoro senza perdita di informazioni.

Il BIM potendo gestire una vasta gamma di dati eterogenei è uno strumento utile per la realizzazione di un gemello digitale di una struttura storica.

Il gemello digitale rappresenta una replica virtuale di un sistema fisico e viene utilizzato per la rappresentazione dello stato attuale della struttura. Sfruttando i dati provenienti da sistemi SHM, il model updating e il BIM è stato possibile realizzare uno strumento integrato di facility management completamente automatizzato in grado di raccogliere tutti i dati in un unico ambiente.

Queste tecnologie combinate aprono la strada alla convergenza di altre tecnologie digitali come il GIS, realtà virtuale, realtà aumentata e metaverso fornendo soluzioni innovative per la progettazione, gestione e manutenzione delle strutture.

I materiali cementizi svolgono un ruolo fondamentale per gli interventi di rinforzo e retrofitting delle strutture e risulta fondamentale conoscere quando questi materiali sviluppano le proprietà meccaniche richieste.

In letteratura sono presenti diverse tipologie di prove non distruttive per indagare gli effetti della stagionatura sulle proprietà meccaniche. È stata utilizzata la tecnica EMM – ARM che consente di valutare l'evoluzione del modulo E dei materiali monitorando la frequenza di risonanza di una trave composita.

Rispetto al metodo disponibile in letteratura sono state effettuate delle modifiche al setup di prova realizzando una piastra che si differenzia da quella presente in letteratura per il foro centrale. Sono state effettuate modifiche anche nelle analisi introducendo un tool per l'identificazione automatica della frequenza di vibrazione che ha portato a curve più pulite rispetto al metodo proposto in letteratura.

Un altro elemento di novità rispetto ai lavori presenti in letteratura è stata la scelta del cemento pozzolanico, poiché presenti lavori quasi esclusivamente con cementi ordinari Portland.

In questo lavoro sono stati indagati l'effetto di storage sia su un cemento pozzolanico che Portland, rilevando in quest'ultimo l'effetto maggiore di riduzione delle proprietà meccaniche.

Sono stati effettuati anche test per la valutazione dell'effetto della temperatura sulla maturazione di paste cementizie, rilevando che all'aumentare della temperatura le reazioni di idratazione avvengono più velocemente.

Questa tecnica si è rilevata affidabile per la valutazione del modulo E nell'early age e può essere utilizzata anche per testare nuove tipologie di materiali come gli FRCM e gli FGRM.

BIBLIOGRAFIA

- Adamtsevic, A.; Eremin, A.; Pustovgar, A.; Pashkevich, S.; Nefedov, S. *Research on the Effect of Prehydration of Portland Cement Stored in Normal Conditions*. Applied Mechanics and Materials. 2014, 670, pp. 376-381. <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.670-671.376>.
- Aldegeily, M., Hu, Y., Shao, X., Zhang, J. *From Architectural Design to Structural Analysis: A Data-Driven Approach to Study Building Information Modeling (BIM) Interoperability*. Proceeding 54th ASC Annual International Conference, Associated Schools of Construction, Minneapolis, USA, 2018, pp. 537-545.
- Al-Sehrawy, R., Kumar, B. *Digital Twins in Architecture, Engineering, Construction and Operations. A Brief Review and Analysis*. In: Toledo Santos, E., Scheer, S. (eds) Proceedings of the 18th International Conference on Computing in Civil and Building Engineering. ICCCBE 2020. Lecture Notes in Civil Engineering, vol 98. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-030-51295-8_64.
- Atamturktur, S., Bornn, L., Hemez, F. *Vibration characteristics of vaulted masonry monuments undergoing differential support settlement*. Engineering Structures. 2011, 33, pp. 2472-2484. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2011.04.020>.
- Azenha, M.; Faria, R.; Magalhães, F.; Ramos, L.; Cunha, A. *Measurement of the E-modulus of cement pastes and mortars since casting, using a vibration based technique*. Materials and Structures. 2011, 45, pp. 81-92. <https://doi.org/10.1617/s11527-011-9750-9>.
- Azenha, M.; Magalhães, F.; Faria, R.; Cunha, Á. *Measurement of concrete E-modulus evolution since casting: A novel method based on ambient vibration*. Cement and Concrete Research. 2010, 4, pp. 1096-1105. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2010.02.014>.

- Azenha, M.; Ramos, L.; Aguilar, R.; Granja, J. *Continuous monitoring of concrete E-modulus since casting based on modal identification: A case study for in situ application*. *Cement and Concrete Composites*. 2012, 34, pp. 881-890. <https://doi.org/10.1016/j.cemconcomp.2012.04.004>.
- Azenha, M.; Silva, J.; Granja, J.; Gomes-Correia, A. *A Retrospective View of EMM-ARM: Application to Quality Control in Soil-improvement and Complementary Development*. *Procedia Engineering*. 2016, 143, pp. 339-346. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.06.043>
- Barontini, A., Masciotta, M. G., Ramos, L. F., Amado-Mendes, P., Lourenço, P. B. *An overview on nature-inspired optimization algorithms for Structural Health Monitoring of historical buildings*. *Procedia Engineering*. 2017, 199, pp. 3320-3325. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.439>.
- Boddupalli, C., Sadhu, A., Azar, E.R., Pattyson, S. *Improved visualization of infrastructure monitoring data using building information modeling*. *Structure and Infrastructure Engineering*. 2019. <https://doi.org/10.1080/15732479.2019.1602150>.
- Bouzas, O., Cabaleiro, M., Conde, B., Cruz, Y., Riveiro, B. *Structural health control of historical steel structures using HBIM*. *Automation in Construction*. 2022, 140. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104308>.
- buildingSMART International, *Coordination View Version 2.0 Summary*, <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition/coordination-view-v2.0/summary>.
- buildingSMART International, *Structural Analysis View Summary*, <http://www.buildingsmart-tech.org/specifications/ifc-view-definition/structural-analysis-view/structural-analysis-view-summary>.

- buildingSMART International, IFC Specifications Database, <https://technical.buildingsmart.org/standards/ifc/ifc-schema-specifications/>.

- Cabboi, A., Gentile, C., Saisi, A. *From continuous vibration monitoring to FEM-based damage assessment: Application on a stone-masonry tower*. Construction and Building Materials. 2017, 156, pp. 252-265. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.08.160>.

- Calleja, J. *New Technique in the Study of Setting and Hardening of Hydraulic Materials*, Journal of ACI, 1952, Vol. 23, No.7, pp. 525-536

- Cardoso, R., Cury, A., Barbosa, F., Gentile, C. *Unsupervised real-time SHM technique based on novelty indexes*. Structural Control and Health Monitoring. 2019, 26. <https://doi.org/10.1002/stc.2364>.

- Cavagli, N., Comanducci, G., Gentile, C., Guidobaldi, M., Saisi, A., Ubertini, F. *Detecting earthquake-induced damage in historic masonry towers using continuously monitored dynamic response-only data*. Procedia Engineering. 2017, 199, pp. 3416-3421. <https://doi.org/10.1016/j.pro-eng.2017.09.581>.

- Chalouhi, E. K., Gonzalez, I., Gentile, C., Karoumi, R. *Damage detection in railway bridges using Machine Learning: application to a historic structure*. Procedia Engineering. 2017, 199, pp.1931-1936. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2017.09.287>.

- Chiaia, B., Davardoust, S., Osello, A. *Structural calculations by horizontal and vertical interoperability for the redevelopment of existing buildings*. Proceeding XIII International Forum Heritage and Technology, Le vie dei Mercanti, Aversa, Italy, 2015, pp. 650-658.

- Chini M., Pierdicca N., Emery W.J. *Exploiting SAR and VHR optical images to quantify damage caused by the 2003 Bam Earthquake*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, 2009.

- Cuomo V., Soldovieri F., Ponzo F.C., Ditommaso R. *A holistic approach to long term SHM of transport infrastructures*. The International Emergency Management Society, Newsletter - ISSUE 33, 2018.
- Davila Delgado, M., Butler, L. *Structural performance monitoring using a dynamic data-driven BIM environment*. Journal of Computing in Civil Engineering. Volume. 2018, 32.
- Davila Delgado, M., Butler, L., Gibbons, N., Brilakis, I., Elshafie, M., Middleton, C. *Management of structural monitoring data of bridges using BIM*. Bridge Engineering Volume. 2016, 170. <https://doi.org/10.17863/CAM.6377>.
- Delsaute, B.; Boulay, C.; Granja, J.; Carette, J.; Azenha, M.; Dumoulin, C.; Karaiskos, G.; Deraemaeker, A.; Staquet, S. *Testing Concrete E-modulus at Very Early Ages Through Several Techniques: An Inter-laboratory Comparison*. Strain, 52, 2016. <https://doi.org/10.1111/str.12172>.
- Deraemaeker, A., Reynders, E., De Roeck, G., Kullaa, J. *Vibration-based structural health monitoring using output-only measurements under changing environment*, Mechanical Systems and Signal Processing, 22, pp. 34-56, 2008.
- Ditommaso R., Mucciarelli M., Ponzo F.C. *Analysis of non-stationary structural systems by using a band-variable filter*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2012.
- Dubina, E.; Black, L.; Sieber R.; Plank, J. *Interaction of water vapour with anhydrous cement minerals*. Advances in Applied Ceramics. 2010, 109, pp. 260-268. <https://doi.org/10.1179/174367509X12554402491029>.
- Dunant, C.F.; Granja, J.; Muller, A.; Azenha M.; Scrivener, K. *Microstructural simulation and measurement of elastic modulus evolution of hydrating cement pastes*. Cement and Concrete Research. 2020, 130, 106007. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2020.106007>.

- Eastman, C., Teicholz, P., Sacks, R., Liston, K. *BIM Handbook: A Guide to Building Information Modeling for Owners, Managers, Designers, Engineers and Contractors*. Second Edi, John Wiley & Sons, Hoboken, New Jersey, USA, 2011.
- Final Report of RILEM TC 185-ATC. *Advanced testing of cement-based materials during setting and hardening*, (ISBN: 2-912143-81-0; e-ISBN: 2-912143-70-5); Eds. H. W. Reinhardt and C. U. Grosse.
- Gamba P., Dell'Acqua F., Trianni G. (2007). *Rapid damage detection in the Bam area using multitemporal SAR and exploiting ancillary Data*. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing.
- García-Macías, E., Ubertini, F. *Automated operational modal analysis and ambient noise deconvolution interferometry for the full structural identification of historic towers: A case study of the Sciri Tower in Perugia, Italy*. Engineering Structures. 2020, 215. <https://doi.org/10.1016/j.eng-struct.2020.110615>.
- García-Macías, E., Venanzi, I., Ubertini, F. *Metamodel-based pattern recognition approach for real-time identification of earthquake-induced damage in historic masonry structures*. Automation in Construction. 2020, 120. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2020.103389>.
- García-Macías, E., Ubertini, F. *Seismic interferometry for earthquake-induced damage identification in historic masonry towers*. Mechanical Systems and Signal Processing. 2019, 132, pp. 380-404. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2019.06.037>.
- Garijo, L.; Azenha, M.; Ramesh, M.; Lourenço, P.; Ruiz, G. *Stiffness evolution of natural hydraulic lime mortars at early ages measured through EMM-ARM*. Construction and Building Materials. 2019, 216, pp. 405-415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.258>.
- Garijo, L.; Azenha, M.; Ramesh, M.; Lourenço, P.; Ruiz, G. *Stiffness evolution of natural hydraulic lime mortars at early ages measured through*

- EMM-ARM. *Construction and Building Materials*. 2019, 216, pp. 405-415. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.04.258>.
- Gentile, C., Ruccolo, A., Canali, F. *Long-term monitoring for the condition-based structural maintenance of the Milan Cathedral*. *Construction and Building Materials*. 2019, 228. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.117101>.
 - Gentile, C., Saisi, A. *Assessment of Environmental Effects for Vibration-Based Damage Detection of Historic Masonry Towers*. *Proceedings*. 2018, 2, 8. <https://doi.org/10.3390/ICEM18-05324>.
 - Gerbino, S., Cieri, L., Rainieri, C., Fabbrocino, G. *On BIM Interoperability via the IFC Standard: An Assessment from the Structural Engineering and Design Viewpoint*. *Applied Sciences*. 2021, 11. <https://www.mdpi.com/2076-3417/11/23/11430>.
 - Granja, J.; Azenha, M. *Towards a robust and versatile method for monitoring E-modulus of concrete since casting: Enhancements and extensions of EMM-ARM*. *Strain* 2017, vol. 53, pp. 1-19. <https://doi.org/10.1111/str.12232>.
 - Granja, J.; Azenha, M.; de Sousa C.; Ferreira, C. *Comparison between different experimental techniques for stiffness monitoring of cement pastes*. *Journal of Advanced Concrete Technology*. 2014, 12, pp. 45-61. <https://doi.org/10.3151/jact.12.46>
 - Hou, G., Li L., Xu, Z., Chena, Q., Liu, Y., Qiu, B. *A BIM-Based Visual Warning Management System for Structural Health Monitoring Integrated with LSTM Network*. *KSCE Journal of Civil Engineering*. 2021, 25(8), pp. 2779-2793.
 - Jeong, Y. S., Eastman, C.M., Sacks, R., Kaner, I. *Benchmark tests for BIM data exchanges of precast concrete*. *Autom. Constr.* 18 (2009), pp. 469-484, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2008.11.001>.

- Kim, J. T. *Autonomous smart sensor nodes for global and local damage detection of prestressed concrete bridges based on accelerations and impedance measurements*. *Smart Structures and Systems*, 2010, 711.
- Kita, A., Cavagli, N., Ubertini, F. *Temperature effects on static and dynamic behavior of Consoli Palace in Gubbio, Italy*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2019, 120, pp. 180-202. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.10.021>.
- Kouris, L. A. S., Penna, A., Magenes, G. *Seismic damage diagnosis of a masonry building using short-term damping measurements*. *Journal of Sound and Vibration*. 2017, 394, pp. 366-391. <https://doi.org/10.1016/j.jsv.2017.02.001>.
- Lai, H. Deng, X. *Interoperability analysis of IFC-based data exchange between heterogeneous BIM software*, *Journal of Civil Engineering and Management*. 24-7 (2018), pp. 537-555, <https://doi.org/10.3846/jcem.2018.6132>.
- Lee, G.; Won, J.; Ham, S.; Shin, Y. *Metrics for Quantifying the Similarities and Differences between IFC Files*, *Journal of Computing in Civil Engineering*, 25, 2011, pp. 172-181, [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)CP.1943-5487.0000077](https://doi.org/10.1061/(ASCE)CP.1943-5487.0000077).
- Li, Z., Feng, M. Q., Luo, L., Feng, D., Xu, X. *Statistical analysis of modal parameters of a suspension bridge based on Bayesian spectral density approach and SHM data*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2018, 98, pp. 352-367. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2017.05.005>.
- Limongelli M.P. *Seismic health monitoring of an instrumented multistory building using the interpolation method*. *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, 2014.
- Lin T. H., Lu Y. C., Hung S. L. *Locating damage using integrated global-local approach with wireless sensing system and single-chip impedance measurement device*. *Scientific World Journal*, 2014.

- Lorenzoni, F., Casarin, F., Caldon, M., Islami, K., Modena, C. *Uncertainty quantification in structural health monitoring: Applications on cultural heritage buildings*. Mechanical Systems and Signal Processing. 2016, 66-67, pp. 268-281. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2015.04.032>.
- Maia, L.; Azenha, M.; Faria R.; Figueiras, J. *Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions*. Cement and Concrete Research. 2011, 41, pp. 799-807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.008>.
- Maia, L.; Azenha, M.; Faria, R.; Figueiras, J. *Influence of the cementitious paste composition on the E-modulus and heat of hydration evolutions*. Cement and Concrete Research. 2011, 41, pp. 799-807. <https://doi.org/10.1016/j.cemconres.2011.03.008>.
- Marcolin, G. *Structural Information Modeling proposta di sviluppo di standard informative open BIM per l'integrazione di analisi strutturali*, Master thesis (in Italian). University of Padua, Department of Civil, Environment and Architectural Engineering, 2017, <http://tesi.cab.unipd.it/56332>, Accessed date: 14 May 2018.
- Marra, A., Rainieri, C., Fabbrocino, G., D'Amico, S., Venuti, V. *On the Role of Historical Research in the Structural Condition Assessment of Heritage Structures*. Handbook of Cultural Heritage Analysis, Springer International Publishing, 2022.
- Massazza, F.; Oberti G. *Durability of pozzolanic cements and italian experience in mass concrete*. In Durability of Concrete, second international conference, Montreal, Canada, 4-9 August 1991.
- Mazaheripour, H.; Faria, R.; Ye, G.; Schlangen, E.; Granja J.; Azenha, M. *Microstructure-Based Prediction of the Elastic Behaviour of Hydrating Cement Pastes*. Applied Sciences. 2018, 8, pp. 442. <https://doi.org/10.3390/app8030442>.

- McCarter, W. J. and Brousseau, R. *The A. C. response of hardened cement paste*, Cement and Concrete Research, 1990, Vol. 20, 1990, pp. 891-900.
- Mengelkamp, G., Fritzen, C. P. *Combination of global and local methods for Structural Health Monitoring*. 2006.
- Meoni, A., Vittori, F., Piselli C., D'Alessandro, A., Pisello, A.L., Ubertini, F. *Integration of structural performance and human-centric comfort monitoring in historical building information modelling*. Automation in Construction. 2022, 138. <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2022.104220>.
- Mesquita, E., Arêde, A., Pinto, N., Antunes, P., Varum, H. *Long-term monitoring of a damaged historic structure using a wireless sensor network*. Engineering Structures. 2018, 161, pp. 108-117. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2018.02.013>.
- Muller, M. F., Garbers, A., Esmanioto, F., Huber, V., Loures, E. R., Canciglieri Jr O. *Data interoperability assessment through IFC for BIM in structural design – A five-year gap analysis*, Journal of Civil Engineering and Management, 23-7 (2017), pp. 943-954, <https://doi.org/10.3846/13923730.2017.1341850>.
- Nizam, R. S, Zhang, C. *Current State of Information Exchange between the two most popular BIM software: Revit and Tekla*. Proceeding 1st International Conference on Sustainable Building and Structures, Sustainable Building and Structures, Suzhou, P.R. China, 2015.
- O'Shea, M., Murphy, J. *Design of a BIM Integrated Structural Health Monitoring System for a Historic Offshore Lighthouse*. Buildings. 2020, 10, 131; doi:10.3390/buildings10070131.
- Pazlar, T. Turk, Z. *Interoperability in practice: Geometric data exchange using the IFC standard*, Journal of Information Technology in Construction (ITcon), Special Issue Case Studies of BIM 13 (2008), pp. 362-380.

- Peeters B., De Roeck G. *One year monitoring of the Z24 bridge: environmental influences versus damage effects*. In: Proceedings of the IMAC-XVIII San Antonio, TX, 2000.
- Ponzo F.C., Ditommaso R., Auletta G., Mossucca A. *A Fast Method for Structural Health Monitoring of Italian Strategic Reinforced Concrete Buildings*. Bulletin of Earthquake Engineering, 2010.
- Radzieński, M., Krawczuk, M., Palacz, M. *Improvement of damage detection methods based on experimental modal parameters*. Mechanical Systems and Signal Processing. 2011, 25, pp. 2169-2190. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2011.01.007>.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G. *Development and validation of an automated operational modal analysis algorithm for vibration-based monitoring and tensile load estimation*. Mechanical Systems and Signal Processing. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2015.01.019>.
- Rainieri, C., Fabbrocino, G. *Operational Modal Analysis of civil engineering structures: an introduction and guide for applications*. Springer, 2014, New York, USA.
- Rainieri C., Gargaro D., Fabbrocino G., Maddaloni G., Di Sarno L., Prota A., Manfredi G. *Shaking table tests for the experimental verification of the effectiveness of an automated modal parameter monitoring system for existing bridges in seismic areas*. Structural Control and Health Monitoring. Volume 25, Issue 7, Article number e2165, 2018.
- Ramaji, I. J., Memari, A. M. *Interpretation of structural analytical models from the coordination view in Building information models*, Autom. Constr. 90 (2018), pp.117-133, <https://doi.org/10.1016/j.autcon.2018.02.025>.
- Ramesh, M.; Azenha M.; Lourenço P.B. *Study of Early Age Stiffness Development in Lime–Cement Blended Mortars*. In Structural Analysis of Historical Constructions. RILEM Bookseries, Aguilar, R., Torrealva,

- D., Moreira, S., Pando, M.A., Ramos, L.F., Springer: Cham, Netherlands, 2019, 18, pp. 397–404. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99441-3_42.
- Ramesh, M.; Azenha M.; Lourenço, P.B. *Mechanical properties of lime-cement masonry mortars in their early ages*. *Materials and Structures*. 2019, 52, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1319-z>.
 - Ramesh, M.; Azenha M.; Lourenço, P.B. *Mechanical properties of lime-cement masonry mortars in their early ages*. *Materials and Structures*. 2019, 52, pp. 1-14. <https://doi.org/10.1617/s11527-019-1319-z>.
 - Rosati, I., Fabbrocino, G., Rainieri, C. *A discussion about the Douglas-Reid model updating method and its prospective application to continuous vibration-based SHM of a historical building*. *Engineering Structures*. 2022, 273. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2022.115058>.
 - Rytter, A. *Vibrational Based Inspection of Civil Engineering Structures*, Department of Building Technology and Structural Engineering, University of Aalborg, 1993.
 - Saisi, A., Gentile, C., Guidobaldi, M. *Post-earthquake continuous dynamic monitoring of the Gabbia Tower in Mantua, Italy*. *Construction and Building Materials*. 2015, 81, pp. 101-112. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2015.02.010>.
 - Sibenik, G. *Building information modelling based interdisciplinary data exchange: a case study*, Proceeding 1st International UK BIM Academic Forum Conference, Glasgow, Scotland, 2016, pp. 379-390.
 - Sibenik, G., Kovacic, I. *Current state of data exchange between architectural and structural analysis models – a critical review*, Proceeding Conference on Computing in Construction (JC3), Heraklion, Greece, 2017, pp.263-270.
 - Silkorsky C. (1999). *Development of a Health Monitoring System for Civil Structures using a Level IV Non-Destructive Damage Evaluation Method*,

Proceedings of the 2nd International Workshop on Structural Health Monitoring, Stanford, CA, USA.

- Silva, J.; Azenha, M.; Correia A.; Granj, J. *Continuous monitoring of sand–cement stiffness starting from layer compaction with a resonant frequency-based method: Issues on mould geometry and sampling*. *Soils and Foundations*. 2014, 54, 1, pp. 56-66. <https://doi.org/10.1016/j.sandf.2013.12.006>.
- Taher, A. A. *BIM Software Capability and Interoperability Analysis*, Master thesis KTH School of Architecture and the Built Environment (ABE), Civil and Architectural Engineering, Building Technology, Stockholm, Sweden, 2016, <https://www.diva-portal.org/smash/get/diva2:917005/FULLTEXT01.pdf>.
- Theiler, M., Dragos, K., Smarsly, K. *BIM-based design of structural health monitoring systems*. The 11th International Workshop on Structural Health Monitoring, 2017. <https://doi.org/10.12783/shm2017/13941>
- Tronci, E. M., De Angelis, M., Betti., R., Altomare, V. *Vibration-based structural health monitoring of a RC-masonry tower equipped with non-conventional TMD*. *Engineering Structures*. 2020, 22. <https://doi.org/10.1016/j.engstruct.2020.111212>.
- Ubertini, F., Comanducci, G., Cavagli, N. *Vibration-based structural health monitoring of a historic bell-tower using output-only measurements and multivariate statistical analysis*. *Structural Health Monitoring*. 2016, 15. <https://doi.org/10.1177/1475921716643948>.
- Ubertini, F., Comanducci, G., Cavagli, N., Pisello, A. L., Materazzi, A. L., Cotana, F. *Environmental effects on natural frequencies of the San Pietro bell tower in Perugia, Italy, and their removal for structural performance assessment*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2017, 82, pp. 307-322. <https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2016.05.025>.
- Valinejadshoubi, M., Bagchi, A., Moselhi, O. *Managing Structural Health Monitoring Data Using Building Information Modelling*. SMAR:

- Fourth Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures. 2017.
- Valinejadshoubi, M., Bagchi, A., Moselhi, O., Shakibabarough, A. *Investigation on the potential of building information modeling in structural health monitoring of buildings*. Building Tomorrow's Society. 2018.
 - van Breugel, K. *Simulation of hydration and formation of structure in hardening cement-based materials*, 1991, PhD thesis, Delft University of Technology, Delft.
 - Velay-Lizancos, M.; Azenha, M.; Martínez-Lage I.; Vázquez-Burgo, P. *Addition of biomass ash in concrete: Effects on E-Modulus, electrical conductivity at early ages and their correlation*. Construction and Building Materials. 2017, 157, pp. 1126-1132. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2017.09.179>.
 - Velay-Lizancos, M.; Martinez-Lage, I.; Azenha, M.; Granja, J.; Vazquez-Burgo, P. *Concrete with fine and coarse recycled aggregates: E-modulus evolution, compressive strength and non-destructive testing at early ages*. Construction and Building Materials. 2018, 193, pp. 323-331. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.10.209>.
 - Vincenzi L., De Roeck G., Savoia M. *Comparison between coupled local minimizers method and differential evolution algorithm in dynamic damage detection problems*. Advances in Engineering Software, Volume 65, 2013.
 - Whittaker, M.; Al-Mutawa, F.; Leon, L.; Plank, J.; Dubina, E.; Arkless, L. *The effect of prehydration on the engineering properties of CEM I Portland cement*. Advances in Cement Research. 2013, 25, pp. 12-20. <https://doi.org/10.1680/adcr.12.00030>.
 - Worden, S. K., Farrar, C. R., Manson, G., Park G. *The Fundamental Axioms of Structural Health Monitoring*, Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences Issue, June, 2007.

- Yao, R., Pakzad, S. N. *Autoregressive statistical pattern recognition algorithms for damage detection in civil structures*. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2012, 31, pp. 355-368. <https://doi.org/10.1016/j.ymssp.2012.02.014>.
- Ye, C., Butler, L., Calka, B., Iangurazov, M., Lu, Q., Gregory, A., Girolami, M., Middleton, C. *A Digital Twin of Bridges for Structural Health Monitoring*. 12th International Workshop on Structural Health Monitoring. 2019.
- Zhao, P., He, X. *Research on dynamic data monitoring of marine bridge steel structure building information based on BIM model*. *Arabian Journal of Geosciences*. 2021, 14: 305.