

**ANALISI E INTERVENTI STRUTTURALI
SU EDIFICI VINCOLATI**
Parte 2



**ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI
MACERATA**

Il monitoraggio dinamico



Prof. Ing. Clementi Francesco

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA)

Università Politecnica delle Marche, Ancona

francesco.clementi@univpm.it

Macerata – 26 Marzo 2021

Seminario FAD



Monitoraggio dinamico di strutture civili

- Automotive/aerospace
- Ambito civile
- Grandi strutture
- Infrastrutture
- ...

Definizione principali parametri modali della struttura (frequenze proprie, smorzamenti e forme modali) dall'analisi dei dati acquisiti (accelerazioni) per conoscerne il comportamento dal punto di vista dinamico

Valutazione della resistenza, ma anche controllo della funzionalità in condizioni di esercizio e quindi possibilità di pianificare tempestivamente interventi

Calibrazione di modelli strutturali numerici utili per la valutazione della vulnerabilità sismica della struttura e per l'individuazione delle cause che possono aver determinato cambiamenti nel comportamento dinamico

INTRODUZIONE

- Moto e vibrazioni
- Parametri principali e Grandezze misurabili
- Analisi base e Analisi in frequenza
- Campionamento (Sampling) e Fenomeno dell'Aliasing (sotto-campionamento)
- Leakage e Finestratura
- I Filtri

LA NORMATIVA

- UNI 9614:2017
- UNI 9916:2014
- D.L. 109/2018 ("Decreto Genova") - Capo II
- Parere CSLP n.88/2019 dell'Adunanza telematica del 17/04/2020

LA STRUMENTAZIONE

- La catena di misura
- Trasduttori / Accelerometri

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

- EMA e OMA
- Modelli matematici
- Metodi di identificazione dinamica
- Valutazione dei risultati

LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

- Il modello numerico
- La calibrazione
- Confronto e validazione dei risultati

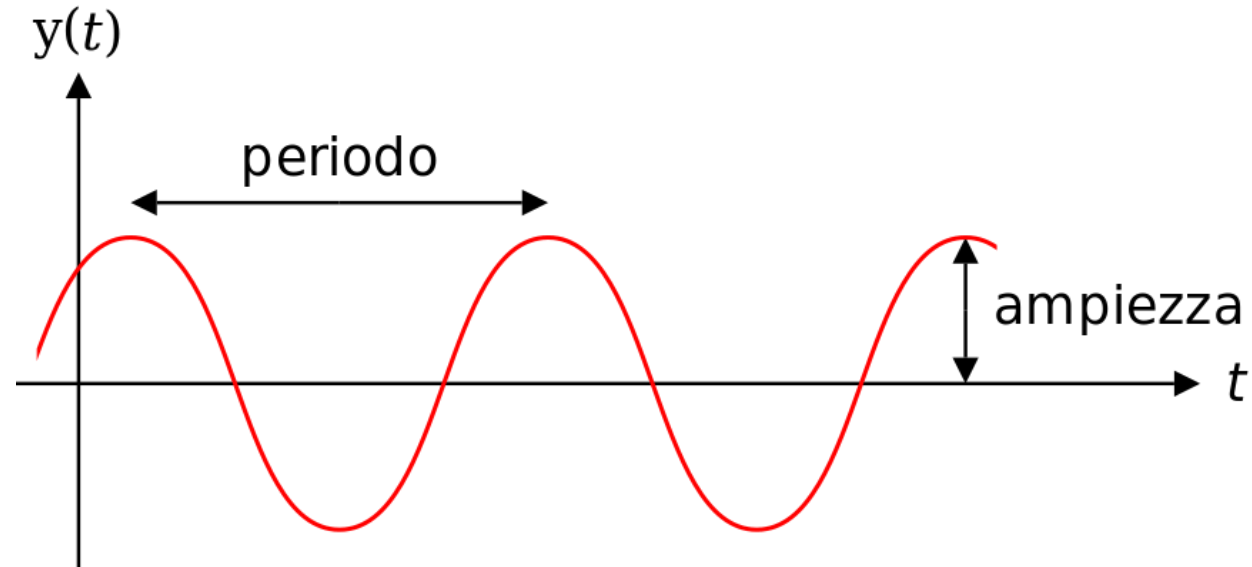
CASI STUDIO

- Santuario del Santissimo Sacramento di Treia (MC)
- Palazzo del Governatore, Torre Civica e Loggiato a Matelica (MC)
- Torre Civica di Ostra (AN)
- Cattedrale Metropolitana di Fermo (FM)
- Collegiata di Santa Maria a Visso (MC)
- Miglioramento sismico della scuola di Ostra Vetere (AN)
- Ponte sul fiume Garigliano, Minturno (LT)
- Cattedrale di Camerino (MC)



Un corpo vibra quando descrive intorno ad una posizione di riferimento un moto oscillatorio i cui parametri (ampiezza, valore medio, etc.) non sono in generale costanti nel tempo.

Nelle strutture le vibrazioni possono influenzare anche notevolmente la stabilità e la funzionalità con il rischio quindi, nel lungo periodo, di indurre danni strutturali.

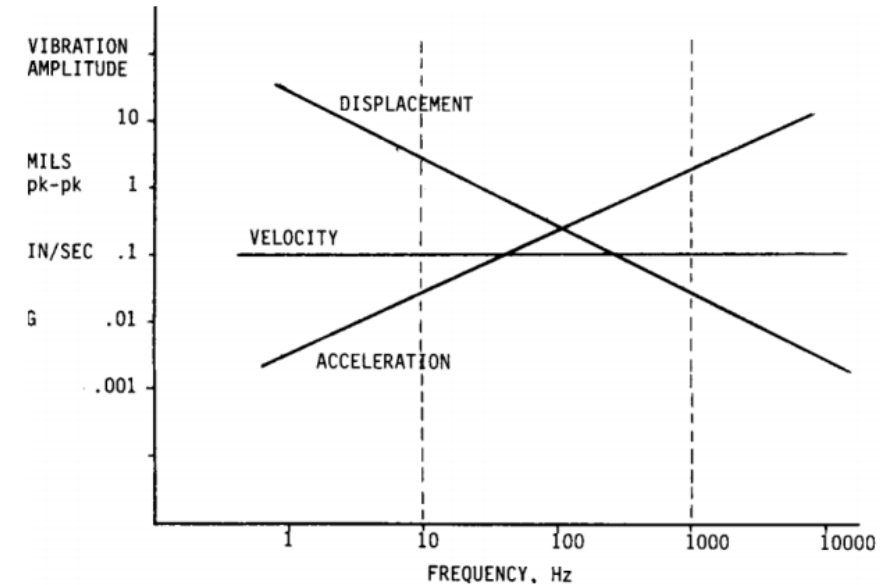
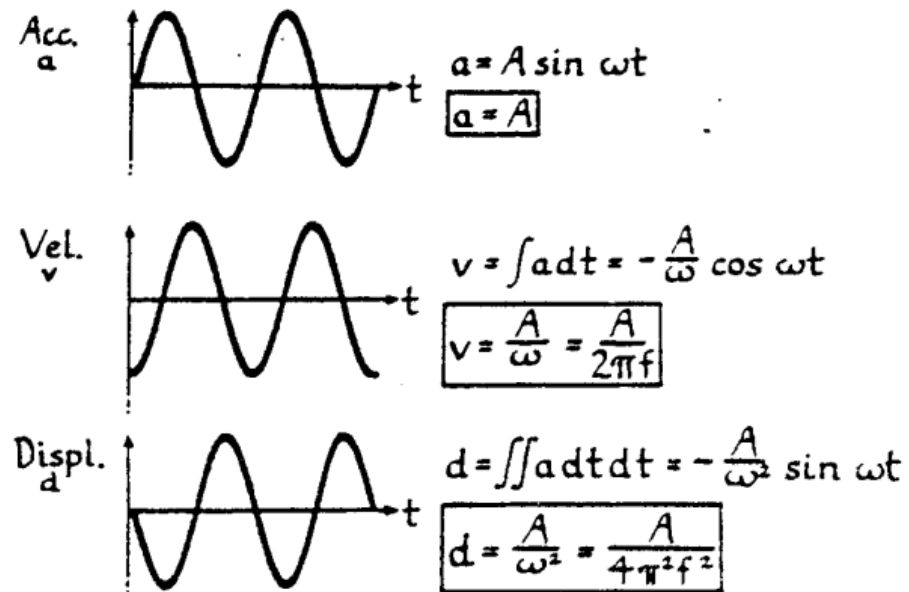


Ampiezza (A): massima oscillazione che indica quanto è 'forte' la vibrazione

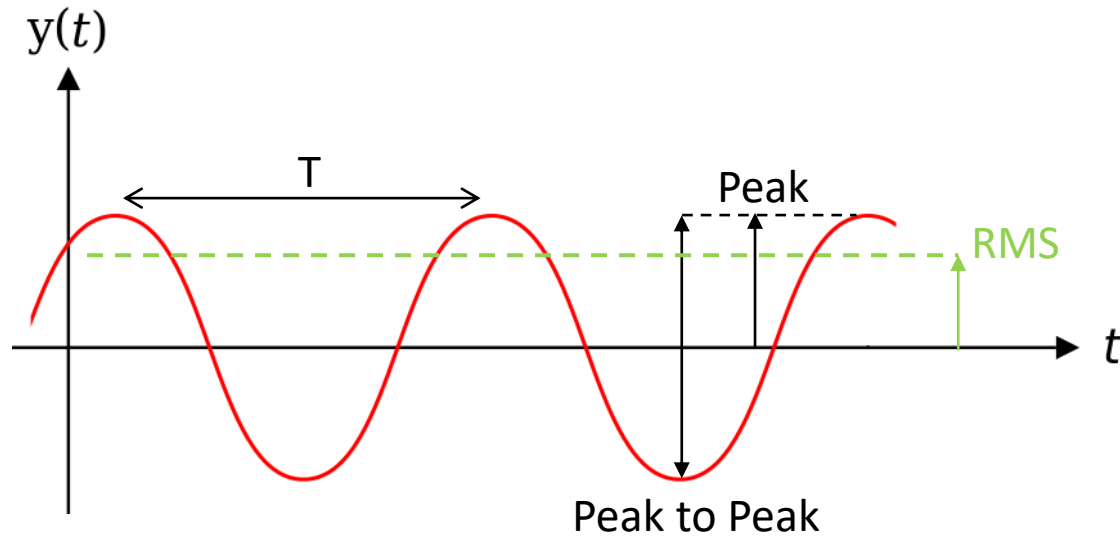
Periodo (T): tempo necessario a compiere un'oscillazione completa

Frequenza ($f = 1/T$): quante volte, in un periodo, si ripete la vibrazione

Per stimare una vibrazione posso misurare lo spostamento, o la velocità, o l'accelerazione. La scelta del parametro dipende dal range di frequenze del fenomeno che sto indagando. Per una singola armonica: qualunque sia il parametro considerato, rimangono inalterati forma e periodo della vibrazione, ma si verifica una variazione di ampiezza e fase.



L'analisi di un segnale di vibrazione espresso in termini di accelerazione nel dominio del tempo viene condotta attraverso il calcolo di alcuni parametri che ne consentono una quantizzazione del livello in modo da poterla confrontare con livelli di riferimento eventualmente normati.

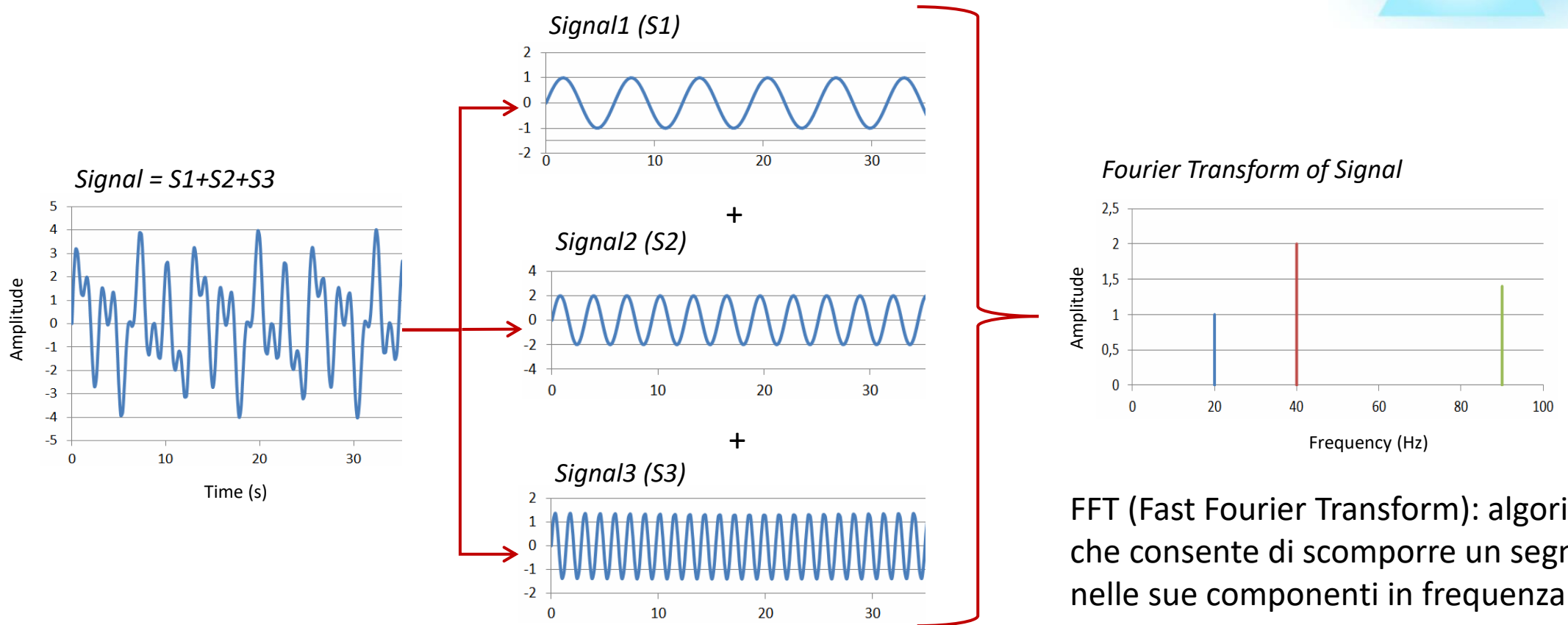


$$RMS = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x^2(t) dt}$$

$x(t)$: andamento del segnale in funzione del tempo

- *Peak (picco)*: escursione massima della vibrazione, positiva o negativa
- *Peak to Peak (picco-picco)*: escursione massima dell'onda
- *RMS (Root Mean Square, Valore Medio Efficace)*: restituisce un valore di ampiezza correlata al contenuto energetico della vibrazione

Come un prisma separa la luce bianca nei suoi colori fondamentali, così un segnale qualsiasi può essere separato nelle sue componenti più semplici \Rightarrow FFT



FFT (Fast Fourier Transform): algoritmo che consente di scomporre un segnale nelle sue componenti in frequenza

Teorema di Fourier:

una funzione periodica $x(t)$ di periodo T può essere scomposta in una sommatoria (*serie di Fourier*) di infinite funzioni armoniche elementari.

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad \text{dove} \quad \omega_n = \frac{2\pi n}{T} \quad \text{SERIE DI FOURIER}$$

$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{dove} \quad X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt \quad \text{TRASFORMATA DI FOURIER}$$

In generale i segnali di cui si dispone sono di tipo digitale o analogico. I primi sono già funzioni discrete del tempo, i secondi invece sono funzioni continue del tempo, per cui vanno discretizzati.

$$x(t_k) = (x_k) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{\frac{2\pi i n k}{N}} \quad \text{dove} \quad X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k e^{\frac{-2\pi i n k}{N}} \quad n = 1, N \quad \text{TRASFORMATA DISCRETA DI FOURIER}$$

In tal modo una funzione del tempo può essere rappresentata nel dominio delle frequenze.

Segnale continuo



Segnale discreto

Indica la discretizzazione dei tempi che consiste nel misurare l'ampiezza del segnale analogico (1) ad intervalli di tempo fissati (ΔT , dove T è detto periodo di campionamento) per ottenere la ricostruzione e successiva digitalizzazione del segnale (2).

$$X_n = X(n \cdot \Delta T)$$

Generico vettore generato dalla discretizzazione

$$f_s = \frac{1}{\Delta T}$$

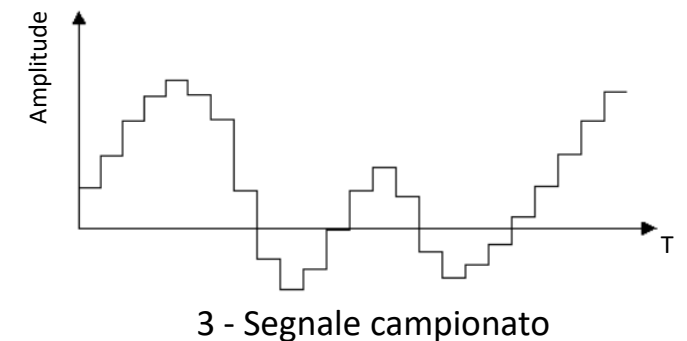
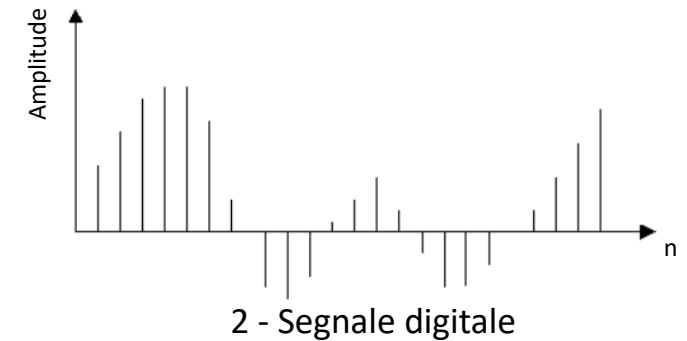
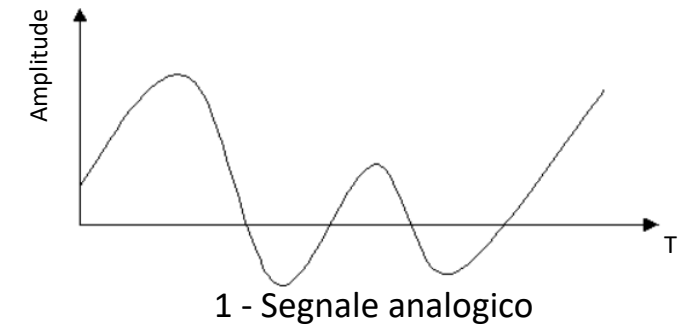
Frequenza di campionamento

La discretizzazione dell'ampiezza avviene grazie ai convertitori analogico-digitali. Il segnale risulta approssimato con un certo numero di 'gradini' (bit), che ne rappresentano la risoluzione (3).

$$f_s \geq 2f_N \quad \text{Teorema di Shannon (Nyquist)}$$

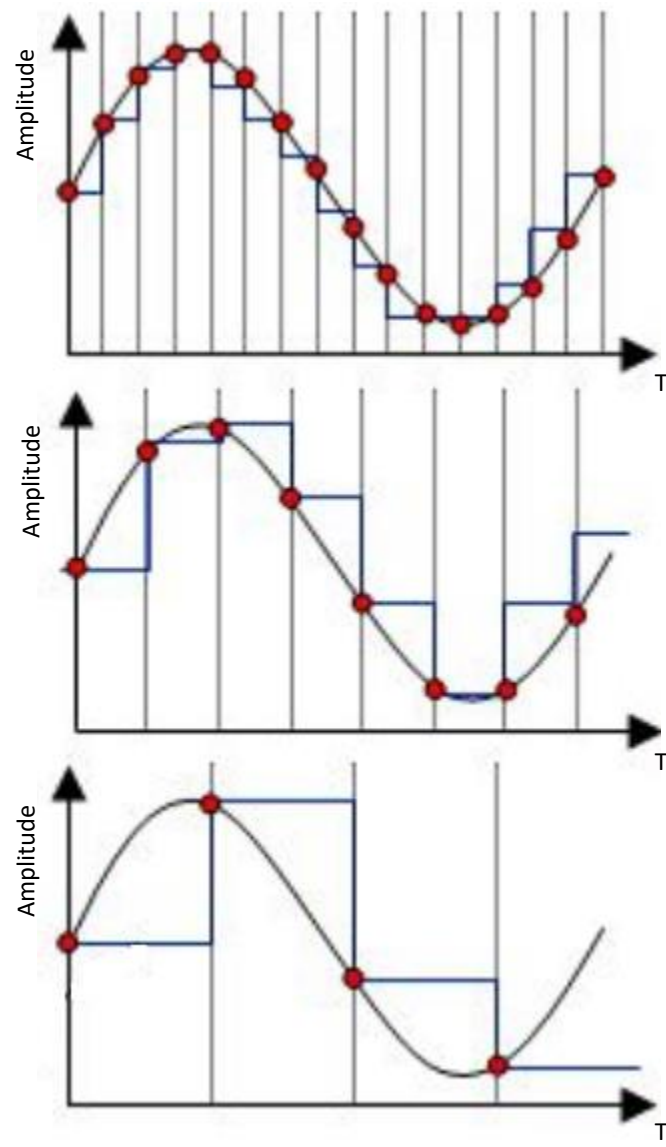
dove $f_N = \frac{f_s}{2}$ è frequenza di Nyquist, ovvero la massima frequenza contenuta nel segnale campionabile senza errore.

E' opportuno avere una f_s 5-10 volte la massima frequenza di interesse.



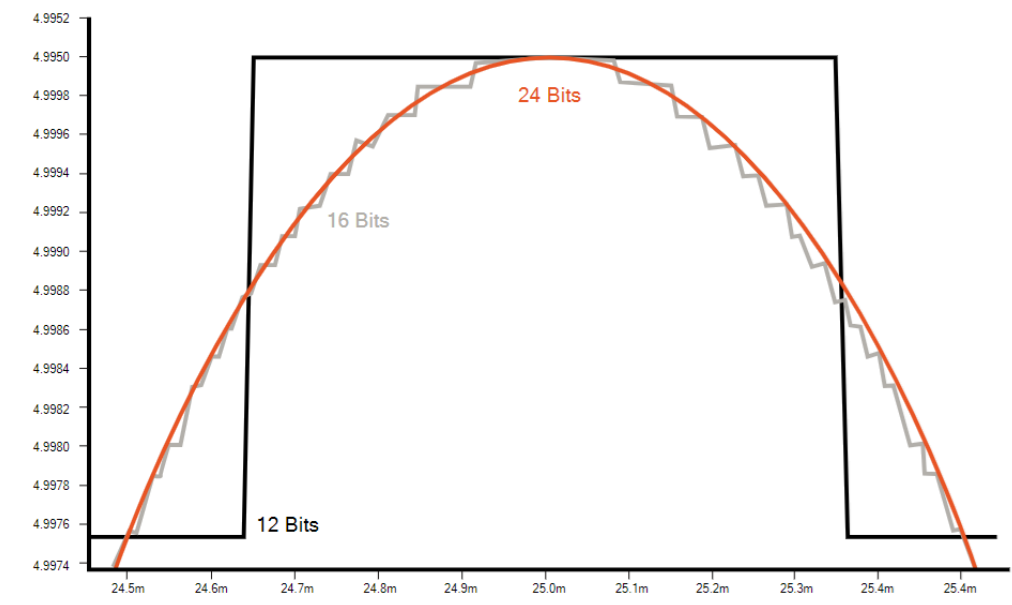
INTRODUZIONE CAMPIONAMENTO (SAMPLING)

f_s

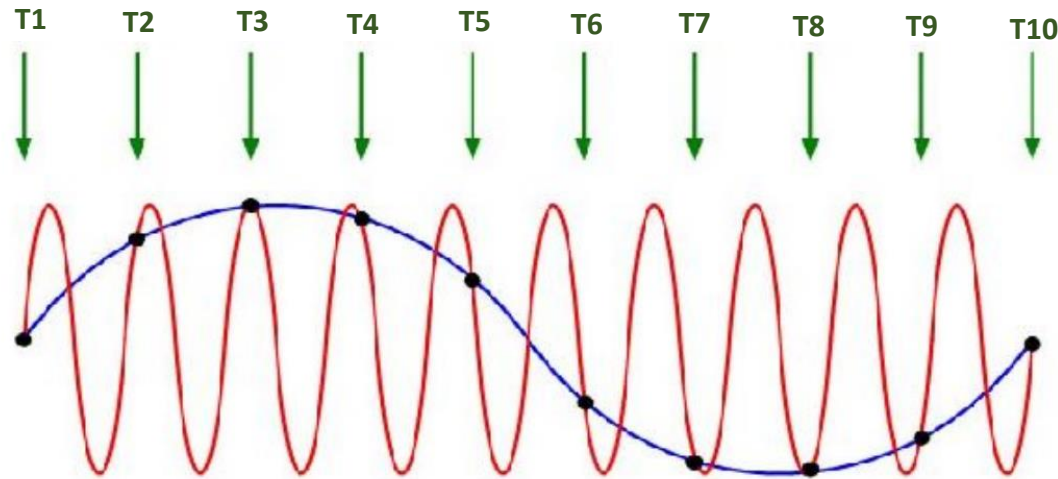


Se si aumenta la risoluzione sull'asse delle ampiezze con un convertitore migliore, il sistema riproduce più fedelmente il segnale, ma si deve aumentare anche la risoluzione sull'asse dei tempi. Non ha senso avere un segnale con un'alta risoluzione delle ampiezze ma sotto-campionato nel dominio del tempo.

Figura: campionamenti diversi per uno stesso segnale



Avviene quando utilizzo una frequenza di campionamento non sufficientemente elevata per il fenomeno che sto osservando. Se $f_s < 2f_N$ le più alte frequenze contenute nel segnale analogico assumeranno una falsa identità aparendo come frequenze inferiori.

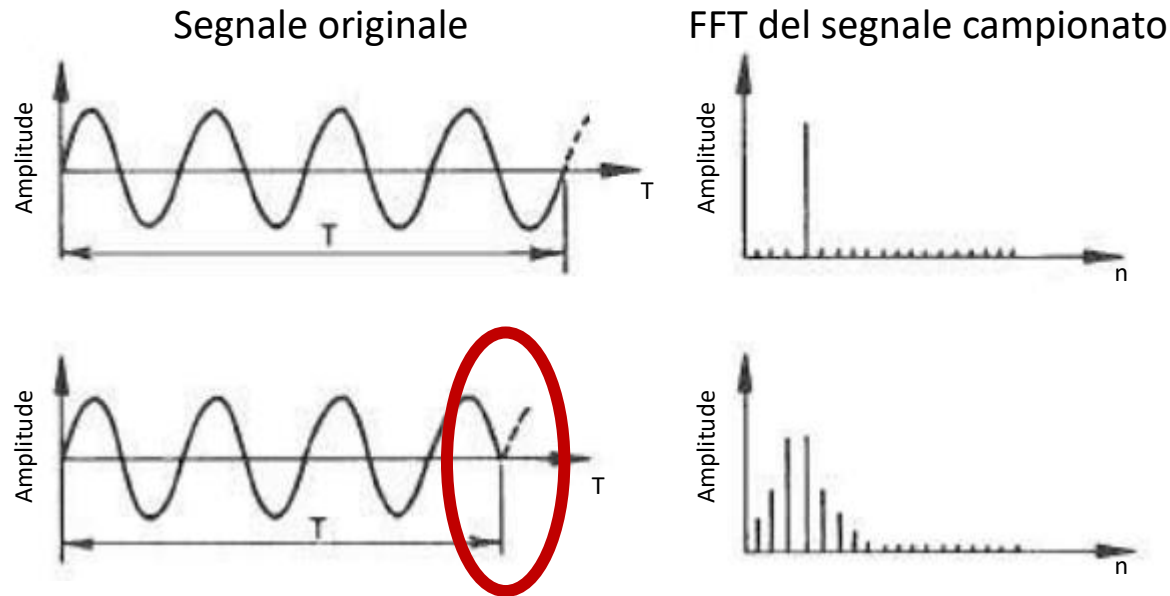


T1 istanti di campionamento
— segnale in ingresso originale
— segnale dopo il campionamento

Data la bassa frequenza di campionamento, il segnale originario viene distrutto e non lo posso recuperare. Soluzioni:

- Acquisisco ad una frequenza molto più elevata di quella del fenomeno fisico per avere molti più campioni (però file molto pesanti);
- Fisso una frequenza di acquisizione quindi uso un filtro Anti-Aliasing (filtro passa-basso).

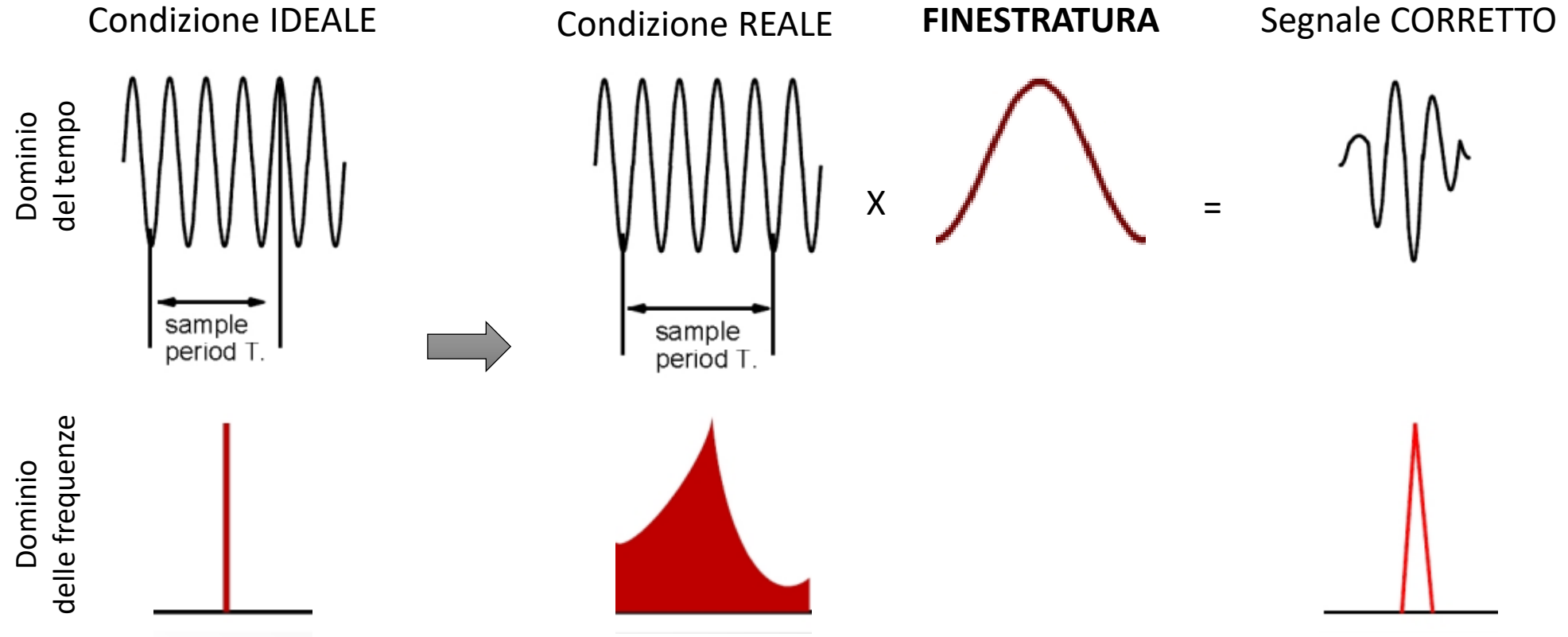
Il fenomeno del Leakage è una conseguenza del fatto che il campionamento del segnale avviene in un intervallo di tempo finito.



Il ΔT corrisponde al periodo del segnale:
dalla FFT del segnale ottengo la
frequenza propria del segnale.

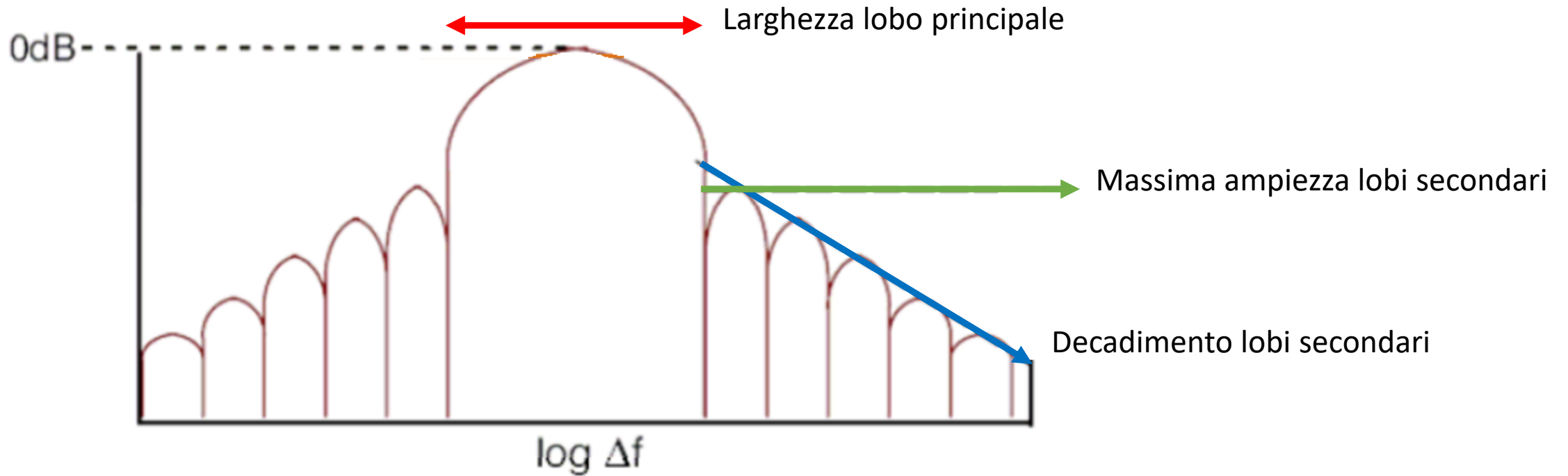
Il ΔT non corrisponde al periodo del segnale:
la FFT del segnale presenta valori non nulli
anche per frequenze non contenute nel
segnale.

Importante avere segnali periodici. Nel caso il fenomeno in esame non sia periodico, devo renderlo tale eliminando il leakage e per poter sfruttare l'analisi di Fourier. In tal senso il segnale deve essere ricalibrato a mezzo di finestrate.



Le "finestre" sono delle funzioni che permettono una correzione del segnale annullando il segnale ai bordi dell'intervallo, e quindi inducendo una continuità "artificiale" della condizione di periodicità. Esistono vari tipi di "finestre" disponibili e la scelta dipende dalle finalità dell'analisi spettrale.

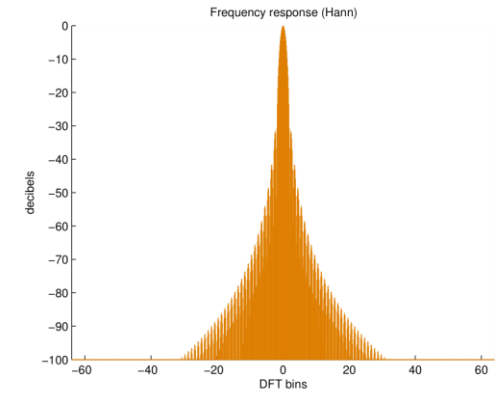
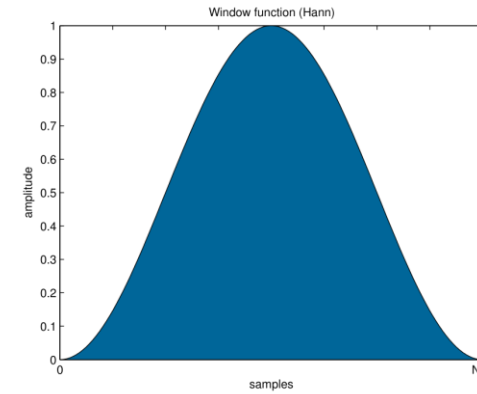
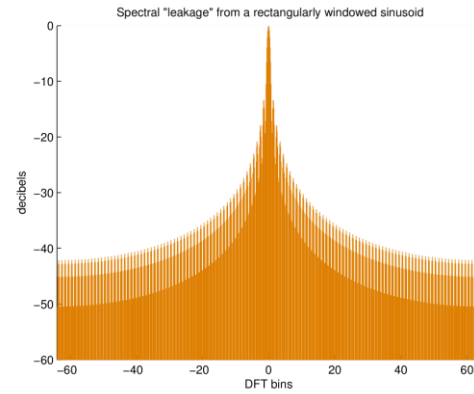
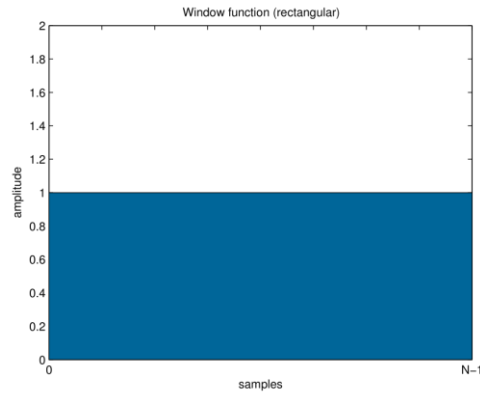
Parametri che definiscono i tipi di finestatura



Questi parametri influenzano:

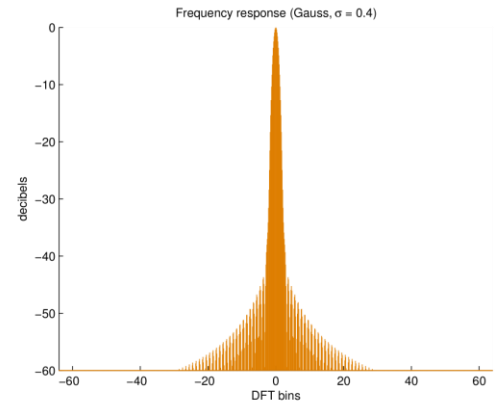
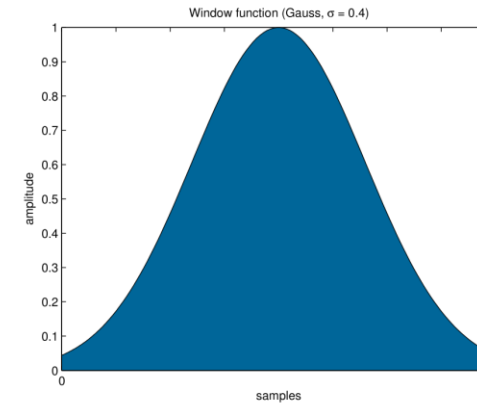
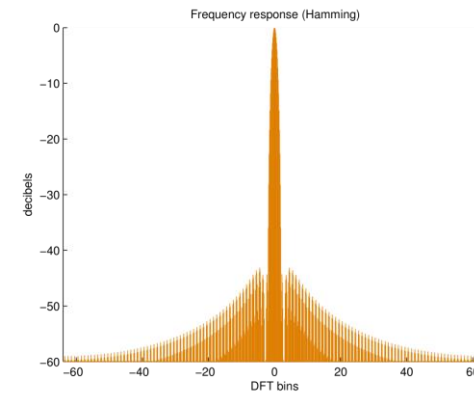
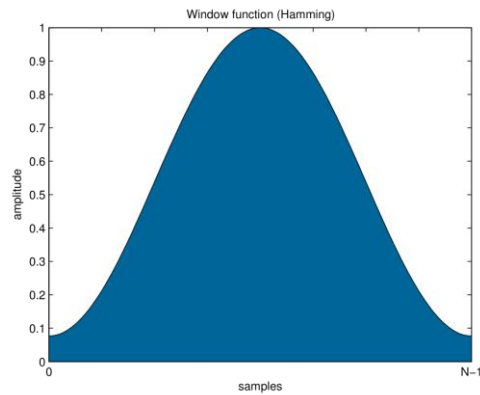
- La risoluzione in frequenza nello spettro del segnale
- La differenza tra la massima e minima ampiezza delle oscillazioni rilevabili

Tipi di finestrata



Finestra rettangolare

Finestra di Hann



Finestra di Hamming

Finestra di Gauss

Esempio

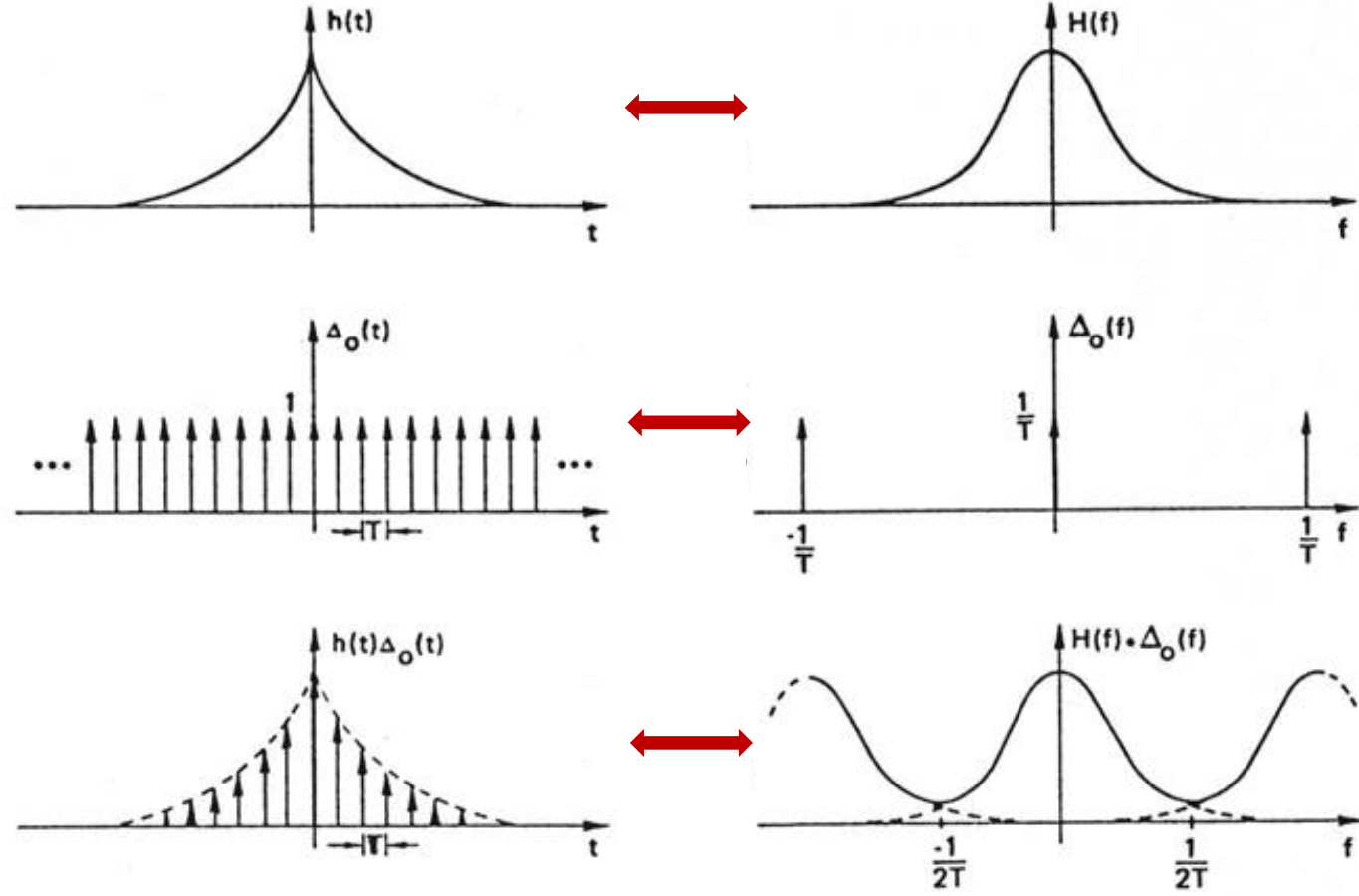
Considero: funzione $h(t)$ e sua trasformata di Fourier $H(f)$

Per ottenere $H(f)$: campionamento di $h(t)$ per la sequenza campionante $\Delta_0(t)$

Risultato del campionamento

Dominio del tempo

Dominio delle frequenze

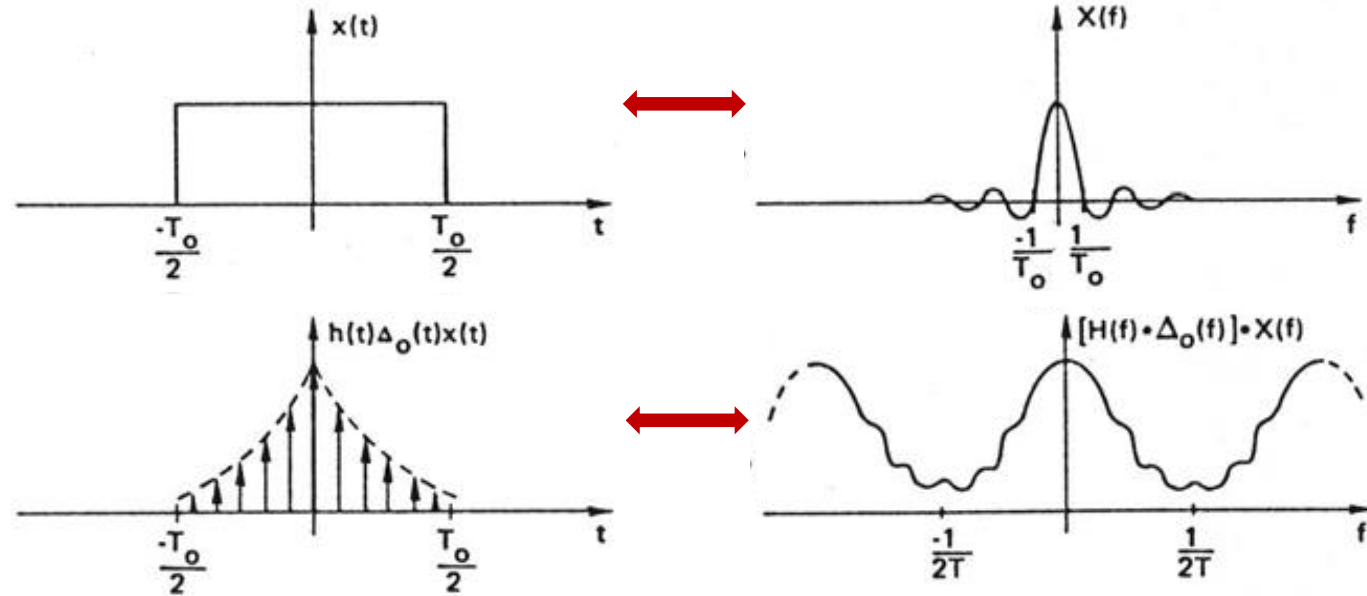


Durata temporale di $h(t)$ molto elevata: finestra di durata T_0

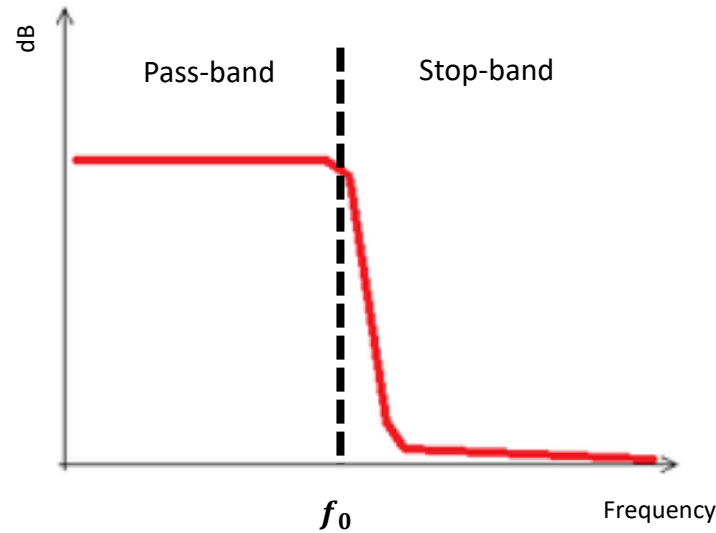
Spettro finale

Dominio del tempo

Dominio delle frequenze

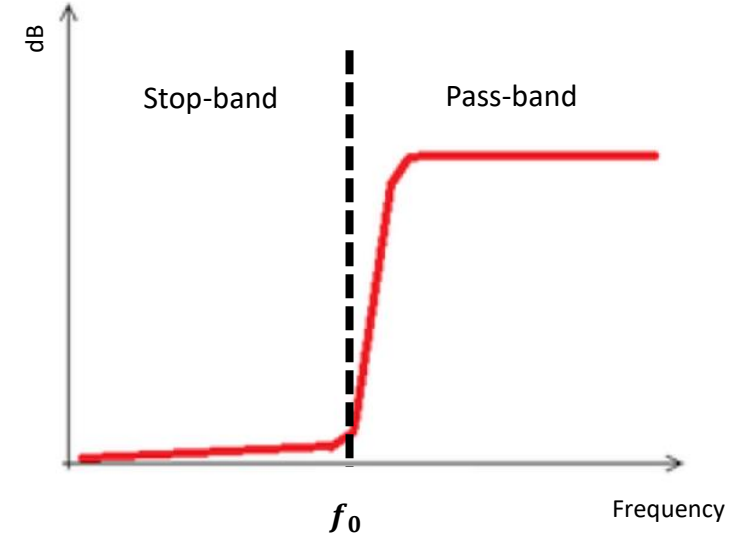


Sono strumenti che operano nello spazio delle frequenze e che permettono una finestratura del segnale, modificandone però alcuni aspetti. In una condizione *ideale* il filtro non dovrebbe attenuare le frequenze desiderate, mentre dovrebbe applicare un'attenuazione "infinita" a quelle indesiderate.



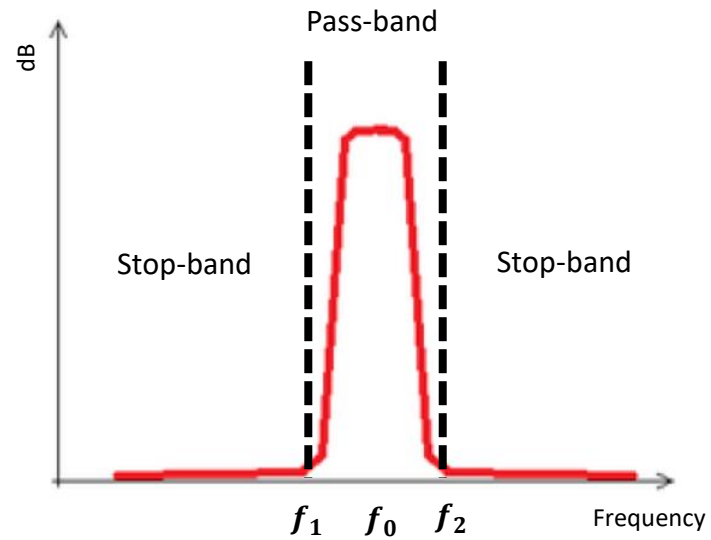
Passa-basso

Permette il passaggio di frequenze al di sotto di una certa soglia



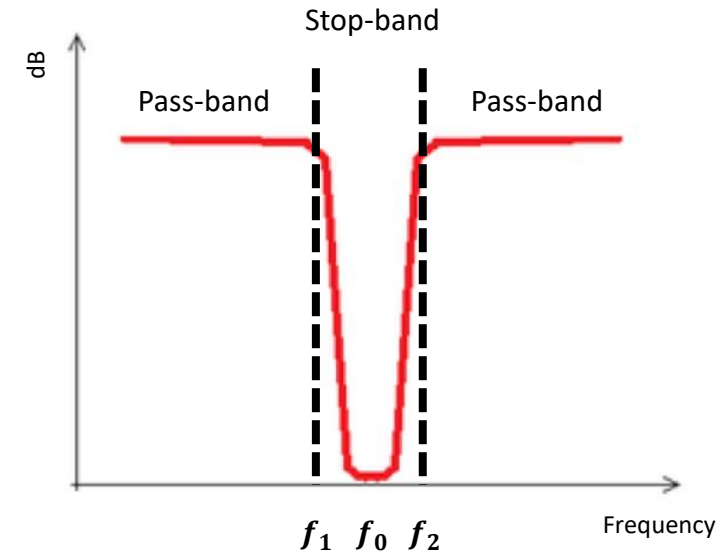
Passa-alto

Permette il passaggio di frequenze al di sopra di una certa soglia



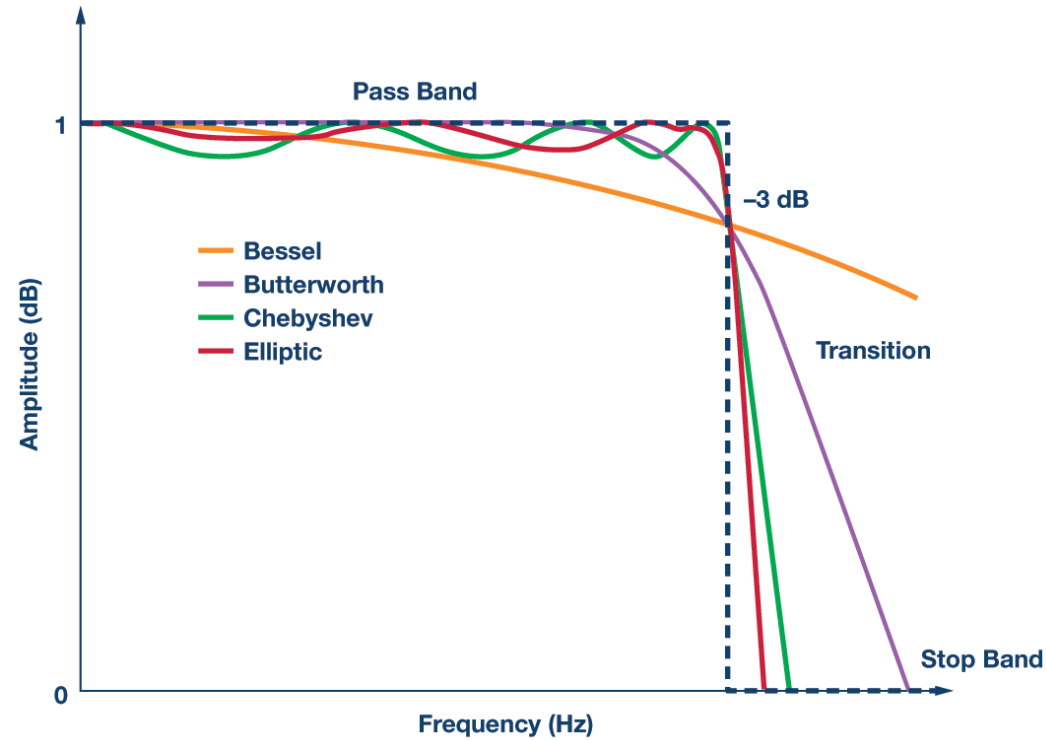
Passa-banda

Permette il passaggio di frequenze al di sotto di una certa soglia



Notch (elimina-banda)

Permette il passaggio di frequenze al di sopra di una certa soglia



Filtro	Pendenza	Dimensione banda di transizione (attenuazione)	Altri fattori
Butterworth	Buona	Media	Distorsione di fase moderata
Chebyshev	Ripida	Buona	Lenta risposta ai transitori
Bessel	Buona	Pessima	Maggiore sfasamento
Elliptic	Molto ripida	Ottima	Risposta di fase non lineare

INTRODUZIONE

- Moto e vibrazioni
- Parametri principali e Grandezze misurabili
- Analisi base e Analisi in frequenza
- Campionamento (Sampling) e Fenomeno dell'Aliasing (sotto-campionamento)
- Leakage e Finestratura
- I Filtri

LA NORMATIVA

- UNI 9614:2017
- UNI 9916:2014
- D.L. 109/2018 ("Decreto Genova") - Capo II
- Parere CSLP n.88/2019 dell'Adunanza telematica del 17/04/2020

LA STRUMENTAZIONE

- La catena di misura
- Trasduttori / Accelerometri

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

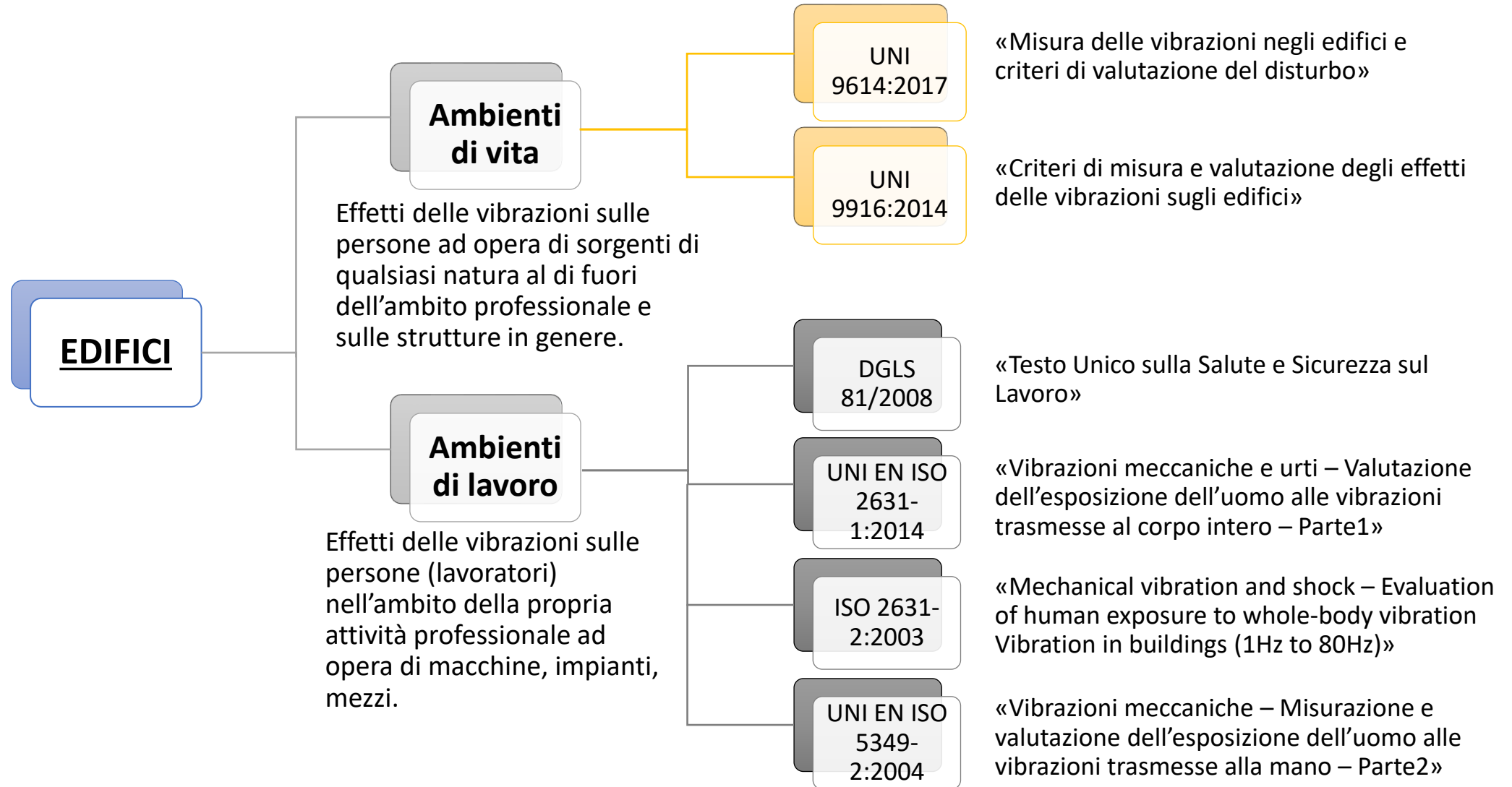
- EMA e OMA
- Modelli matematici
- Metodi di identificazione dinamica
- Valutazione dei risultati

LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

- Il modello numerico
- La calibrazione
- Confronto e validazione dei risultati

CASI STUDIO

- Santuario del Santissimo Sacramento di Treia (MC)
- Palazzo del Governatore, Torre Civica e Loggiato a Matelica (MC)
- Torre Civica di Ostra (AN)
- Cattedrale Metropolitana di Fermo (FM)
- Collegiata di Santa Maria a Visso (MC)
- Miglioramento sismico della scuola di Ostra Vetere (AN)
- Ponte sul fiume Garigliano, Minturno (LT)
- Cattedrale di Camerino (MC)



Aspetti generali:

- Definisce **metodologie di misura di vibrazioni immesse negli edifici ad opera di sorgenti**. La misura della vibrazione viene effettuata al fine di una sua valutazione in termini di disturbo alle persone
- Introduce criteri per la scelta della strumentazione di misura
- Introduce i criteri di valutazione del disturbo definendo le grandezze da rilevare
- Riporta dei valori limite mediante i quali valutare i valori rilevati
- Suddivisione giornata: periodo diurno dalle 6.00 alle 22.00 e periodo notturno dalle 22.00 alle 6.00

Le sorgenti di vibrazione sono distinte per:

Posizione:

- Interne all'edificio
- Esterne all'edificio

Funzione:

- Attività essenziali di servizio pubblico (ospedali, acquedotti, elettrodotti)
- Attività non interrompibili (trasporti, produzione e distribuzione energia, etc)
- Diverse dalle precedenti (interrompibili)

Durata vibrazione prodotta:

- Continue o semi-continue
- Intermittenti di lungo periodo (es. strada, metro, ferrovia)
- Intermittenti di breve periodo (es. ascensori, montacarichi, etc)
- Temporanee di lungo periodo
- Temporanee di breve periodo

Misurazioni:

- Grandezza preferenziale per la misura delle vibrazioni: accelerazione. Si misurano le accelerazione lungo le tre direzioni ortogonali (x, y, z) dato che la sensibilità dell'uomo alle vibrazioni dipende anche dalla direzione di propagazione (oltre che dalla frequenza)
- Strumentazione da utilizzare: accelerometri
- Postazioni di misura: ambienti con permanenza di persone (pavimenti o altri elementi strutturali a contatto con le persone durante lo svolgimento di attività o riposo)
- Durata misurazioni: dipendente dal numero di eventi relativi, in modo da garantire accuratezza statistica (es. per traffico ferroviario e stradale la durata della misurazione deve essere tale da 'catturare' minimo 15 eventi; per attività umane dirette, tipo discoteche, minimo 25 eventi, etc)

Elaborazione segnale per ogni singolo evento:

1. Filtraggio segnale con filtro passa-banda: per isolare la banda passante significativa per la risposta del corpo umano al disturbo
2. Filtraggio segnale con filtro di ponderazione: per attribuire la pesatura in funzione della risposta del corpo umano al disturbo per ciascuna frequenza
3. Calcolo valore efficace dell'accelerazione assiale ponderata

$$a_{w,j} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T a_{w,j}(t)^2 dt}$$

j: asse di misure (x, y, z)
T: tempo di integrazione

4. Calcolo accelerazione ponderata totale efficace: sono combinate istante per istante le 3 accelerazioni assiali ponderate con il loro valore efficace
5. Calcolo massima accelerazione ponderata: a partire dai valori calcolati in precedenza

$$a_{w,max,j} = \max(a_w) \quad \text{all'interno del j-esimo evento}$$

6. Calcolo massima accelerazione statistica

$$a_{w,95} = a_{w,max} + 1.8 \cdot \sigma$$

$a_{w,max}$: media aritmetica delle massime accelerazioni
ponderate relative agli eventi considerati

σ : scarto della distribuzione delle massime accelerazioni
ponderate

7. Calcolo accelerazione associata alla sorgente (da confrontare con valori limite)

$$V_{sor} = \sqrt{V_{imm}^2 - V_{res}^2}$$

V_{imm} : accelerazione ponderata massima statistica
vibrazioni immesse

V_{res} : accelerazione ponderata massima statistica vibrazioni
residue

8. Incertezza di misura: di tipo strumentale, per la scelta delle posizioni di misura e a causa dell'aleatorietà del fenomeno osservato. In un tale scenario si demanda allo sperimentatore la valutazione della dispersione dei dati. Per ovviare a ciò si consiglia di aumentare il numero di eventi da analizzare.

Aspetti generali:

- Scopo: **valutazione effetti delle vibrazioni sugli edifici con riferimento a risposta strutturale ed integrità architettonica**
- Definisce i metodi appropriati di misura e per il trattamento dei dati
- Fornisce una guida per la valutazione dei fenomeni vibratorii per rapportare i livelli misurati ai limiti suggeriti (da norme o per le condizioni di esercizio delle apparecchiature)
- Permette la caratterizzazione del comportamento dinamico a scopo diagnostico (verifiche rispetto ipotesi progettuali o di condizioni post-sismiche)
- Permette la caratterizzazione del comportamento dinamico a scopo di previsione (verifiche di resistenza a carichi dinamici accidentali, quali raffiche di vento)
- Si applica ad edifici di carattere abitativo, industriale e monumentale

Fattori da considerare:

Caratteristiche fenomeno vibratorio

- Meccanismo di eccitazione e trasmissione (tramite terreno, per via aerea o applicazione diretta di una forza)
- Durata e andamento temporale (da considerare l'accumulo del danno per fatica nei materiali)
- Natura del fenomeno (deterministica o aleatoria) per impostare una corretta procedura di misurazione
- Distribuzione spettrale dell'energia (severità del fenomeno)

Caratteristiche degli edifici

- Caratteristiche costruttive (tipologia costruttiva, caratteristiche inerziali e di rigidezza)
- Stato di conservazione (verifica del quadro fessurativo e deformativo esistente per identificare fenomeni di degrado in atto e cause)
- Caratteristiche delle fondazioni (dimensioni e stato di conservazione se possibile) ed interazione suolo-struttura

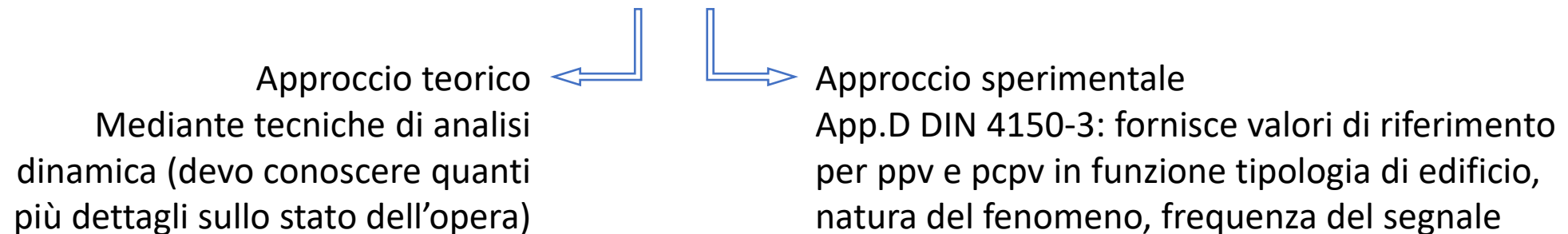
Misurazioni:

1. Scelta grandezza da considerare (accelerazione, spostamento e velocità)
2. Scelta tipo di trasduttore (accelerometri, velocimetri, trasduttori di spostamento): dipende principalmente dalle caratteristiche del segnale che si vuole misurare
3. Calibrazione sistema di misura: ogni 3 anni presso laboratorio accreditato
4. Requisiti base dell'acquisizione (risoluzione convertitore 16 o 24 bit; frequenza campionamento $\geq 250\text{Hz}$; filtro anti-aliasing con frequenza di taglio \leq frequenza di campionamento/2.56; durata a seconda del fenomeno; misure in più punti fatte in simultanea)
5. Scelta posizioni di misura
 - Misura eccitazione: trasduttore in prossimità della sorgente, lungo i 3 assi ortogonali; per edifici con lato maggiore di 20 metri, misure su più punti in simultanea (1 ogni 10 metri)
 - Misura riposta edificio: nel caso di sorgente esterna effettuare la misura in fondazione e all'ultimo piano; per sorgenti interne anche misure in prossimità della sorgente; per edificio multipiano misure anche ai piani intermedi
6. Modalità fissaggio dei trasduttori: il sistema di montaggio deve essere il più leggero ma rigido possibile al fine di non introdurre alterazioni del moto dovute al sistema di accoppiamento trasduttore-struttura

Trattamento dei dati:

1. Integrazione o derivazione del segnale: applicazione filtro passa-alto e integrazione del segnale filtrato nel dominio del tempo
2. Calcolo velocità di picco puntuale (peak particle velocity – ppv): misurazione simultanea delle tre componenti e combinazione vettoriale
3. Calcolo velocità di picco di una delle componenti del moto (peak component particle velocity – pcpv): valore massimo del modulo di una delle tre componenti ortogonali misurate simultaneamente
4. Analisi spettrale delle singole componenti del vettore velocità per individuare le frequenze dominanti del segnale; la risoluzione in frequenza deve essere scelta in modo tale da discriminare le varie frequenze di interesse

Valutazione dei dati per stabilire se il livello vibrazionale può essere causa di danni (diretti o indiretti)



"Disposizioni urgenti per la città di Genova, la sicurezza della rete nazionale delle infrastrutture e dei trasporti, gli eventi sismici del 2016 e 2017, il lavoro e le altre emergenze"

↳ Istituzione (dal 1° gennaio 2019) dell'*Agenzia Nazionale per la Sicurezza delle Ferrovie e delle Infrastrutture Stradali e Autostradali (ANSFISA)*:

- Esercita attività ispettiva finalizzata alla verifica della corretta organizzazione dei processi di manutenzione e promuove l'adozione di Sistemi di Gestione della Sicurezza
- Sovrintende alle ispezioni di sicurezza
- Propone l'adozione del piano nazionale per l'adeguamento e lo sviluppo delle infrastrutture stradali e autostradali nazionali "[...] da sviluppare anche attraverso il monitoraggio sullo stato di conservazione e sulle necessità di manutenzione delle infrastrutture stesse."
- Svolge attività di studio, ricerca e sperimentazione

↳ Istituzione dell'*Archivio Informatico Nazionale delle Opere Pubbliche (AINOP)*:

- Diviso in sezioni in base alla tipologia di opera pubblica
- "[...] genera un codice identificativo della singola opera pubblica (IOP), che contraddistingue e identifica in maniera univoca l'opera medesima [...]"
- Messo a disposizione e consultabile anche in formato open data, prevedendo la possibilità di raccogliere segnalazioni da sottoporre ad enti e amministrazioni
- "Le informazioni contenute nell'AINOP consentono di pervenire ad una valutazione complessiva sul livello di sicurezza delle opere, per agevolare il processo di programmazione e finanziamento degli interventi di riqualificazione o di manutenzione delle opere stesse e la determinazione del grado di priorità dei medesimi"

↳ *Sistema di monitoraggio dinamico per la sicurezza delle infrastrutture stradali e autostradali in condizioni di criticità e piano straordinario di monitoraggio dei beni culturali immobili:*

- "[...] sistema di monitoraggio dinamico da applicare alle infrastrutture stradali e autostradali, quali ponti, viadotti, rilevati, cavalcavia e opere simili [...] dotandosi degli occorrenti apparati per operare il controllo strumentale costante delle condizioni di sicurezza delle infrastrutture stesse anche utilizzando il Building Information Modeling – BIM."

"Linee Guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti"

- Oggetto di applicazione sperimentale per 18 mesi in relazione al sistema di monitoraggio anche dinamico di ponti e viadotti.
- Il documento illustra "[...] come la classificazione del rischio, o meglio, la classe di attenzione si inquadri in un approccio generale multilivello che dal semplice censimento delle opere d'arte da analizzare arriva alla determinazione di una classe di attenzione sulla base della quale si perverrà, nei casi previsti dalla metodologia stessa, alla verifica di sicurezza [...]"
- Documento suddiviso in 3 capitoli:
 1. *Classificazione e Gestione del Rischio*
 2. *Valutazione della sicurezza*
 3. *Monitoraggio*

Metodologia di attuazione delle Linee Guida che prevede 5 livelli, crescenti in complessità, grado di dettaglio, onerosità delle indagini e decrescenti in numero di infrastrutture su cui applicarle e riguardo l'incertezza dei risultati ottenuti:

- **Livello 0:** Censimento
- **Livello 1:** Ispezioni visive dirette e primo rilievo della struttura e delle caratteristiche geomorfologiche, idrologiche ed idrauliche dell'area
- **Livello 2:** Consente di giungere alla classe di attenzione (rischio potenziale su parametri di pericolosità, vulnerabilità ed esposizione)
- **Livello 3:** Esecuzione di valutazioni preliminari (Monitoraggio come modalità di indagine e di rilevamento dei fenomeni nel tempo)
- **Livello 4:** Esecuzione di valutazioni accurate (Norme Tecniche per le Costruzioni)
- **Livello 5:** Da applicarsi ai ponti considerati di rilevanza strategica ai fini di garantire i collegamenti essenziali nell'ambito della rete stradale

Monitoraggio occasionale e periodico

Installazione di un sistema di monitoraggio per una durata limitata (occasionale) da eventualmente ripetere ad intervalli più o meno regolari nel tempo (periodico). Per:

- Manutenzione straordinaria o adeguamento
- Studio comportamento tipologie strutturali ripetitive
- Per situazioni al contorno di natura transitoria (tipo studio comportamento versanti in vista di interventi di stabilizzazione)
- Analisi di fenomeni di degrado/danneggiamento anomali e situazioni di rischio elevato

Monitoraggio permanente o continuo

Sistema hardware/software concepito per rimanere operativo per lunghi periodi sino a coprire tutta la vita di servizio di una struttura. Complesso e richiede idonee procedure operative di gestione e qualificazione del personale. Raccomandabile per:

- Ponti strallati o sospesi e ponti di grande luce (> 200 m)
- Ponti con campate di luce superiore ai 50 m in c.a.p. realizzati da più di 40 anni
- Ponti con difficoltà di ispezione (travate a cassone e pile non ispezionabili) in c.a.p. o acciaio
- Ponti con soluzioni strutturali innovative
- Ponti di rilevanza storica
- Ponti in ambienti critici, caratterizzata da elevati carichi di traffico, con problematiche di fatica, in zone ad alto rischio sismico o con situazioni al contorno critiche

INTRODUZIONE

- Moto e vibrazioni
- Parametri principali e Grandezze misurabili
- Analisi base e Analisi in frequenza
- Campionamento (Sampling) e Fenomeno dell'Aliasing (sotto-campionamento)
- Leakage e Finestratura
- I Filtri

LA NORMATIVA

- UNI 9614:2017
- UNI 9916:2014
- D.L. 109/2018 ("Decreto Genova") - Capo II
- Parere CSLP n.88/2019 dell'Adunanza telematica del 17/04/2020

LA STRUMENTAZIONE

- **La catena di misura**
- **Trasduttori / Accelerometri**

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

- EMA e OMA
- Modelli matematici
- Metodi di identificazione dinamica
- Valutazione dei risultati

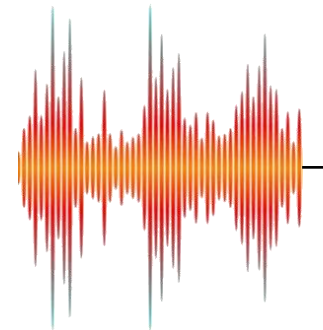
LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

- Il modello numerico
- La calibrazione
- Confronto e validazione dei risultati

CASI STUDIO

- Santuario del Santissimo Sacramento di Treia (MC)
- Palazzo del Governatore, Torre Civica e Loggiato a Matelica (MC)
- Torre Civica di Ostra (AN)
- Cattedrale Metropolitana di Fermo (FM)
- Collegiata di Santa Maria a Visso (MC)
- Miglioramento sismico della scuola di Ostra Vetere (AN)
- Ponte sul fiume Garigliano, Minturno (LT)
- Cattedrale di Camerino (MC)

LA STRUMENTAZIONE LA CATENA DI MISURA



Fenomeno fisico
(sorgente)

Interpreta la sorgente. Di vari tipi in base al fenomeno che voglio misurare. Producono segnali elettrici.



Trasduttore

Condizionamento del segnale: filtri e conversione analogico-digitale.



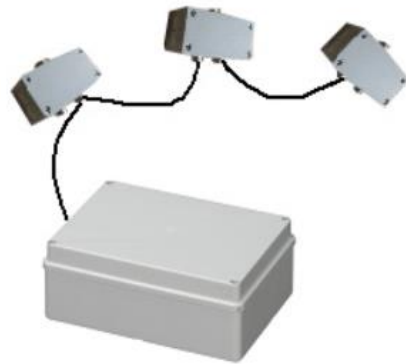
Sistema di acquisizione dati



Sistema di memorizzazione
e controllo

Trasmissione cablata:

- Per monitoraggi permanenti
- Per strutture di limitata estensione (limite lunghezza dei cavi)
- La qualità del dato può variare a causa della lunghezza dei cavi (caduta di tensione)
- Necessaria disponibilità alimentazione di rete
- Sincronizzazione dei dati automatica
- Adeguata se presenti idonei passaggi per il posizionamento dei cavi



Trasmissione wireless:

- Per applicazioni di breve durata
- Idonea per strutture di grande estensione (ponti)
- Eliminazione del problema della qualità del dato
- Necessarie batterie/pannelli solari
- Attenzione alla sincronizzazione dei dati
- Installazione più rapida



Trasduttori di temperatura

- Termocoppie
- Termoresistenze
- Termistori

Trasduttori di stress superficiale (estensimetri)

Trasduttori di spostamento

- Potenzimetri
- Induttivo (LVDT)
- GPS

Trasduttori d'angolo

- Resistivi
- Induttivi (RVDT)

Trasduttori di posizione

Trasduttori di pressione sonora

- Microfoni

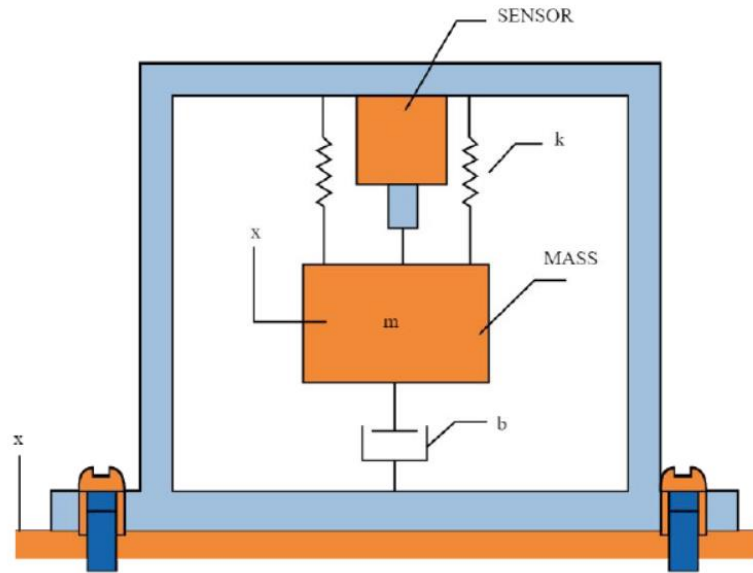
Trasduttori di corrente

Trasduttori di tensione

Trasduttori di vibrazioni (accelerometri)

- Accelerometri Piezoelettrici
- ICP/IEPE (Piezoelettrici con circuito integrato)
- Mems (Accelerometri capacitivi)
- Force Balance (Servo-accelerometri)

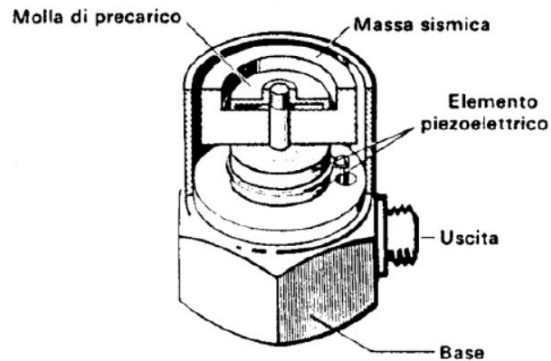
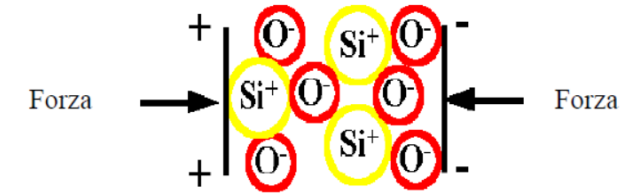
Accelerometri



Massa tenuta in posizione da un elemento elastico (molla).
La forza applicata alla massa fa sì che la molla si deformi.
Misurando la deformazione risalgo alla forza applicata e
quindi all'accelerazione della massa.
Possono essere monoassiali o triassiali.

Accelerometri piezoelettrici

Piezoelettricità: proprietà di alcuni cristalli di generare una differenza di potenziale quando sono soggetti ad una deformazione meccanica. Quando viene applicata una pressione esterna, cariche di segno opposto si posizionano sulle facce opposte.



Il cristallo è un condensatore: se collegato all'interno di un circuito elettrico la differenza di potenziale tra le due facce risulta proporzionale alla forza applicata e dunque all'accelerazione del corpo da misurare.

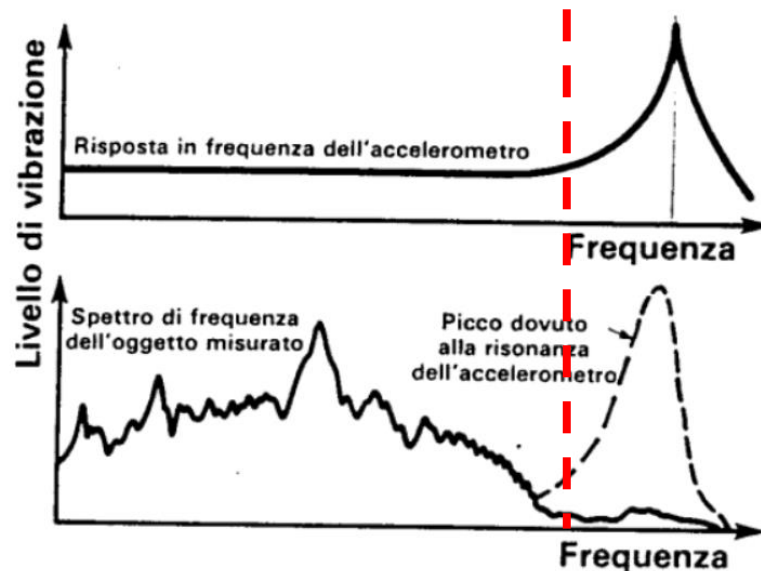
Tipo accelerometro monoassiale: misura vibrazioni lungo un asse (asse del cilindro).



Tipo accelerometro triassiale: all'interno vengono disposti cristalli lungo le tre direzioni ortogonali.

Caratteristiche:

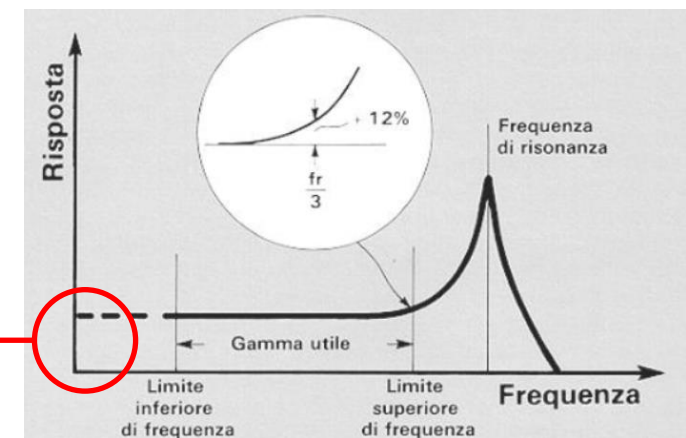
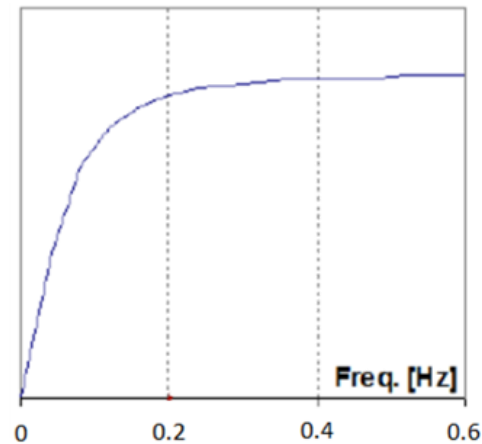
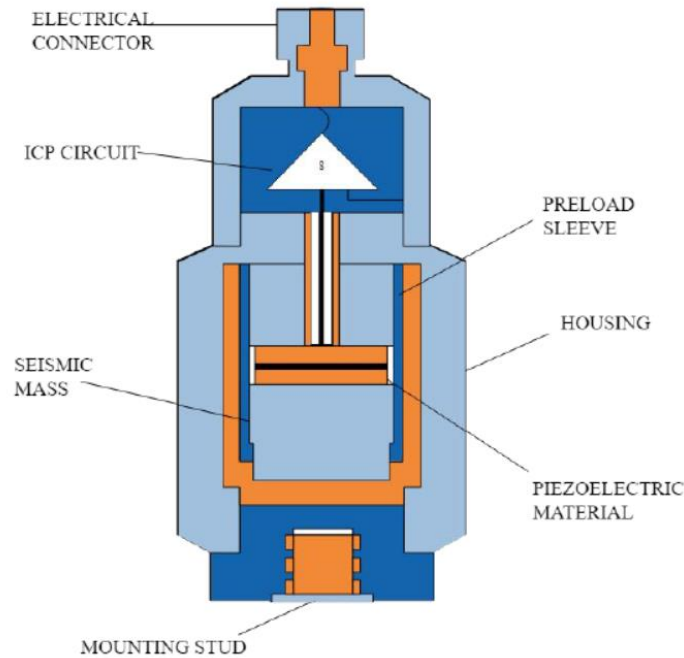
- Sensibilità: cresce al crescere delle dimensioni del gruppo piezoelettrico e della massa sismica (si può ovviare a questo utilizzando un preamplificatore che amplifica il segnale prima che arriva al sensore)
- Massa: non deve superare 1/10 della massa dell'oggetto sul quale è montato l'accelerometro (altrimenti potrebbe modificare le proprietà dinamiche del corpo da misurare)
- Gamma in frequenza: il segnale in uscita è costante al variare della frequenza fino alla frequenza di risonanza dell'accelerometro, in corrispondenza della quale si ha un aumento del segnale



Regola pratica: considero un accelerometro utilizzabile fino ad $1/3$ della sua frequenza di risonanza - - - -

Accelerometri ICP (Integrated Circuit Piezoelectric)/IEPE

- Materiale piezoelettrico: quarzo
- Contengono un circuito elettrico integrato, quindi non necessitano di un preamplificatore esterno
- Alimentati a corrente continua
- Data la necessità di alimentazione è compatibile solo con misure dinamiche
- Risposta in frequenza limitata superiormente dai fenomeni di risonanza e inferiormente dalle proprietà piezoelettriche del quarzo

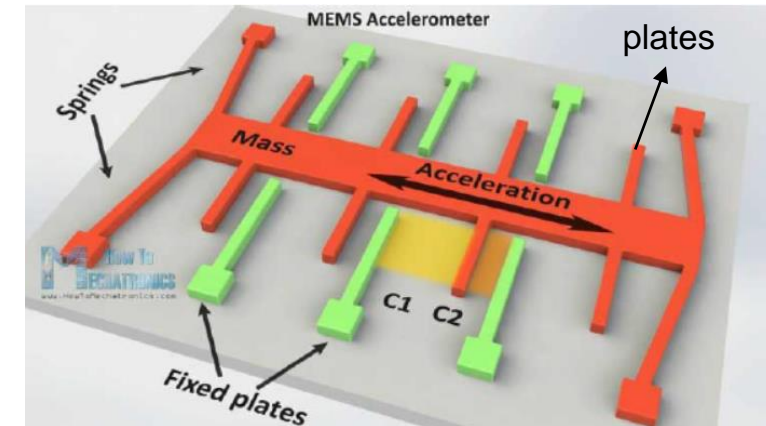


Accelerometri MEMS (Micro Electro Mechanical Systems)

Integrati in un micro-chip (molto piccolo).

Funzionamento: parte del circuito elettrico costituisce la stessa **massa**. Questa massa viene mantenuta in posizione da elementi elastici che sono parti del micro-chip stesso (**springs**).

Il circuito elettrico ha delle alette (**plates**) e muovendosi fa avvicinare queste alette a delle altre che sono fisse (**fixed plates**). Dati questi avvicinamenti e allontanamenti delle alette (effetto capacitivo), il circuito si comporta come un condensatore.



Accelerometro MEMS tipo

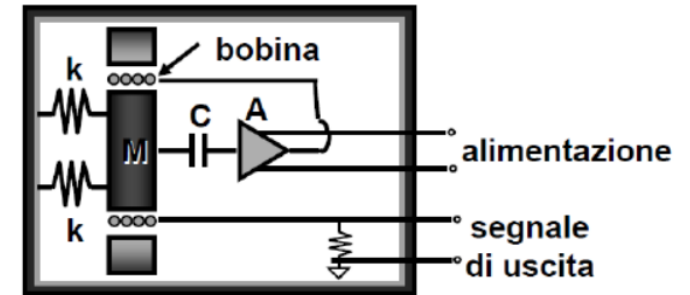
- In grado di misurare lungo tre assi
- Elevata precisione
- Banda passante a partire da 0Hz, quindi in grado di misurare accelerazioni statiche
- Producono consumi limitati
- Costo inferiore rispetto ai precedenti

Accelerometri Force Balance

La massa M è sospesa alla cassa del trasduttore mediante molle.

Funzionamento: un sistema elettronico, grazie ad una bobina e ad una corrente circolare, mantiene fissa la massa rispetto alla scatola collegata al corpo di cui si vuole misurare la vibrazione.

La corrente necessaria per mantenere ferma la massa è proporzionale all'accelerazione dello strumento.



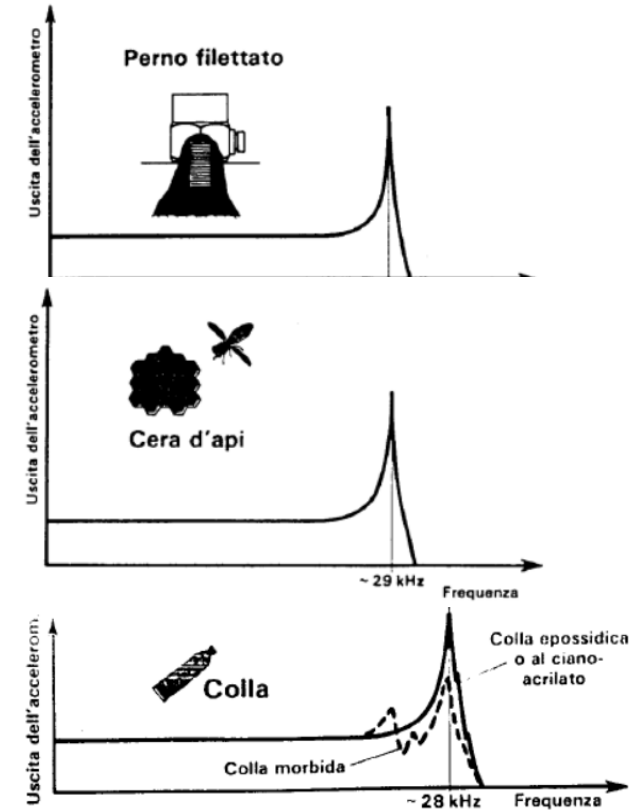
Accelerometro Force Balance tipo

- Frequenza propria tipica inferiore ai 400 Hz (limite superiore di banda passante)
- Pesanti e ingombranti
- Misurano con molta precisione segnali con bassa frequenza o accelerazioni statiche
- Delicati quando non alimentati poiché la massa è in grado di muoversi e le molle hanno bassa rigidezza

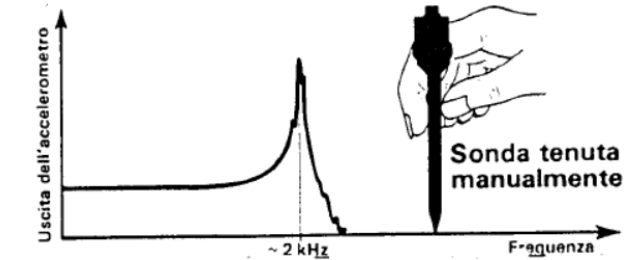
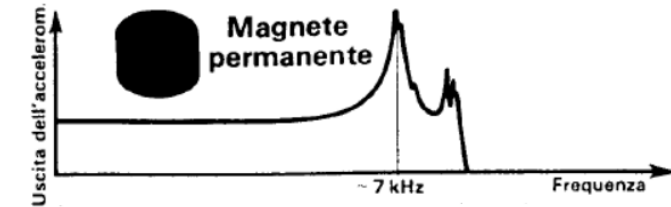
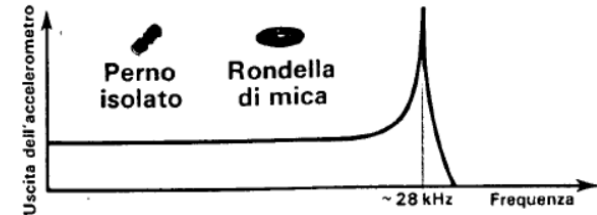
Fissaggio accelerometri:

Requisito principale per un corretto montaggio: perfetto accoppiamento meccanico tra la base dell'accelerometro e la superficie sulla quale è attaccato.

- Perno filettato: miglior montaggio poiché la frequenza risonante raggiunta è quasi coincidente a quella misurata durante la calibratura
- Cera d'api: sottile strato per incollare la base dell'accelerometro; utile per montaggi rapidi; abbassa maggiormente la frequenza di risonanza; permette misure in un certo campo di accelerazione e temperatura
- Perno incollato: dischetto metallico munito di perno da incollare con colla epossidica o cianoacrilica

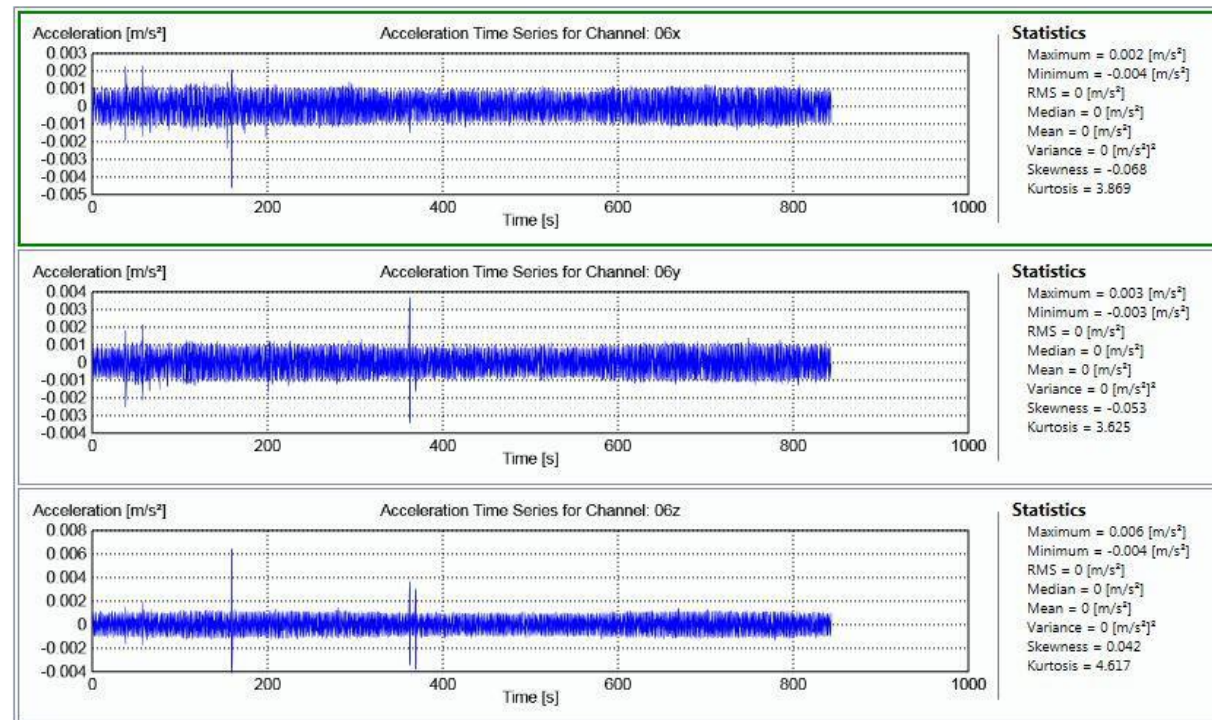


- Perno isolato e rondella di mica: quando l'accelerometro deve essere isolato elettricamente
- Magnete permanente: metodo veloce e di facile realizzazione; limita il campo utile di frequenza (2,5 kHz) e il campo dinamico (100-200 m/s²) per la limitata forza di attrazione del magnete
- Sonda impugnata manualmente: metodo grossolano, ma comodo per rapida indagine preliminare
- Nastro biadesivo
- Resina bicomponente



Segnale in uscita:

Segnale in uscita dagli accelerometri: time histories accelerometriche.



INTRODUZIONE

- Moto e vibrazioni
- Parametri principali e Grandezze misurabili
- Analisi base e Analisi in frequenza
- Campionamento (Sampling) e Fenomeno dell'Aliasing (sotto-campionamento)
- Leakage e Finestratura
- I Filtri

LA NORMATIVA

- UNI 9614:2017
- UNI 9916:2014
- D.L. 109/2018 ("Decreto Genova") - Capo II
- Parere CSLP n.88/2019 dell'Adunanza telematica del 17/04/2020

LA STRUMENTAZIONE

- La catena di misura
- Trasduttori / Accelerometri

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

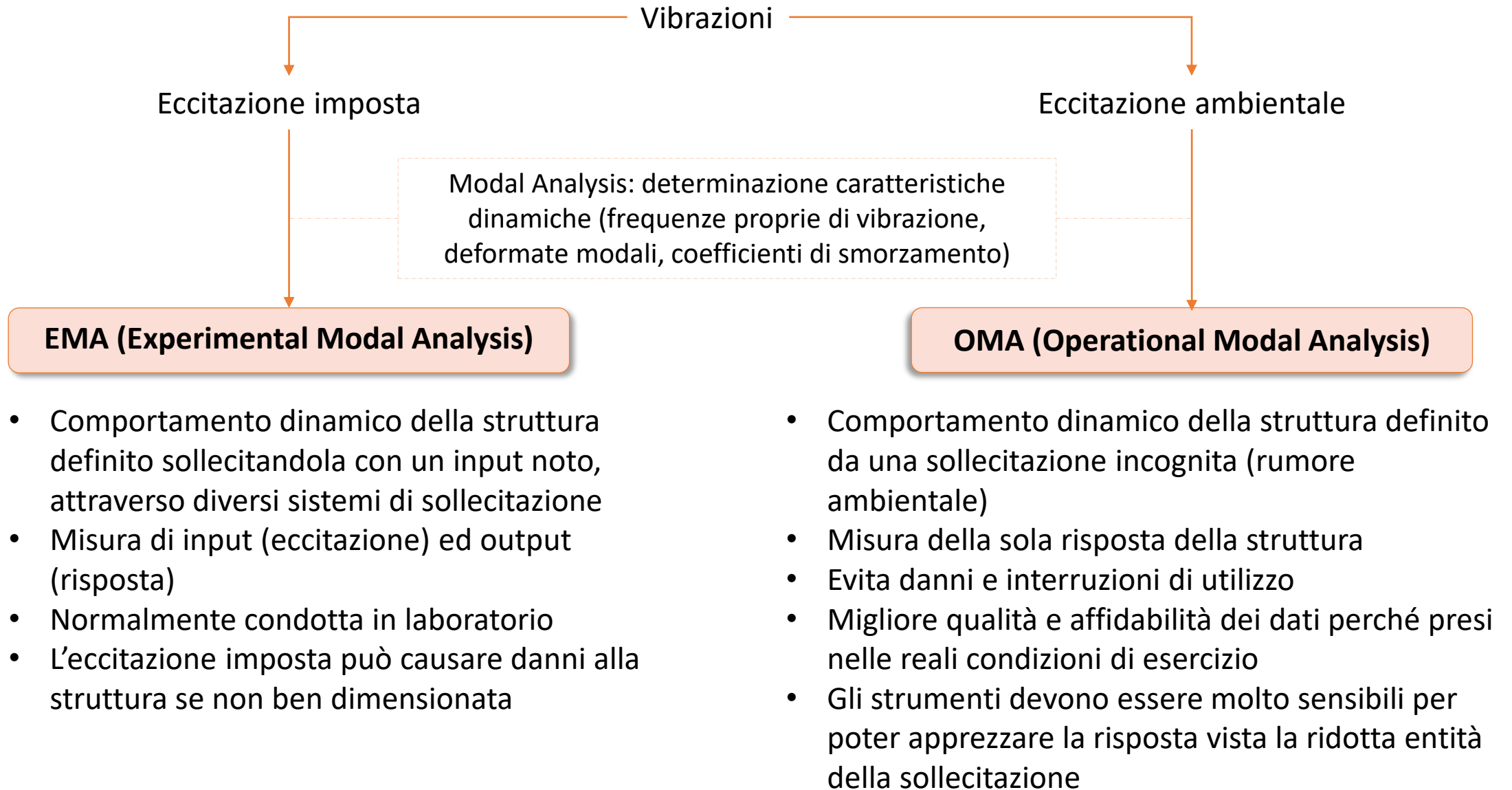
- EMA e OMA
- Modelli matematici
- Metodi di identificazione dinamica
- Valutazione dei risultati

LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

- Il modello numerico
- La calibrazione
- Confronto e validazione dei risultati

CASI STUDIO

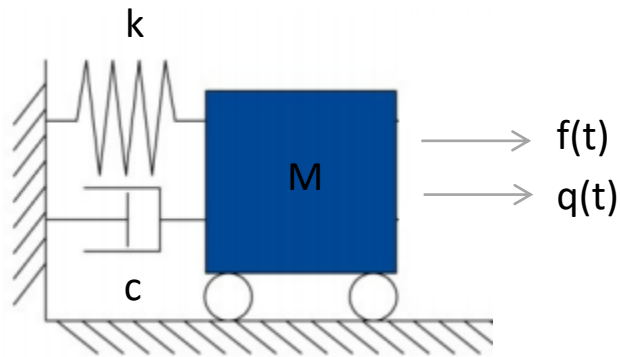
- Santuario del Santissimo Sacramento di Treia (MC)
- Palazzo del Governatore, Torre Civica e Loggiato a Matelica (MC)
- Torre Civica di Ostra (AN)
- Cattedrale Metropolitana di Fermo (FM)
- Collegiata di Santa Maria a Visso (MC)
- Miglioramento sismico della scuola di Ostra Vetere (AN)
- Ponte sul fiume Garigliano, Minturno (LT)
- Cattedrale di Camerino (MC)



- ❖ **Formulazione Classica:** permette la rappresentazione della risposta dinamica della struttura (spostamenti, velocità e accelerazioni) causata dalle forze di inerzia
- ❖ **Formulazione State-Space:** utilizzabile nei casi in cui lo smorzamento non è proporzionale a massa ed a rigidità del sistema, dando la possibilità di costruire modelli matematici in cui i dati sperimentali possono essere accoppiati a modelli discreti
- ❖ **Modelli Auto-Regressivi:** formulazioni discrete del tempo che tentano di modellare la risposta del sistema ad un istante, in funzione delle risposte negli istanti precedenti attraverso un processo stocastico

Formulazione Classica

Richiami analisi Modale: SDOF (Single Degree of Freedom)



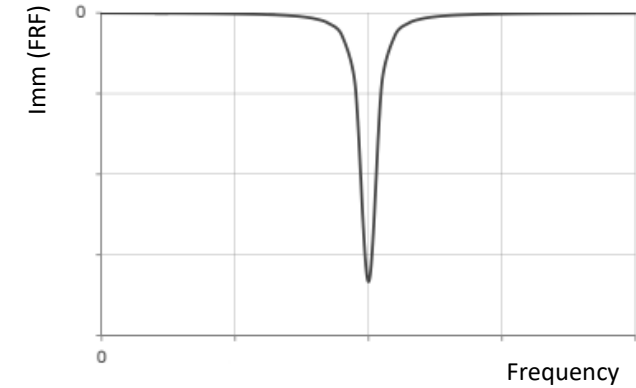
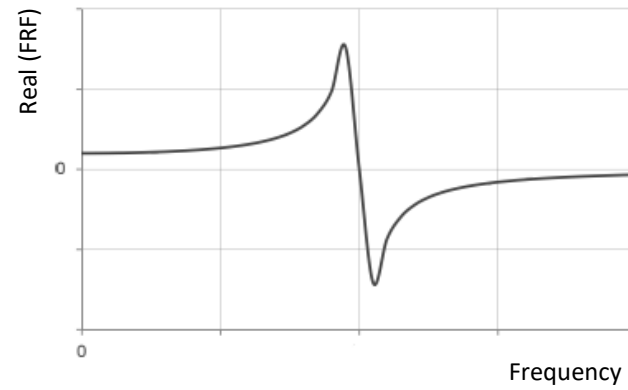
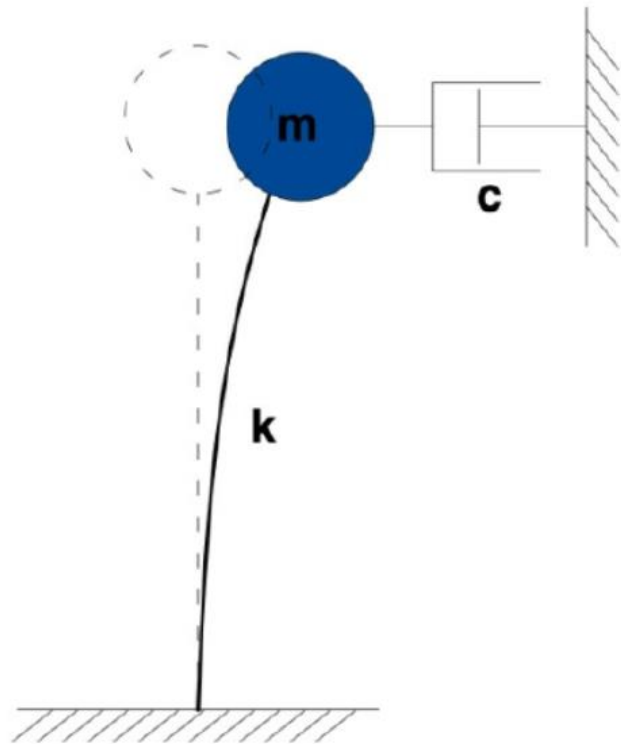
Equazione del moto

$$m\ddot{q} + c\dot{q} + kq = f(t)$$

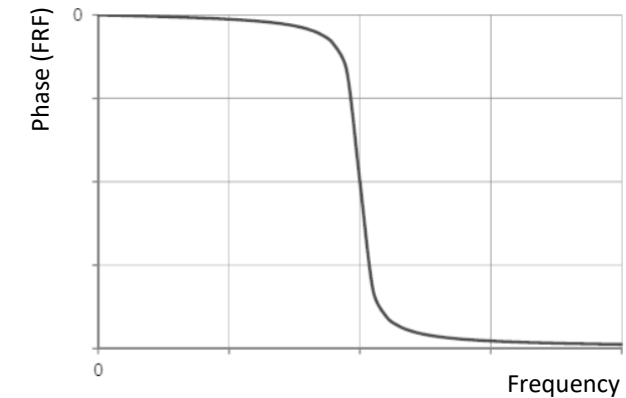
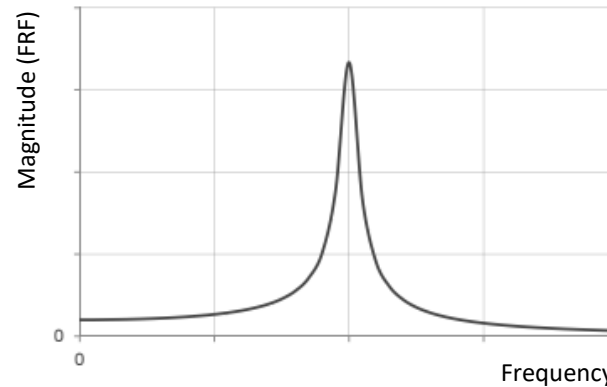
FRF (Frequency Response Function): rapporto tra la risposta stazionaria del sistema e la forzante

$$FRF = \frac{q(t)}{f(t)}$$

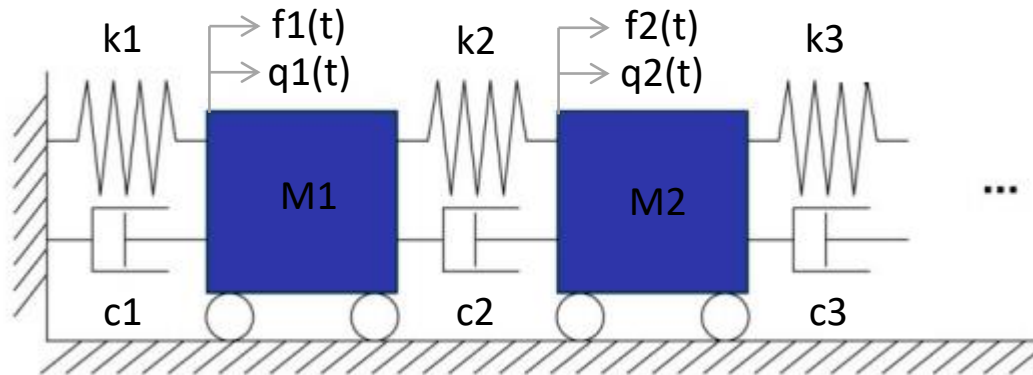
FRF è un numero complesso quindi rappresentato da una parte reale e una parte immaginaria.



La parte reale incrocia l'asse delle frequenze in corrispondenza della risonanza, mentre la parte immaginaria ha un punto di minimo.



Richiami analisi Modale: MDOF (Multi Degree of Freedom)



Equazione del moto

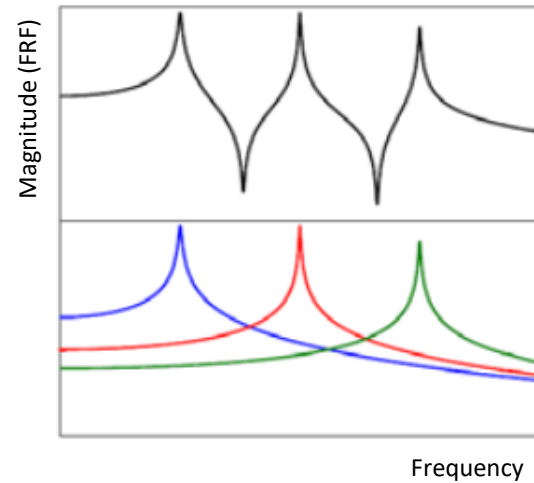
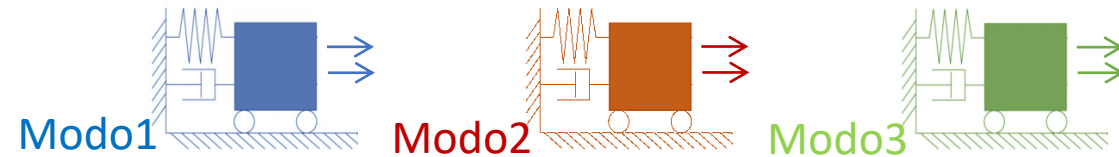
$$[M]\ddot{q} + [C]\dot{q} + [K]q = F(t)$$

Strutture reali: sistemi continui e disomogenei, che hanno un infinito numero di gradi di libertà. Le loro analisi comportano un'approssimazione che consiste nel descrivere il loro comportamento attraverso l'uso di un numero minimo di gradi di libertà.

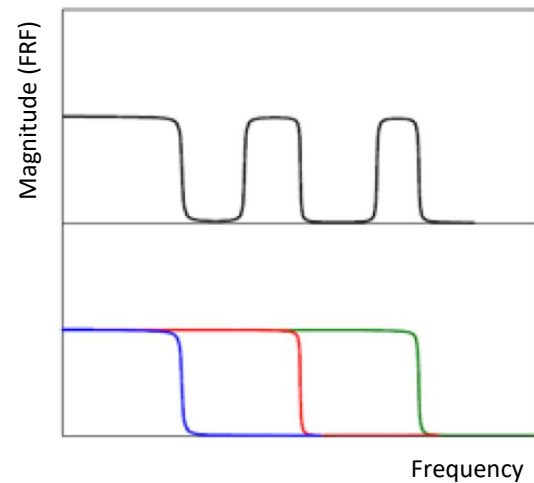
In questo caso la FRF assume la forma di una matrice simmetrica h_{jk} $N \times N$, i cui valori costituiscono la risposta in spostamento nel grado di libertà j -esimo, ad una forzante applicata nel grado di libertà k -esimo.

Anche nel MDOF la FRF è composta di parte reale e immaginaria, ma non è una funzione unica e dipende dal numero di gradi di libertà del sistema, in particolare si hanno $N(N+1)/2$ FRF, in quanto la matrice è simmetrica.

Considero un sistema MDOF a 3 gradi di libertà. Questo può essere rappresentato attraverso la combinazione lineare di sistemi ad 1 grado di libertà:

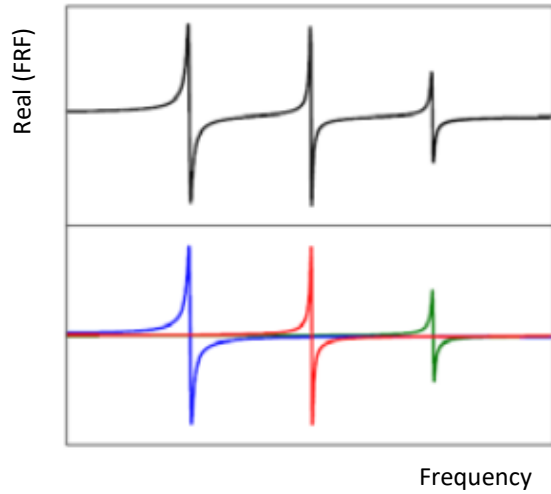
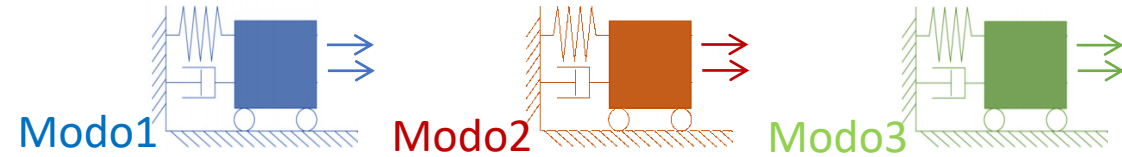


Magnitude: si hanno tanti picchi quanti sono i modi di vibrare del sistema, in corrispondenza delle frequenze naturali dei modi stessi.
Picchi negativi: punti di minimo, detti di antirisonanza

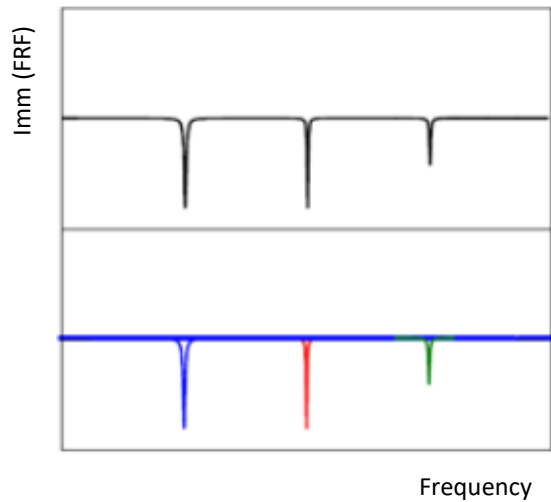


Phase: sfasamento di 180° in corrispondenza delle risonanze

Considero un sistema MDOF a 3 gradi di libertà. Questo può essere rappresentato attraverso la combinazione lineare di sistemi ad 1 grado di libertà:



Parte reale



Parte immaginaria

Formulazione State-Space

- Metodo più adeguato per gestire serie temporali stocastiche e il rumore presente nei dati misurati
- Modello matematico con un insieme di variabili di input, di output e di stato, correlate da equazioni differenziali del primo ordine
- Le variabili di stato evolvono nel tempo in funzione dei valori negli istanti precedenti e quindi dei valori degli input. Devono essere linearmente indipendenti.
- Lavorando nel dominio del tempo non si pone il problema della risoluzione in frequenza
- Non limitato ai sistemi con componenti lineari e condizioni iniziali nulle

Time Continuous Models

$$[M] \ddot{q}(t) + [C] \dot{q}(t) + [K] q(t) = F(t) = B_N u(t) \quad \text{Equazione del moto per un sistema MDOF}$$

Formulazione che trasforma le n equazioni del moto in $2n$ equazioni differenziali del 1° ordine.

Si introducono: $x(t)$ vettore delle variabili di stato, $u(t)$ vettore degli input e $y(t)$ vettore di risposta.

Risoluzione del sistema come combinazione di:

- Equazione di stato $\dot{x}(t) = A_c x(t) + B_c u(t)$

A_c	matrice di stato
B_c	matrice degli input
- Equazione delle osservazioni $y(t) = C_c x(t) + D_c u(t)$

C_c	matrice degli output
D_c	matrice di trasmissione

Nell'equazione delle osservazioni, si presume che le misurazioni vengano eseguite in l posizioni ($l < n$) e che $y(t)$ possa essere misurato con trasduttori di accelerazione, velocità e spostamento.

Tali modelli consentono di mettere in relazione dati sperimentali ($y(t)$) con parametri di eccitazione ($u(t)$).

Time Discrete Models

Nella realtà del monitoraggio, le acquisizioni con trasduttori forniscono delle serie temporali in precisi istanti, quindi valori discreti e non continui nel tempo.

Si introducono: x_k vettore delle variabili di stato all'istante $k\Delta t$, u_k vettore delle eccitazioni e y_k vettore delle osservazioni:

- Equazione di stato $x_{k+1} = A x_k + B u_k$
 A matrice di stato
 B matrice degli input
- Equazione delle osservazioni $y_k = C x_k + D u_k$
 C matrice degli output
 D matrice di trasmissione

Modelli Auto-Regressivi

- *Auto-Regressive Moving Average* (ARMA) per SDOF
- *Auto-Regressive Moving Average Vector* (ARMAV) per MDOF

Il vettore di stato viene rimosso, mentre il vettore delle osservazioni assume la forma:

$$y_k = \underbrace{A_1^{AR} y_{k-1} - A_2^{AR} y_{k-2} - \dots - A_{na}^{AR} y_{k-na}}_{AR} + \underbrace{e_k + C_1^{MA} e_{k-1} + C_2^{MA} e_{k-2} + \dots + C_{nc}^{MA} e_{k-nc}}_{MA}$$

e_k rappresentazione del processo stocastico di input

A^{AR} matrici dei parametri della parte auto-regressiva, da cui si calcolano i parametri modali del sistema

C^{MA} matrici dei parametri della parte a media mobile

Input - Output

Forze di eccitazione e risposta vibrazionale misurate simultaneamente. Parametri modali calcolati stimando le FRF e le IRF, nel dominio della frequenza e del tempo.

Classificazione:

- *Tipo di formulazione* —————> diretta: basata su equazione che descrivono l'equilibrio dinamico
—————> indiretta: descrizione del sistema tramite i suoi parametri modali, ipotizzando risposta lineare, ortogonalità delle forme modali, proporzionalità tra la matrice di smorzamento e quelle di massa e rigidezza
- *Numero di gradi di libertà*: accuratezza e complessità crescono al crescere del numero di modi considerati, ma in generale è sufficiente considerare solo alcuni modi
- *Tipo di estimatori*: solo per metodi indiretti che operano nel dominio delle frequenze
- *Numero di input e output*: —————> Single-Input-Single-Output (SISO)
—————> Single-Input-Multi-Output (SIMO)
—————> Multi-Input-Multi-Output (MIMO)

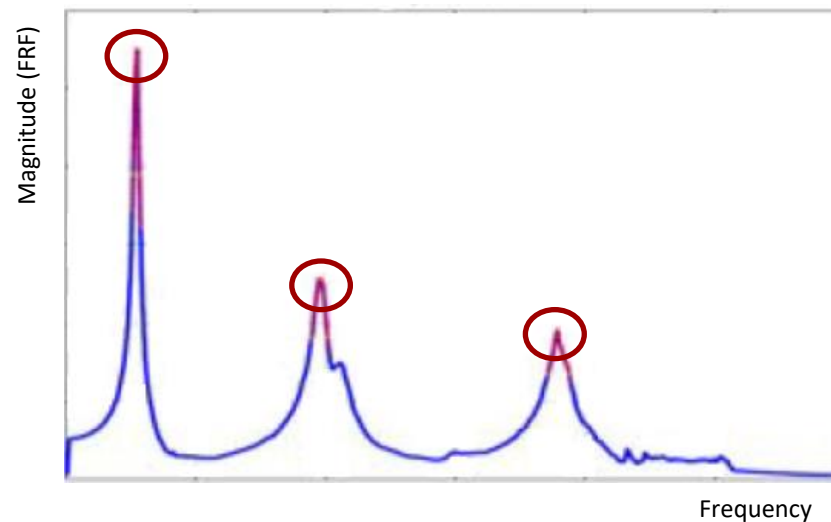
L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

METODI DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA

	Method	Type of formulation	SDOF or MDOF	Type of estimates	Number of inputs/outputs		
Frequency Domain	Peak Picking	Indirect (Modal)	SDOF	Local	SISO		
	Circle-fit						
	Inverse						
	Dobson				SISO/SIMO		
	Nonlinear LSFD				MDOF	Local Global	SIMO MIMO
	Orthogonal Polynomial						
Tuned-sinusoid	Mau		SDOF	Local	SISO		
	Asher's		MDOF	Global	MIMO		
Time Domain	Complex Exponential		SDOF	Local	SISO		
	LSCE		MDOF	Global	SIMO/MIMO		
	Ibrahim	MIMO					
	ERA						
	ARMA				Direct		

Peak Picking (PP)

- Di facile implementazione e interpretazione dei risultati
- Ipotesi che le vibrazioni ambientali eccitano in maniera uniforme tutti i modi di interesse
- Valuta:
 1. le frequenze naturali dall'osservazione dei picchi del grafico della "magnitude" della FRF
 2. i modi vibrazionali dal rapporto tra i picchi in vari punti della struttura
 2. gli smorzamenti dalla "larghezza" dei picchi
- I risultati sono molto sensibili al rumore dei segnali e allo smorzamento strutturare
- Valida stima dei parametri modali quando i modi sono nettamente separati (disaccoppiati) e lo smorzamento è modesto



Output - Only

Di questa categoria fanno parte le tecniche di Analisi Modale Operazionale (OMA): si basano sulla misura della risposta dinamica del sistema sottoposto a vibrazioni ambientali o operative e sul presupposto che le eccitazioni siano casuali nel tempo e nello spazio fisico della struttura.

Classificazione:

- *Dominio delle Frequenze*: analisi del segnale di ciascun punto di misura, e correlazione tra i segnali (metodi non parametrici). Forniscono i migliori risultati quando nei dati campionati è presente una vasta banda di frequenze o un ampio numero di modi oscillatori.
- *Dominio del Tempo*: adattamento delle funzioni di correlazione al modello della struttura e alle serie temporali dei dati registrati (metodi non parametrici). Portano a risultati più accurati quando il range di frequenze di interesse è limitato e il numero di modi da identificare è modesto.

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

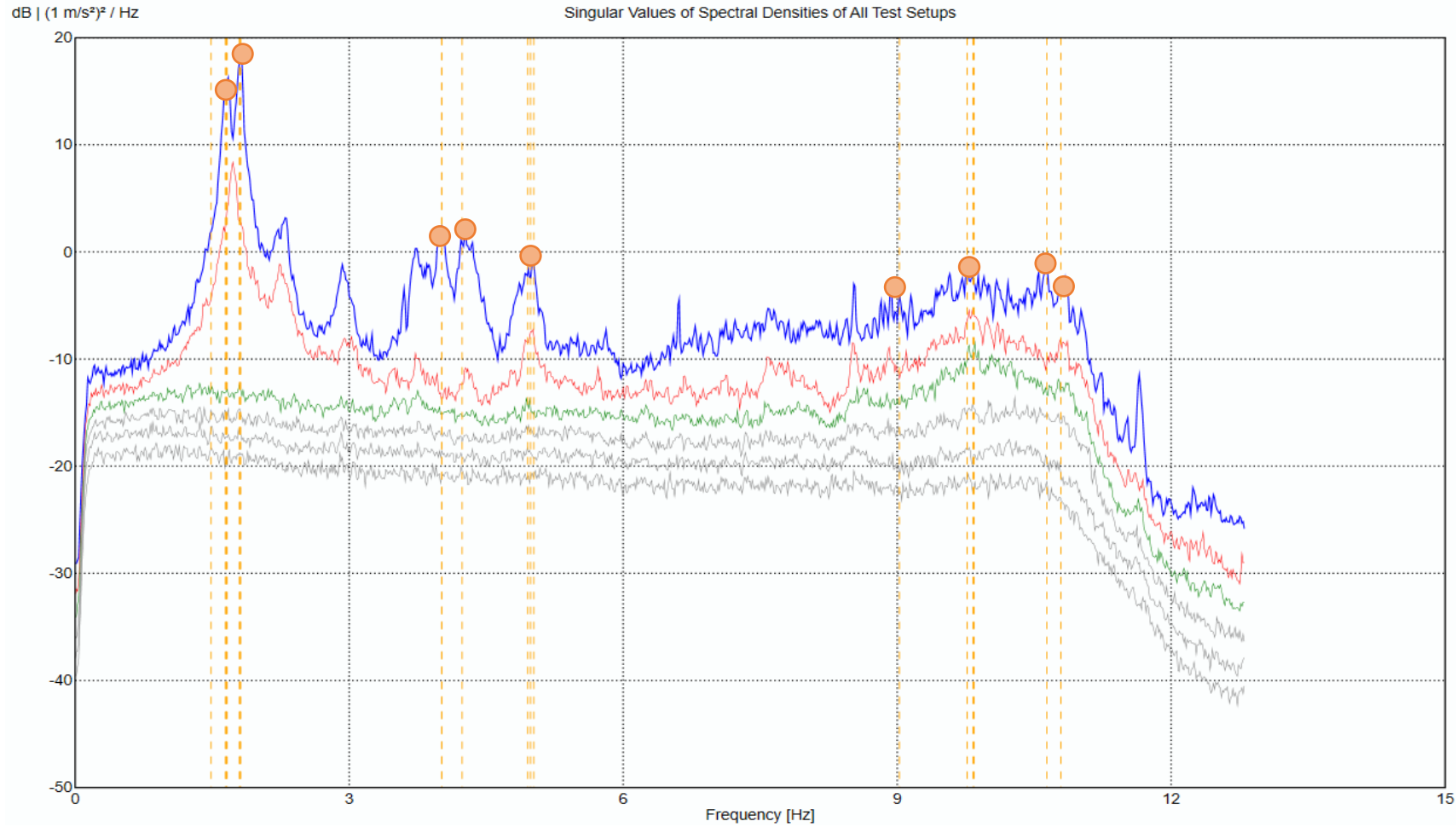
METODI DI IDENTIFICAZIONE DINAMICA

	Method	Characteristics
Frequency Domain	Peak Picking (PP)	Classical SDOF method
	Frequency Domain Decomposition (FDD)	MDOF method; application of SVD to reduce noise
Time Domain	Random Decrement (RD)	Operates on time domain series, leading to a free decay curve analysis
	Recursive Techniques (ARMA)	Time series modelling using recursive algorithms
	Maximum Likelihood Methods	Stochastic methods based on the minimization of a covariance matrix
	Stochastic Subspace Identification Methods (SSI-Data)	Stochastic methods based on the project of state vector on a vector of past realizations

Frequency Domain Decomposition (FDD)

Estensione del metodo PP al caso output-only: ugualmente, l'FDD considera che le frequenze di risonanza del sistema siano ben distinte.

- Idea di base: eseguire una decomposizione approssimativa della risposta del sistema in un insieme di sistemi indipendenti a singolo grado di libertà (SDOF), uno per ogni modo.
- Passi principali:
 1. Stima della matrice di densità spettrale (PSD) a partire dai dati grezzi
 2. Decomposizione del valore singolare (Singola Value Decomposition - SVD) delle matrici PSD ad ogni valore di frequenza
 3. Stima frequenze e forme modali dai picchi della densità spettrale
- Può rilevare il contributo dei diversi modi nella stessa frequenza
- Alta inaccuratezza legata alla stima dello smorzamento



● Picchi = frequenze di risonanza

Enhanced Frequency Domain Decomposition (EFDD)

- FDD potenziato per ottenere valori più accurati dello smorzamento:
 1. Analisi FDD
 2. Trasformata discreta di Fourier inversa (IDFT): ricostruisce il segnale nel dominio del tempo, scomposto nelle sue frequenze principali, consentendo di disaccoppiare i contributi modali
- Permette una stima più accurata sia delle frequenze naturali che delle forme modali
- L'impiego di un'interpolazione lineare permette di eliminare componenti armoniche dovute a forzanti indesiderate che possono compromettere la bontà dei risultati. In questo modo si riescono a stimare anche i rapporti di smorzamento

$$[G_{yy}(\omega)] = [\bar{H}(\omega)][G_{xx}(\omega)][\bar{H}(\omega)]^T$$

In cui:

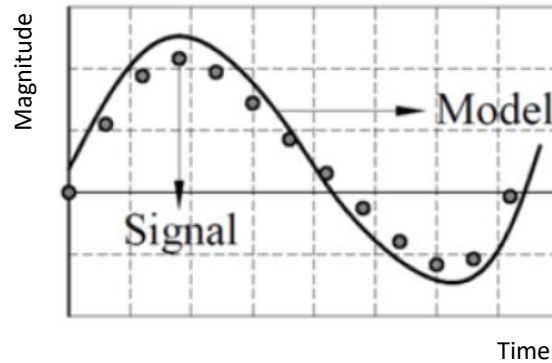
G_{xx} : matrice PDS degli inputs r [$r \cdot r$]

G_{yy} : matrice PSD delle risposte m [$m \cdot m$] composta dai vettori delle forme modali associate ai modi che concorrono ad una particolare frequenza

$\bar{H}(\omega)$: matrice FRF [$m \cdot r$]

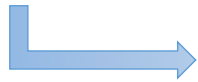
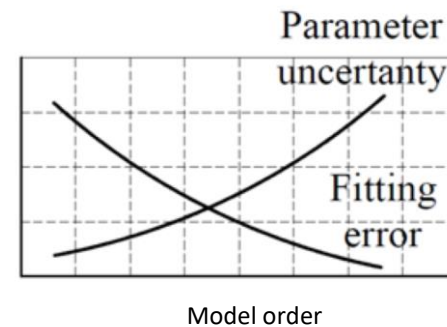
Stochastic Subspace Identification (SSI)

- Nel dominio del tempo, elabora direttamente le serie temporali. Può individuare modi vicini e consente la stima dei parametri modali ad alta frequenza. Implica un maggior tempo di elaborazione rispetto ai metodi precedenti
- Il modello ha parametri che possono essere regolati per minimizzare la deviazione tra la risposta del sistema e quella prevista

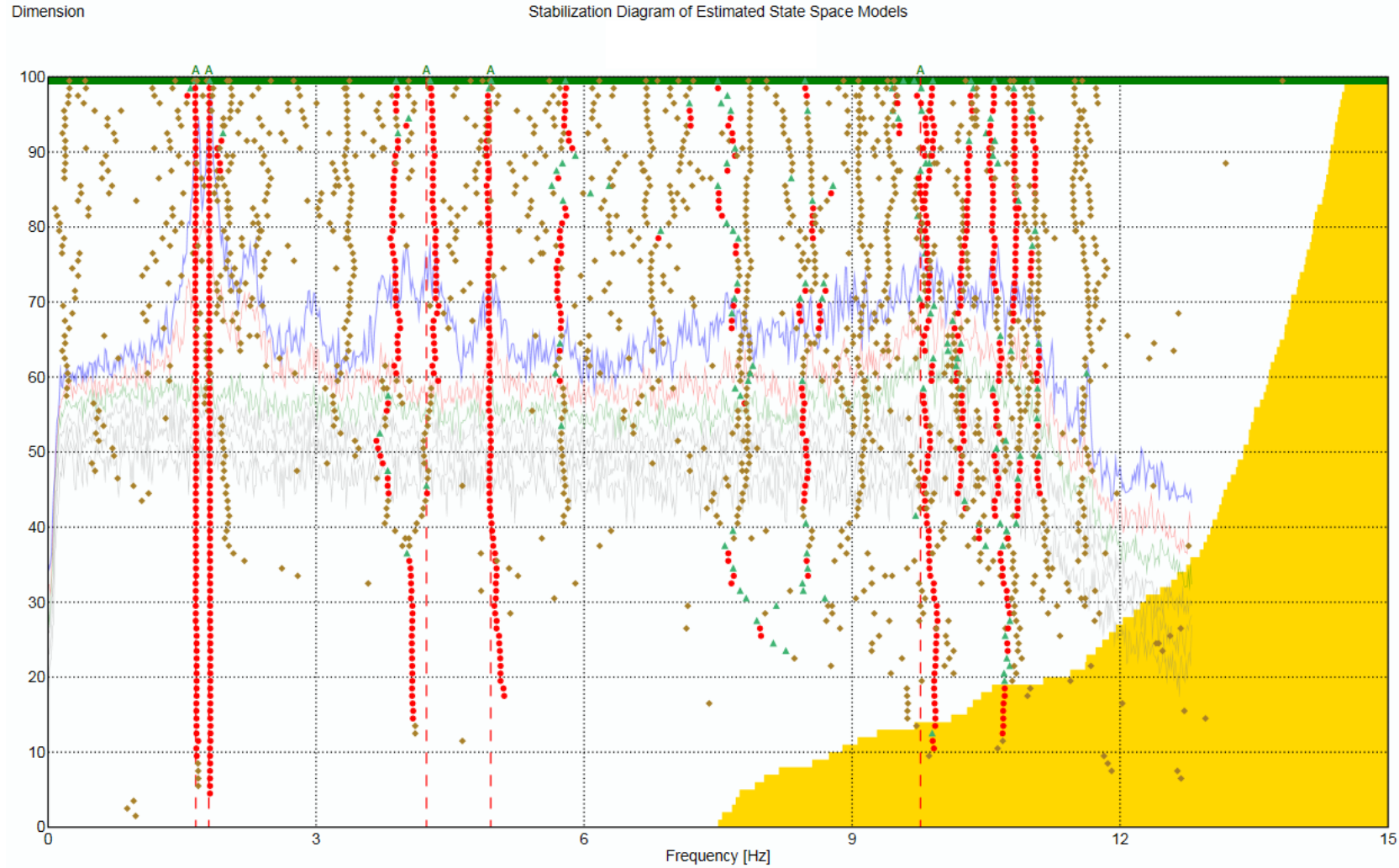


- Basato sulla teoria dello *discrete-time state-space*: la soluzione del problema porta all'identificazione della matrice di stato A e della matrice di output C per poi risalire alle frequenze, forme modali e coefficienti di smorzamento

- Ordine del modello n (gradi di libertà) ignoto: n troppo ridotto non restituisce una modellazione della risposta strutturale corretta, mentre n troppo elevato porta ad un aumento dell'incertezza statistica dei parametri del modello



Strategia: considerare vari modelli con ordine crescente per identificare tutti i modi fisici nella gamma di frequenza di interesse. Tali modi fisici sono riconoscibili nel diagramma di stabilizzazione come allineamento di punti (frequenze naturali). I modi spuri (numerici, dovuti a rumore o filtraggio) hanno andamento più irregolare



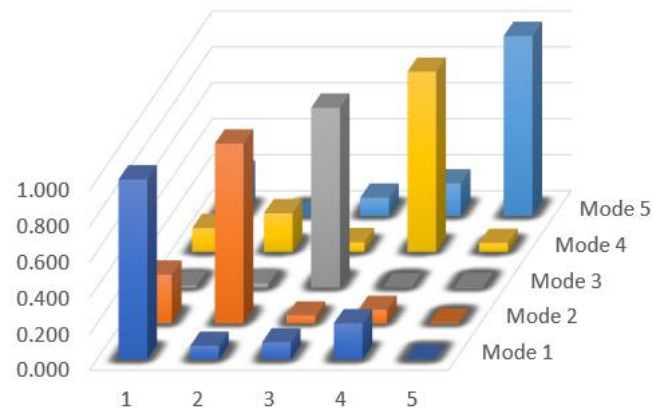
- Modi stabili (un allineamento = una frequenza naturale)
- ▲ Modi instabili
- ◆ Modi spuri (rumore)

- Confronto tra forme modali: MAC (Modal Assurance Criterion)

$$MAC_{(r,q)} = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)}$$

$\{\varphi_X\}_q$: vettore modale di cui si valuta la compatibilità, modo q
 $\{\varphi_A\}_r$: vettore modale compatibile con il modello analitico, modo r

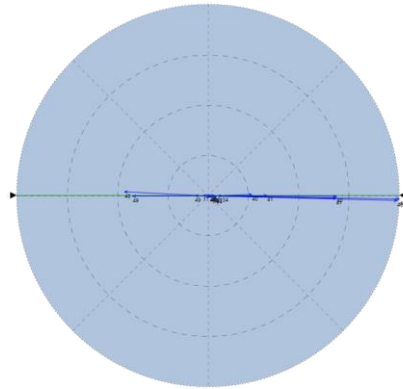
AutoMAC per indagare la bontà dell'estrazione effettuata (un set di vettori di forme modali sono correlati con se stessi):



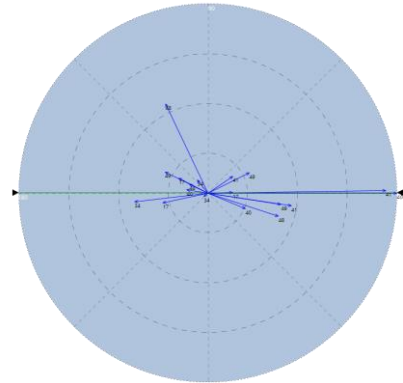
Condizione ottimale:

- Valore 1 sulla diagonale (riferimento di un modo a sé stesso)
- Valore circa 0 fuori dalla diagonale (indipendenza lineare tra modi diversi)

- Affidabilità delle forme modali: *Complexity Plot*



Modo affidabile (non complesso): le componenti (frecce) giacciono lungo una retta



Modo poco affidabile (complesso): le componenti (frecce) non giacciono lungo una retta

INTRODUZIONE

- Moto e vibrazioni
- Parametri principali e Grandezze misurabili
- Analisi base e Analisi in frequenza
- Campionamento (Sampling) e Fenomeno dell'Aliasing (sotto-campionamento)
- Leakage e Finestratura
- I Filtri

LA NORMATIVA

- UNI 9614:2017
- UNI 9916:2014
- D.L. 109/2018 ("Decreto Genova") - Capo II
- Parere CSLP n.88/2019 dell'Adunanza telematica del 17/04/2020

LA STRUMENTAZIONE

- La catena di misura
- Trasduttori / Accelerometri

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

- EMA e OMA
- Modelli matematici
- Metodi di identificazione dinamica
- Valutazione dei risultati

LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

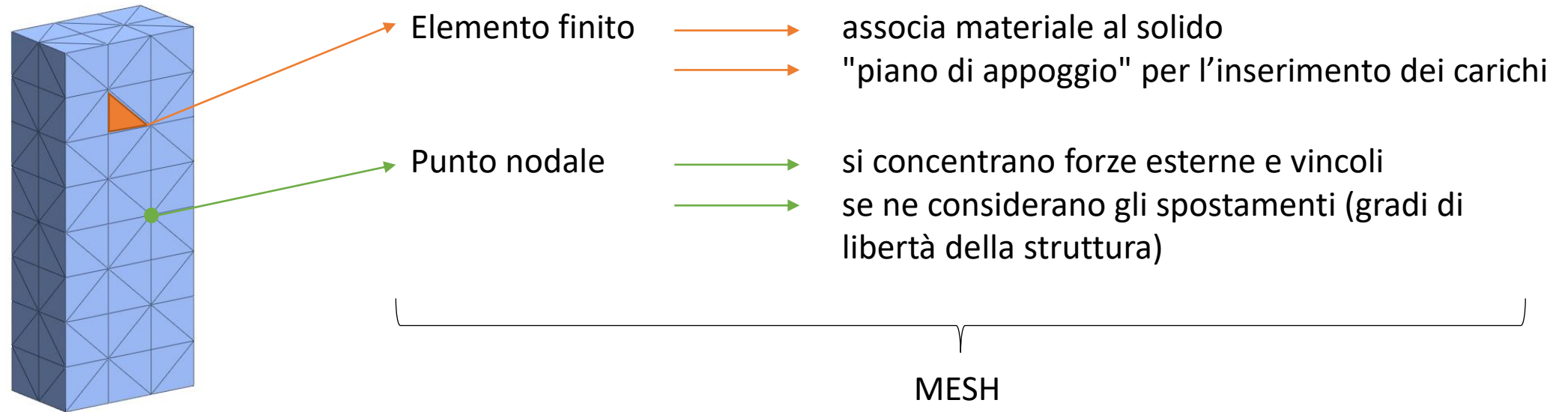
- **Il modello numerico**
- **La calibrazione**
- **Confronto e validazione dei risultati**

CASI STUDIO

- Santuario del Santissimo Sacramento di Treia (MC)
- Palazzo del Governatore, Torre Civica e Loggiato a Matelica (MC)
- Torre Civica di Ostra (AN)
- Cattedrale Metropolitana di Fermo (FM)
- Collegiata di Santa Maria a Visso (MC)
- Miglioramento sismico della scuola di Ostra Vetere (AN)
- Ponte sul fiume Garigliano, Minturno (LT)
- Cattedrale di Camerino (MC)

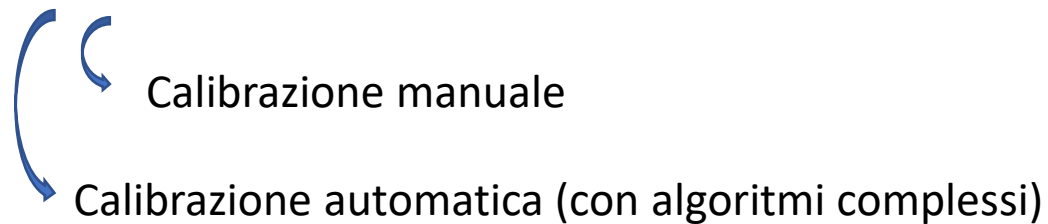
Scopo della modellazione numerica: ottenere geometrie che ben approssimano la struttura reale per analizzarla a livello globale e ottenere informazioni riguardo al comportamento statico e dinamico d'insieme.

Finite Element Method (FEM): dominio della struttura suddiviso in tanti sottodomini (elementi finiti) collegati tra loro attraverso i punti nodali.



Analisi modale: permette di ricavare i parametri modali numerici (frequenze, forme modali e smorzamenti) della struttura (da confrontare con quelli ricavati dall'identificazione dinamica).

- Premessa: approssimazioni nella costruzione dei modelli numerici (sia sulla geometria che sui parametri dei materiali)
- Scopo: ottenere la coincidenza dei parametri modali numerici (da analisi modale su modello numerico) con quelli sperimentali (da identificazione dinamica su modello sperimentale)
- Modalità di esecuzione: aggiornamento dei parametri dei materiali assegnati al modello numerico (massa, rigidità, proprietà di smorzamento). Ad ogni aggiornamento si fa il confronto tra i dati dei due modelli.



- Confronto tra frequenze: differenza percentuale

$$\Delta f_i = \left| \frac{f_{i,exp} - f_{i,num}}{f_{i,exp}} \right| \cdot 100$$

i : i -esimo modo

$f_{i,exp}$: frequenza sperimentale

$f_{i,num}$: frequenza numerica

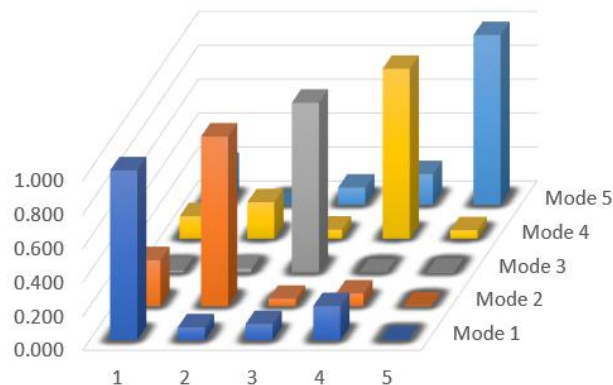
- Confronto tra forme modali: MAC (Modal Assurance Criterion)

$$MAC_{(r,q)} = \frac{|\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_X\}_q|^2}{(\{\varphi_A\}_r^T \{\varphi_A\}_r)(\{\varphi_X\}_q^T \{\varphi_X\}_q)}$$

$\{\varphi_X\}_q$: vettore modale di cui si valuta la compatibilità, modo q

$\{\varphi_A\}_r$: vettore modale compatibile con il modello analitico, modo r

→ CrossMAC per confronto modi tra modello sperimentale e modello numerico:



Condizione ottimale:

- Valore circa 1 sulla diagonale (forme modali simili)
- Valore circa 0 fuori dalla diagonale (forme modali ortogonali)

INTRODUZIONE

- Moto e vibrazioni
- Parametri principali e Grandezze misurabili
- Analisi base e Analisi in frequenza
- Campionamento (Sampling) e Fenomeno dell'Aliasing (sotto-campionamento)
- Leakage e Finestratura
- I Filtri

LA NORMATIVA

- UNI 9614:2017
- UNI 9916:2014
- D.L. 109/2018 ("Decreto Genova") - Capo II
- Parere CSLP n.88/2019 dell'Adunanza telematica del 17/04/2020

LA STRUMENTAZIONE

- La catena di misura
- Trasduttori / Accelerometri

L'IDENTIFICAZIONE DINAMICA

- EMA e OMA
- Modelli matematici
- Metodi di identificazione dinamica
- Valutazione dei risultati

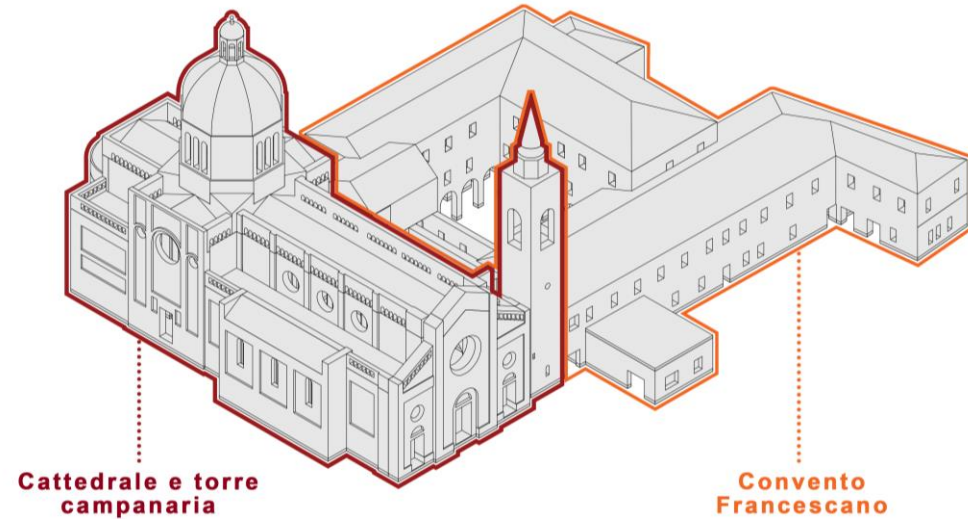
LA CALIBRAZIONE DEI MODELLI NUMERICI

- Il modello numerico
- La calibrazione
- Confronto e validazione dei risultati

CASI STUDIO

- Santuario del Santissimo Sacramento di Treia (MC)
- Palazzo del Governatore, Torre Civica e Loggiato a Matelica (MC)
- Torre Civica di Ostra (AN)
- Cattedrale Metropolitana di Fermo (FM)
- Collegiata di Santa Maria a Visso (MC)
- Miglioramento sismico della scuola di Ostra Vetere (AN)
- Ponte sul fiume Garigliano, Minturno (LT)
- Cattedrale di Camerino (MC)

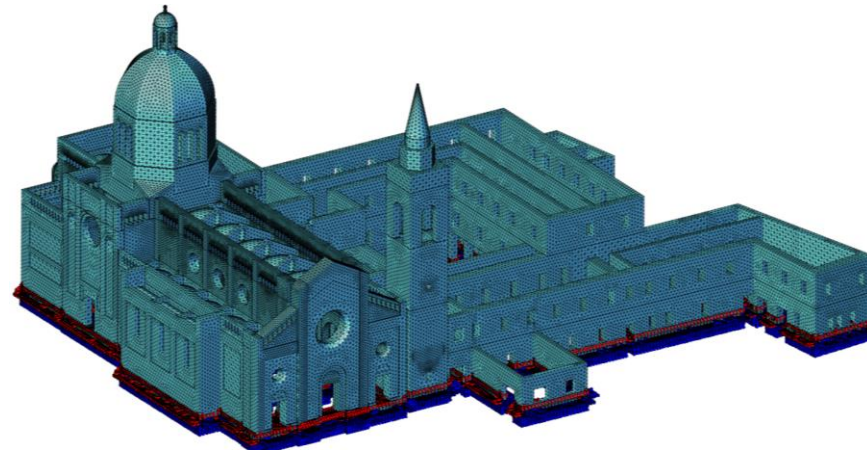
SANTUARIO SANTISSIMO CROCEFISSO DI TREIA (MC)



SANTUARIO DEL SANTISSIMO CROCEFISSO DI TREIA (MC)

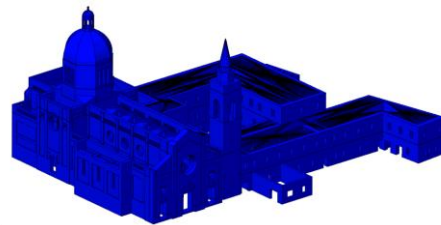


Modello numerico (FEM)

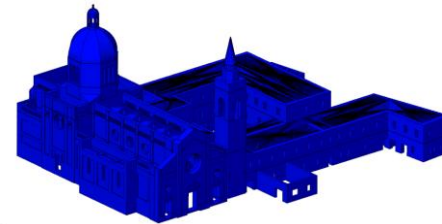


Danneggiato dal sisma del 2016:

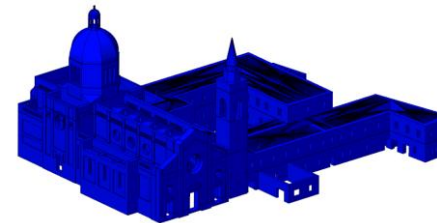
- Attivazione meccanismo ribaltamento semplice facciata
- Lanterna della cupola danneggiata con gravi lesioni ad X causate da azioni sul piano dei maschi murari che la compongono
- Modulo elastico unico per tutto il modello: muratura in mattoni pieni e malta di calce, $E=1500 \text{ N/mm}^2$



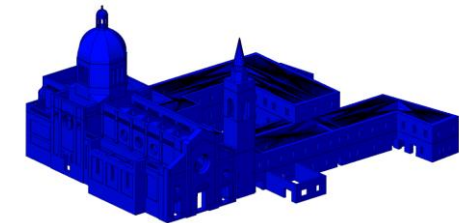
Modo 1 1.531Hz



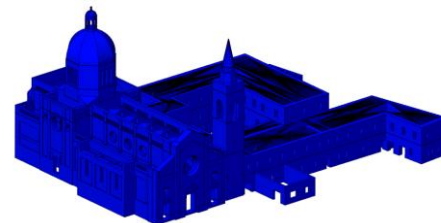
Modo 2 1.647Hz



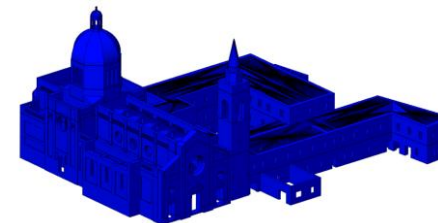
Modo 3 3.906Hz



Modo 4 4.154Hz

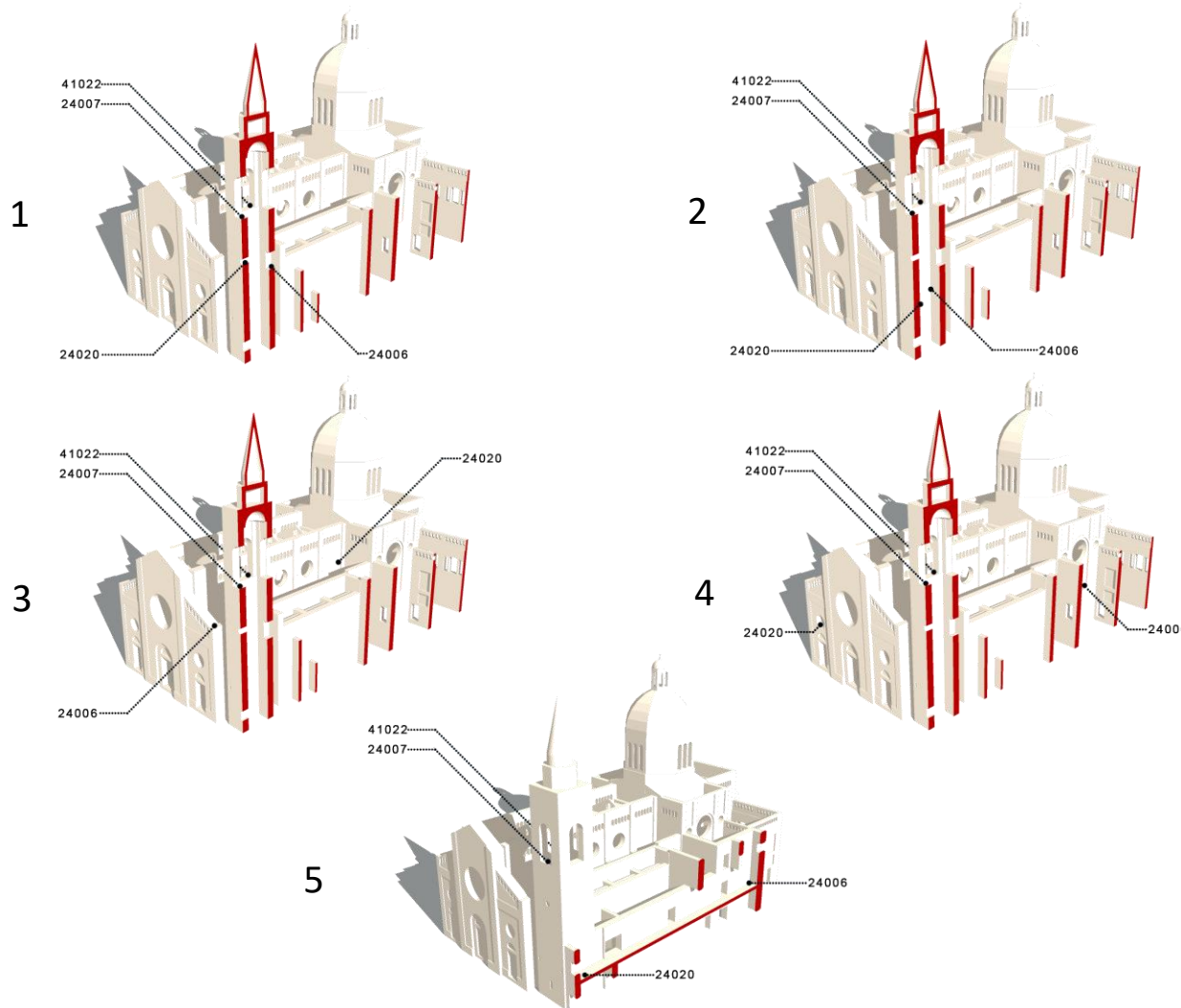


Modo 5 4.735Hz



Modo 6 5.252Hz

5 Acquisizioni: 4 sensori, di cui due fissi sulla sommità della torre



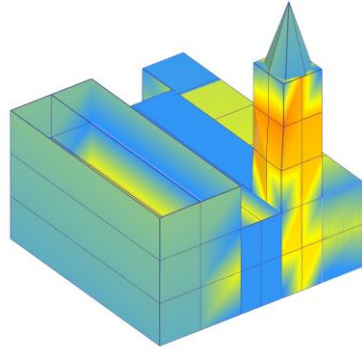
Acquisizione 1 e 2: Torre campanaria

Acquisizione 3 e 4: Interazione torre e chiesa

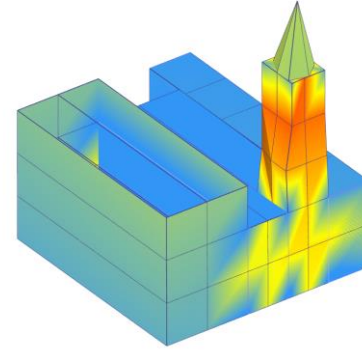
Acquisizione 1 e 2: Sezione di collegamento tra chiesa e monastero

Modello sperimentale

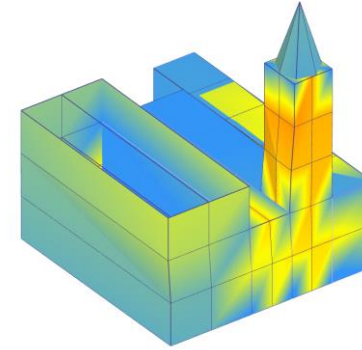
Modo 1



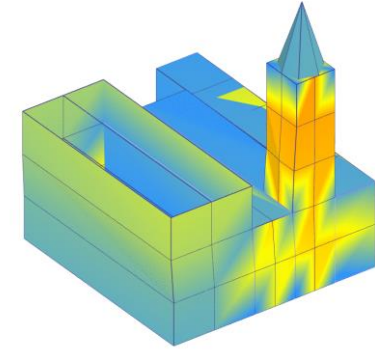
Modo 2



Modo 3

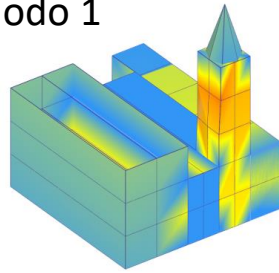


Modo 4

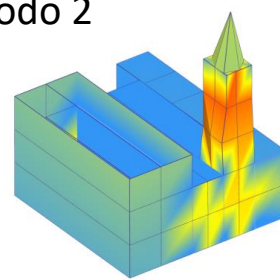


Confronto

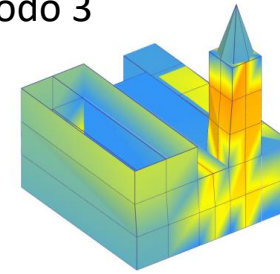
Modo 1



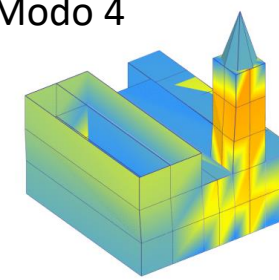
Modo 2



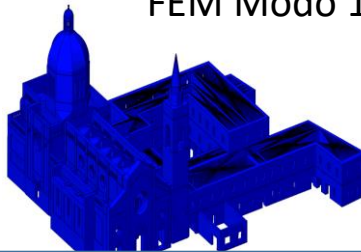
Modo 3



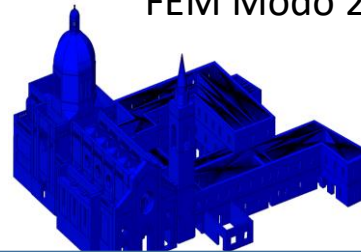
Modo 4



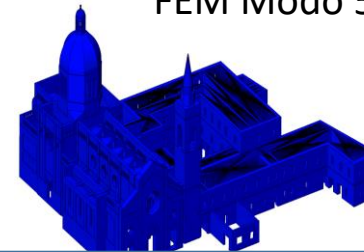
FEM Modo 1



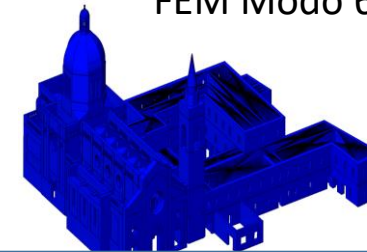
FEM Modo 2



FEM Modo 5

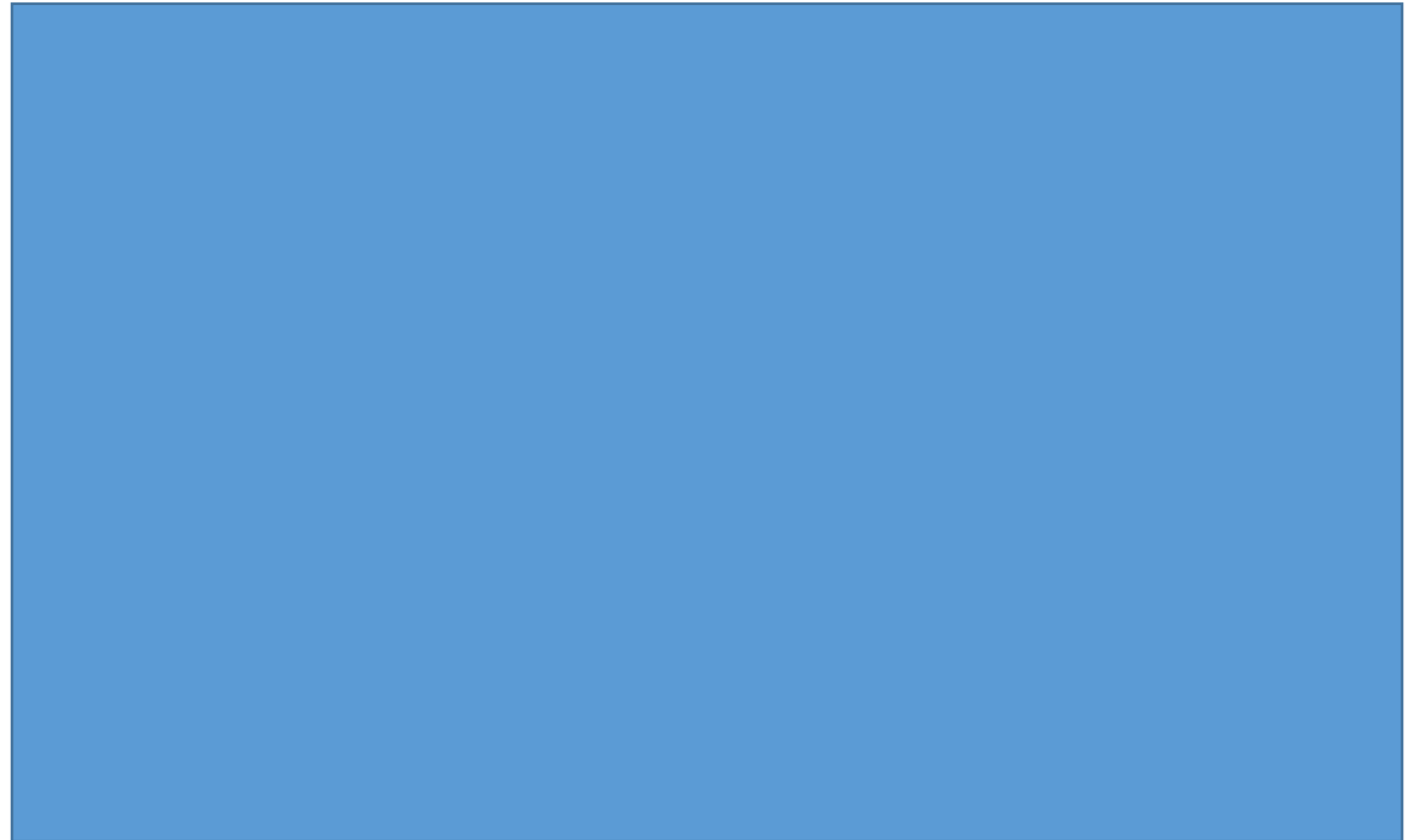


FEM Modo 6



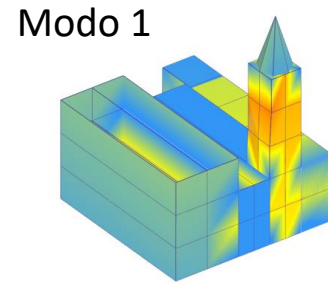
Calibrazione: step 1

- Aumentato il modulo elastico del blocco chiesa, che risulta costruita con materiali di ottima qualità: $E=2400 \text{ N/mm}^2$
- Valore minimo nelle zone danneggiate dal sisma, seguendo il quadro fessurativo: le volte della navata centrale, il tamburo della cupola e la facciata principale: $E=1800 \text{ N/mm}^2$
- Corpo restante invariato: $E=1500 \text{ N/mm}^2$

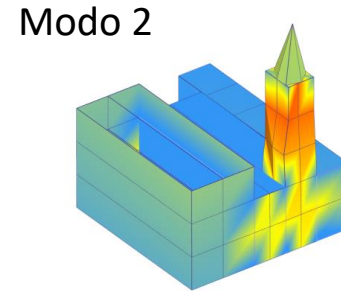
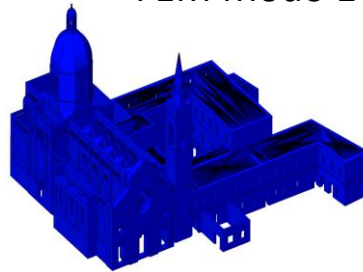


SANTUARIO SANTISSIMO CROCEFISSO DI TREIA (MC)

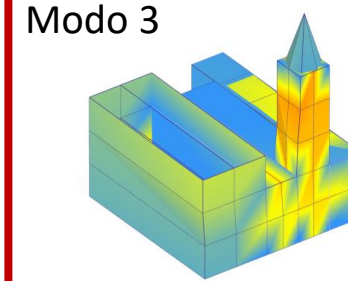
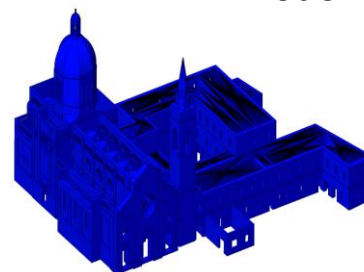
Calibrazione: step 1



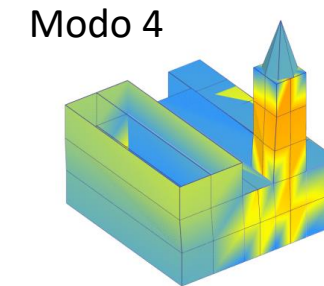
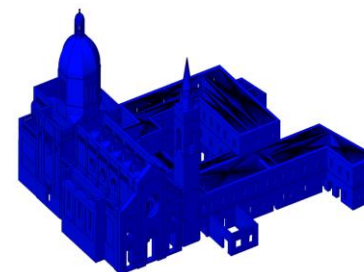
FEM Modo 1



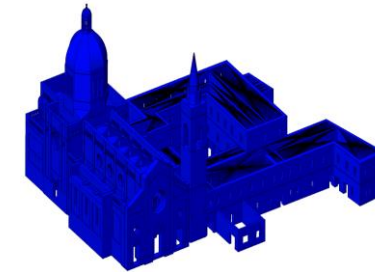
FEM Modo 2



FEM Modo 5



FEM Modo 6



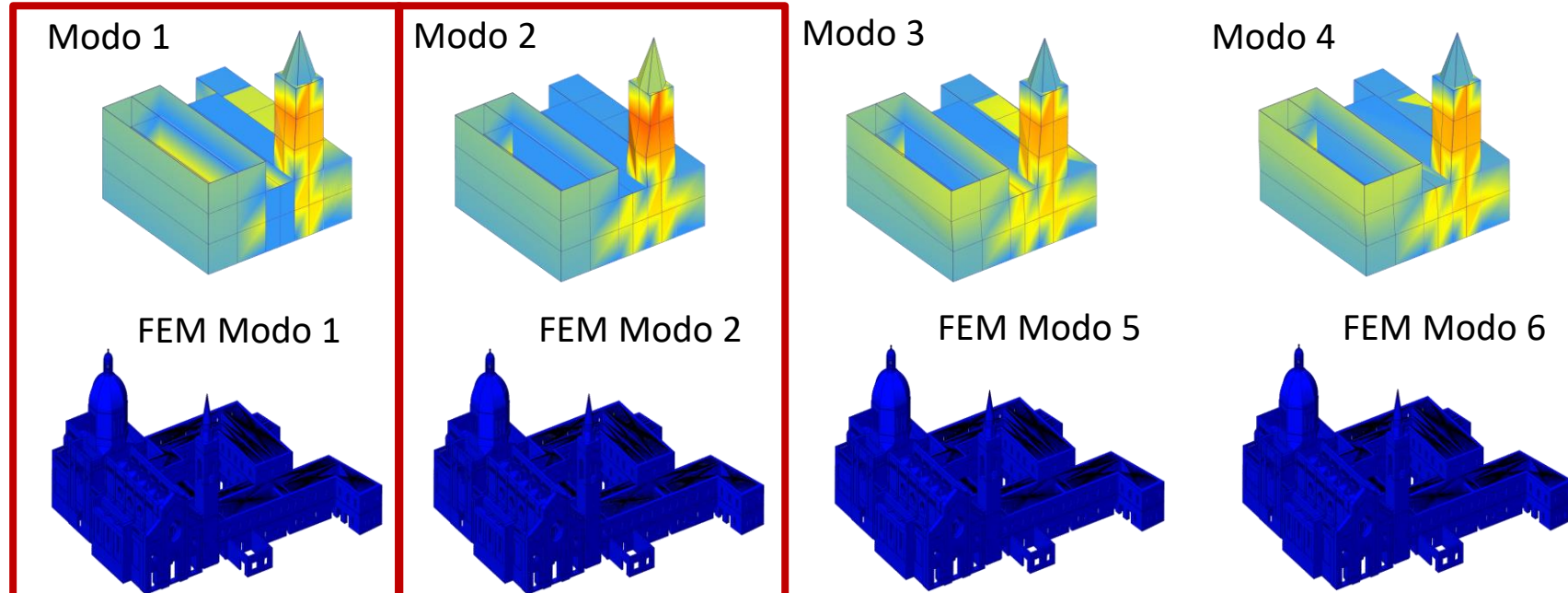
Calibrazione: step 2

Torre divisa in due blocchi a livello di interpiano:

- E elevato per il basamento: $E=3025$ N/mm²
- E basso per la parte alta: $E=1350$ N/mm²

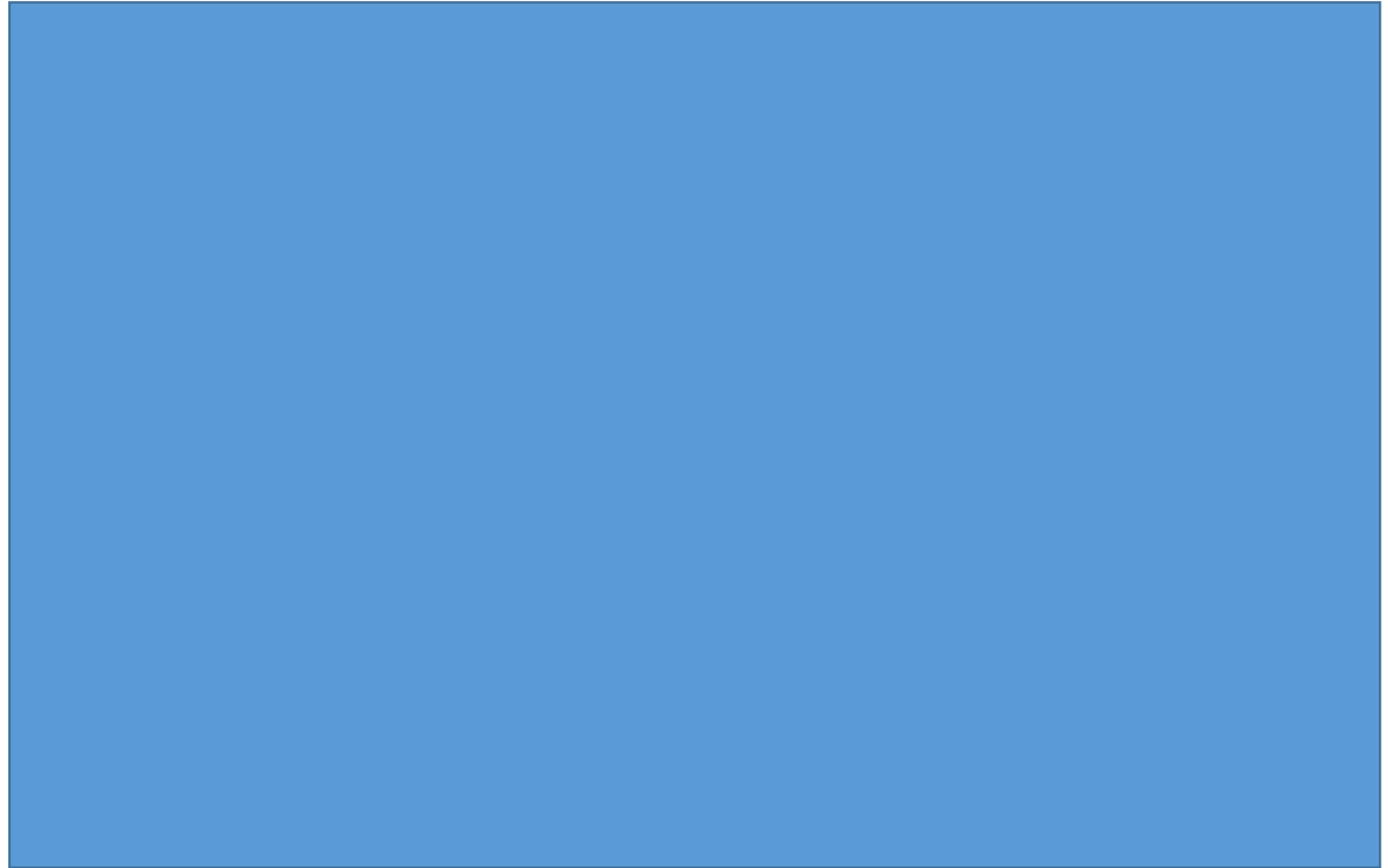


Calibrazione: step 2



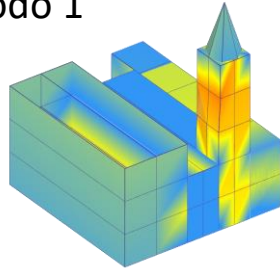
Calibrazione: step 3

Torre divisa in altri due blocchi (totale 4)
con ordine decrescente dal basso verso
l'alto

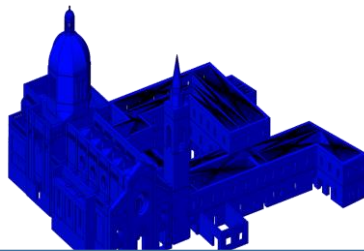


Calibrazione: step 3

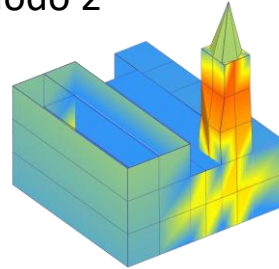
Modo 1



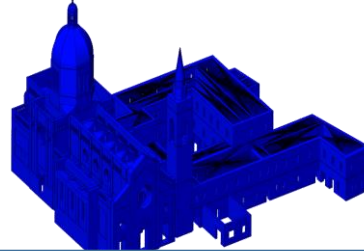
FEM Modo 1



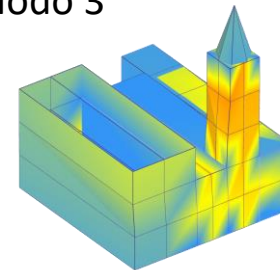
Modo 2



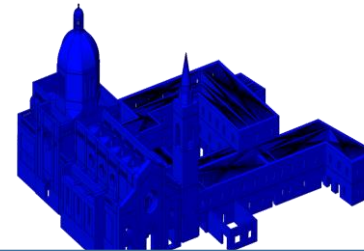
FEM Modo 2



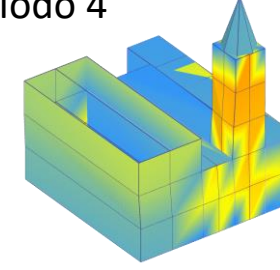
Modo 3



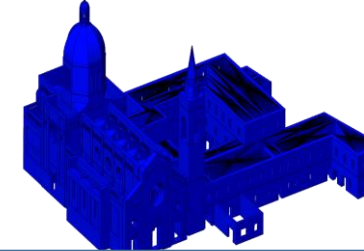
FEM Modo 5



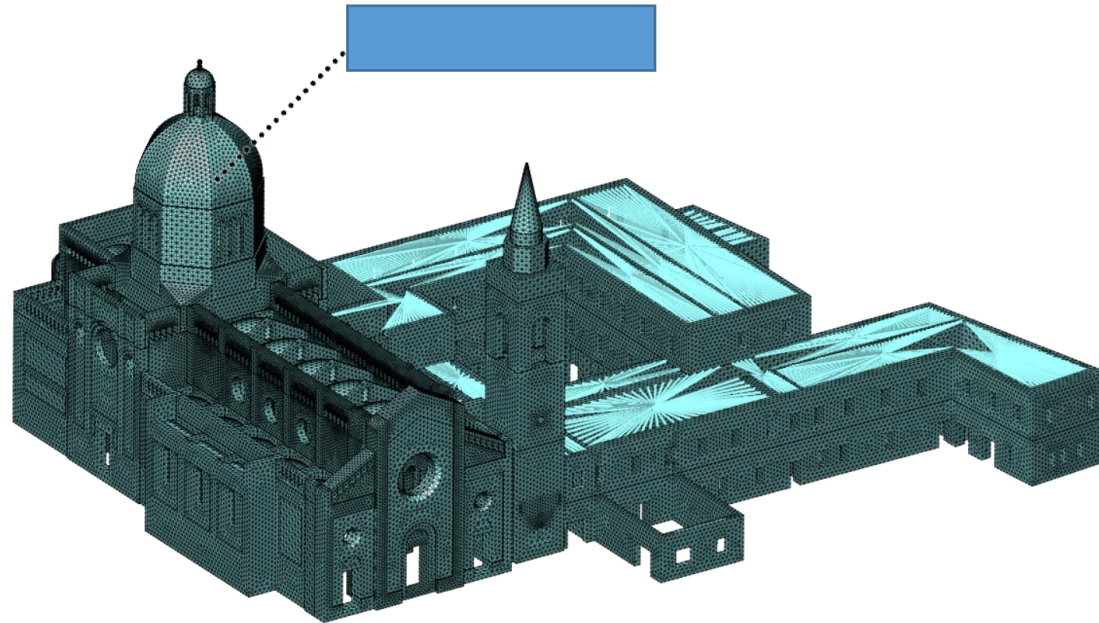
Modo 4



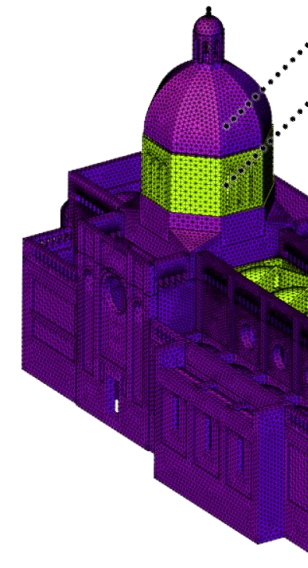
FEM Modo 6



Riepilogo



MODELLO INIZIALE



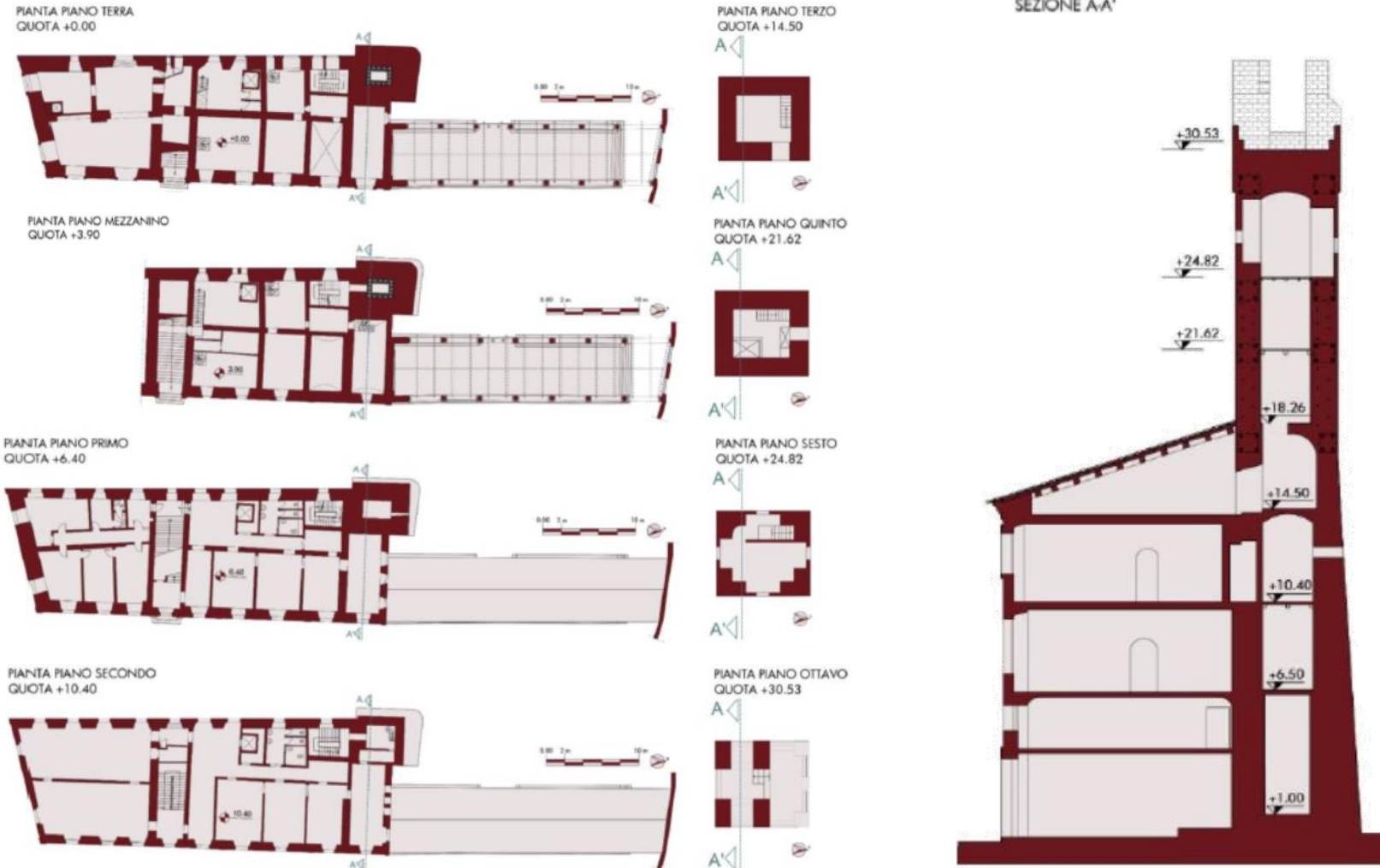
MODELLO CALIBRATO

PALAZZO, TORRE CIVICA E LOGGIATO A MATELICA (MC)



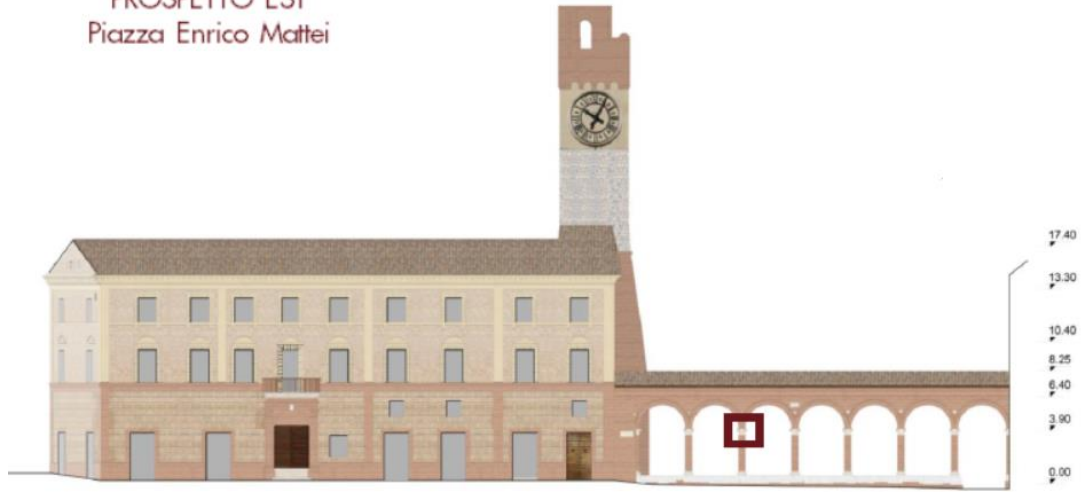
PALAZZO DEL GOVERNATORE, TORRE CIVICA E LOGGIATO A MATELICA (MC)

Rilievo

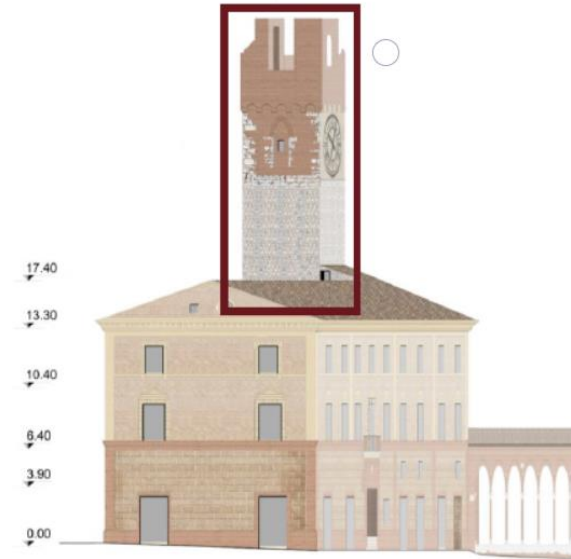


Rilievo

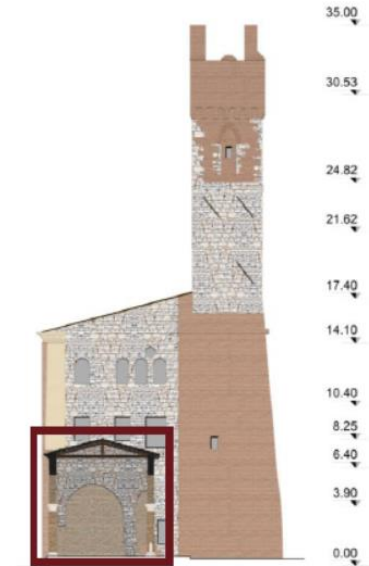
PROSPETTO EST
 Piazza Enrico Mattei



PROSPETTO SUD
 Via Umberto I°



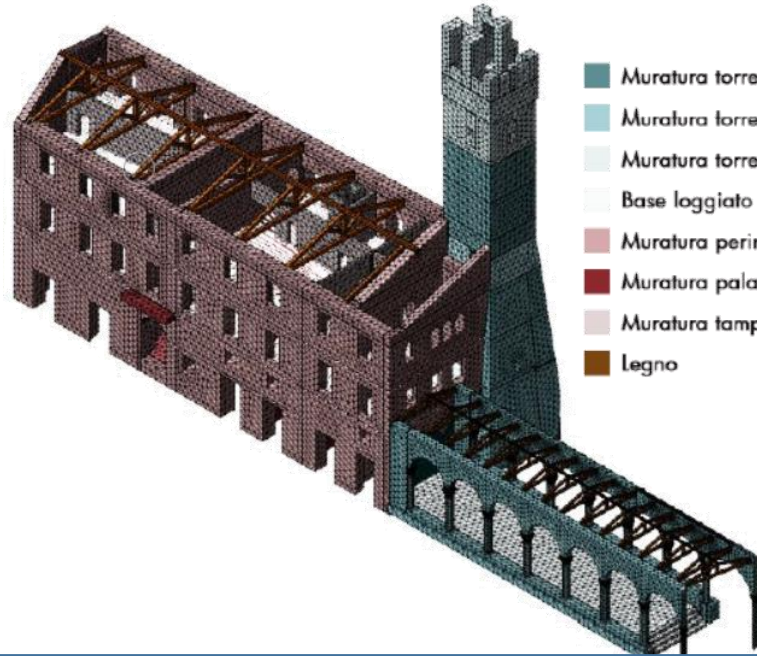
PROSPETTO NORD



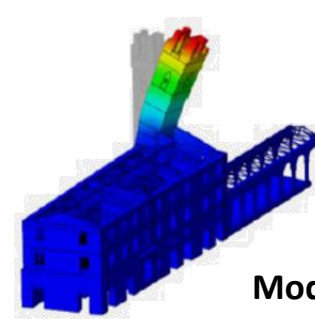
PROSPETTO OVEST



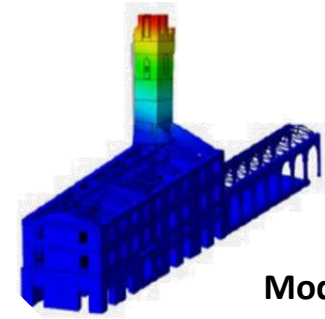
Modello numerico (FEM)



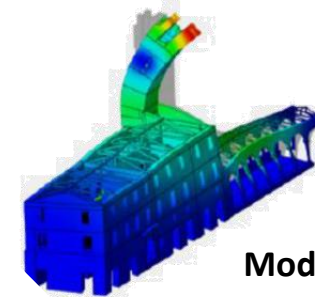
- Muratura torre 1,2,3,5,6 e muratura loggiato
- Muratura torre 4
- Muratura torre 7,8,9 e finestroni
- Base loggiato
- Muratura perimetrale palazzo
- Muratura palazzo interni
- Muratura tamponature
- Legno



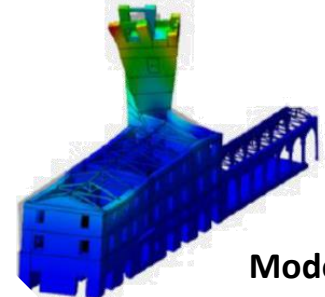
Modo 1
1.731Hz



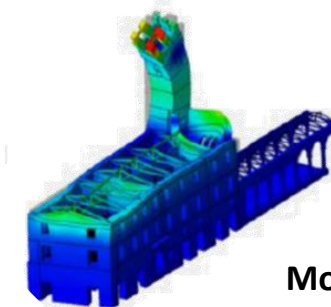
Modo 2
1.764Hz



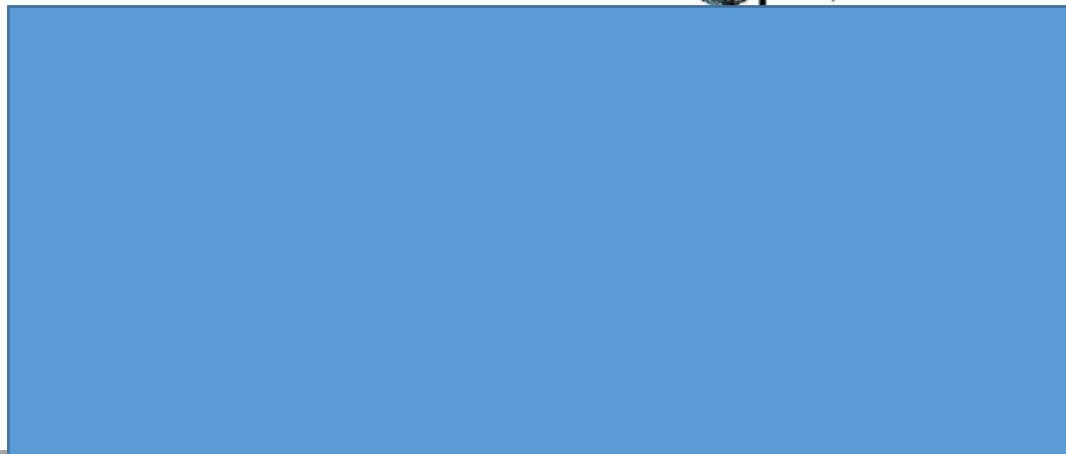
Modo 3
4.953Hz



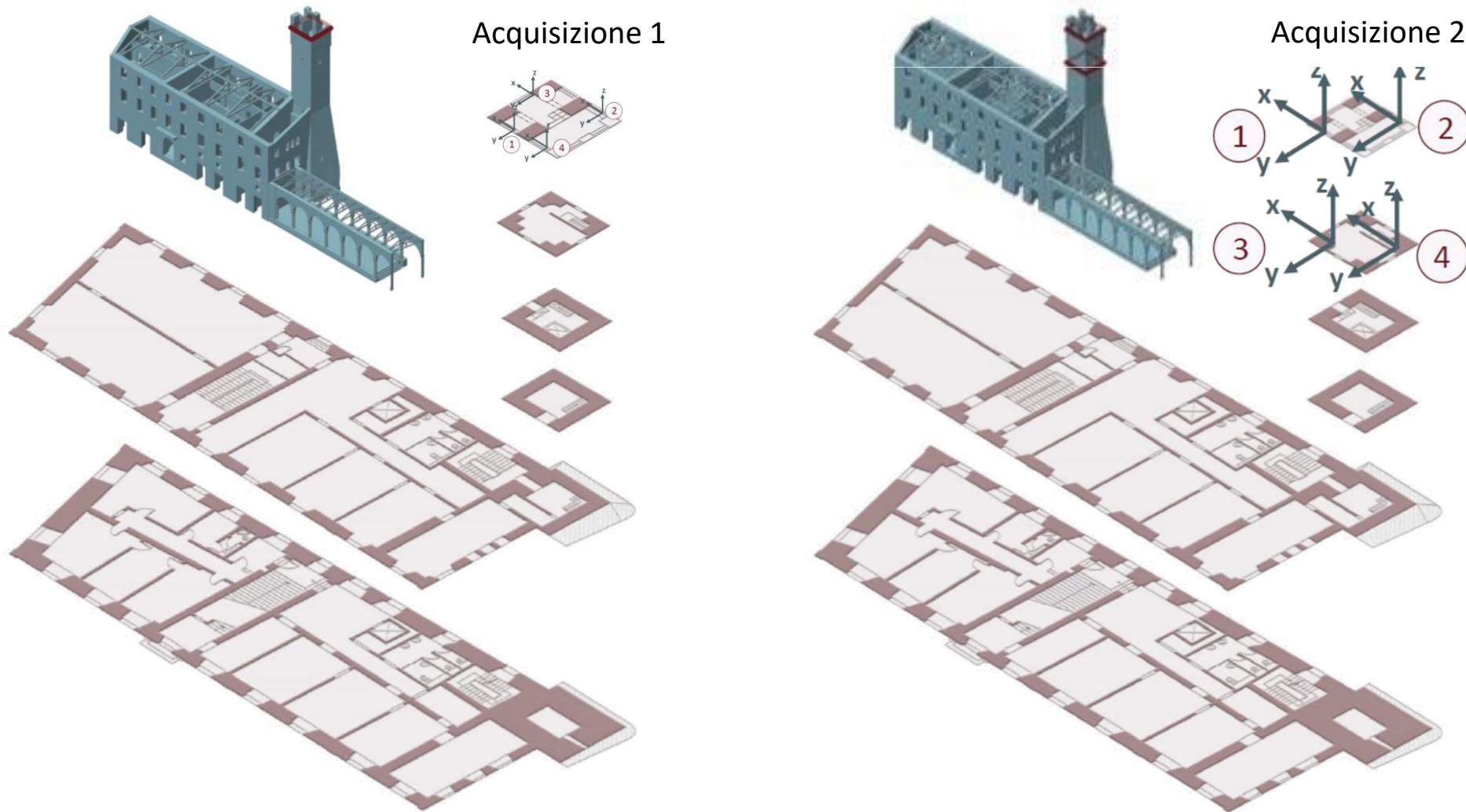
Modo 4
6.264Hz



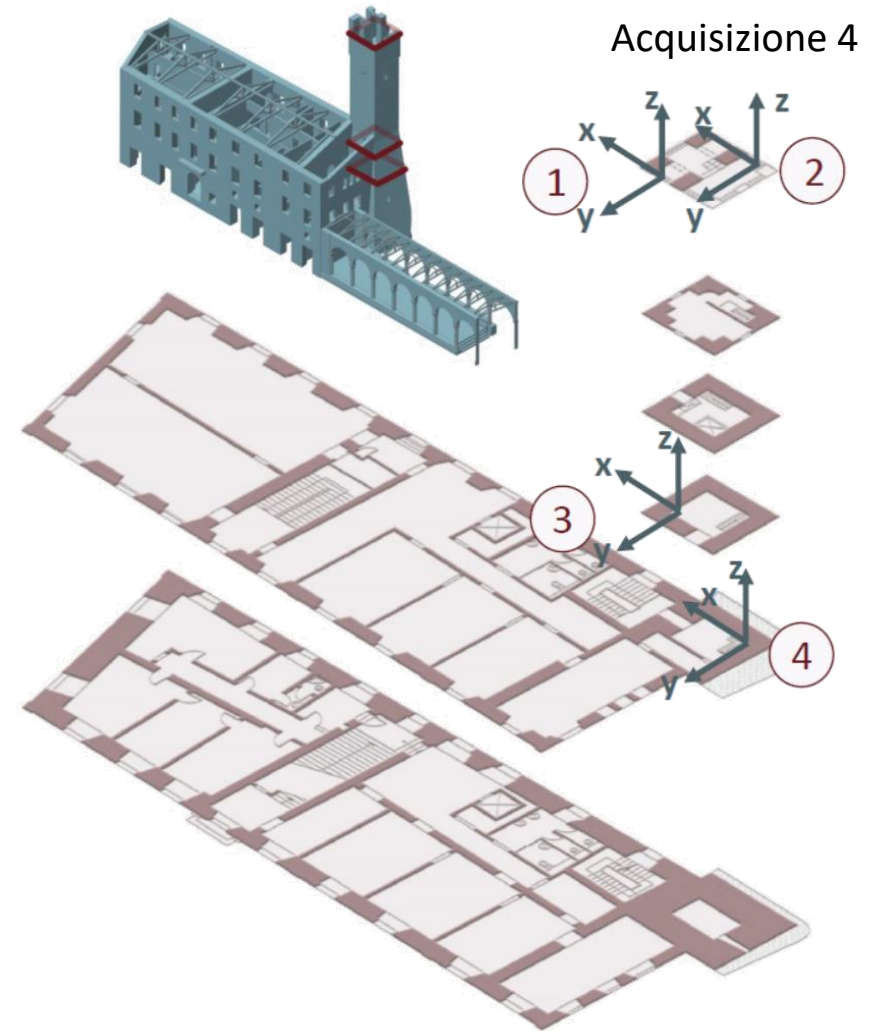
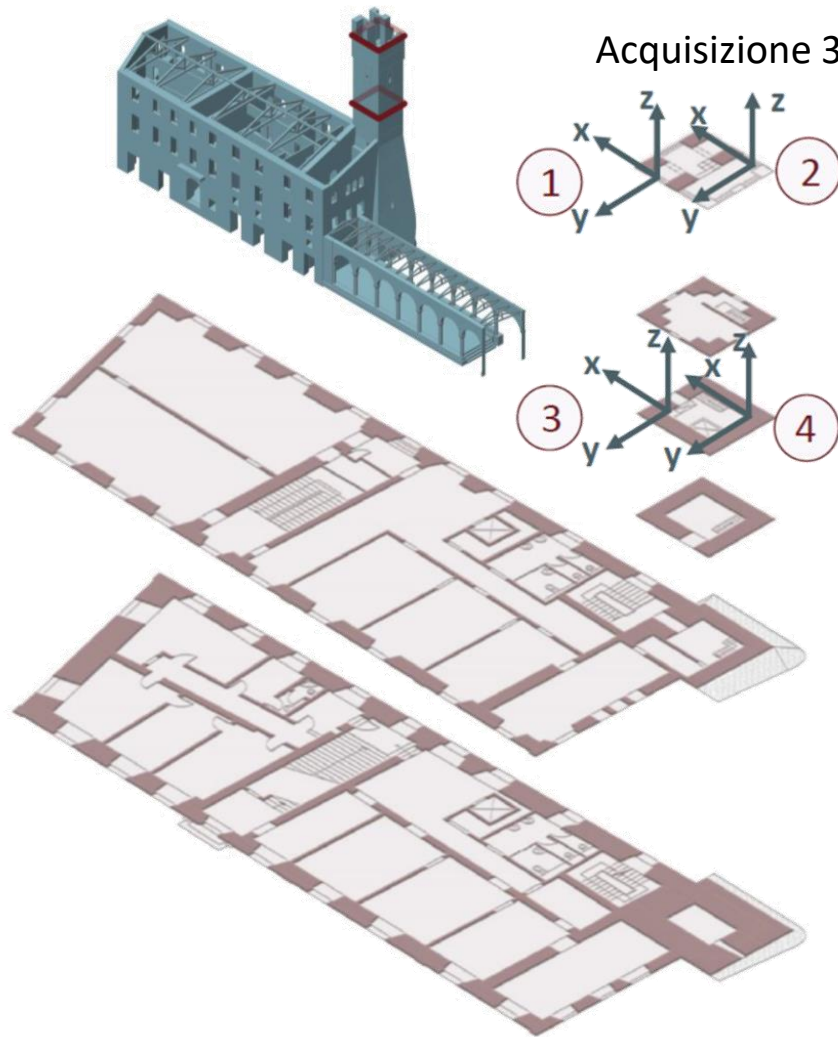
Modo 5
7.667Hz



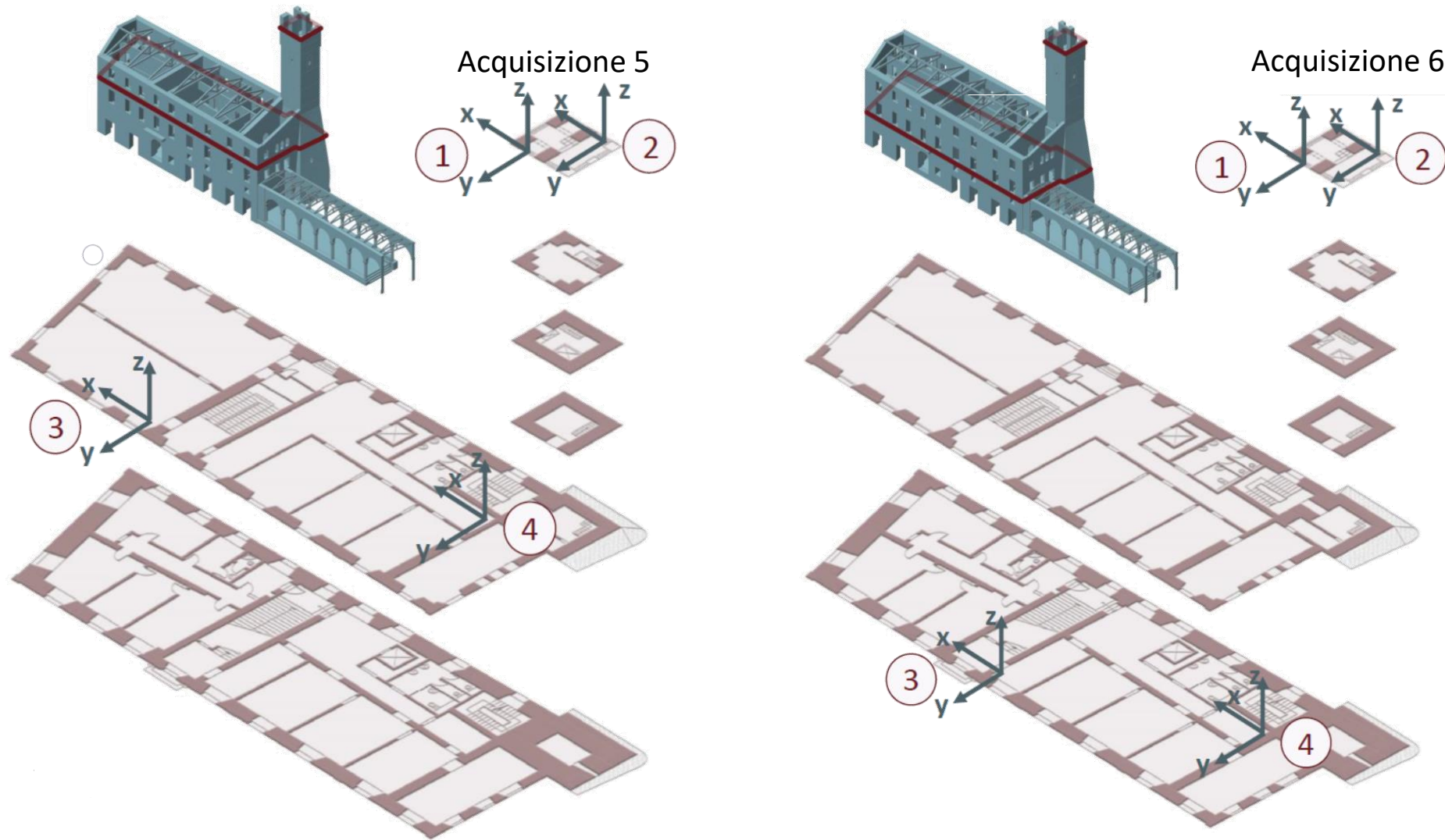
6 Acquisizioni: 4 sensori, di cui due fissi in sommità



6 Acquisizioni: 4 sensori, di cui due fissi in sommità

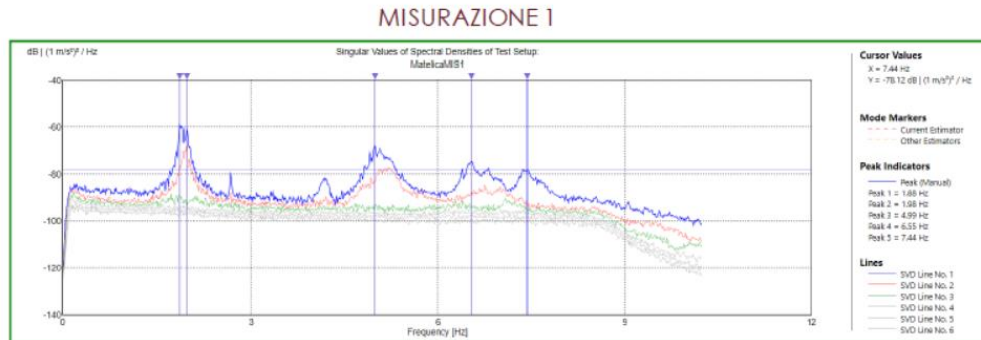


6 Acquisizioni: 4 sensori, di cui due fissi in sommità

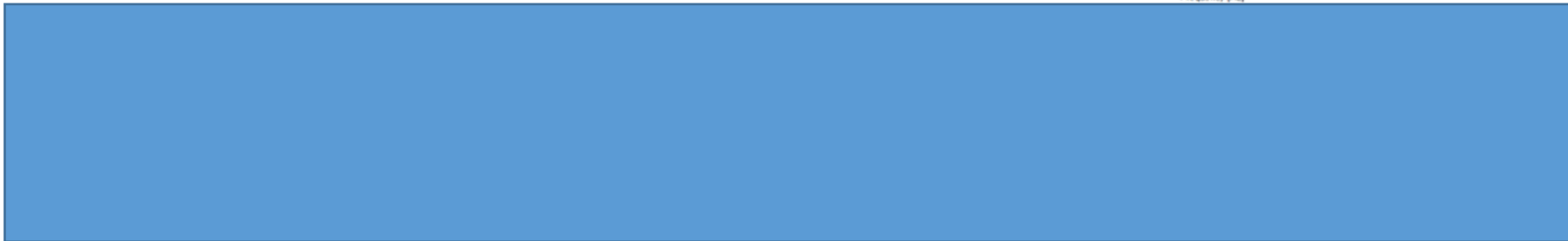
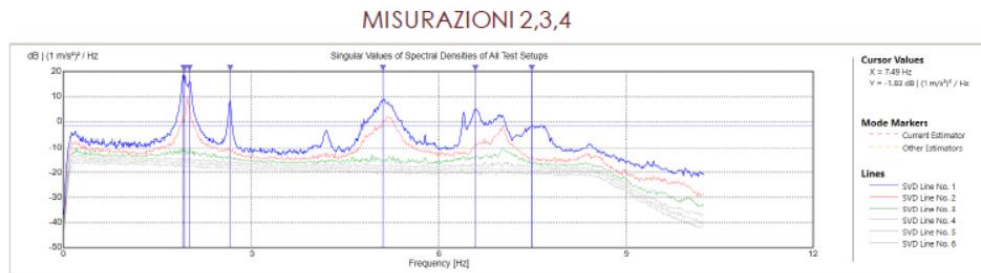
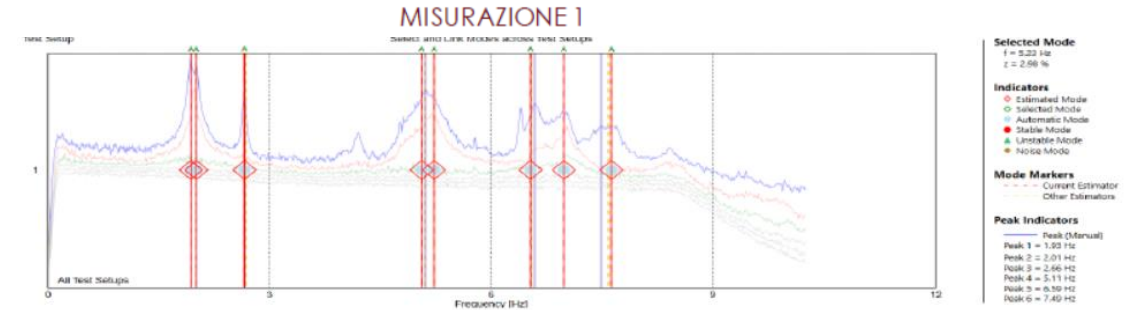


Identificazione dinamica

Analisi nel dominio delle frequenze

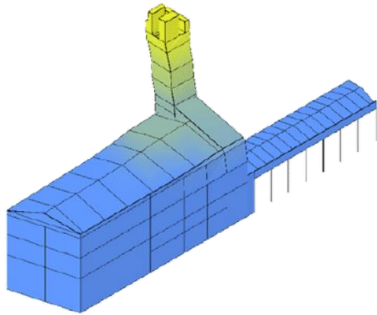


Analisi nel dominio del tempo

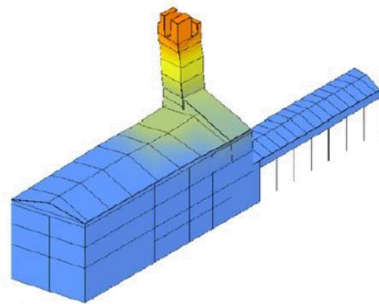


Modello sperimentale

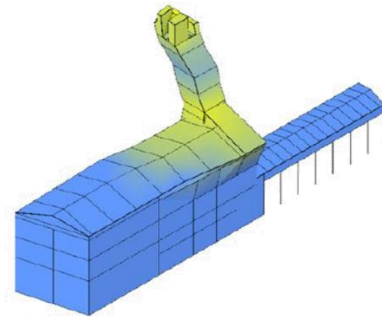
MODO 1
Traslazionale in Y



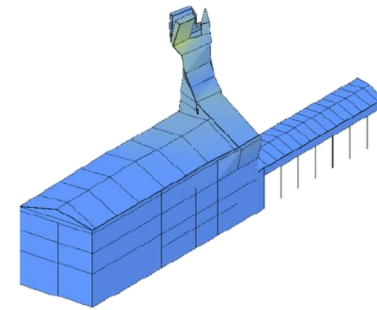
MODO 2
Traslazionale in X



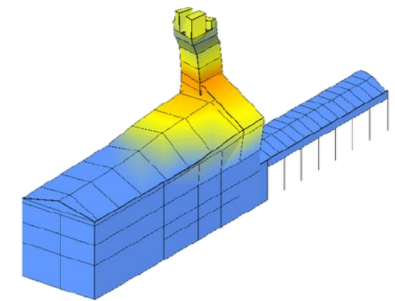
MODO 3
Flessionale in Y



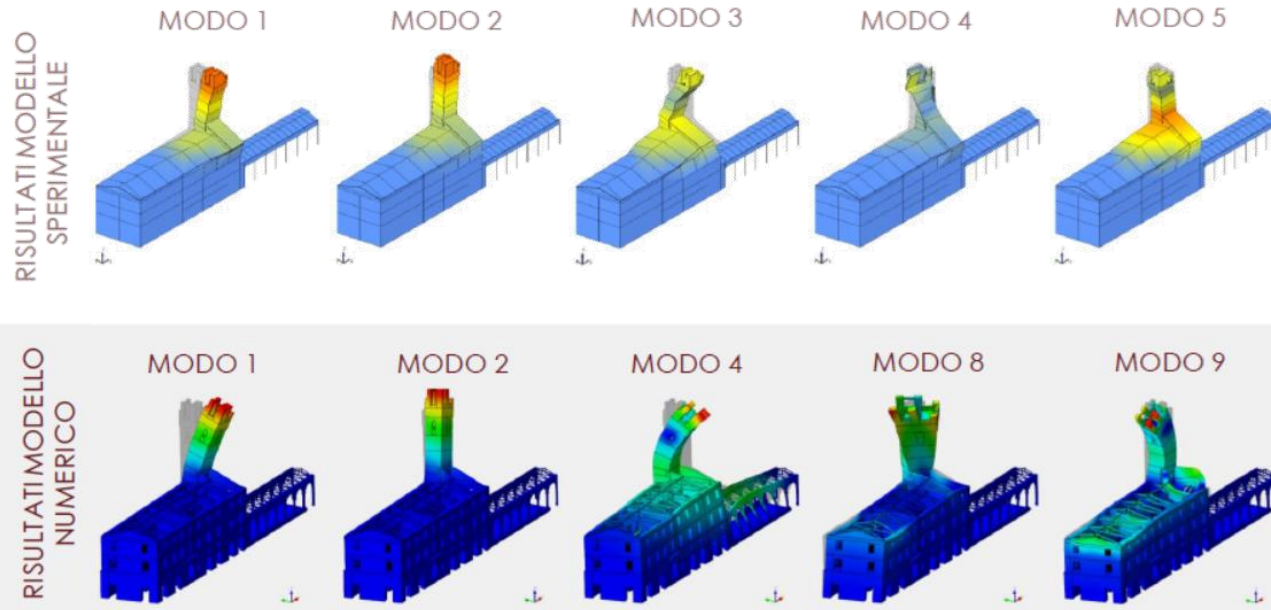
MODO 4
Distorcente



MODO 5
Flessionale
accoppiato

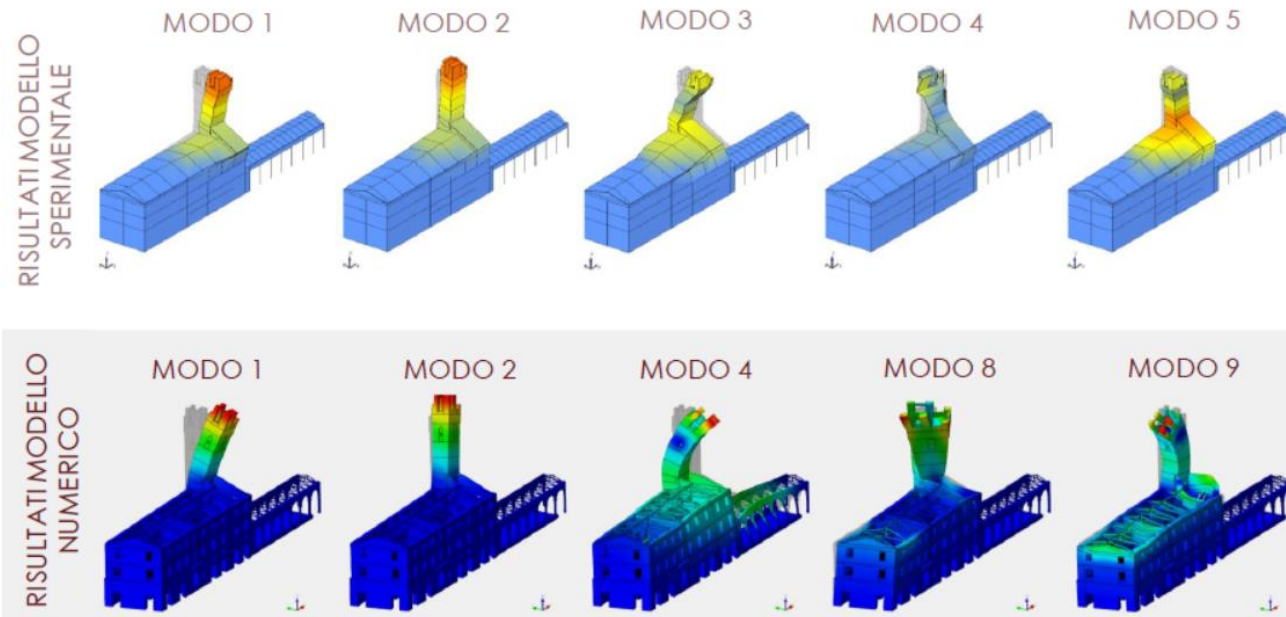


Confronto



- Forme modali coincidenti
- Differenza percentuale in frequenza minima nel terzo, quarto e quinto modo
- Divergenza in frequenza al primo e al secondo modo: i materiali assegnati alla torre sono meno rigidi di quelli che realmente la compongono

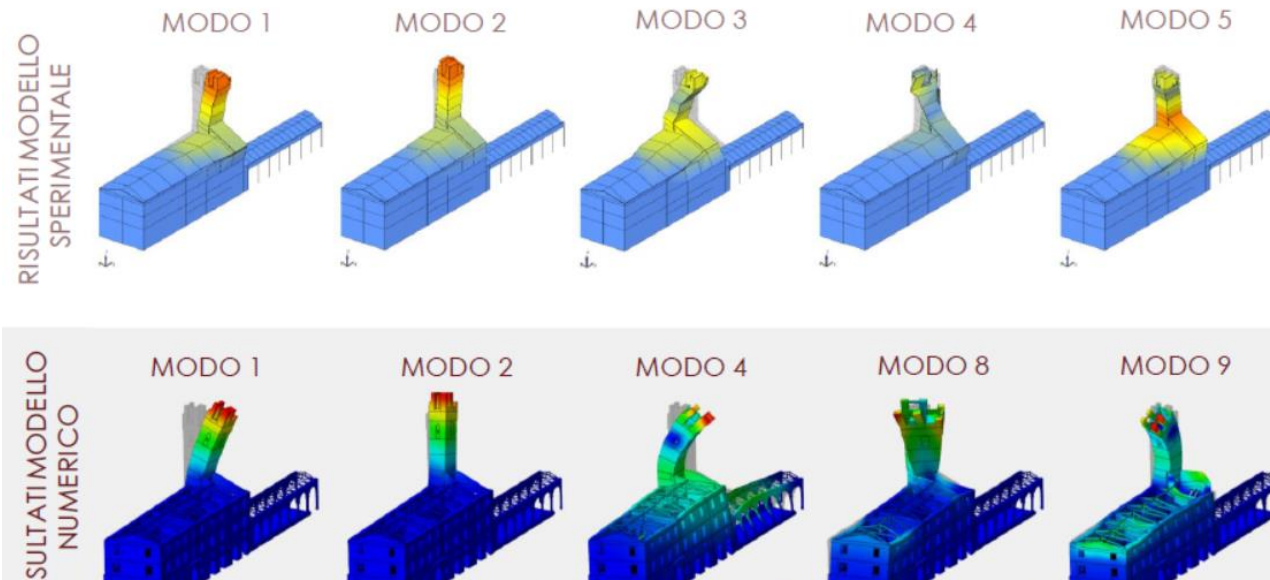
Calibrazione: step 1



- Incremento moduli elastici di alcune parti della torre
- Forme modali invariate
- Calibrazione anche del primo modo



Calibrazione: step 2

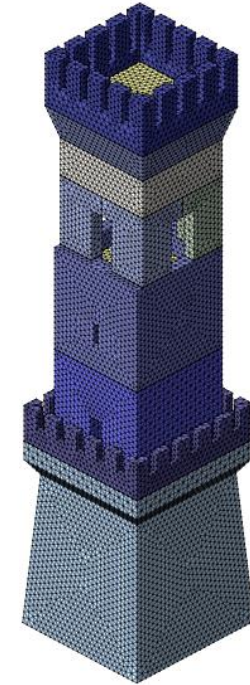


- Incremento moduli elastici di parti non soggette ad interventi recenti presupponendo che abbiano maggiore rigidità
- Calibrazione di tutti i modi, sia in frequenze che in forme modali

	MODELLO SPERIMENTALE				
MAC	MODO 1	MODO 2	MODO 3	MODO 4	MODO 5

Casi studio

TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

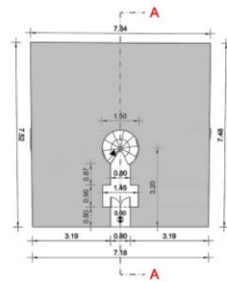


TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

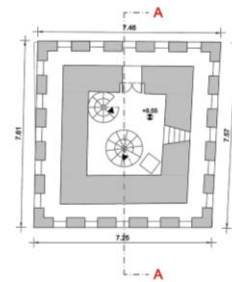
Casi studio

TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

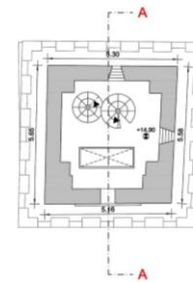
Rilievo



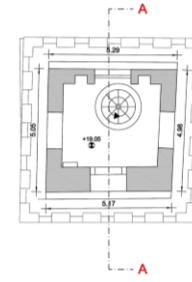
PIANTA PIANO TERRA
(base della torre)



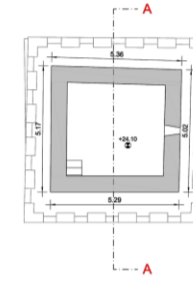
PIANTA PIANO PRIMO
(prima merlatura)



PIANTA PIANO SECONDO
(meccanismo dell'orologio)



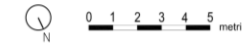
PIANTA PIANO TERZO
(vano campana)



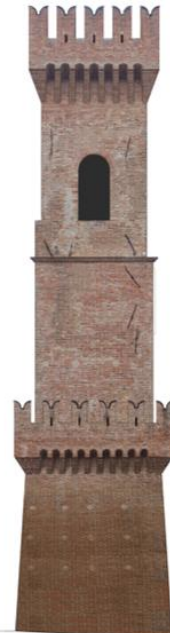
PIANTA PIANO QUARTO
(base della torre)



PIANTA PIANO QUINTO
(merlatura sommità della torre)



PROSPETTO NORD-EST



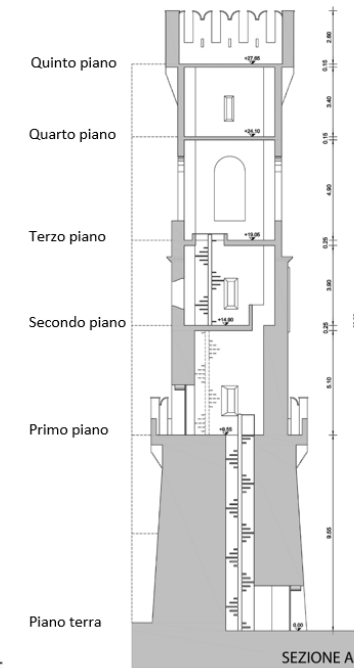
PROSPETTO SUD-EST



PROSPETTO SUD-OVEST

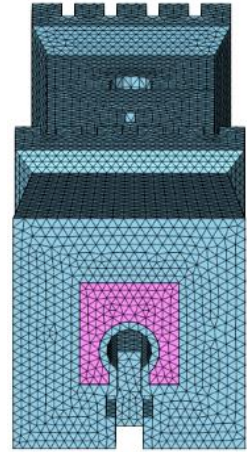
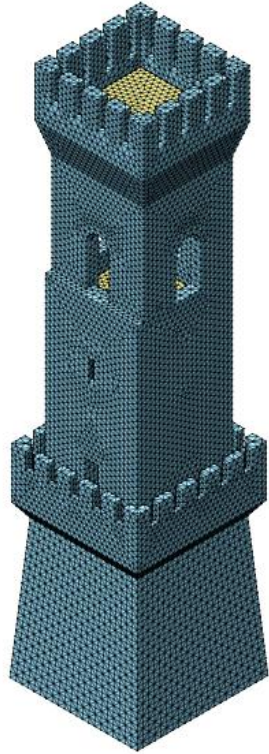


PROSPETTO NORD-OVEST

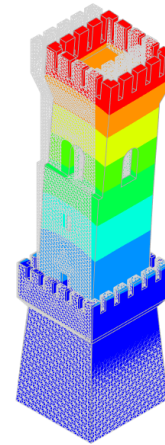


SEZIONE A-A

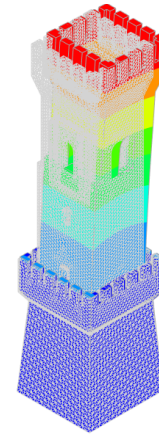
Modello numerico (FEM)



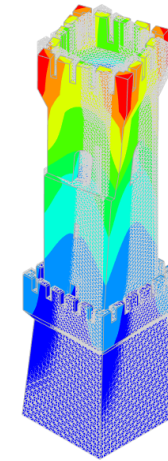
● **Filling**
 $E = 1100 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0.20$
 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$



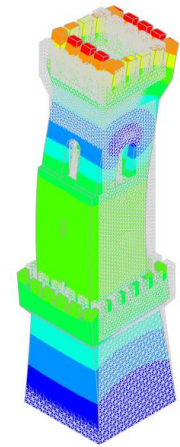
Modo 1
 1.607Hz



Modo 2
 1.632Hz



Modo 3
 5.192Hz



Modo 4
 6.025Hz

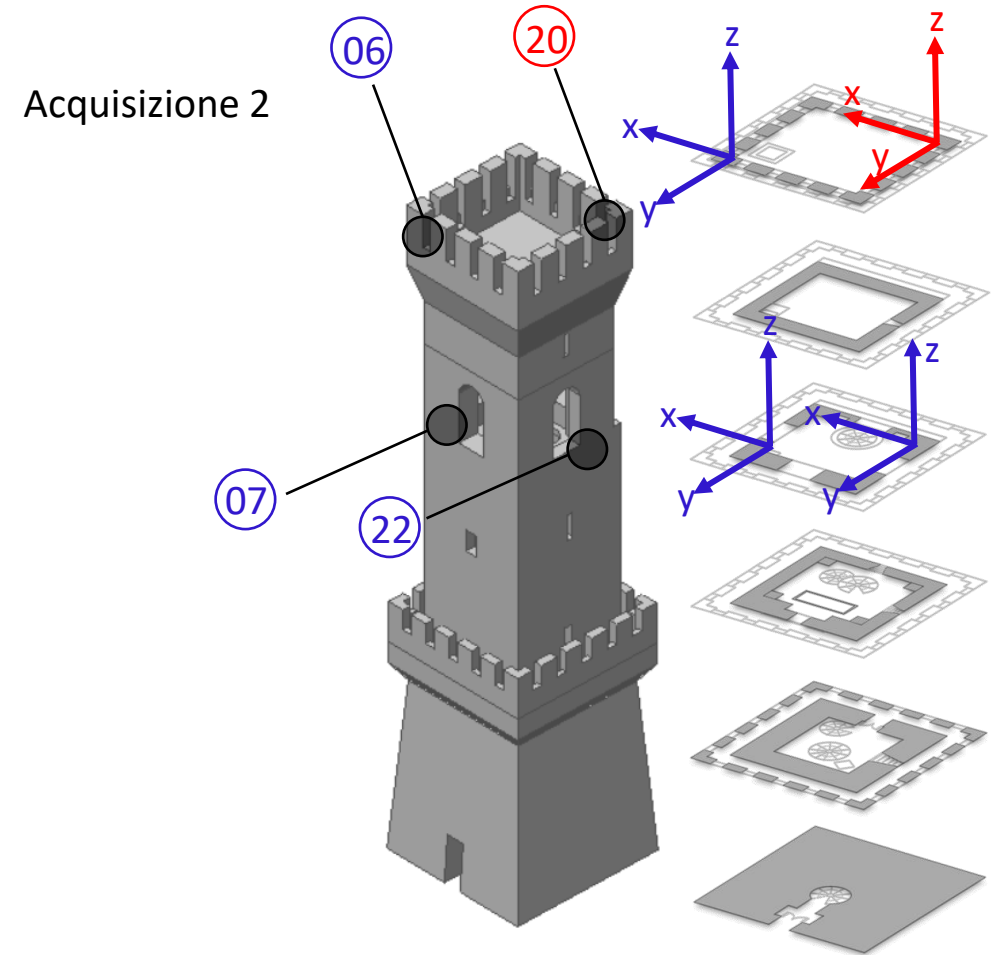
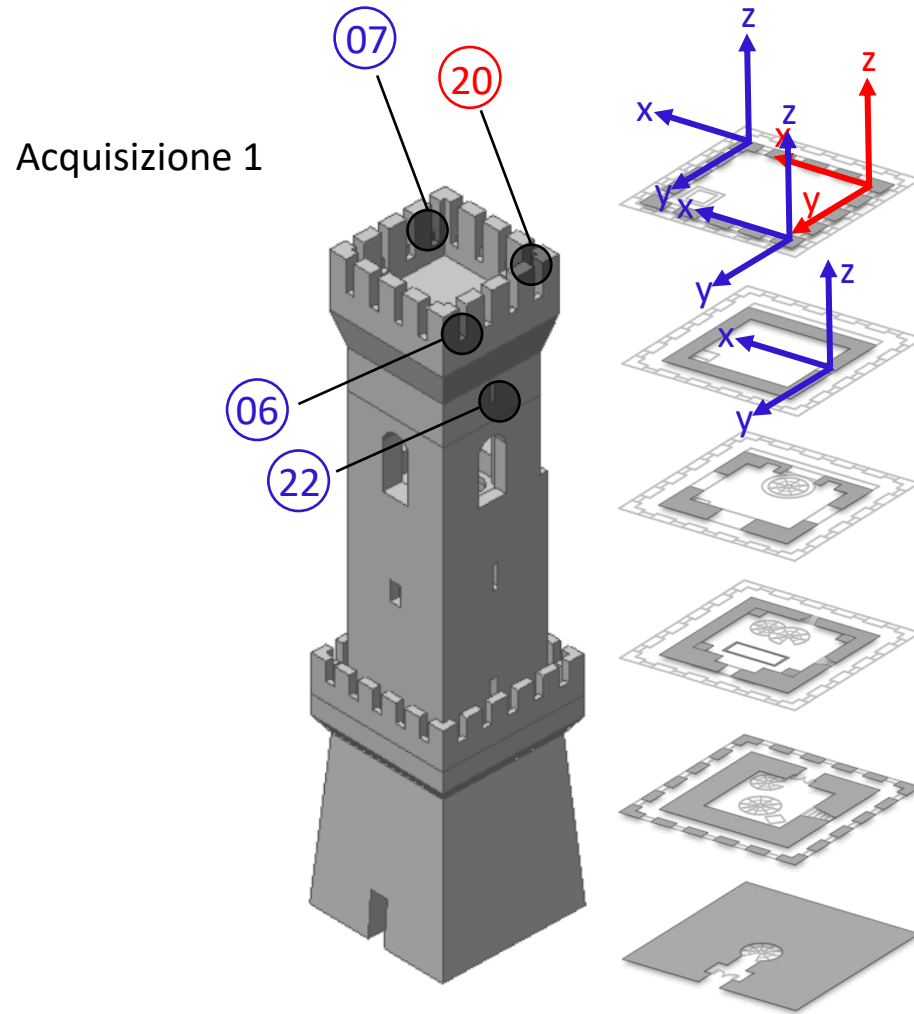
● **Concrete**
 $E = 30000 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0.20$
 $\gamma = 25 \text{ kN/m}^3$

● **Masonry**
 $E = 1800 \text{ N/mm}^2$
 $\nu = 0.20$
 $\gamma = 18 \text{ kN/m}^3$

Casi studio

TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

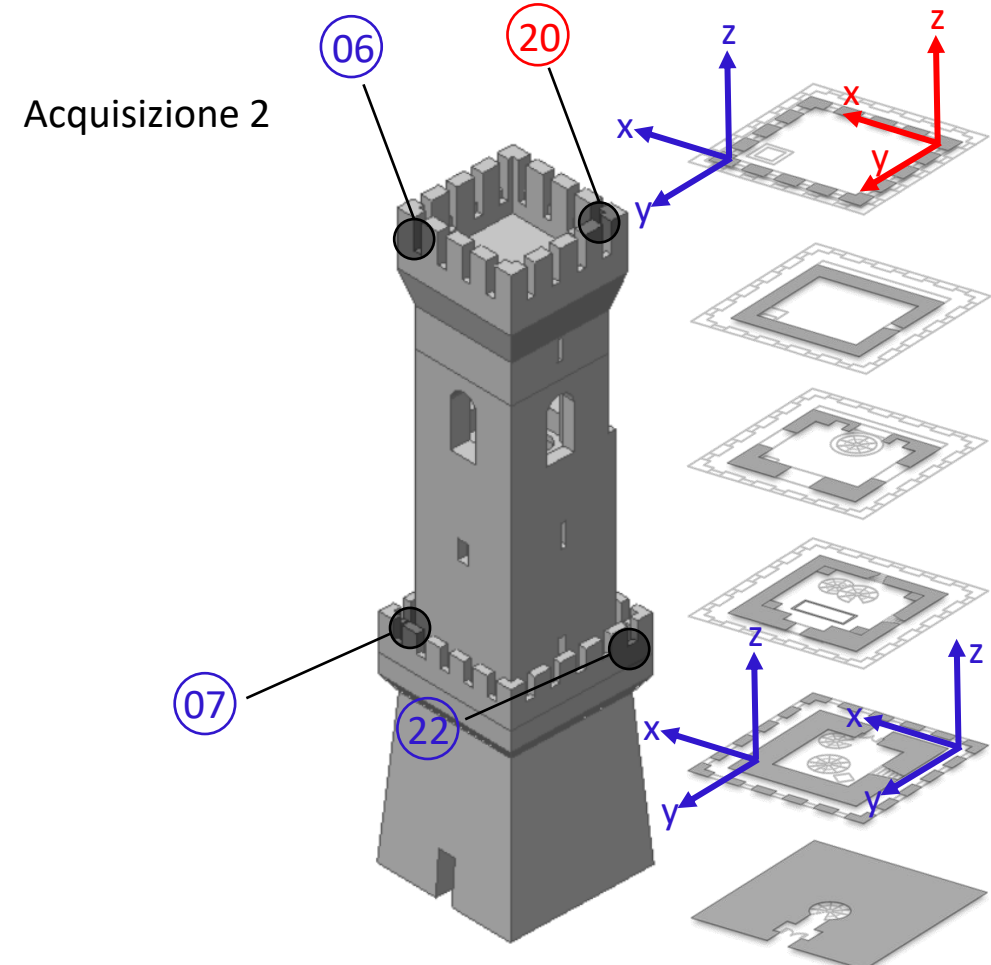
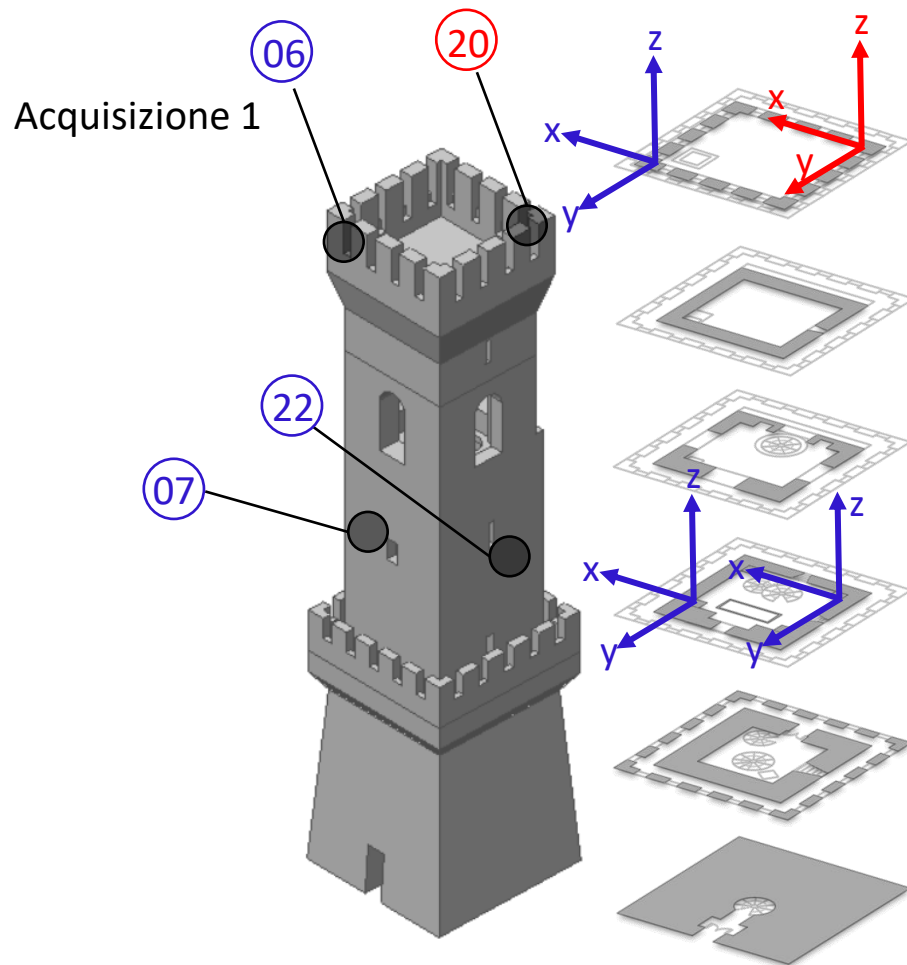
4 Acquisizioni: 4 sensori, 2 in sommità di cui 1 sempre fisso e 1 spostano nella seconda misurazione
 Eseguite due campagne di misura: 29 giugno 2018 e 22 febbraio 2019 mantenendo lo stesso layout



Casi studio

TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

4 Acquisizioni: 4 sensori, 2 in sommità di cui 1 sempre fisso e 1 spostano nella seconda misurazione
 Eseguite due campagne di misura: 29 giugno 2018 e 22 febbraio 2019 mantenendo lo stesso layout



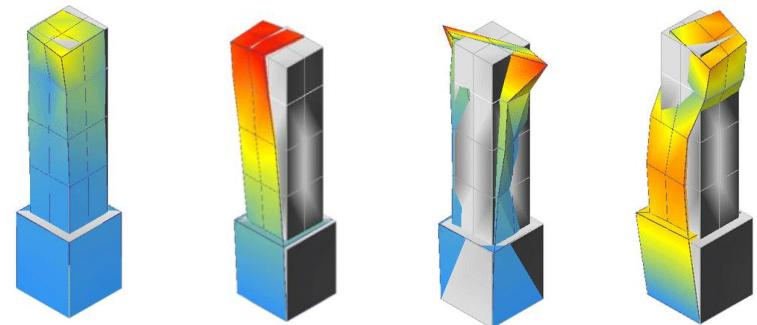
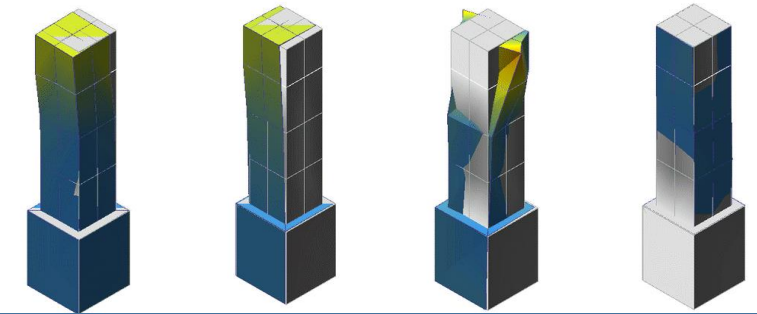
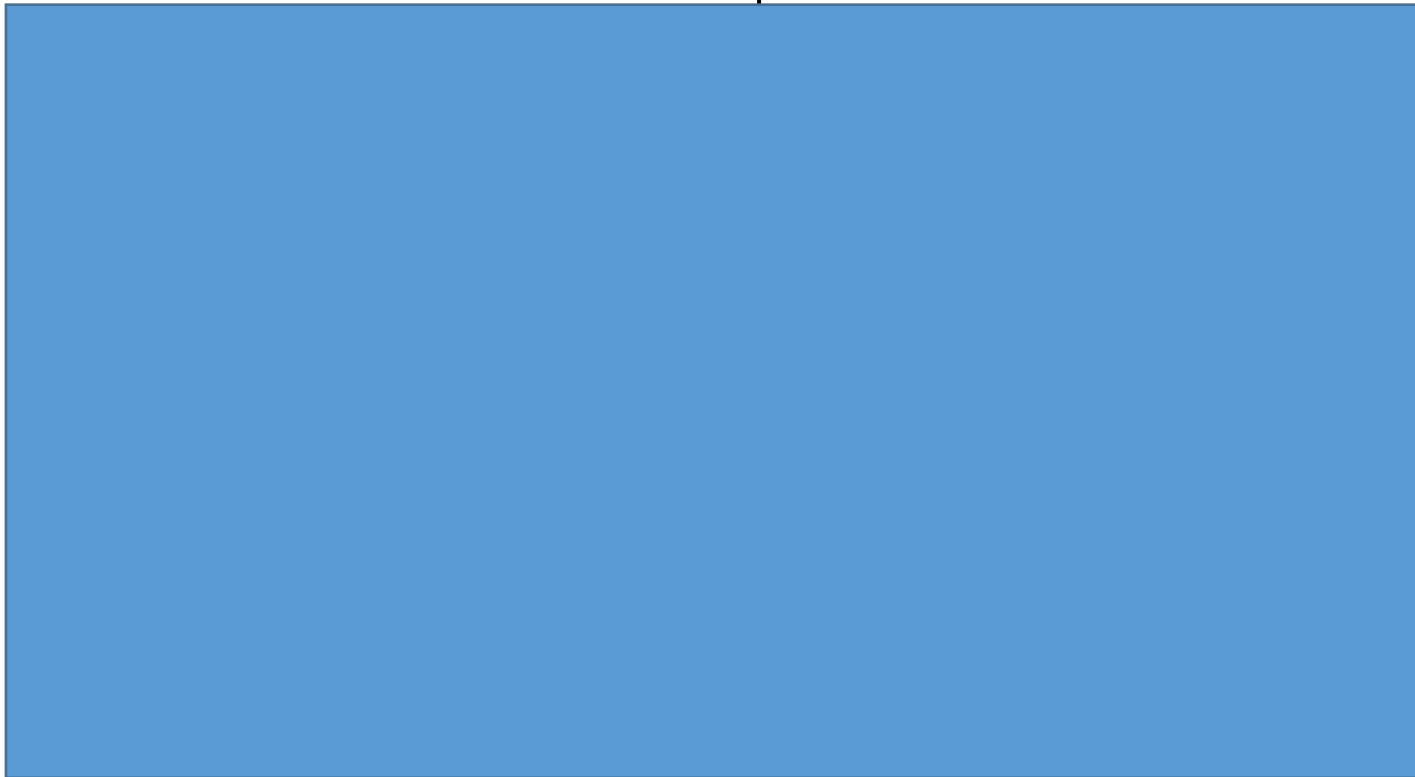
Casi studio

TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

Identificazione dinamica

Analisi nel dominio delle
frequenze (EFDD)

Analisi nel dominio
del tempo (SSI)

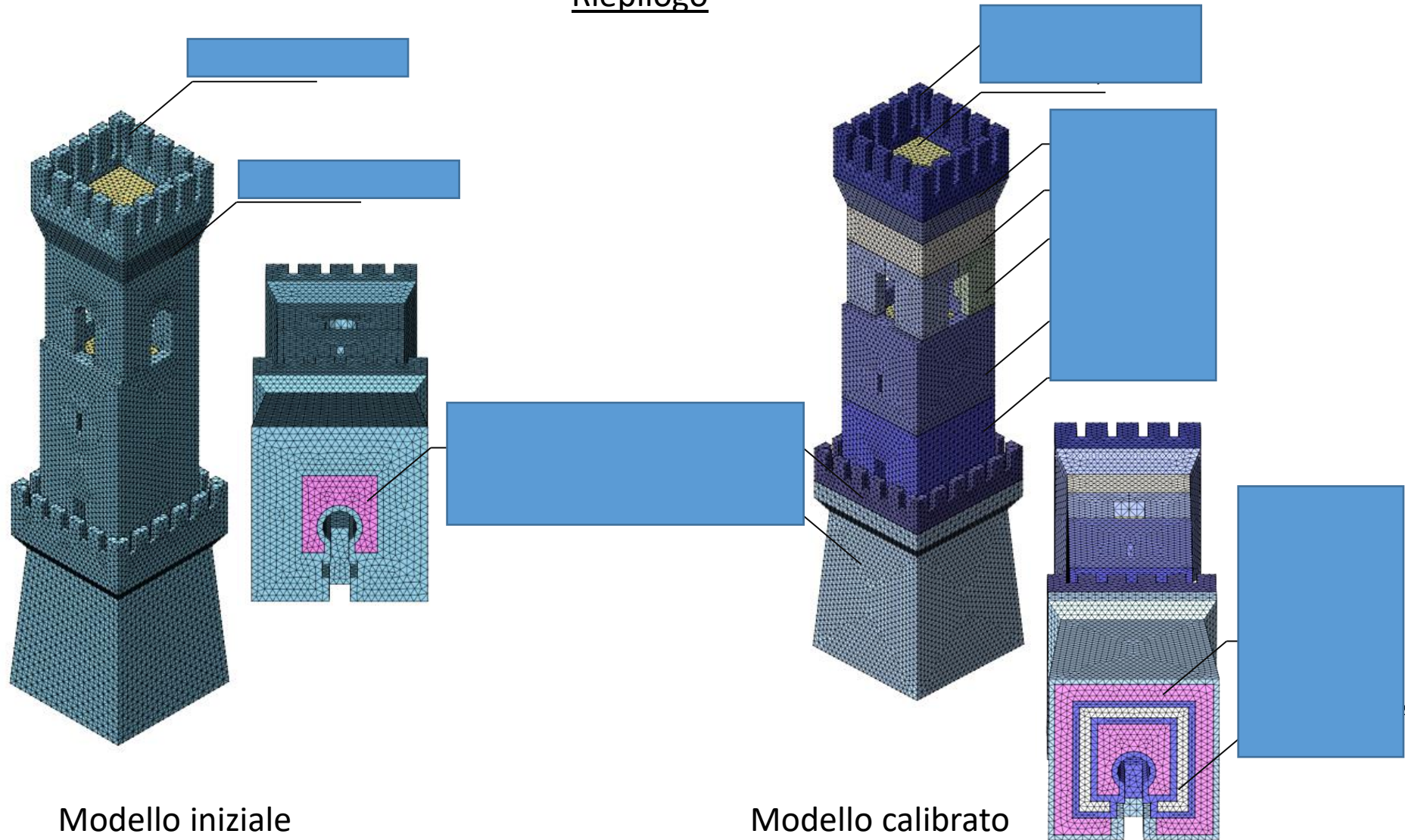


- Risultati notevolmente simili, sia tra i due metodi, sia tra le due misurazioni (piccole variazioni probabilmente dovute alle differenze condizioni di temperatura)
- Corrispondenza tra forme modali tra le due misurazioni

Casi studio

TORRE CIVICA DI OSTRA (AN)

Riepilogo



Modello iniziale

Modello calibrato

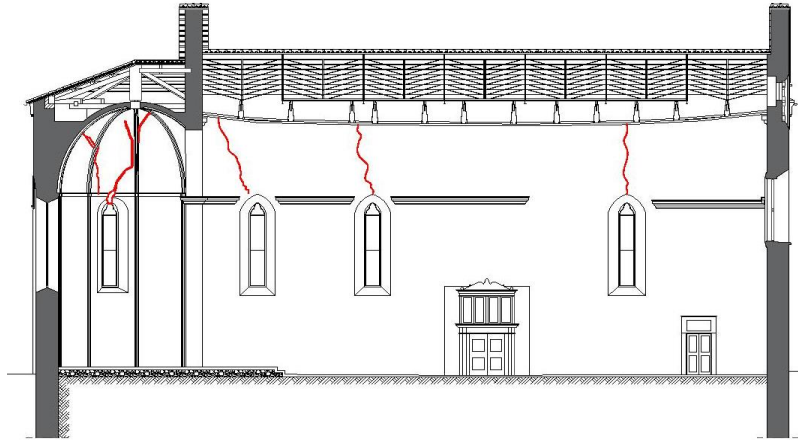


**COLLEGIATA DI SANTA MARIA
A VISSO (MC)**

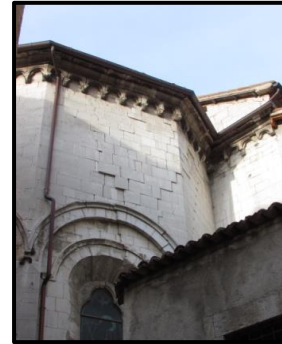
Casi studio

COLLEGIATA DI SANTA MARIA A VISSO (MC)

Quadro fessurativo



Abside – vista



Cupola Abside



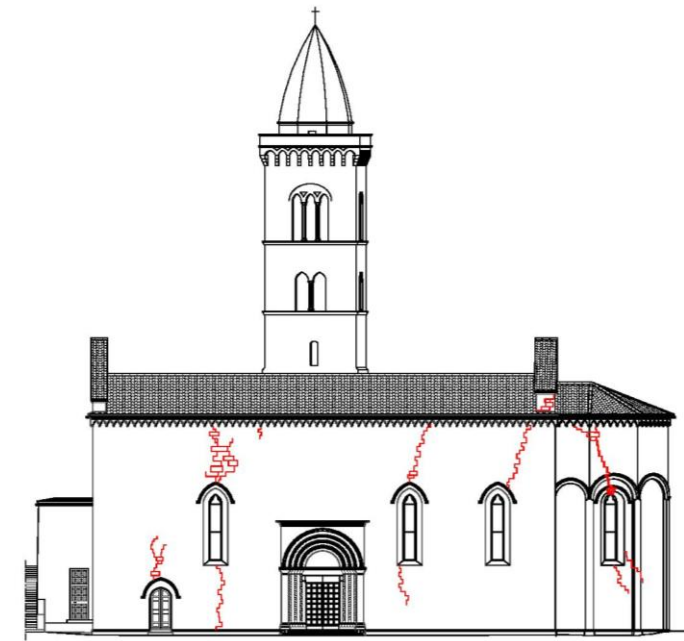
Fronte



Lesione passante Abside

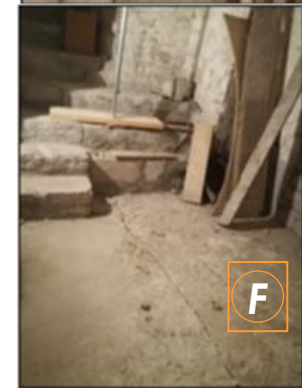
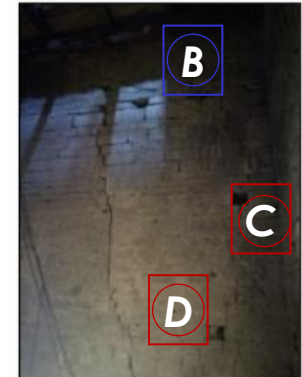
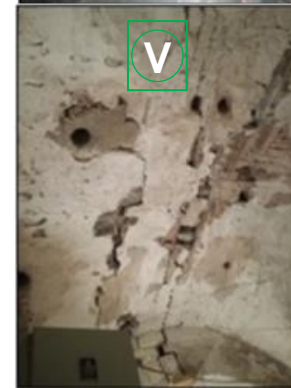
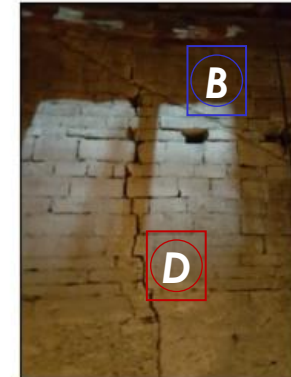
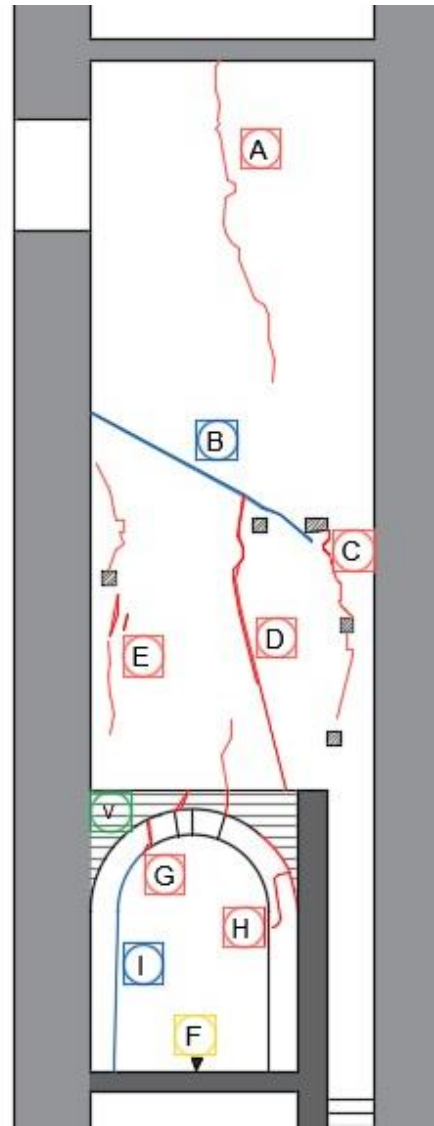
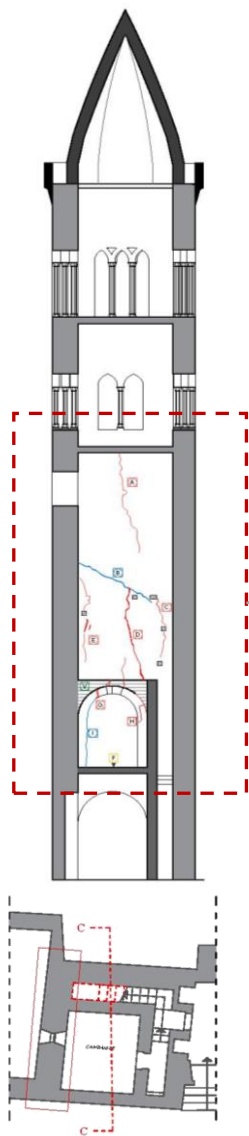


Lesioni passanti monofore – vista interna

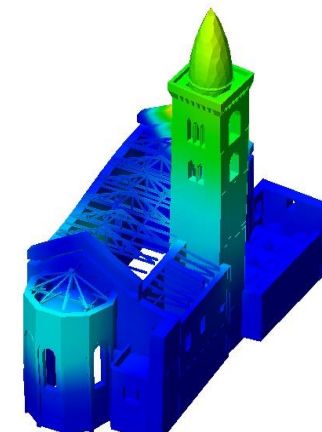
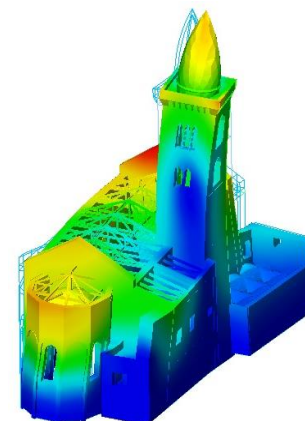
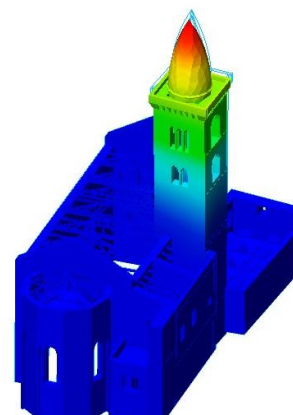
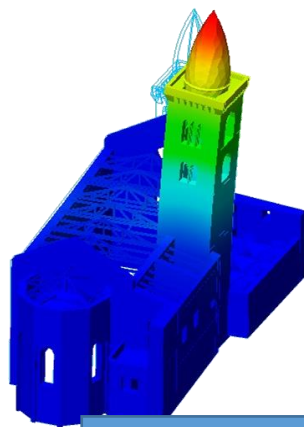


Casi studio

COLLEGIATA DI SANTA MARIA A VISSO (MC)



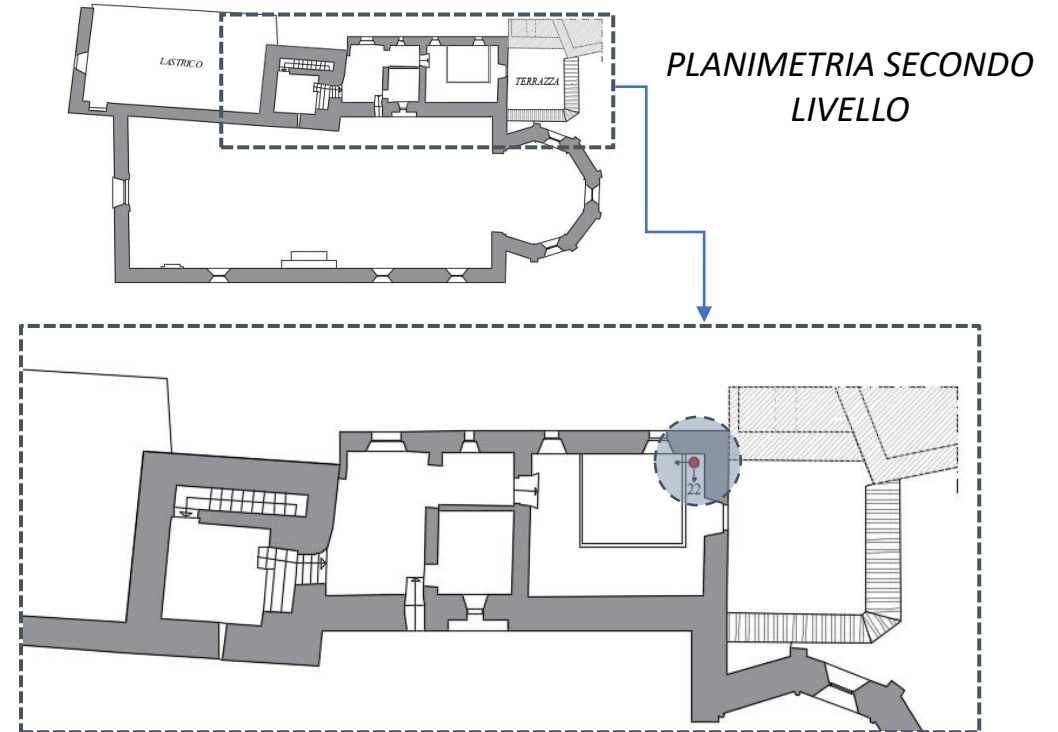
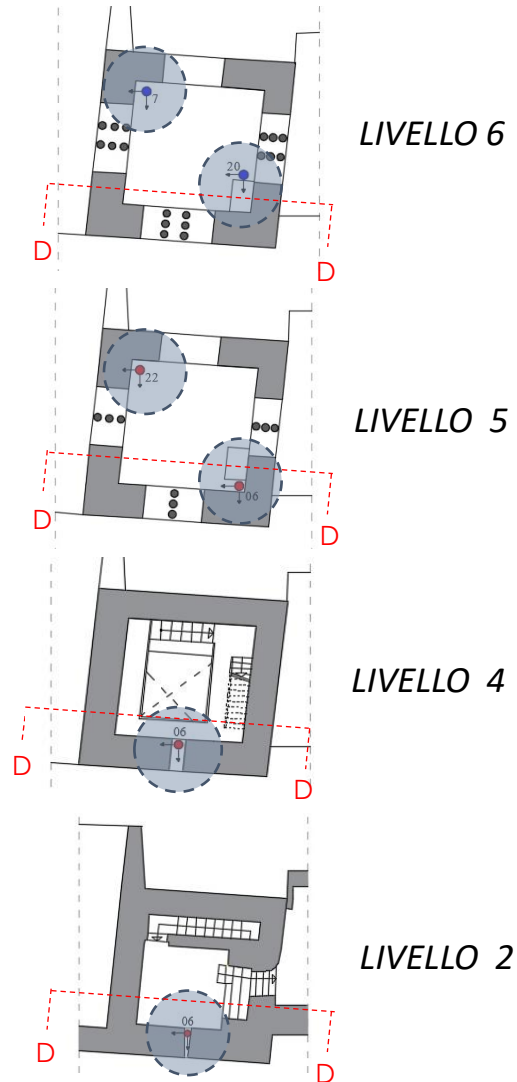
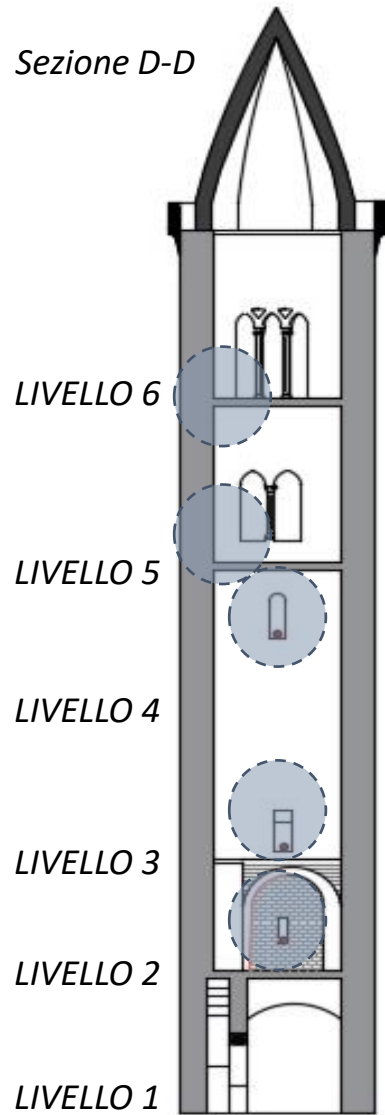
Modello numerico (FEM)



Casi studio

COLLEGIATA DI SANTA MARIA A VISSO (MC)

5 Acquisizioni: 4 sensori, di cui due fissi al livello 6 della torre



- un sensore fisso al livello 5 per le prime due acquisizioni e poi spostato
- un sensore fisso al livello 5 per le prime quattro acquisizioni e poi spostato nell'ultima nel locale sopra la sacrestia, al secondo livello

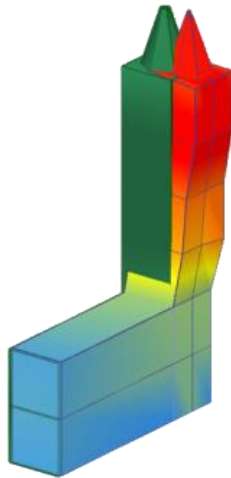
Casi studio

COLLEGIATA DI SANTA MARIA A VISSO (MC)

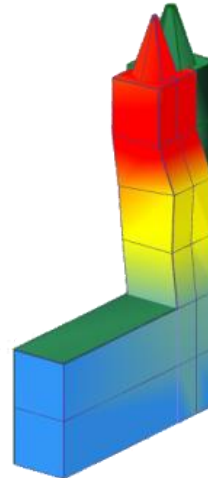
Modello sperimentale

Torre: elemento su cui si è posta l'attenzione per l'attività di monitoraggio.
Identificazione con metodo SSI

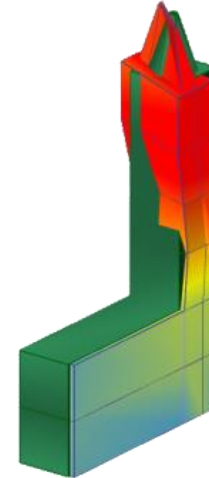
Modo 1



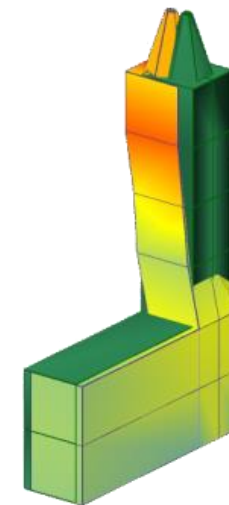
Modo 2



Modo 3



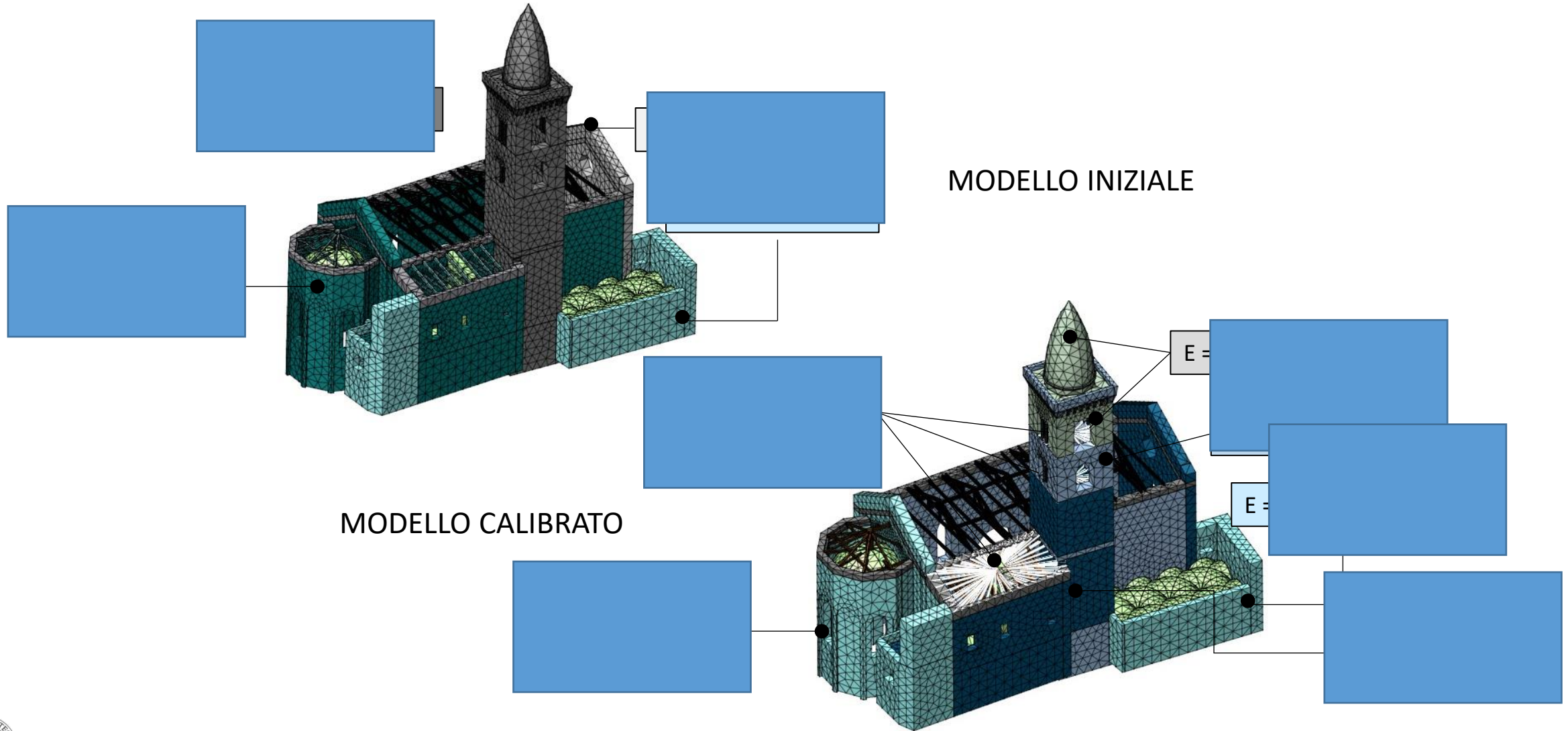
Modo 4



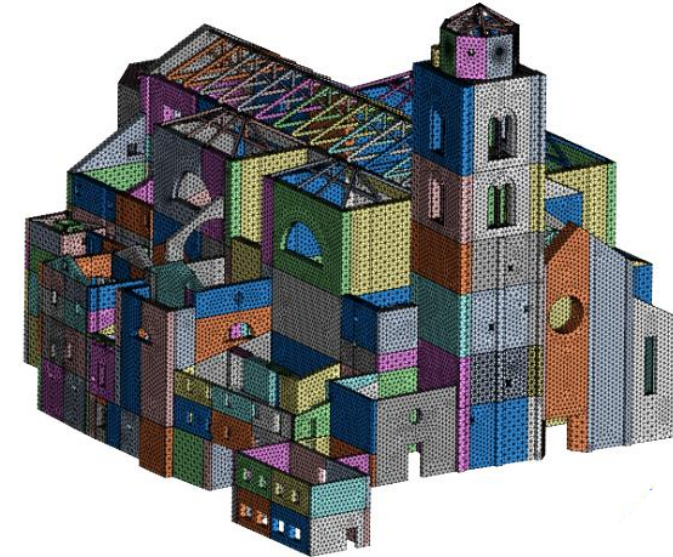
Casi studio

COLLEGIATA DI SANTA MARIA A VISSO (MC)

Riepilogo

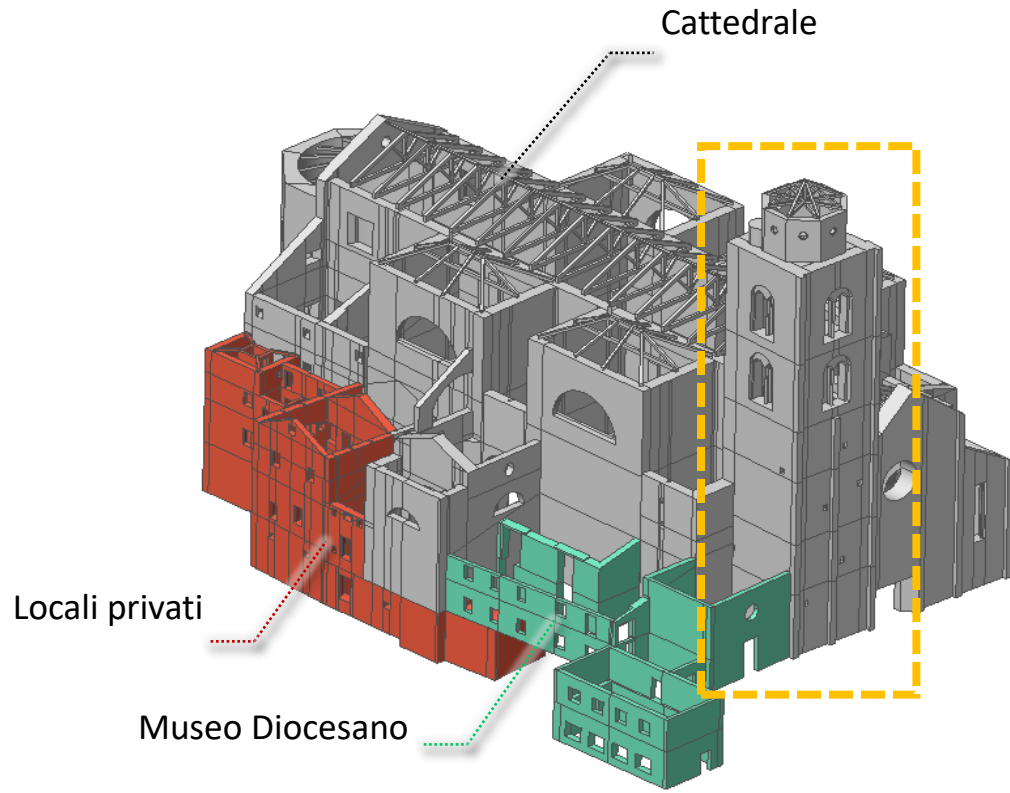


CATTEDRALE METROPOLITANA DI FERMO (FM)



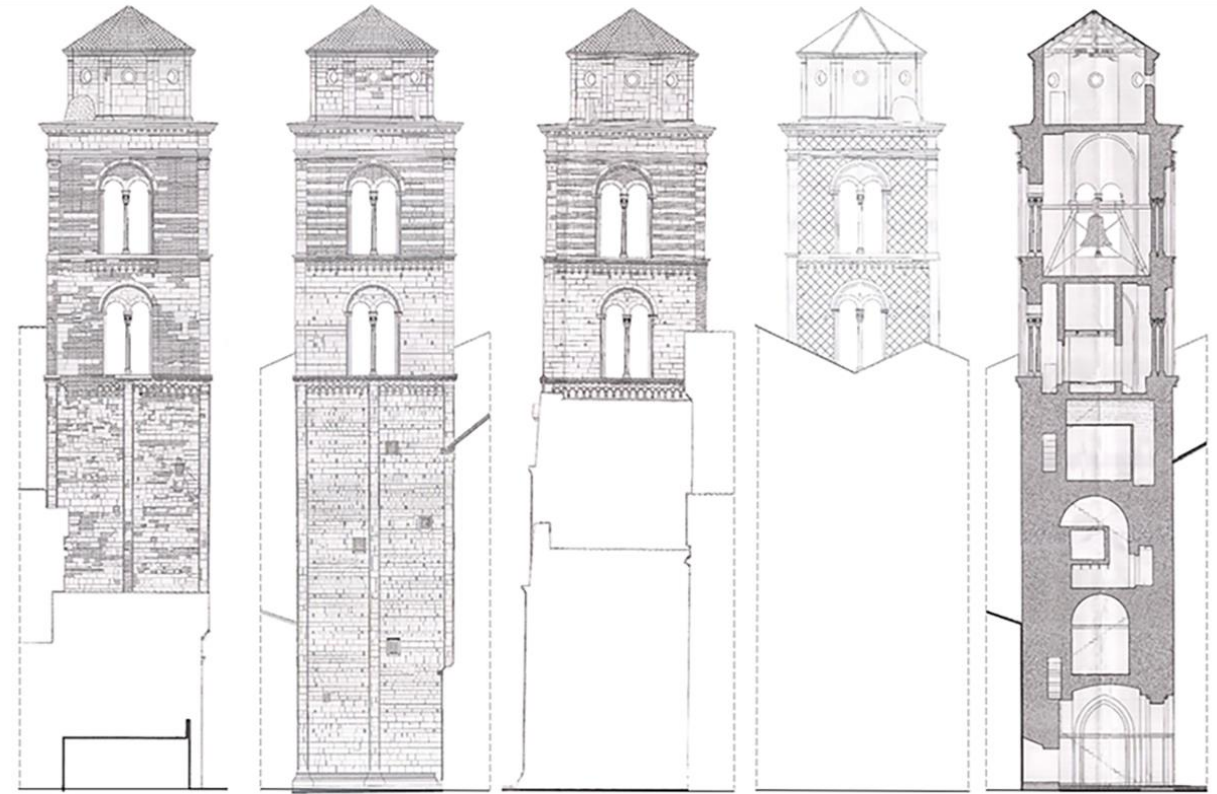
CATTEDRALE METROPOLITANA DI FERMO (FM)

Article: Bianconi, F.; Salachoris, G.P.; Clementi, F.; Lenci, S. A Genetic Algorithm Procedure for the Automatic Updating of FEM Based on Ambient Vibration Tests. *Sensors* **2020**, *20*, 3315
<https://doi.org/10.3390/s20113315>



Oggetto del monitoraggio: torre campanaria

Rilievo



North front

West front

Sud front

East front

Section X-X



Ground floor

1st floor

2nd floor

3rd floor

4th floor

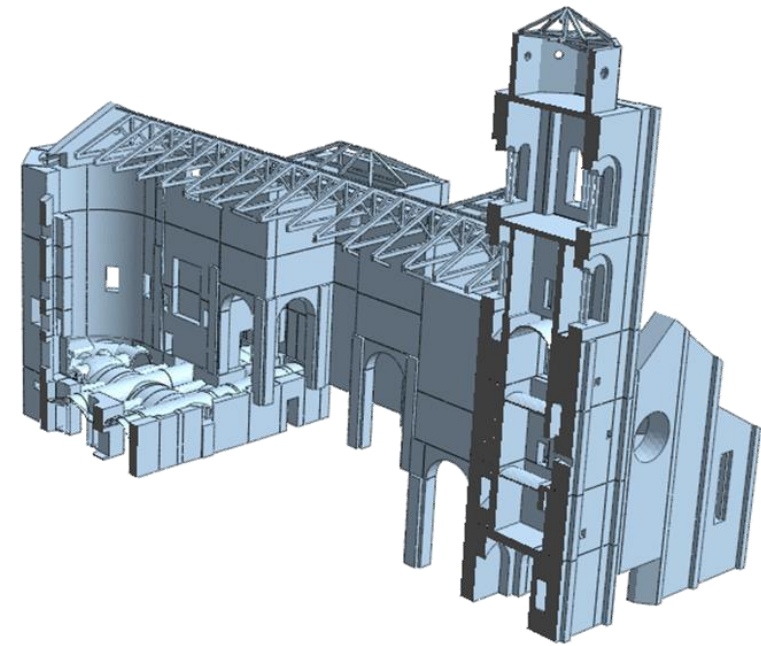
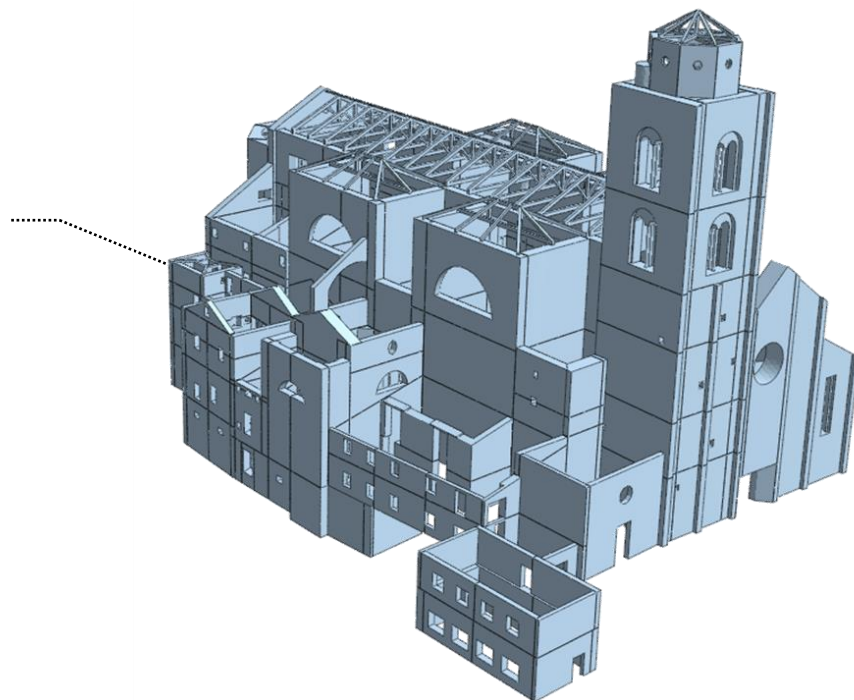
5th floor

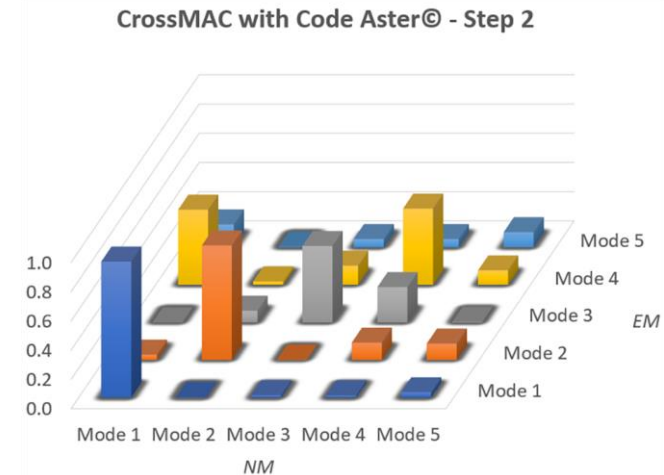
6th floor

Modello numerico (FEM)

- La struttura è stata modellata nella sua interezza per rispettare le reali condizioni al contorno della torre campanaria (corpo chiesa, cripta, museo diocesano e locali privati)
- Inizialmente è stato impostato un unico modulo elastico per tutto il modello (mattoni pieni e malta di calce)

$E = 1800 \text{ Mpa}$





Confronto risultati con calibrazione manuale:

- La seconda e la quarta frequenza risultano migliorate; la prima ha aumentato l'errore percentuale superando il 5%, ma restando lontana da valori troppo elevati; la quinta frequenza ha mantenuto all'incirca lo stesso valore di Δf , mentre la terza frequenza presenta uno scostamento sostanziale
- CrossMAC: migliorato per tutti i modi, ma il quinto resta comunque molto basso

Valutazione finale

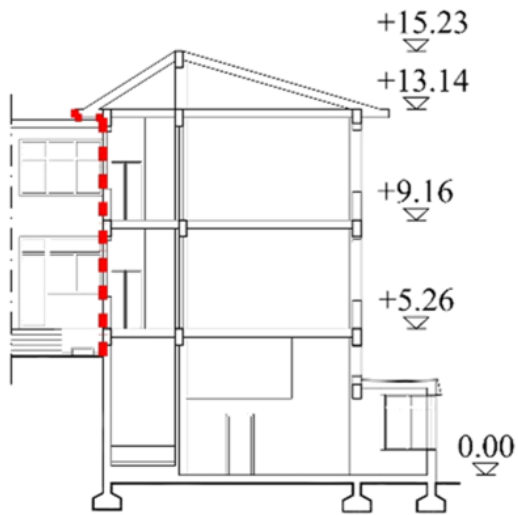
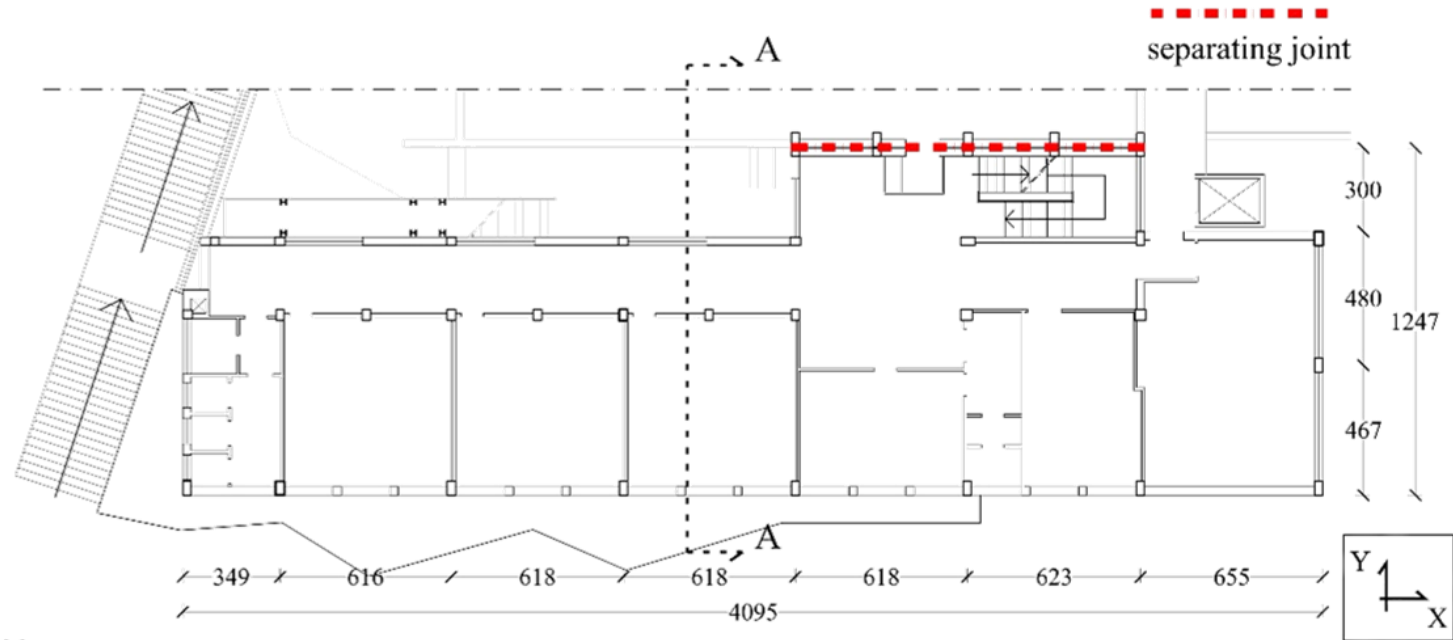
La calibrazione manuale ha restituito una migliore corrispondenza in termini di frequenze in quanto si vanno a modificare le porzioni di struttura necessarie al raggiungimento di un certo valore di frequenza. La calibrazione automatica ha invece restituito un'ottimizzazione del crossMAC (valutazione della somiglianza tra modi) un po' a discapito delle frequenze.



MIGLIORAMENTO SISMICO DELLA SCUOLA DI OSTRA VETERE (AN)

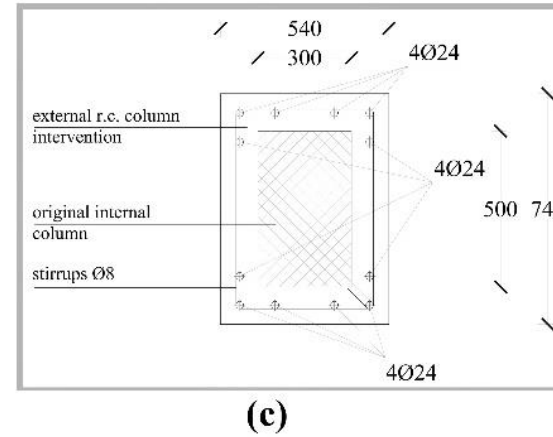
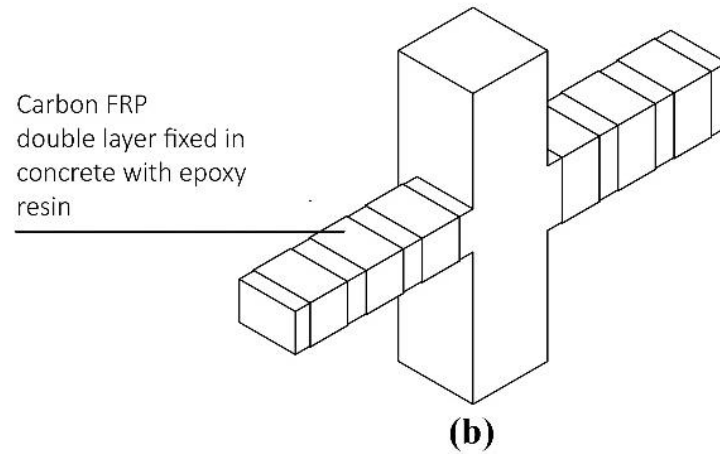
Casi studio

SCUOLA DI OSTRA VETERE (AN)



Casi studio

SCUOLA DI OSTRA VETERE (AN)



- Stiffness irregularity
- Poor and ineffective stirrups
- Deformable storeys
- Poor concrete quality

Casi studio

SCUOLA DI OSTRA VETERE (AN)



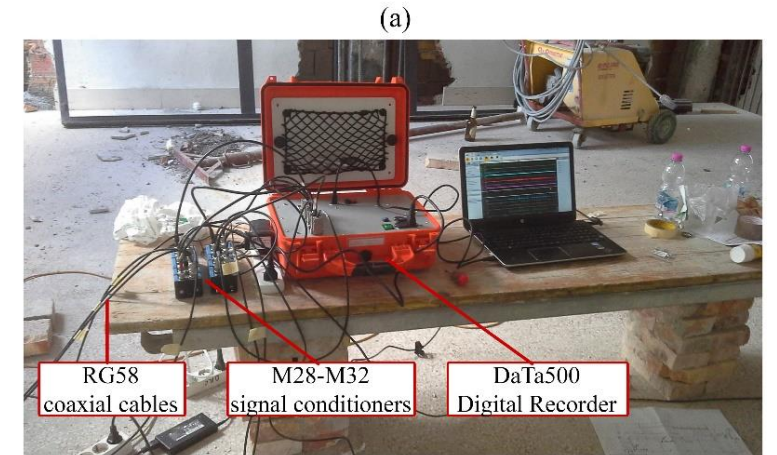
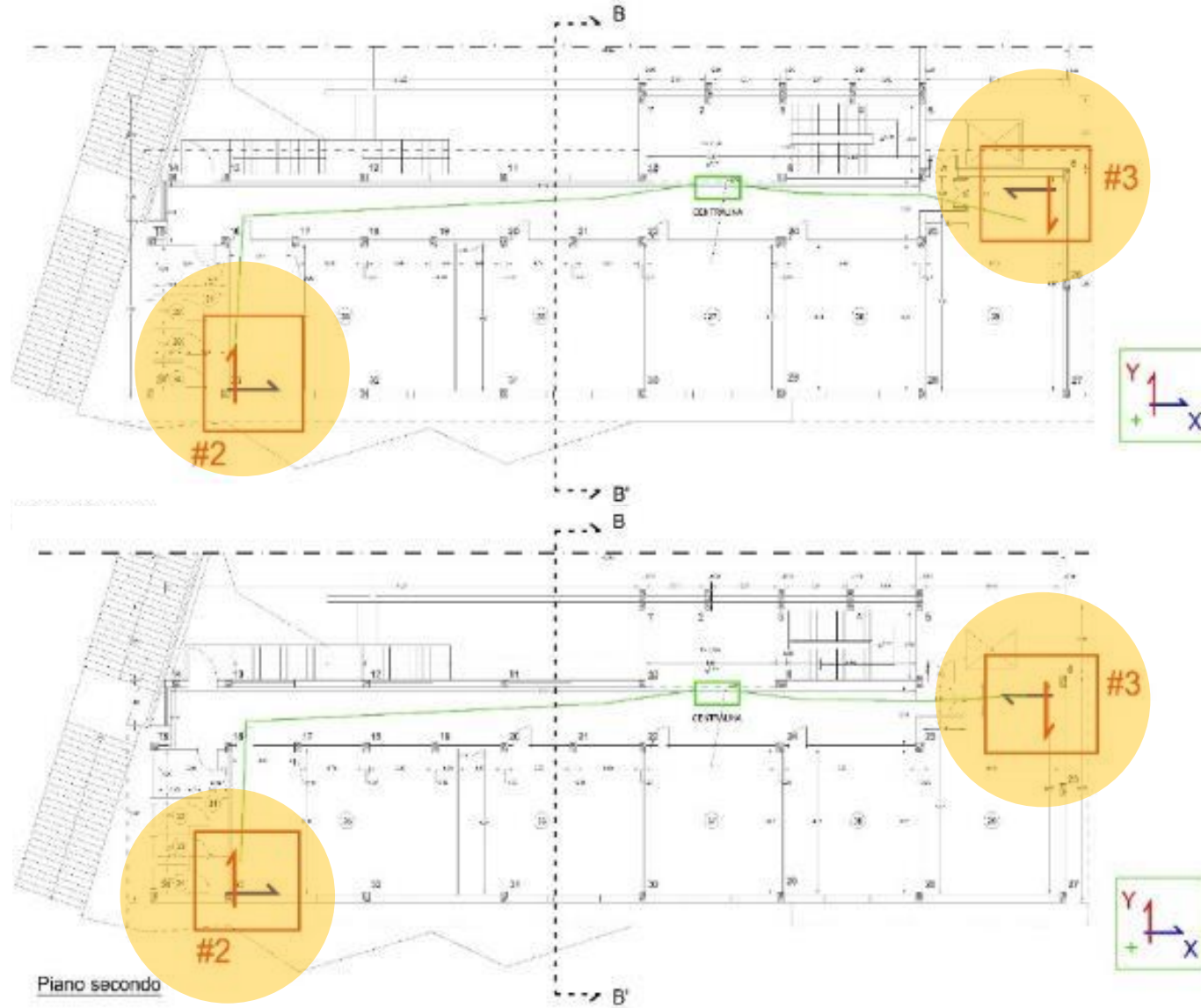
- original columns cross-sections were increased, using high resistance r.c.
- new longitudinal steel bars were introduced
- The distribution of stirrups was made effective, particularly in column-beam nodes
- Each beam node was equipped with Fiber Reinforced Polymers (FRP)

Objective of the present work:

Track the evolution of structural dynamic behavior across (before, during and after) the interventions.

Casi studio

SCUOLA DI OSTRA VETERE (AN)



(b)



(c)

4 Ambient Vibration Survey (AVS) have been performed:

- **AVS n.1**
17th March, 2015
Before beginning of the works
- **AVS n.2**
15th October, 2015
All the connection between RC elements and infill panels were removed, so there was no interaction between them
- **AVS n.3**
26th January, 2016
All the cross sections of the columns are enlarged
- **AVS n.4**
22nd April, 2016
After the end of the retrofiting works

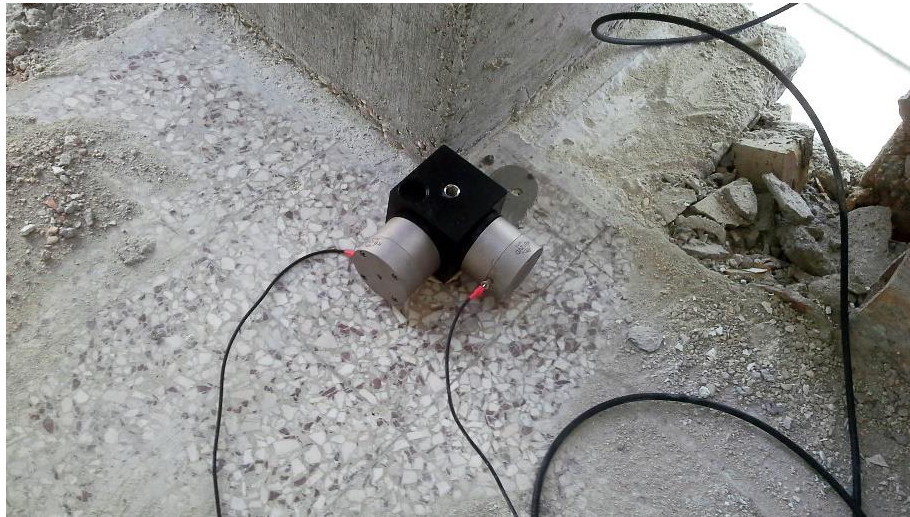
AMBIENT VIBRATION TESTS_AV51



AMBIENT VIBRATION TESTS_AV52



AMBIENT VIBRATION TESTS_AV53

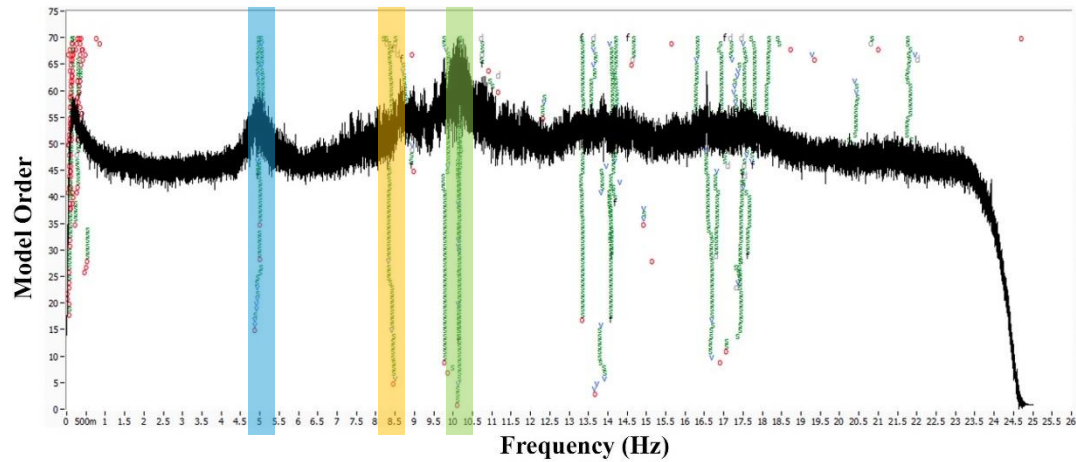


AMBIENT VIBRATION TESTS_AV53



ESTIMATION OF STRUCTURAL DYNAMIC PARAMETERS

Dynamic Parameters Extraction: Stabilization Diagrams



Tracking of Structural Dynamic Evolution

?



Periodic SHM

AVS n.1

17th March, 2015

AVS n.2

15th October, 2015

AVS n.3

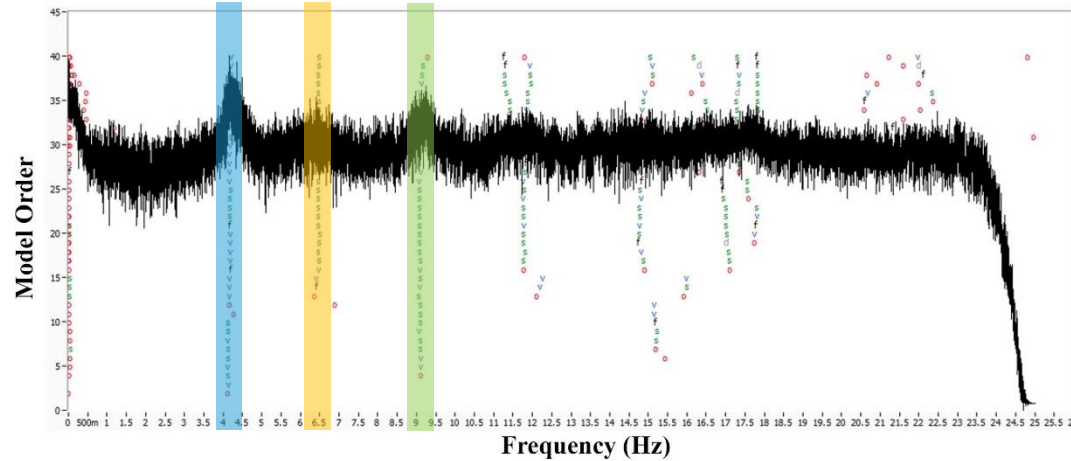
26th January, 2016

AVS n.4

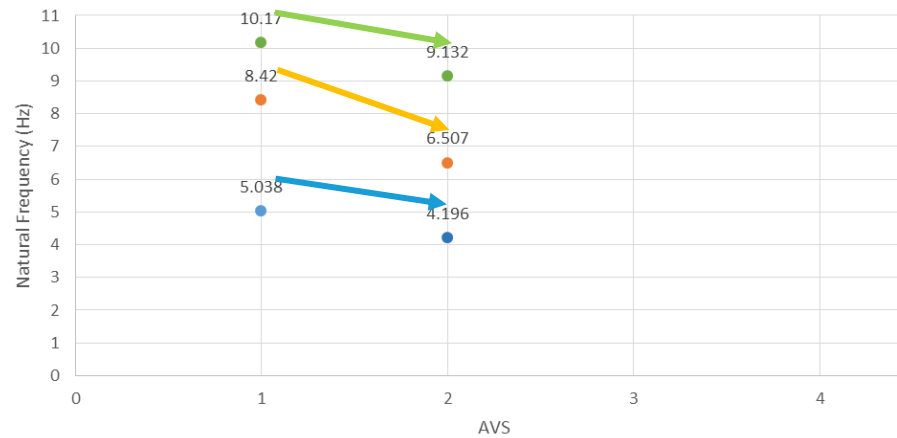
22nd April, 2016

ESTIMATION OF STRUCTURAL DYNAMIC PARAMETERS

Dynamic Parameters Extraction: Stabilization Diagrams



Tracking of Structural Dynamic Evolution

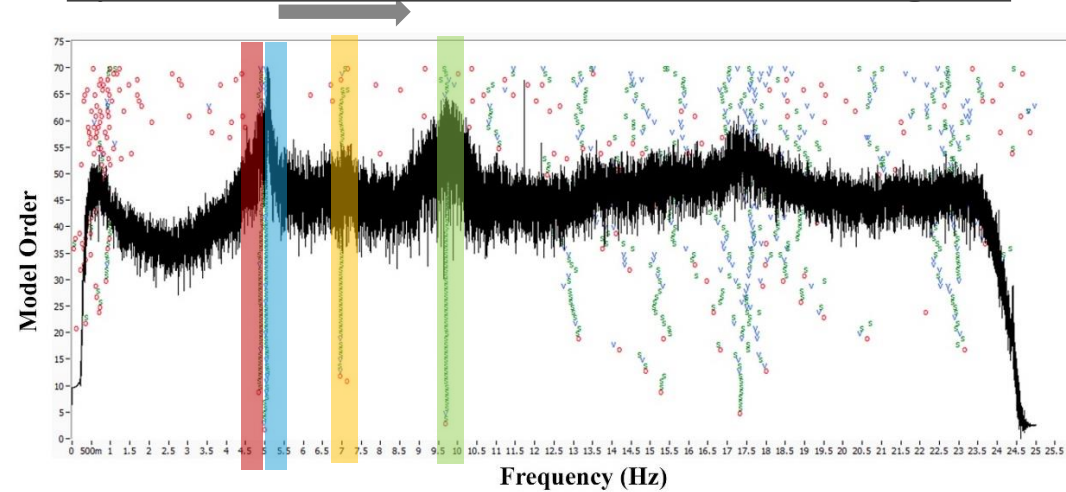


Periodic SHM

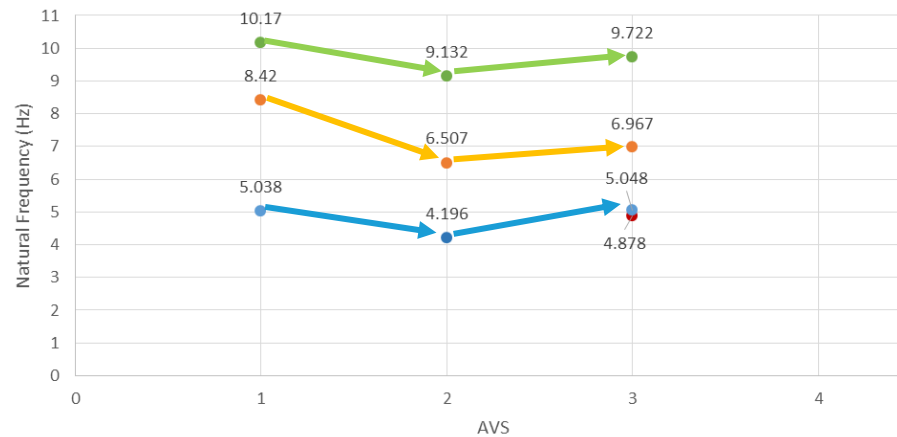
- AVS n.1
17th March, 2015
- AVS n.2
15th October, 2015
- AVS n.3
26th January, 2016
- AVS n.4
22nd April, 2016

ESTIMATION OF STRUCTURAL DYNAMIC PARAMETERS

Dynamic Parameters Extraction: Stabilization Diagrams



Tracking of Structural Dynamic Evolution

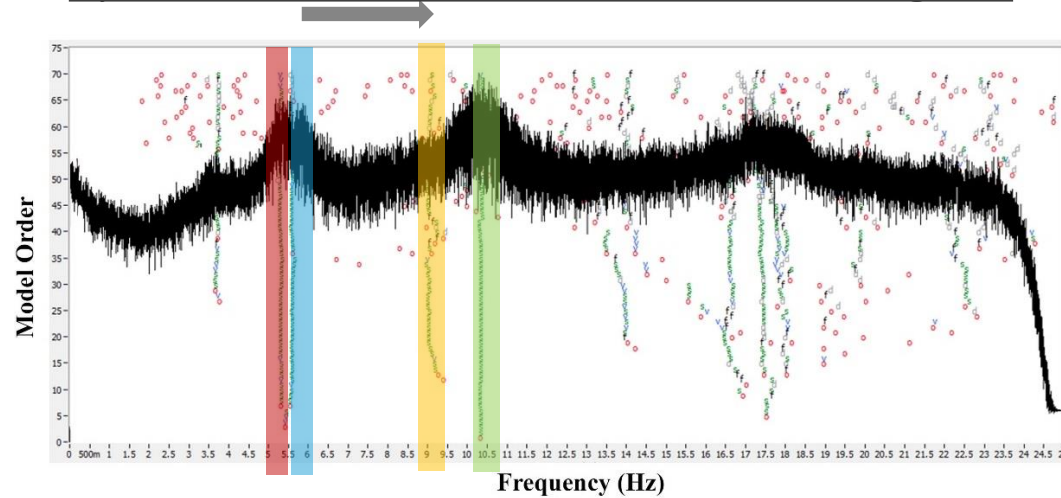


Periodic SHM

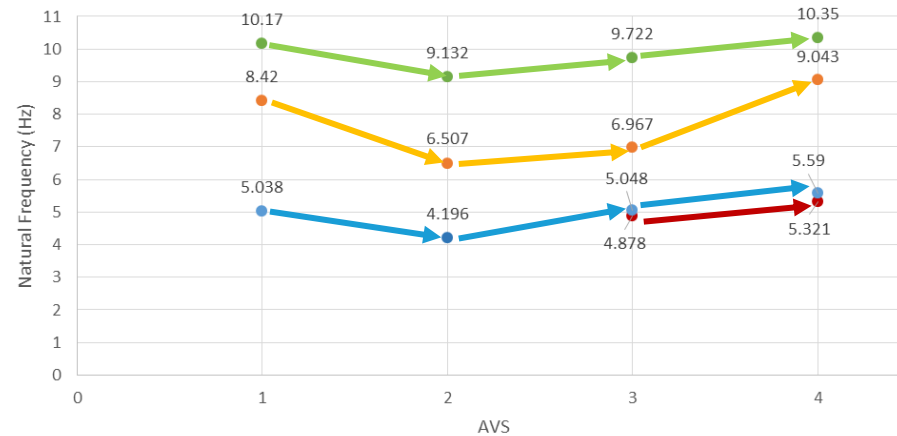
- AVS n.1
17th March, 2015
- AVS n.2
15th October, 2015
- AVS n.3
26th January, 2016
- AVS n.4
22nd April, 2016

ESTIMATION OF STRUCTURAL DYNAMIC PARAMETERS

Dynamic Parameters Extraction: Stabilization Diagrams



Tracking of Structural Dynamic Evolution

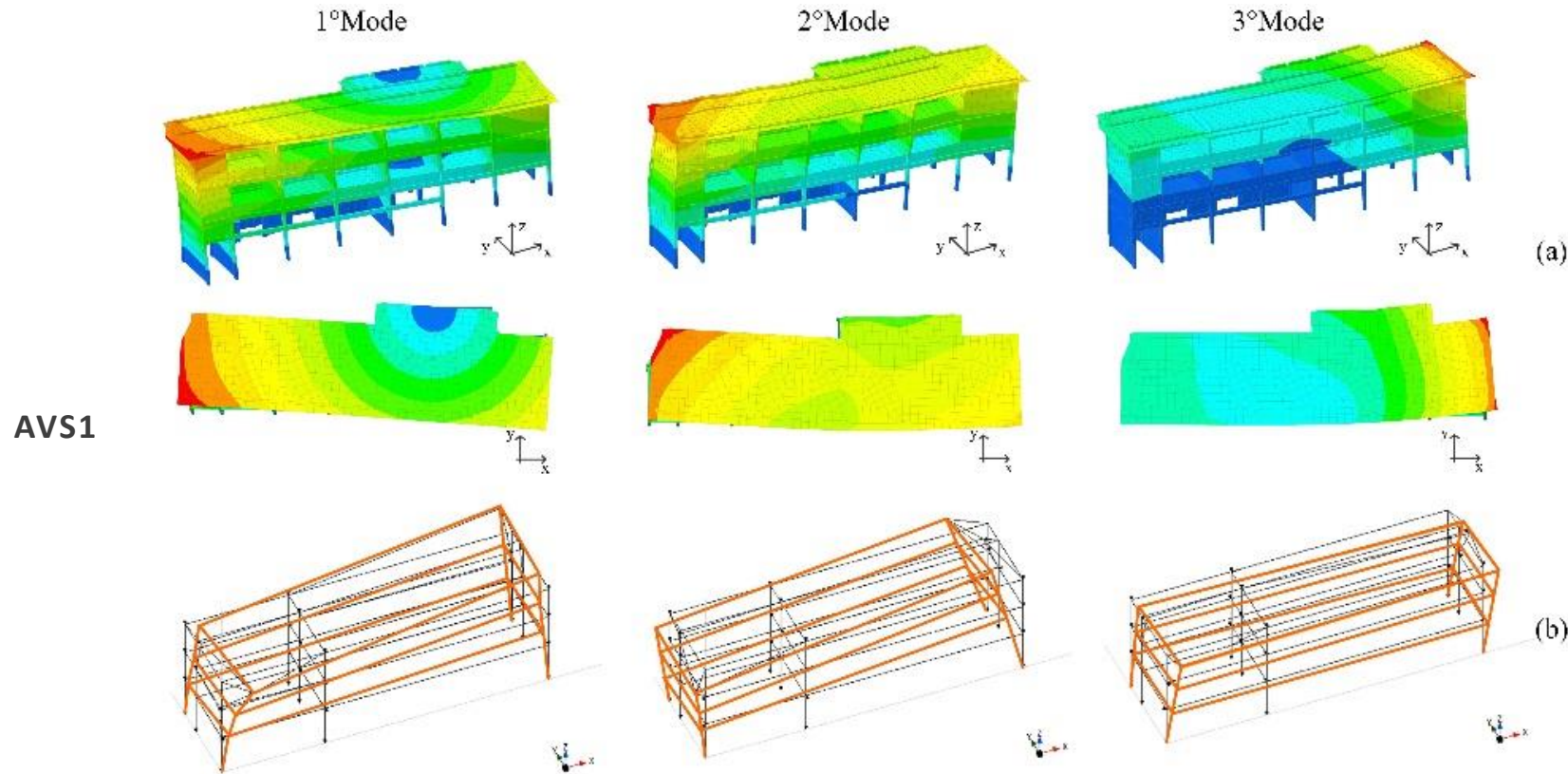


Periodic SHM

- AVS n.1
17th March, 2015
- AVS n.2
15th October, 2015
- AVS n.3
26th January, 2016
- AVS n.4
22nd April, 2016

F.E. MODELS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL TESTS

Numerical Model Updating



Periodic AVS

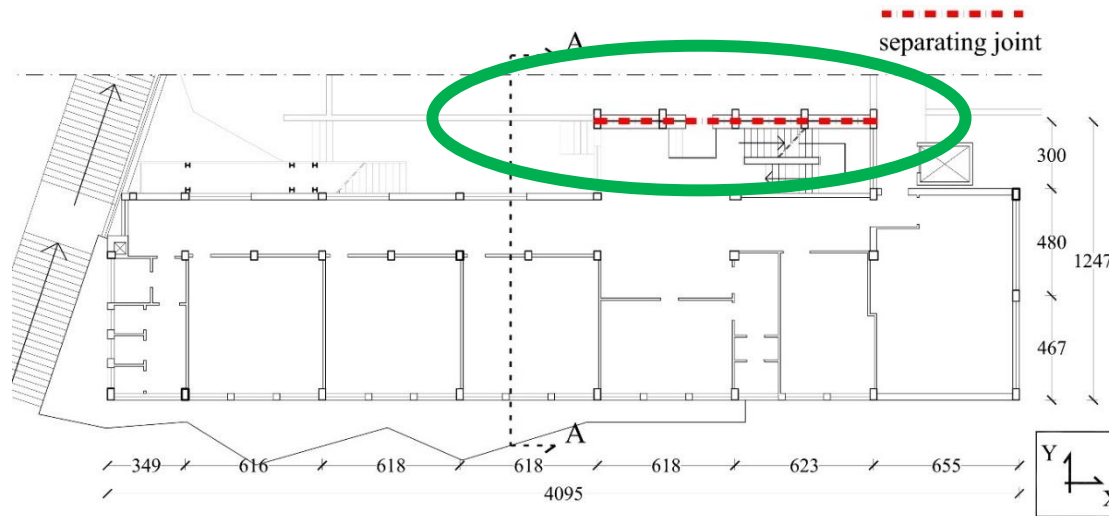
Calibration parameters:

- Stiffness of masonry panels
- Stiffness of storeys
- Influence of seismic joint

Torsional effects:
seismic joint

F.E. MODELS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL TESTS

Numerical Model Updating



Modo	AVS1	FEM	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	Frequenza	Frequenza	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
N.	(Hz)	(Hz)						
1	5.04	5.31	14.23	14.23	13.35	13.35	57.03	57.03
2	8.42	8.14	50.88	65.11	19.77	33.11	3.01	60.04
3	10.17	10.17	11.99	77.10	35.57	68.68	20.48	80.52

Periodic AVS

Calibration parameters:

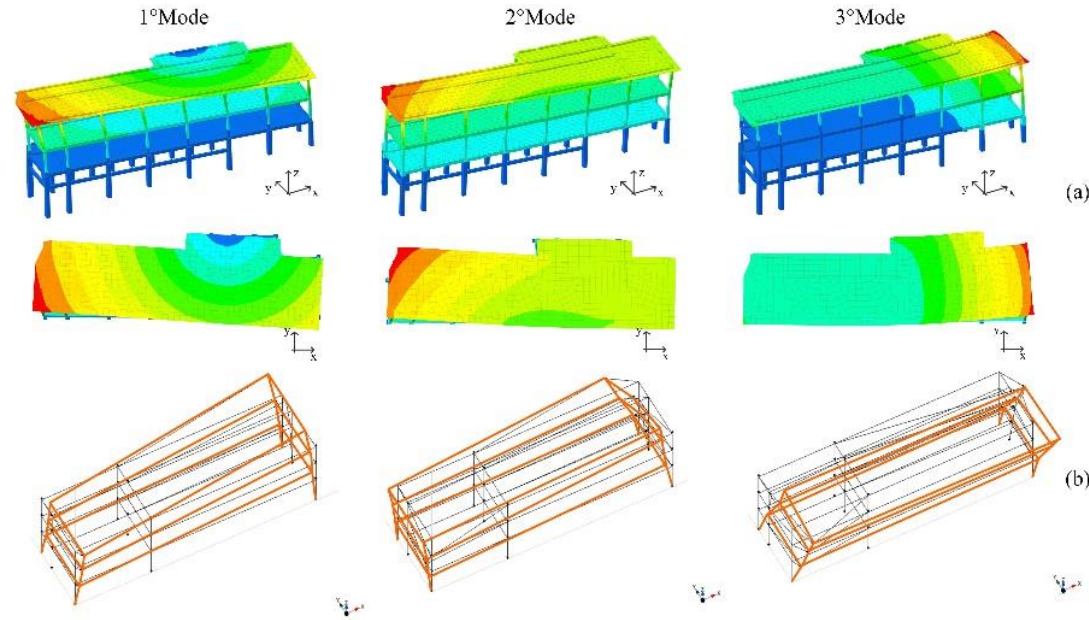
- Stiffness of masonry panels
- Stiffness of storeys
- Influence of seismic joint

Torsional effects: seismic joint

F.E. MODELS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL TESTS

Numerical Model Updating

AVS2



Modo	AVS2	FEM	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	Frequenza	Frequenza	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	4.20	4.52	15.38	15.38	5.33	5.33	32.12	32.12
2	6.51	6.49	46.15	61.53	5.64	10.97	5.19	37.31
3	9.132	9.61	1.84	63.37	31.94	42.90	21.22	58.53

Periodic AVS

Calibration parameters:

- Stiffness of masonry panels
- Stiffness of storeys
- Influence of seismic joint

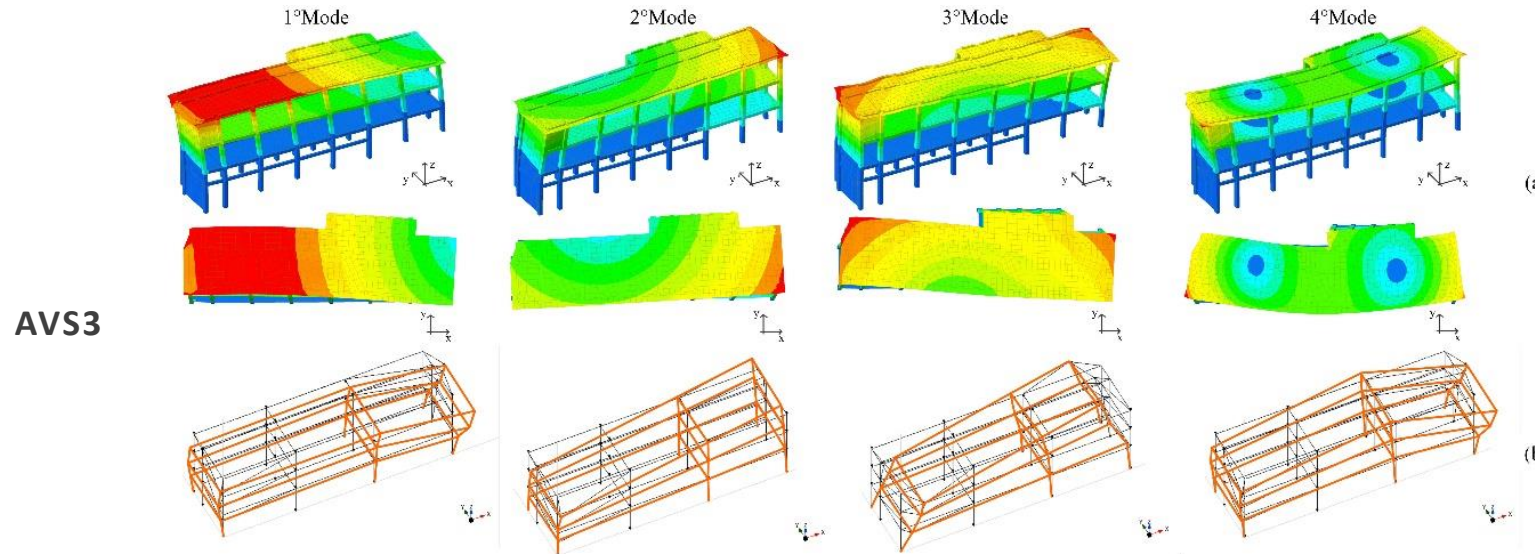
Torsional effects:
seismic joint

Infill panel effects:
stiffness reduction

-20%

F.E. MODELS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL TESTS

Numerical Model Updating



Periodic AVS

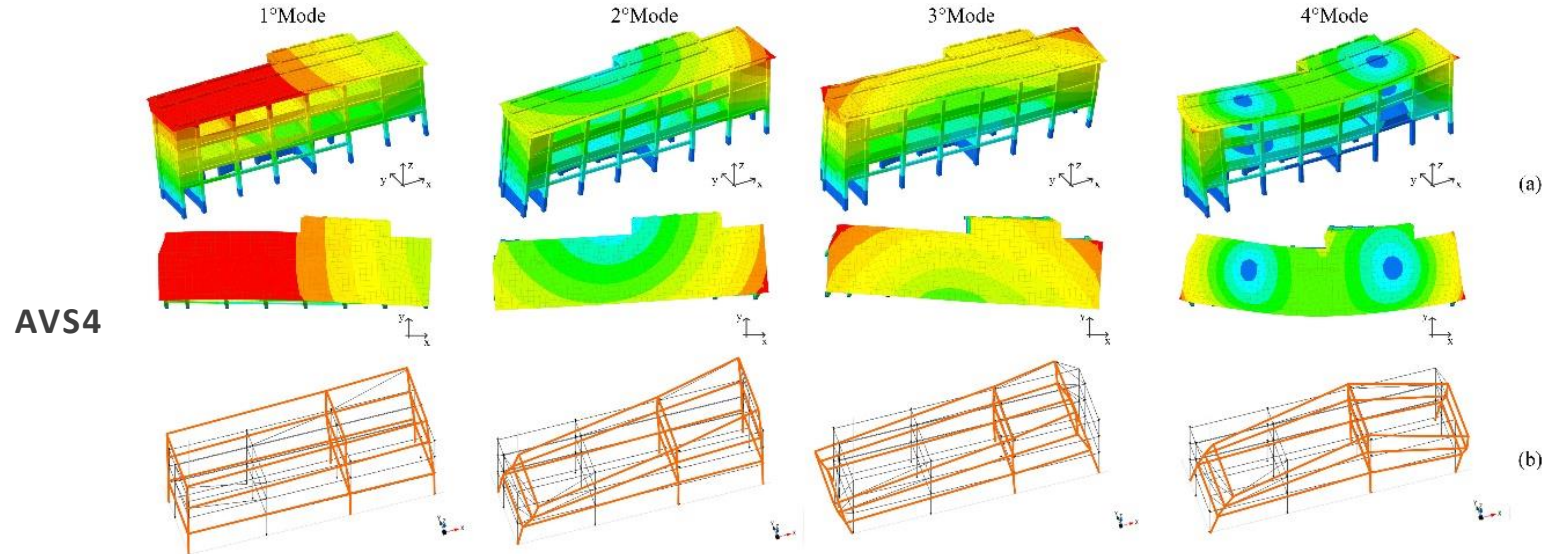
«cleaning» of the structural joint

Enlargement of columns cross-section: Stiffness increment **+15%**

Modo N.	AVS3	FEM	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	Frequenza (Hz)	Frequenza (Hz)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	4.88	4.69	3.08	3.08	51.15	51.15	6.49	6.49
2	5.04	5.44	21.34	24.42	12.17	63.32	38.53	45.02
3	6.97	7.37	42.08	66.50	0.09	63.42	23.37	68.40
4	9.72	10.58	0.86	67.37	1.21	64.63	0.03	68.44

F.E. MODELS AND COMPARISON WITH EXPERIMENTAL TESTS

Numerical Model Updating



Modo N.	AVS4	FEM	TRAN-X		TRAN-Y		ROTN-Z	
	Frequenza (Hz)	Frequenza (Hz)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)	Mass (%)	Sum (%)
1	5.321	5.24	1.96	1.96	79.01	79.01	2.47	2.47
2	5.59	5.61	24.39	26.35	4.89	83.90	56.21	58.67
3	9.043	8.79	56.42	82.77	0.07	83.97	26.30	84.98
4	10.35	10.81	0.76	83.53	6.39	84.41	0.43	85.40

Periodic AVS

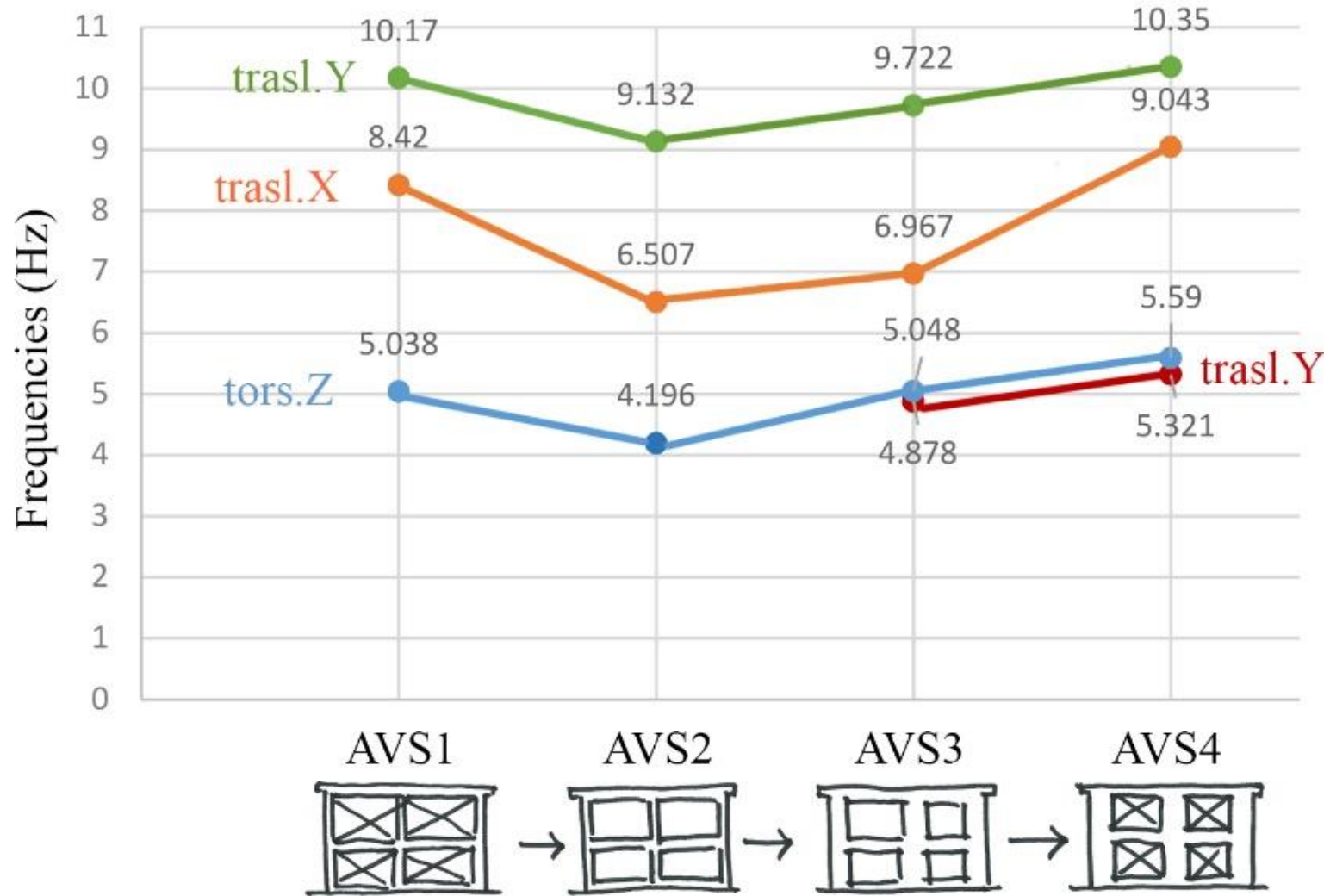
«cleaning» of the structural joint

Enlargement of columns cross-section: Stiffness increment **+15%**

Infill panel effects: stiffness reduction **-20%**

Casi studio

SCUOLA DI OSTRA VETERE (AN)



Remarks

- Evaluation of effectiveness of the retrofitting works
- Stiffness contribution of infill walls
- Knowledge of the dynamic behavior
- Detection of structural anomalies

PONTE SUL FIUME GARIGLIANO, MINTURNO (LT)



PONTE SUL FIUME GARIGLIANO, MINTURNO (LT)

Casi studio

PONTE SUL FIUME GARIGLIANO, MINTURNO (LT)

Rilievo



BASE ARCATI IN CLS
 - Lesioni e/o distacchi di spigoli e deterioramento copriferro;
 - Lesioni copriferro nelle zone di connessione tra struttura in cls e parapetto metallico.
 Tali lesioni sono rilevabili su tutta la struttura in cls, in alcune zone si rileva uno stato di degrado consistente, con distacco completo di porzioni di copriferro ed esposizione delle armature metalliche.



STRALLI LESIONATI IN SEGUITO ALL'INCIDENTE DEL 2019
 - Lesione completa del 4° strallo (lato Regione Campania);
 - Danni sulle camicie protettive e sul getto di boiacca del 3° strallo (lato Regione Campania).
 In seguito all'incidente stradale del 2019, il 4° strallo non è più in sede e risulta totalmente lesionato, presentando una sezione netta di rottura degli elementi strutturali in acciaio.

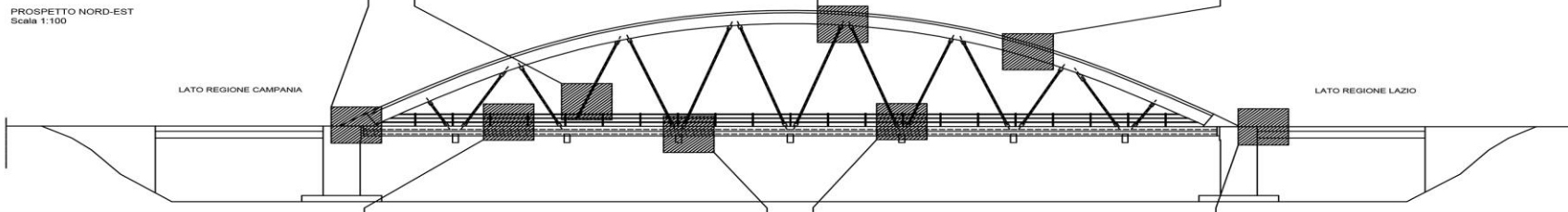


ARCATA IN CLS E PORZIONE SUPERIORE DEGLI STRALLI
 - Lesioni e/o distacchi di spigoli e deterioramento copriferro;
 - Macchie di umidità e tracce di scolo.
 Tali lesioni sono riscontrabili su tutta la struttura in calcestruzzo. Le macchie sono rilevabili lungo l'arcata in cls, in corrispondenza degli agganci della parte superiore degli stralli con tracce evidenti di scolo di materiale metallico ossidato.



ARCATA E TRAVI TRASVERSALI IN CLS
 - Lesioni e/o distacchi di spigoli e deterioramento copriferro;
 - Macchie di umidità.
 Tali lesioni sono rilevabili lungo tutta la struttura in calcestruzzo, in particolar modo nella zona degli spigoli delle travi trasversali, che risulta maggiormente esposta agli agenti atmosferici.

PROSPETTO NORD-EST
 Scala 1:100



PARAPETTO METALLICO
 - Elementi ammorlati ed ossidati con lesioni sulle giunzioni;
 - Lesioni gravi degli elementi in corrispondenza del 4° strallo lato Campania (causate dall'incidente del 2019);
 I parapetti metallici presentano uno stato di degrado avanzato con ossidazione completa degli elementi e lesioni di vario genere che ne inficiano la corretta funzionalità.



INTRADOSSO SOLETTA IMPALCATO E TRASVERSI
 - Macchie di umidità;
 - Lesioni e/o distacchi di spigoli e deterioramento copriferro.
 Le macchie di umidità, rilevate in diverse zone dell'intradosso della soletta, derivano da infiltrazioni provenienti dalla parte superiore dell'impalcato stesso.
 I distacchi del copriferro si rilevano su spigoli di travi e traversi.



STRALLI
 - Distacco del getto di boiacca a protezione degli stralli;
 - Danni su camicia protettiva ed elementi della base degli stralli.
 Gli stralli presentano diverse criticità nello stato di conservazione in quanto gli elementi metallici strutturali risultano esposti agli agenti atmosferici, a causa dei danni esistenti sui diversi elementi di protezione e del degrado del getto di boiacca.

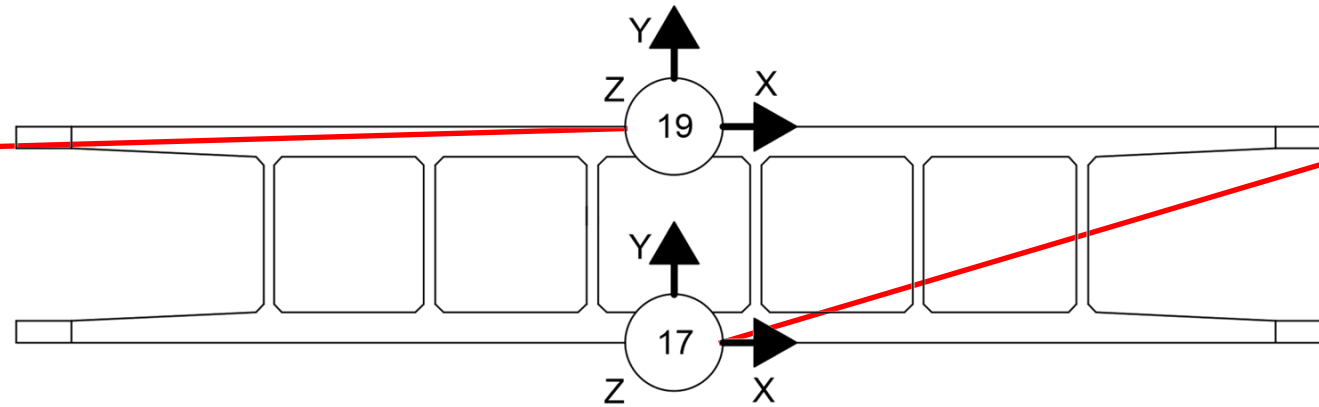


GIUNTO DI DILATAZIONE
 - Danni in corrispondenza degli elementi di protezione dei giunti;
 - Presenza di vegetazione e degrado della pavimentazione stradale.
 I giunti di dilatazione presentano uno stato di conservazione non ottimale con elementi danneggiati e degrado della pavimentazione stradale con crescita di vegetazione all'interno delle fessurazioni ed evidenza di percolamento di acqua sulla testa delle pile sottostanti.

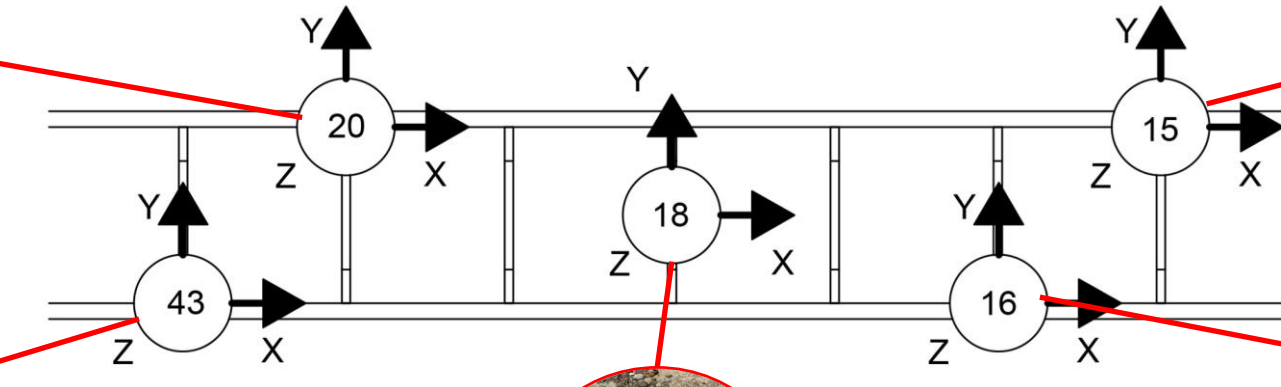


Schemi dei sensori

Archi

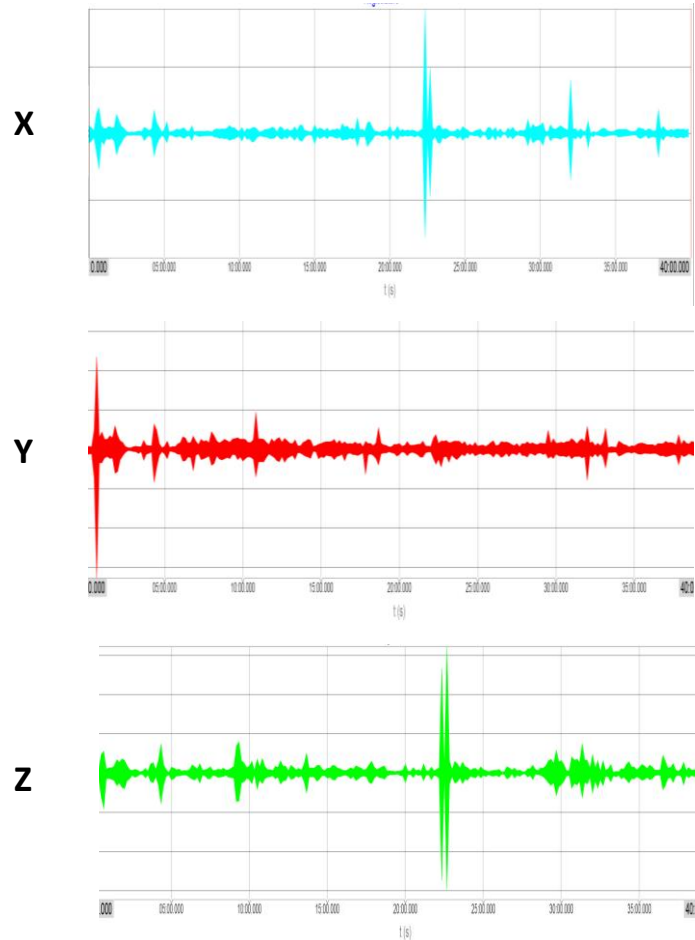


Impalcato

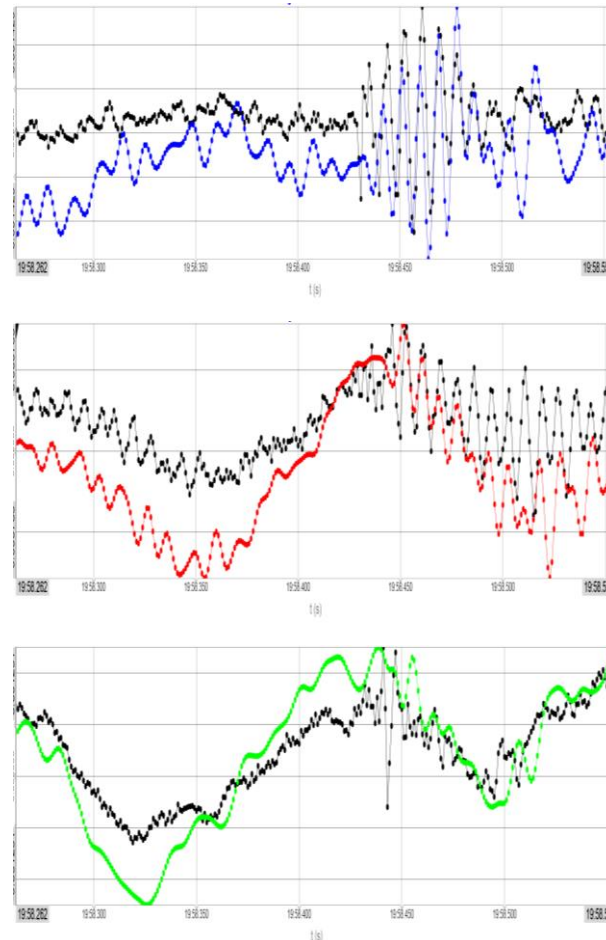


Acquisizione e trattamento dei dati

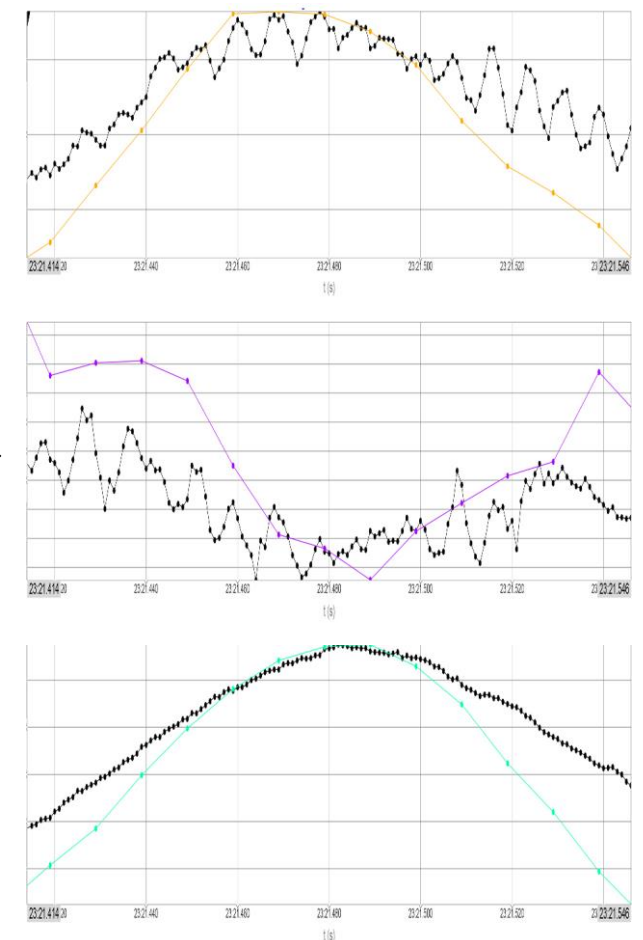
Segnali RAW [1000 Hz]
Durata acquisizione: 40 min



Filtraggio – Butterworth ordine 6
(In nero il segnale originale)



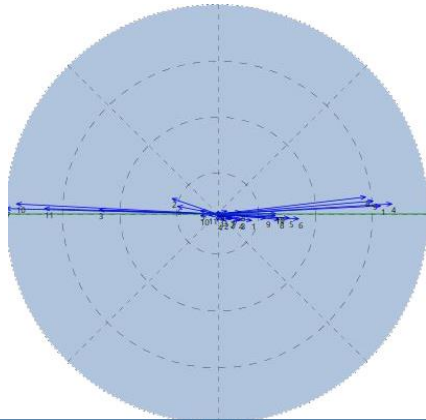
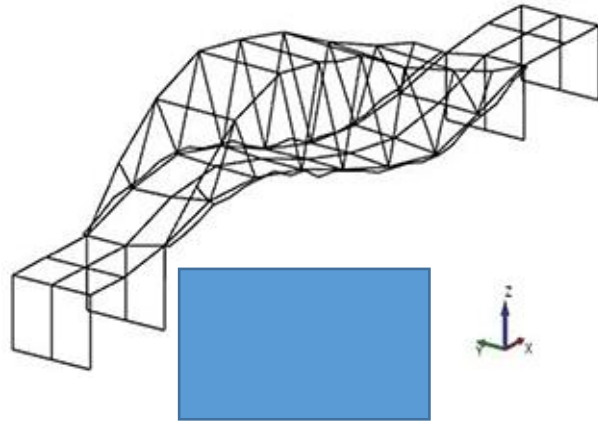
Ricampionamento [100 Hz]
(in nero il segnale originale)



Identificazione dinamica tramite metodo SSI (dominio del tempo)

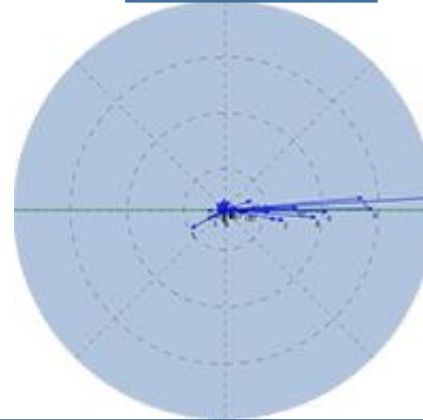
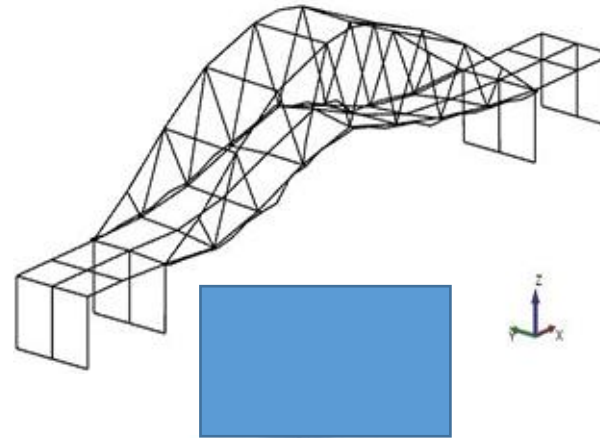
Modo 1

Flessionale



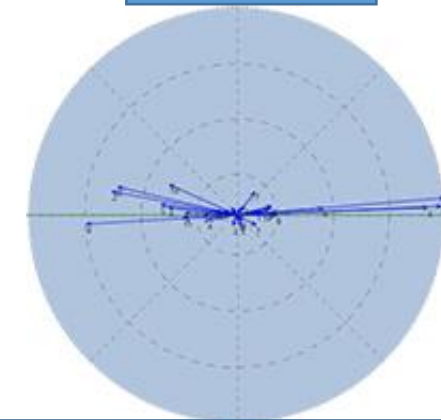
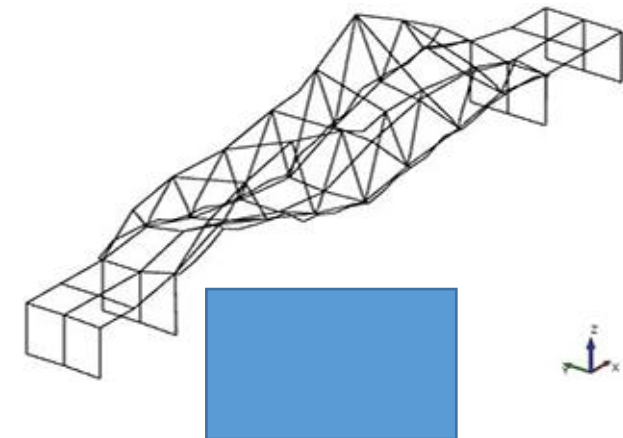
Modo 2

Flessionale



Modo 3

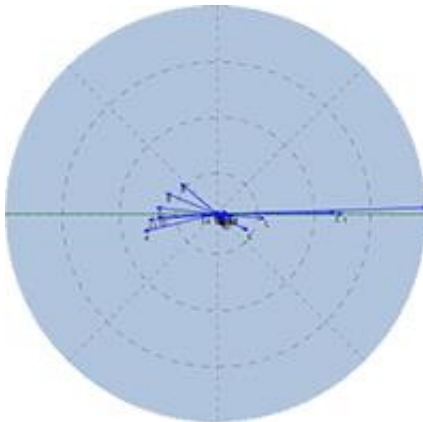
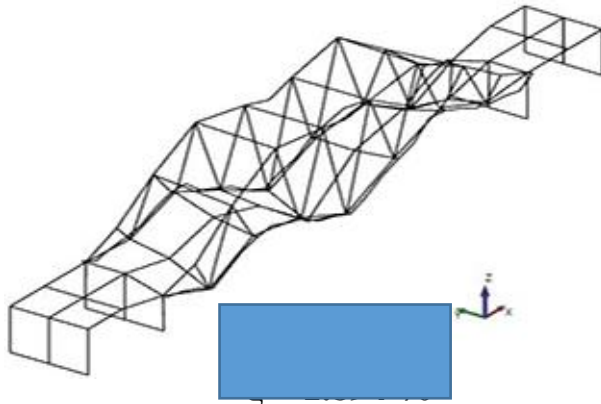
Flessionale + Torsionale



Identificazione dinamica tramite metodo SSI (dominio del tempo)

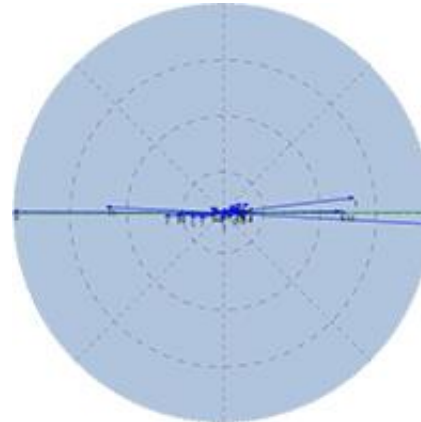
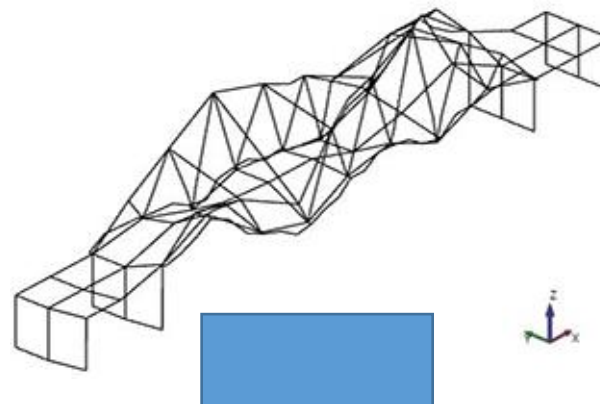
Modo 4

Flessionale + Torsionale



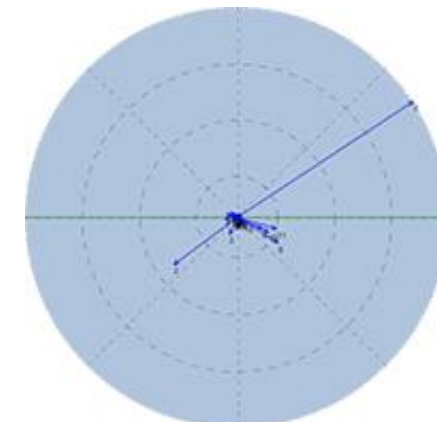
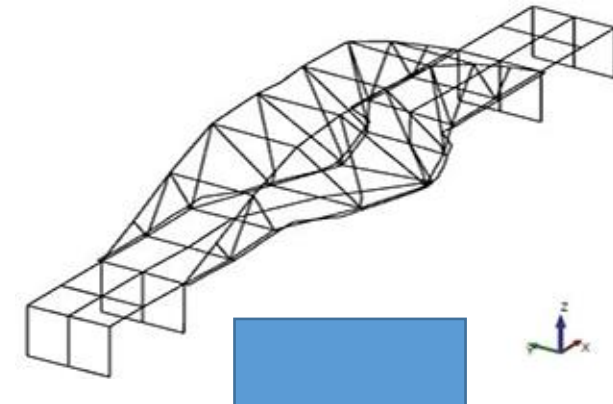
Modo 5

Flessionale + Torsionale



Modo 6

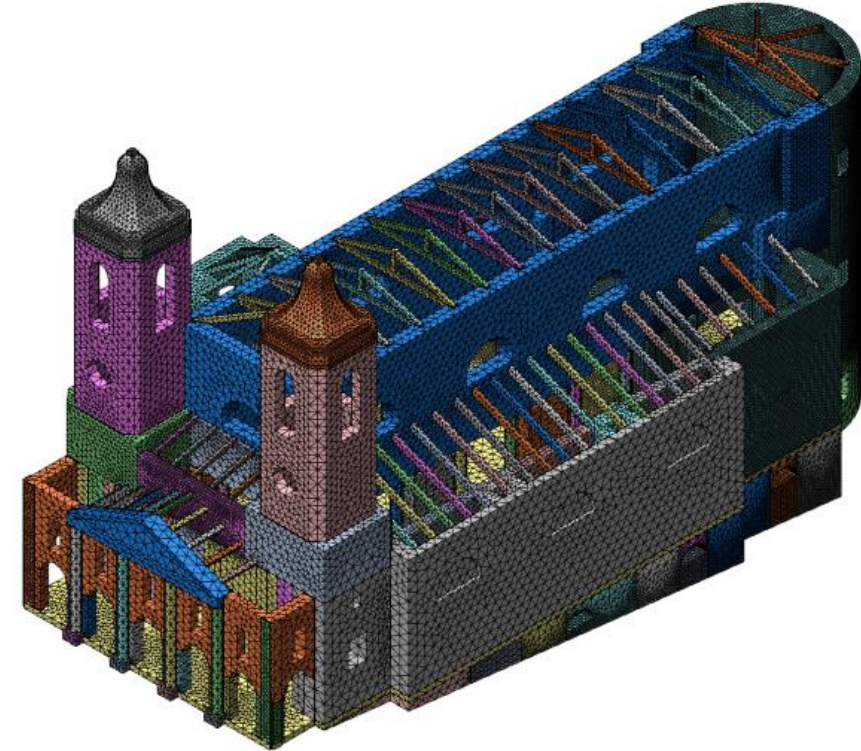
Flessionale + torsionale



Validazione dei risultati

AutoMAC

<u>MAC</u>	3.689 Hz	4.909 Hz	5.641 Hz	10.76 Hz	12.43 Hz	22.77 Hz
3.689 Hz	1	0.013	0.014	0.004	0.002	0.002
4.909 Hz	0.013	1	0.236	0.068	0.005	0.033
5.641 Hz	0.014	0.236	1	0.007	0.000	0.005
10.76 Hz	0.004	0.068	0.007	1	0.163	0.024
12.43 Hz	0.002	0.005	0.000	0.163	1	0.005
22.77 Hz	0.002	0.033	0.005	0.024	0.005	1



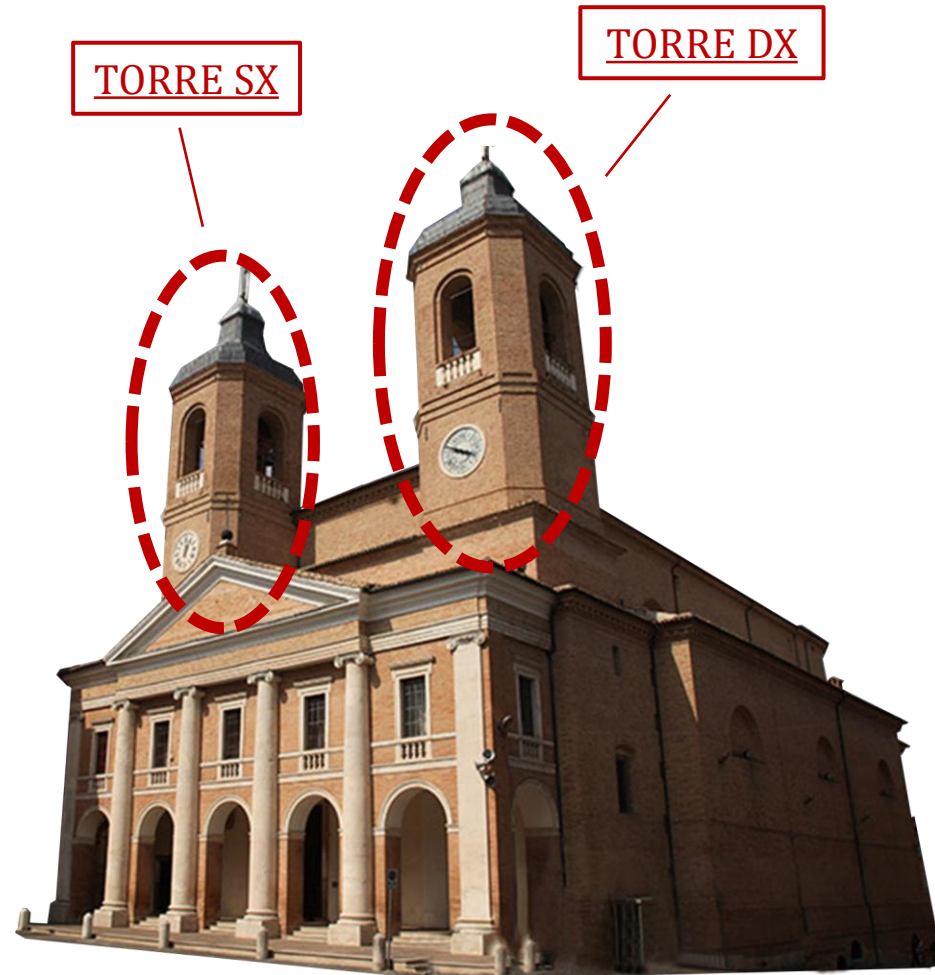
CHIESA DI SANTA MARIA ANNUNZIATA A CAMERINO (MC)



1. Inquadramento
2. Modello numerico preliminare
3. Monitoraggio Short-Time (04 Febbraio 2020):
 - Strumentazione
 - Layout sensori e specifiche di acquisizione
 - Risultati
4. Monitoraggio Continuo (20 Aprile 2020 – Oggi):
 - Strumentazione
 - Layout Sensori e specifiche di acquisizione
 - Parametri ambientali
 - Modal Tracking e correlazione con i dati ambientali

Casi studio

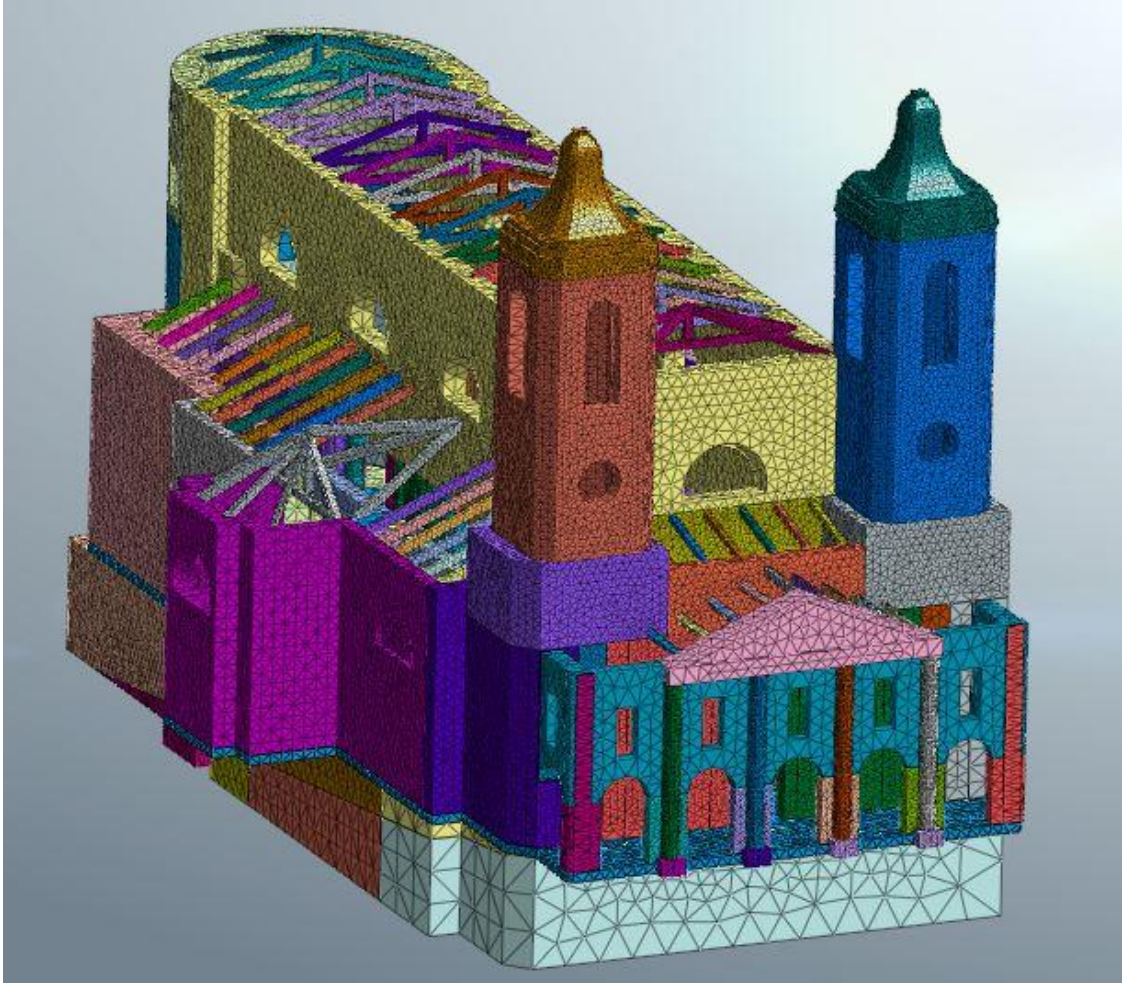
CATTEDRALE DI CAMERINO (MC)



- **Denominazione torri:**
 - «Torre Sx» e «Torre Dx» identificate secondo lo schema in figura
- **Altezza Torri:**
 - Picco: 34.5 m
 - Celle campanarie a quota 25.05 m
- **Sezione torri:**
 - Sezione ottagonale irregolare
 - Ingombro circa 6.92 x 7.40 m²

Casi studio

CATTEDRALE DI CAMERINO (MC)

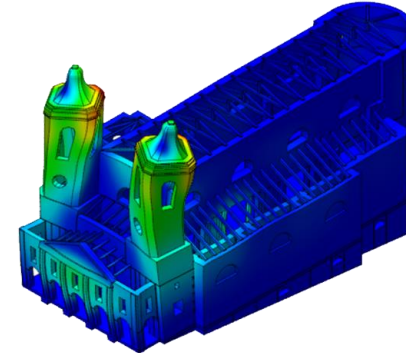
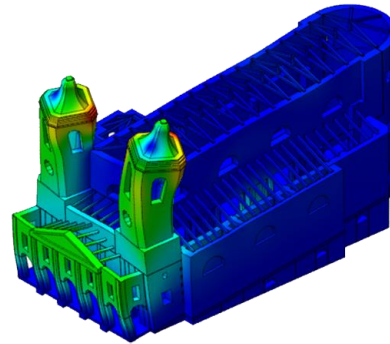
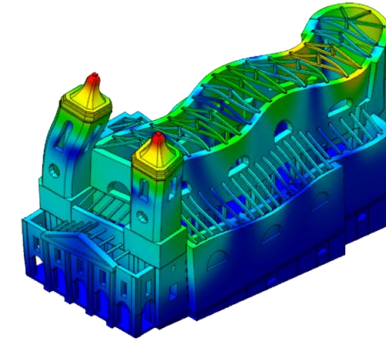
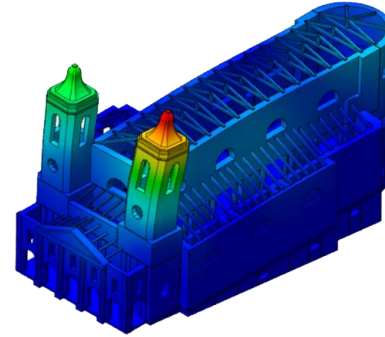
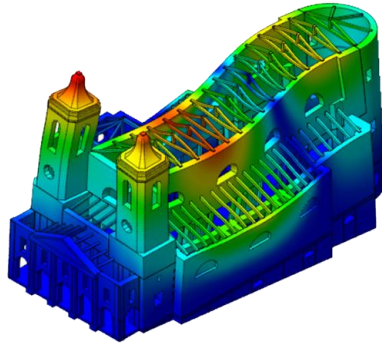


- Realizzazione modello numerico tramite software Midas FEA©
- Analisi modale preliminare del modello globale:
 - Individuazione range di frequenze di interesse;
 - Valutazione forme modali associate ai modi propri teorici
 - Valutazione punti maggiormente sollecitati per applicazione principio dell'Optimal Sensor Placement (O.P.T.)

Casi studio

CATTEDRALE DI CAMERINO (MC)

Modello numerico preliminare (NON CALIBRATO)



Monitoraggio Short-Time – Strumentazione

PCB 393B12 (x18)



PoE



Centralina di Acquisizione Krypton – 4 canali (x7)



- Nr. 18 + 3 Accelerometri piezoelettrici monoassiali:
 - Sensitività: 10 V/g
 - Range di misura: ± 8 g (PCB), ± 6 g (MMF)
- Nr. 7 Centraline di acquisizione a 4 canali
 - Conversione A/D e sincronizzazione segnali;
 - Risoluzione: 24bit
 - Filtro anti-aliasing
- Nr. 1 PoE:
 - Alimentazione del sistema e trasmissione dati

Monitoraggio Short-Time – Layout Sensori e specifiche di acquisizione

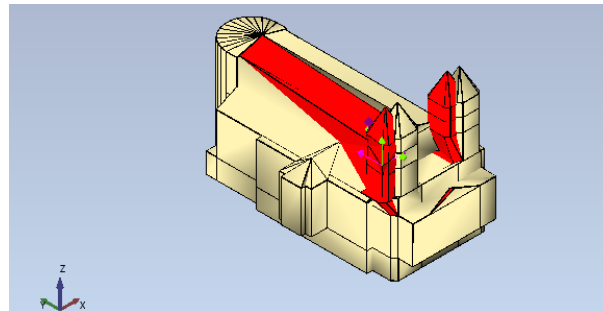


- Obiettivo: Valutare il comportamento dinamico in esercizio delle torri, e fissare uno stato «zero» per il successivo monitoraggio in continuo
- Punti di misura: 9 punti di misura per ogni torre, con disposizione dei sensori pensata per evidenziare i comportamenti traslazionali e torsionali
- Frequenza di campionamento: 200 Hz
- Durata acquisizione: 30 min.

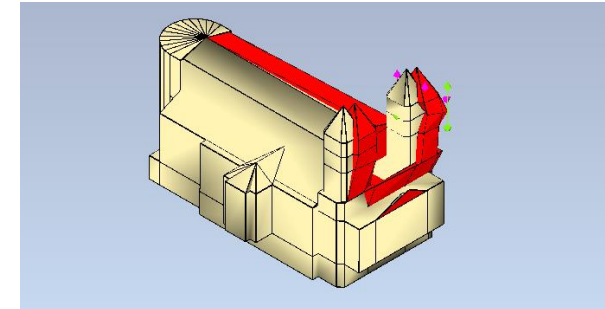
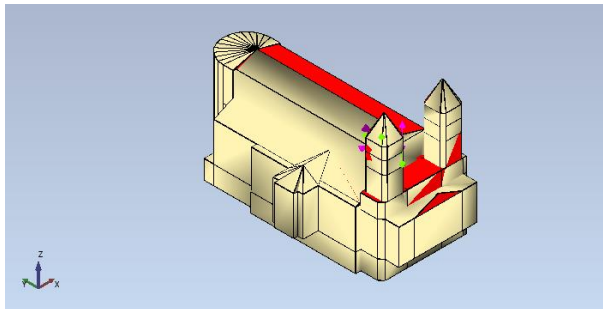
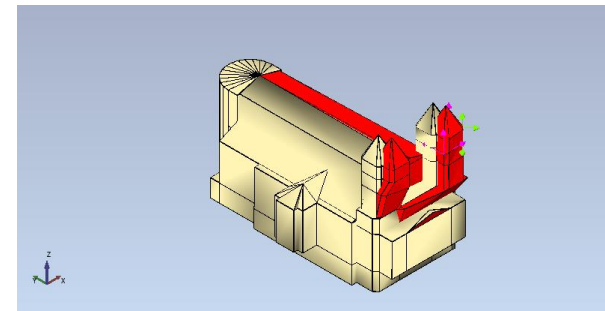
Monitoraggio Short-Time – Risultati dell'identificazione

Identificazione modi e corrispondenti frequenze «Target» per il monitoraggio continuo:

Torre Sx



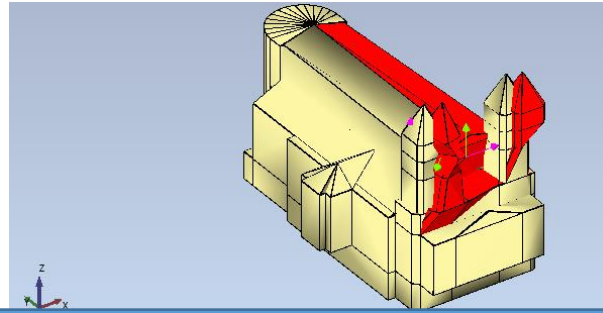
Torre Dx



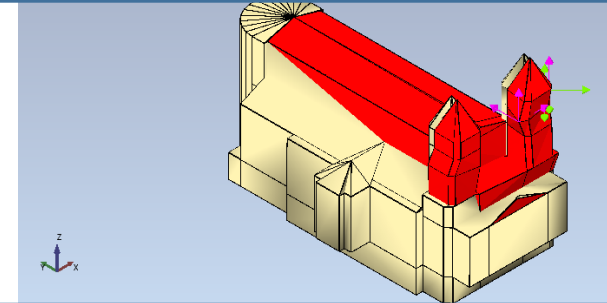
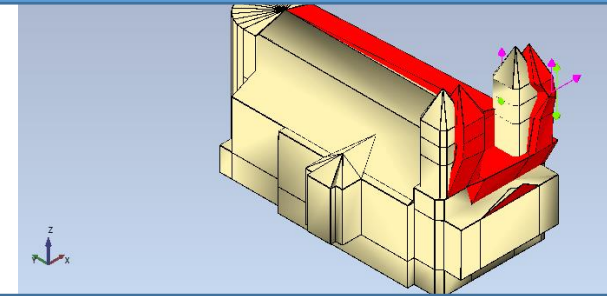
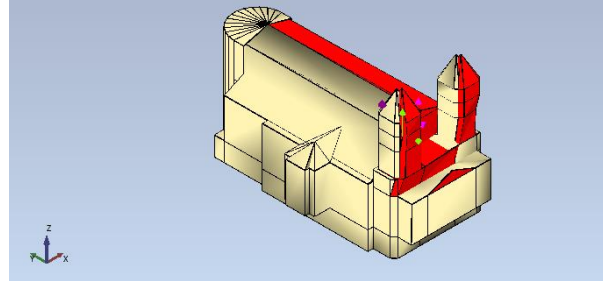
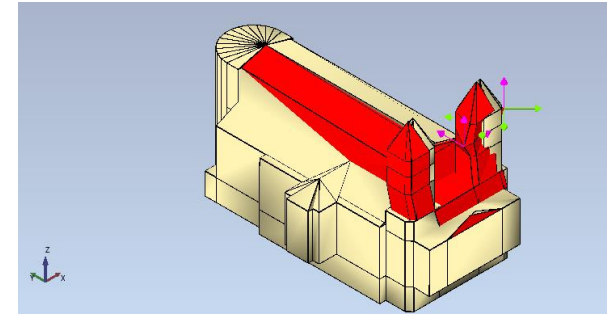
Casi studio

CATTEDRALE DI CAMERINO (MC)

Torre Sx



Torre Dx



Monitoraggio continuo – Strumentazione

PC:

Gestione software di acquisizione e immagazzinamento dati

Alimentatore:

48V DC



PoE:

Alimentazione sensori e trasmissione dei dati

MonoDAQ-E-gMeter:

4 accelerometri MEMS triassiali
Range di misura (max): ± 8 g
Collegamento in serie
(distanza massima 50 m)



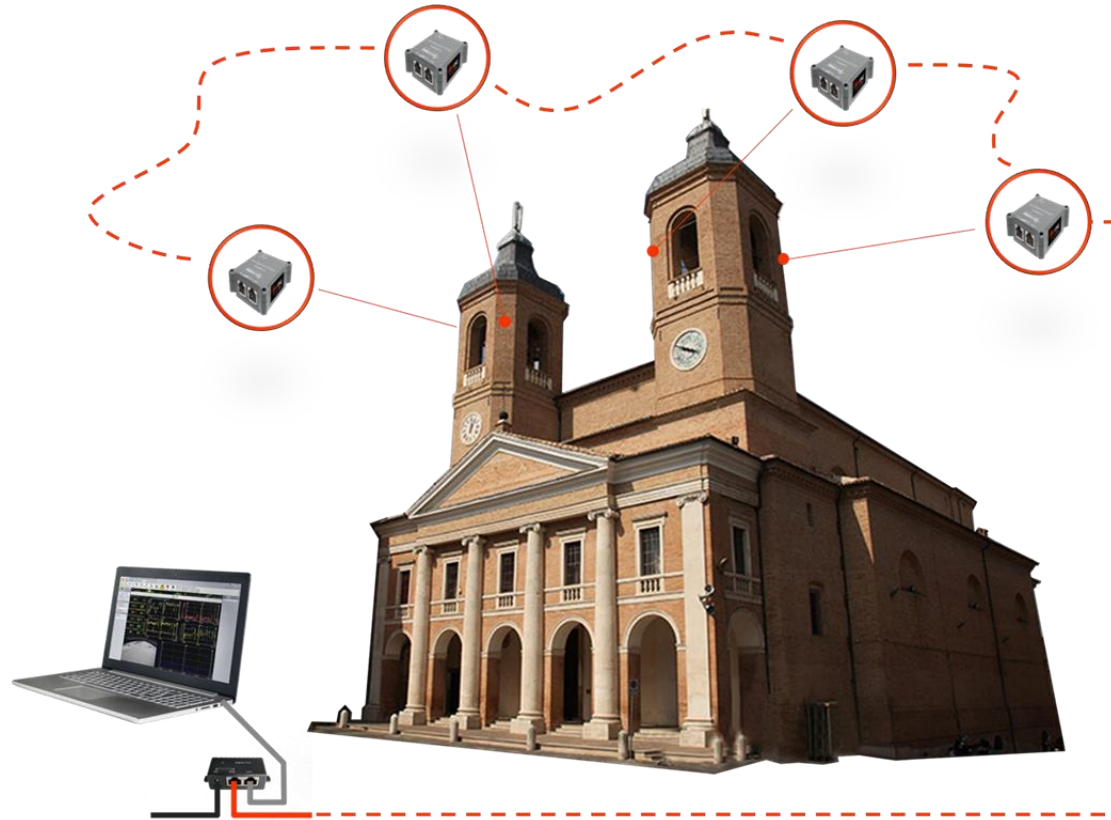
Cavi ethercat cat 6 - AWG 24:

Lunghezza 50 m
Alimentazione e trasmissione dati

Casi studio

CATTEDRALE DI CAMERINO (MC)

Monitoraggio continuo – Layout Sensori e specifiche di acquisizione



- N°4 accelerometri MEMS triassiali:
 - Quota: circa 29.5 m;
 - 6 canali di acquisizione per torre;
- Modalità di acquisizione:
 - Registrazione in continuo 10 min/h con frequenza di campionamento 100 Hz;
 - Registrazione su «trigger» per 50 min/h con frequenza di campionamento 1000 Hz;
- Obiettivi:
 - Tracking frequenze per identificazione del danno;
 - Correlazione con parametri ambientali (Temperatura, Umidità relativa, Vento)

Monitoraggio Continuo – Parametri ambientali



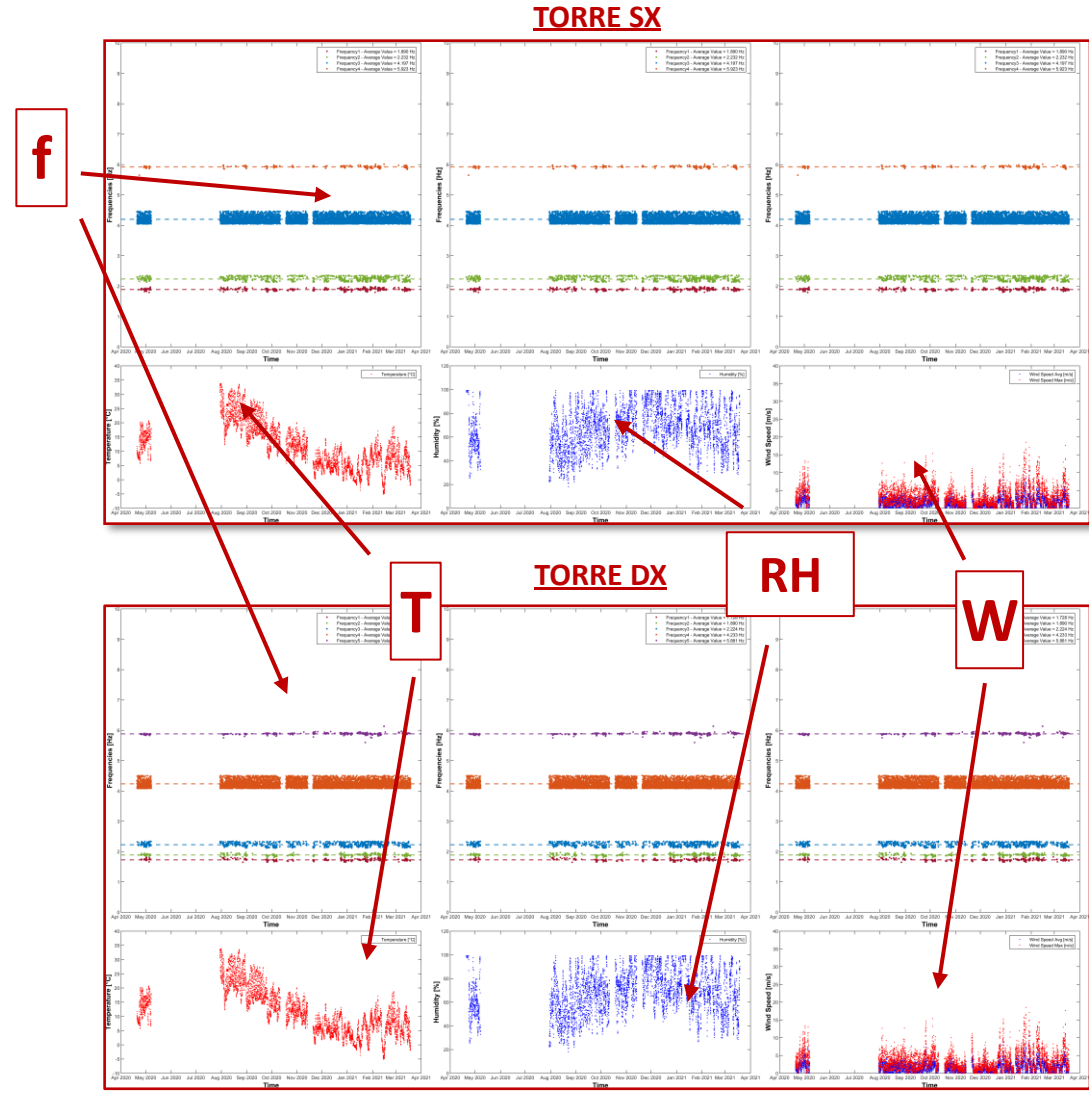
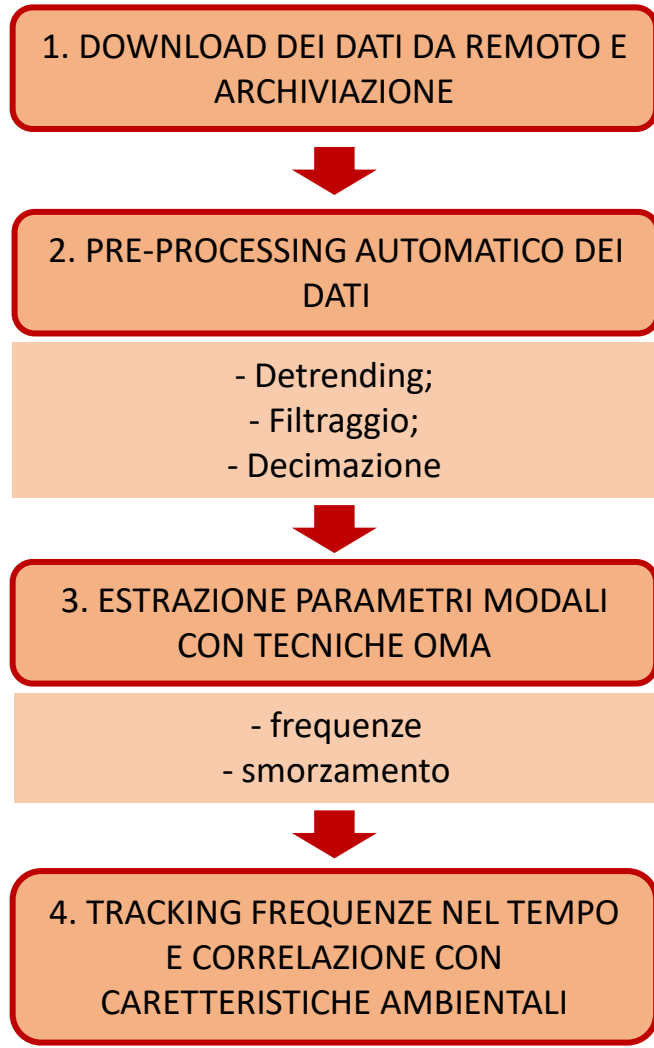
Dati ambientali relativi a:

- Temperatura esterna (T) [°C];
- Umidità relativa (RH) [%];
- Velocità max e media [m/s] e direzione del vento (W).

Download settimanale da:

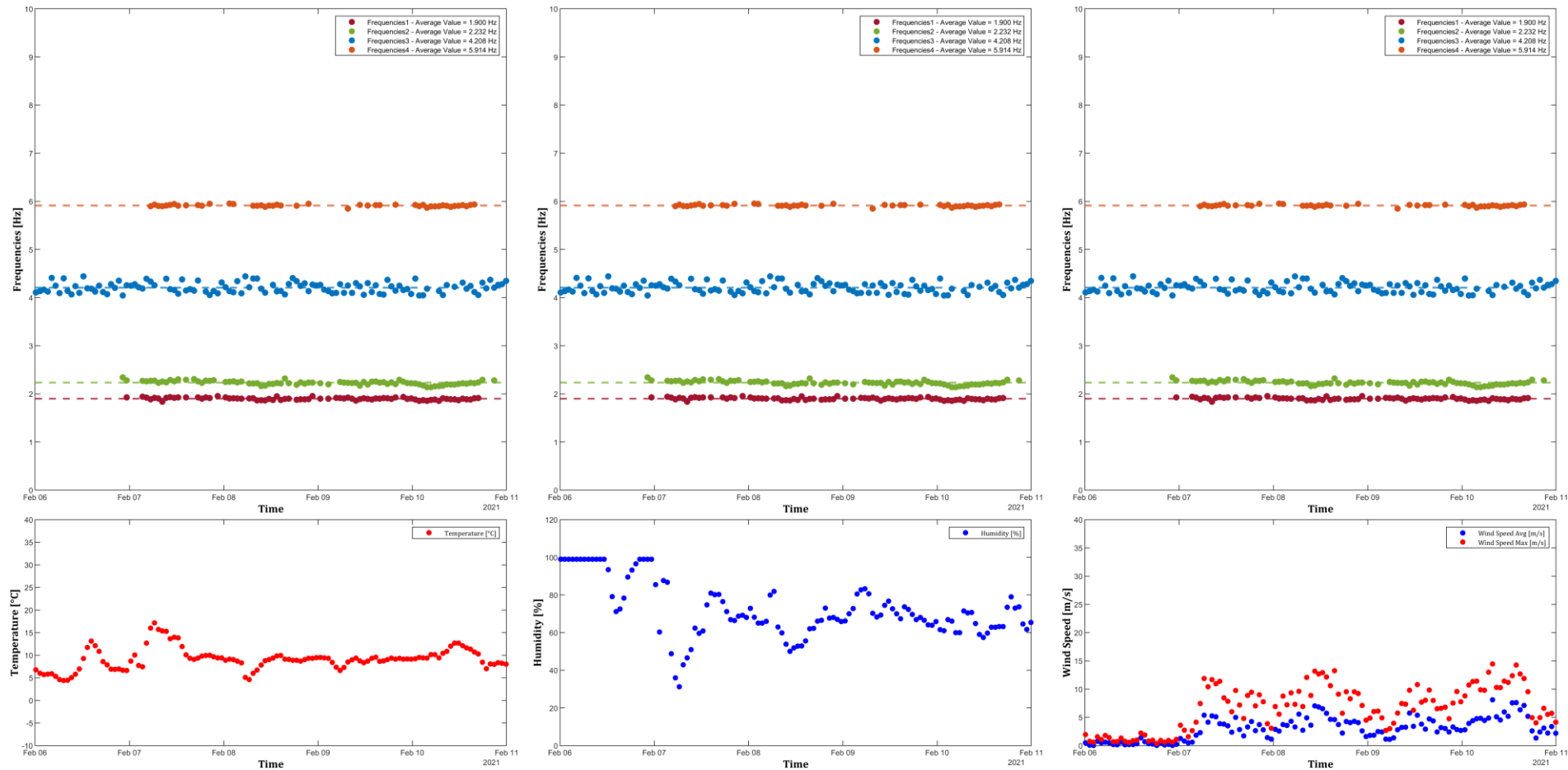
<http://app.protezionecivile.marche.it/sol/indexjs.sol?lang=it>

Monitoraggio continuo – Modal Tracking e correlazione con dati ambientali



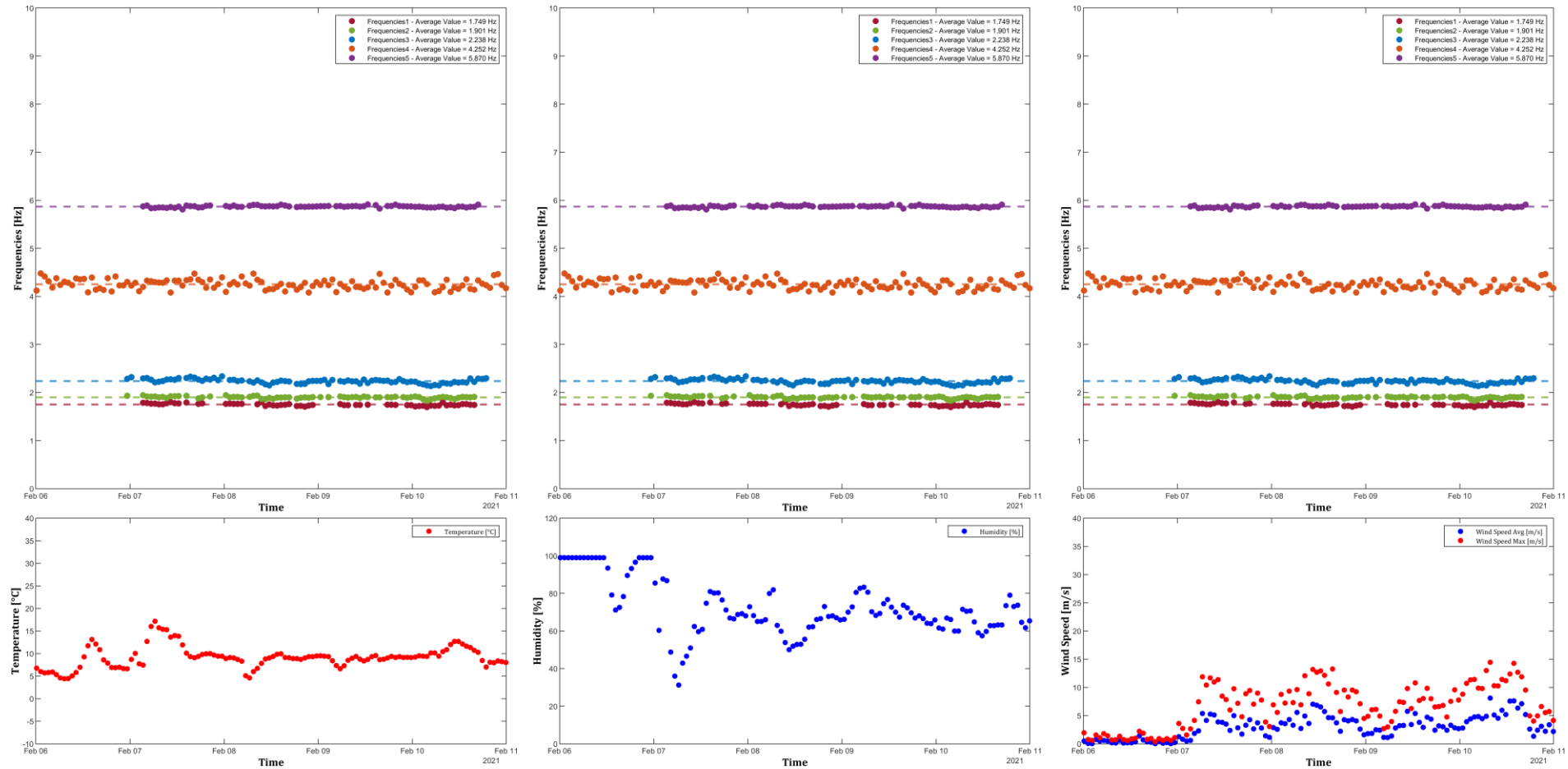
Monitoraggio continuo – Esempio

FREQUENZE TRACCIATE PER LA **TORRE SX** TRA IL 06/02/2021 E LO 11/02/2021 CORRELATE CON I RELATIVI DATI DI TEMPERATURA, UMIDITÀ E VELOCITÀ DEL VENTO



Monitoraggio continuo – Esempio

FREQUENZE TRACCIATE PER LA **TORRE DX** TRA IL 06/02/2021 E LO 11/02/2021 CORRELATE CON I RELATIVI DATI DI TEMPERATURA, UMIDITÀ E VELOCITÀ DEL VENTO



**ANALISI E INTERVENTI STRUTTURALI
SU EDIFICI VINCOLATI**
Parte 2



**ORDINE DEGLI INGEGNERI DELLA PROVINCIA DI
MACERATA**

Il monitoraggio dinamico



Prof. Ing. Clementi Francesco

Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile ed Architettura (DICEA)

Università Politecnica delle Marche, Ancona

francesco.clementi@univpm.it

Macerata – 26 Marzo 2021

Seminario FAD

