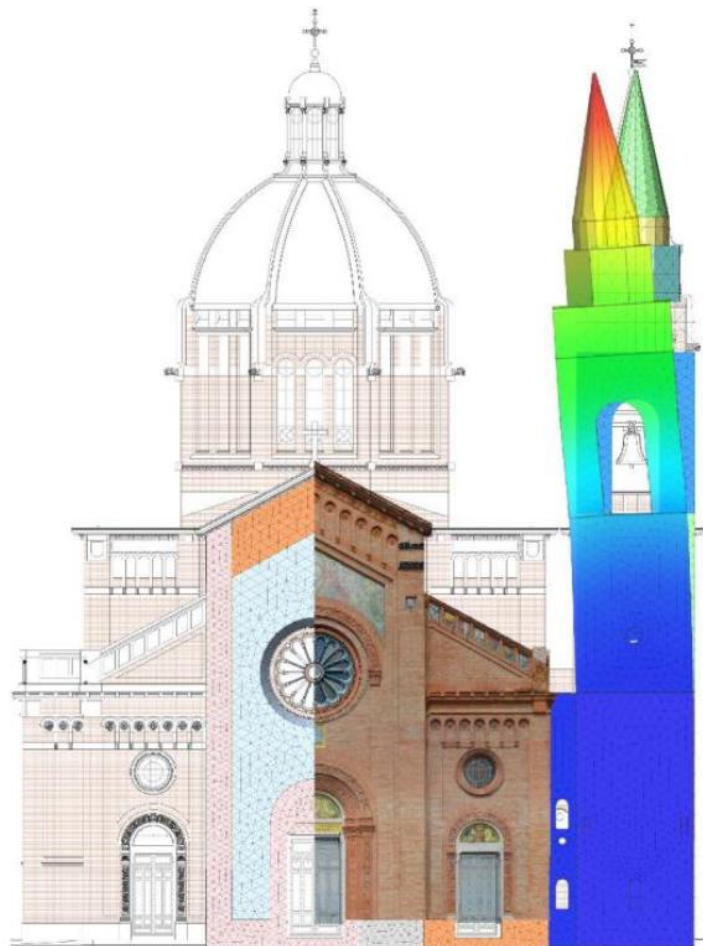


# Analisi dinamica strutture storiche.

Santuario del Santissimo Crocifisso  
di Treia (MC).



## INTRODUZIONE

L'elevata sismicità del territorio italiano ha portato negli anni il verificarsi di numerosi eventi sismici di diversa intensità. Provocando numerose perdite, come è facilmente apprezzabile nell'infografica in figura 1. Tuttavia è utile notare come; l'intensità dell'evento sismico non sia strettamente correlata al numero di vittime associabili all'evento.

Questo perché le variabili che regolano questo parametro sono molteplici. Come per esempio la natura stratigrafica, topologica del terreno e qualità del costruito che viene impattato dall'evento.

È proprio quest'ultima variabile sulla quale si dovrebbe agire con maggior insistenza con opere di monitoraggio ed analisi strutturale. Anche per la natura del patrimonio storico italiano, ricco di manufatti di pregio.

In seguito verrà illustrata la procedura per riuscire a caratterizzare dinamicamente il Santuario del Santissimo Crocifisso di Treina, in collaborazione con l'Università Politecnica delle Marche, colpito dal terremoto del centro Italia nel 2016.

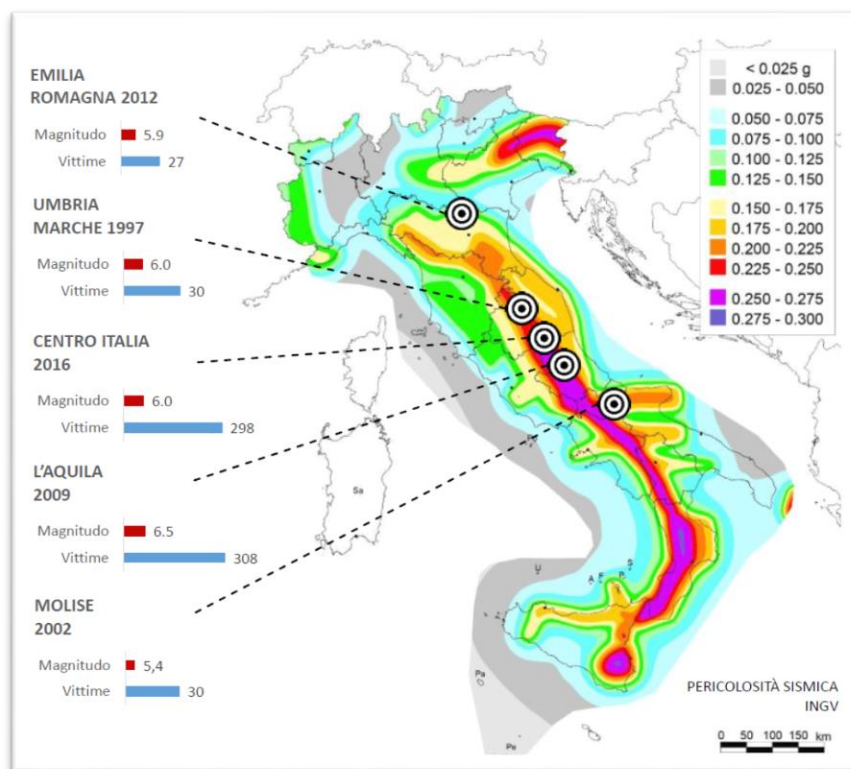


Figura 1 Pericolosità Sismica INGV

## BASI TEORICHE - OMA

L'analisi modale operazionale (OMA) è una tecnica complementare ai tradizionali metodi di analisi modale e si basa sulla misurazione della sola risposta della struttura di test.

La tecnica consente il monitoraggio delle strutture, quali quelle civili, che sono difficili o sconvenienti da eccitare tramite forzanti esterne controllate, a causa delle loro condizioni al contorno, o delle loro dimensioni notevoli. La qualità dei dati è migliorata, anche perché essi rappresentano le reali condizioni d'uso del sistema dinamico. Le misurazioni sono inoltre effettuate con condizioni al contorno reali garantite. Le strutture civili possono quindi essere testate in situ, senza comprometterne la destinazione d'uso (es. traffico per i ponti), evitando interferenze o interruzioni del loro uso quotidiano. Infine, per tutte le motivazioni addotte, il costo dell'analisi OMA risulta notevolmente inferiore dell'analisi di tipo EMA.

Tuttavia esistono alcune problematiche legate a questo tipo di analisi, come il fatto che sia necessario l'impiego di attrezzature molto sensibili per poter apprezzare la risposta, vista l'entità ridotta delle sollecitazioni, e la necessità di prestare particolare attenzione all'elaborazione dei dati, in quanto si è in possesso dei soli dati di output.

In generale la forza che eccita la struttura è costituita da un rumore bianco o una forza ignota alla quale si somma un rumore bianco. In ogni caso l'input è ignoto dal punto di vista analitico e va trattato esclusivamente in termini probabilistici. Si formulano quindi ipotesi di distribuzione statistica delle forze, e se ne deriva la teoria di identificazione dinamica.

## MODELLO ANALITICO

Per la creazione di un buon modello analitico è necessario compiere un primo studio sulla conoscenza del manufatto in esame.

Valutare fattori geometrici, di resistenza dei materiali e gli eventi a cui negli anni è stato sottoposto.

Ad una prima indagine preliminare è stata quindi modellata l'intera struttura con elementi shell in un programma ed elementi finiti attribuendo il medesimo Modulo Elastico ai diversi componenti.

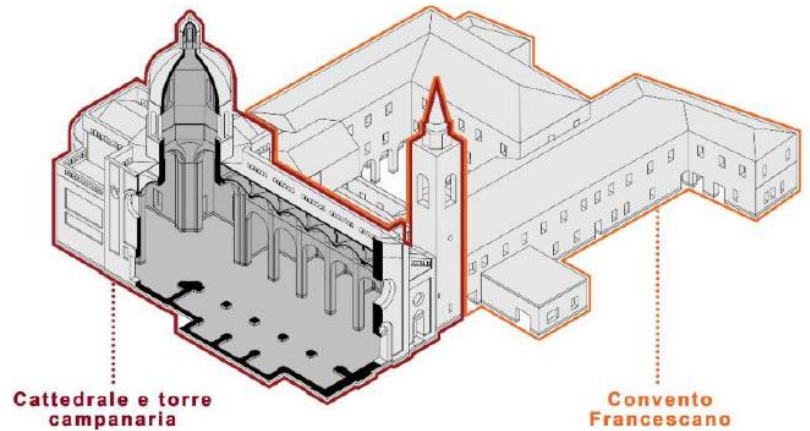


Figura 2 Elementi Costituenti il Fabbricato

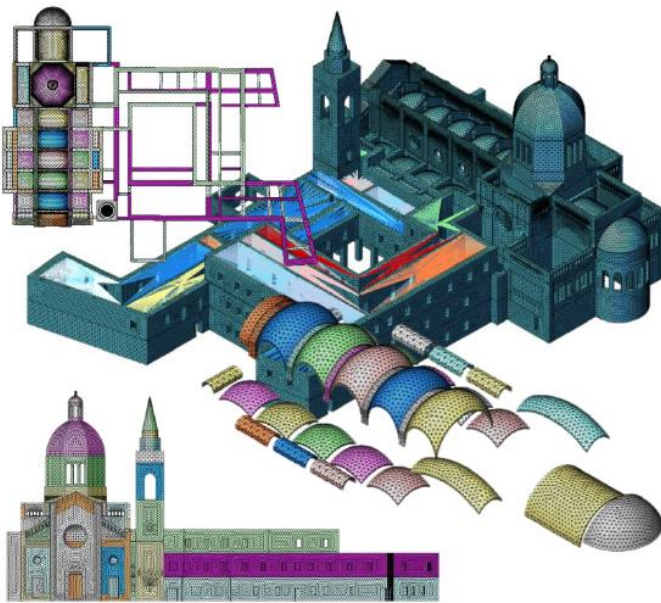


Figura 3 Modello FEM

Come si può apprezzare dalla figura N. 3 si è attribuito ad ogni elemento strutturale un diverso tipo di materiale.

Così da poter poi agire sul modulo elastico in fase di Model Updating. Per andare a matchare la risposta del modello analitico col modello sperimentale.

Si è quindi eseguita una prima analisi modale facendo riferimento alla risoluzione dell'equazione fondamentale della dinamica del secondo ordine definita a meno del termine dello smorzamento considerato nullo:

$$[M]\{\ddot{X}(t)\} + [K]\{X(t)\} = \{f(t)\}$$

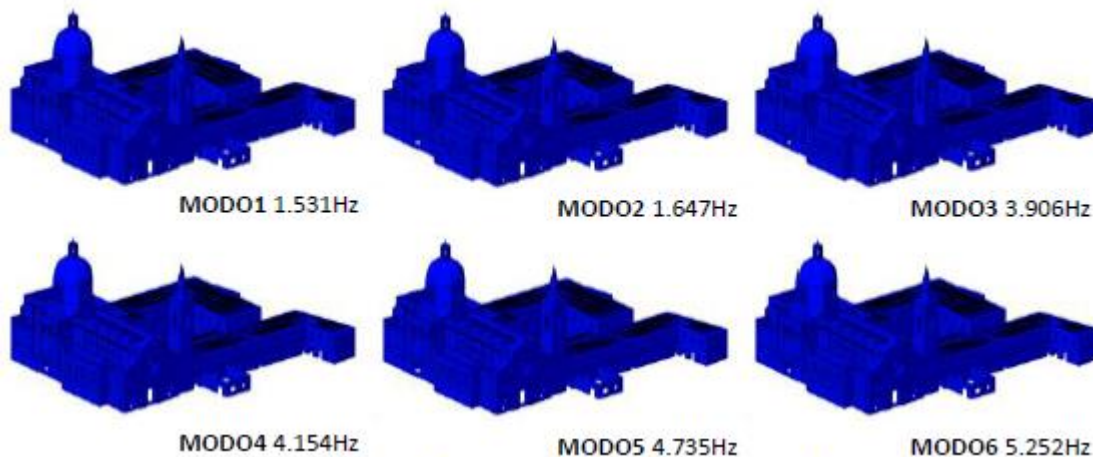


Figura 4 Primi 6 Modi Analitici

## MODELLO SPERIMENTALE

Per identificare i parametri modali del modello sperimentale sono state effettuate diverse campagne di misura col sistema di monitoraggio delle vibrazioni **GEA System**.

Variando di volta in volta le posizioni dei sensori, avendo cura di lasciare almeno un sensore sempre nella medesima posizione durante le varie campagne di misura. Così da poter poi ricollegare le varie misurazioni.

Una volta ottenuti i dati di tipo raw si è proceduto all'identificazioni dei modi sperimentali con le varie tecniche di stabilizzazione. (SSI FDD)

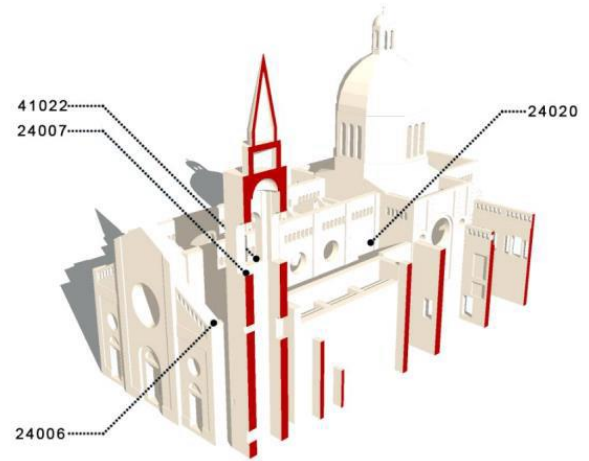


Figura 5 Esempio Setup Posizionamento Sensori

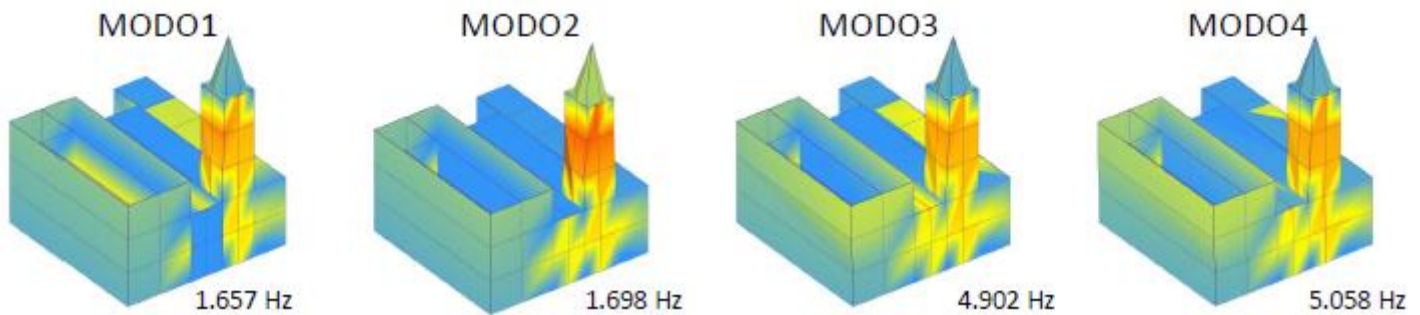


Figura 6 Primi 4 Modi Sperimentali

## MODEL UPDATING

Il Model Updating è una procedura attraverso la quale è possibile migliorare il comportamento di un modello preliminare correggendo errori legati alle assunzioni fatte nella sua formulazione.

Per il conseguimento di questo scopo è fondamentale il ruolo svolto dall'analisi modale sperimentale che permette l'identificazione della struttura a partire dall'elaborazione del segnale accelerometrico registrato durante l'esecuzione delle prove dinamiche.

Lo step successivo è la scelta dei parametri da tarare per ciascun macro-elemento; questa fase è molto delicata poiché influenza enormemente la qualità dei risultati ottenuti. Inoltre, il numero di parametri da tarare deve essere limitato al fine di evitare mal condizionamenti. In generale nella parametrizzazione si attribuiscono delle variabili a singoli elementi o a gruppi di stesse caratteristiche e le si fanno variare entro un certo range.

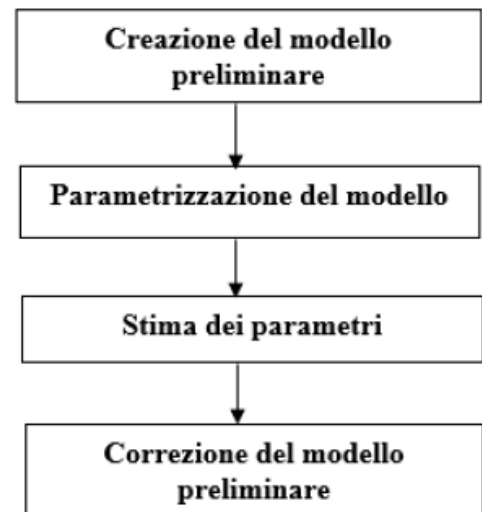


Figura 7 Flow Chart Model Updating

Un altro momento importante nel Model Updating è il confronto tra i dati sperimentali e quelli ottenuti per via numerica dal FEM. La delicatezza di questo passaggio è dovuta al fatto che, essendo i gradi di libertà della struttura nel modello molti di più rispetto a quelli strumentati e avendo inoltre ipotizzato nullo lo smorzamento, la comparazione fra questi dati risulta essere molto complessa. Infatti, il confronto fra i modi di vibrare teorici e quelli sperimentali avviene alla luce del coefficiente MAC variabile tra 0 e 1. Infine, l'ultimo passaggio è la calibrazione del modello di partenza attraverso la stima dei parametri meccanici corretti. Questo può avvenire sia in un singolo step (è il caso dei metodi diretti) che in maniera iterativa (metodi indiretti) e dipende dalla tecnica di ottimizzazione scelta fra quelle possibili.

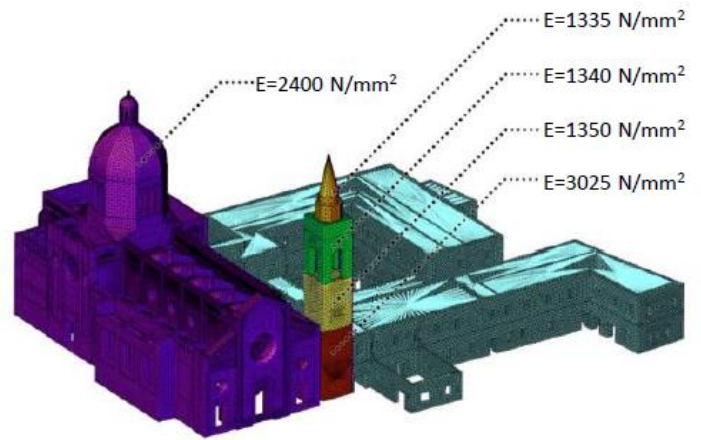


Figura 8 Modello FEM Calibrato

## CONCLUSIONI

La conoscenza dinamica degli edifici storici risulta assai difficoltosa soprattutto riguardo i parametri dei materiali che, nel corso del tempo, possono subire variazioni significative.

I soli modelli FEM non riescono a rispondere in maniera esauriente a questa necessità. Avendo, per loro natura, limiti intrinseci come la mancata presa in considerazione dello smorzamento. (oppure forzando la diagonalizzazione)

La definizione di un sistema di monitoraggio dinamico permanente ha il doppio vantaggio di valutare come evolvono i parametri modali della struttura ed eseguire un monitoraggio permanente nel medesimo istante.

## COLLABORAZIONI

Lavoro Frutto di una stretta collaborazione con Novatest srl e Università Politecnica delle Marche, Dipartimento di Ingegneria Civile, Edile e Architettura, sezione Strutture. Si ringrazia inoltre il comune di Treia per la gentile concessione ed il laureando Simone Antonucci.

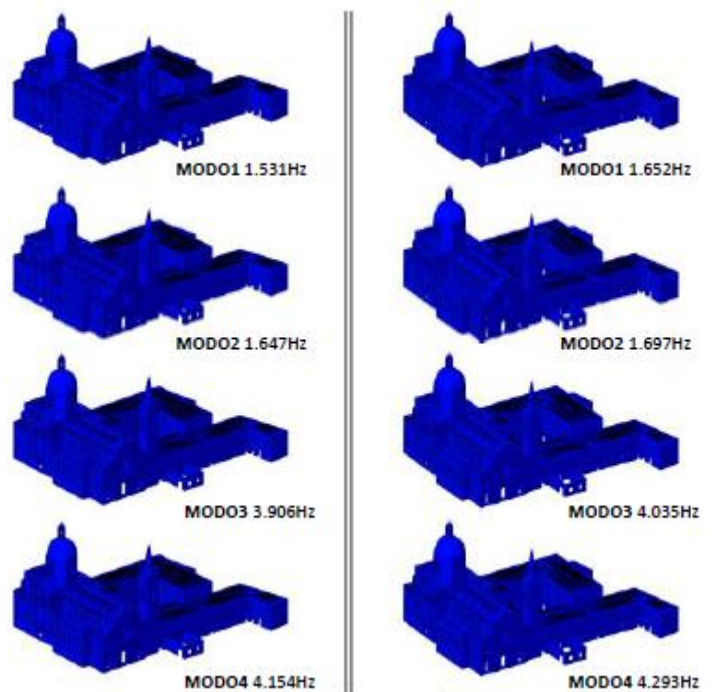


Figura 9 Comparazione tra modelli non calibrati (sx) e calibrati dx)



Sequoia IT s.r.l.

Via Einaudi, 25 -10024 Moncalieri (TO) – ITALY

t.+39 011 640.2992 f.+39 011 640.2985 capitale sociale € 110.000,00 i.v.

[www.sequoia.it](http://www.sequoia.it)