

***MADLab-ER – LEZIONI DAL SISMA 2012***

*The days of the earthquake. Lessons from the tragedy.*  
L'esperienza del terremoto dell'Emilia, dopo l'ora più buia  
LEZIONE 4| MODENA - Giovedì 9 Aprile 2026  
**Alessandro Capra** |UNIMORE) **Donato Sabia** |PoliTO)

***Il monitoraggio statico e dinamico***

**Monitoraggio dinamico:**  
**La Torre della Ghirlandina e il Duomo di Modena**  
Donato Sabia, Politecnico di Torino



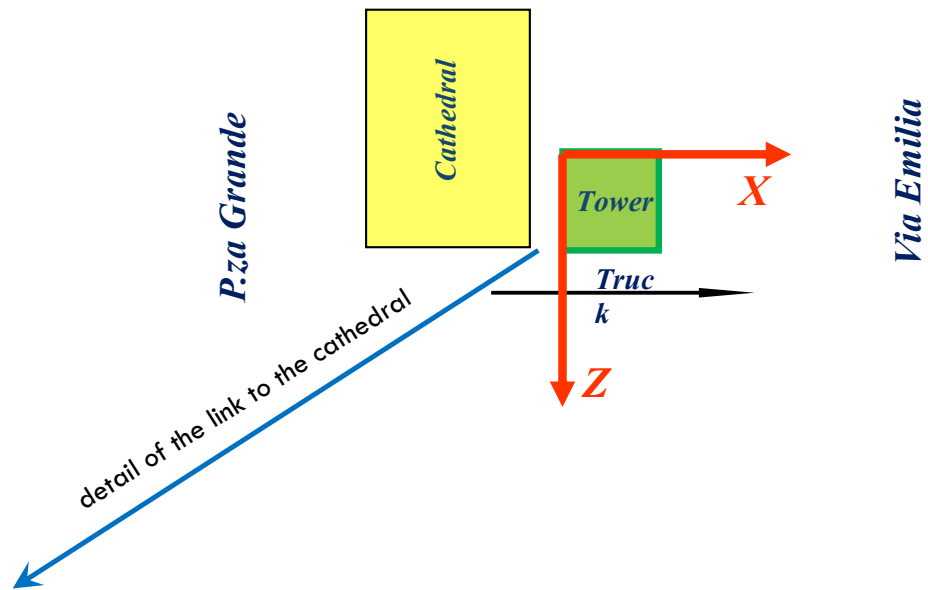
***Ghirlandina Tower – Modena***  
**Sperimentazione ed Identificazione Dinamica**  
Renato Lancellotta, Donato Sabia



*Prove sperimentali dinamiche*

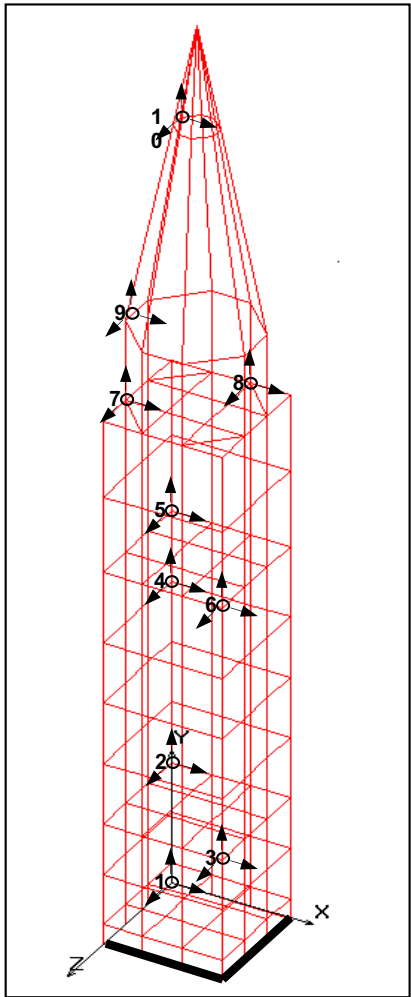
Le prove sono state eseguite nelle tre seguenti condizioni:

- **amvibrazioni ambientali**
- **vibravibrazioni delle campane**
- **Passaggio di un autocarro**



## Experimental Dynamic Tests

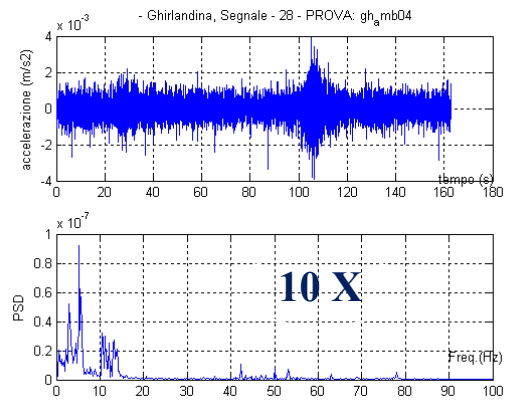
## Ghirlandina Tower – Modena



Sensor position

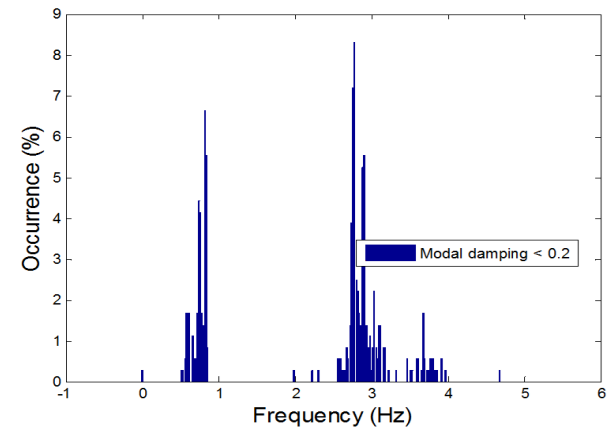
| Pos. | x(m) | y(m) | z(m) |
|------|------|------|------|
| 1    | 0    | -2   | 0    |
| 2    | 0    | 10   | 0    |
| 3    | 10   | 10   | 10   |
| 4    | 0    | 28   | 0    |
| 5    | 0    | 35   | 0    |
| 6    | 10   | 35   | 10   |
| 7    | 0    | 50   | 7    |
| 8    | 7    | 50   | 0    |
| 9    | 0    | 68   | 7    |
| 10   | 4    | 77   | 4    |

### Ambient Vibrations

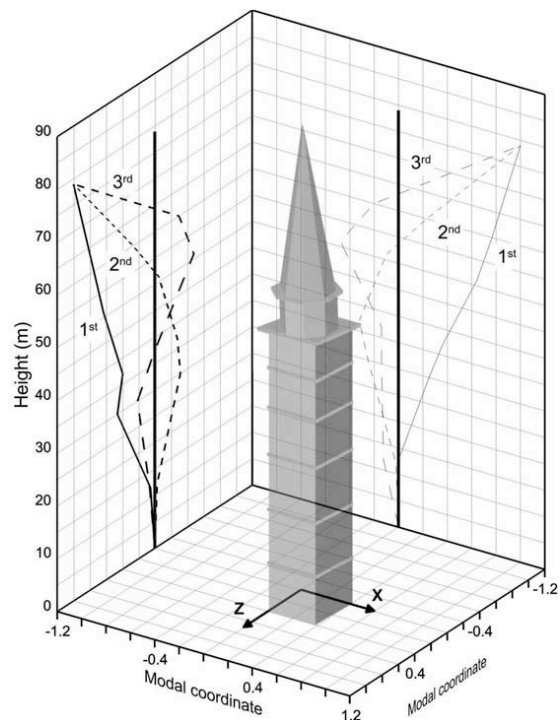


Identificazione Dinamica eseguita con:

- **ARMAV** (Auto Regressive Moving Average);
- **ERA** (Eigensystem Realization Algorithm);
- **SSIM** (Stochastic Subspace Identification Method)



## Prove dinamiche sperimentali



## Ghirlandina Tower – Modena

### Modi di vibrare

| Mode 1         |           | Mode 2         |           |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| Frequency (Hz) | Damping % | Frequency (Hz) | Damping % |
| 0.74           | 1.43      | 0.85           | 1.24      |

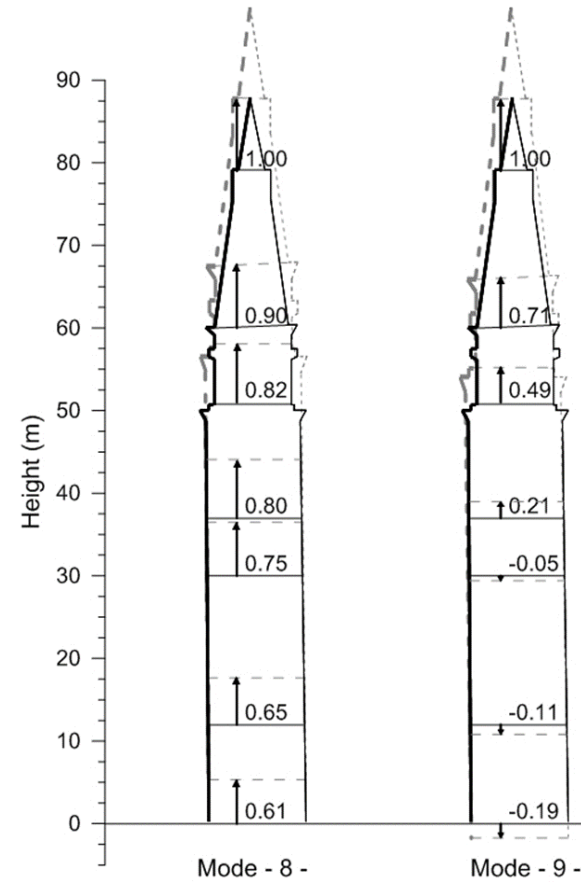
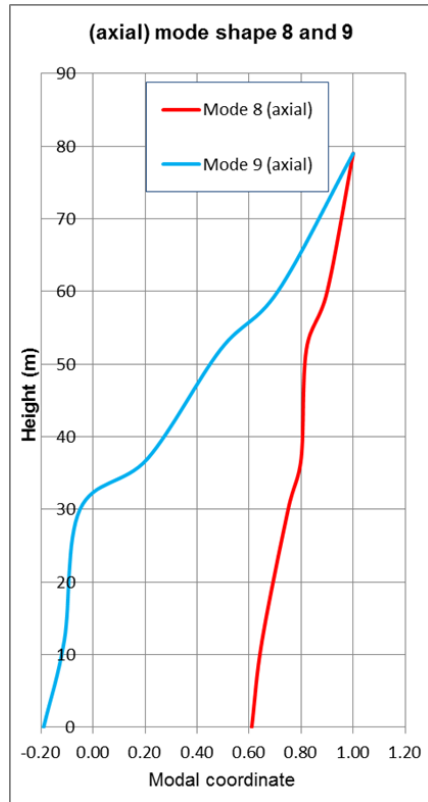
| Mode 3         |           | Mode 4         |           |
|----------------|-----------|----------------|-----------|
| Frequency (Hz) | Damping % | Frequency (Hz) | Damping % |
| 2.77           | 2.47      | 2.99           | 4.01      |

| Mode 5         |           | Mode 6         |           | Mode 7         |           | Mode 8         |           | Mode 9         |           |
|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|----------------|-----------|
| Frequency (Hz) | Damping % | Frequency (Hz) | Damping % | Frequency (Hz) | Damping % | Frequency (Hz) | Damping % | Frequency (Hz) | Damping % |
| 3.66           | 3.76      | 4.81           | 2.77      | 5.25           | 1.66      | 4.51           | 7.36      | 9.79           | 7.95      |

Renato Lancellotta, Donato Sabia

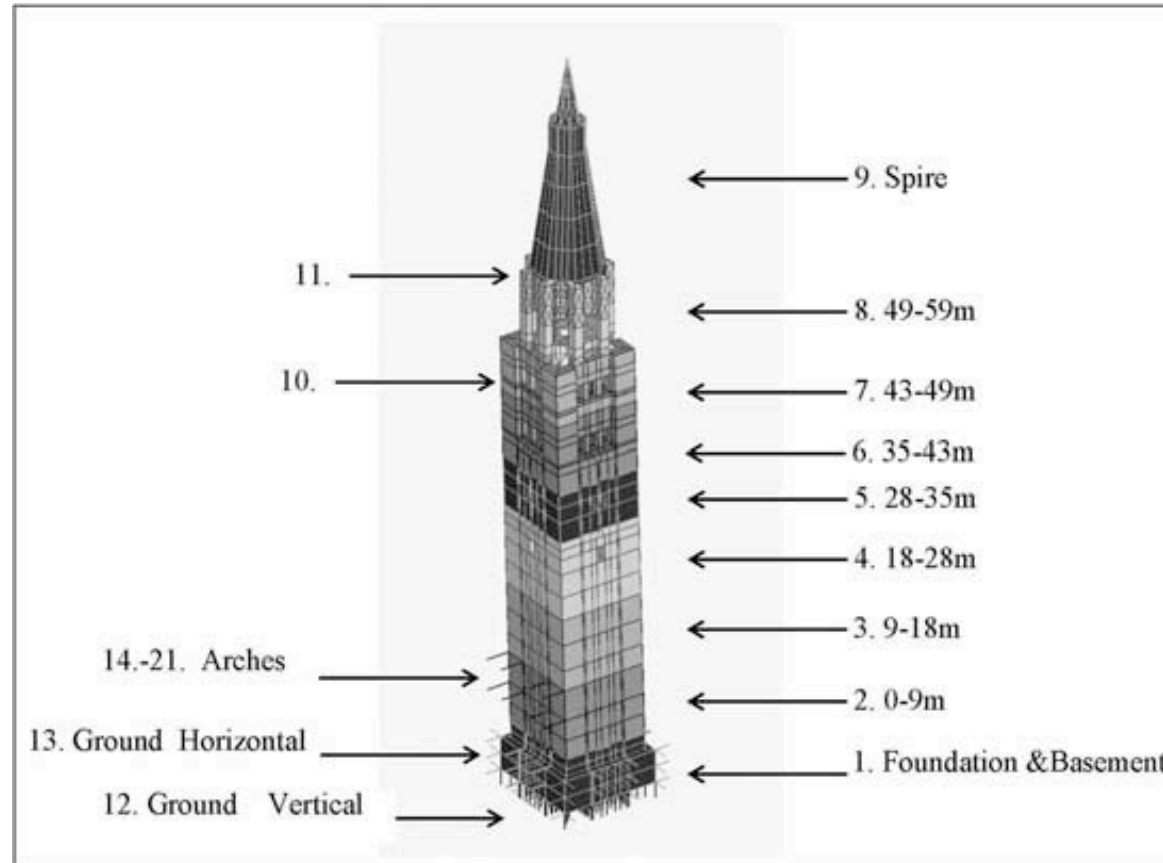
**Ghirlandina Tower – Modena**

**Modi di vibrare in direzione verticale**



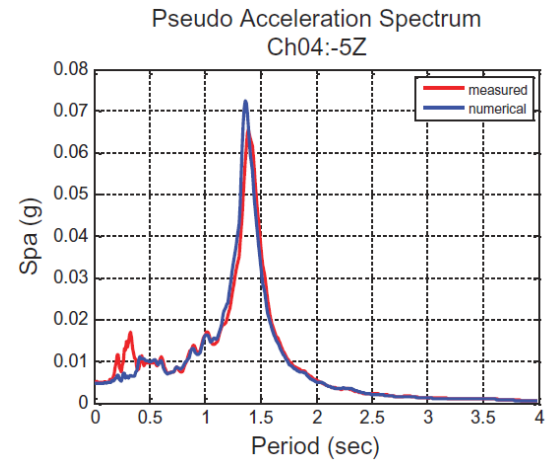
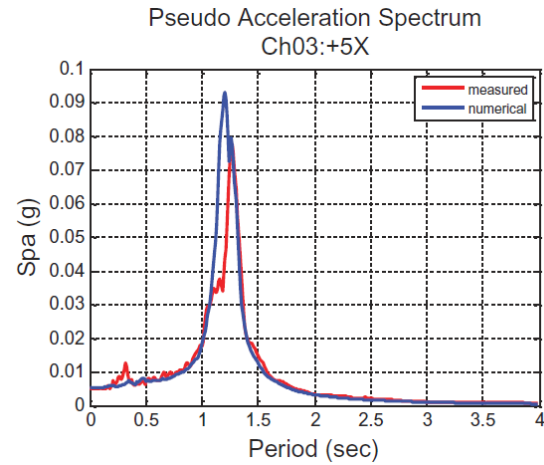
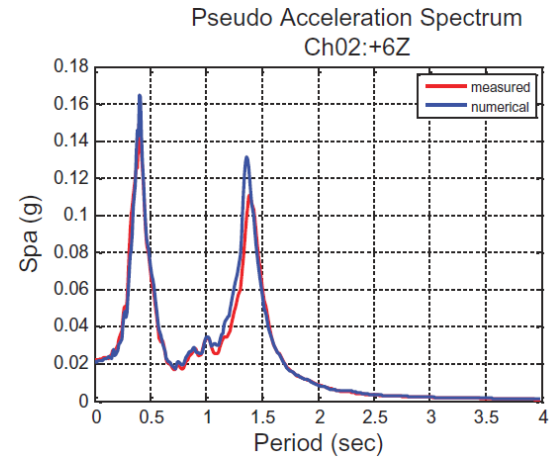
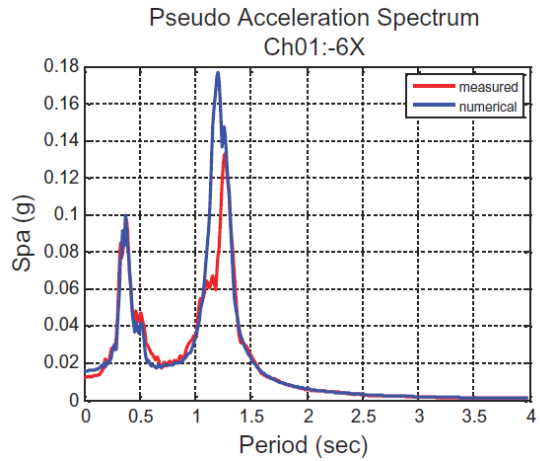
**Ghirlandina Tower – Modena**

*Model Updating*



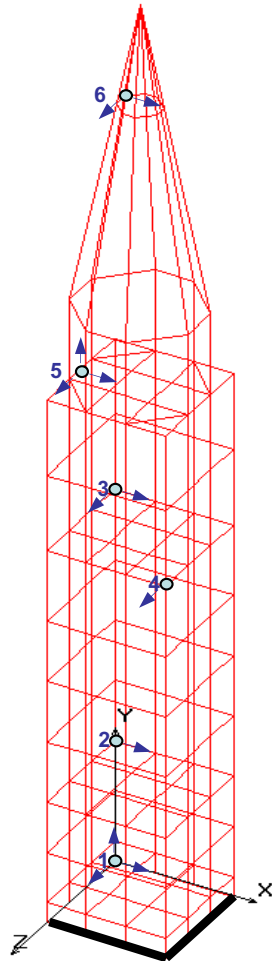
## Model Updating

## Ghirlandina Tower – Modena



## Monitoraggio Dinamico Continuo

### Ghirlandina Tower – Modena



| Measuring points | X(m) | y(m) | Z(m) |
|------------------|------|------|------|
| 1                | 0    | -1   | 0    |
| 2                | 0    | 10   | 0    |
| 3                | 0    | 35   | 0    |
| 4                | 10   | 35   | 10   |
| 5                | 0    | 50   | 3    |
| 6                | 4    | 77   | 4    |

- 6 Punti di Misura
- 12 Accelerometri
- Frequenza di campionamento: 100 Hz

*Ghirlandina Tower – Modena*

## **Un approccio automatico per il monitoraggio strutturale di lungo termine (Machine Learning Approach)**

Giacomo Vincenzo De Marie, Donato Sabia  
Structural Health Monitoring, 2018

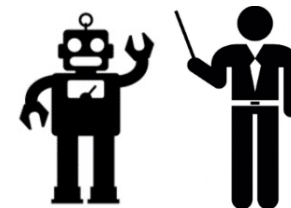
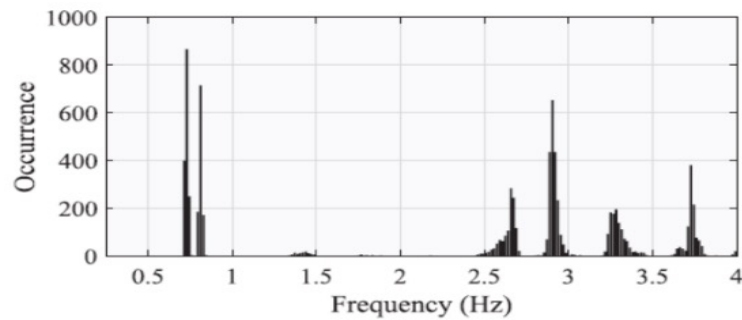
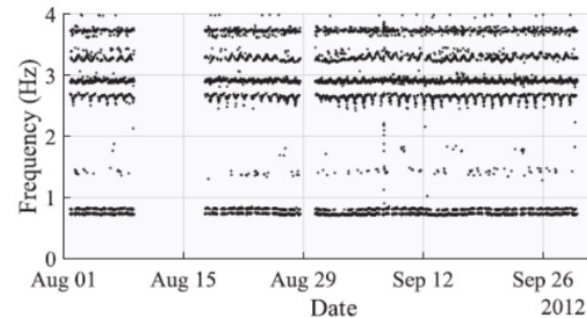
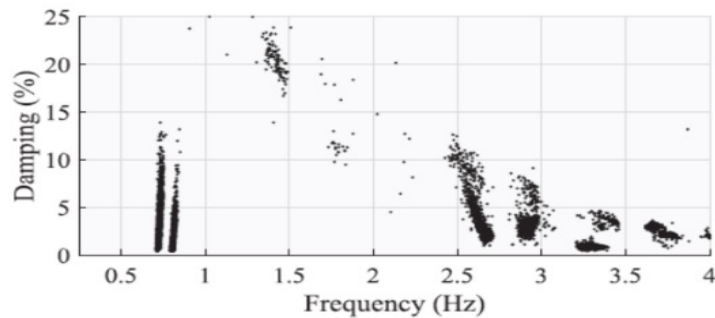
## THE MACHINE LEARNING APPROACH

### IDENTIFICAZIONE DINAMICA

Misure dal 1° Agosto Al 28 settembre 2012



1,829,952 Modi di vibrare da classificare

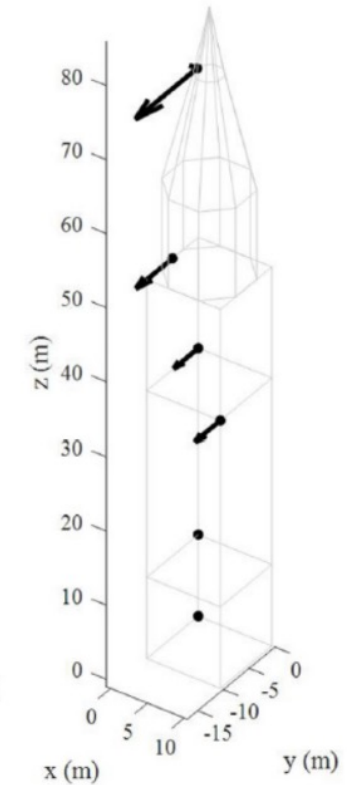
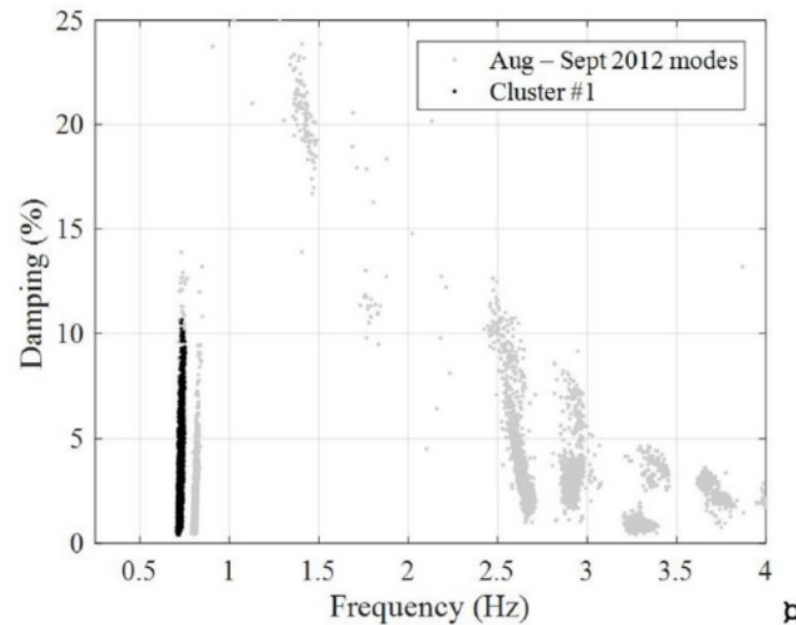


**Possiamo pensare di addestrare una macchina a farlo (Machine Learning)**

## THE MACHINE LEARNING APPROACH

### CLASSIFICAZIONE (CLUSTERING)

I Modi di Vibrare identificati in un periodo di tempo limitato vengono raggruppati in base alle frequenze naturali, ai valori di smorzamento e alle forme modali. Per ogni gruppo si decide se considerarlo importante e meritevole di monitoraggio.

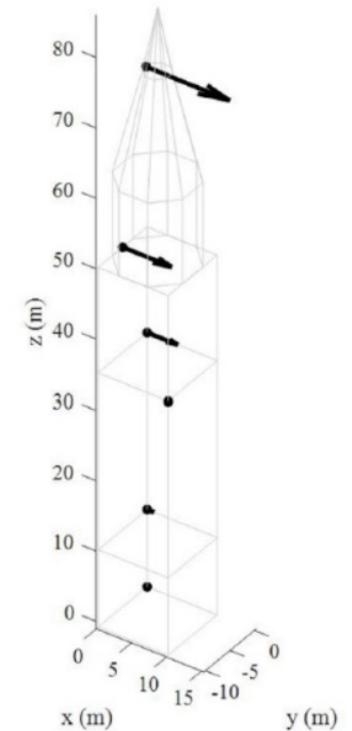
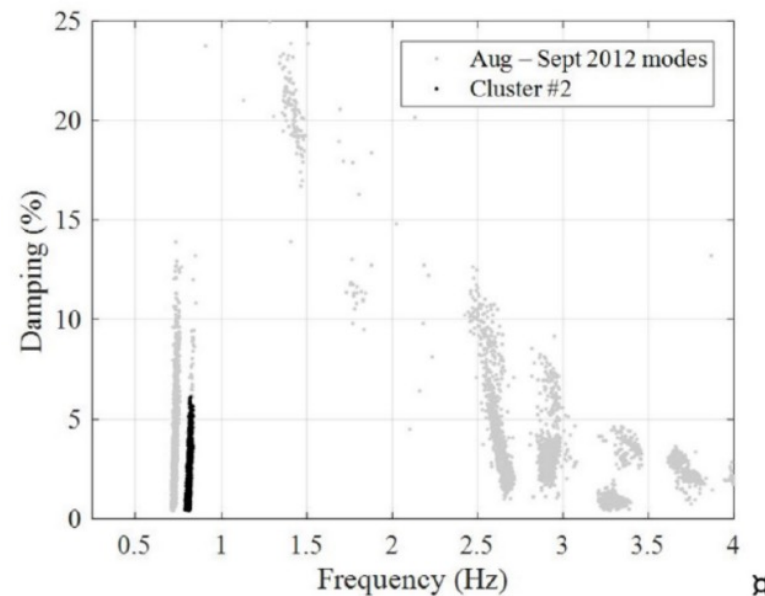


1<sup>st</sup> Modo flessionale (y-direction)

## THE MACHINE LEARNING APPROACH

### CLUSTERING

I Modi di Vibrare identificati in un periodo di tempo limitato vengono raggruppati in base alle frequenze naturali, ai valori di smorzamento e alle forme modali. Per ogni gruppo si decide se considerarlo importante e meritevole di monitoraggio.

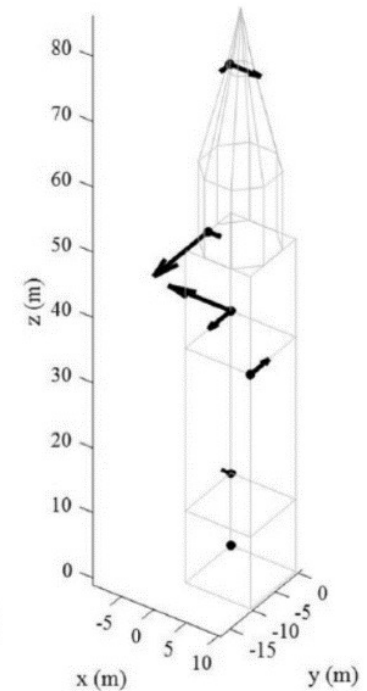
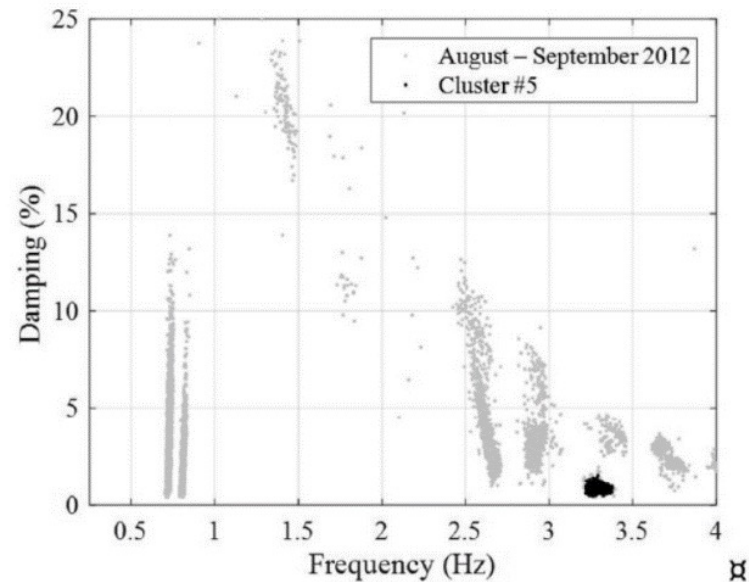


1<sup>st</sup> benModo flessionale (x-direction)

## THE MACHINE LEARNING APPROACH

### CLUSTERING

I Modi di Vibrare identificati in un periodo di tempo limitato vengono raggruppati in base alle frequenze naturali, ai valori di smorzamento e alle forme modali. Per ogni gruppo si decide se considerarlo importante e meritevole di monitoraggio.



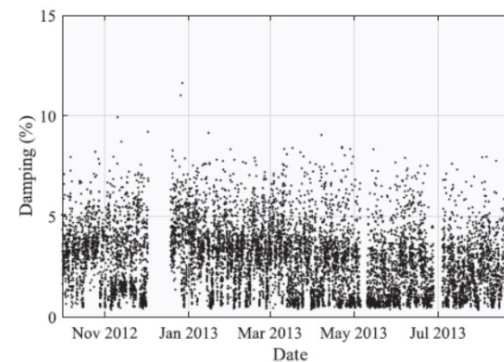
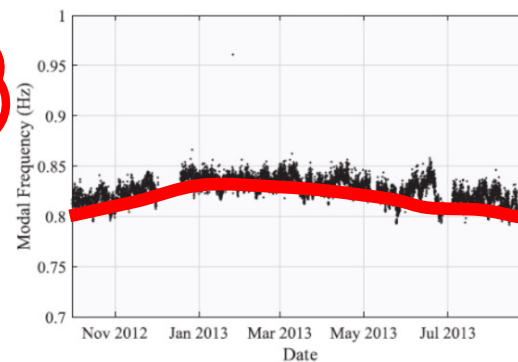
1<sup>st</sup> Modo torsionale

## THE MACHINE LEARNING APPROACH

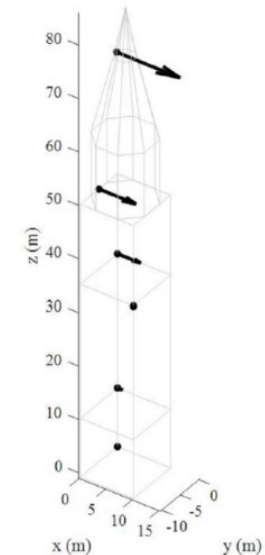
### MONITORAGGIO AUTOMATICO

Sulla base dei cluster trovati come risultato della fase precedente, viene costruito un classificatore. Ogni nuovo modo di vibrare identificato viene classificato automaticamente e, ripetendo il processo nel tempo, si ottiene il monitoraggio dei modi di vibrare rilevanti.

#### Un anno di monitoraggio automatico:



1<sup>st</sup> Modo flessionale (x-direction)

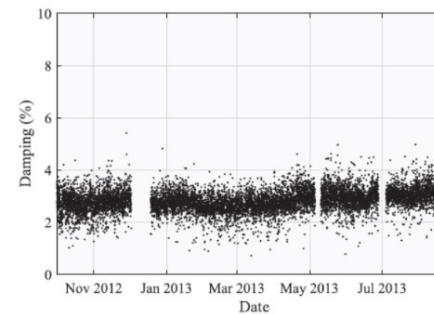
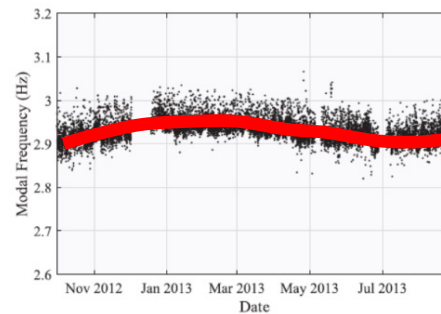
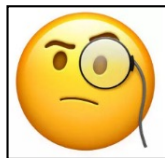


## THE MACHINE LEARNING APPROACH

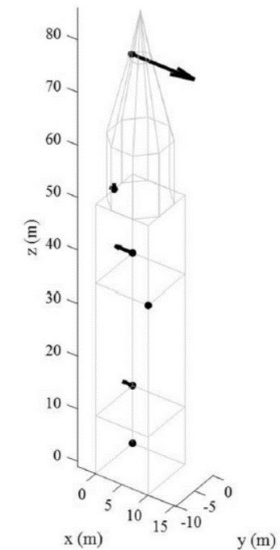
### MONITORAGGIO AUTOMATICO

Sulla base dei cluster trovati come risultato della fase precedente, viene costruito un classificatore. Ogni nuovo modo di vibrare identificato viene classificato automaticamente e, ripetendo il processo nel tempo, si ottiene il monitoraggio dei modi di vibrare rilevanti.

#### Un anno di monitoraggio automatico:



2<sup>nd</sup> Modo flessionale (x-direction)

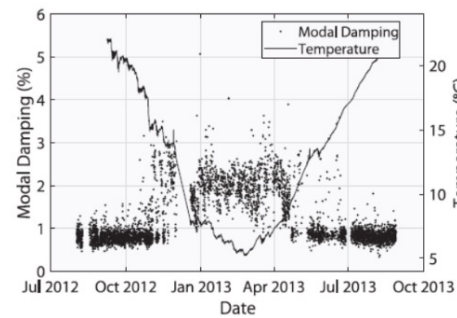
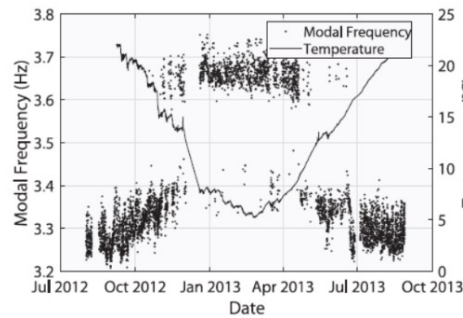


## THE MACHINE LEARNING APPROACH

### MONITORAGGIO AUTOMATICO

Sulla base dei cluster trovati come risultato della fase precedente, viene costruito un classificatore. Ogni nuovo modo di vibrare identificato viene classificato automaticamente e, ripetendo il processo nel tempo, si ottiene il monitoraggio dei modi di vibrare rilevanti.

#### Un anno di monitoraggio automatico:



1<sup>st</sup> Modo torsionale



Dettaglio collegamento con la Cattedrale

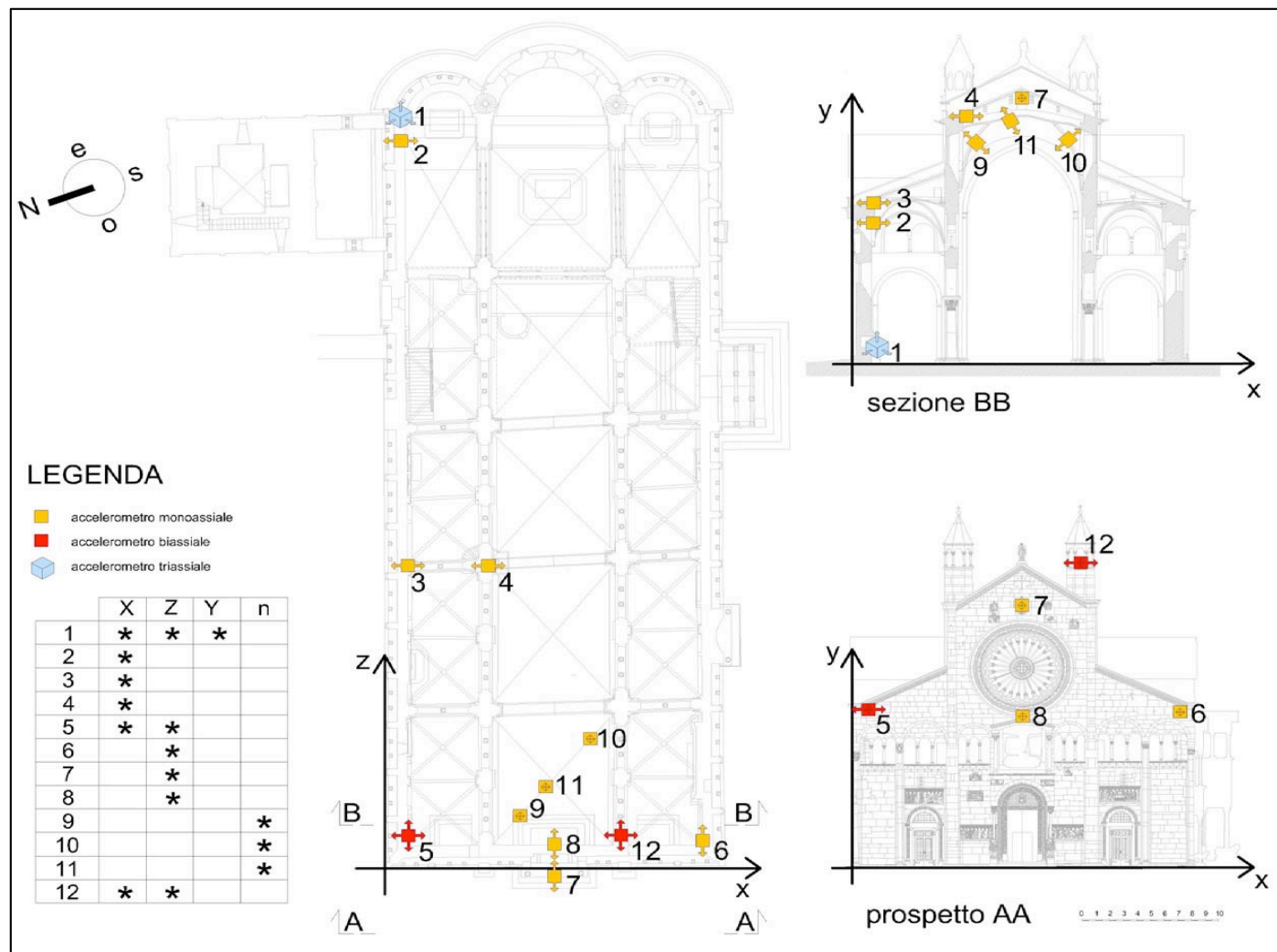
***Duomo di Modena – Modena***  
**Sperimentazione e Identificazione Dinamica**



**Duomo di Modena – Modena**  
**Sperimentazione e Identificazione Dinamica**

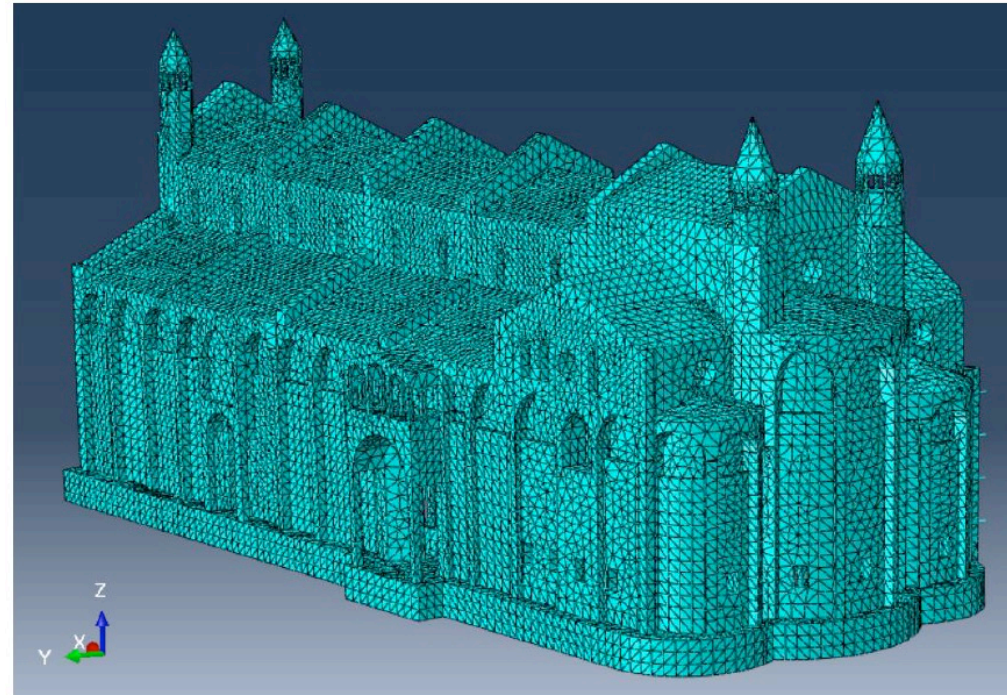
Sistema di monitoraggio:

- 12 punti di misura
- 16 accelerometri



**Duomo di Modena – Modena**  
**Identificazione Dinamica e Model Updating**

Modello Numerico FEM



Model Updating:

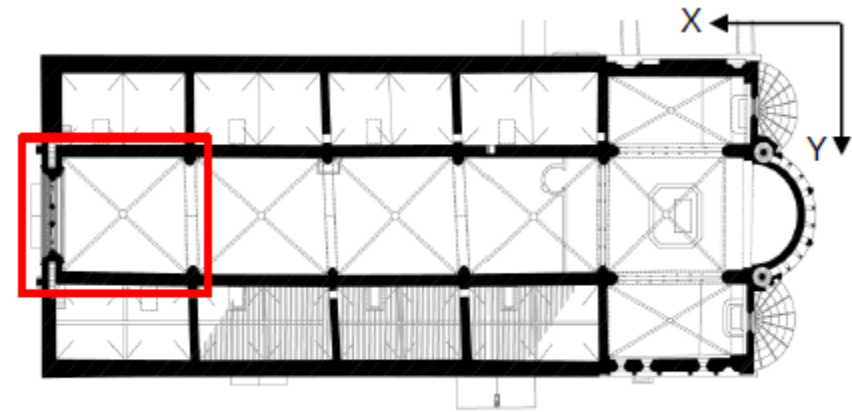
$$MAC_{jk} = \frac{|\phi_{mj}^T \phi_{ak}|^2}{(\phi_{mk}^T \phi_{ak})(\phi_{mj}^T \phi_{aj})}$$

*Experimental and Numerical data – Initial and Updated model*

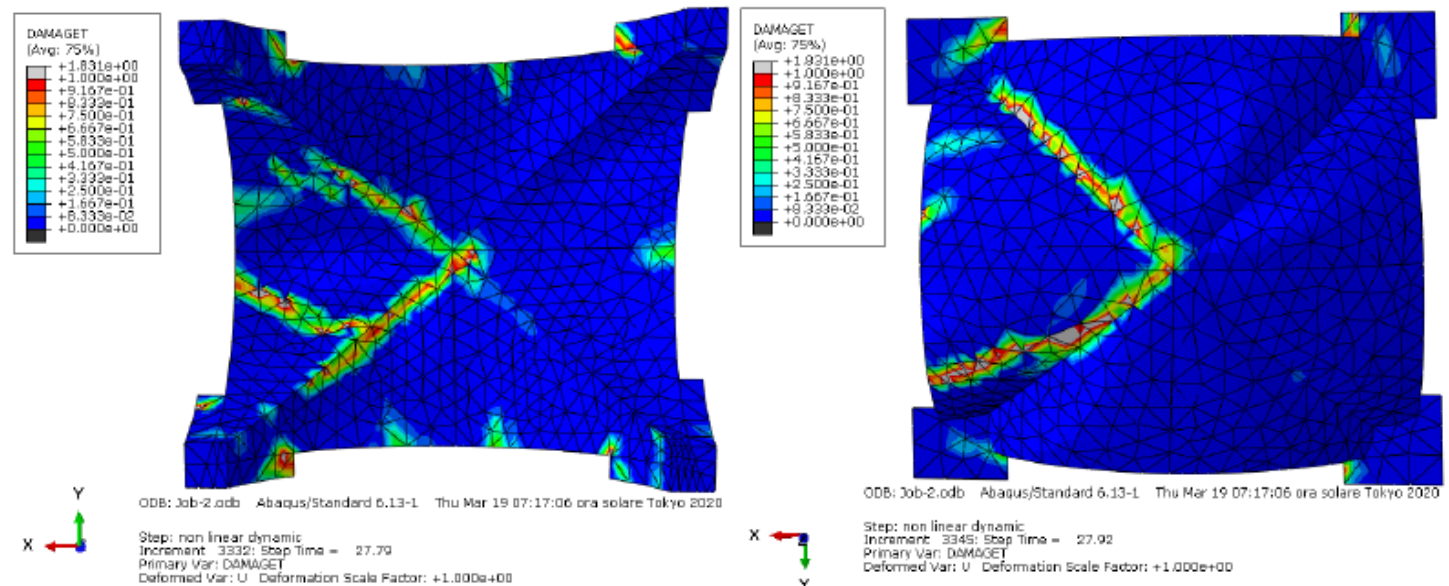
| Vibration Mode | Experimental   | Numerical Initial model |           | MAC  | Numerical Updated model |           |      |
|----------------|----------------|-------------------------|-----------|------|-------------------------|-----------|------|
|                | Frequency (Hz) | Frequency (Hz)          | Error (%) |      | Frequency (Hz)          | Error (%) |      |
| 1              | 1.99           | 2.22                    | 11.56     | 0.96 | 1.99                    | 0.00      | 0.97 |
| 2              | -              | 3.56                    | -         | -    | -                       | -         | -    |
| 3              | 3.20           | 4.01                    | 25.31     | 0.73 | 3.20                    | 0.00      | 0.76 |
| 4              | 3.41           | 4.69                    | 37.54     | 0.94 | 3.41                    | 0.00      | 0.95 |

**Duomo di Modena – Modena**  
**Scenari di Danno sulle Strutture Voltate**

Danneggiamento rilevato  
Terremoto Finale Emilia 2012

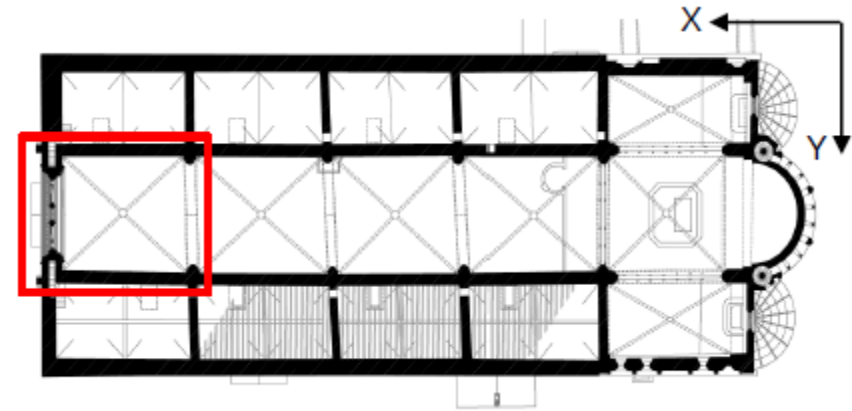


Danneggiamento simulato  
Terremoto Finale Emilia 2012



**Duomo di Modena – Modena**  
**Scenari di Danno sulle Strutture Voltate**

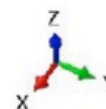
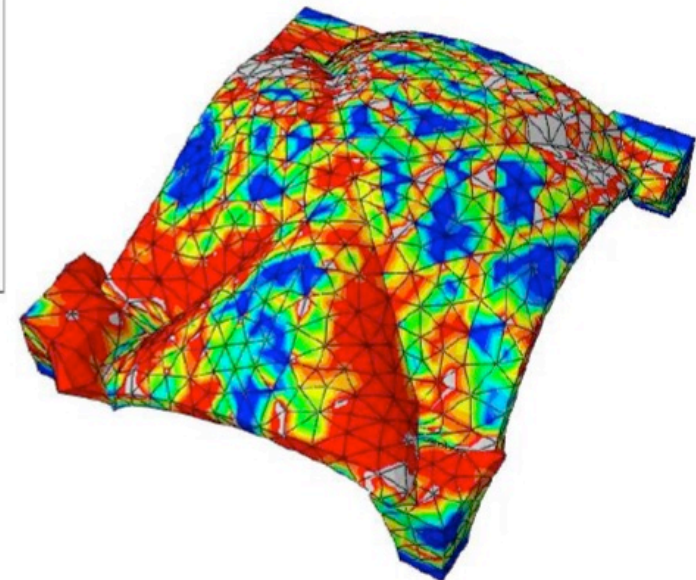
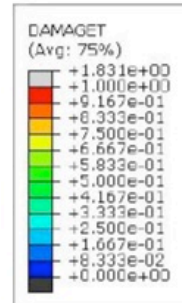
Simulazione Collasso Volta:



Analisi Dinamica Non Lineare sul modello calibrato:

- Input:  
Storie temporali di accelerazioni alla base della volta, ottenute dall'amplificazione delle storie temporali di accelerazione alla base registrate durante il terremoto del 2012.
- Analisi: incrementale
- Output: Condizione ultima di collasso

**Condizione Ultima:**  
**Incremento accelerazioni = 1,6**



## CONCLUSIONI

- ✓ La sperimentazione e l'identificazione Dinamica permettono di raccogliere una grande quantità di informazioni, di cogliere la risposta dinamica globale di una struttura e di stimarne le caratteristiche meccaniche.
- ✓ La grande quantità di informazioni permette di calibrare un modello numerico in grado di riprodurre la risposta sperimentale misurata e quindi utilizzabile per valutazioni affidabili di capacità.
- ✓ Il monitoraggio permette di controllare la risposta nel tempo, rilevando eventuali modificazioni dovute a danneggiamenti o fenomeni di degrado.
- ✓ La metodologia proposta per l'identificazione automatica delle modalità di vibrazione di una struttura implementa un approccio concreto per il monitoraggio continuo a lungo termine dello stato di salute delle strutture.
- ✓ Anche se il metodo è stato applicato offline a un ampio database di misurazioni, consente naturalmente l'estensione al monitoraggio online del flusso di dati