



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

Università di Firenze
Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



Structural Health Monitoring vs Damage detection

Gianni Bartoli

Dip. di Ingegneria Civile e Ambientale



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



Structural Health Monitoring SHM



Structural Health Monitoring (SHM):

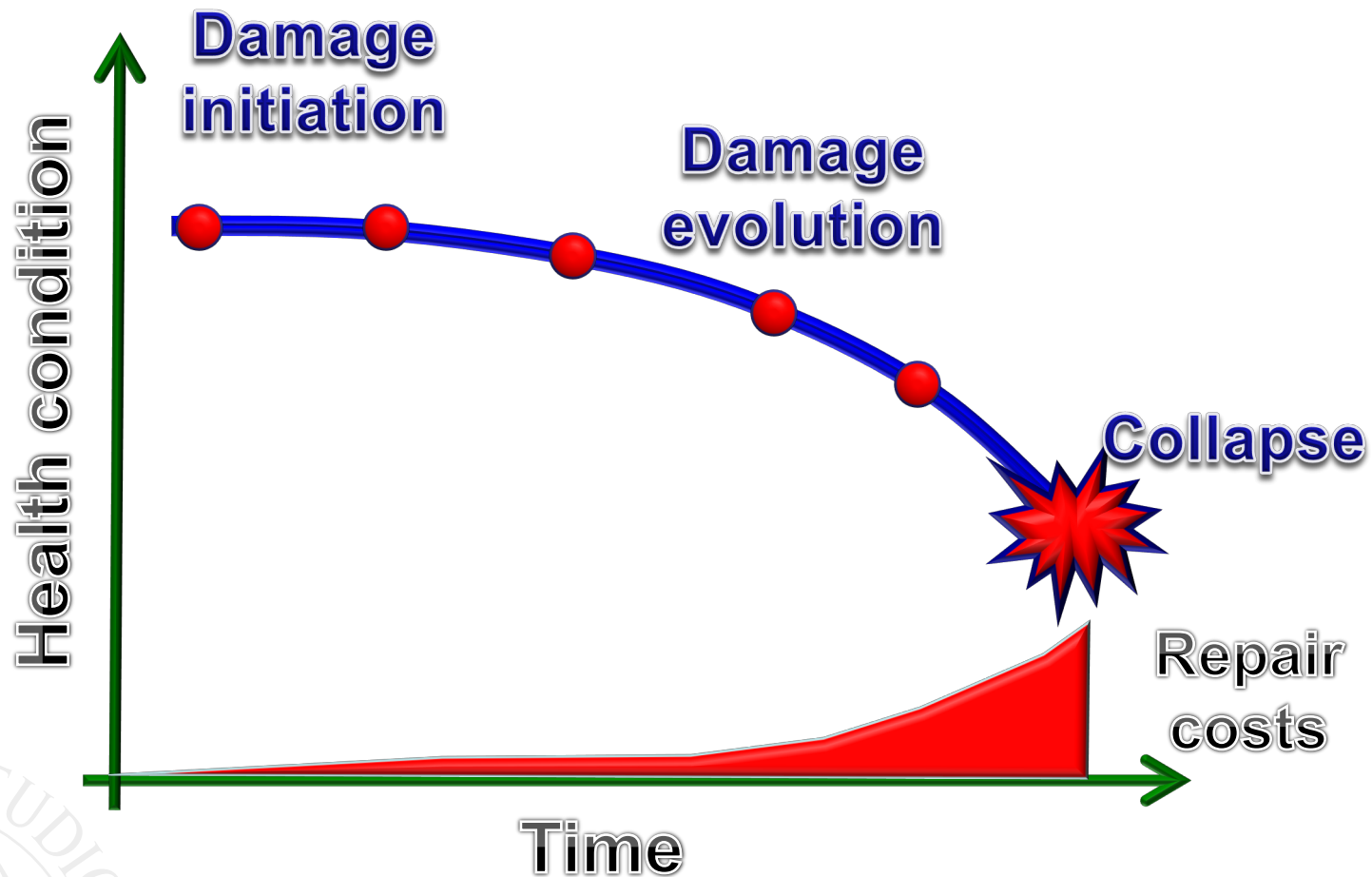
Processo di implementazione di una strategia di identificazione del “danno” basata sull’osservazione (misura) della risposta dinamica della struttura, l’estrazione di caratteristiche di danno e la loro analisi statistica al fine di valutare lo stato di salute attuale

Danno:

Qualunque cambiamento, intenzionalmente indotto o meno, nelle proprietà geometriche e meccaniche di una struttura, incluse le variazioni delle condizioni di vincolo e delle connessioni, che influenza negativamente le prestazioni presenti e future della struttura stessa



Manutenzione strutturale



SHM e manutenzione

Reattiva:

si interviene solo quando qualche componente critico si danneggia

Programmata (time based):

componenti critiche sono mantenute o sostituite a intervalli regolari
indipendentemente dalle loro effettive condizioni

Proattiva (condition based):

Il sistema di monitoraggio provvede a identificare il danno e invia l'allerta in modo da intraprendere le necessarie azioni correttive atte ad evitare che il danno progredisca fino a un livello critico

Vibration-based SHM

Le fasi

1. Valutazione operativa
2. Acquisizione dati
3. Selezione degli indici di danno
4. Modellazione statistica per l'identificazione del danno

Acquisizione dati



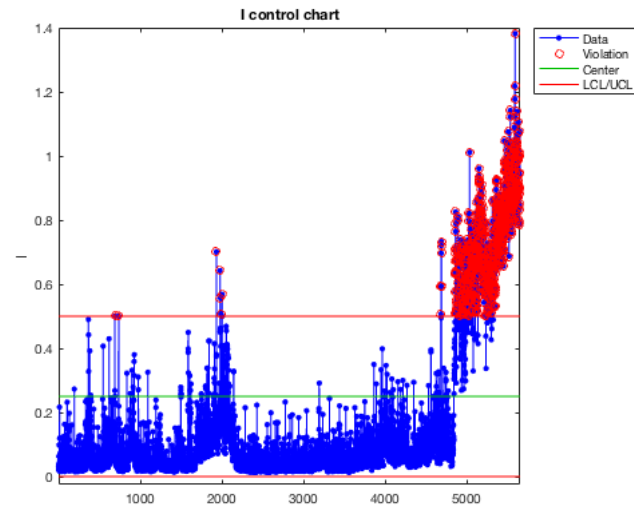
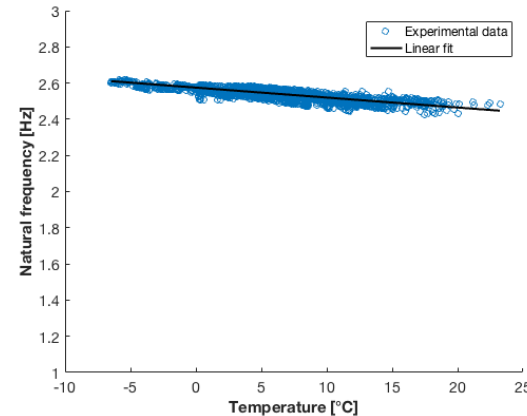
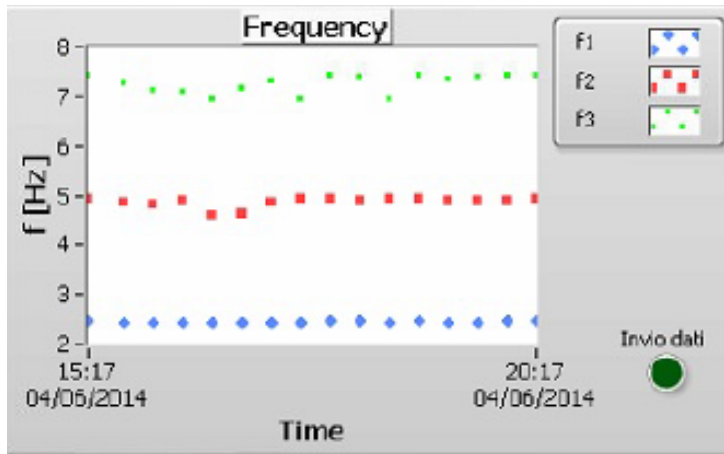
N.B.: I sensori non misurano il danno!!

Identificazione del danno

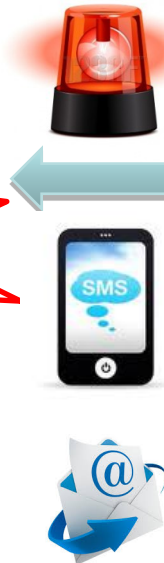
Classificazione di Rytter (1993)

1. Il danno è presente? (ESISTENZA)
2. Dove si trova il danno? (LOCALIZZAZIONE)
3. Che tipo di danno è? (TIPO)
4. Quanto severo è il danno? (ESTENSIONE)
5. Quanta vita utile rimane? (PROGNOSI)

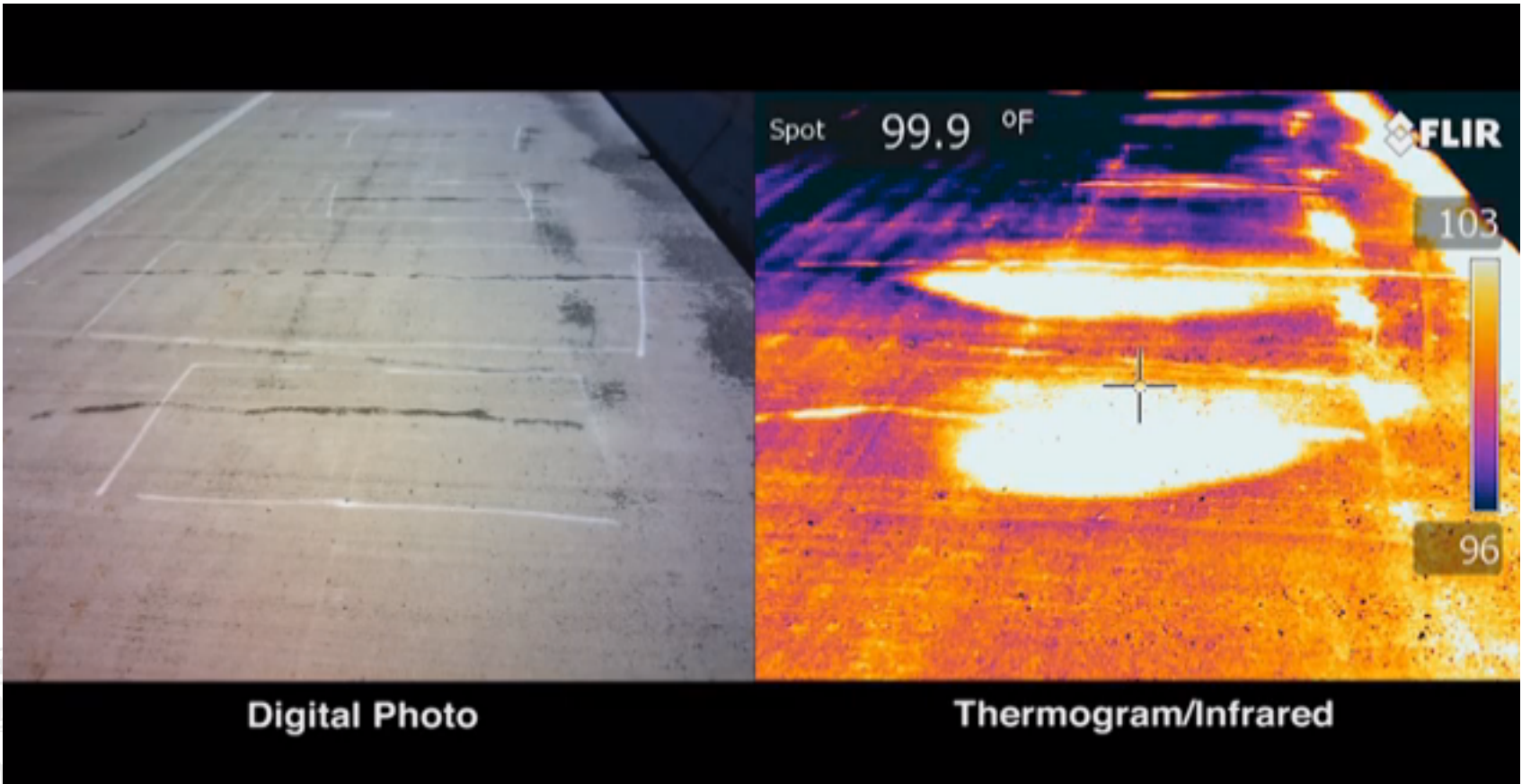
Sistema automatico?



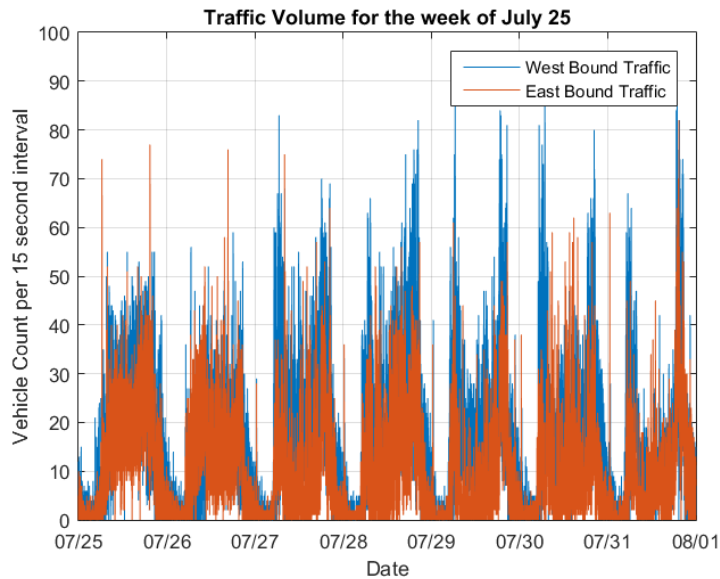
WARNING!!



Variabili Ambientali: temperatura



Variabili Ambientali: traffico





Caso studio

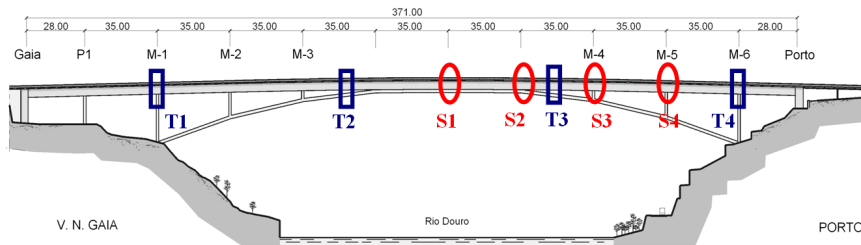
INFANTE D. HENRIQUE BRIDGE



Courtesy of Dr. Filipe Magalhaes, University of Porto

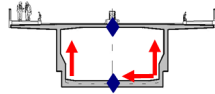


Courtesy of Dr. Filipe Magalhaes,
University of Porto



○ Sections with accelerometers

▭ Sections with temperature sensors



← Accelerometers

◆ Temperature sensors

$f = 0.810 \text{ Hz}$



$f = 1.135 \text{ Hz}$



$f = 1.405 \text{ Hz}$



$f = 1.993 \text{ Hz}$



$f = 2.212 \text{ Hz}$



$f = 3.013 \text{ Hz}$



$f = 3.490 \text{ Hz}$



$f = 3.734 \text{ Hz}$



$f = 0.770 \text{ Hz}$

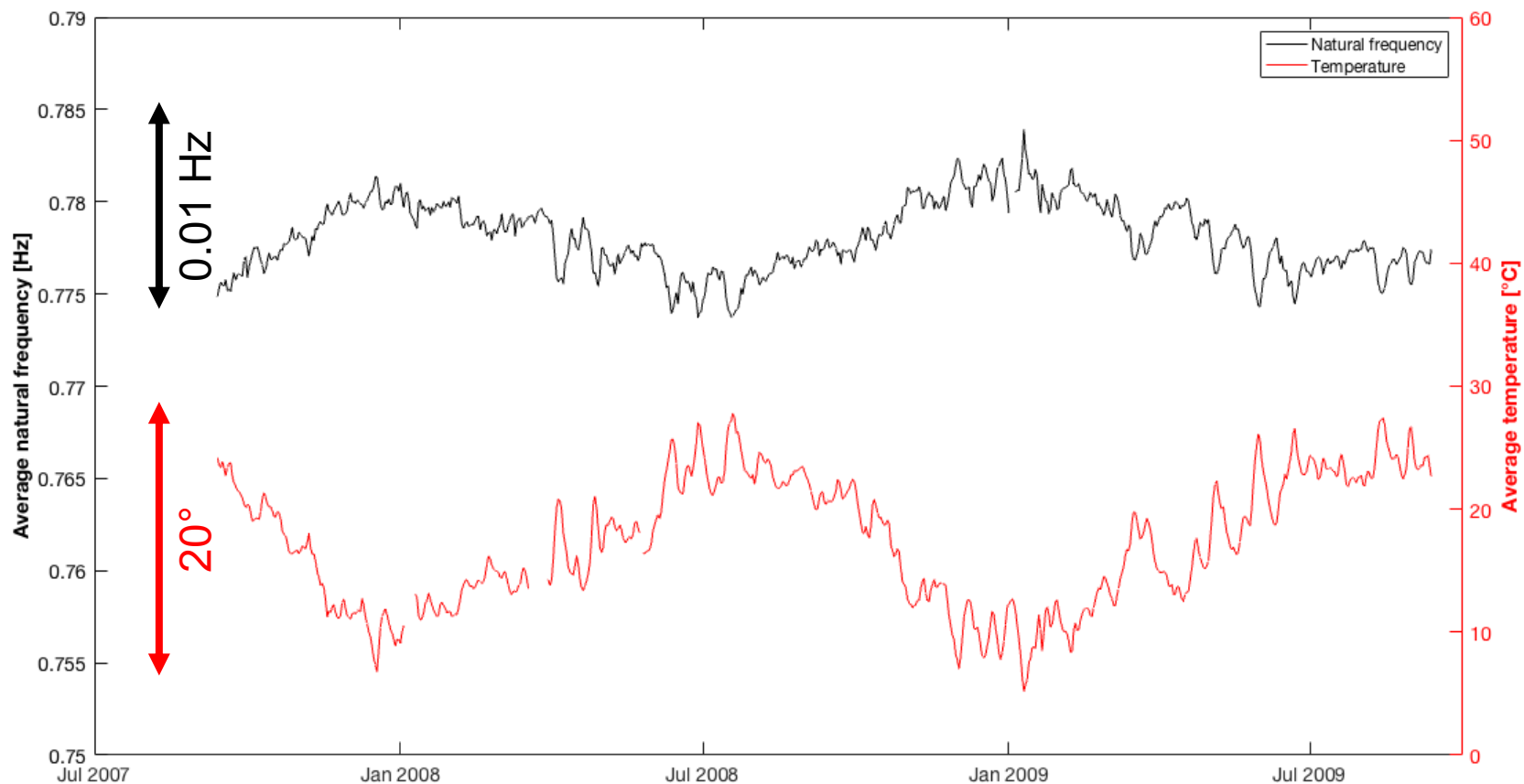


$f = 1.734 \text{ Hz}$



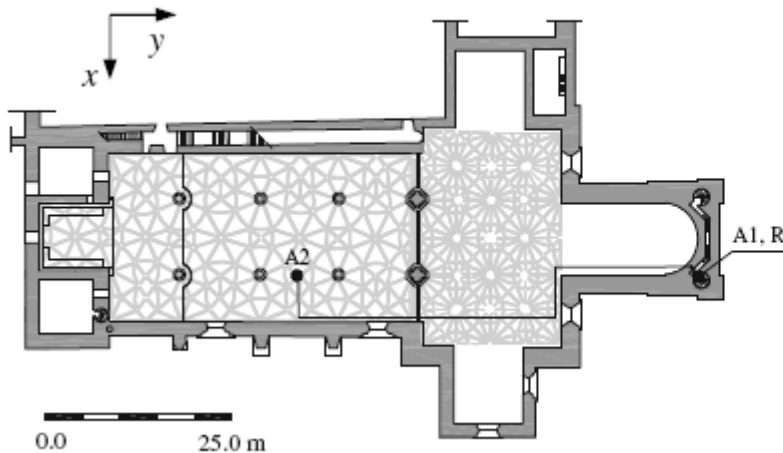
$f = 3.309 \text{ Hz}$





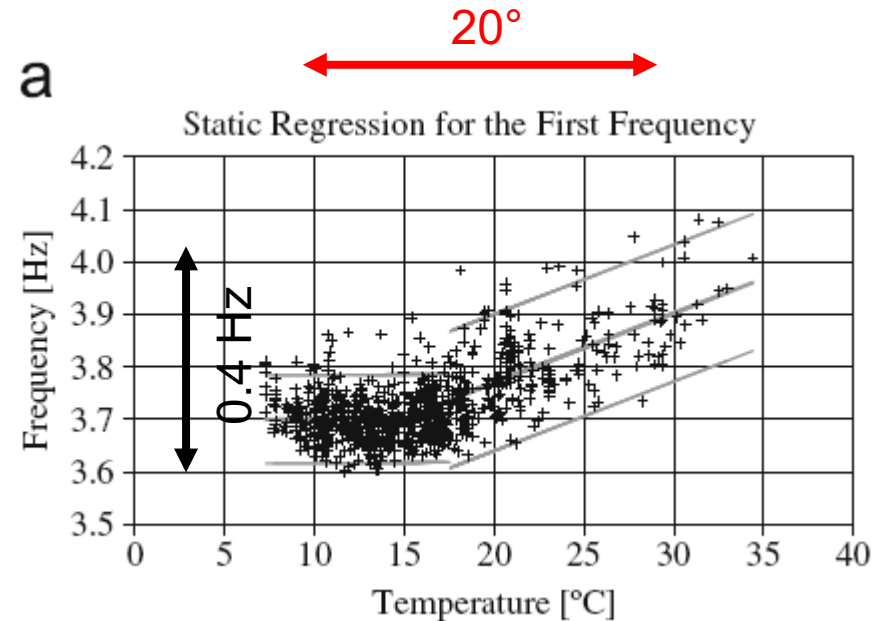
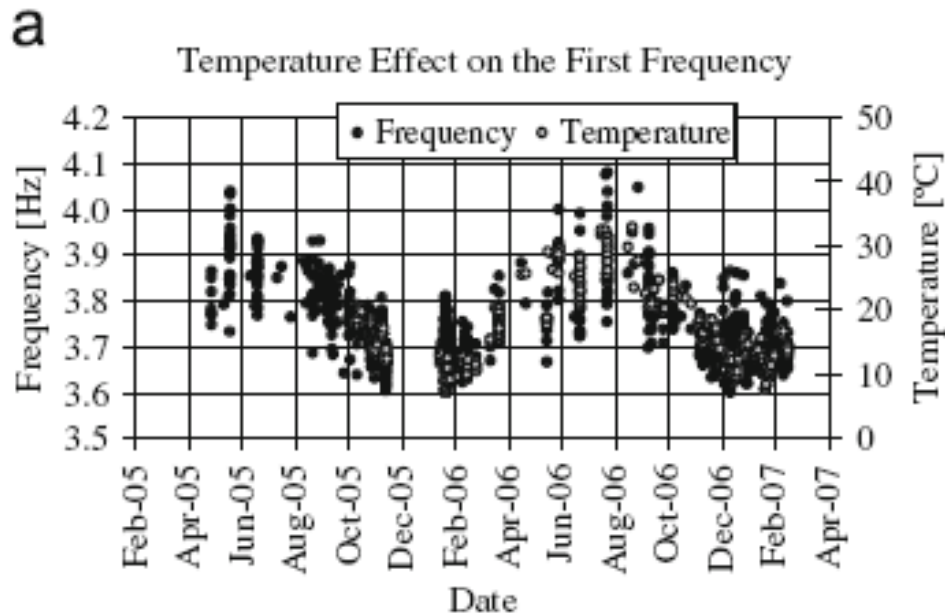
Influenza delle variazioni stagionali di temperatura

Effetti delle VA



Church of Monastery of Jerónimos,
Lisbon

Effetti delle VA

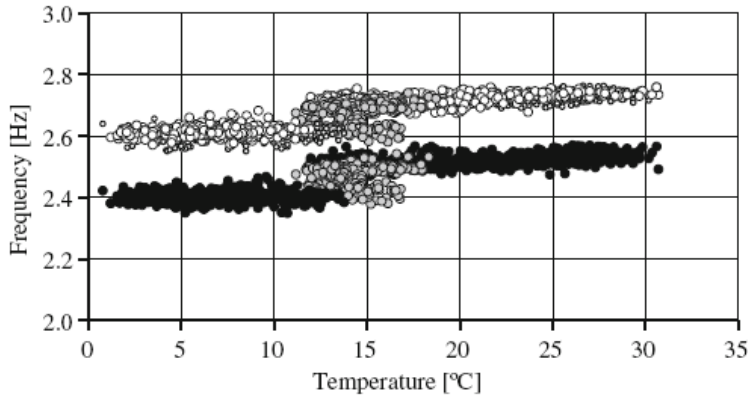


frequencies increase for increasing temperatures
(up to 0.1-0.2 Hz for 10° C)

Effetti delle VA

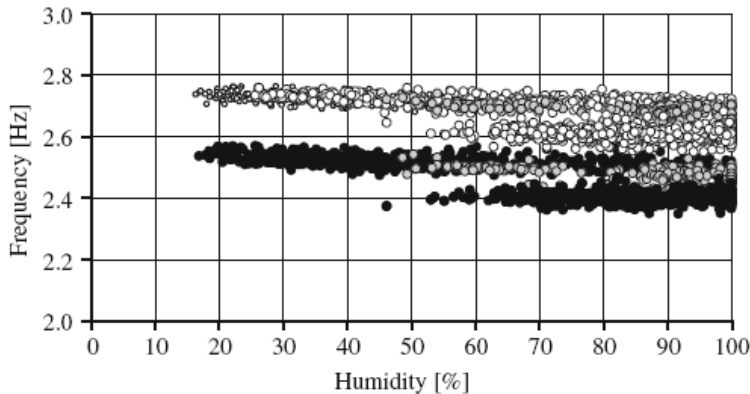
a

First two Frequencies versus Temperature



b

First two Frequencies versus Humidity



Mogadouro Clock Tower

frequencies decrease for increasing humidity
(0.05 Hz for 50%)

Compensare gli effetti delle VA

- Dipendenti dal tempo
 - Non uniformi
 - Talvolta difficili da identificare o misurare
- ⇒
- ◆ Identificazione VA rilevanti
 - ◆ Compensazione dei relativi effetti





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

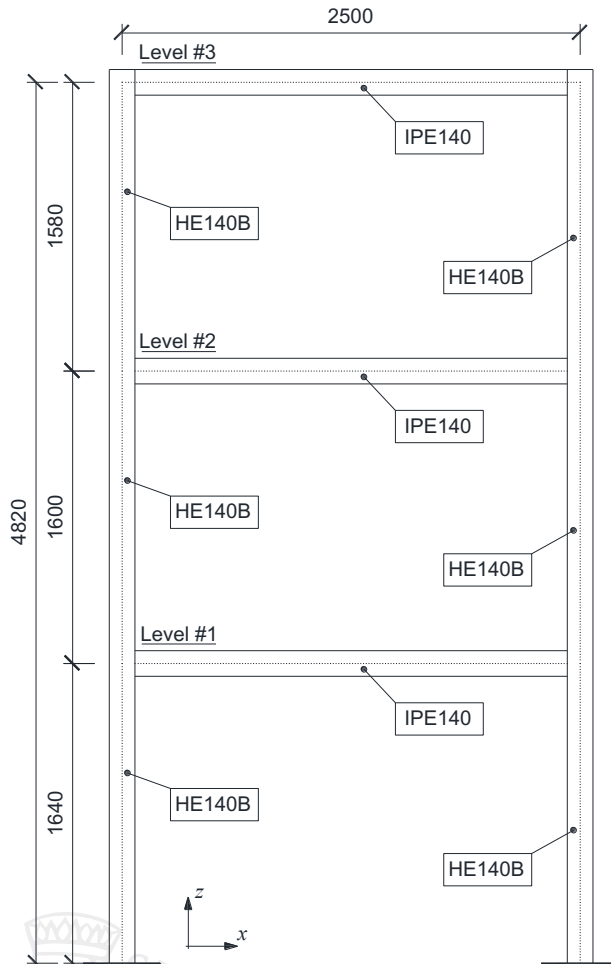
Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



Effetti delle VA vs. Effetto del danneggiamento



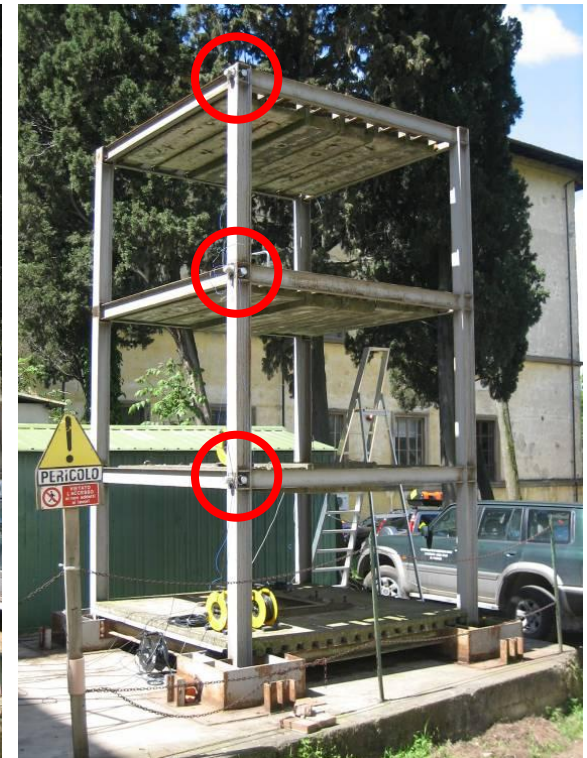
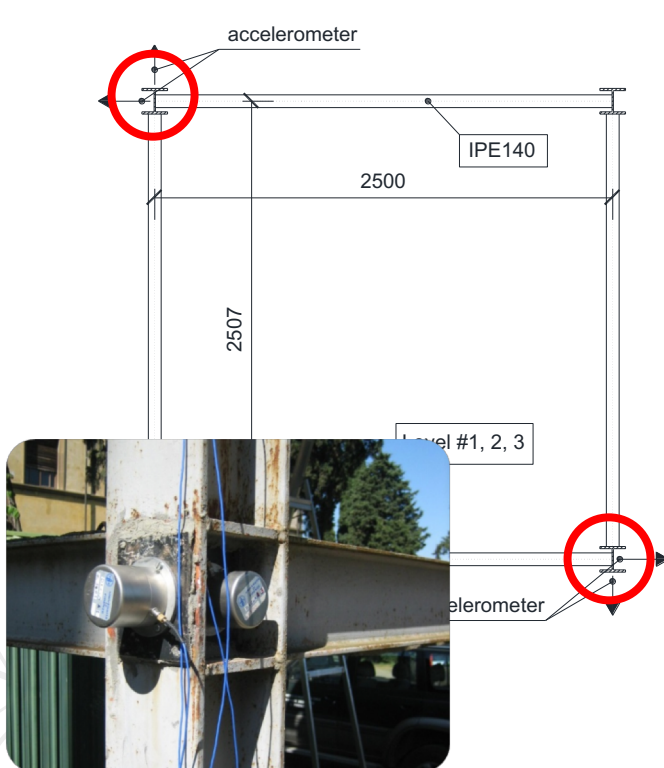
Esempio #1



L'attività sperimentale

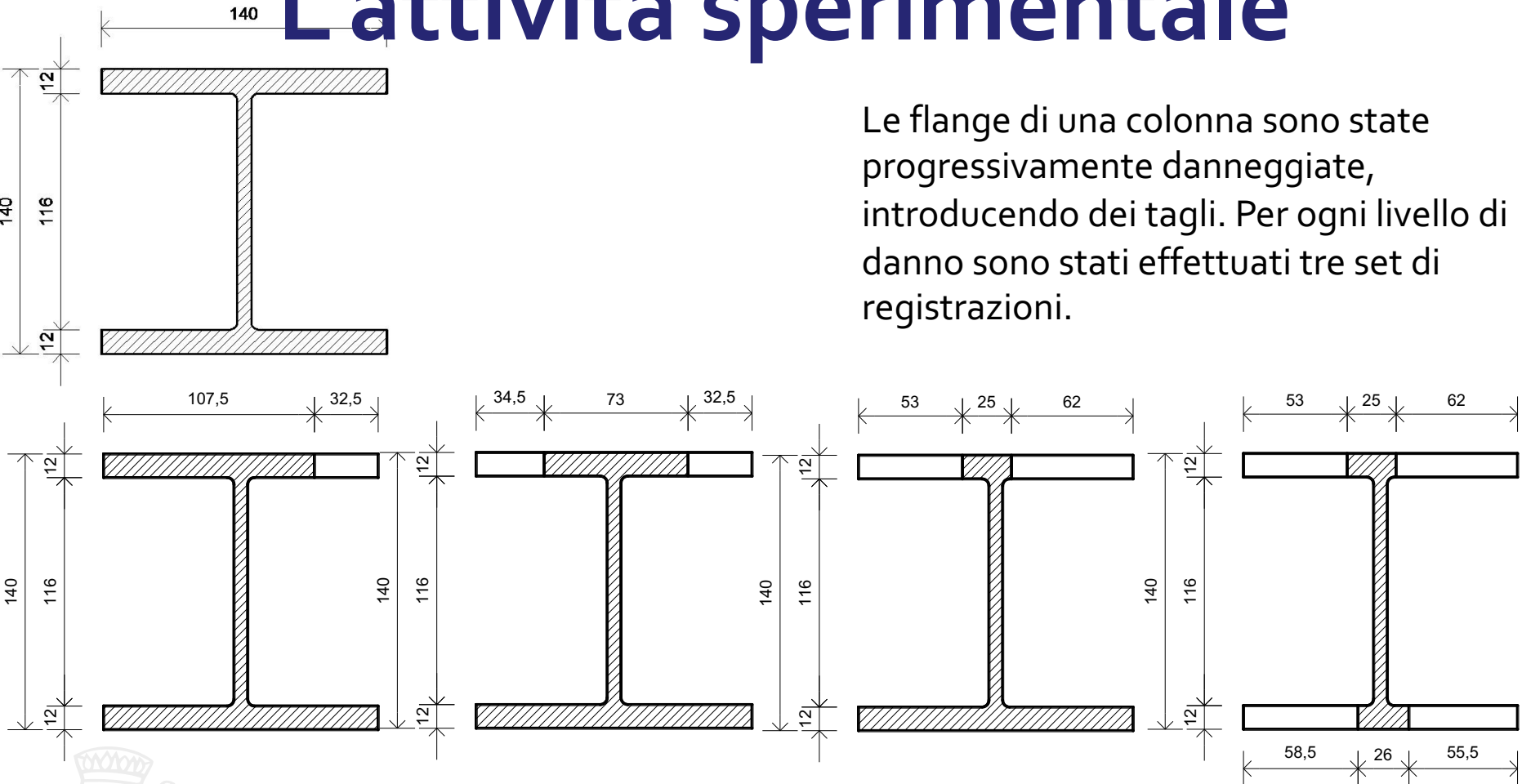
Il modello in scala di telaio in acciaio è stato strumentato con 12 accelerometri, registrando vibrazioni indotte da carichi ambientali (vento).

Gli accelerometri sono stati disposti in coppia (e mutuamente ortogonali) nei vertici dei tre livelli del telaio in corrispondenza dei nodi.



L'attività sperimentale

Le flange di una colonna sono state progressivamente danneggiate, introducendo dei tagli. Per ogni livello di danno sono stati effettuati tre set di registrazioni.



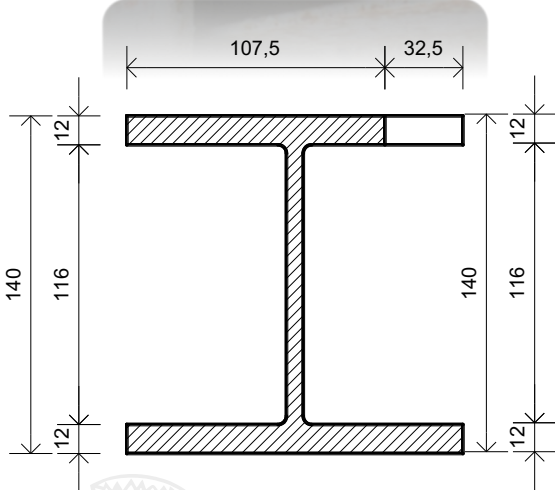
Livello di danno # 1

Livello di danno # 2

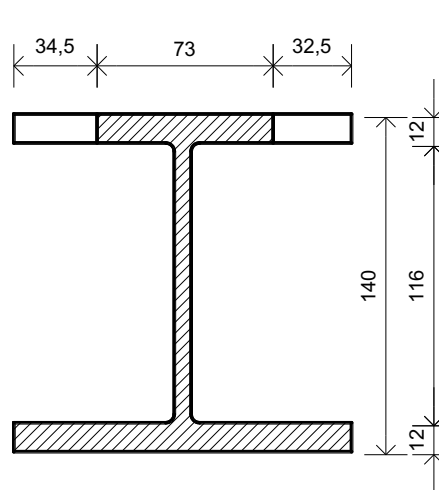
Livello di danno # 3

Livello di danno # 4

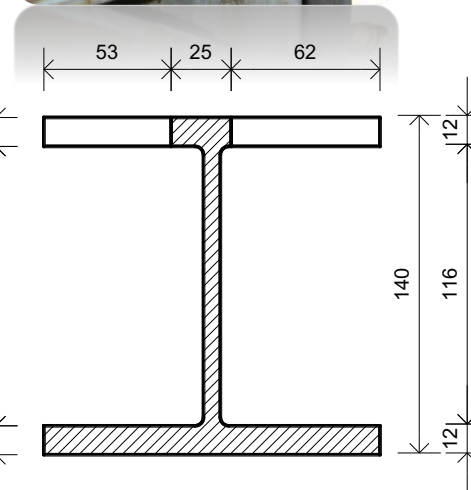
L'attività sperimentale



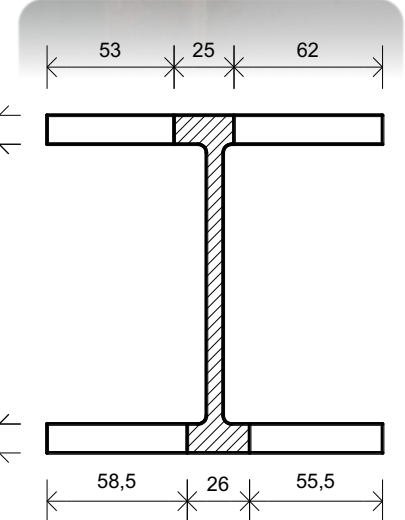
Livello di danno #1



Livello di danno #2



Livello di danno #3



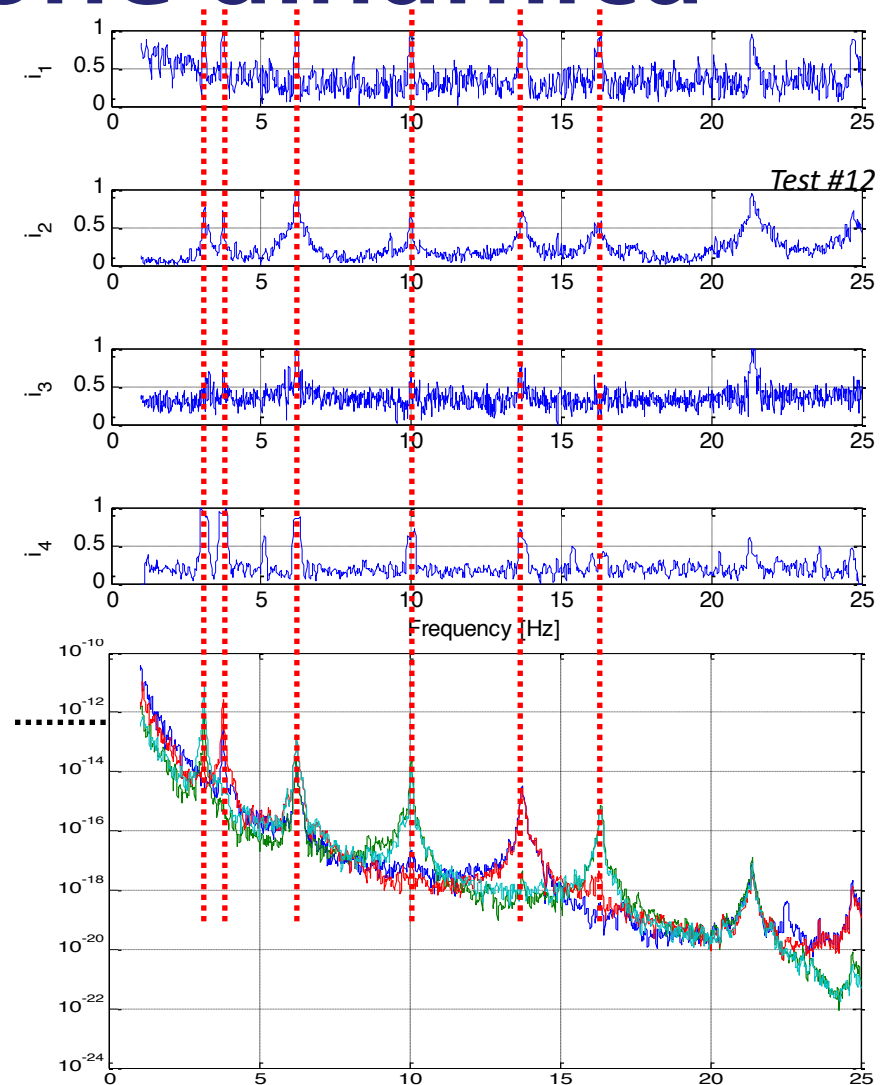
Livello di danno #4

Identificazione dinamica

Test	Tipo di test
Test # 1÷5	Conf. di riferimento
Test # 11÷13: Set#1	Livello di danno #1
Test # 21÷23: Set#2	Livello di danno #2
Test # 31÷33: Set#3	Livello di danno #3
Test # 41÷43: Set#4	Livello di danno #4

La frequenza di campionamento è stata di 400 Hz, con durata variabile di circa 4-5 minuti.

Il segnale, disturbato, è stato filtrato a 12.5 Hz e successivamente ricampionato a 25 Hz.

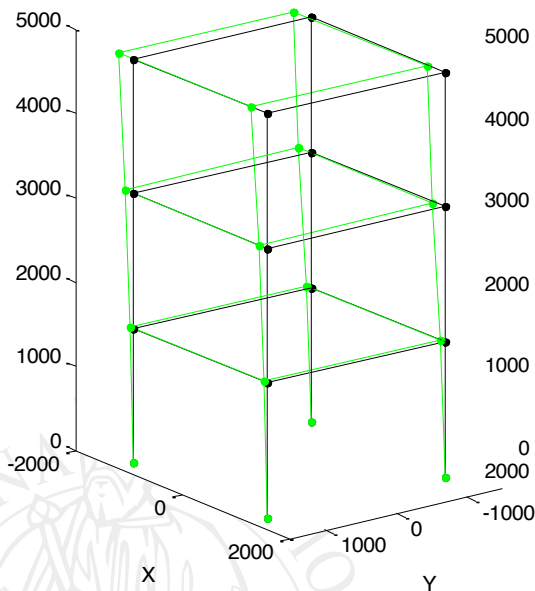




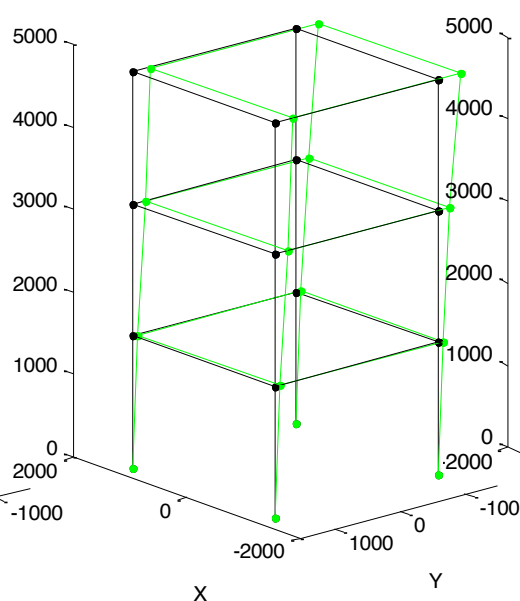
Identificazione dinamica

Set #	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Set #0	3.14	3.76	6.18	10.06
Set #1	3.08	3.75	6.24	9.98
Set #2	3.09	3.71	6.20	9.96
Set #3	3.05	3.74	6.11	9.94
Set #4	3.03	3.72	6.13	9.91

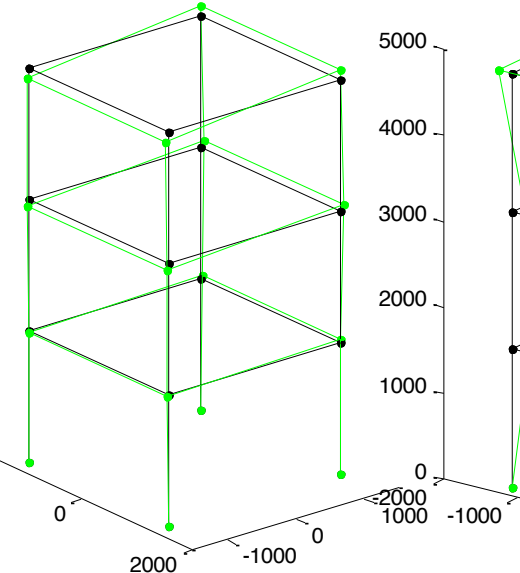
$f_1 = 3.14$ Hz



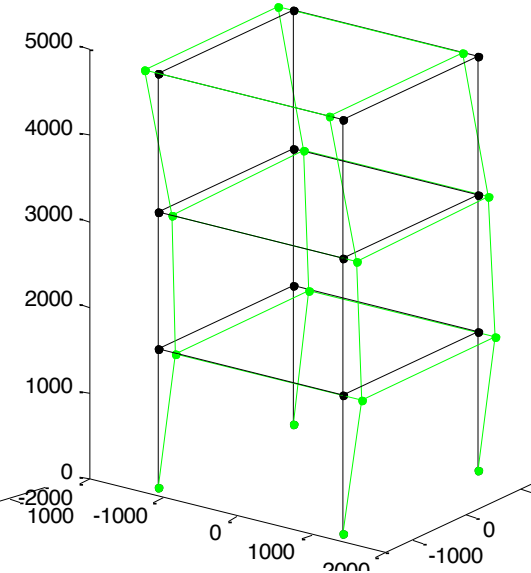
$f_2 = 3.76$ Hz



$f_3 = 6.18$ Hz

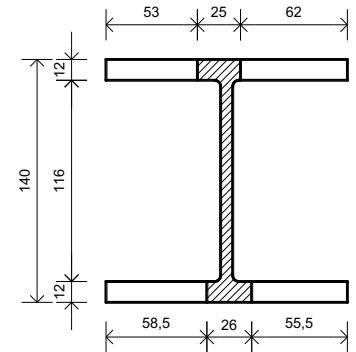


$f_4 = 10.06$ Hz



Identificazione dinamica

Set #	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)	f_4 (Hz)
Set #0	3.14	3.76	6.18	10.06
Set #1	3.08	3.75	6.24	9.98
Set #2	3.09	3.71	6.20	9.96
Set #3	3.05	3.74	6.11	9.94
Set #4	3.03	3.72	6.13	9.91

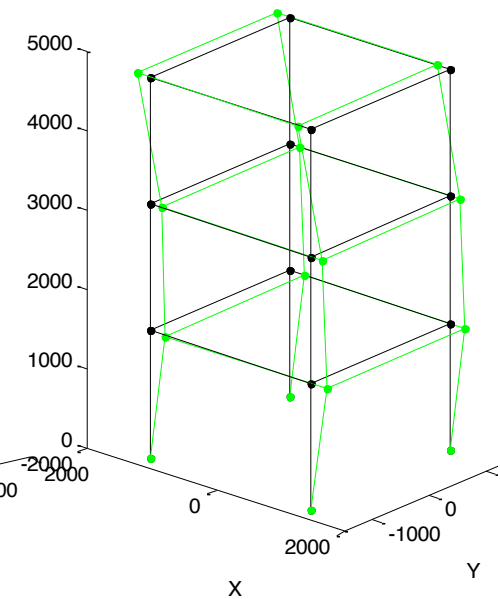
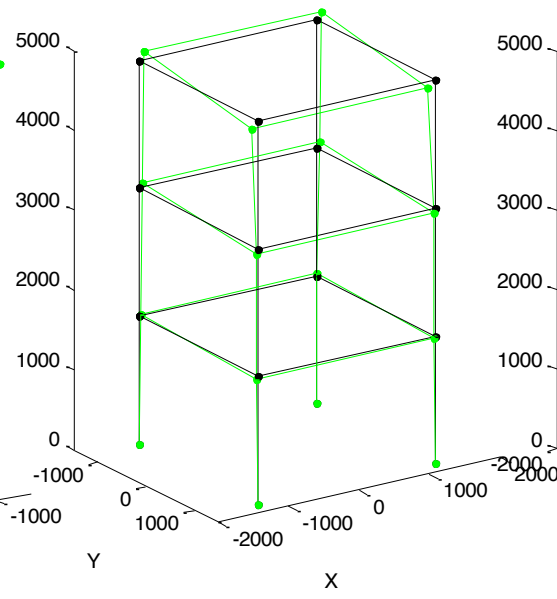
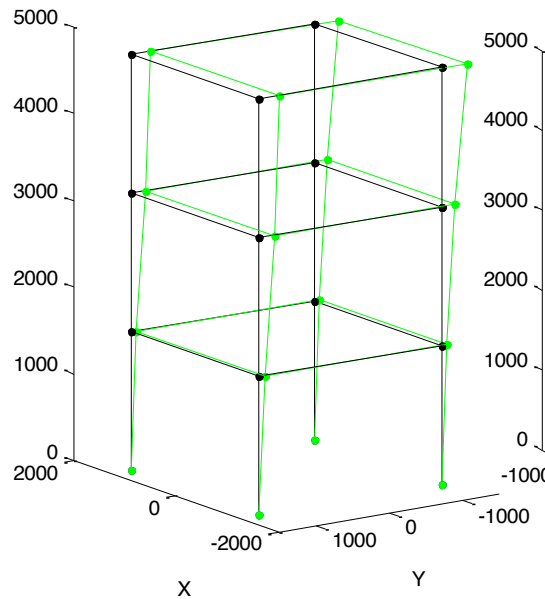
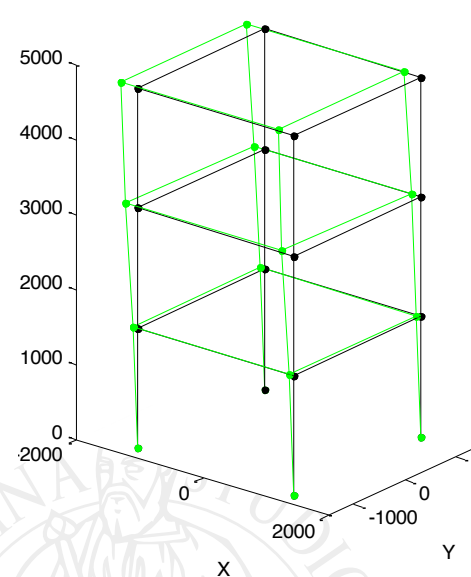


$f_1 = 3.03$ Hz

$f_2 = 3.72$ Hz

$f_3 = 6.13$ Hz

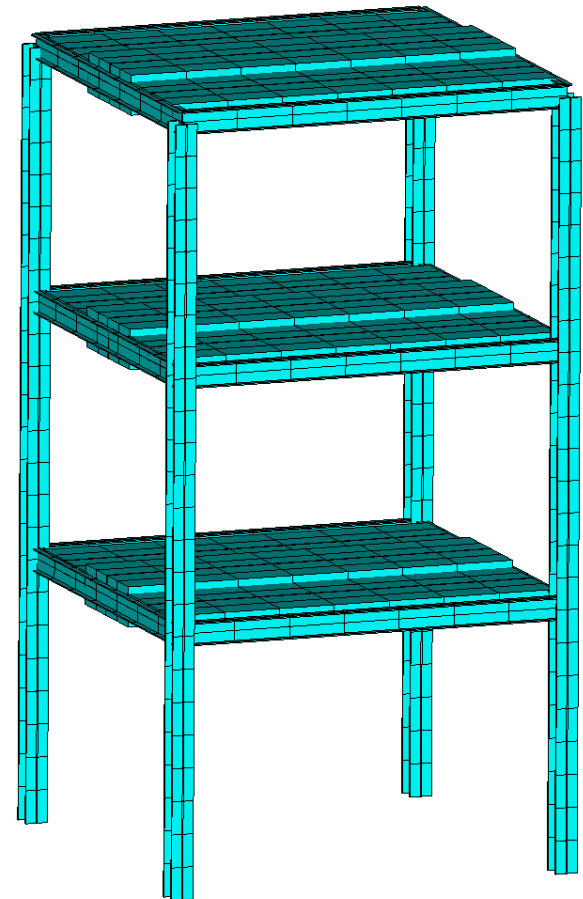
$f_4 = 9.91$ Hz



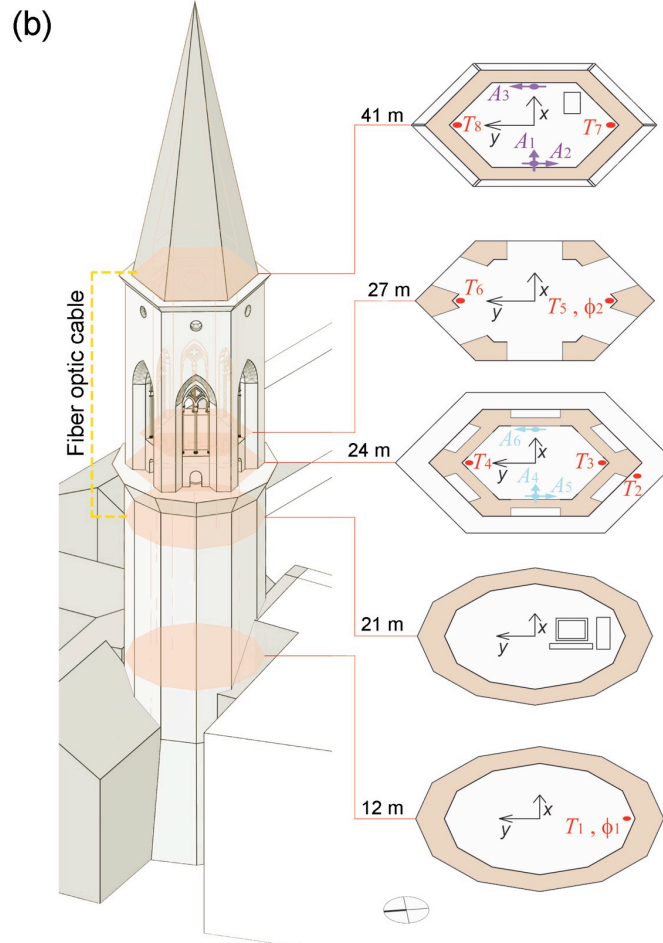
Localizzazione del danno

Utilizzo di Algoritmi genetici

- Il telaio è stato modellato nella condizione di riferimento non danneggiata costruendo parametricamente il modello.
- Ogni colonna è stata modellata con 3 (#livelli) x 8 elementi finiti di tipo beam.
- I cromosomi sono stati costruiti componendoli di bit che codificano la larghezza di ciascuna delle due flange della colonna.
- Ogni cromosoma è dunque composto da $4 \times 3 \times 8 \times 2$ bits: 4 colonne per 3 livelli, ogni livello con 8 elementi finiti, ogni elemento caratterizzato da due dati variabili (la lunghezza delle due flange) per un totale di 192 bit per ogni cromosoma.
- I bit, nel caso impostato, possono assumere qualunque valore reale compreso tra 0 (flangia completamente danneggiata) e 1 (flangia non danneggiata).



Esempio #2



Campanile di S. Pietro, Perugia

- Costruito nel XIII secolo
- Danneggiato dal sisma del 1997
- Restaurato nel 2002
- Monitorato dal 2014 con accelerometri e sensori di parametri ambientali

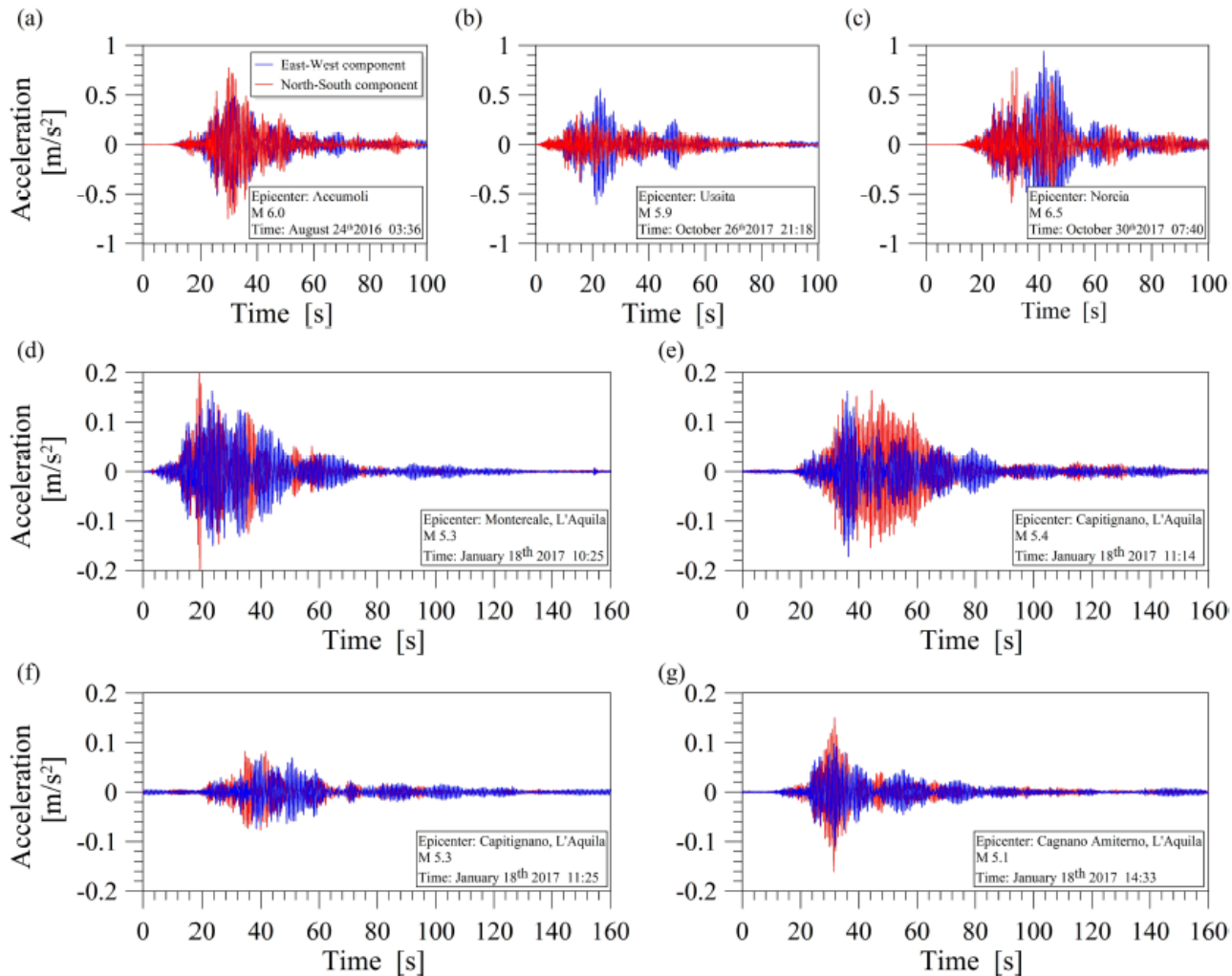


Figure 2: Measured dynamic response of the bell-tower in terms of acceleration during the three main shocks of the seismic sequence: Accumoli earthquake (a), Ussita earthquake (b) and Norcia earthquake (c) and during the four earthquakes occurred on January 18th 2017: Montereale, L'Aquila (d), Capitignano, L'Aquila (e,f) and Cagnano Amiterno, L'Aquila (g).

	Channel 1 [m/s ²]	Channel 2 [m/s ²]	Channel 3 [m/s ²]	Resultant 1-2 [m/s ²]
Accumoli	0.5861 (0.0922)	0.7632 (0.1109)	0.7948 (0.1128)	0.9140 (0.1442)
Ussita	0.6065 (0.0810)	0.3781 (0.0491)	0.3008 (0.0472)	0.6445 (0.0947)
Norcia	0.9423 (0.1596)	0.7627 (0.1018)	0.6487 (0.1008)	0.9469 (0.1893)
Montereale	0.1604 (0.0262)	0.2162 (0.0225)	0.1633 (0.0228)	0.2168 (0.0345)
Capitignano	0.1717 (0.0192)	0.1634 (0.0263)	0.1603 (0.0269)	0.1777 (0.0325)
Capitignano	0.0739 (0.0137)	0.0824 (0.0124)	0.0988 (0.0126)	0.1051 (0.0184)
Cagnano	0.1102 (0.0163)	0.1606 (0.0176)	0.1206 (0.0178)	0.1630 (0.0240)
Bells	0.0339 (0.0114)	0.0278 (0.0087)	0.0269 (0.0084)	0.0351 (0.0143)
Wind storm	0.0249 (0.0011)	0.0447 (0.0009)	0.0242 (0.0009)	0.0719 (0.0019)
Normal conditions	(0.0002)	(0.0002)	(0.0002)	(0.0002)

Table 1: Maximum values of accelerations recorded on top of the bell-tower (corresponding RMS values are reported in brackets) during 2016 Central Italy seismic sequence and earthquakes of January 18th 2017. For comparative aims, accelerations produced by swinging bells on June 5th 2016, during a wind storm occurred from March 4th to March 6th 2015 and in normal everyday conditions (RMS values only) are showed.



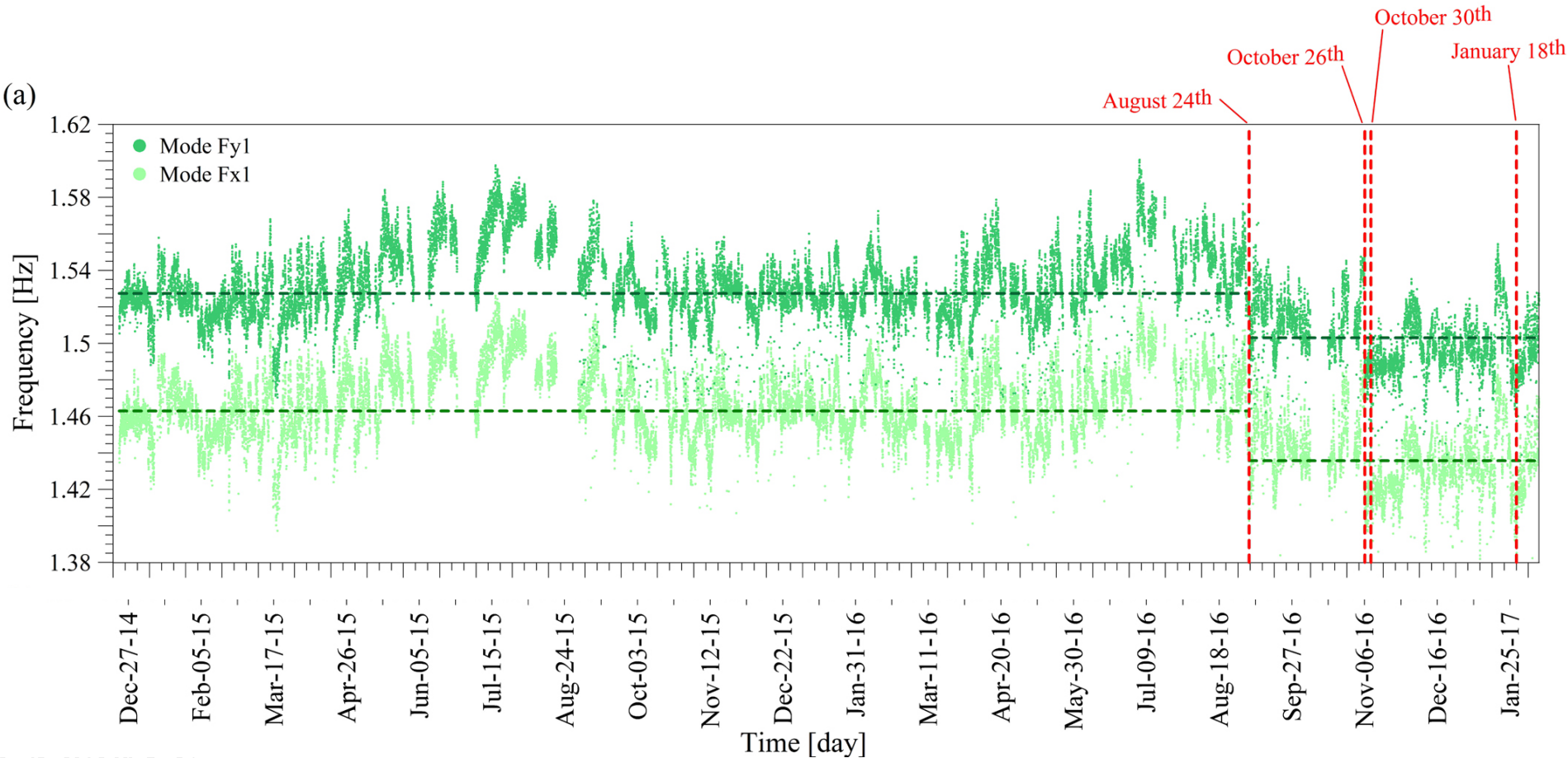
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale

Da A. Kita, N. Cavalagli, G. Comanducci,
F. Ubertini: «*Dynamic testing and
monitoring of historic towers for seismic
damage detection*», 2017

(a)







UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



**Tecnologie ICT per il MOnitoraggio Strutturale di Costruzioni
Antiche basato su Reti di sensori wireless e DrOni**





Progetto realizzato con il determinante contributo regionale a valere sul Programma Attuativo Regionale cofinanziato dal FAS (adesso FSC) e del contributo a valere sui fondi FAR messi a disposizione dal MIUR.



Regione Toscana



FAS
Fondo Aree
Sottoutilizzate
2007-2013



REPUBBLICA ITALIANA

CHE COS'È

MOSCARDO è un **Sistema per il monitoraggio di edifici storici e monumentali** che integra competenze e tecnologie del settore ICT (reti di sensori wireless, trattamento ed elaborazione di segnali provenienti da sensori e di immagini e video catturati da droni) con competenze e metodologie della scienza e della tecnica delle costruzioni e della meccanica computazionale **per l'analisi modale operativa e l'analisi strutturale.**

LA TECNOLOGIA PER LA SALVAGUARDIA DEI NOSTRI BENI CULTURALI





Regione Toscana



FAS
Fondo Aree
Sottoutilizzate
2007-2013



REPUBBLICA ITALIANA

April 2016 – October 2018



*ICT technologies for structural monitoring of Ancient
Constructions based on wireless sensor networks and drones*

numerical tools

drones



long-term monitoring of built heritage



Project funded by the **Tuscany Region Administration**

Partners:

Infomobility srl
www.infomobility-italia.com

CNR - ISTI
MMS Lab: *Meccanica dei
Materiali e delle Strutture*
WN Lab: *Wireless Networks*
SI Lab: *Segnali e Immagini*

DICEA – Department of Civil
and Environmental
Engineering, University of
Florence

Engineering Italy solutions srl
www.eisolutions.it



Infomobility SRL
Partner & Capofila



CNR ISTI
Partner



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE
DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

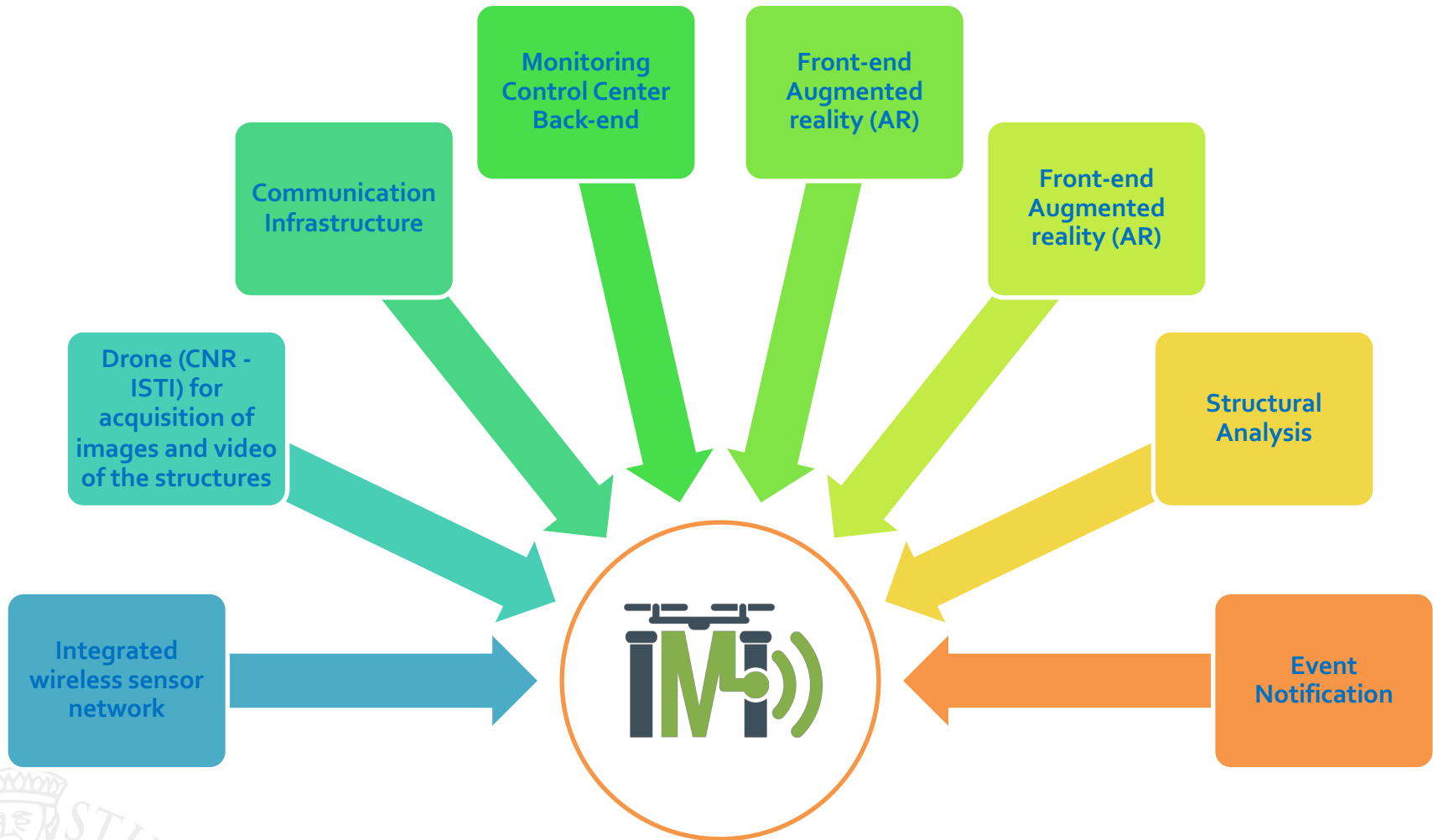
UniFI DICEA
Partner

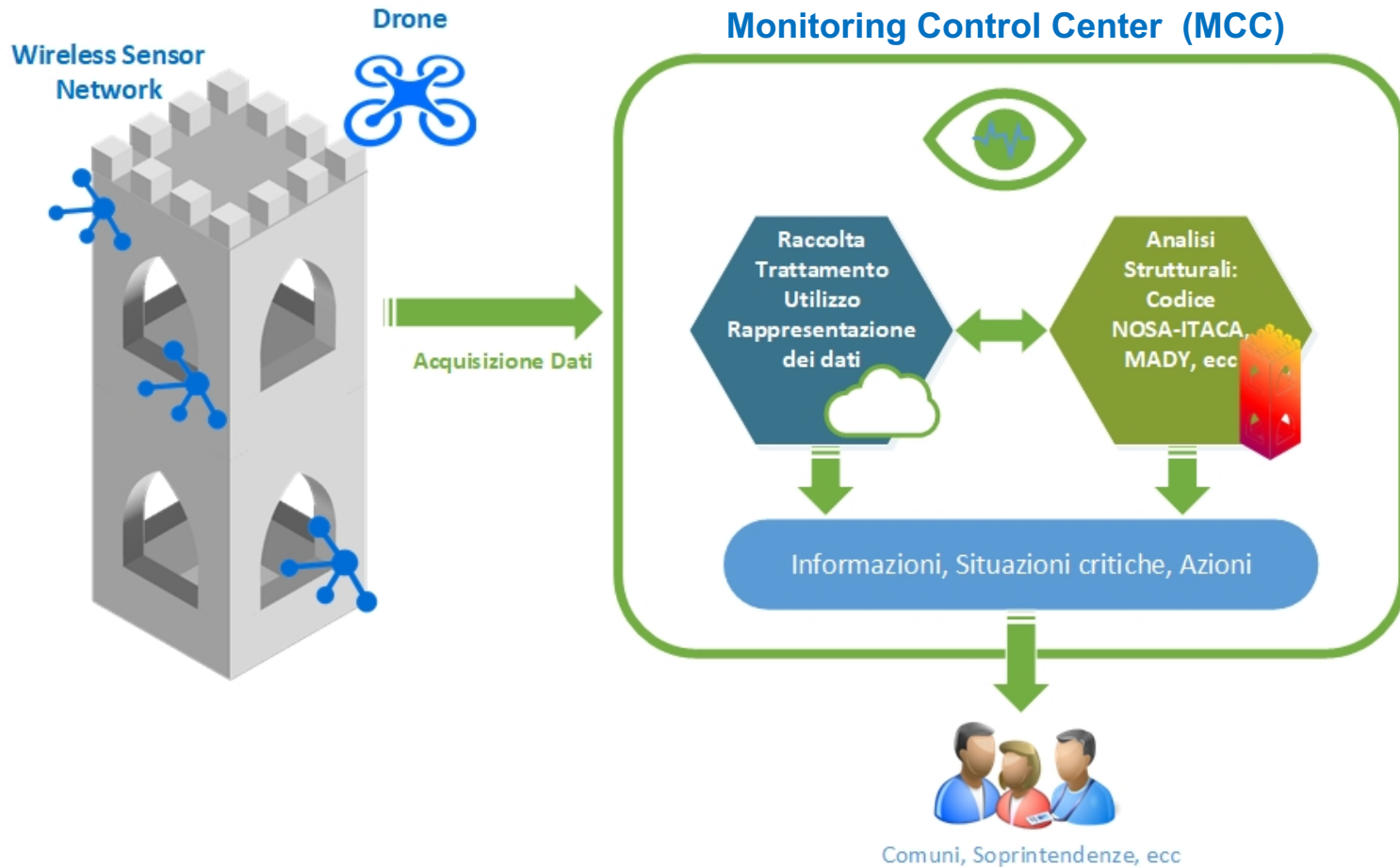


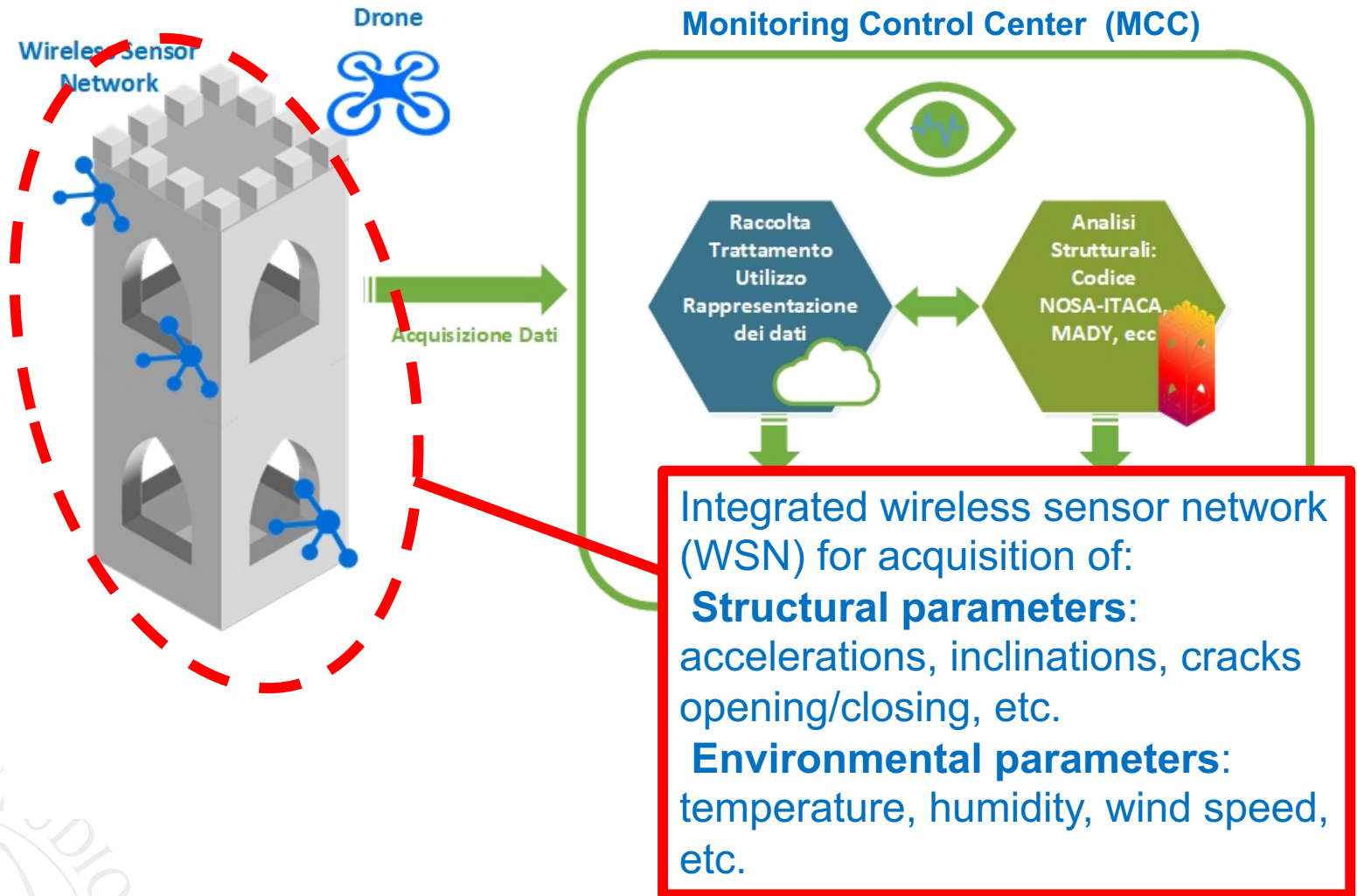
eisolutions

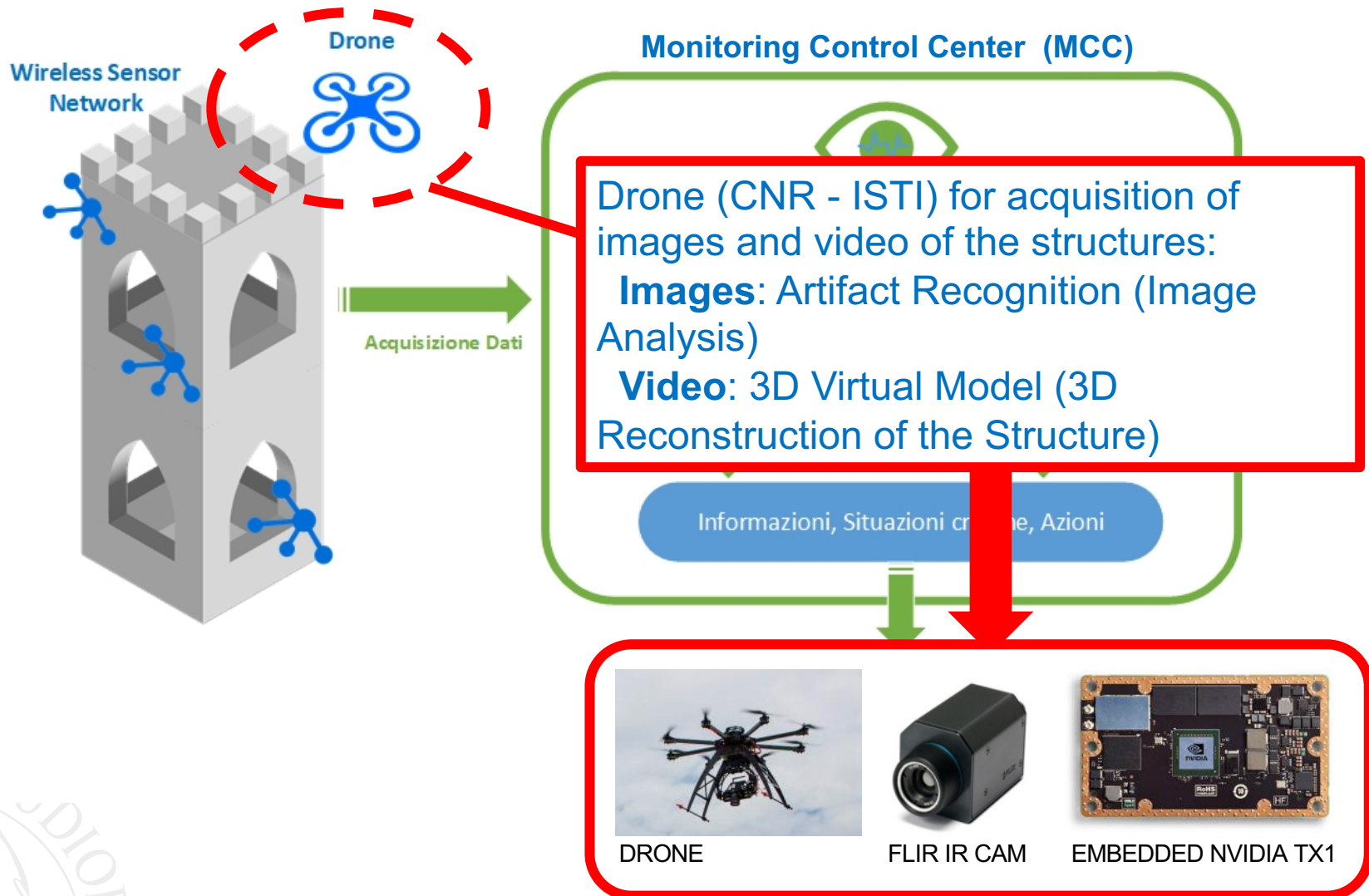
EIS Srl
Partner

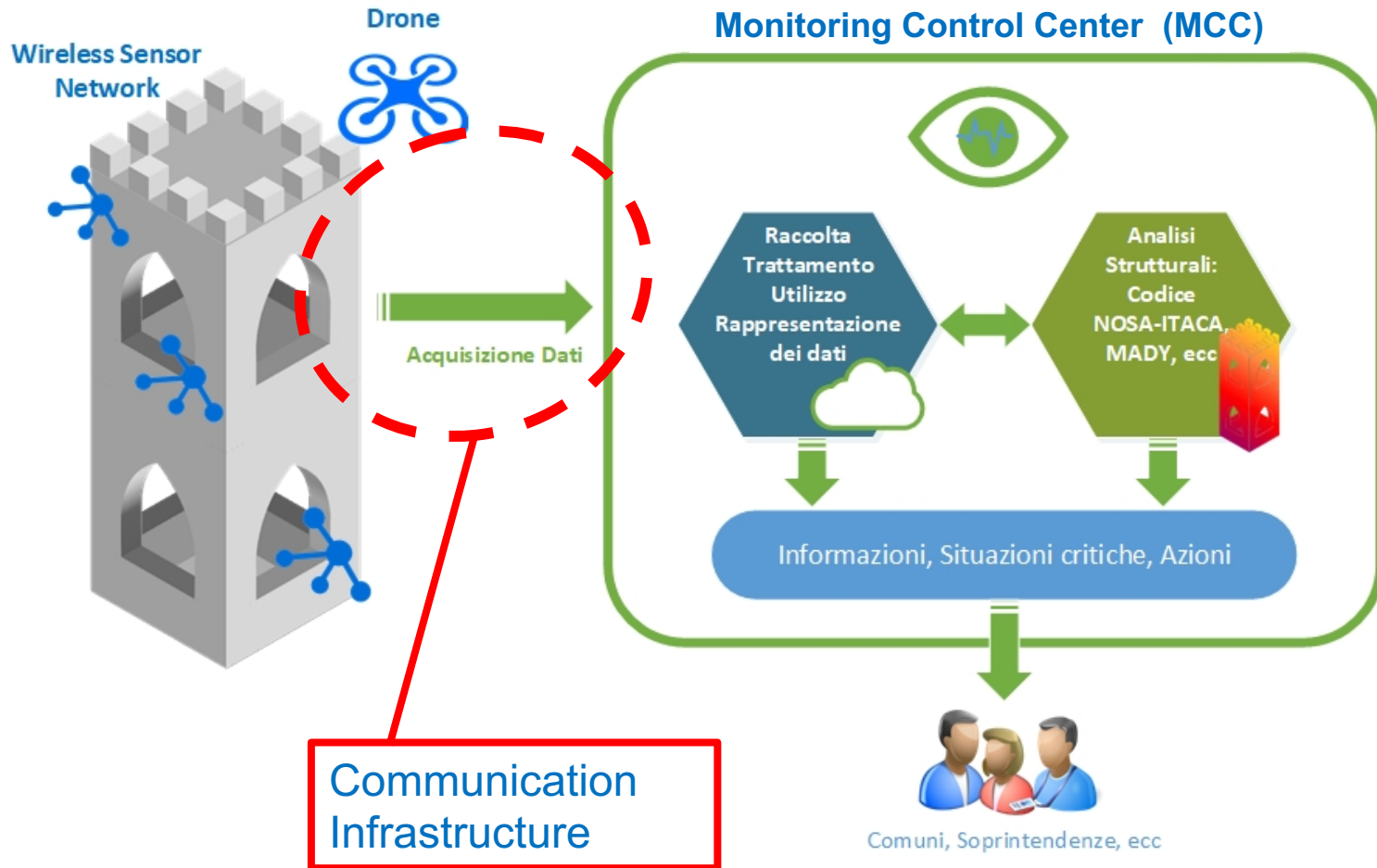
Project Coordinator: Infomobility srl – Pisa (Italy)

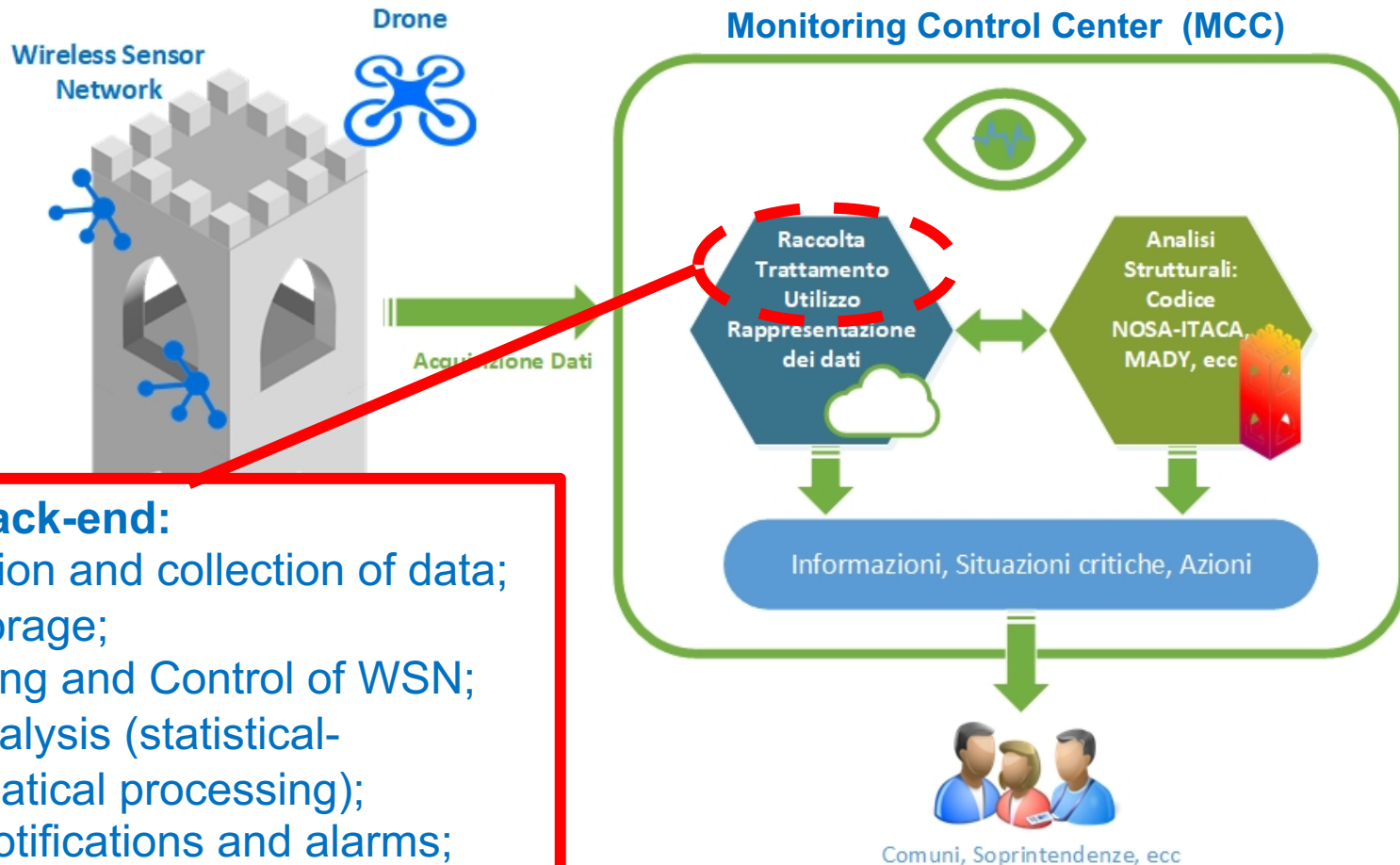












MCC Back-end:

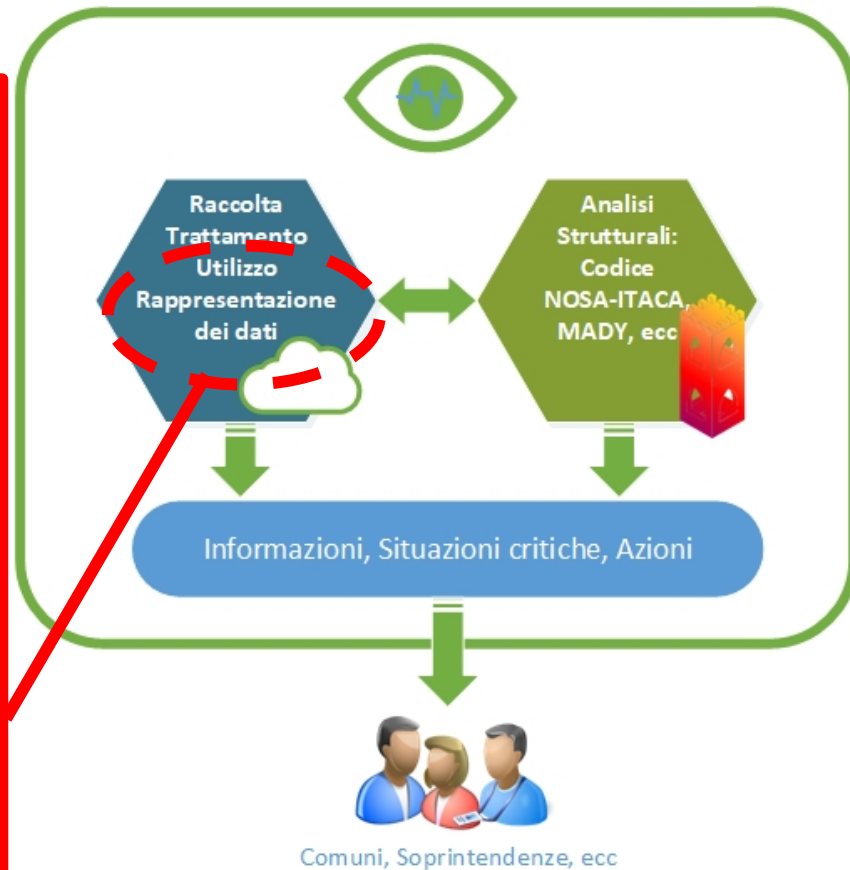
Acquisition and collection of data;
Data storage;
Monitoring and Control of WSN;
Data Analysis (statistical-mathematical processing);
Event notifications and alarms;
Security (access management and data protection).



Front-end (Web-platform)

- Visualization of structures and positioning of sensors
- Data consultation for each structure
- Consultation of synthetic and critical indicators
- Visualization of drone images, artifact recognition results, and increased reality videos
- Configuring, managing, and verifying system and WSN operation
- Acquiring video and images and downloading data

Monitoring Control Center (MCC)



Drone

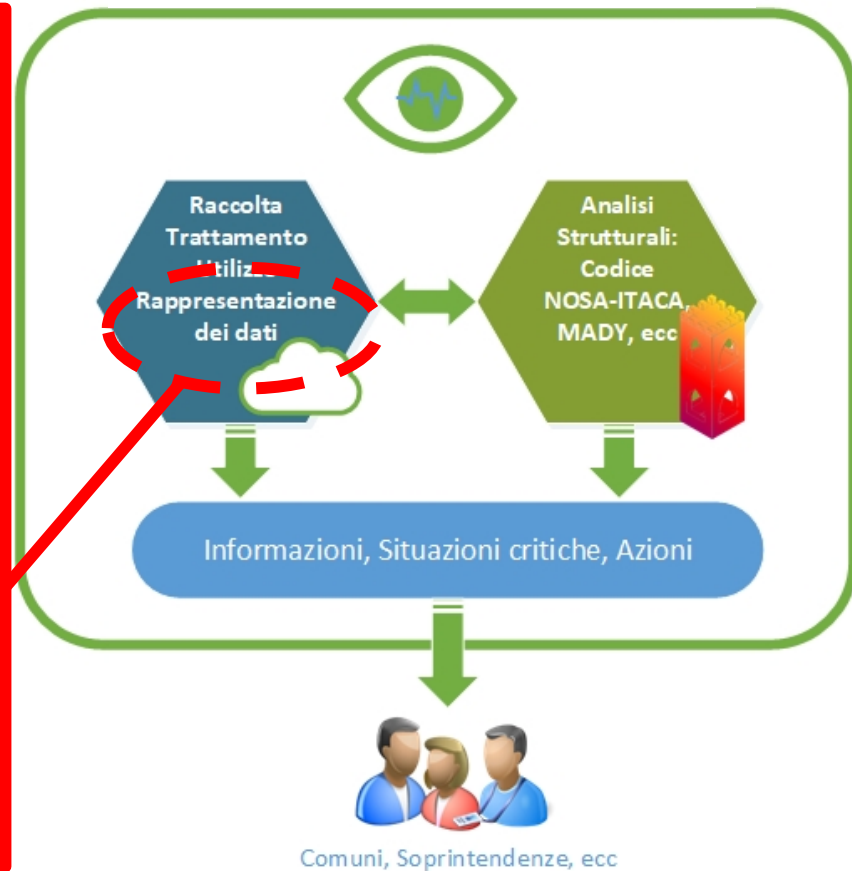
Monitoring Control Center (MCC)

Front-end Augmented reality (AR)

Interactive display of video streams and data detected by sensors:

Live, during drone inspections, to view video streams captured by the aircraft along with sensors operating in the framed area

Deferred, displaying the 3D model of the structure and analyzing the historical data provided by the sensor network and archived in the MCC



Structural Analysis

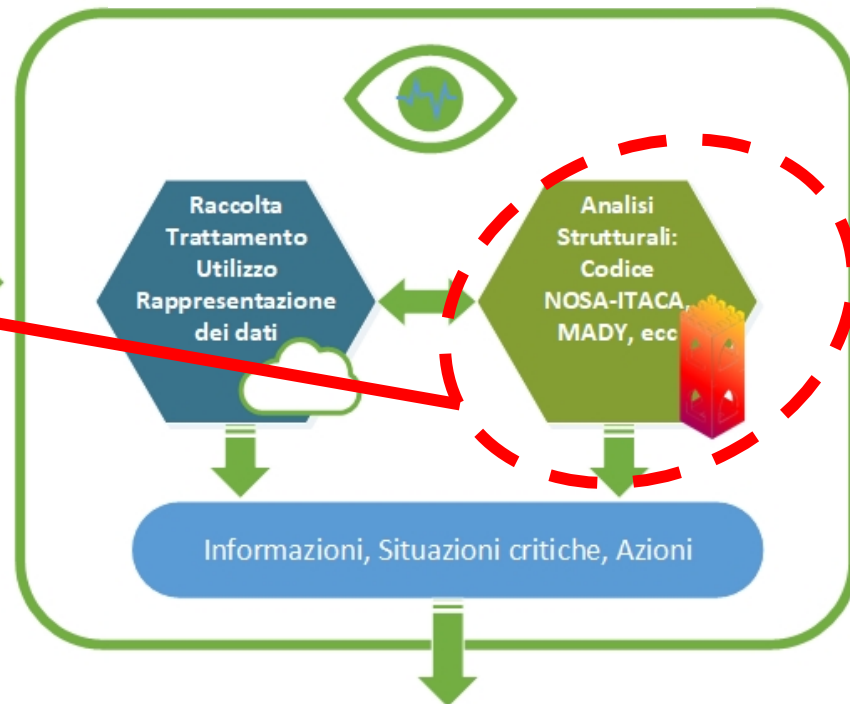
Numerical modeling of the monuments (for static, dynamic and modal analysis of masonry constructions)



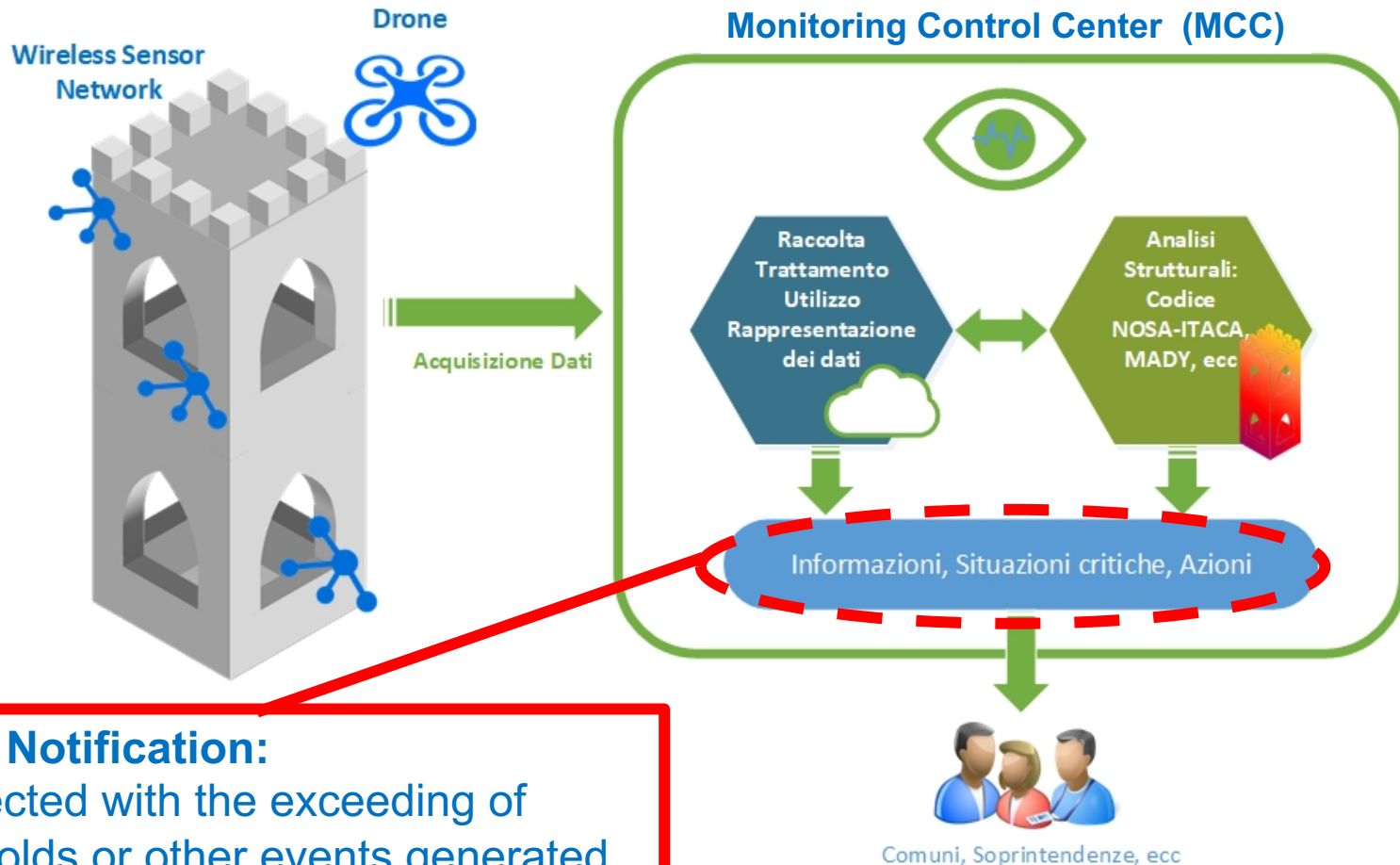
- ✓ Define thresholds for structural alarms;
- ✓ Evaluate the effectiveness of any consolidation operations

isizione Dati

Monitoring Control Center (MCC)



Comuni, Soprintendenze, ecc



Event Notification:

Connected with the exceeding of thresholds or other events generated by the system via email, IM or web application

□ The “Voltone”, Livorno

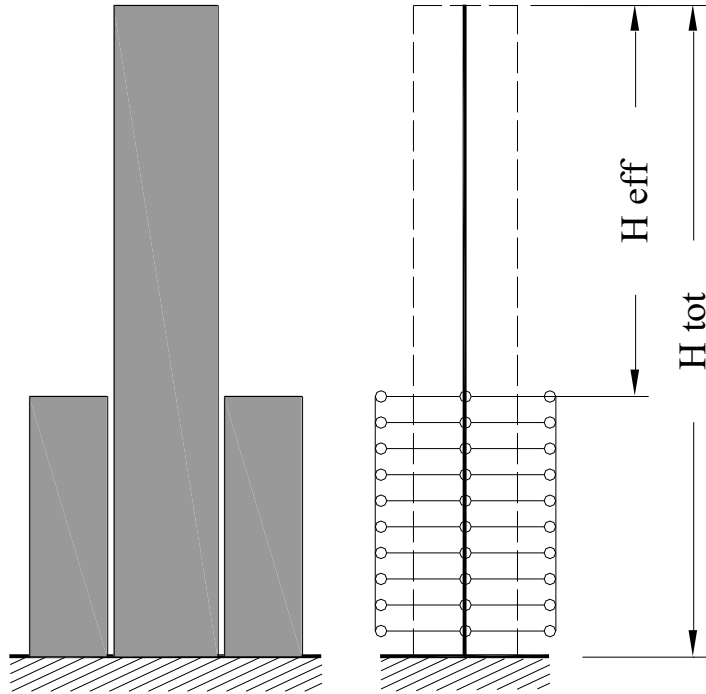


□ The “Old Fortress”, Livorno

Test Cases



□ “Torre Grossa”, San Gimignano

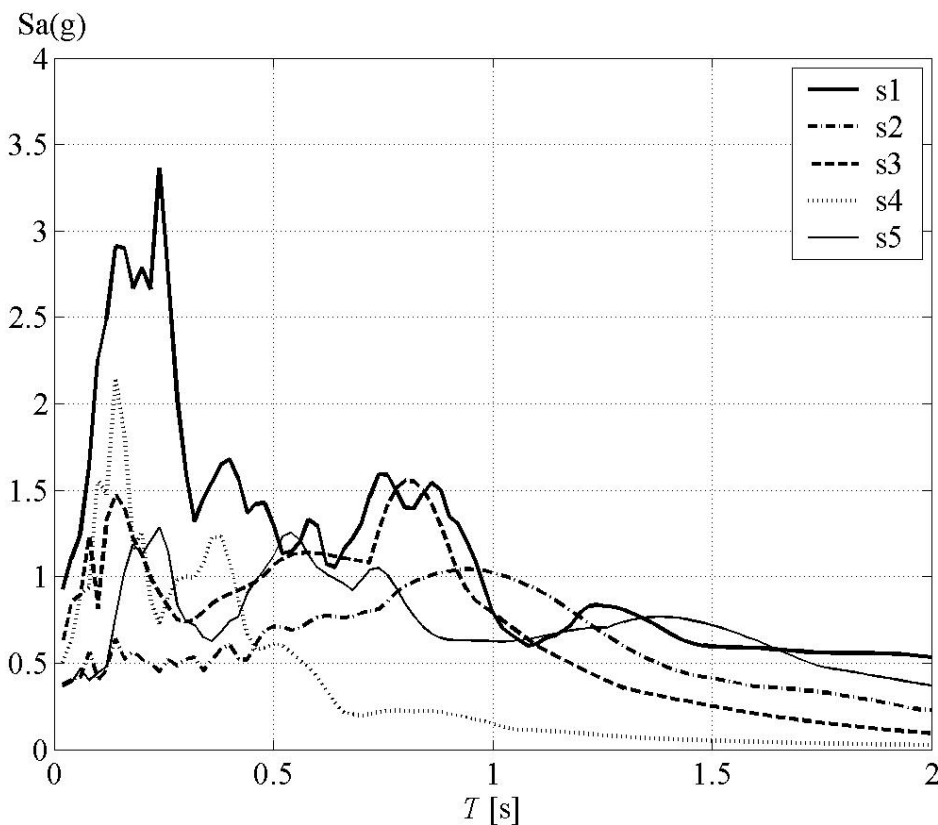


Esempio #3



	TA	TB ₁	TB	TB ₂	TC
H_{tot} (m)	40	50	50	50	60
H_{eff} (m)	20	30	30	30	40
E (GPa)	3.0	3.6	3.0	2.4	3.0
σ_c (MPa)	5.0	6.0	5.0	4.0	5.0

Case	Earthquake	Date	Mw	Time (s)	PGA (g)
s1	Tabas	1978	7.4	63.40	0.925
s2	Montenegro(1)	1979	6.9	47.80	0.374
s3	Friuli(1)	1976	6.4	9.35	0.602
s4	Friuli(2)	1976	6	9.98	0.505
s5	Montenegro(2)	1979	6.9	47.80	0.362



Peaks cover all the range of the first natural periods of the analysed structures (0.39 - 1.06 s).

DAMAGE SCENARIO

Under the applied inputs:

- Some towers crack but do not crush (" - ").
- Some towers undergo compressive damage ("x").
- Sometimes collapse occurs. Thus, the amplitude of the applied input is reduced through a scale factor (< 1), to the maximum value that does not lead the structure to collapse ("scale factor").

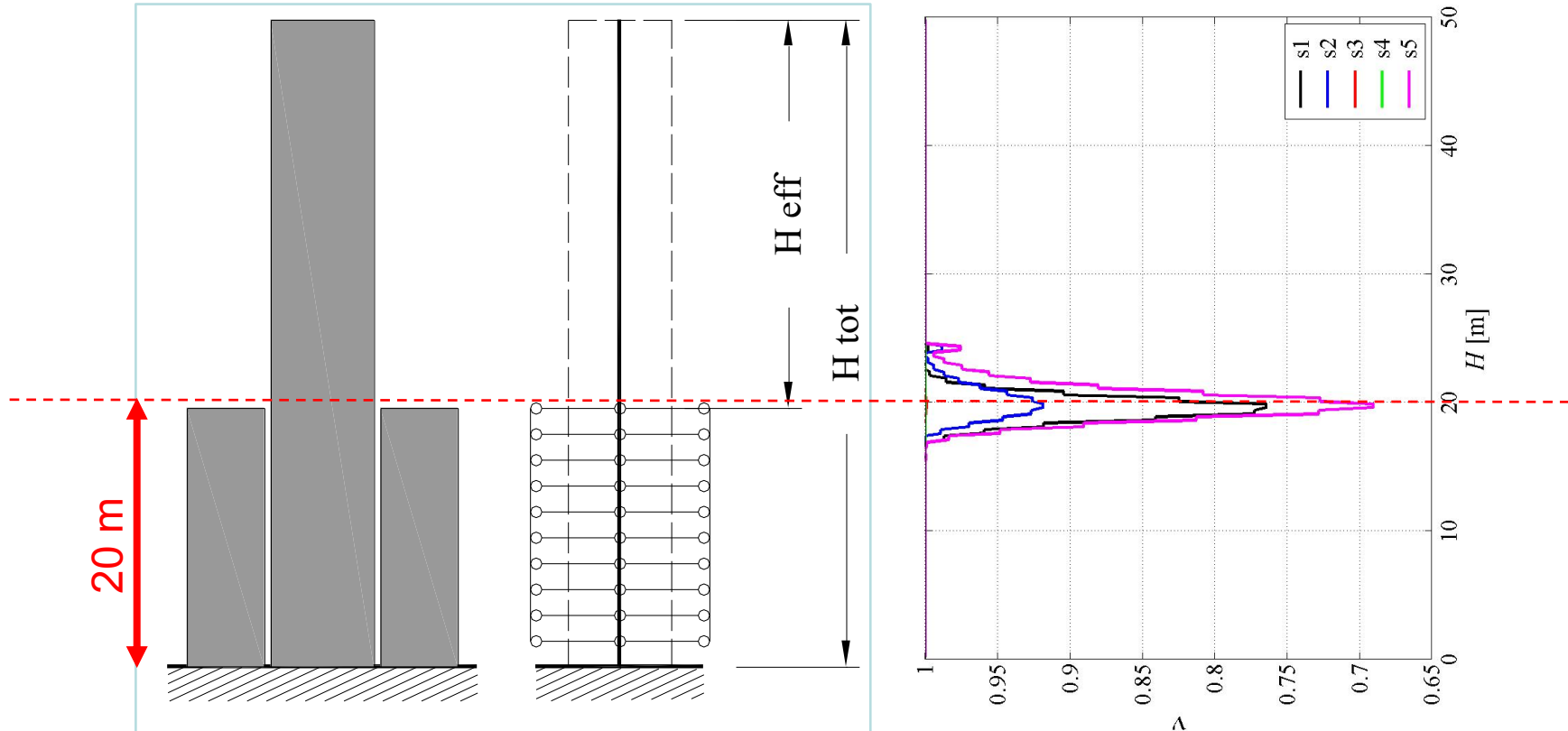
Case	TA	TB	TB ₂	TC
s1	x	0.86	0.74	0.39
s2	-	x	x	x
s3	x	x	x	-
s4	-	-	-	-
s5	x	x	x	0.87

not damaged

damaged

approaching collapse

DAMAGE SCENARIO



- Damage parameter ν , final Young's modulus E over its initial value ($0 \leq \nu \leq 1$), is an indicator of the degree of damage.
- Damage always locates around the height of 20 m, with a maximum value of $\nu \approx 0.7$ for input $s5$, i.e. a reduction of 30% of E and σ_c .



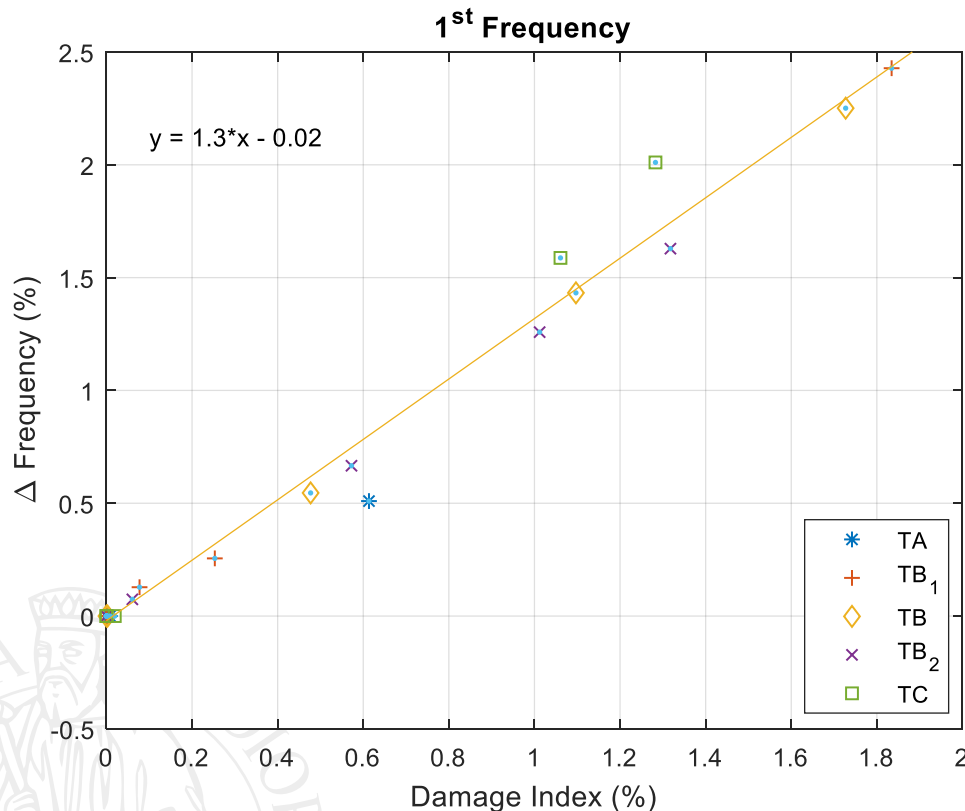
RESULTS: NATURAL FREQUENCIES

	f_1 (Hz)	f_2 (Hz)	f_3 (Hz)
Undam.	1.466	7.940	18.520
s1	1.445 (1.42%)	7.929 (0.14%)	18.404 (0.63%)
s2	1.458 (0.52%)	7.934 (0.08%)	18.479 (0.22%)
s3	1.466 (-)	7.940 (-)	18.520 (-)
s5	1.433 (2.27%)	7.916 (0.30%)	18.344 (0.96%)



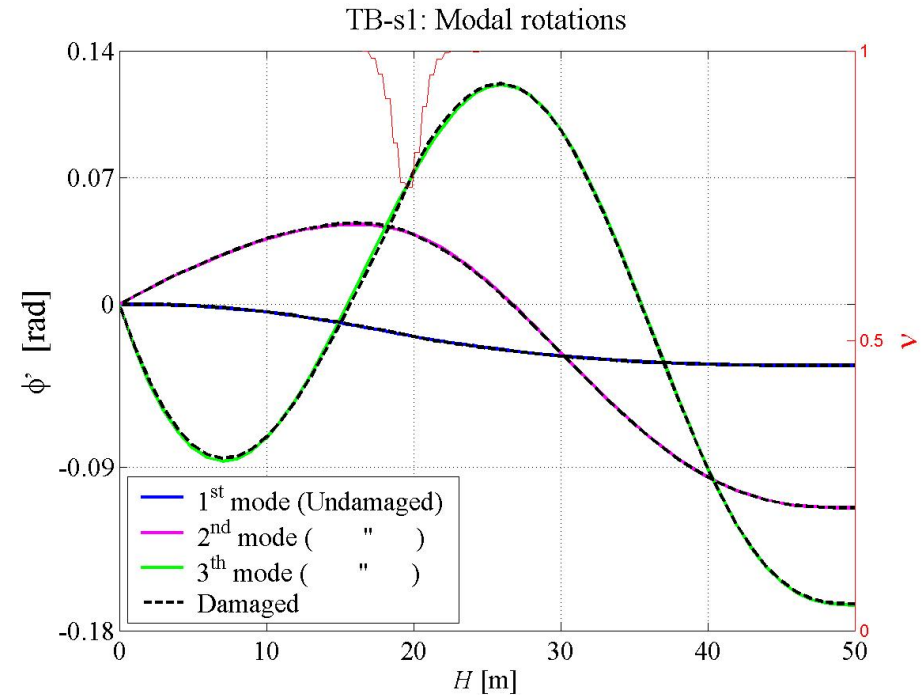
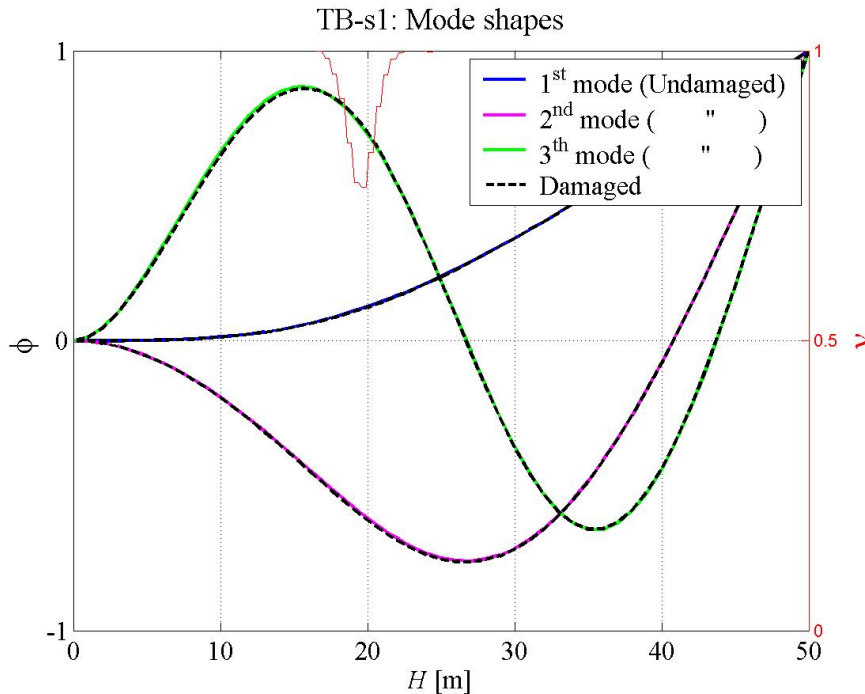
RESULTS: NATURAL FREQUENCIES

- Changes in natural frequencies are very slight, consistently with previous numerical and experimental researches (Sinou 2009; Gentile et al. 2016).
- Damage affects primarily the first frequency, up to variations $\approx 2.5\%$.
- Variations $> 1\%$ only for the most damaged cases, very close to collapse.

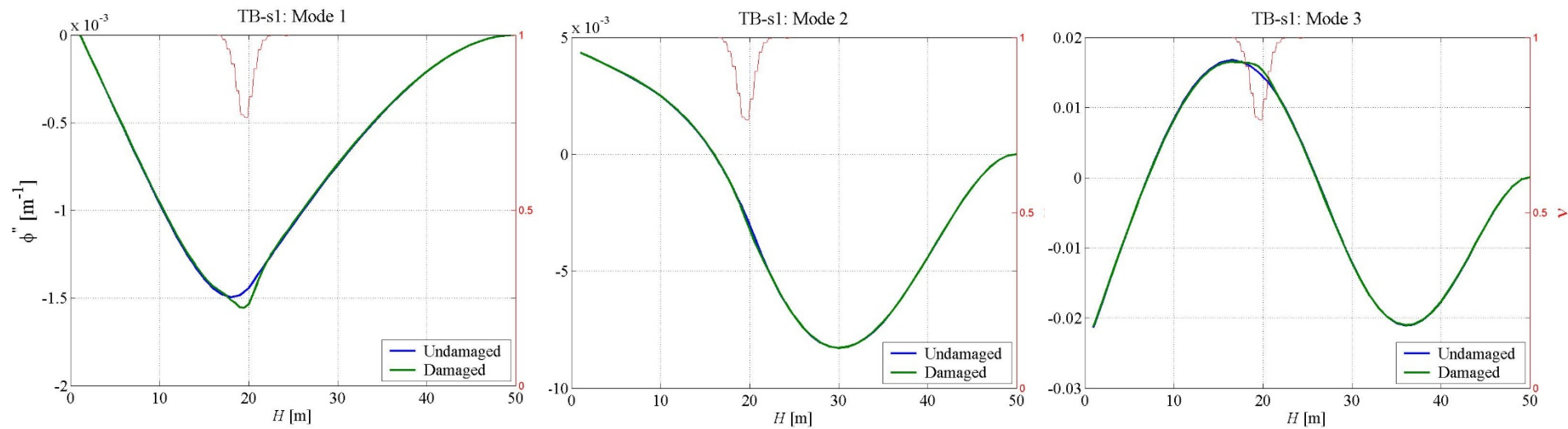


Variation of the first frequency vs a damage index (the percentage of damaged area by total area) for all the towers.

RESULTS: MODE SHAPES AND ROTATIONS



RESULTS: MODAL CURVATURES





UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA

Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
FIRENZE

DICEA
DIPARTIMENTO
DI INGEGNERIA CIVILE
E AMBIENTALE

Università di Firenze
Dipartimento di Ingegneria
Civile e Ambientale

Structural Health Monitoring vs Damage detection

Gianni Bartoli
gianni.bartoli@unifi.it