



**edilportale**<sup>®</sup>  
**smart**  
**village**  
**in tour** **MADE**expo  
in collaborazione con

segui su   

**22 maggio 2013 / Genova**

**Valutazione della sicurezza sismica delle costruzioni esistenti in muratura e soluzioni compatibili per l'adeguamento**

**Sergio Lagomarsino**



**Università degli Studi di Genova - Scuola Politecnica**  
DICCA  
Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale

## Vulnerabilità sismica del costruito in muratura

- La PERICOLOSITÀ in Italia è piuttosto alta: terremoti non molto violenti (negli ultimi 30 anni magnitudo minore di 6.5) ma frequenti
- RISCHIO SISMICO elevato: presenza di molte costruzioni vulnerabili, antiche o progettate senza prescrizioni antisismiche
- MURATURA: sono naturalmente soggette a danneggiamento anche per terremoti di bassa intensità (strutture rigide, materiale non resistente a trazione, possibilità di meccanismi locali)
- CULTURA SISMICA LOCALE: specifici dettagli costruttivi si trovano nelle zone a maggiore rischio sismico
- VULNERABILITÀ AGGIUNTA da invasivi interventi della “tecnica moderna”
- PRINCIPIO del “MINIMO INTERVENTO”: necessità di conciliare esigenze di sicurezza con desiderio di conservazione

## OBIETTIVI DELL'INTERVENTO DI PREVENZIONE SISMICA

- **SICUREZZA**
- **CONSERVAZIONE**
- **SOSTENIBILITÀ**

Perpetuate | Subline description - Windows Internet Explorer

http://www.perpetuate.eu/

File Modifica Visualizza Preferiti Strumenti ?

Google Effettua la ricerca

Perpetuate | Subline description



PERFORMANCE-BASED APPROACH TO EARTHQUAKE PROTECTION OF CULTURAL HERITAGE IN EUROPEAN AND MEDITERRANEAN COUNTRIES

European Research Project funded by FP7



HOME RESEARCH PROJECT» RESULTS AND DOCUMENTS» DISSEMINATION» RESTRICTED AREA CONTACTS RSS RSS



*Time is the keyword for the conservation of cultural heritage.  
Periodic maintenance protects against material decay, ensuring endless life to buildings.  
Structural health monitoring controls the occurrence of damage or instability due to anthropic or environmental transformations.  
Preventive actions must be adopted in order to PERPETUATE the life of monuments in seismic areas, in due time, before an earthquake interrupts their life forever.*

Sergio Lagomarsino  
Coordinator of PERPETUATE Project

**Login**  
...

**Newsletter**  
Subscribe to receive updates from perpetuate.eu

**Forum**  
Discussion board for the perpetuate.eu topics.

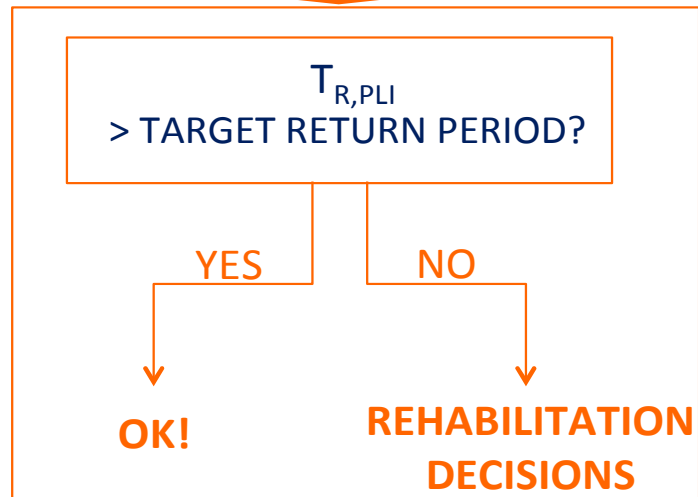
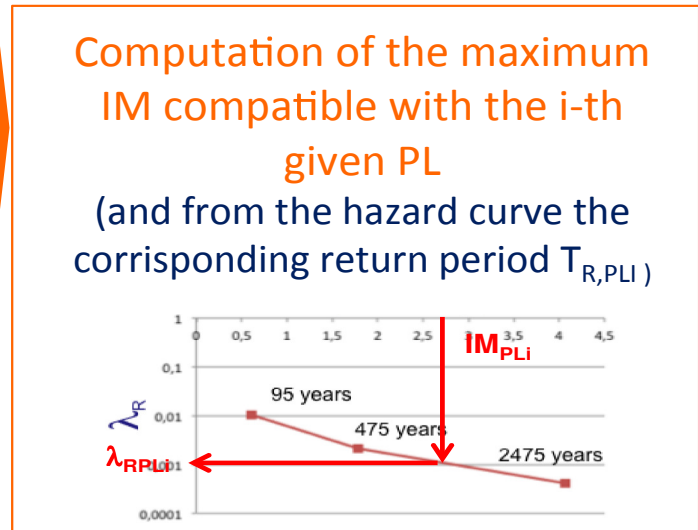
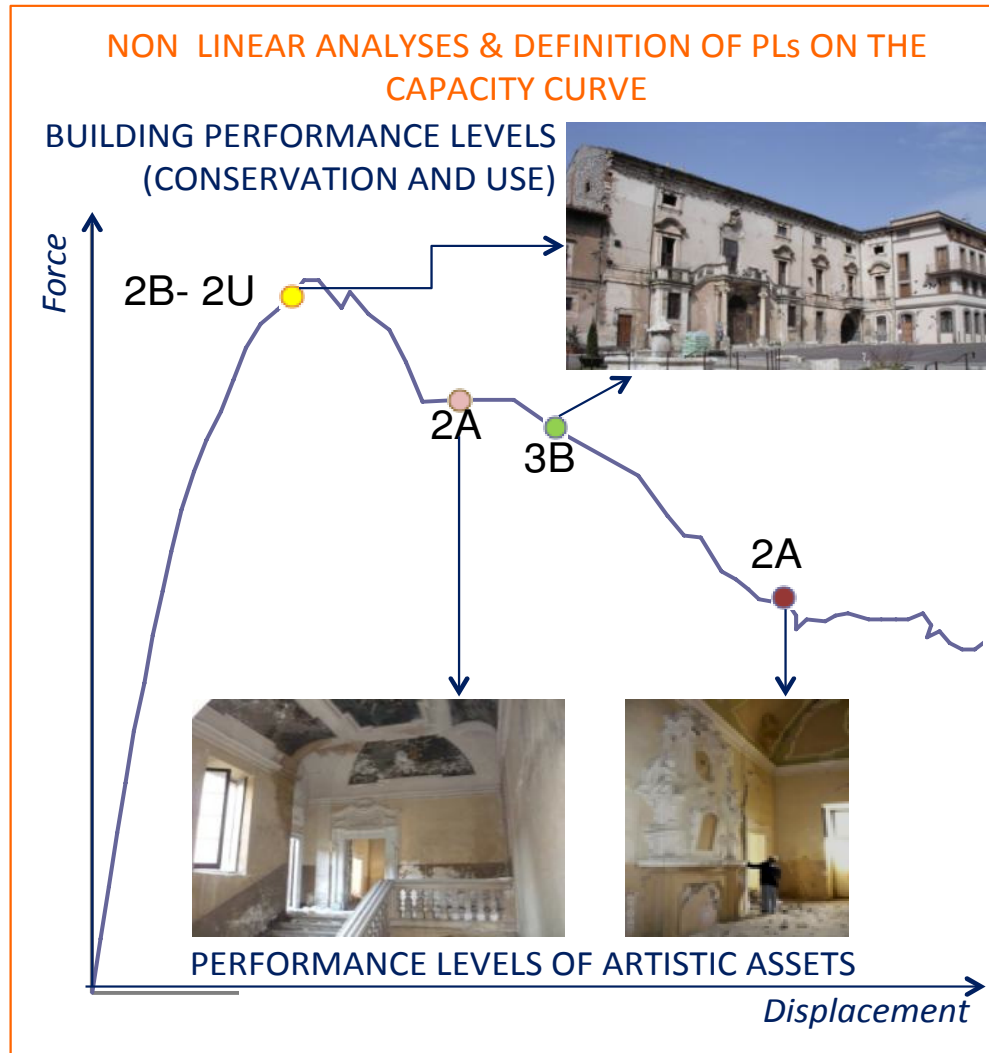
**Links**  
Reference websites and partners

**video su YouTube: "perpetuate research project"**  
**www.perpetuate.eu**

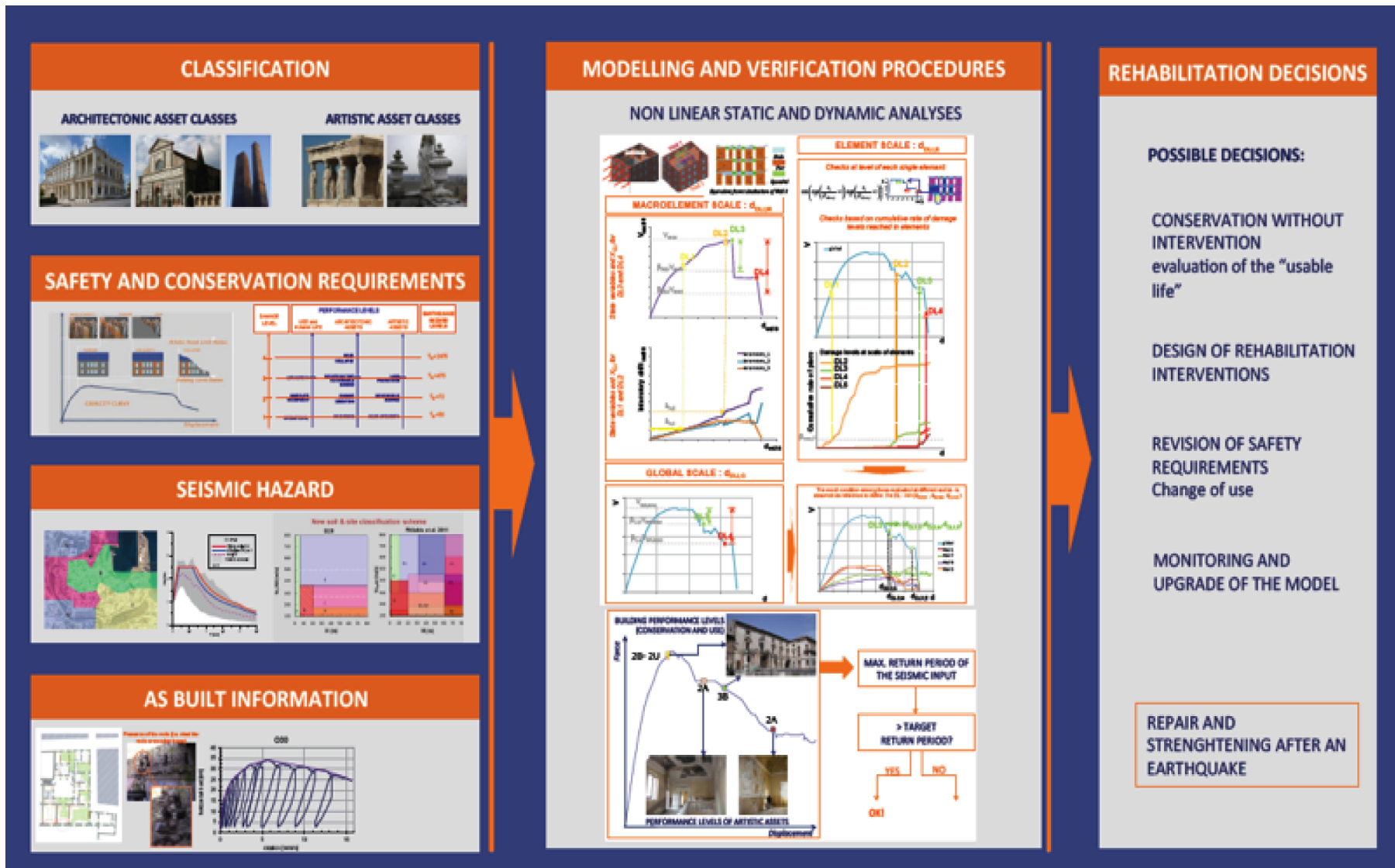
## Principi delle Linee Guida PERPETUATE

- Per la protezione dal rischio sismico del patrimonio culturale è prioritariamente necessario **sviluppare affidabili metodi di analisi e procedure di valutazione**, strumenti indispensabili per attuare concretamente i principi del **“minimo intervento”** tenendo conto delle imprescindibili esigenze di sicurezza.
- Nell’ambito di un **approccio prestazionale**, la valutazione deve essere fatta in spostamenti (**“displacement-based approach”**).
- È necessario riferirsi a **metodi di analisi nonlineari (statici o dinamici)**, oggi disponibili ed applicabili in ambito professionale.
- Nella progettazione degli **interventi di miglioramento sismico** è necessario privilegiare soluzioni: poco invasive, che privilegiano la capacità di spostamento, migliorando i collegamenti, integrando tradizione e innovazione.

# Principi delle Linee Guida PERPETUATE



# I passi della procedura PERPETUATE



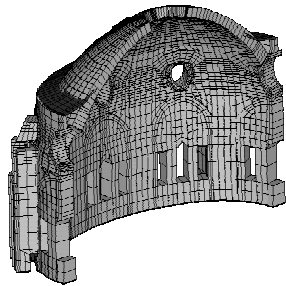
# Classificazione e modelli meccanici per l'analisi

## ARCHITECTONIC CLASSES

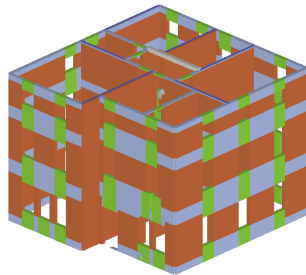


## MODELS CLASSES

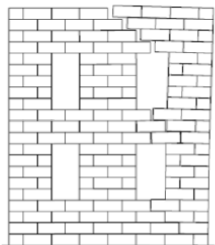
**CCLM - Continuum  
 Constitutive Laws models**



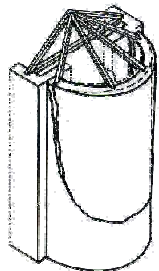
**SEM - Structural Element  
 models**



**DIM - Discrete Interface  
 models**



**MBM - Macro Block  
 models**



## CORRELATION

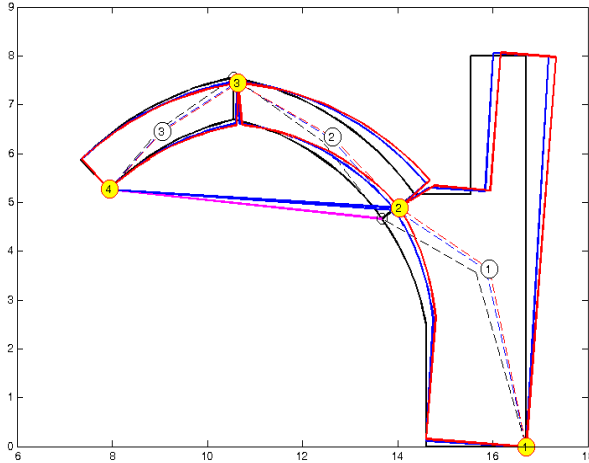
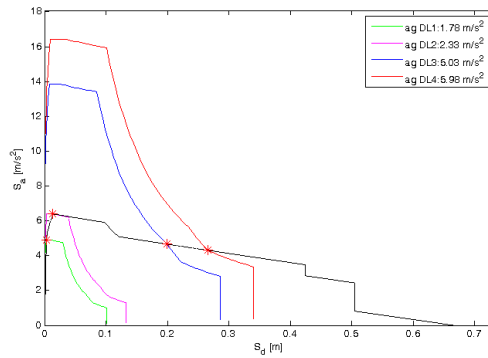
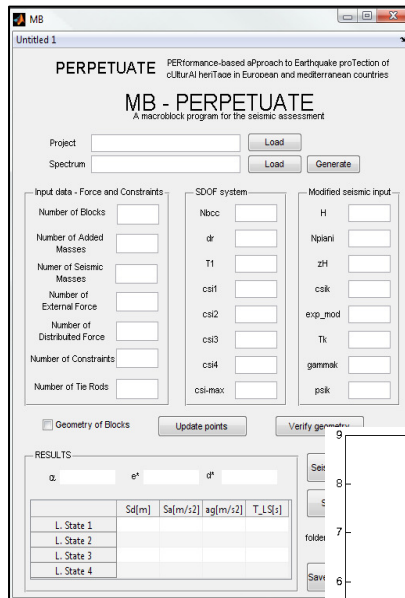
Architectonic asset class		Models			
		CCLM	SEM	DIM	MBM
A	Assets subjected to prevailing in-plane damage	POSSIBLE	Global	POSSIBLE	Local
B	Assets subjected to prevailing out-of-plane damage	POSSIBLE		POSSIBLE	STANDARD
C	Assets characterized by monodimensional masonry elements		STANDARD		POSSIBLE
D	Arched structures subject to in-plane damage	POSSIBLE		POSSIBLE	STANDARD
E	Massive structures in which local failure of masonry prevails	POSSIBLE		STANDARD	
F	Blocky structures subjected to overturning			POSSIBLE	STANDARD
G	Built systems subjected to complex damage		Global	POSSIBLE	Local

RARE    
  POSSIBLE    
  STANDARD



## Analisi limite a macroblocchi

### MB - PERPETUATE

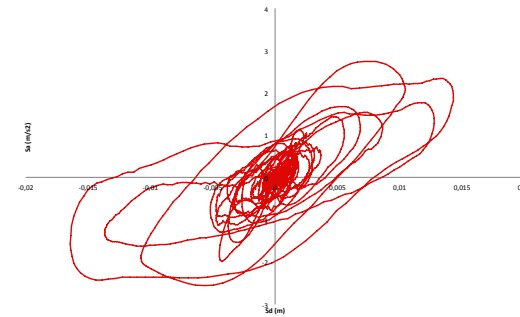
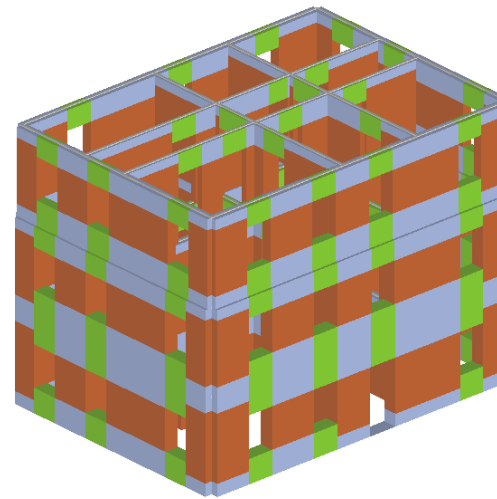


by Lagomarsino S. and Ottonelli D.  
 download: [www.perpetuate.eu](http://www.perpetuate.eu)

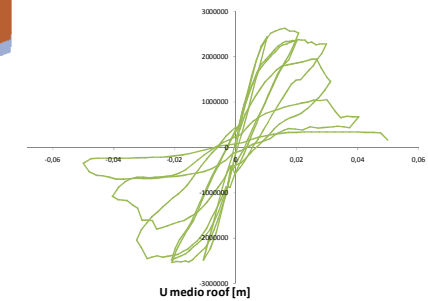
## SOFTWARE

## Analisi 3D a telaio equivalente

### TREMURI



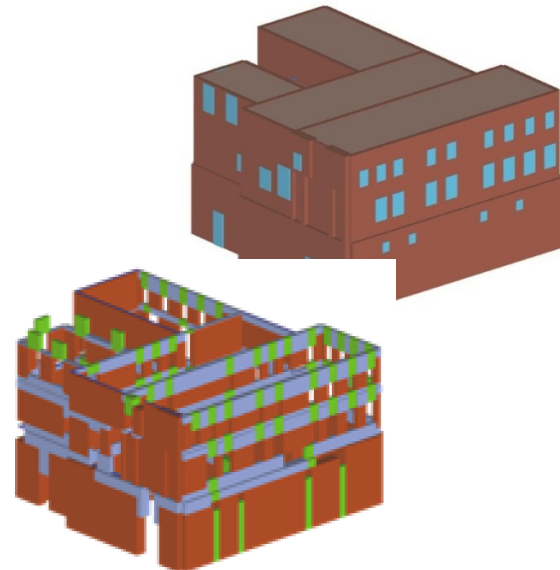
NONLINEAR DYNAMIC ANALYSES



CYCLIC NONLINEAR  
STATIC ANALYSES

by Lagomarsino, Penna, Galasco, Cattari  
 ask to: [tremuri@gmail.com](mailto:tremuri@gmail.com)

# Conoscenza e indagini: analisi di sensitività e $F_c$



## SENSITIVITY ANALYSES

STATISTIC UNCERTAINTIES  
 RANDOM VARIABLES

- MATERIAL PROPERTIES
- PAR. FOR MULTILINEAR CONSTITUTIVE LAWS
- IN-PLANE STIFFNESS OF FLOORS

MASONRY MATERIAL PROPERTIES

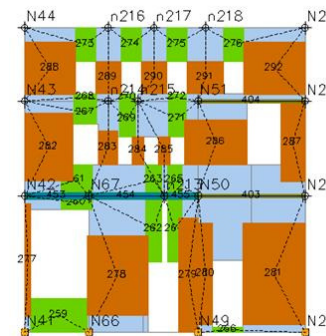
	var $x_k$	$x_k$ mean value	$f_k$
TYPE 1	E	615	0,17
	G	205	0,17
	$\tau$ [Mpa]	0,043	0,19
	$f_m$	2,5	0,2
TYPE 2	E	1400	0,14
	G	430	0,09
	$\tau$ [Mpa]	0,082	0,21
	$f_m$	5	0,2

EPISTEMIC UNCERTAINTIES  
 LOGIC TREE APPROACH

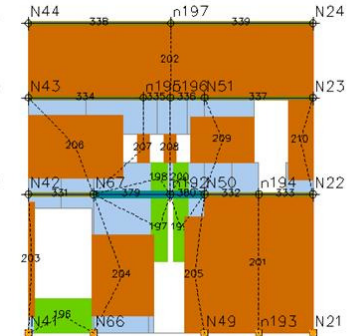
INFILLED OPENINGS



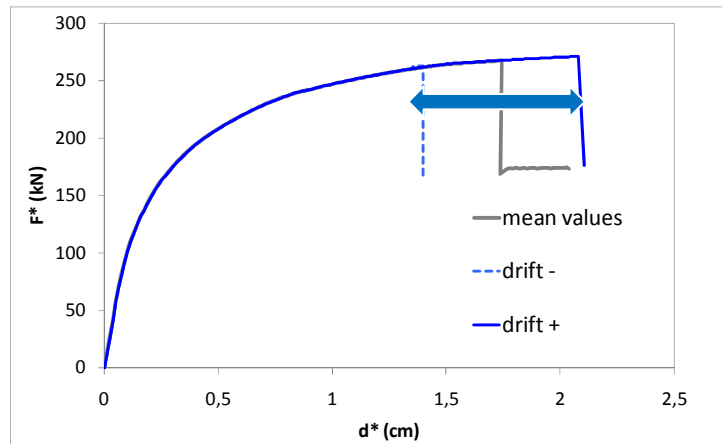
MODEL A



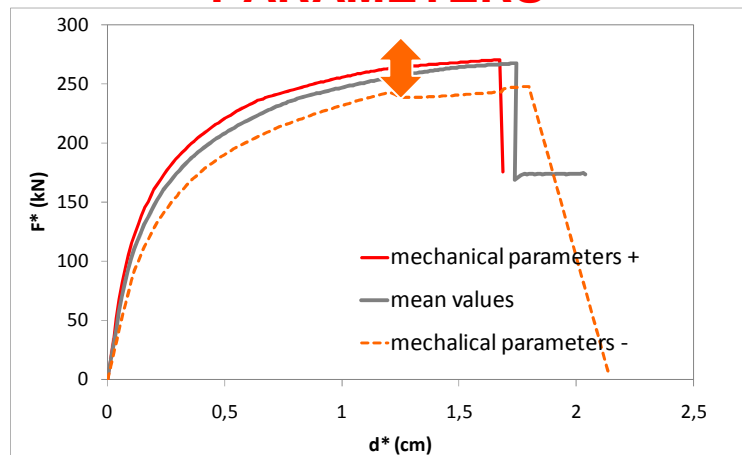
MODEL B



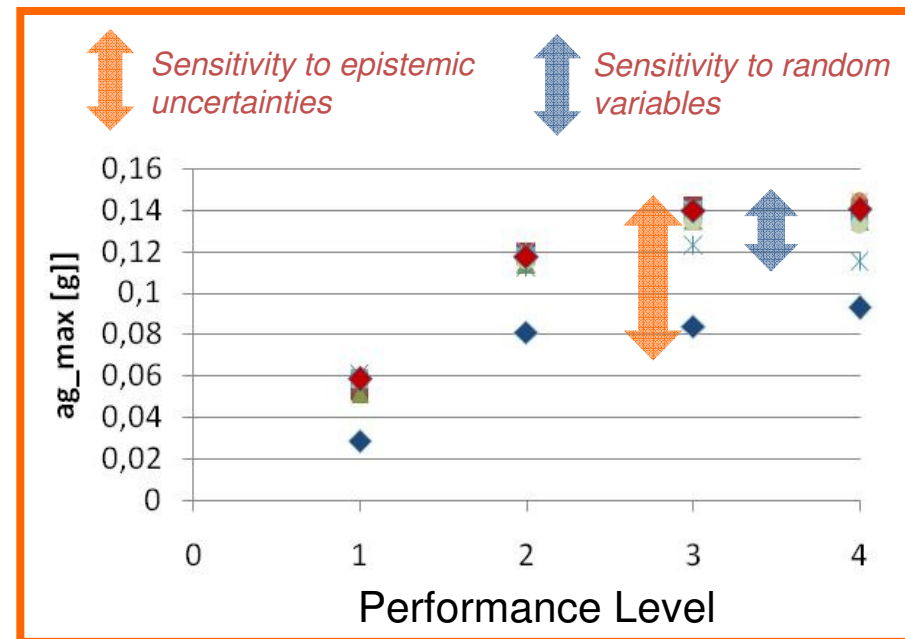
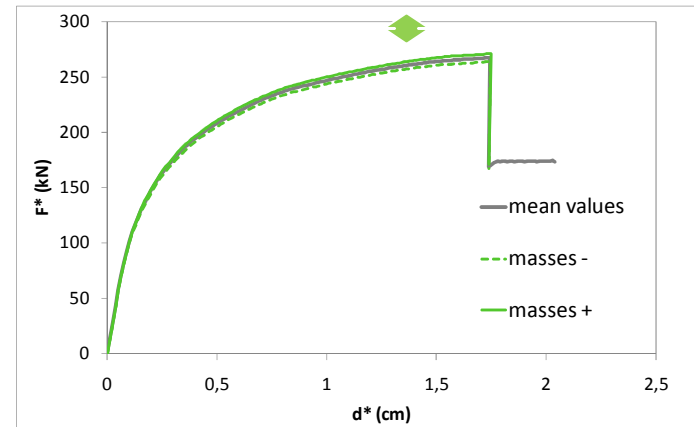
## SENSITIVITY TO DRIFT



## SENSITIVITY TO MATERIAL PARAMETERS

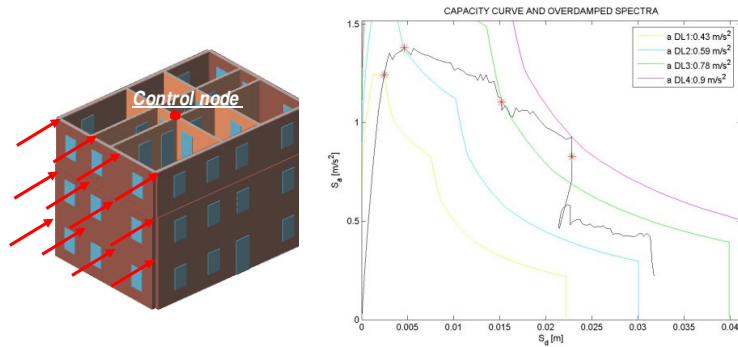


## SENSITIVITY TO MASSES

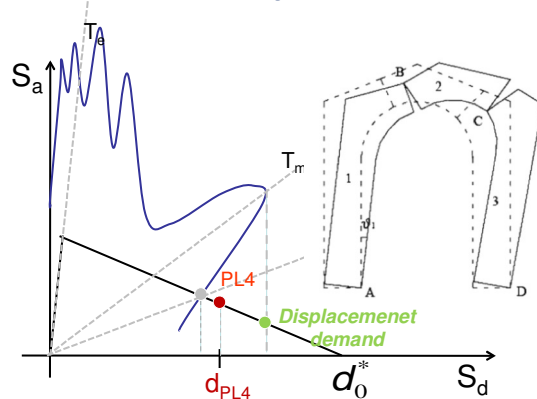


## PUSHOVER ANALYSES AND CAPACITY SPECTRUM METHOD (STANDARD METHOD)

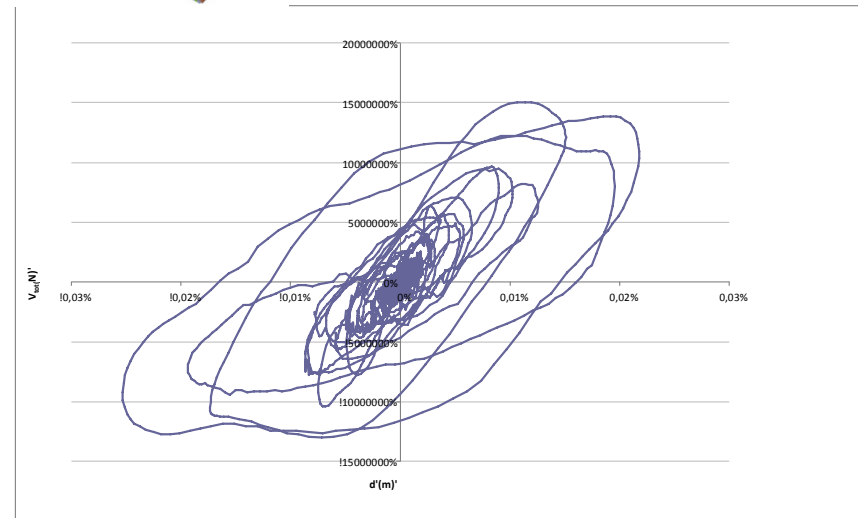
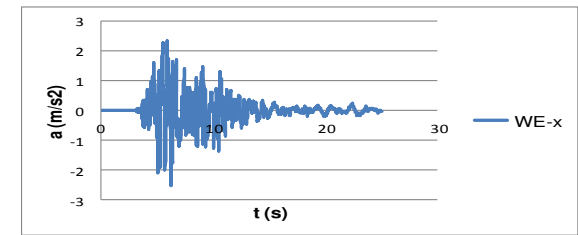
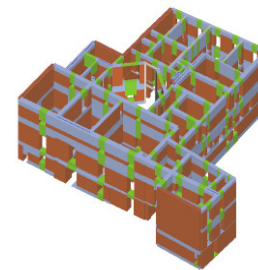
### Non linear static analyses



### Incremental equilibrium analyses



## NON-LINEAR DYNAMIC ANALYSIS (IDA) (MORE ACCURATE – HIGH COMPUTATIONAL EFFORT)



## Il terremoto del maggio 2012 in Emilia

- **ELEVATA INTENSITÀ:** massimo storico per l'area epicentrale (più forte del terremoto stimato dalla mappa INGV per  $T_R=475$  anni).
- **AMPLIFICAZIONE LOCALE:** caratteristiche del moto sismico tipiche di un suolo deformabile (tipo C), con contenuti in frequenza sui lunghi periodi e grandi domande di spostamento.
- **VULNERABILITÀ:** costruzioni con limitata presenza di dettagli costruttivi antisismici (“regole dell’arte”) - terremoti poco frequenti: pareti sottili, poche catene, coperture spingenti e mal collegate.
- **TIPOLOGIE VULNERABILI** – strutture flessibili: torri e campanili, elementi svettanti, chiese, palazzi con grandi aule, casolari, rocche.
- **EDILIZIA RESIDENZIALE IN MURATURA:** buon comportamento di edifici regolari, isolati, a 2 o 3 piani (se sufficiente qualità malta).

# Le scosse sismiche del 20 e 29 maggio 2012

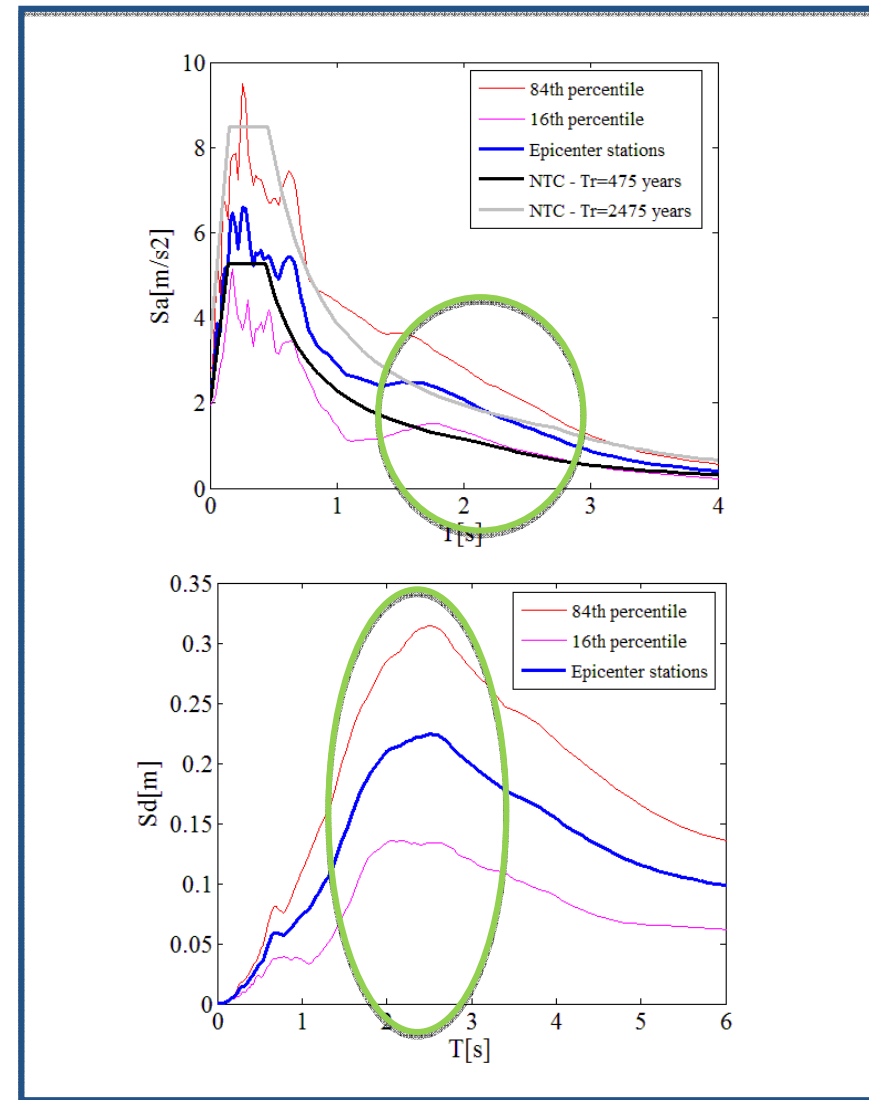
**PRIMA SCOSSA: 20-5-12**  
 ( $M_L=5.9$ ; EPICENTRO VICINO A  
 FINALE EMILIA – MO)

**SECONDA SCOSSA: 29-5-12**  
 ( $M_L=5.8$ ; EPICENTRO VICINO A  
 MIRANDOLA – MO)

ELEVATA COMPONENTE VERTICALE

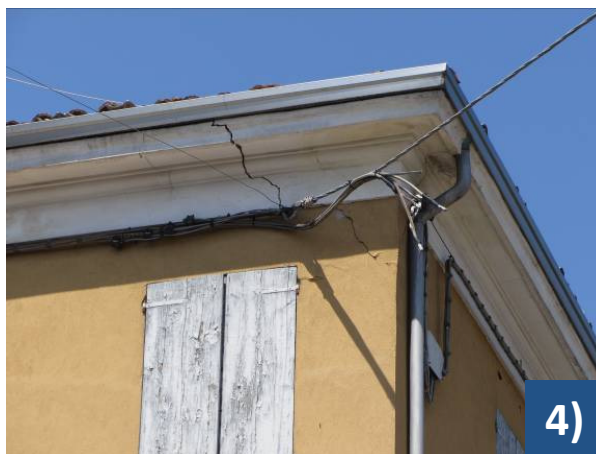
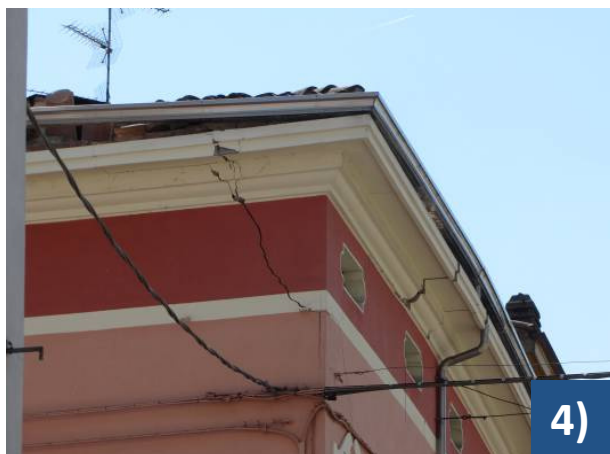


*Dalle registrazioni nella zona epicentrale*  
 (MRN 20/5/2012 e 29/5/2012; SAN0 29/5/2012):



## Vulnerabilità degli edifici in muratura emiliani

- 1) MURATURA DI MATTONI CON MALTA DI BASSA QUALITA' E SCARSA ADERENZA
- 2) DEGRADO E UMIDITA' (NEI CASI DI EDIFICI ABBANDONATI)
- 3) LIMITATO SPESSORE DELLE PARETI (A DUE O TRE TESTE, MALE AMMORSATE)
- 4) COPERTURE LIGNEE SPINGENTI E MALE COLLEGATE ALLA SOMMITA' DEL MURO



# Risposta sismica delle costruzioni in muratura

## DALLA LETTURA DEL DANNO

### GRAVI DANNI A SPECIFICHE CATEGORIE

EDIFICI MONUMENTALI: VULNERABILITA'  
DI ALCUNE TIPOLOGIE



CASOLARI: TIPOLOGIA VULNERABILE E  
CATTIVA MANUTENZIONE



### BUON COMPORTAMENTO EDILIZIA ORDINARIA





## EDILIZIA ORDINARIA

- ✓ AGGREGATI RECENTI E POCO COMPLESSI
- ✓ BUONI AMMORSAMENTI GRAZIE ALL'USO DEL MATTONE



LIMITATA VULNERABILITA' PER AZIONI FUORI PIANO



- RIBALTAMENTO DI PORZIONI SVETTANTI IN CORRISPONDENZA DI IRREGOLARITÀ IN ELEVAZIONE



- CROLLO DEI CORNICIONI O DI PORZIONI SOMMITALI DELLA FACCIATA, CAUSATI DAL SISTEMA DI COPERTURA (PUNTONI SPINGENTI O COPERTURA NON COLLEGATA ALLA CIMASA MURARIA)

# EDILIZIA ORDINARIA

✓ BUONI AMMORSAMENTI GRAZIE ALL'USO DEL  
MATTONE

✓ ASSENZA DI CORDOLI DI PIANO



DANNO PREVALENTE PER  
AZIONI NEL PIANO  
(MECCANISMO PER "FASCE  
DEBOLI")



○ IL DANNO INTERESSA IN  
MODO "UNIFORME" TUTTA LA  
PARETE

○ SI LOCALIZZA IN TUTTE LE  
FASCE, PRIMA CHE NEI  
MASCHI MURARI



○ I MASCHI SI DANNEGGIANO  
IN GENERE ALLA BASE, SOLO  
A SEGUITO DI SIGNIFICATIVI  
SPOSTAMENTI

# Simulazione del danno in un edificio a San Felice sul Panaro

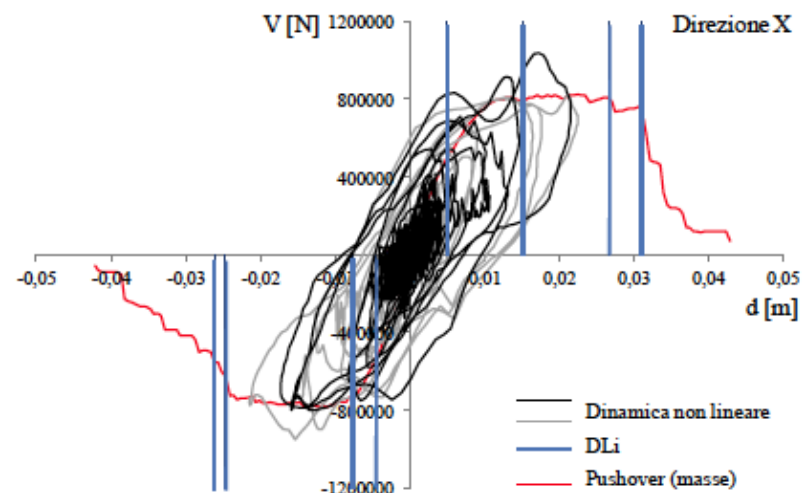
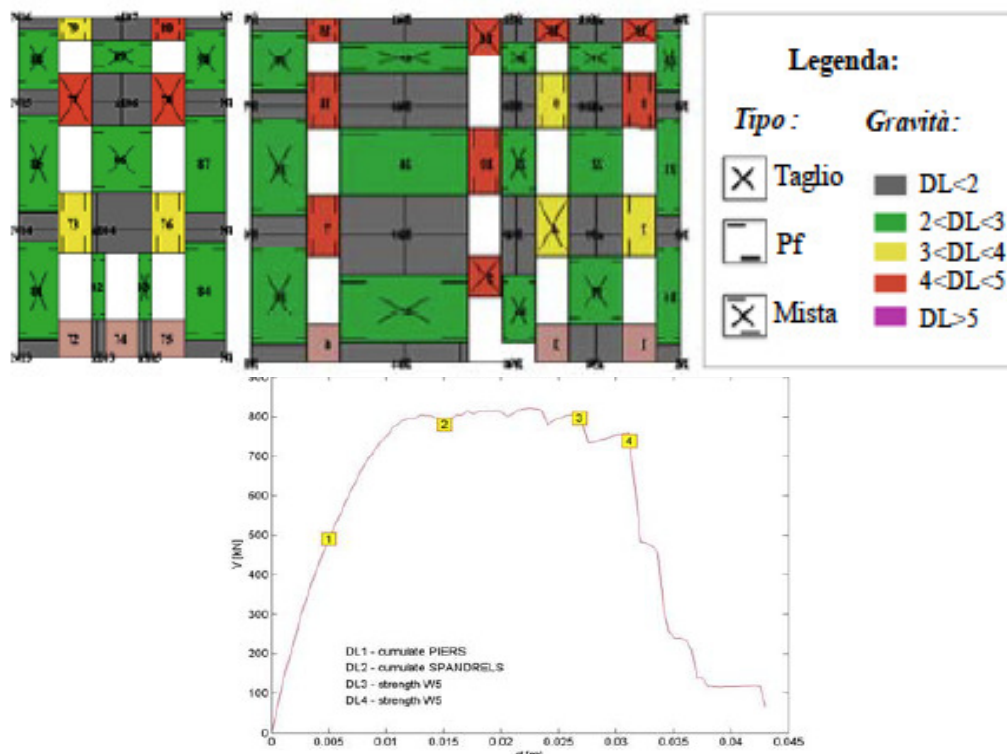


Figura 18. Direzione X: confronto tra le analisi non lineari statiche e dinamiche

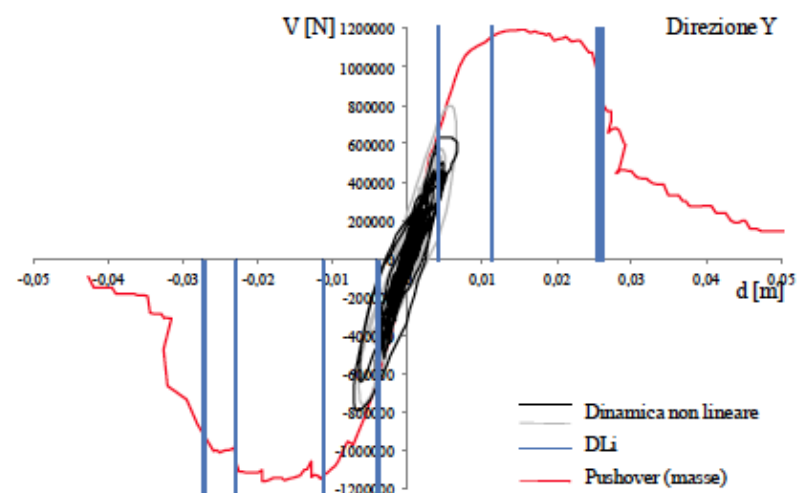
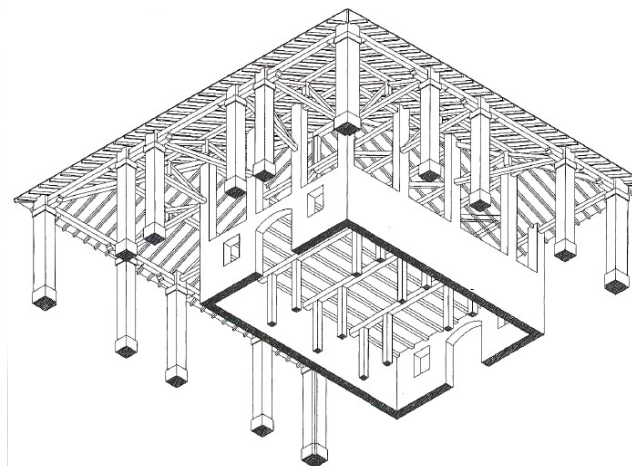


Figura 19. Direzione Y: confronto tra le analisi non lineari statiche e dinamiche

## VULNERABILITA'

- CATTIVO STATO DI MANUTENZIONE
- PRESENZA DI PILASTRI MURARI MOLTO SNELLI E DI POCHE PARETI PIENE
- PERIODI DI VIBRAZIONE PIUTTOSTO LUNGHI
- LIMITATO GRADO DI IPERSTATICITÀ, LEGATO ALL'ASSENZA DI UNA STRUTTURA DI COPERTURA BEN ORGANIZZATA E CONTROVENTATA
- SONO PRESENTI CAPRIATE NELLA ZONA CENTRALE, DA CUI SI DIPARTONO UNA SERIE DI PUNTONI DI FALDA SPINGENTI SULLE PARETI LATERALI E SUI PILASTRI DEL PROSPETTO

## CASOLARI RURALI



## DANNI:

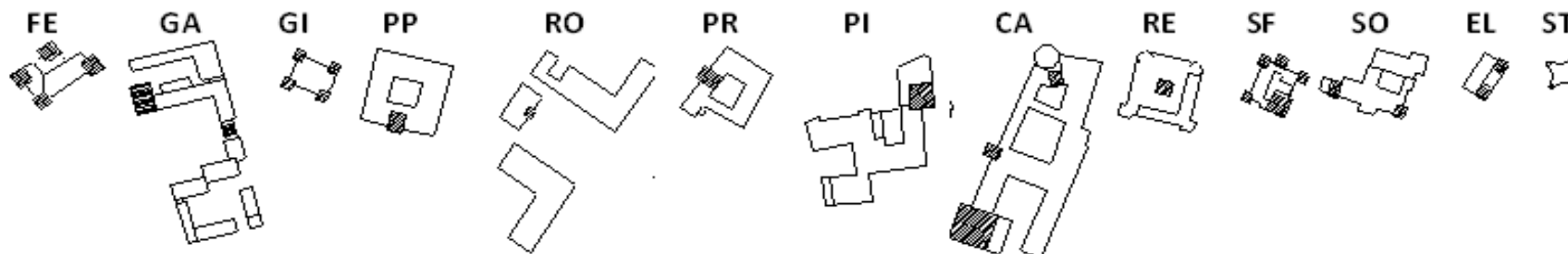
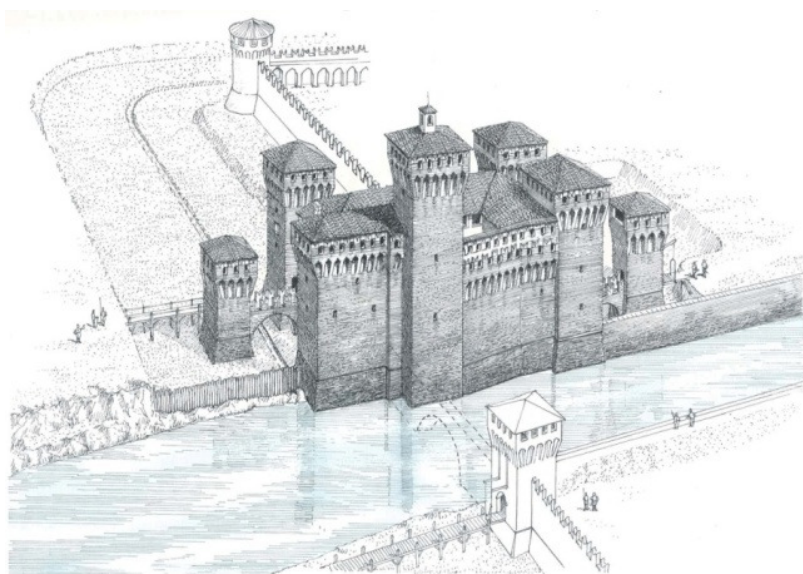
I DANNI RICORRENTI OSSERVATI SONO TIPICAMENTE ASSOCIATI ALLA SPINTA DI ELEMENTI DELLA COPERTURA NON ADEGUATAMENTE COLLEGATI, CON APERTURA DEI GIUNTI NELLA SEZIONE DI BASE DEI PILASTRI MURARI



*Esempi di rotazioni con parzializzazione alla base dei pilastri del prospetto principale*

# ROCCE FORTIFICATE

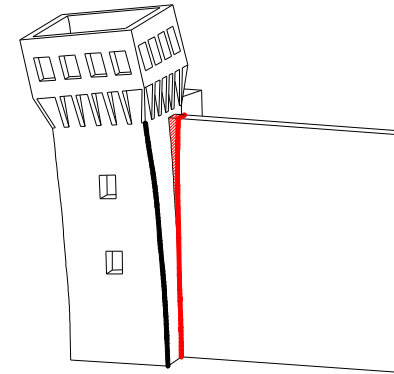
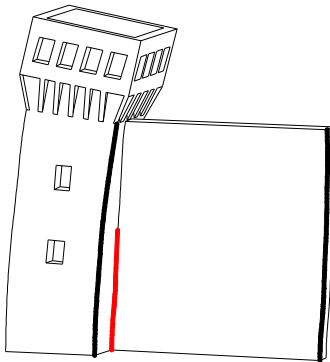
- COSTRUZIONI FORTIFICATE MEDIEVALI COSTRUITE COME FORTILIZIO MILITARE
- PRESENZA DI UN BASTIONI E TORRI, COLLEGATI PER MEZZO DI MURA DIFENSIVE



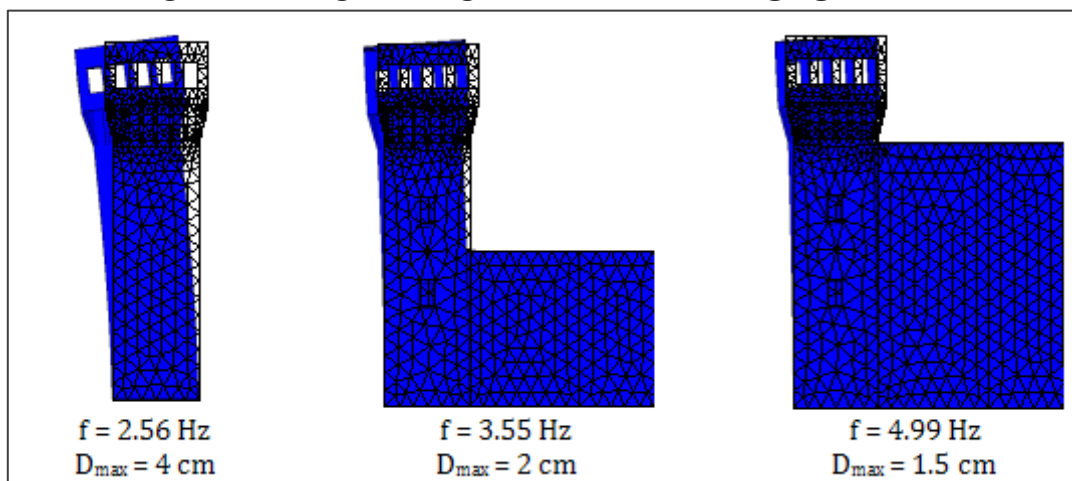
0 50m

# ROCCE FORTIFICATE

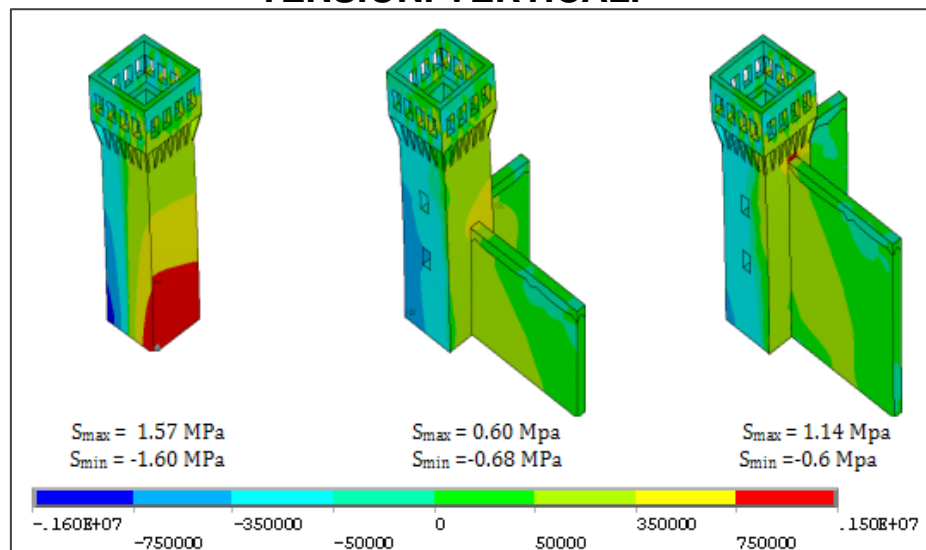
- TORRI D'ANGOLO COLLEGATE AI MURI PERIMETRALI SENZA CONTINUITÀ ED ALLINEAMENTO → CONCENTRAZIONI DI SOLLECITAZIONI → FLESSIONE SUI MURI DELLA TORRE, CONDIZIONI DI VINCOLO ECCENTRICO CHE FAVORISCONO UNA RISPOSTA TORSIONALE.
- LA DIVERSA ALTEZZA E SNELLEZZA DEI MURI PERIMETRALI DELLA FORTEZZA E DELLA TORRE → DIVERSA RISPOSTA DINAMICA AD AZIONI ORIZZONTALI, CARATTERIZZATA DA UNA DEFORMAZIONE PREVALENTEMENTE A TAGLIO PER I PRIMI E FLESSIONALE PER LA SECONDA.



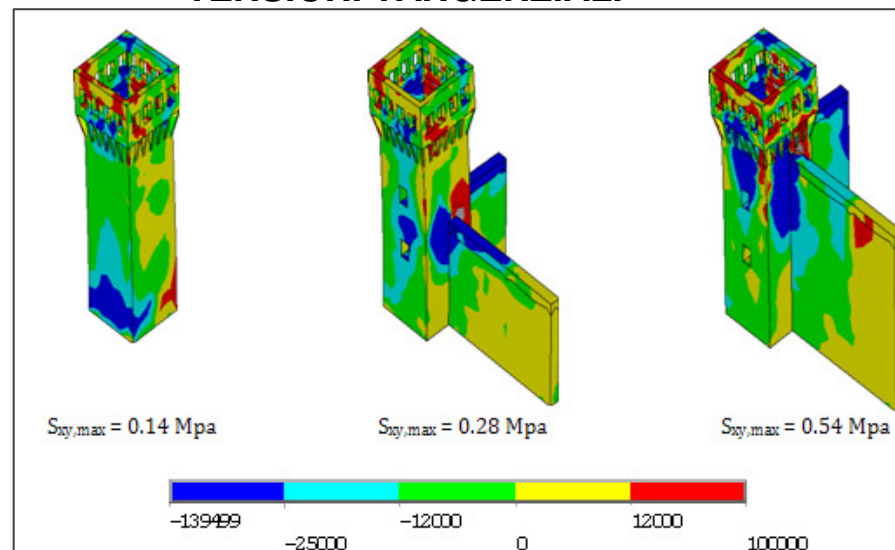
## DEFORMATE OTTENUTE DALL'ANALISI SPETTRALE



## TENSIONI VERTICALI



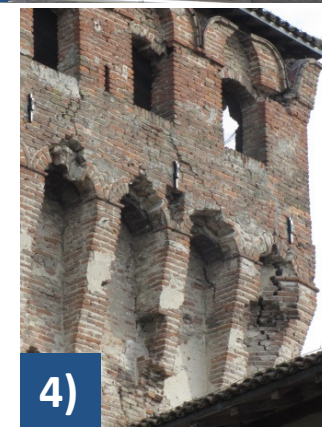
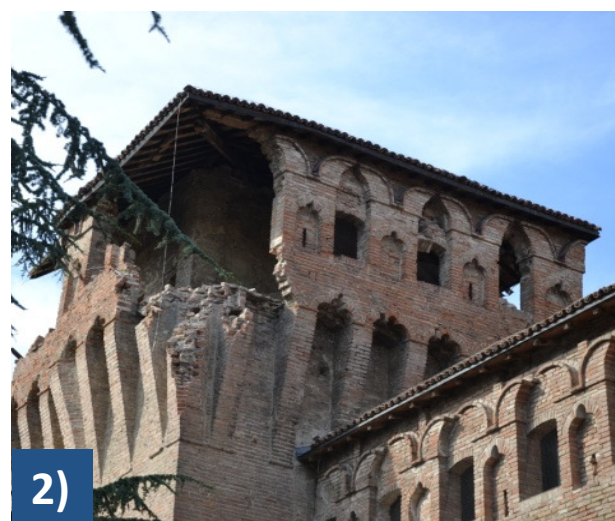
## TENSIONI TANGENZIALI





## ROCCE FORTIFICATE

- 1) LESIONI A TAGLIO NEL CORPO PRINCIPALE DELLE TORRI
- 2) DANNI FAVORITI DALLA PRESENZA DI COPERTURE SPINGENTI O MAL COLLEGATE
- 3) DANNI CONCENTRATI IN SOMMITÀ NEI MASCHI MURARI E NELLE MERLATURE
- 4) LESIONI NELLE MENSOLE DI MURATURA CHE SORREGGONO LA PARTE SOMMITALE





TALVOLTA  
GUGLIA  
SLANCIATA

CELLA  
CAMPANARIA

FUSTO CON  
PICCOLE  
APERTURE  
ALLINEATE

CIASCUNO DEI TRE ELEMENTI È CARATTERIZZATO DA SPECIFICI MECCANISMI DI DANNO E COLLASSO

✓ STRUTTURE FLESSIBILI

✓ IL COLLEGAMENTO A STRUTTURE ADIACENTI PIÙ RIGIDE (LA CHIESA) RIDUCE IL PERIODO DI VIBRAZIONE E MODIFICA IL COMPORTAMENTO

## VINCOLATI SU UN LATO

## CAMPANILI ISOLATI

### ✓ Campanile del Duomo di Mirandola



- Sollecitazioni di taglio nel fusto, aggravate dalla presenza di aperture allineate su tale asse
- Nella cella campanaria le sollecitazioni di compressione si concentrano nei pilastri murari, (collasso locale delle paraste esterne)
- Deformazione permanente torsionale, causata dal vincolo asimmetrico

### ✓ Campanile di Buonacompra



- Danno per pressoflessione alla base, subito sopra il basamento, particolarmente robusto
- Crollo della guglia

✓ Chiesa di S. Francesco di Assisi (Finale Emilia)



✓ Rocca di Galeazza



✓ Palazzo di Pico



## VULNERABILITA'

- SNELLEZZA
- AMPLIFICAZIONE DELL'INPUT PER L'EFFETTO FILTRO
- MOTO SISMICO CON DOMANDE DI SPOSTAMENTO SPETTRALE ELEVATE AI LUNGI PERIODI
- ELEVATA COMPONENTE SUSSULTORIA NELL'AREA EPICENTRALE

## DANNO OSSERVATO

- SCONNESSIONI
- SCORRIMENTI
- CROLLI A TERRA

A Mirandola l'accelerazione spettrale per un periodo  $T=0.6$  s ha addirittura superato i 3 g → un elemento ha ricevuto istantaneamente un'azione risultante verso l'alto pari a 2 volte il proprio peso, che lo ha sollevato!!!

L'uso di modelli meccanici, purchè basati su una attenta conoscenza della costruzione e affiancati da interpretazioni qualitative, è essenziale nella valutazione del giusto punto di equilibrio tra sicurezza e conservazione.

Nel secolo scorso, in Italia, gli interventi di consolidamento sul costruito sono stati progettati senza far uso di modelli meccanici, e ciò ha portato:

- Interventi di adeguamento invasivi, dettati dalla fiducia sulla “tecnica moderna” e sui principi di irrigidimento e resistenza.
- Interventi di miglioramento, basati su un approccio qualitativo, talvolta insufficienti, altre volte inutili.

Gli effetti degli ultimi terremoti italiani sul patrimonio storico ci impongono di operare una strategia di prevenzione consapevole degli edifici storici, che consideri la sicurezza, conservazione e sostenibilità.