

ANALISI DI VULNERABILITÀ AVANZATE DI STRUTTURE IN C.A. E MURATURA

A cura del Settore di Calcolo Geotecnico

Ing. Paolo Sattamino - Direttore Commerciale

Ing. Ada Zirpoli - Coordinatore Tecnico

Ingg. A. Bertella, M. Dalla Valle, R. Giangualano - Supporto Tecnico



STRATEGIE DI MODELLAZIONE E ANALISI DI STRUTTURE IN MURATURA MODELLATE AL CONTINUO

Ing. Corrado Prandi – Studio Tecnico Civile Ing. Prandi, Correggio (RE)

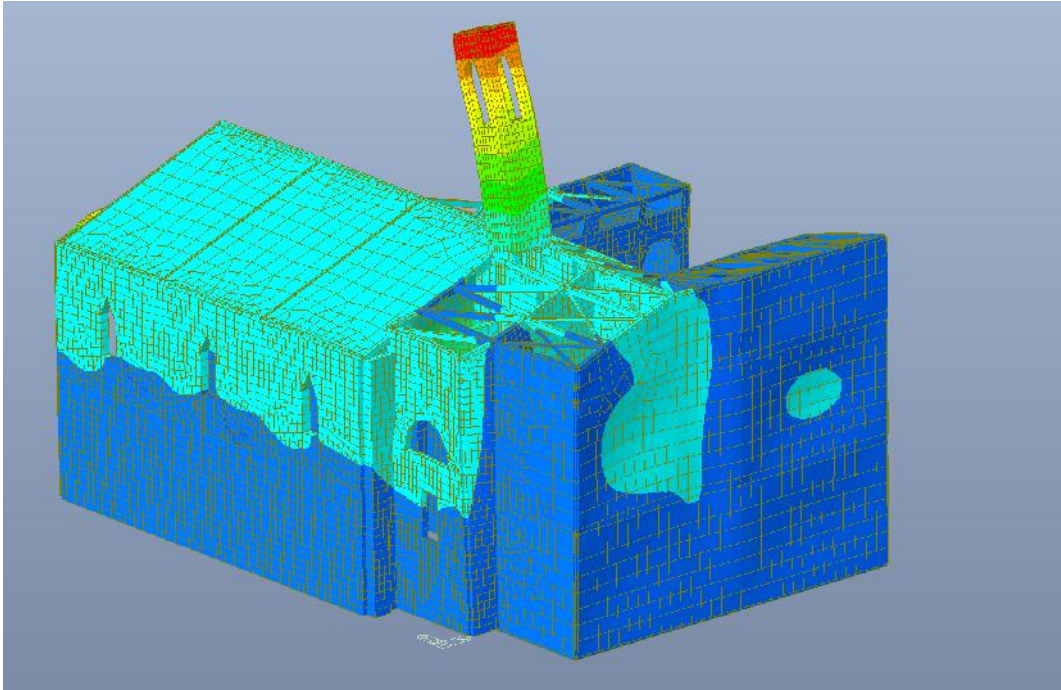




Giugno 2016

Seminari Calcolo Strutturale





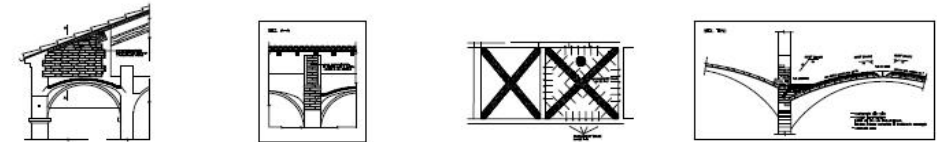
FASI PRELIMINARI:

- rilievo geometrico
- rilievo del quadro fessurativo
- riconoscimento delle fasi di edificazione
- differenziazione della qualità materiali
- determinazione semplificata tensioni

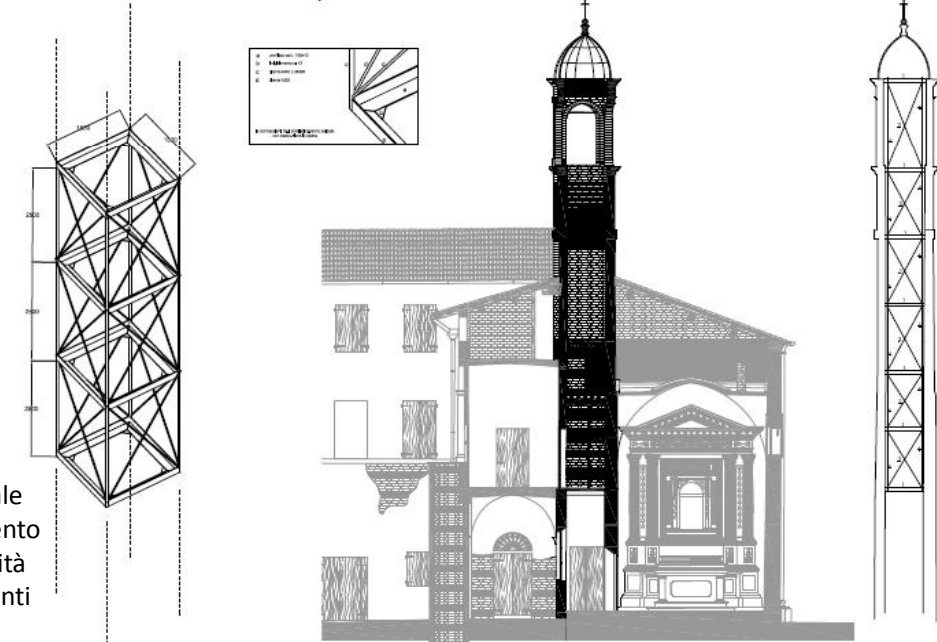
MODELLAZIONE e PROGETTO

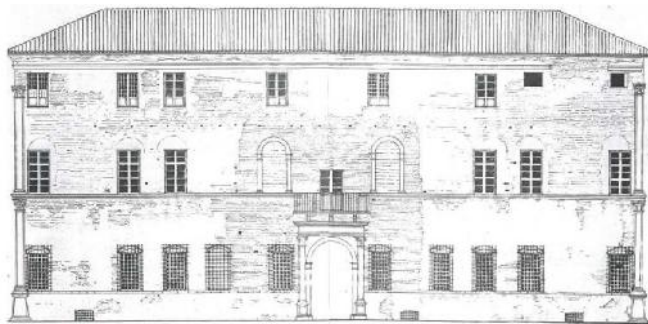
- differenziazione storica dei materiali
- attribuzione di vincoli e rigidzze
- analisi dinamica lineare
- riconoscimento delle max.tensioni
- analisi statica non lineare
- progressione del danneggiamento
- comportamento globale
- riscontri danneggiamento
- valutazione vulnerabilità
- interventi locali coerenti

2. consolidamento delle volte



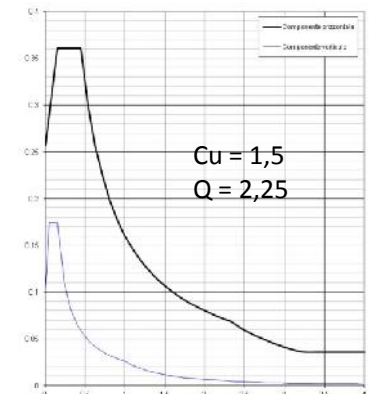
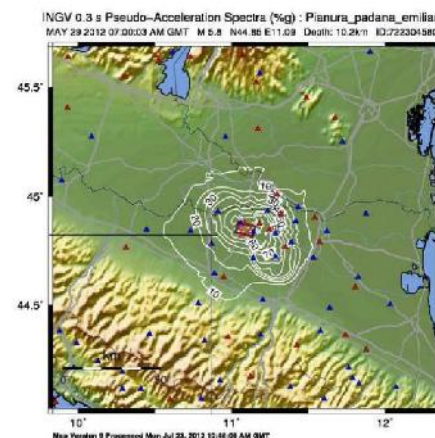
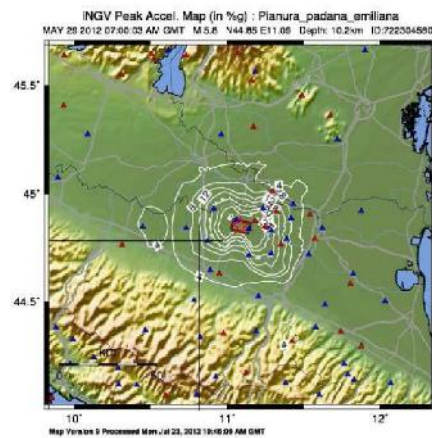
3. consolidamento del campanile

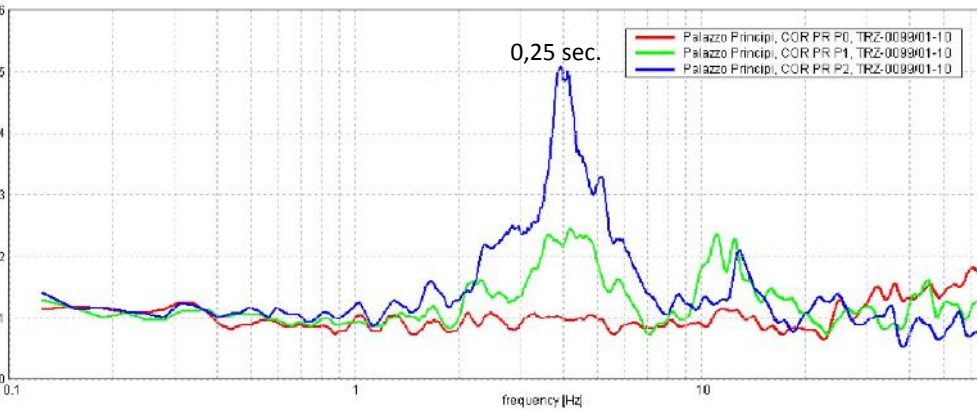




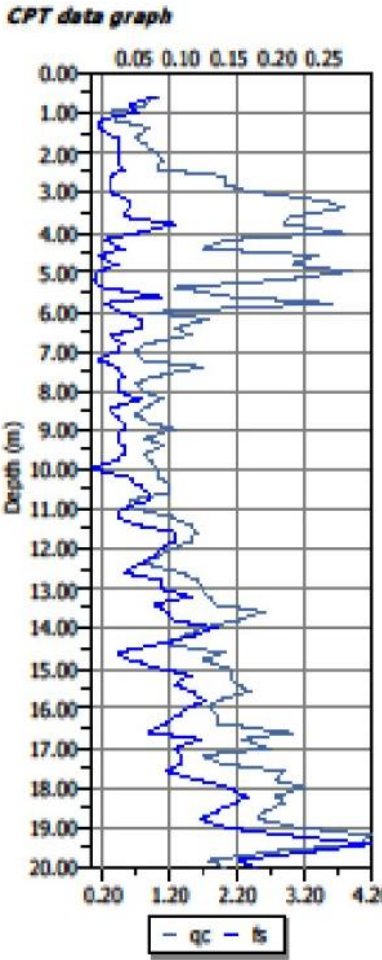
anno	magnitudo	epicentro
1547	5.2	Reggio Emilia
1572	5.1	Sorvolo
1586	4.8	S.Cesario sul Panaro
1591	4.8	Reggio Emilia
1608	4.8	Reggio Emilia
1660	4.6	Modena
1671	5.3	Campogalliano
1806	5.2	Novellara
1810	5.3	Guastalla
1811	5.2	Casalgrande
1831	5.4	Campegine
1832	5.6	S.Ilario d'Enza
1850	4.8	Modena

anno	magnitudo	epicentro
1857	5.3	S.Ilario d'Enza
1873	5.1	Scandiano
1915	5.0	S.Ilario d'Enza
1923	5.2	Formigine
1928	4.8	Carpi
1930	4.8	Albinea
1950	4.5	Bagnolo in Piano
1967	4.7	Correggio
1967	4.5	Castelnuovo Rangone
1987	5.0	S.Tommaso della Fossa
1996	5.4	Bagnolo in Piano
2000	4.5	Canolo di Correggio

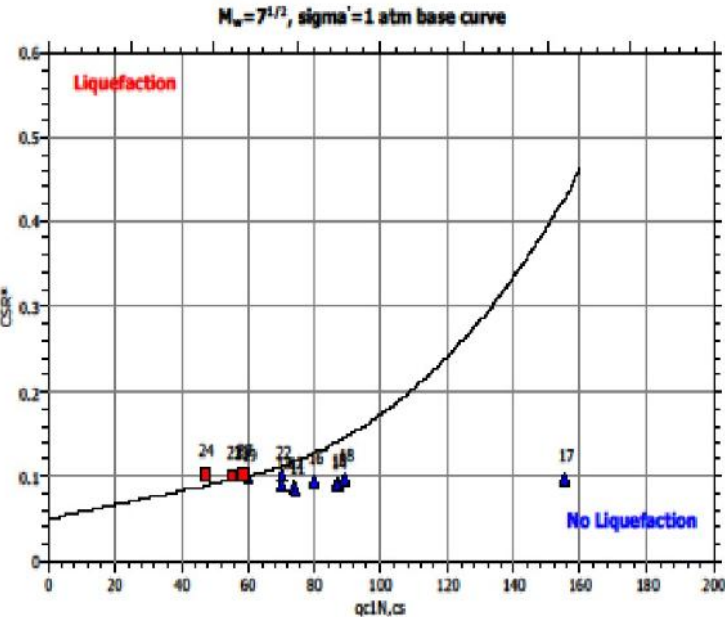


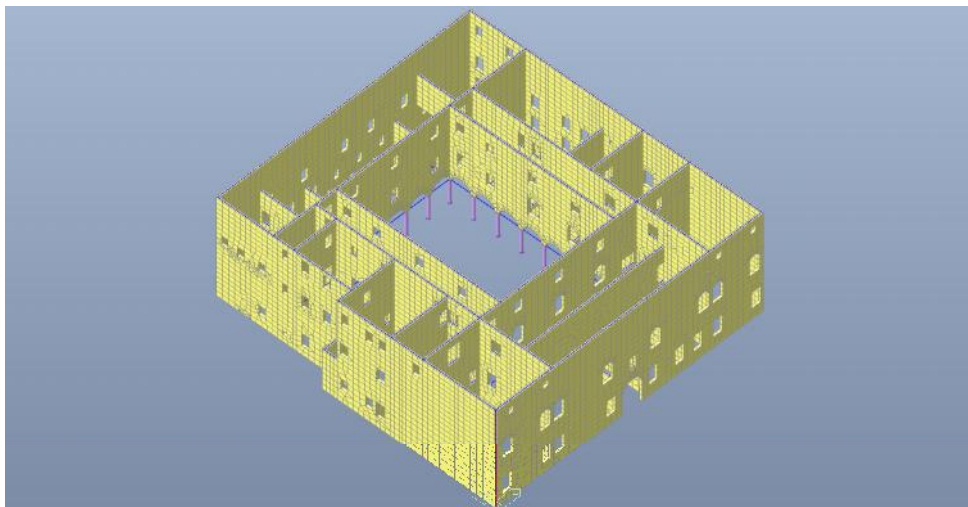


Modo	Periodo (s)	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X		ROTN-Y		ROTN-Z	
		MASS (%)	SUM (%)	MASS (%)	SUM (%)	MASS (%)	SUM (%)	MASS (%)	SUM (%)	MASS (%)	SUM (%)	MASS (%)	SUM (%)
1	0.2774	83.1361	83.1361	0.0360	0.0360	0.0000	0.0000	0.0083	0.0083	22.4724	22.4724	1.0667	1.0667
2	0.2628	0.0123	83.1485	87.4501	87.4862	0.0000	0.0000	21.4925	21.5008	0.0081	22.4805	0.2271	1.2938
3	0.1605	9.4347	92.5831	0.4416	87.9278	0.0000	0.0000	0.4289	21.9296	9.5652	32.0457	16.3512	17.6450
4	0.1143	0.4487	93.0318	7.0332	94.9610	0.0000	0.0000	39.3249	61.2545	1.9917	34.0373	4.1549	21.7999

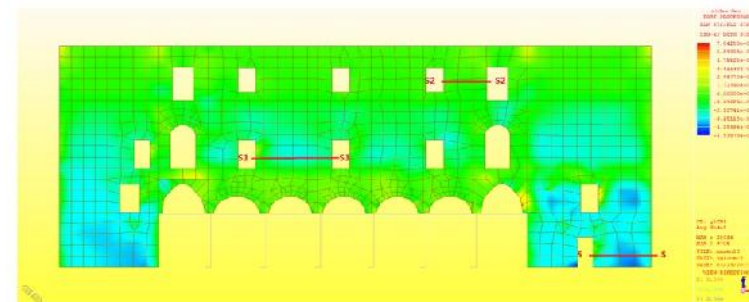


strato n°	Velocità onde S (V _S)	Profondità base strato (m)	Spessore singolo strato (m)
1	93	0.47	0.47
2	114	1.12	0.65
3	166	2.51	1.39
4	185	3.63	1.12
5	210	6.71	3.08
6	190	10.44	3.73
7	239	15.51	5.07
8	255	30.0	14.49



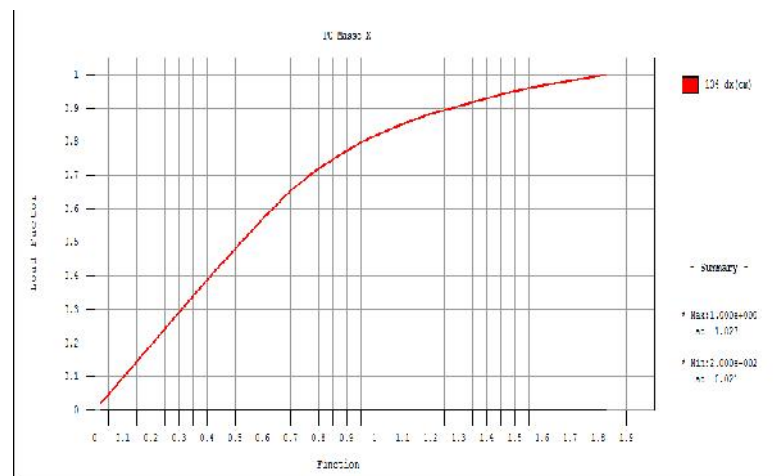
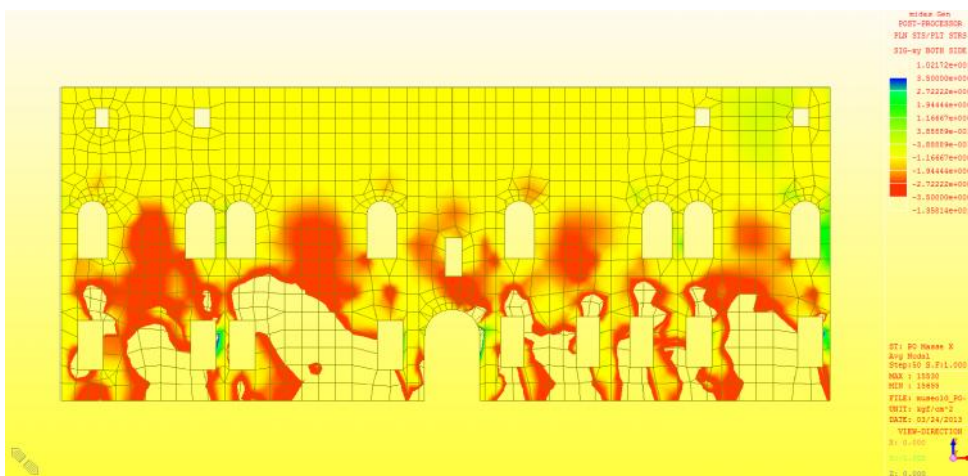


Analisi dinamica lineare
individuazione zone più gravate
verifiche capacità maschi murari



Sezione S-S

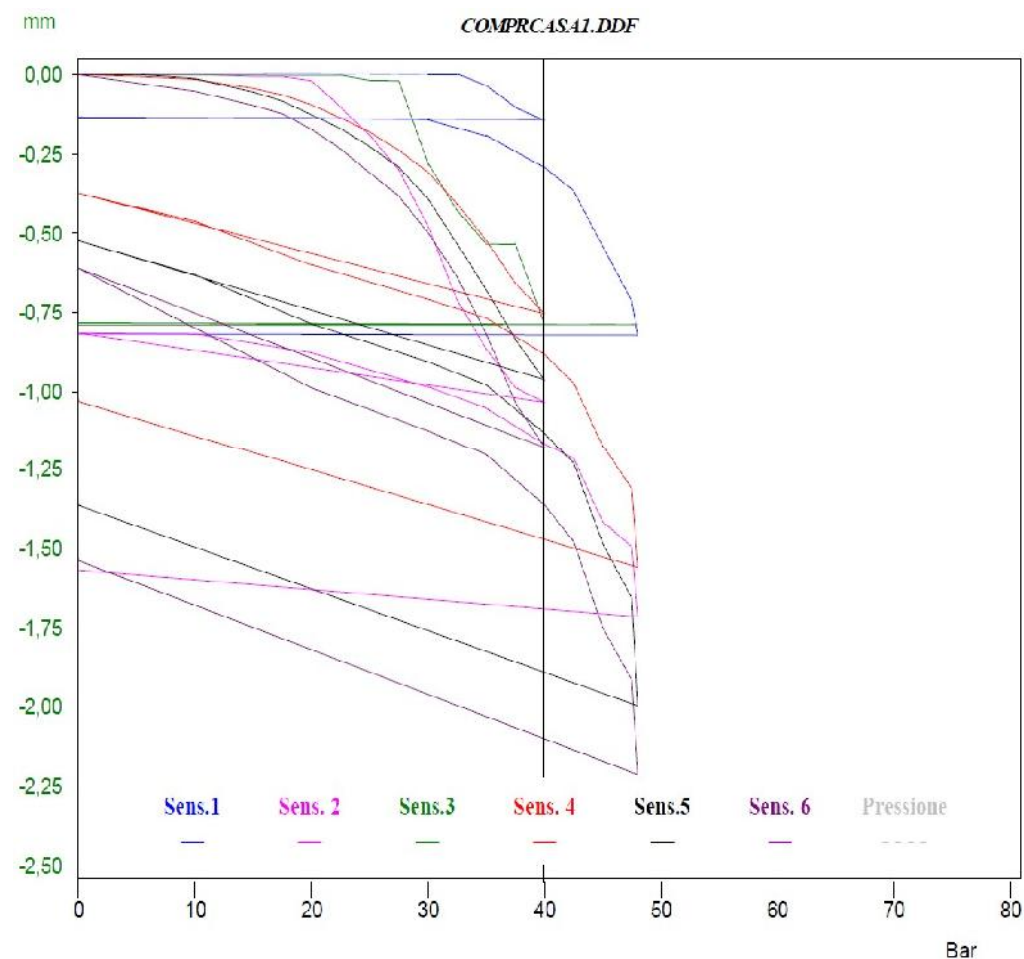
PRINCIPALI ESISTENTI	Verifica pressoflessione		Verifica a taglio	
	Mcd nel piano	958900	Mcd fuori piano	61832
NELLE	Mu nel piano	13860750	Ve scorrimento	50204.667
	I fattore di sicurezza [S]	18.40	I fattore di sicurezza [S]	0.92
GENERALI	h [m]	420	Mcd diagonale	61332
	I	380	Mu fuori piano	1270048
	I	89	Vt diagonale	40200.352
	I	89	Fattore di sicurezza [FS]	1.136

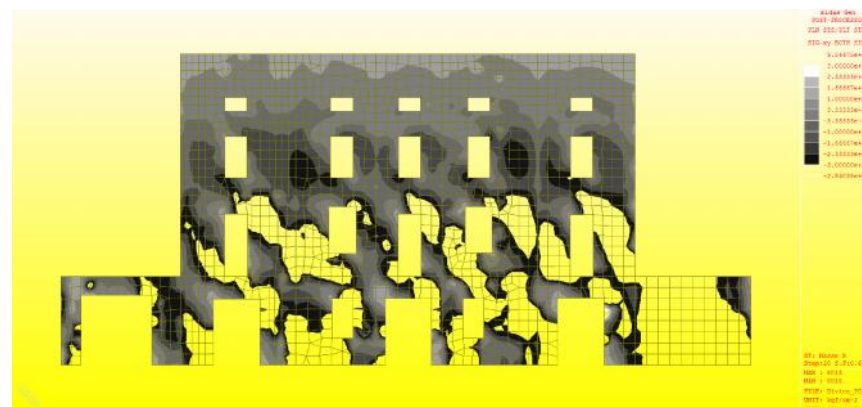
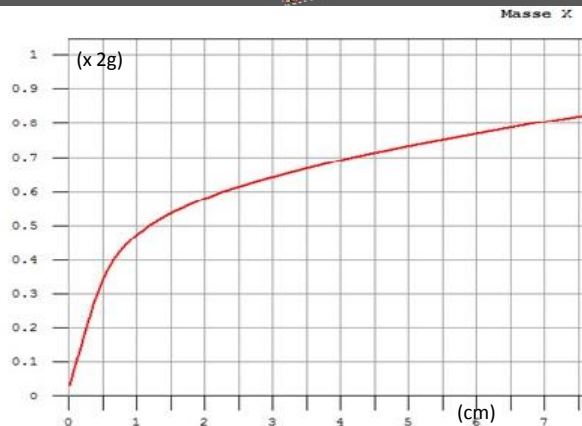
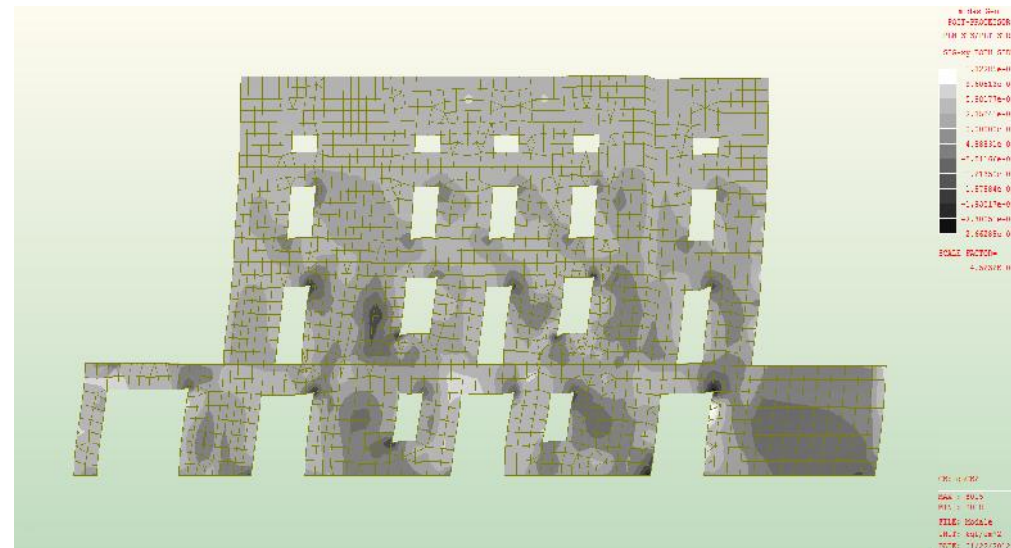
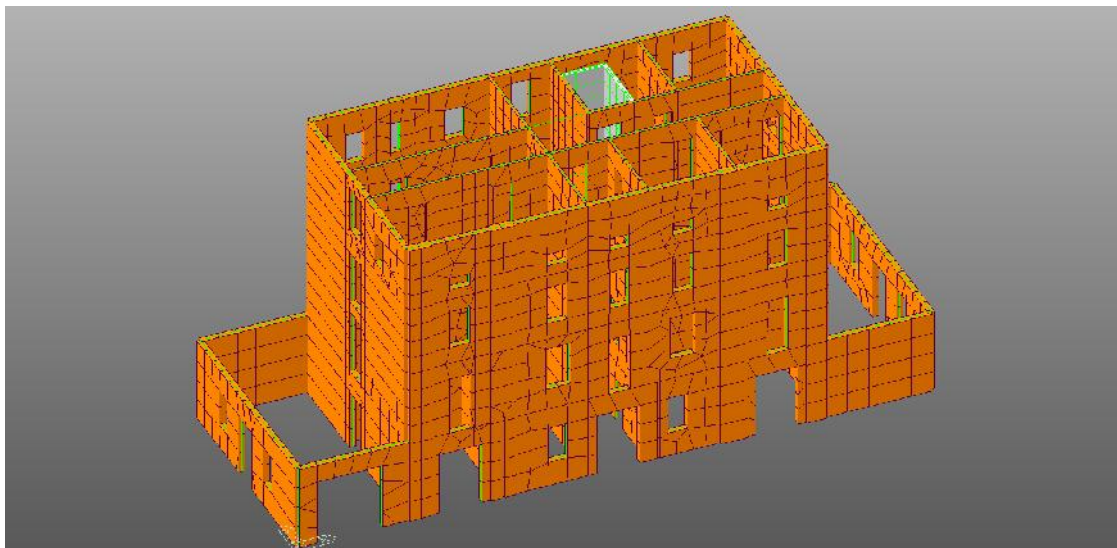


Analisi statica non lineare
Riconoscimento della soglia
di non linearità
visualizzazione progressione
del danneggiamento



		T(sec) modo est/ovest	T(sec) modo nord/sud
	rilevazione 1	0,260	0,213
primo piano	" 2	0,270	0,209
	" 3	0,270	0,212
	" 1	0,267	0,209
secondo piano	" 2	0,270	0,208
	" 3	0,267	0,213
	" 1	0,263	0,208
pottotetto	" 2	0,264	0,206
	" 3	0,267	0,207
		0,266	0,209
	Da analisi modale	0,221	0,193

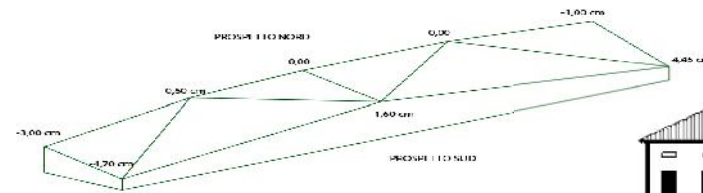
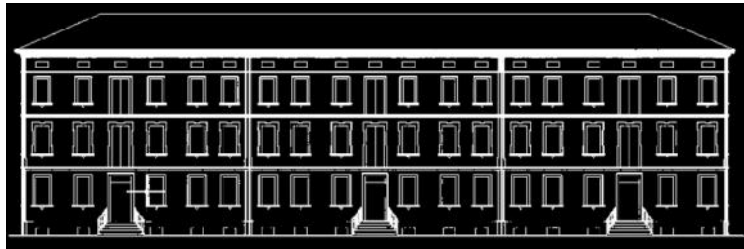




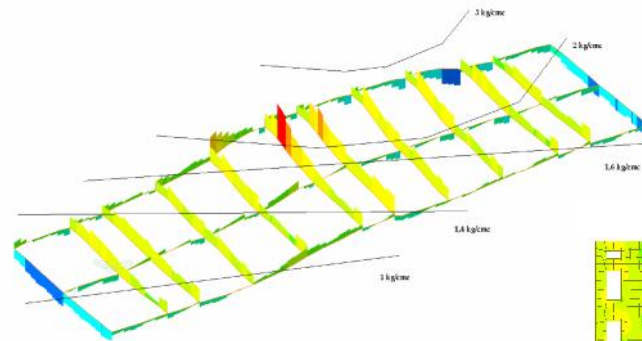
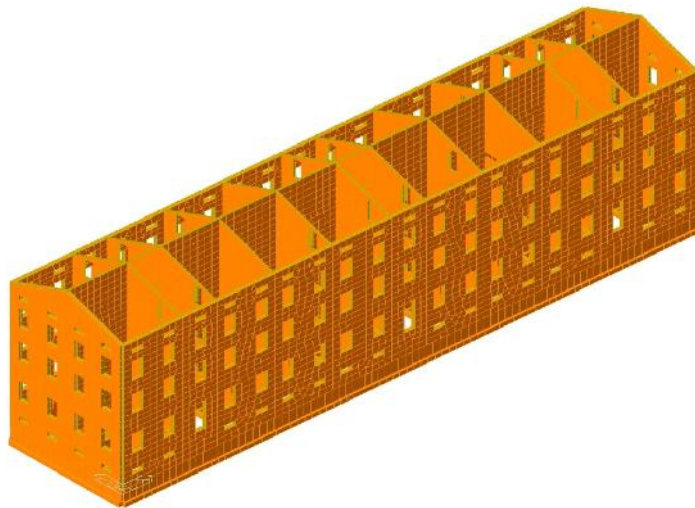
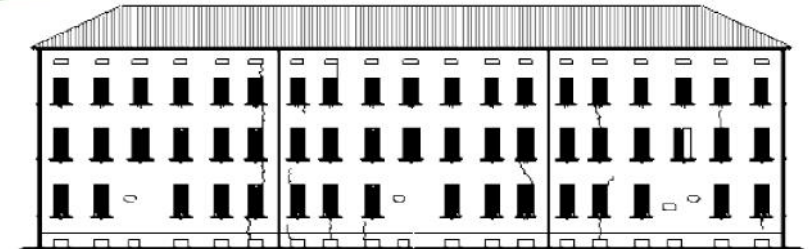
analisi dinamica lineare:
Entità e distribuzione delle tensioni conseguenti
all'azione sismica spettrale

analisi statica non lineare
progressione del quadro fessurativo per azione
sismica crescente

**POSSIBILITA' di VALUTAZIONI SOMMARIE sul
DANNEGGIAMENTO PROGRESSIVO
Consequente a SIMI con INTENSITA' CRESCENTE**

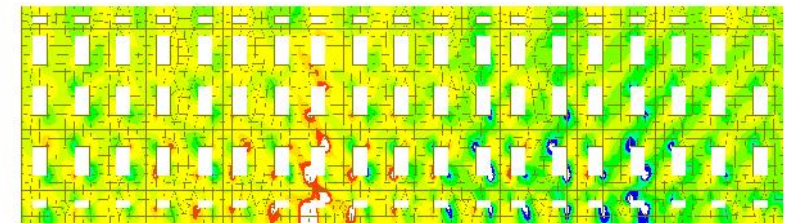


rilievo planimetrico alla base del fabbricato



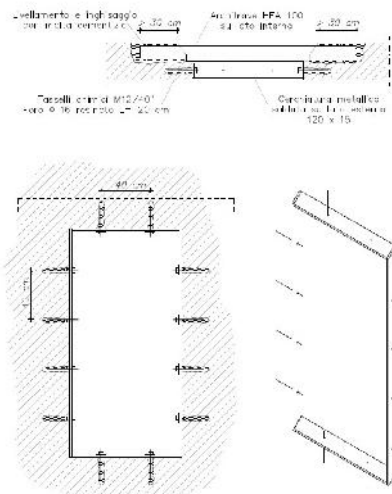
differenziazione della K di sottofondo
nelle travi di fondazione
in base alle analisi sul terreno

parzializzazioni nel modello
e fessurazioni nel fabbricato
molto coerenti

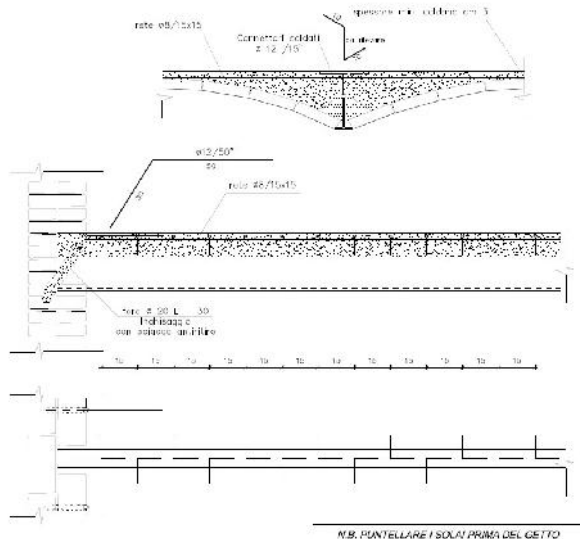


PARTICOLARE D

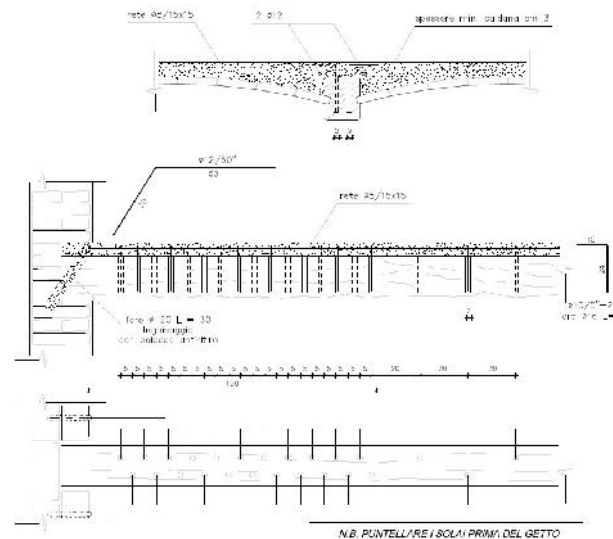
Interventi sulle aperture:
sostituzione architravi di porta e finestra
cerchiature aperture varani fasteno
(scala 1:20)

**PARTICOLARE A**

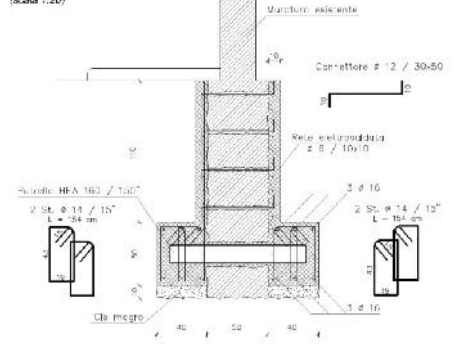
Interventi di consolidamento solai con punte
(scala 1:10)



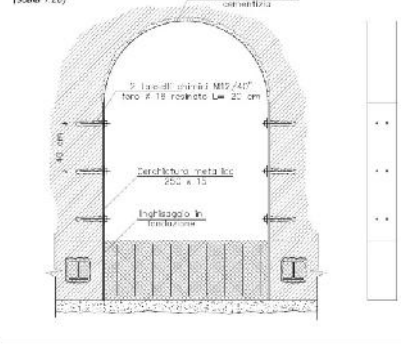
Interventi di consolidamento solai tipo I
(scala 1:10)

**PARTICOLARE H**

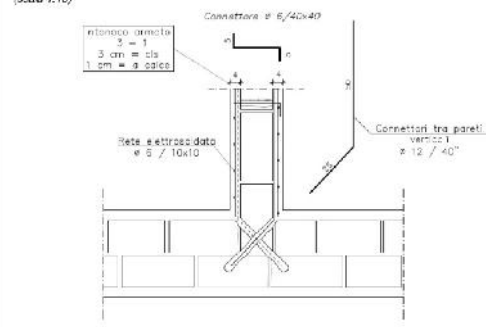
Consolidamento fondazioni in muratura
(scala 1:20)

**PARTICOLARE G**

Interventi sulle aperture ed arco
cerchiature metalliche
(scala 1:20)

**PARTICOLARE E**

Interventi sulle pareti
inclinato armato
(scala 1:10)



Gli interventi in progetto sono di MIGLIORAMENTO SISMICO

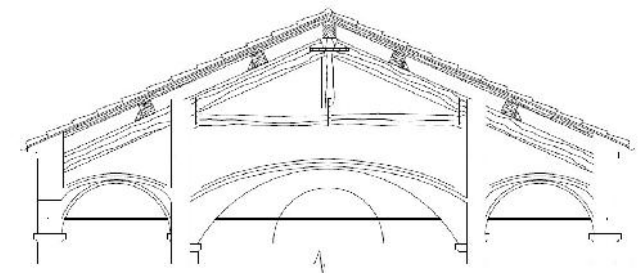
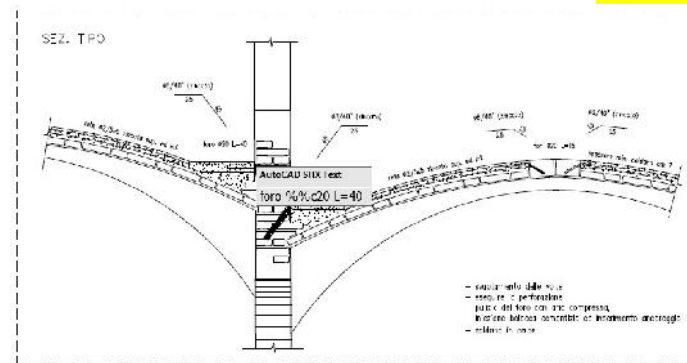
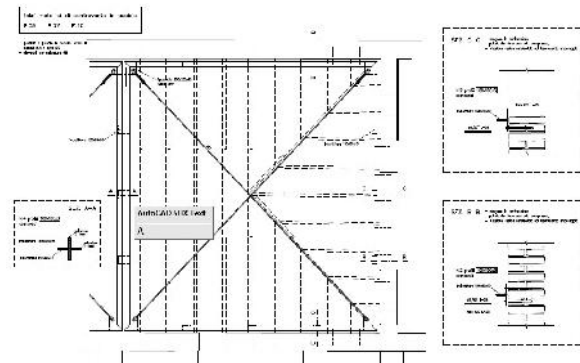
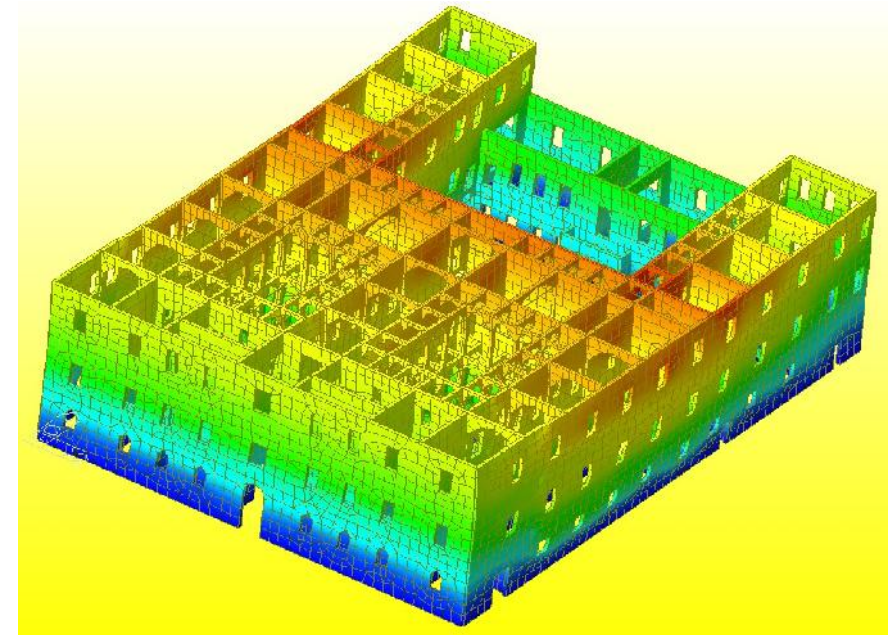
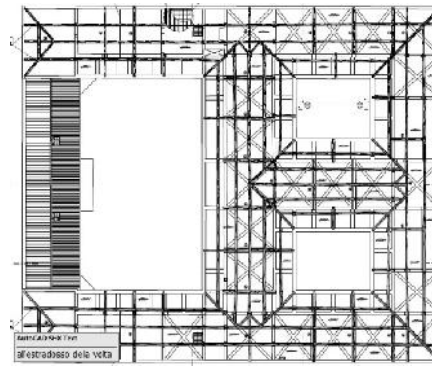
- ☐ irrigidimento delle fondazioni in muratura
- ☐ Irrigidimento nel e fuori piano degli impalcati
- ☐ cerchiature metalliche delle aperture a contenere dislocazioni
- ☐ Connessione dei setti murari trasversali alle pareti esterne

L'intervento è stato eseguito per sottocantieri, mimimizzando il trasferimento degli occupanti

La maggior parte degli interventi sono stati eseguiti ed hanno beneficiato dei contributi regionali previsti a seguito del sisma nell'anno 2012

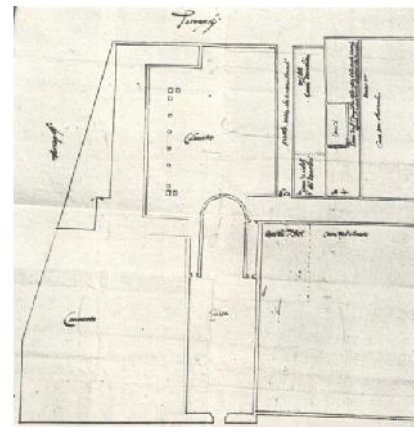


Il modello globale ha chiaramente evidenziato le parti del fabbricato soggette a spostamenti eccessivi, indirizzando nelle modalità di intervento.

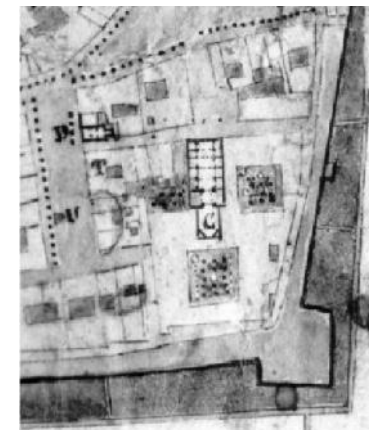




Inizio 1600



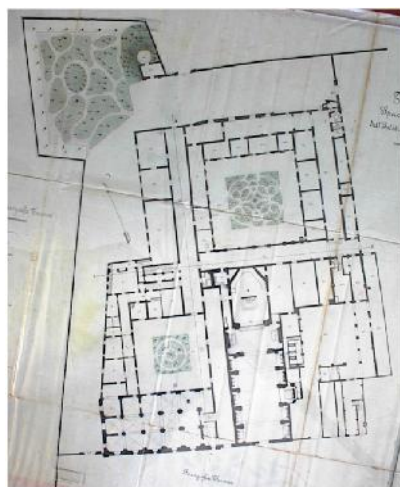
Fine 1600



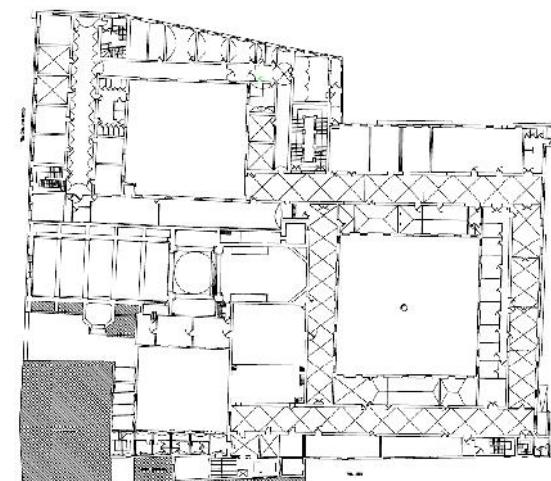
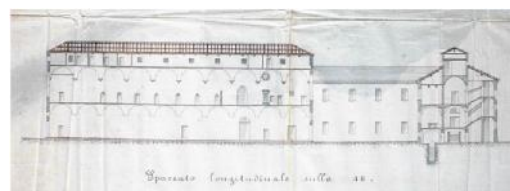
Inizio 1800

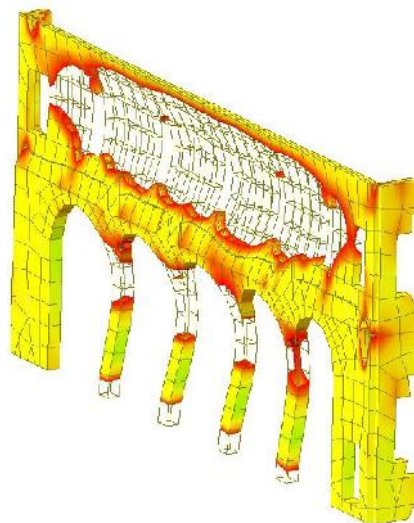
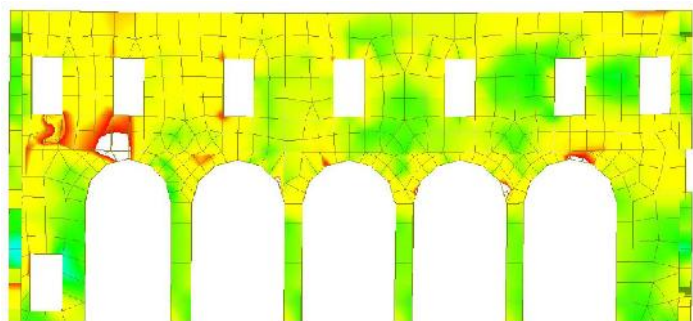
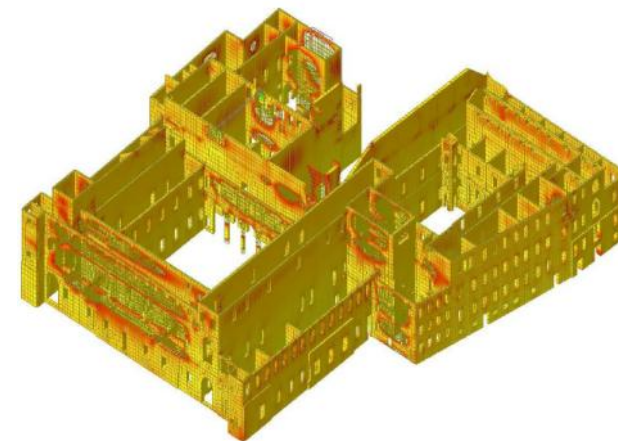
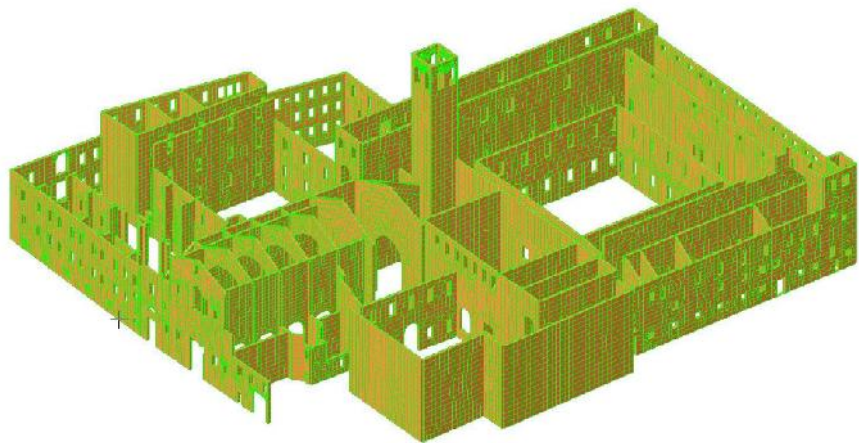


Inizio 1800



Fine 1800



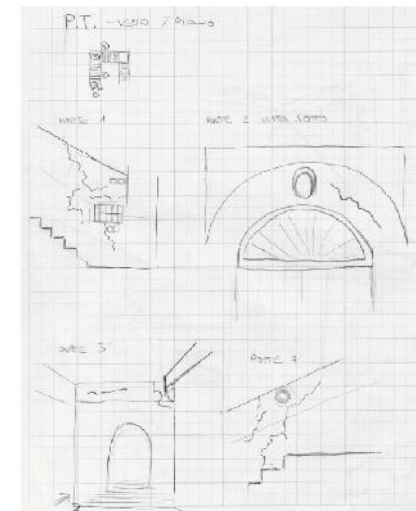
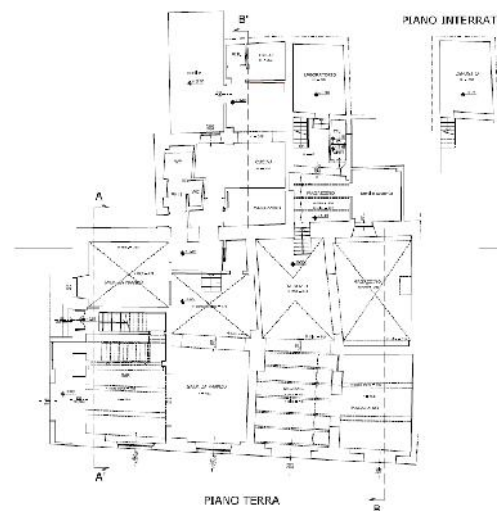
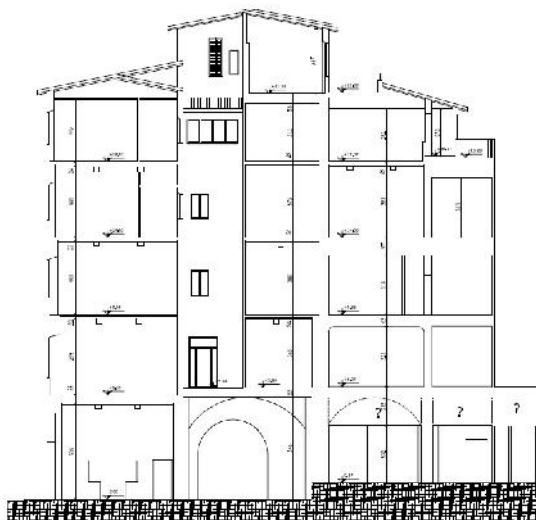


GEOMETRIA	[cm]		[daN-cm]
h	515	Med fuori piano	860420
l	295	Mu fuori piano	45752
t	30	Fattore di sicurezza [FS]	0.05

verifica del maschio al primo piano

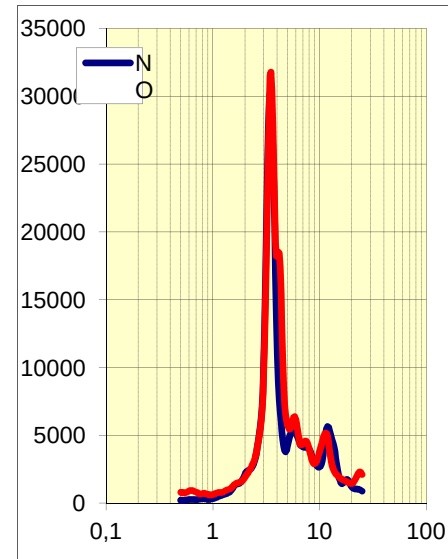
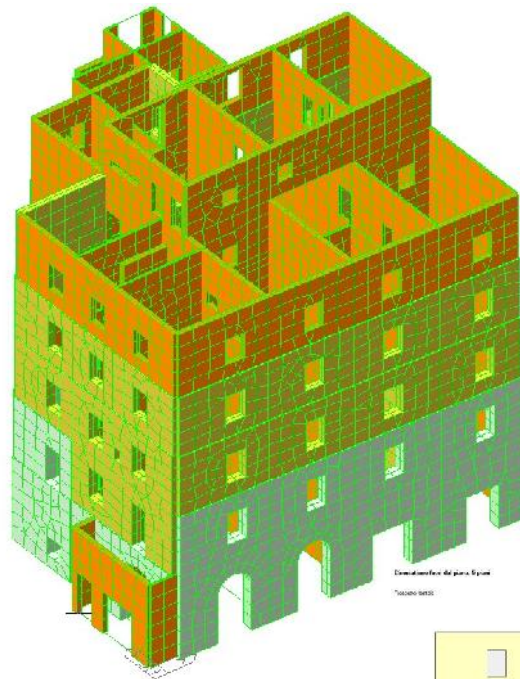
GEOMETRIA	[cm]		[daN-cm]
h	645	Med fuori piano	204440
l	60	Mu fuori piano	94223
t	30	Fattore di sicurezza [FS]	0.46

Verifica della colonna al pianoterrano



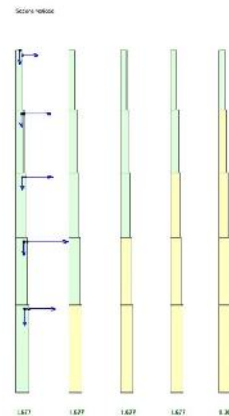
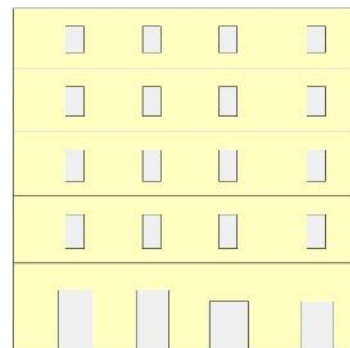
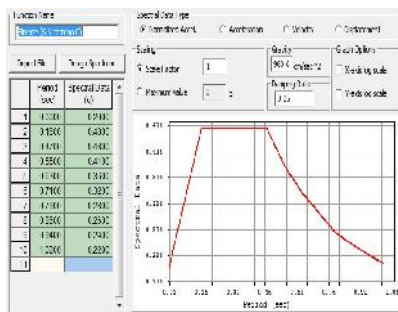
Stratigrafia			
Descrizione stratigrafia	Profondità iniziale (m)	Profondità finale (m)	Campione
Limi argillo sabbiosi	0.00	2.50	N
Ghiaie	2.50	12.50	N
Substrato litoide	12.50	14.00	N

Valori di verifica kg/cm ²	Compressione ambito statico	Compressione Ambito sismico	Scorrimento Ambito statico	Scorrimento ambito sismico
Muratura in pietra naturale	30	45	0.35+0,4 6	0.5+0,4 6
Muratura mista	25	37	0.3+0,4 6	0.45+0,4 6
Muratura in laterizio	20	30	0.25+0,4 6	0.35+0,4 6

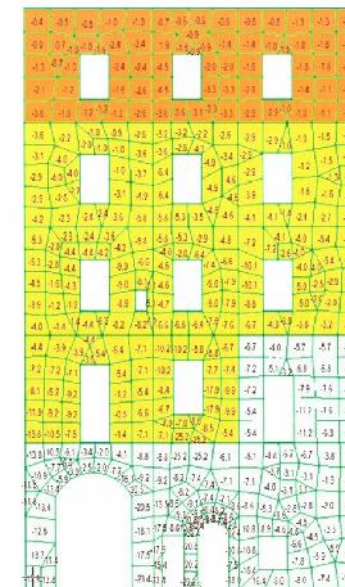


Mode No	Frequency (cycle/sec)
1	1.54
2	1.79
3	2.53
4	3.06
5	3.13
6	3.27
7	3.86

manufatto	Carico unitario
Muratura in pietra	2500 kg/m ³
Muratura in laterizio	1800 kg/m ³
Impalcato a volta	600+200 kg/m ² (permanenti+variabili)
Impalcato ligneo	400+200 kg/m ² "
copertura	250+150 kg/m ² "

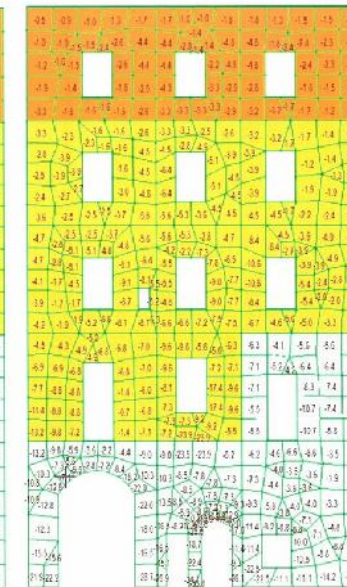


Allocazione



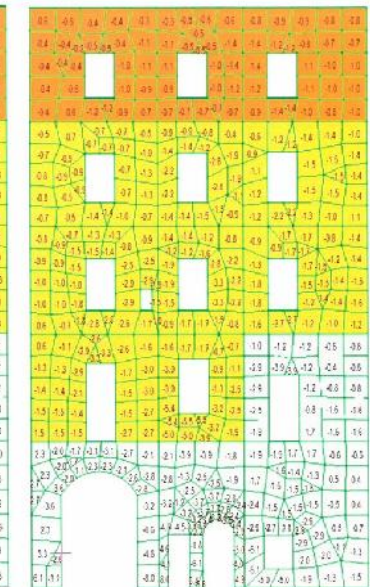
Analisi statica

Tensioni assiali (kg/cm²)



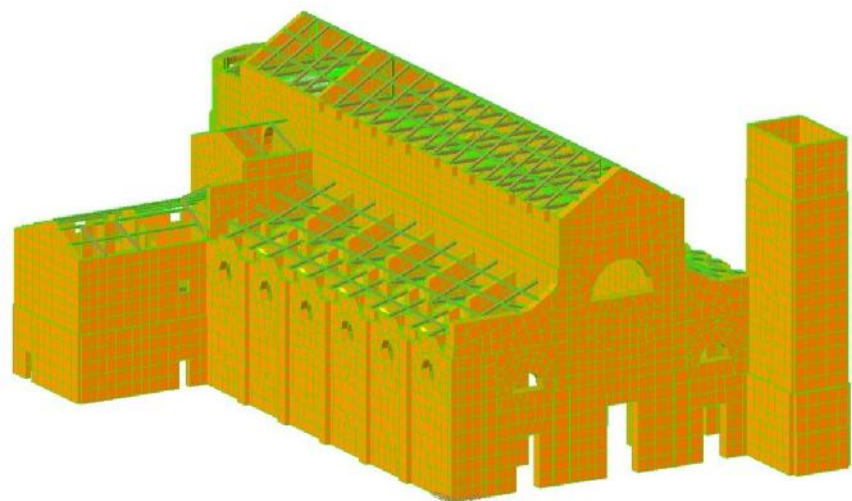
Analisi sismica

Tensioni assiali (kg/cm²)

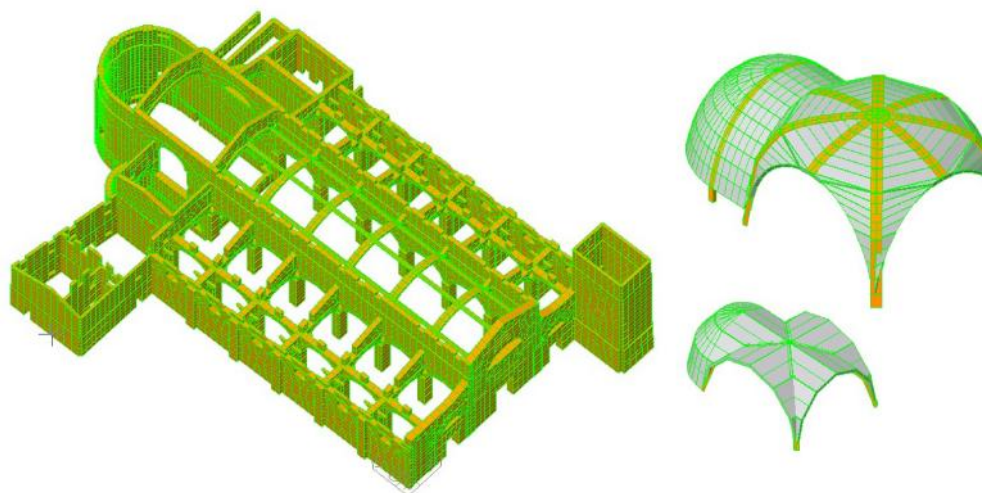


Analisi sismica

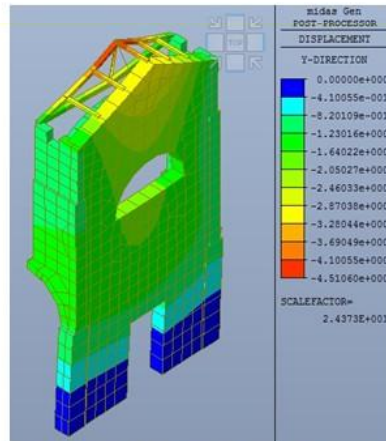
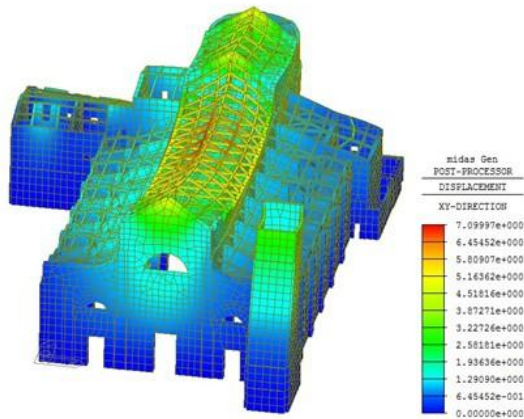
Tensioni tangenziali (kg/cm²)



Mode No	Frequency	Period		Tolerance
	(rad/sec)	(cycle/sec)	(sec)	
1	13.9816	2.2252	0.4494	0.0000e+000
2	16.2704	2.5395	0.3862	0.0000e+000
3	16.7188	2.6509	0.3758	0.0000e+000
4	17.2985	2.7531	0.3632	0.0000e+000
5	20.0300	3.1379	0.3137	0.0000e+000
6	22.2492	3.5411	0.2824	0.0000e+000
7	29.7561	4.7358	0.2112	0.0000e+000
8	33.6177	5.3504	0.1869	0.0000e+000
9	59.0890	9.4043	0.1063	0.0000e+000
10	62.4902	9.9456	0.1005	0.0000e+000



Mode No	TRAN-X		TRAN-Y		TRAN-Z		ROTN-X		ROTN-Y		ROTN-Z	
	MASS(%)	Sum(%)	MASS(%)	Sum(%)	MASS(%)	Sum(%)	MASS(%)	Sum(%)	MASS(%)	Sum(%)	MASS(%)	Sum(%)
1	21.9601	21.9601	0.0498	0.0498	0.0033	0.0033	0.0020	0.0020	3.6760	3.6760	0.7969	0.7969
2	3.2044	25.1645	2.2251	2.2749	0.0056	0.0059	0.2125	0.2145	0.7518	4.4273	0.8827	1.6796
3	0.0784	25.2429	37.8942	40.1691	0.0413	0.0472	2.4498	2.5642	0.0281	4.4553	0.0808	1.7603
4	13.0240	38.2669	0.0168	40.1860	0.0078	0.0550	0.0007	2.5649	1.9788	6.4347	4.7561	6.5165
5	20.6415	58.9084	0.0387	40.2247	0.0036	0.0586	0.0044	2.5693	0.1515	6.5862	0.1512	6.6677
6	0.0071	58.9155	18.0376	58.2623	0.1277	0.1863	0.0516	2.7210	0.0021	6.5883	0.1727	6.8404
7	14.5569	73.4723	0.0021	58.2644	0.0013	0.1876	0.0305	2.7514	0.0006	6.5883	0.9112	7.7516
8	0.1713	73.6437	7.4976	65.7621	0.3256	0.5142	0.0021	2.7536	0.0506	6.6395	0.4976	8.2492
9	16.1377	89.7814	0.1302	65.8922	0.0042	0.5184	0.0003	2.7539	1.2732	7.9127	0.5675	8.8167
10	0.0832	89.8647	24.2753	90.1675	0.1381	0.6565	1.3184	4.0722	0.0744	7.9871	0.0776	8.8943



Spostamenti in cm per la combinazione di carico sismica di maggiore rilievo

Gli spostamenti conseguenti all'azione del sisma sono maggiormente rilevanti nelle murature del sottotetto e per la copertura, dove il rapporto $\Delta/H \approx 5/1000$; tale riscontro suggerisce l'opportunità di un intervento di contenimento degli spostamenti longitudinali e trasversali a tale livello, anche provvedendo all'irrigidimento dell'impalcato ligneo di copertura.

L'analisi dei modi di vibrare evidenzia modi di vibrare ben definiti secondo gli assi principali della costruzione e l'assenza di modi rotazionali significativi (considerazione confermata anche dall'analisi dei modi successivi ai primi 10).

Somma delle reazioni vincolari alla base per la combinazione di carico sismica più gravosa:

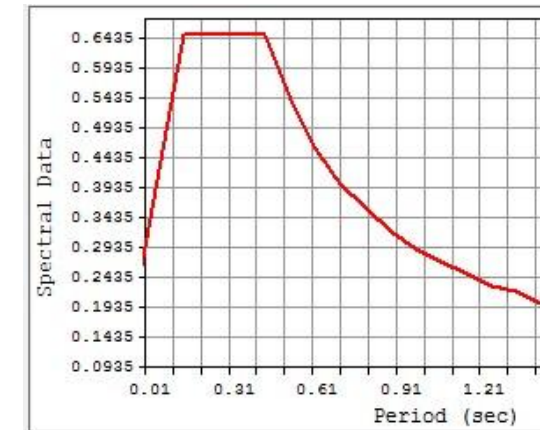
Load	F_x (tonf)	F_y (tonf)	F_z (tonf)
gLCB7	1058.35	1217.65	7879.59

rapporto tra il tagliante medio attivato nella struttura ed il peso sismico della stessa:

$$(1058.35^2 + 1217.65^2)^{1/2} / 7879.59 = 0.2 \quad q=2$$

Tale valore di tagliante medio, associabile alla condizione di SLV per il fabbricato, potrà poi essere confrontato con la soglia di comportamento non lineare globale, determinata con l'analisi statica non lineare.

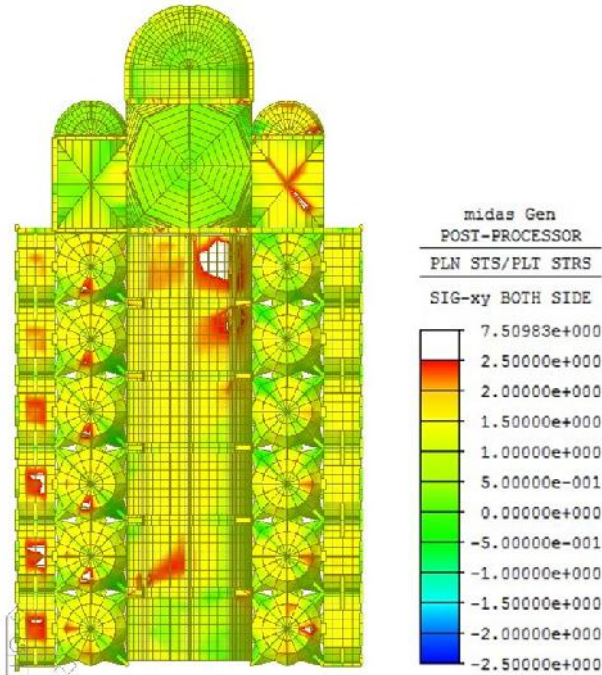
Le componenti del tagliante secondo X ed Y permettono di individuare la direzione dell'azione del sisma rispetto alla direzione N-S è: $\arctan 1217/1058 = 49^\circ$



L'applicazione dello spettro elastico comporta una risultante al suolo pari a circa 0,4g

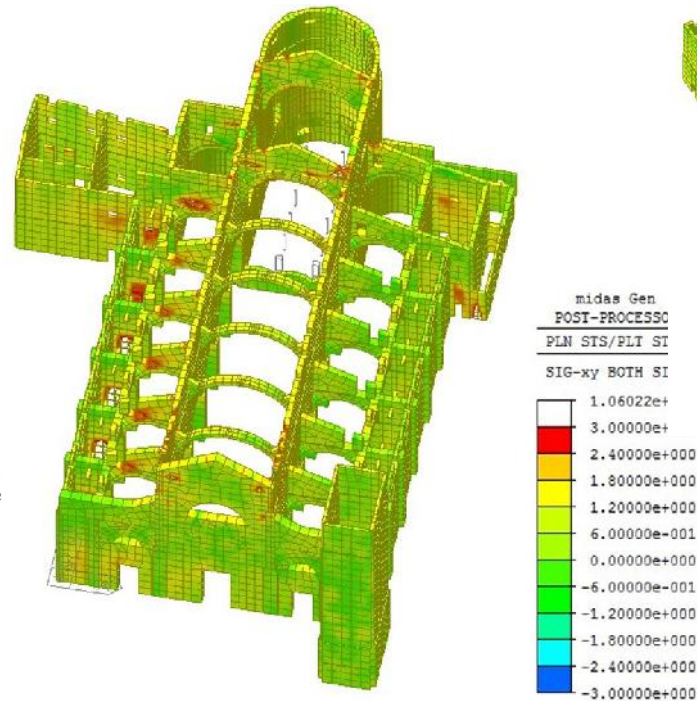
Risultati dell'analisi dinamica lineare

Viene restituita una – *fotografia* - dello stato tensionale nelle varie parti della costruzione sottoposta alle azioni derivate dello spettro elastico

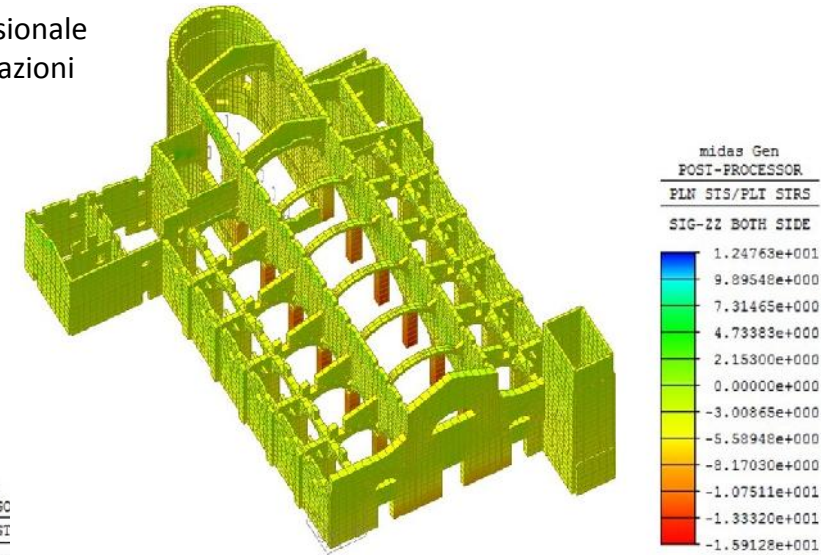


Tensioni tangenziali in daN/cm^2 per la combinazione di carico sismica più gravosa con cancellazione degli elementi interessati da tensioni eccedenti $\pm 2.5 \text{ daN/cm}^2$

Scalando lo spettro elastico con fattori via via crescenti e rilanciando ogni volta l'analisi, si può riconoscere la progressione del danno nelle varie parti della costruzione



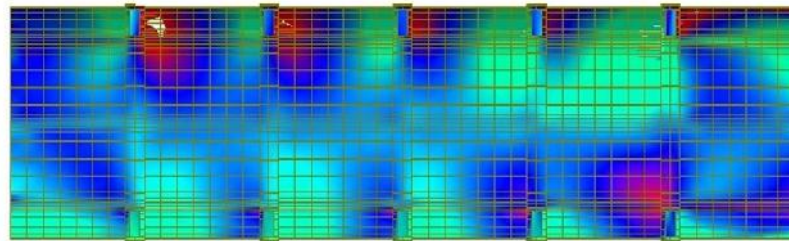
Tensioni tangenziali in daN/cm^2 per la combinazione di carico sismica più gravosa con cancellazione degli elementi interessati da tensioni eccedenti $\pm 3 \text{ daN/cm}^2$



Tensioni verticali/assiali in daN/cm^2 per la combinazione di carico statica più gravosa

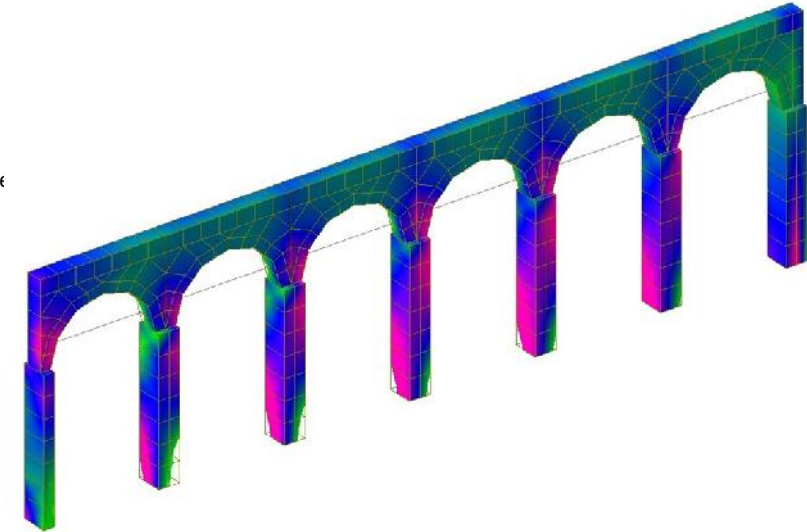
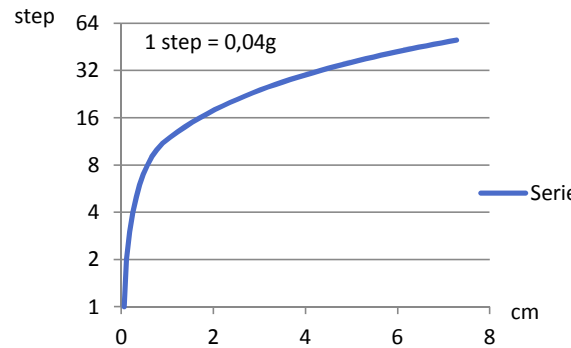
L'analisi in ambito elastico non attua la redistribuzione delle tensioni al superamento delle soglie tensionali

Risultati dell'analisi statica non lineare



Volta a botte della navata centrale

Mapa tensionale delle **tensioni tangenziali**, riportando in bianco il superamento della soglia limite assunta pari a $\pm 1 \text{ daN/cm}^2$, ottenuta per spinta pari a $0,2g$

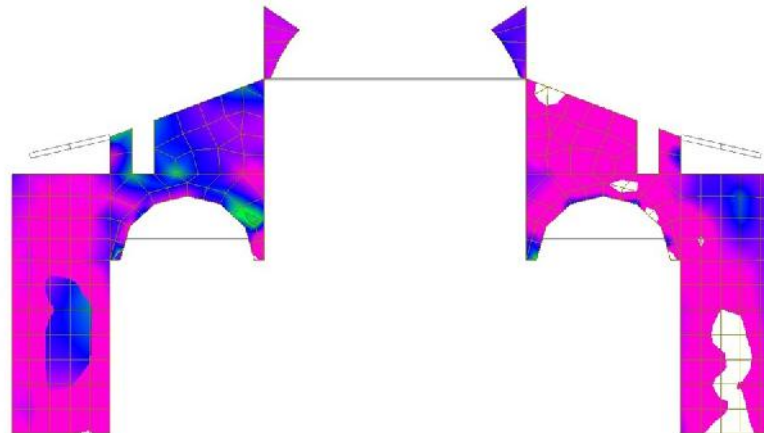


Assonometria pilastri della navata

Mapa tensionale delle **tensioni assiali**, riportando in bianco il superamento della soglia limite assunta pari a $3(\text{traz})/-15(\text{comp}) \text{ daN/cm}^2$, ottenuta per spinta pari a $0,48g$

E' stato possibile determinare una presunta successione e progressione del danneggiamento in base alla entità delle forze di inerzia attivate dal sisma.

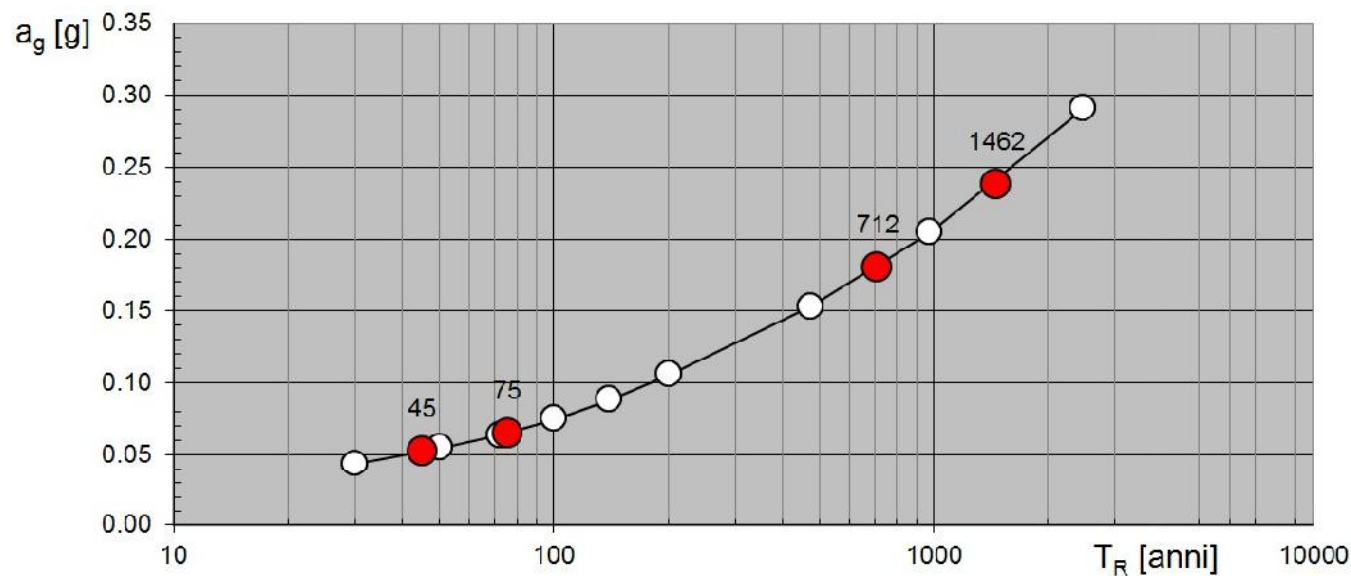
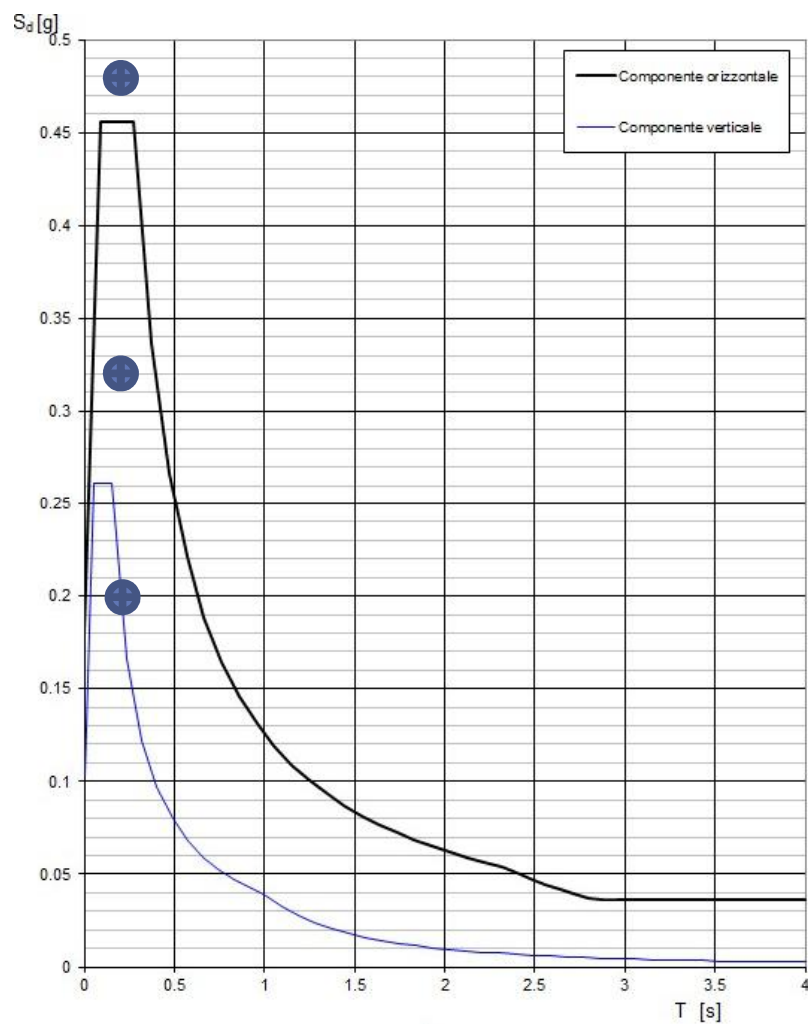
Queste considerazioni hanno trovato sufficienti riscontri con le informazioni raccolte circa il danneggiamento conseguente a sismi passati e recenti



Sezione trasversale delle navate

Mapa tensionale delle **tensioni tangenziali**, riportando in bianco il superamento della soglia limite assunta pari a $\pm 2,5 \text{ daN/cm}^2$, ottenuta per spinta pari a $0,32g$

Per il fabbricato indagato si può pensare di associare ad un sisma di intensità nota un danneggiamento presunto; si potrebbero fare considerazioni circa la priorità degli interventi sulla base dei danni associabili a sismi attesi e delle possibili conseguenze al danneggiamento



	S_d	S_d/S_{dmax}	a_g^*	$T_R(\text{anni})$	$P_{vr} (\%)$	$V_r(\text{anni})$
volte	0,2g	0,44	0,08g	100	40	11 << 75
pareti laterali	0,32g	0,70	0,13g	300	15	32 < 75
pilastrini navata	0,48g	1,05	0,19g	800	8	85 > 75

Volendo procedere nel riconoscere S_d per la possibile aderenza degli intonaci all'intradosso delle volte, si riconoscerebbero valori di T_R molto bassi; frequentemente il distacco degli intonaci comporta la maggiore vulnerabilità.