



L'utilizzo della dinamica sperimentale per la diagnostica e il monitoraggio delle strutture

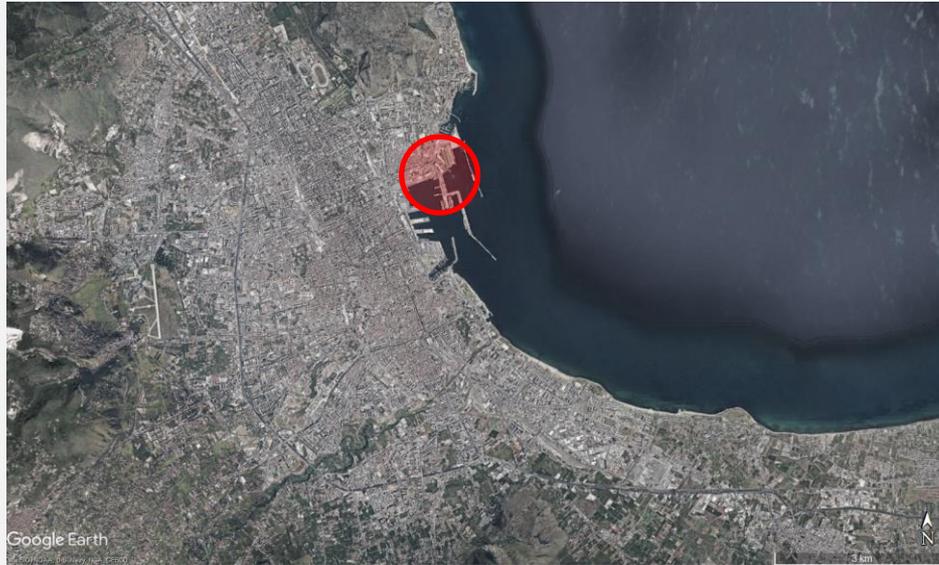
WEBINAR – 5 dicembre 2022

LA DINAMICA SPERIMENTALE A SUPPORTO DELLE VERIFICHE DI VULNERABILITÀ DEL PATRIMONIO STORICO MONUMENTALE: UN CASO STUDIO SULL'ARSENALE DELLA MARINA REGIA DI PALERMO

Ing. Cristiano Bilello, Ph.D. *

Ing. Alfredo Castrogiovanni, Ph.D.

Caso studio: Arsenale della Marina Regia di Palermo

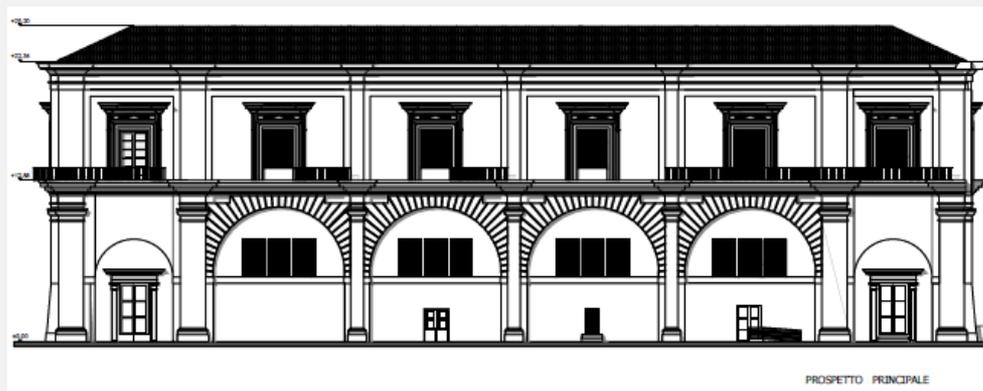
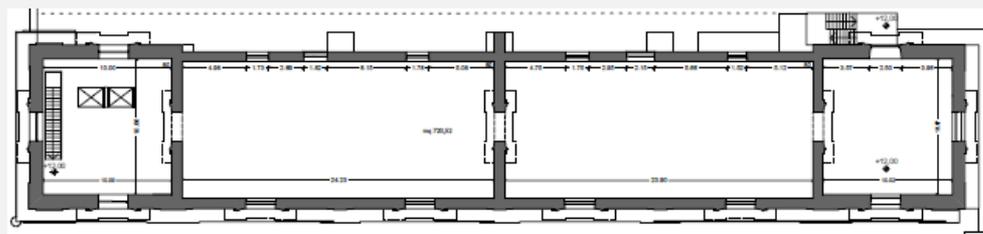
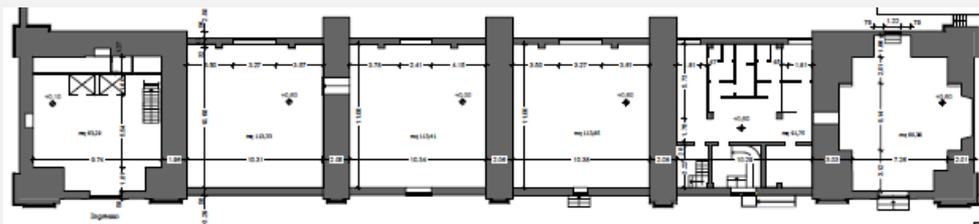


- Commissionato dalla corona spagnola sotto Filippo IV di Spagna
- Costruito tra il 1621 ed il 1630 su Progetto dell'Architetto regio Mariano Smiriglio nel Molo Nuovo (1575)
- Destinato a realizzazione, rimessaggio, armamento e varo di navi della Marina Regia spagnola di Sicilia
- Oggi di proprietà della Regione Siciliana e utilizzato dalla Soprintendenza del Mare

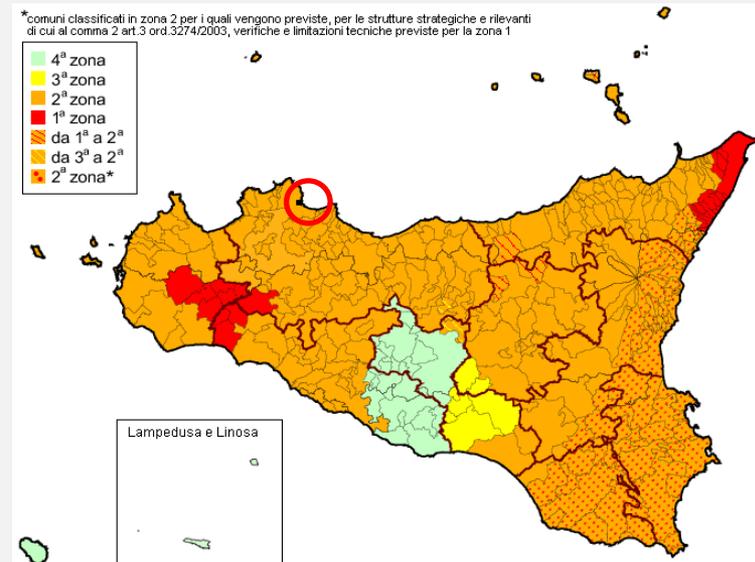
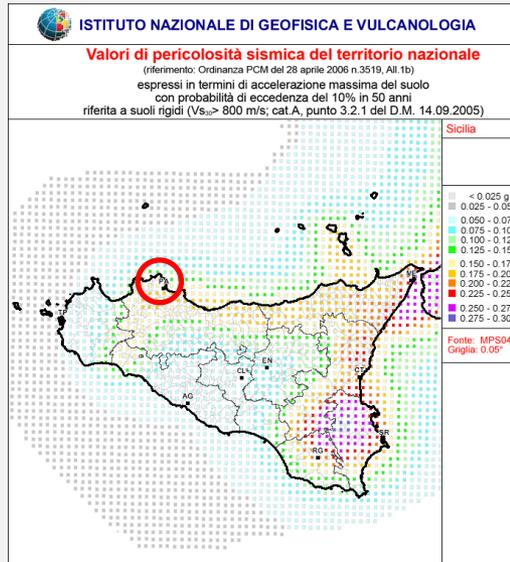
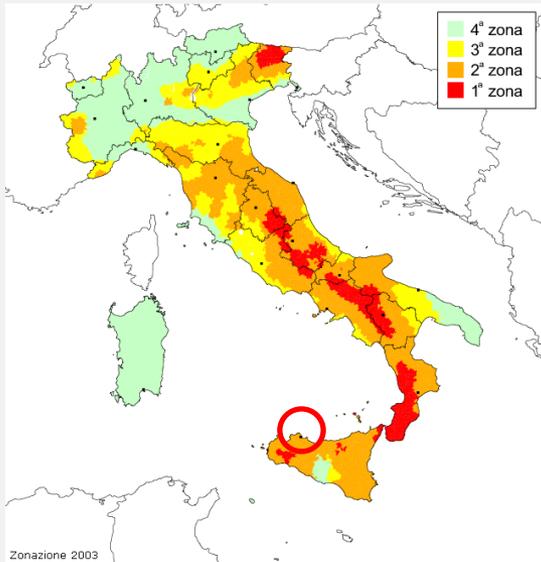


Caratteristiche principali del fabbricato

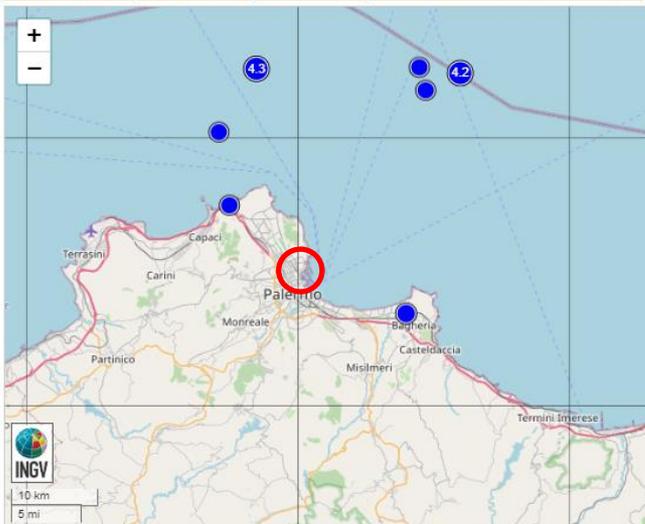
- Dimensioni in pianta 72,5x12,5m
- n.2 elevazioni, H = 24,50m
- Fondazioni in blocchi di calcarenite
- Murature in blocchi di calcarenite squadriati sp.=200cm circa
- Orizzontamenti PT: n. 4 volte a botte in calcarenite e n.1 volta a crociera sp.=35cm circa
- Opere in c.a. (1942-1947) : soppalco PT (h=5,75m circa) e solaio primo piano estremità ovest
- Copertura in legno composta da capriate e terzere (sostituzione d'urgenza 1994)



Rischio sismico dell'area



Fuso Orario: Italia | Dal 1985-01-01 | Magnitudo: 3+ | Punto: (38.1377, 13.3681) - Raggio: 30 km



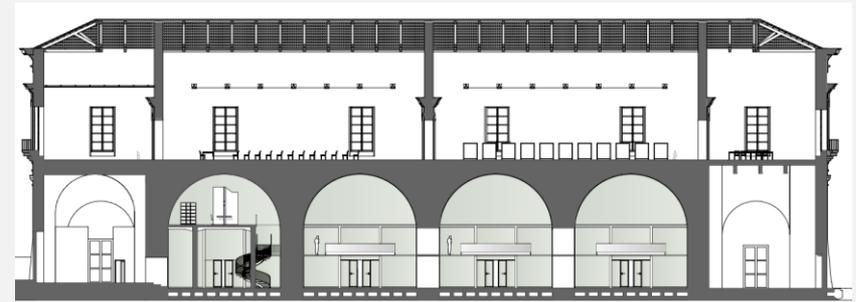
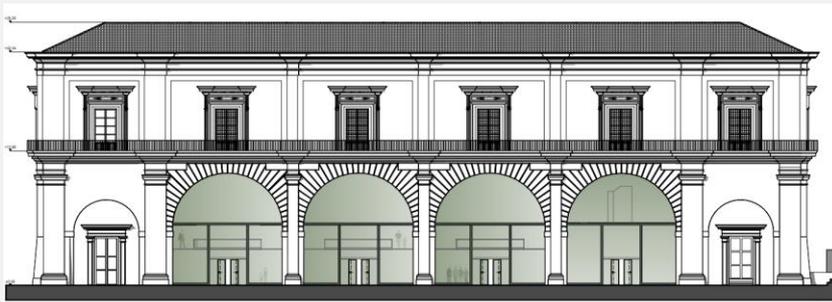
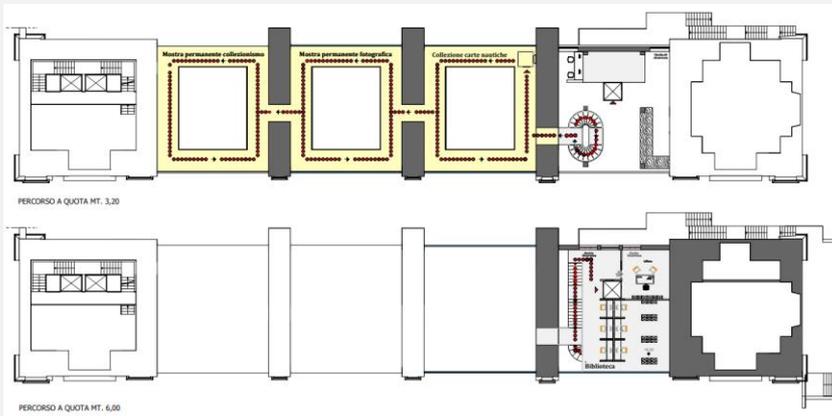
Data e Ora (Italia)	Magnitudo	Profondità	Latitudine	Longitudine
2015-12-20 12:15:16	ML 3.2	24	38.32	13.52
2015-12-20 10:46:03	Mw 4.2	23	38.34	13.57
2012-04-13 11:45:24	ML 3.2	9	38.28	13.26
2012-04-13 08:21:32	Mw 4.3	9	38.34	13.30
2003-08-13 21:44:44	Md 3.0	5	38.20	13.27
2002-09-06 03:25:00	Md 3.3	4	38.09	13.50
1988-06-10 04:20:17	Md 3.0	5	38.35	13.52

$$a_g S = 0.234 g$$

Il progetto preliminare di rifunzionalizzazione

- Realizzazione del «Museo del mare e della navigazione della Sicilia»
- Adeguamento dell'edificio alla musealizzazione
- Realizzazione di percorsi espositivi

(Progettista Arch. Eliana Mauro, RUP Ing. Pietro Selvaggio)



Obiettivi

- Verifica di vulnerabilità sismica (VVS) dell'edificio
- Proposta di possibili interventi di mitigazione del rischio sismico
- Valutazione della fattibilità strutturale del progetto di rifunionalizzazione

Metodologie

- Rilievo 3D con tecnica laser scanner
- Caratterizzazione dinamica della struttura con misure di vibrazione ambientale
- Calibrazione di un modello agli E.F. per lo studio di vulnerabilità sismica

Il percorso della conoscenza nella VVS

Definizione del **livello di conoscenza** (NTC2018) attraverso:

- Analisi storico-critica del fabbricato
- Rilievo geometrico e dei dettagli costruttivi
- Caratterizzazione meccanica dei materiali (nessun riferimento a indagini dinamiche)

Rilievo geometrico	identificazione delle specificità storiche e costruttive della fabbrica	Proprietà meccaniche dei materiali	Terreno e fondazioni
rilievo geometrico completo $F_{C1} = 0.05$	restituzione ipotetica delle fasi costruttive basata su un limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{C2} = 0.12$	parametri meccanici desunti da dati già disponibili $F_{C3} = 0.12$	limitate indagini sul terreno e le fondazioni, in assenza di dati geotecnici e disponibilità d'informazioni sulle fondazioni $F_{C4} = 0.06$
rilievo geometrico completo, con restituzione grafica dei quadri fessurativi e deformativi $F_{C1} = 0$	restituzione parziale delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su: a) limitato rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione e alla verifica delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, verifica diagnostica delle ipotesi storiografiche); b) esteso rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche) $F_{C2} = 0.06$	limitate indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0.06$	disponibilità di dati geotecnici e sulle strutture fondazionali; limitate indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0.03$
	restituzione completa delle fasi costruttive e interpretazione del comportamento strutturale fondate su un esaustivo rilievo materico e degli elementi costruttivi associato alla comprensione delle vicende di trasformazione (indagini documentarie e tematiche, eventuali indagini diagnostiche) $F_{C2} = 0$	estese indagini sui parametri meccanici dei materiali $F_{C3} = 0$	estese o esaustive indagini sul terreno e le fondazioni $F_{C4} = 0$

“Linee guida per la valutazione e riduzione del rischio sismico del Patrimonio culturale - Allineamento alle nuove norme tecniche per le costruzioni” MiBAC

$$F_C = 1 + \sum_{k=1}^4 F_{CK}$$

Rilievo strutturale e geometrico 3D

Strumentazione

- RTC360 3D Laser Scanner

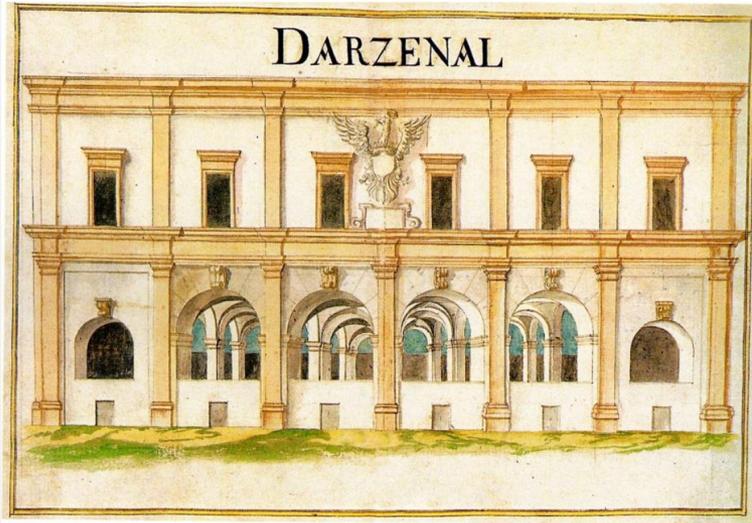


Output

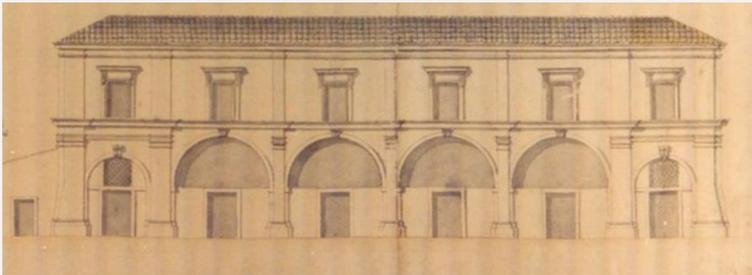
- Nuvola di punti 3D
- Rilievo fotografico completo
- Modello navigabile e misurabile dello stato di fatto



Evoluzione storico-morfologica della fabbrica

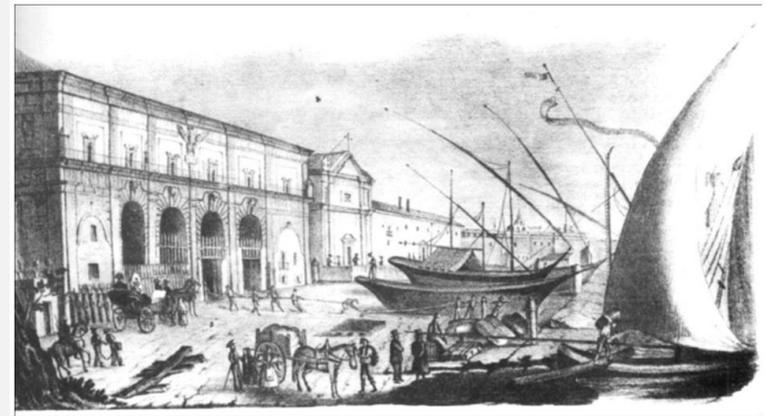


C. Castilla, *Teatro geografico antiguo y moderno del Reyno de Sicilia*, ms, 1686, arsenale di Palermo

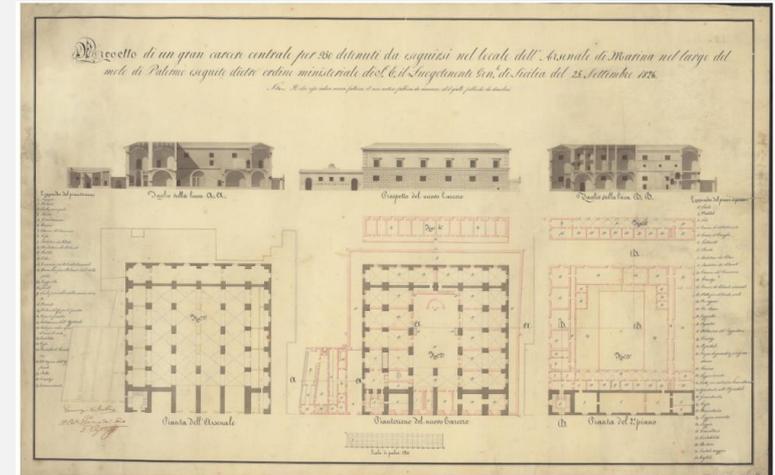


Prospetto principale e sezioni dell'edificio dell'arsenale dopo le prime trasformazioni, 1772

- Originariamente a pianta quadrata 72x72m circa
- Destinato a caserma e Quartiere della Cavalleria dal 1726 e a carcere alla fine del XVIII secolo



L'arsenale in una stampa di inizio Ottocento



Progetto di trasformazione dell'arsenale per la realizzazione del nuovo carcere (Vincenzo Di Martino, 1826)

Evoluzione storico-morfologica della fabbrica

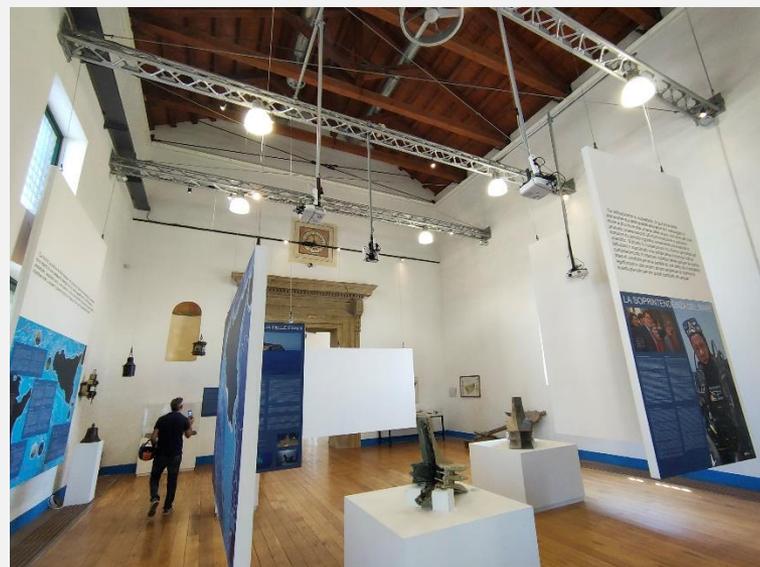


Fronte dell'arsenale in una foto degli anni Venti del Novecento

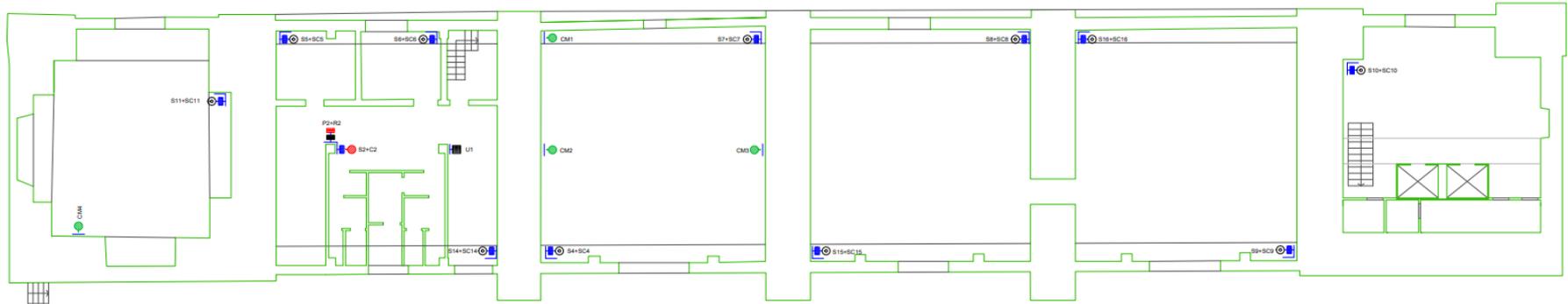


1943

- Acquisito dai Cantieri Navali nel 1941 e pesantemente danneggiato dai bombardamenti del 1943
- Ricostruzione post-bellica del solo corpo fronte mare ed acquisizione dell'attuale morfologia (chiusura delle arcate con materiali di recupero)
- Restauro del 2005 (piano primo): realizzazione irrigidimenti di piano su 3 livelli, sostituzione delle catene, bonifica delle murature, iniezioni armate per ammortamenti d'angolo e ricucitura del sistema archi-volte



Indagini strutturali e caratterizzazione meccanica dei materiali



Planimetria Piano Terra - Scala 1:100



-  Stonacatura 2022(S)
-  Rimozione di copri ferro 2022(R)
-  Pacometria 2022(P)
-  Carota 2022 (C)
-  Estrazione di barra 2022 (B)
-  Indagine termografica 2022 (T)
-  Sclerometria 2022 (SC)
-  Prova dinamica 2022
-  Carota muratura 2022 (CM)
-  SonReb (U)

Caratterizzazione dinamica sperimentale

Identificazione delle caratteristiche dinamiche di una struttura (frequenze, coeff. di smorzamento, forme di vibrazione) a partire dalla misurazione della risposta strutturale a una sollecitazione di tipo dinamico:

- *Experimental Modal Analysis* (EMA): Vibrazione/impulso indotto (Input/output)
- *Operational Modal Analysis* (OMA): Vibrazione ambientale (solo output)

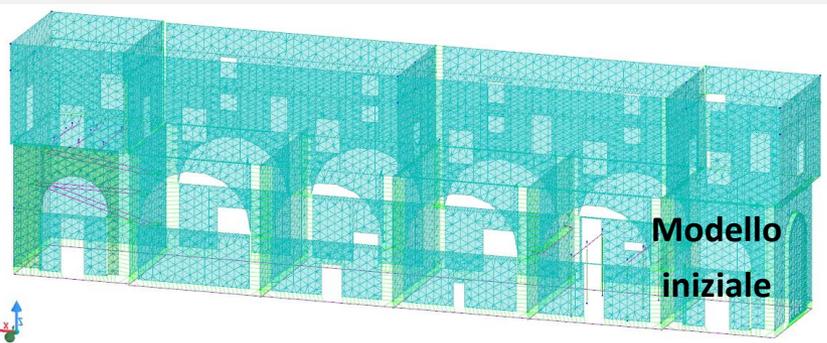
Pro :

EMA	OMA
Controllo del livello di eccitazione	Procedure di prova rapide ed economiche
Identificazione di caratteristiche non lineari	Caratterizzazione dinamica in condizioni operative

Contro :

EMA	OMA
Interruzione temporanea della funzionalità	Ipotesi di comportamento lineare
Costi elevati e set-up più complessi	Sovrapposizione di sorgenti di eccitazione

Il percorso di calibrazione del modello agli E.F.

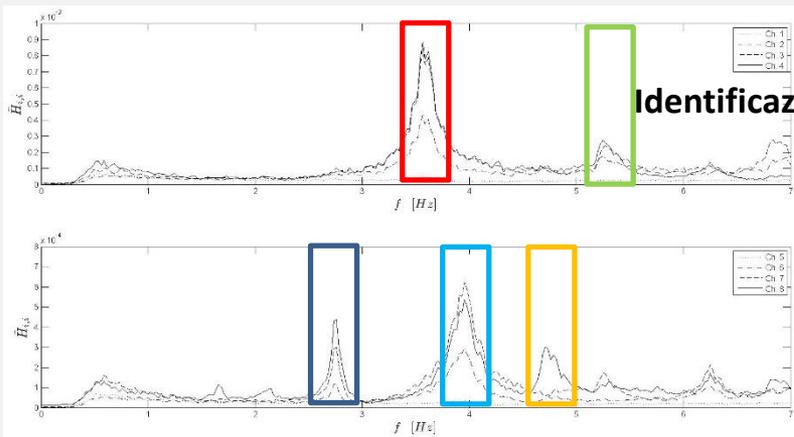


Set-up
Sperimentale

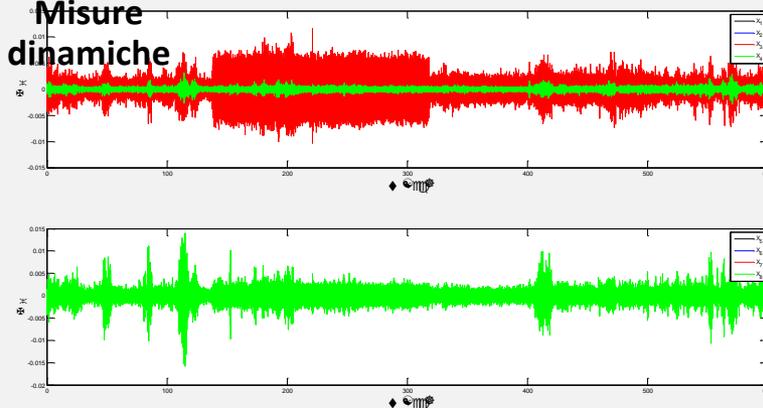
Calibrazione



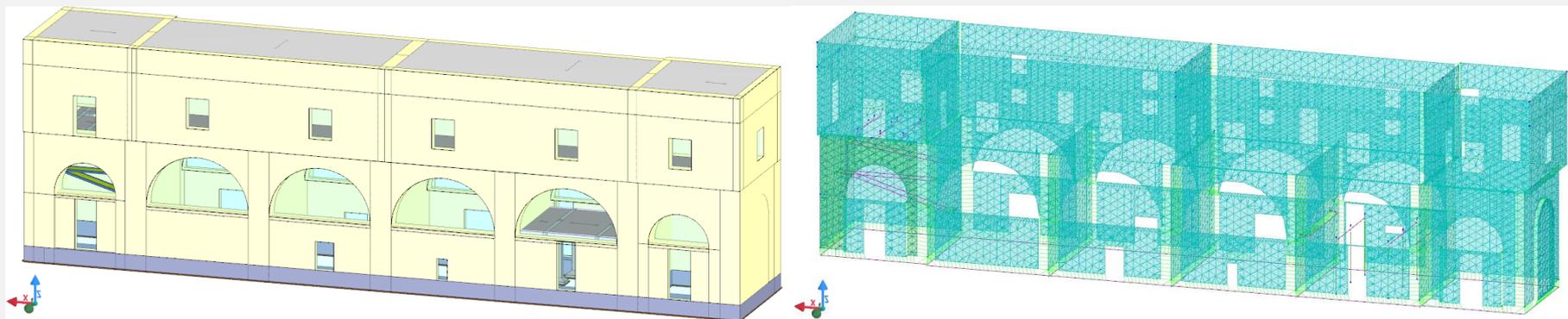
Identificazione



Misure
dinamiche



Il modello agli E.F. iniziale



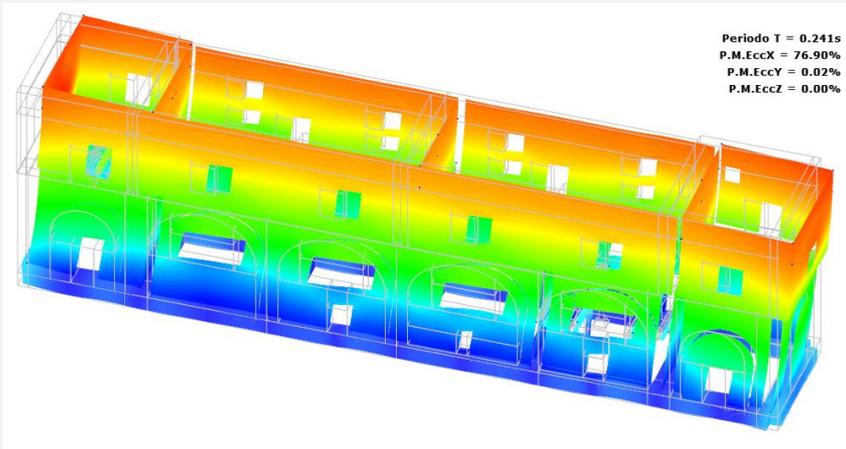
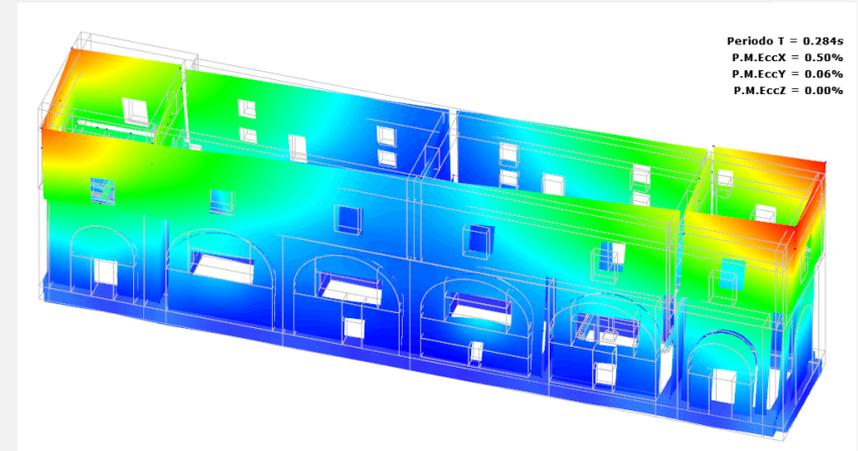
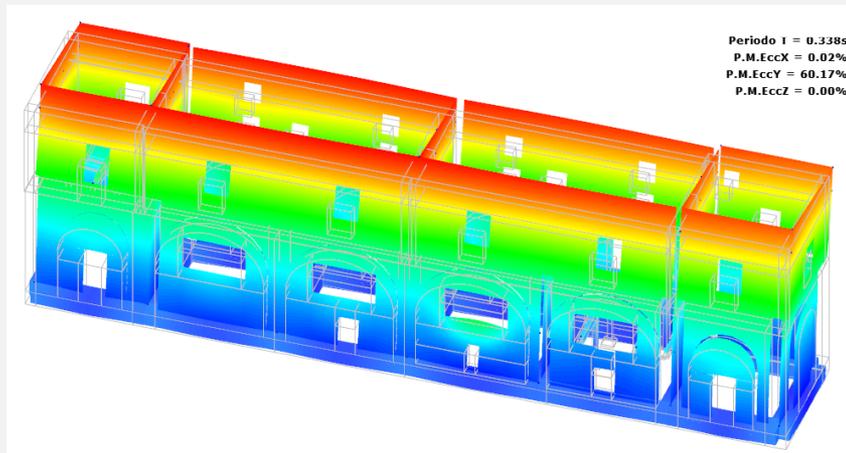
- Muratura discretizzata con elementi *shell* triangolari
- Pilastri e travi discretizzate con elementi *beam*
- Orizzontamenti (volte e solai): spinte e carichi equivalenti, impalcati rigidi ove assimilabili

Materiale	E (MPa)	f _m (MPa)	w (kN/m ³)
Muratura calcarenite PT	1410	2,60	14
Muratura calcarenite P1	1692	3,12	14

Tabella C8.5.I - Valori di riferimento dei parametri meccanici della muratura, da usarsi nei criteri di resistenza di seguito specificati (comportamento a tempi brevi), e peso specifico medio per diverse tipologie di muratura. I valori si riferiscono a: f = resistenza media a compressione, τ_0 = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), f_{v0} = resistenza media a taglio in assenza di tensioni normali (con riferimento alla formula riportata, a proposito dei modelli di capacità, nel §C8.7.1.3), E = valore medio del modulo di elasticità normale, G = valore medio del modulo di elasticità tangenziale, w = peso specifico medio.

Tipologia di muratura	f (N/mm ²)	τ_0 (N/mm ²)	f_{v0} (N/mm ²)	E (N/mm ²)	G (N/mm ²)	w (kN/m ³)
	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max	min-max
Muratura in pietrame disordinata (ciottoli, pietre erratiche e irregolari)	1,0-2,0	0,018-0,032	-	690-1050	230-350	19
Muratura a conci sbalzati, con paramenti di spessore disomogeneo (*)	2,0	0,035-0,051	-	1020-1440	340-480	20
Muratura in pietre a spacco con buona tessitura	2,6-3,8	0,056-0,074	-	1500-1980	500-660	21
Muratura irregolare di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.)	1,4-2,2	0,028-0,042	-	900-1260	300-420	12-16 (**)
Muratura a conci regolari di pietra tenera (tufo, calcarenite, ecc.) (**)	2,0-3,2	0,04-0,08	0,10-0,19	1200-1620	400-500	12-16 (**)
Muratura a blocchi lapidei squadati	5,8-8,2	0,09-0,12	0,18-0,28	2400-3300	800-1100	22
Muratura in mattoni pieni e malta di calce (***)	2,6-4,3	0,05-0,13	0,13-0,27	1200-1800	400-600	18
Muratura in mattoni semipieni con malta cementizia (es.: doppio UNI foratura ≤40%)	5,0-8,0	0,08-0,17	0,20-0,36	3500-5600	875-1400	15

Analisi preliminari per la definizione del set-up sperimentale



Modo	T(s)	f (Hz)	M _x (%)	M _y (%)
1	0,338	2,959	60,17	0,02
2	0,284	3,521	0,06	0,50
3	0,241	4,149	0,02	76,90

- Selezionare le caratteristiche degli accelerometri in base alle frequenze attese
- Definire accuratamente la posizione degli accelerometri al fine di evitare modi locali e ottenere un'adeguata rappresentazione delle forme di vibrazione (compatibilmente con il numero dei sensori)

Setup sperimentale: sistema hardware e software

Centralina: Structural-X (IRS-National Instruments) n. 3 schede NI 9230

Accelerometri: n.8 PCB 393B31 (piezoelettrici mono-assiali)

Test: 6 registrazioni, $F_s = 100\text{Hz}$, 2^{17} campioni, 1311 sec (≈ 20 min)



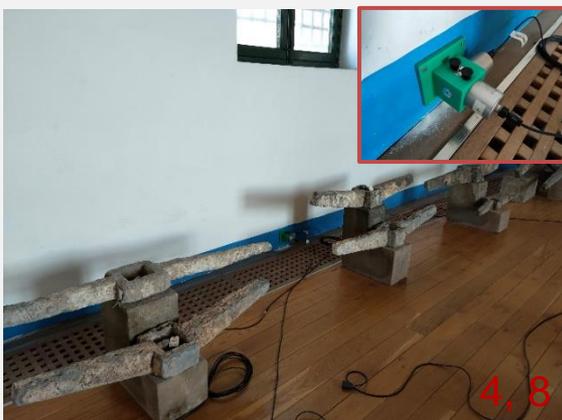
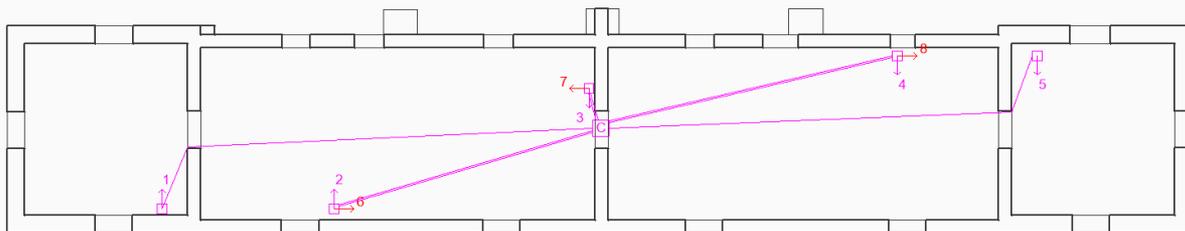
784396-01NI 9230



Caratteristiche	Valore
Frequenza di campionamento	12,8 kSPS
Risoluzione	24 bit
Frequenza di taglio	0.1Hz

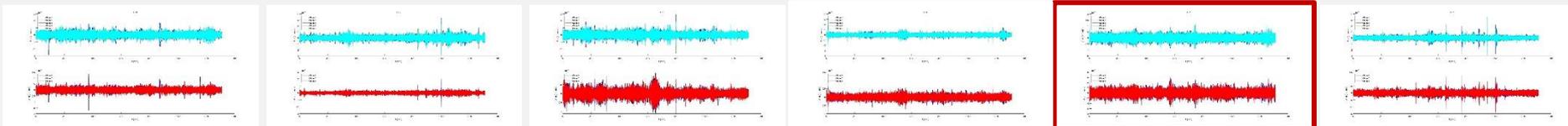
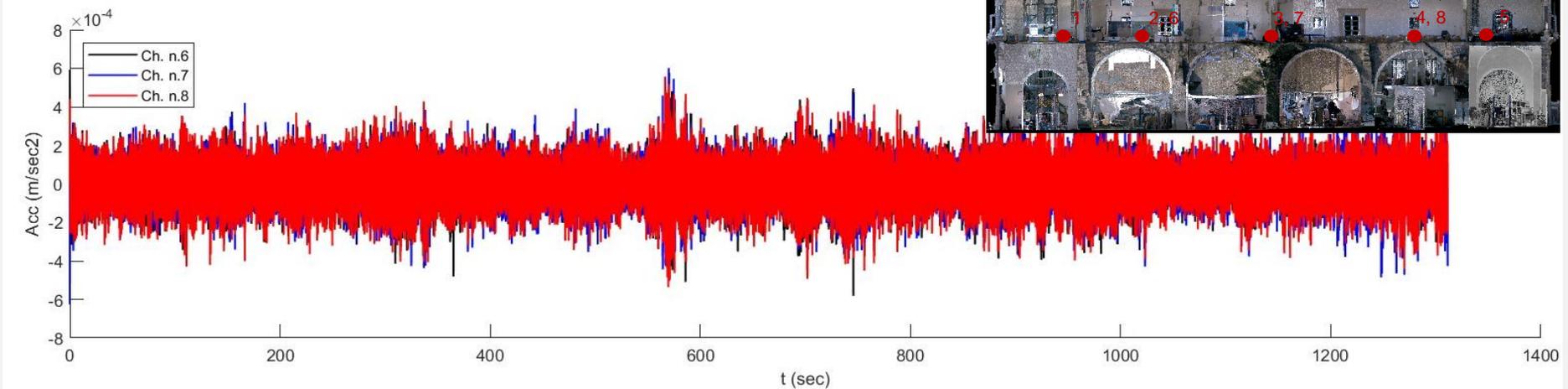
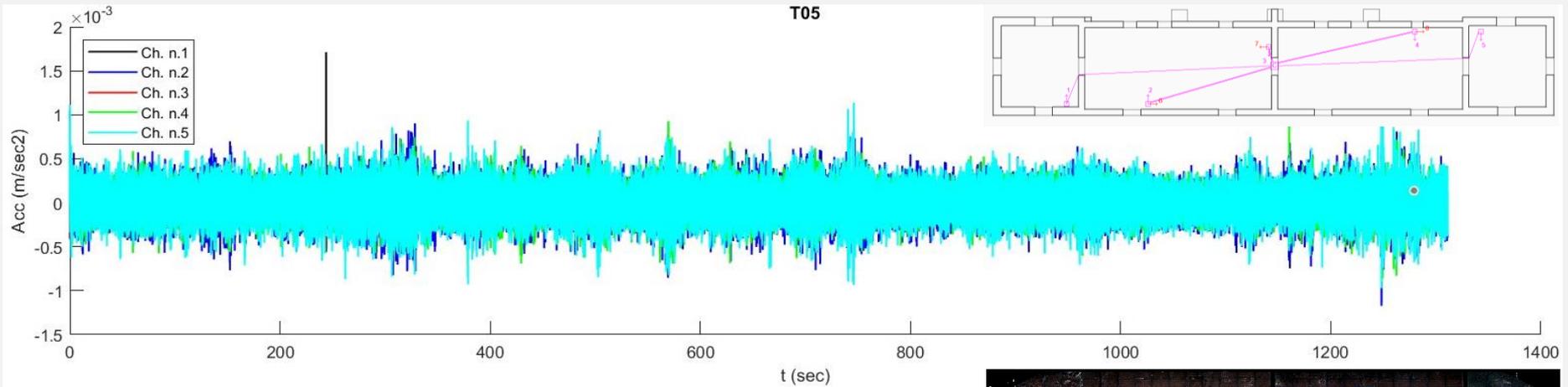
Caratteristiche	Valore
Sensitività ($\pm 5\%$)	10 V/g
Range di misura	0.5 g pk
Range di frequenza	0.1 to 200 Hz
Risoluzione a banda larga	0.000001 g rms
Massa	635 gr

Setup sperimentale: localizzazione dei sensori

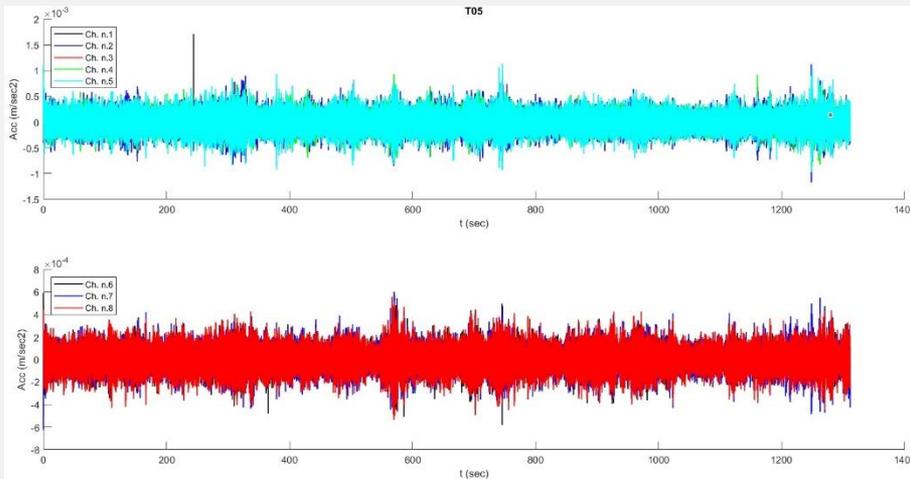


Misure dinamiche

Pre-filtraggio: Butterworth 4° passa alto a 1Hz



Estrazione dei parametri dinamici



$$f_i, \xi_i, \phi_i$$

Metodi nel dominio del tempo

- NExT – Natural Excitation Technique
- ARMA – Auto-Regression Moving Average
- SSI – Stochastic Subspace Identification

Metodi nel dominio delle frequenze

- PP + HP – Peak-picking + Half power
- FDD – Frequency Domain Decomposition

Metodi ibridi

HSD – Hilbert Space Decomposition

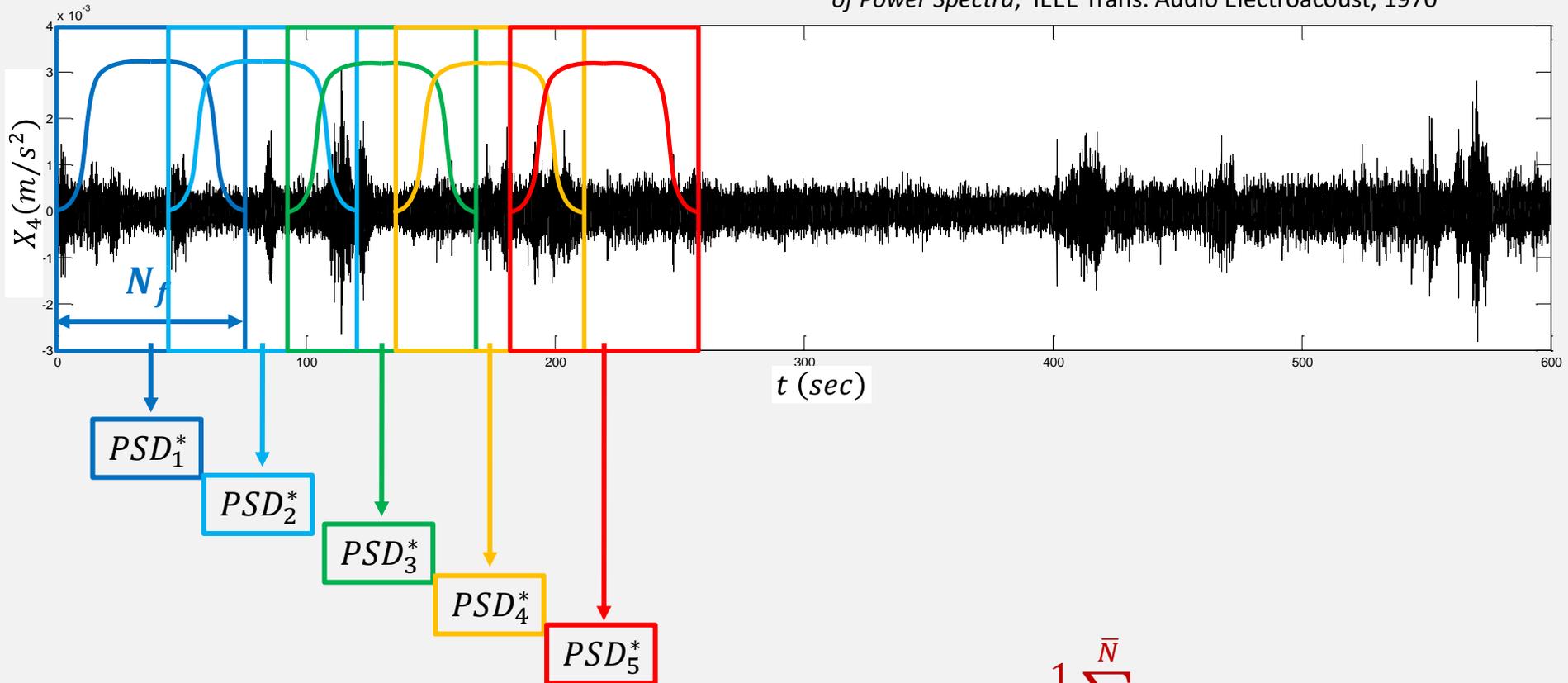
- C. Bilello, E. Greco, M. Greco, N. Madonia, A. Pirrotta, A. Sorce, *A numerical model for pre-monitoring design of historical colonnade courtyards: the case study of Chiaramonte Palace in Palermo*, **The Open Construction and Building Technology Journal**, 2016, 10, (Suppl 1: M3) 52-64
- C. Masnata, C. Bilello, A. Di Matteo, I.A. Dunn, A. Pirrotta, "An innovative ambient identification method", AIMETA 2019 XXIV Conference **The Italian Association of Theoretical and Applied Mechanics** Rome, Italy, 15-19 September 2019
- C. Bilello, A. Di Matteo, A. Fersini, C. Masnata, A. Pirrotta, S. Russotto, "A novel identification procedure from ambient vibration data for buildings of the cultural heritage", XVIII CONVEGNO ANIDIS ASCOLI PICENO 2019 **L'Ingegneria Sismica in Italia** 15- 19 Settembre
- A. Di. Matteo, C. Masnata, S. Russotto, C. Bilello & A. Pirrotta "A novel identification procedure from ambient vibration data", **Meccanica**, November 2020

La Densità Spettrale di Potenza e il metodo di calcolo di Welch

Rappresenta la distribuzione della potenza di un segnale alle varie componenti in frequenza

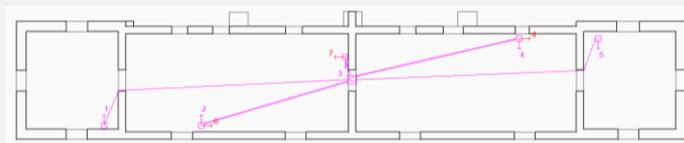
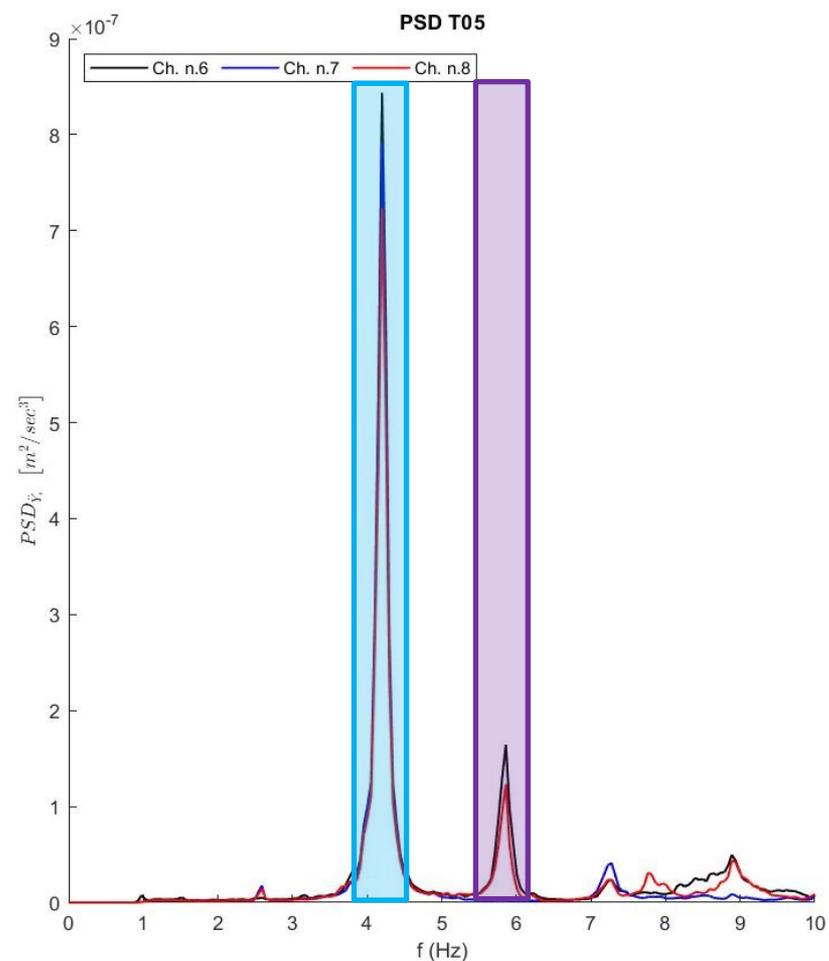
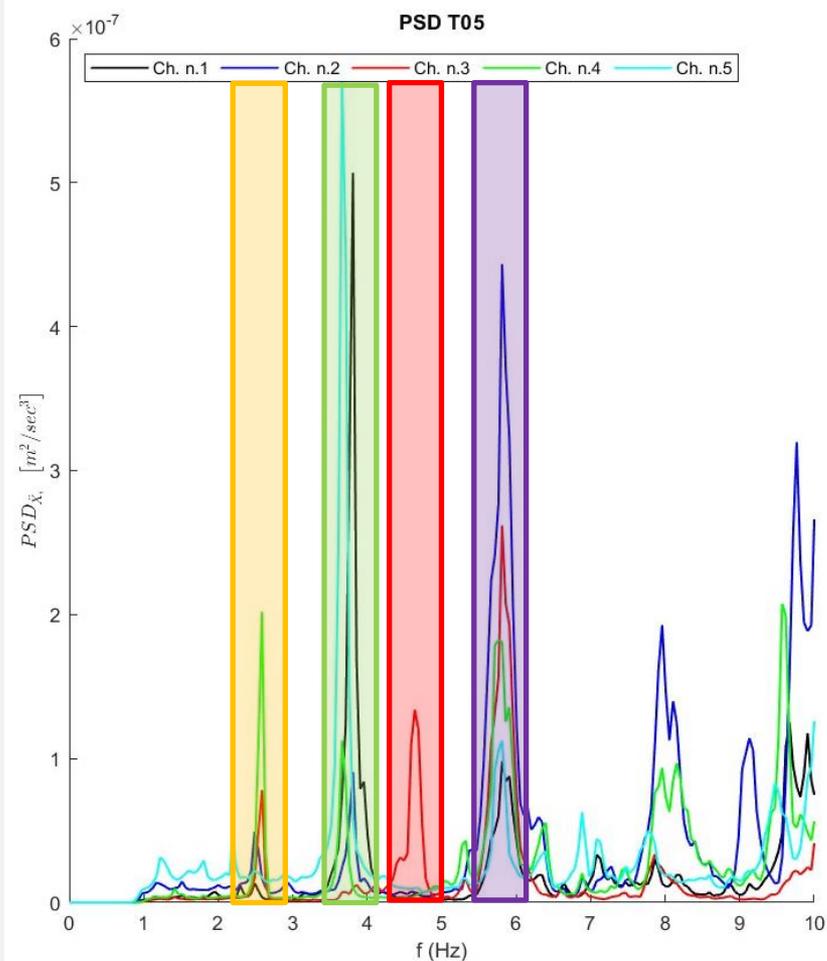


P. D. Welch, *The Use of Fast Fourier Transform for the Estimation of Power Spectra*, IEEE Trans. Audio Electroacoust, 1970



$$\dots \dots \dots \quad PSD(f_k) = \frac{1}{\bar{N}} \sum_{i=1}^{\bar{N}} PSD_i^*(f_k) \quad k = 1, 2 \dots N_f$$

Analisi dei picchi delle PSD



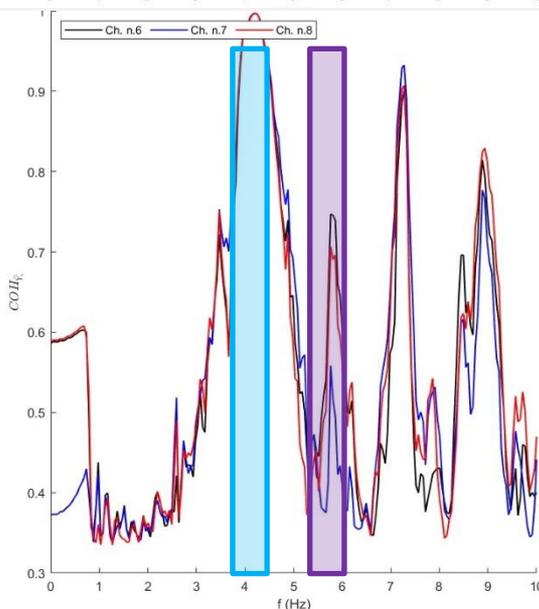
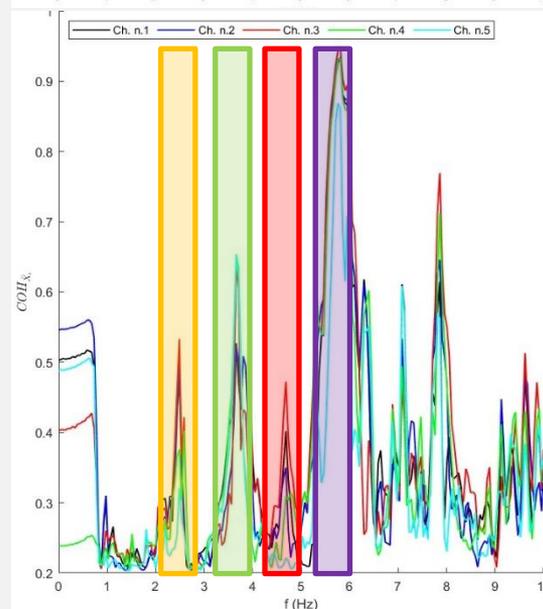
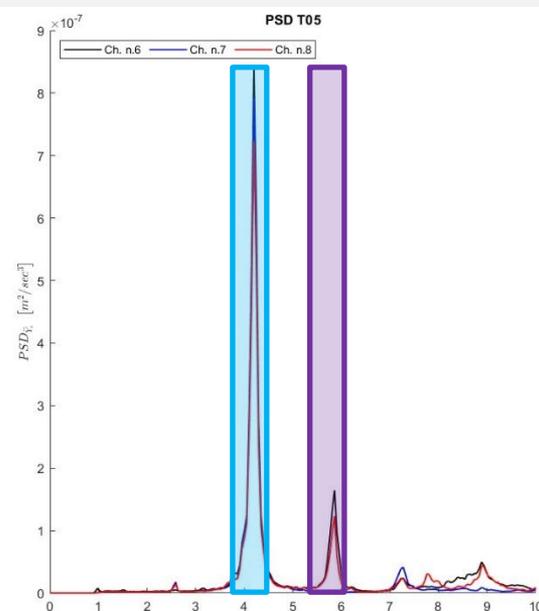
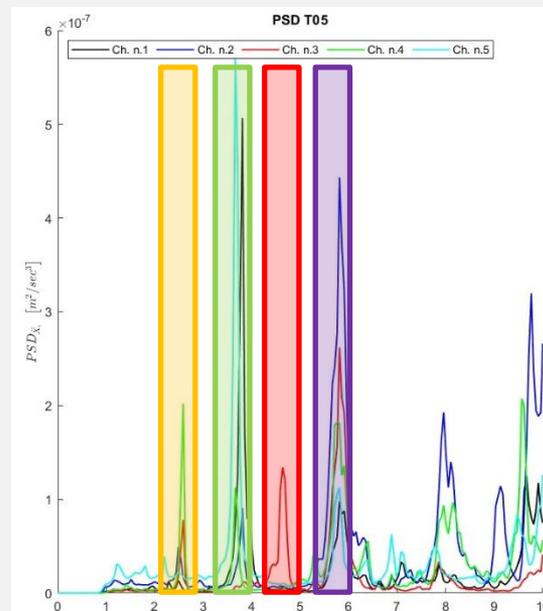
La funzione di coerenza spettrale

Misura il grado di correlazione statistica tra due segnali alle varie frequenze

$$0 < C_{XY}(f) = \frac{|S_{XY}(f)|^2}{S_{XX}(f)S_{YY}(f)} < 1$$

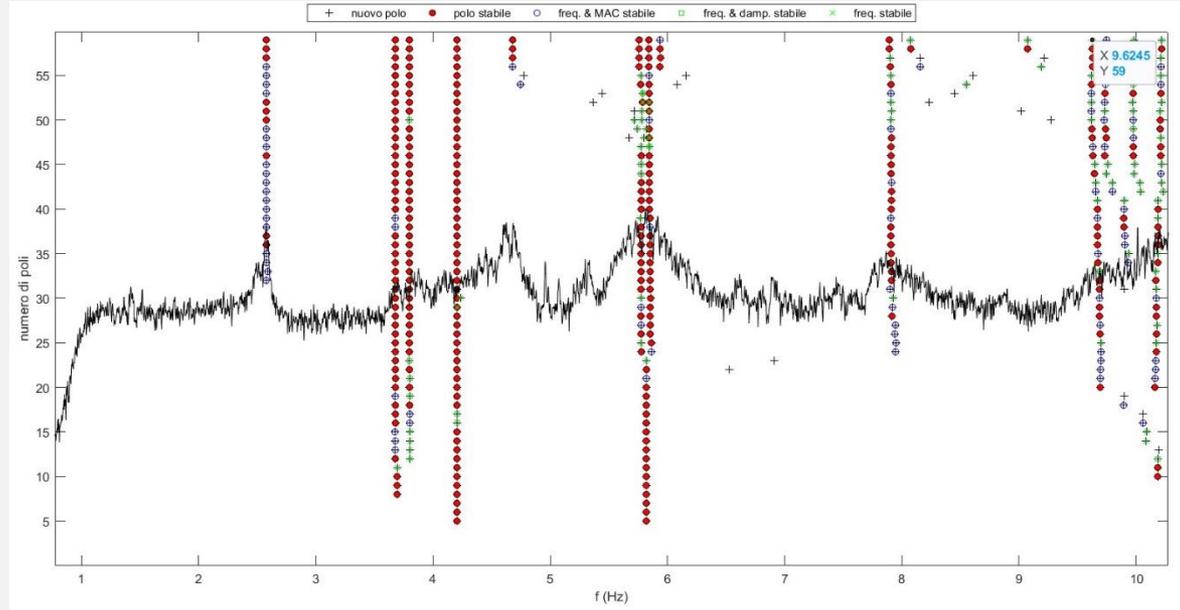
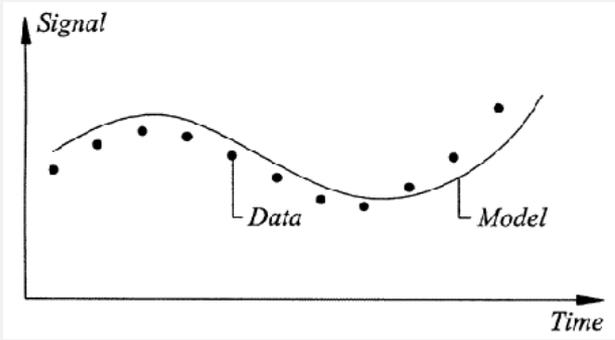
$$S_{XX}(f) = PSD_{XX}(f)$$

- Valori minori di 1 denotano la presenza di componenti di rumore nel segnale strutturale
- In corrispondenza delle frequenze naturali della struttura il rapporto rumore/segnale si riduce a la coerenza spettrale tende a 1



Identificazione con tecnica SSI

Stima parametri ottimali di un modello analitico parametrico che interpola i dati delle serie temporali misurate

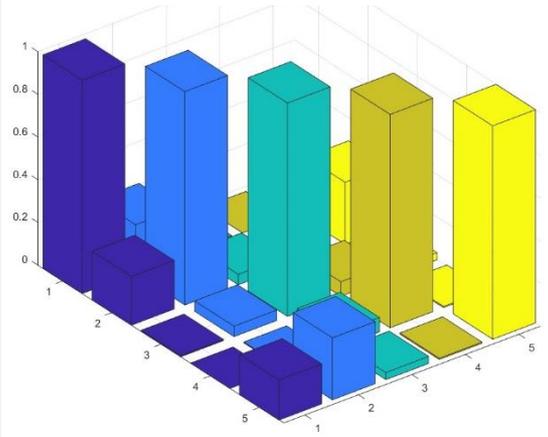


Modo	T(s)	f (Hz)	$\xi(\%)$
1	0,394	2,539	0,62
2	0,272	3,674	0,96
3	0,263	3,800	1,01
4	0,239	4,178	1,31
5	0,173	5,775	1,72

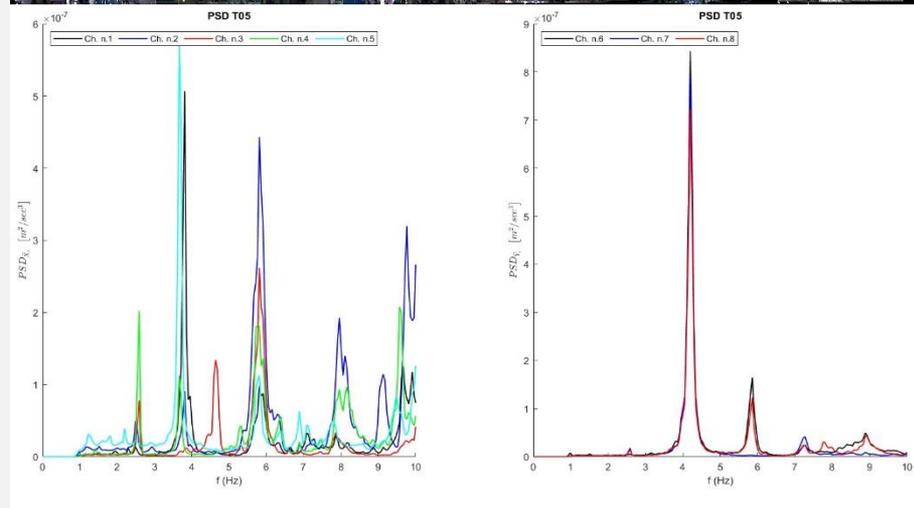
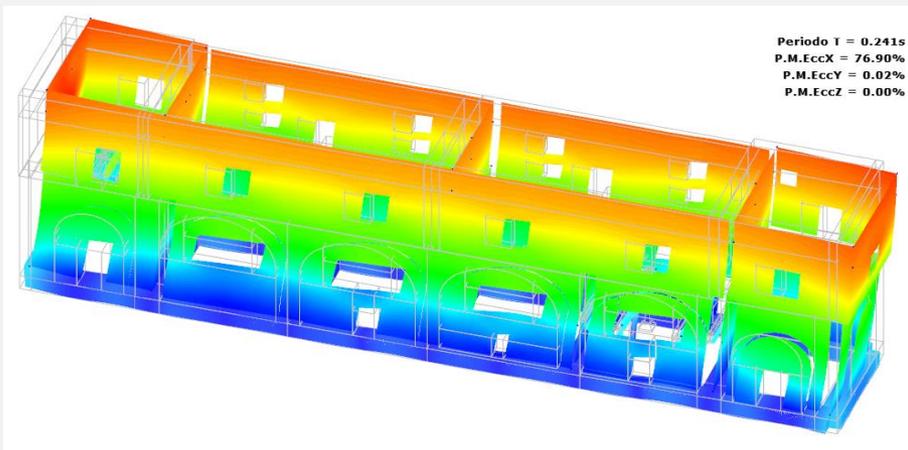
MAC: misura del grado di ortogonalità delle forme di vibrazione identificate

$$0 < c_{ij} = \phi_i^T \phi_j < 1$$

MAC (Modal Assurance Criterion)

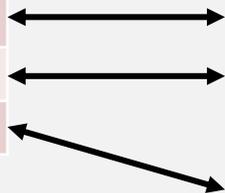


Confronto con il modello agli E.F. iniziale



Modello E.F.

Modo	T(s)	f (Hz)	M _x (%)	M _y (%)
1	0,338	2,959	60,17	0,02
2	0,284	3,521	0,06	0,50
3	0,241	4,149	0,02	76,90



Dati sperimentali

Modo	T(s)	f (Hz)	ξ (%)
1	0,394	2,539	0,62
2	0,272	3,674	0,96
3	0,263	3,800	1,01
4	0,239	4,178	1,31
5	0,173	5,775	1,72

Calibrazione del modello agli E.F. sui dati sperimentali

Frequenza modello E.F. i-esimo modo

$$f_{n,i} \cong \alpha_i \sqrt{E}$$

Frequenza sperimentale i-esimo modo

$f_{e,i}$ – frequenza sperimentale

Funzione errore

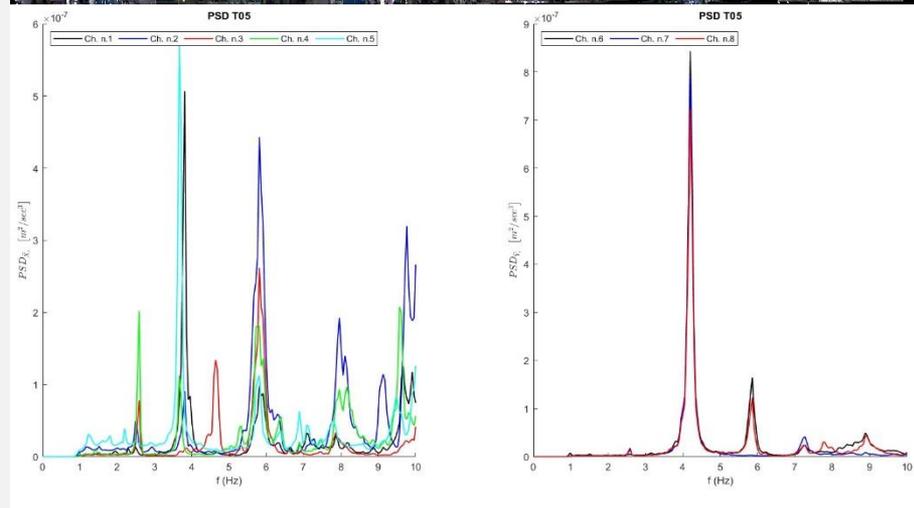
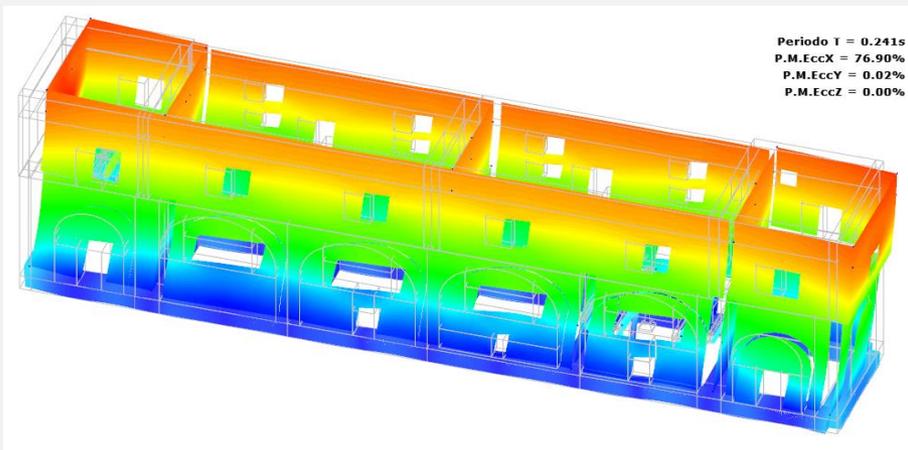
$$Err(E) = \sum_{i=1}^{Nmod} \left(\frac{f_{n,i}}{f_{e,i}} - 1 \right)^2 = \sum_{i=1}^{Nmod} \frac{\alpha_i^2 E - 2\alpha_i f_{e,i} \sqrt{E} + f_{e,i}^2}{f_{e,i}^2}$$

Minimizzazione

$$E_{opt} \rightarrow \frac{d Err(E)}{d E} \rightarrow \sum_{i=1}^{Nmod} \left(\frac{\alpha_i}{f_{e,i}} \right)^2 - \frac{\alpha_i}{f_{e,i} \sqrt{E}} = 0$$

$$E_{opt} = \left(\frac{\sum_{i=1}^{Nmod} \frac{\alpha_i}{f_{e,i}}}{\sum_{i=1}^{Nmod} \left(\frac{\alpha_i}{f_{e,i}} \right)^2} \right)^2$$

Modello agli E.F. calibrato



$$E_{in} = 1410 \text{ MPa}$$

$$E_{opt} = 1474 \text{ MPa}$$

Modo	$f_{E.F.}(\text{Hz})$	$f_{exp.}(\text{Hz})$	Err (%)
1	2,839	2,539	11,8
2	3,365	3,674	-8,4
3	3,934	4,178	-5,8

Analisi vulnerabilità per meccanismi globali

Presso-flessione fuori piano

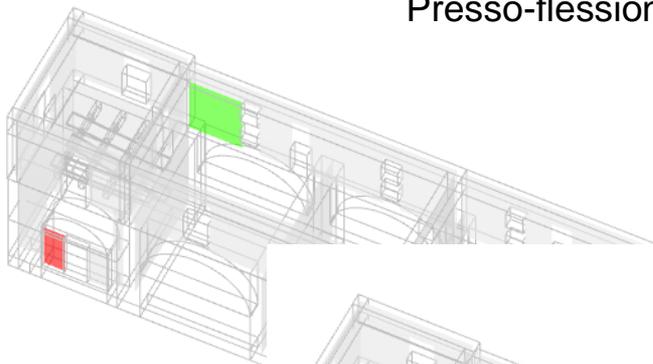


200 %

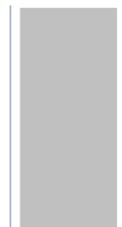


$$\frac{PGA_C}{PGA_D} \%$$

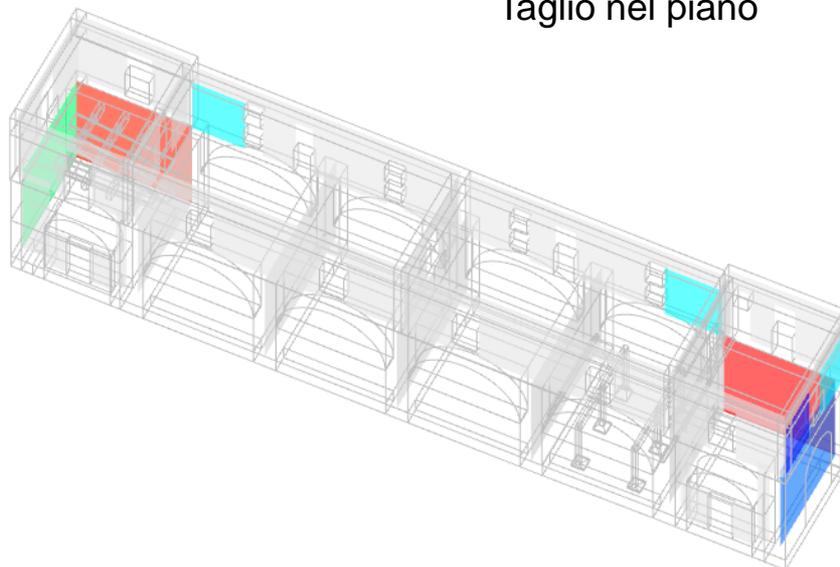
Presso-flessione nel piano



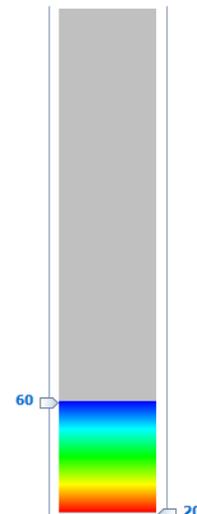
200 %



Taglio nel piano

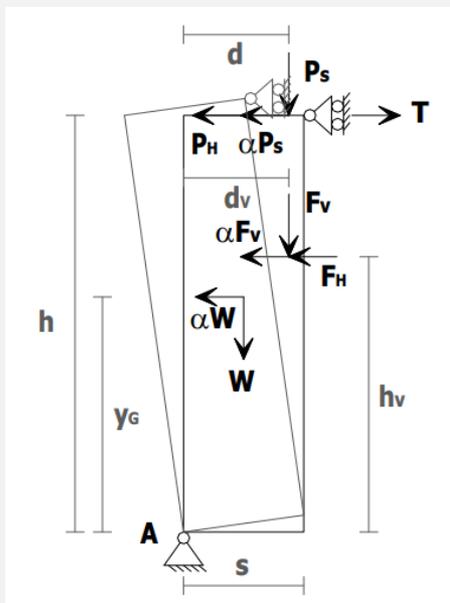


200 %

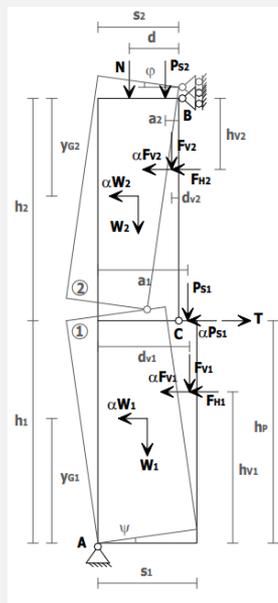


20 %

Analisi di vulnerabilità per meccanismi locali



Ribaltamento



Spanciamento

Spettri di risposta al piano per verifiche
meccanismi locali (Circolare n.7 21/01/2019)

$$S_{eZ}(T, \xi, z) = \sqrt{\sum (S_{eZ,k}(T, \xi, z))^2} \geq S_e(T, \xi) \quad \text{per } T > T_1 \quad [C7.2.5]$$

$$S_{eZ,k}(T, \xi, z) = \begin{cases} \frac{1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) a_{Z,k}(z)}{1 + [1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) - 1] \left(1 - \frac{T}{aT_k}\right)^{1.6}} & \text{per } T < aT_k \\ 1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) a_{Z,k}(z) & \text{per } aT_k \leq T < bT_k \\ \frac{1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) a_{Z,k}(z)}{1 + [1.1 \xi_k^{-0.5} \eta(\xi) - 1] \left(\frac{T}{bT_k} - 1\right)^{1.2}} & \text{per } T \geq bT_k \end{cases} \quad [C7.2.6]$$

$$a_{Z,k}(z) = S_e(T_k, \xi_k) |\gamma_k \psi_k(z)| \sqrt{1 + 0.0004 \xi_k^2} \quad [C7.2.7]$$

Analisi più accurate eseguite facendo uso dei parametri dinamici identificati

Conclusioni

- La misura delle vibrazioni ambientali consente, in maniera rapida e relativamente economica, di caratterizzare dinamicamente edifici storico-monumentali, fornendo informazioni globali sulla risposta del fabbricato, rispetto a quelle puntuali ricavabili da indagini tradizionali (NTC2018)
- I parametri dinamici identificati possono essere utilizzati per calibrare modelli agli E.F. molto più accurati e affidabili per lo studio delle vulnerabilità sismiche globali e locali degli edifici

GRAZIE



Via Maggiore Toselli 10 – 90143 Palermo

Via G. Licata 311 – 92019 Sciacca (AG)

Tel./fax 091- 2513514, 0925-25144

E-mail: bilello@abgroupweb.it

web: www.abgroupweb.it