



Comune di Sant'Agnello



CORSO DI FORMAZIONE

Monitoraggio ed identificazione dinamica delle strutture

Dipartimento di Strutture per Ingegneria ed Architettura

Mercoledì 29 Gennaio 2025

RELATORE

Prof. Ing. Mariano Modano



Il monitoraggio Strutturale

Il monitoraggio delle strutture civili rappresenta un elemento fondamentale per garantire la sicurezza, la durabilità e la funzionalità delle strutture e delle infrastrutture.

Quando è utile monitorare le strutture

Per le strutture è sempre estremamente utile monitorare dei parametri che diano informazioni sullo stato di salute dell'opera, ma il monitoraggio diventa poi indispensabile quando vi è necessità di adeguare le opere oppure di intervenire in presenza di dissesti o danneggiamenti

Cosa e come monitorare

Abbiamo due modi per monitorare una struttura; con monitoraggio statico e con monitoraggio dinamico

Il monitoraggio Statico

Di solito questo monitoraggio viene utilizzato quando la struttura mostra difetti oppure dissesti dovuti a cause esterne.

Il monitoraggio Statico fornisce informazioni sulla CAPACITA' RESISTENTE della struttura ed è un elemento di fondamentale importanza nella progettazione degli interventi

Il monitoraggio Dinamico

La tipologia di monitoraggio dinamico è più complessa e fornisce indicazioni sulle proprietà dinamiche intrinseche della struttura.

I parametri misurati consentono di valutare, nel tempo, eventuali variazioni dello stato di salute dell'opera. Forniscono inoltre parametri fondamentali per la corretta modellazione.

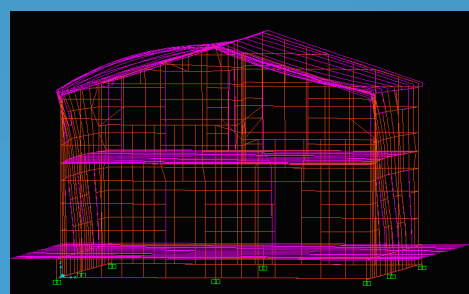
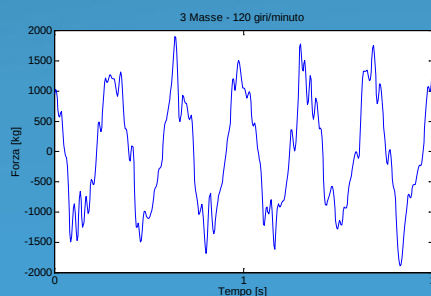
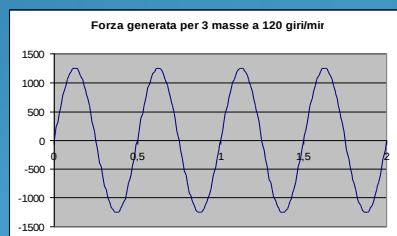
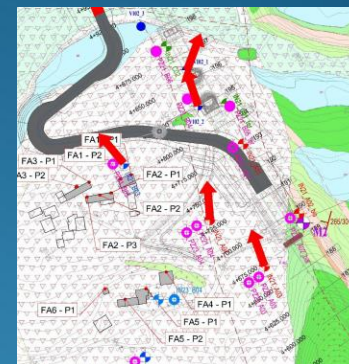
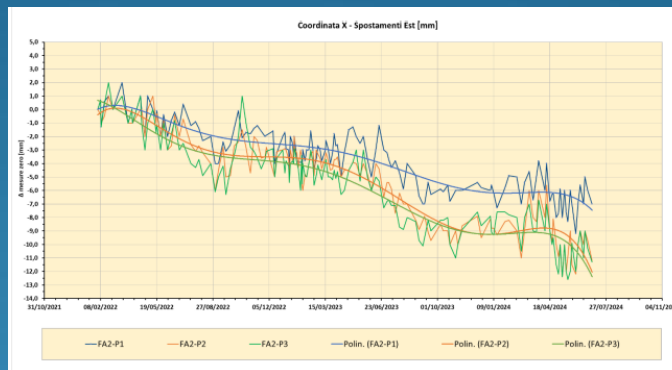
Parametri misurati in fase di monitoraggio

Monitoraggio Statico

- Deformazioni
- Spostamenti
- Forze
- Quadri fessurativi
- Stati di coazione

Monitoraggio Dinamico

- Accelerazioni
- Frequenze (Periodi propri della struttura)
- Forme modali
- Smorzamento
- Velocità e spostamenti in fase di oscillazione



Strumentazione Monitoraggio Statico

Monitoraggio Statico

•Deformazioni

1. Deformometro
2. Strain gauges

•Spostamenti

1. Comparatori centesimali
2. Stazione topografica

•Forze

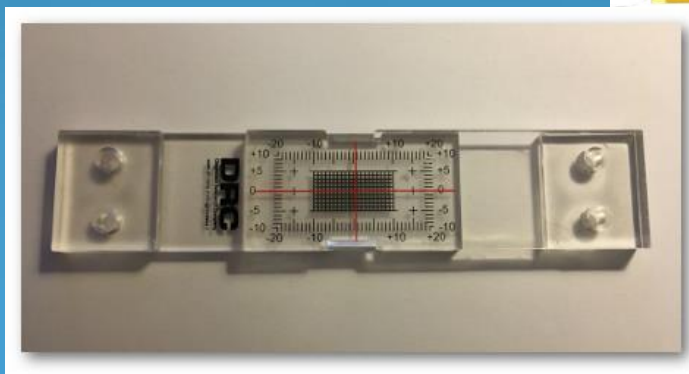
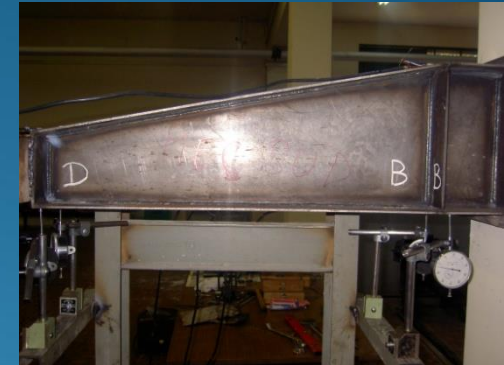
1. Celle di carico

•Quadri fessurativi

1. fessurimetri, comparatori a bottoni

•Stati di coazione

1. -precompressione - strain gauges



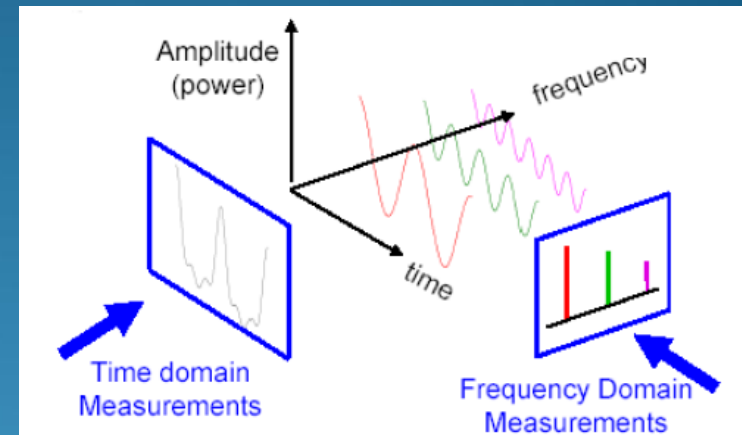
Strumentazione Monitoraggio Dinamico

Monitoraggio Dinamico

•Accelerazioni

1. Accelerometri

- Frequenze (Periodi propri della struttura)
- Forme modali
- Smorzamento
- Velocità e spostamenti in fase di oscillazione



Monitoraggio Statico di un quadro fessurativo

Monitoraggio Statico

•Spostamenti

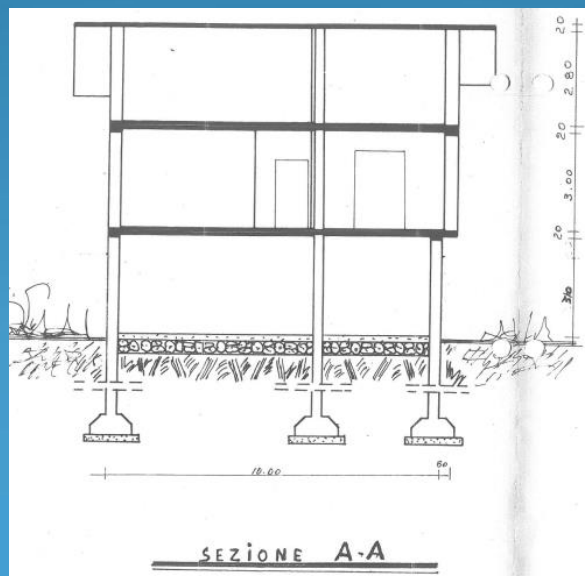
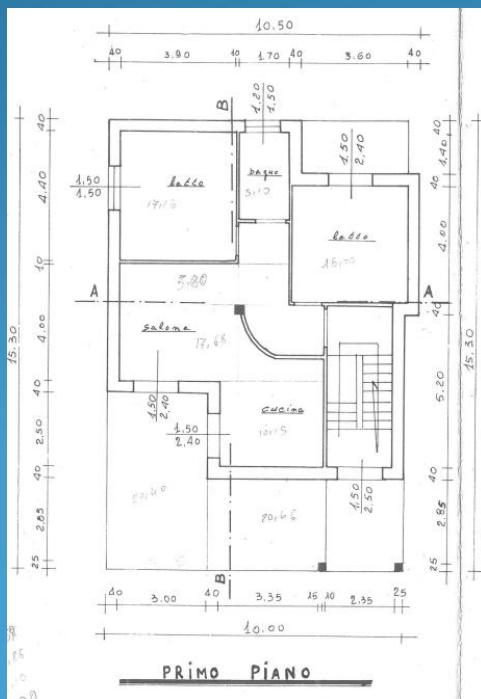
1. Comparatori centesimali



Posizionamento della base di lettura ortogonalmente alla lesione, in taluni casi andrebbero misurati gli spostamenti anche in più punti. Applicare il comparatore centesimale negli alloggi e leggere la misura. Ripetere la misurazione più volte e poi fare la media.



Monitoraggio Statico di un quadro fessurativo



Monitoraggio Statico di un quadro fessurativo

Date letture

02/07/2020

03/07/2020

13/07/2020

20/07/2020

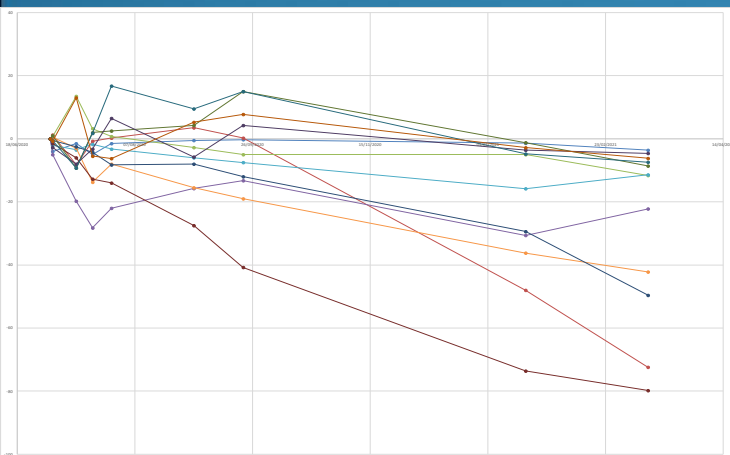
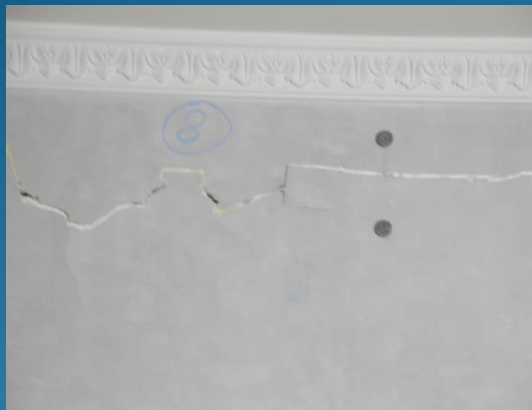
28/07/2020

01/09/2020

22/09/2020

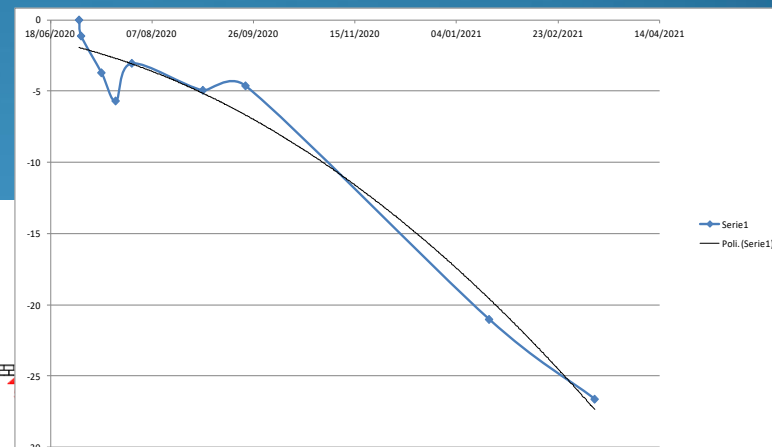
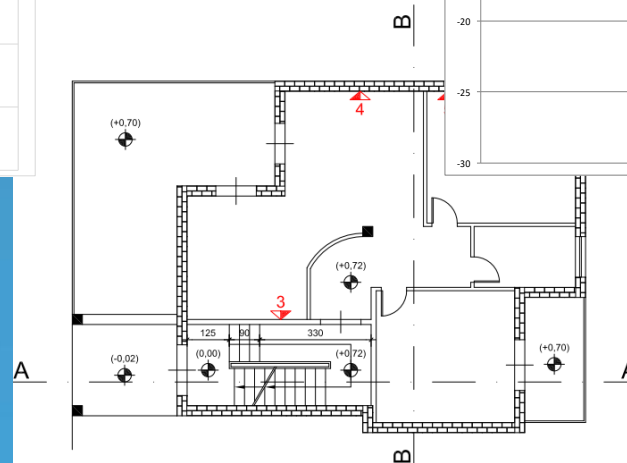
20/01/2021

13/03/2021



Pianta Piano Terra

SCALA 1:100



Monitoraggio di uno stato di presollecitazione

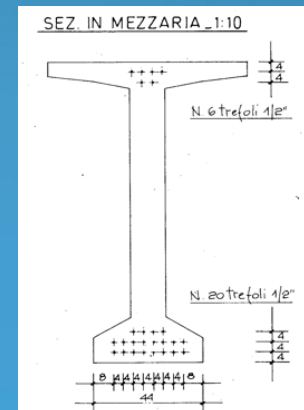
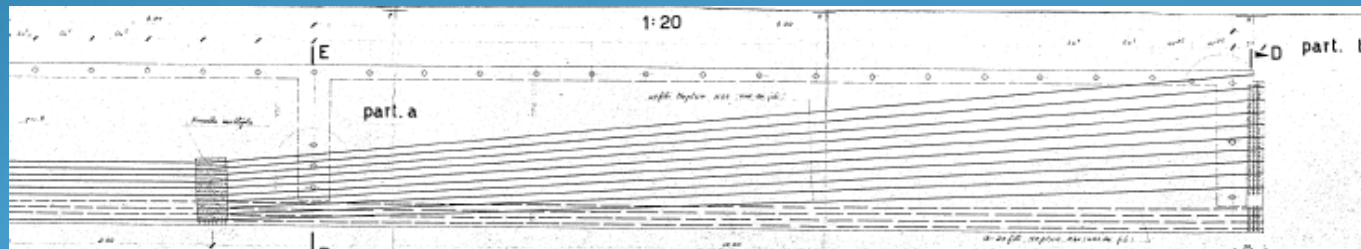
Monitoraggio Statico

- Deformazioni

1. Strain gauges - estensimetri
- Stati di coazione (precompressione)

Viadotto autostradale

Travi in precompresso – cavi pre-tesi



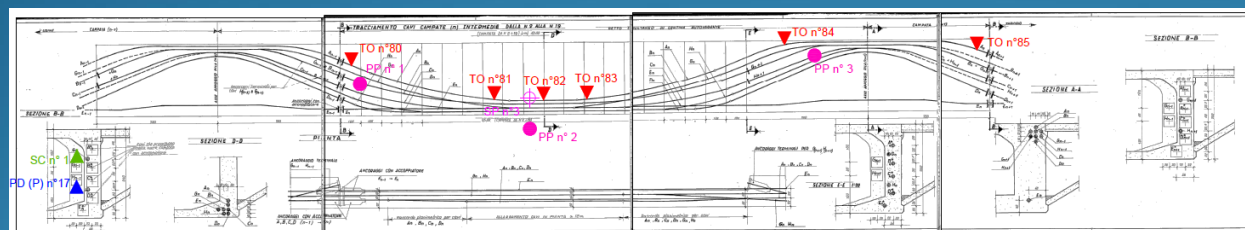
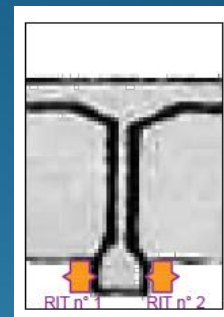
Viadotto autostradale

Travi in precompresso – cavi post-tesi



Prove di rilascio tensionale

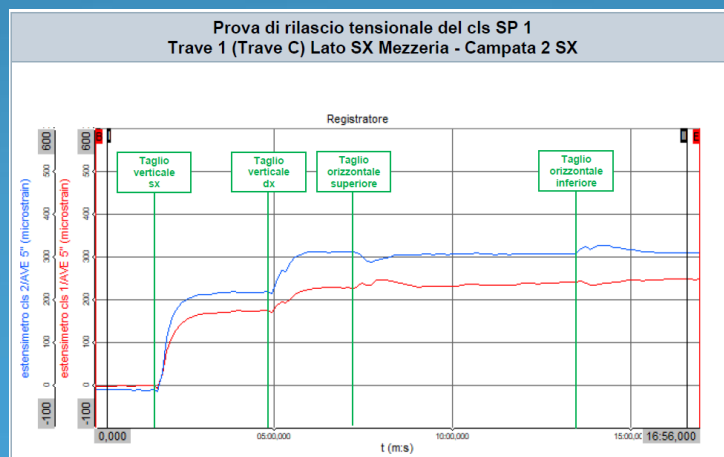
ANALISI SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA DETERMINAZIONE DELLO STATO DI PRECOMPRESSIONE



Descrizione sintetica	Simbologia	Num. Tot.
Microcaso: Taglio visto dei cavi da precompressione finalizzati al riconoscimento geometrico del numero e del diametro dei fili, e al controllo di corrispondenza delle testate si forniscono informazioni sulle caratteristiche di ancoraggio dei cavi.		2
Salvo Cavi di Precompressione: Rilievo da eseguire con metodi convenzionali puntuali ad alta frequenza (1000Hz), lacrimazione, estrazione, saggi visti, etc.		6
Prima di Rilascio: Rilievo del calcestruzzo precompresso in essere secondo le specifiche KS4.		8
Prima di Puntata (P): Puntata sarà eseguita alla prova di Rilascio Tensionale.		0
Diametro a Vista: Prova non distruttiva per determinare le caratteristiche meccaniche dell'acciaio armato in opera.		7



Prova di rilascio tensionale del cls SP 1
Trave 1 (Trave C) Lato SX Mezzeria - Campata 2 SX



$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{Mx}{Ix}y + \frac{Ne}{Ix}y$$

$$\sigma_z = E\varepsilon_z$$

M_x = Momento carichi permanenti

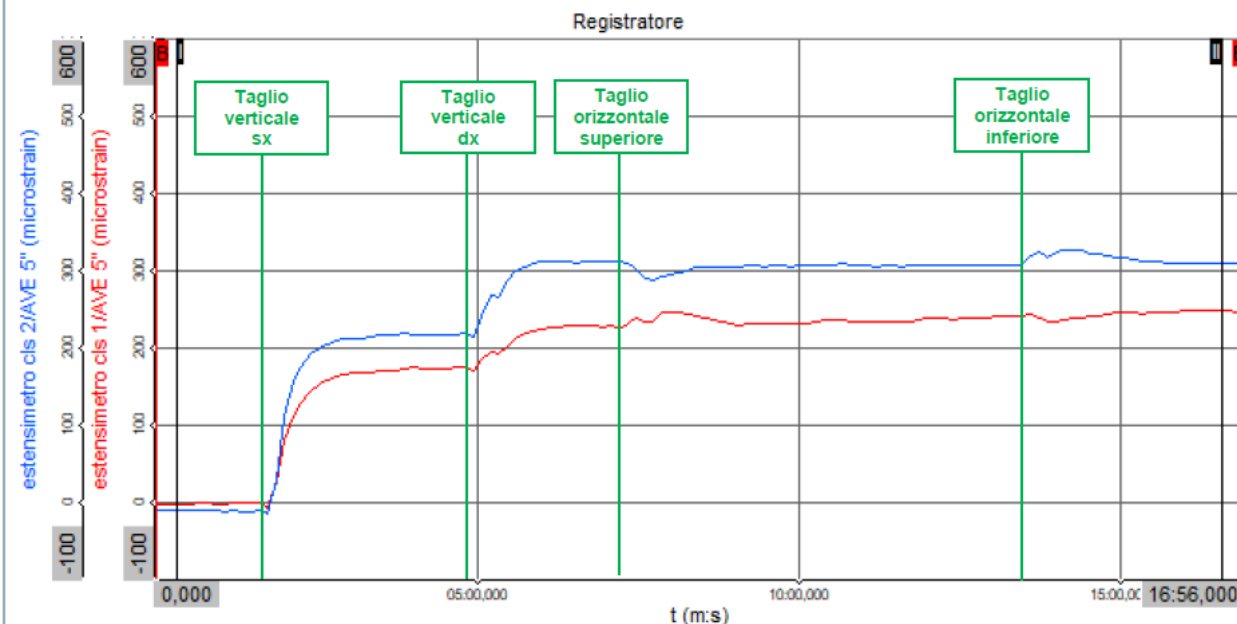
e = Eccentricità sforzo Normale di Precompressione

y = Quota di misurazione della σ_z

I_x = Momento di inerzia della sezione

A = Area della sezione

Prova di rilascio tensionale del cls SP 1 Trave 1 (Trave C) Lato SX Mezzeria - Campata 2 SX



- Valutazione della tensione media misurata su ambo i lati della trave;
- valutazione con modello FEM della tensione agente per i carichi permanenti;
- Determinazione dell'effettiva tensione cui i trefoli sono sottoposti;
- Valutazione dello sforzo normale risultante nei cavi;
- Confronto tra la tensione di progetto e tensione letta per valutare la perdita di precarico media riscontrata nei cavi.

$$\sigma_z = \frac{N}{A} + \frac{M_x}{I_x} y + \frac{N_e}{I_x} y$$

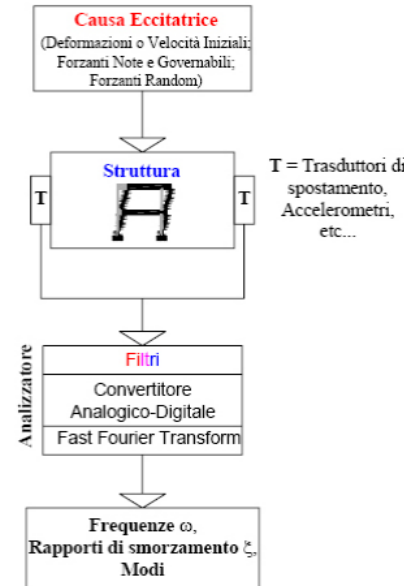
Monitoraggio Dinamico e identificazione strutturale

A seconda del tipo di eccitazione le suddette prove si distinguono in:

PROVE CON ECCITAZIONE AMBIENTALE (OMA)

Forzanti indotte dal
vento o dal traffico

ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE



PROVE CON ECCITAZIONE FORZATA (EMA)

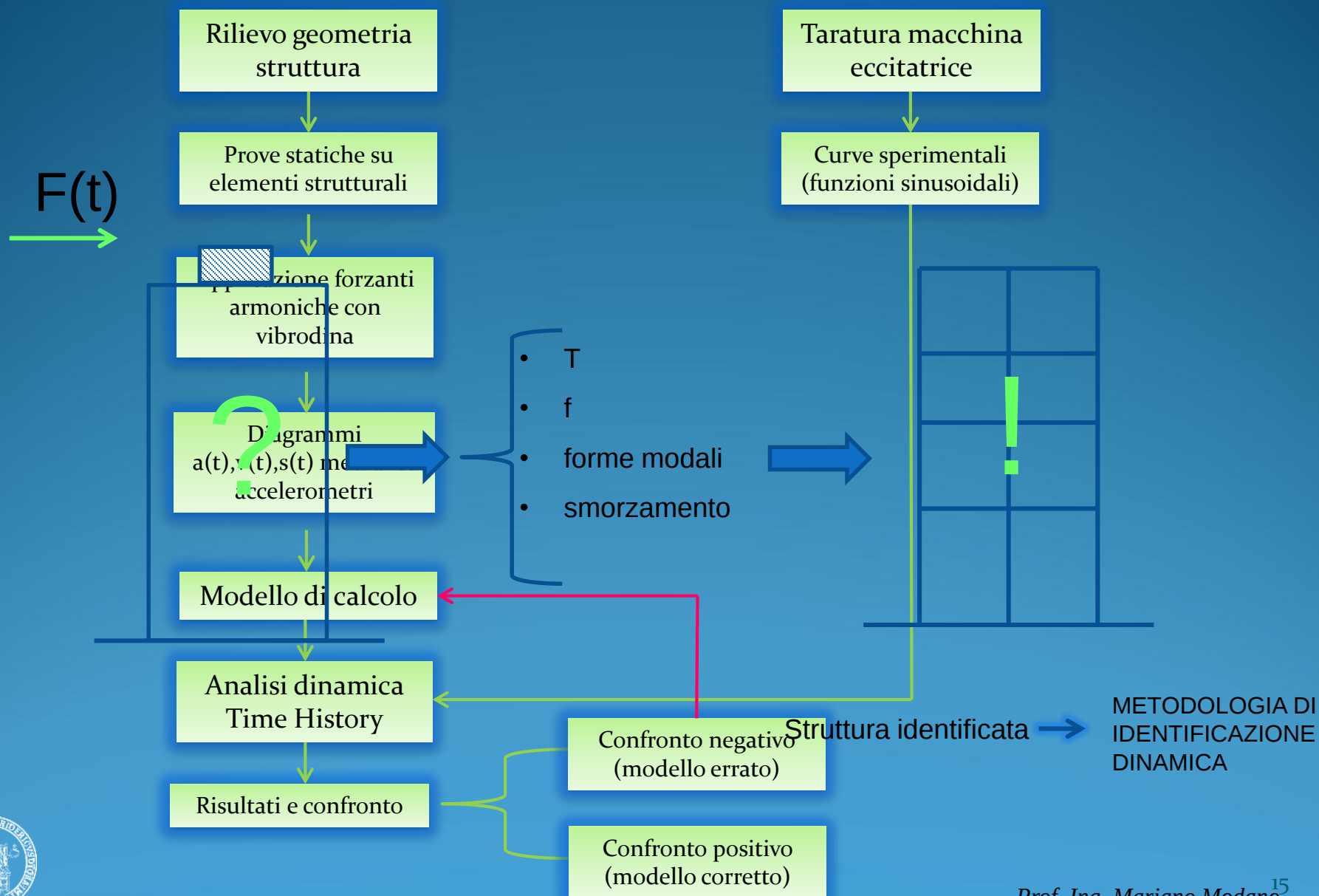
Forzanti indotte da
carichi applicati ad hoc
nella fase sperimentale



La struttura viene sottoposta a prove dinamiche per:

- identificare un modello numerico idoneo a rappresentare la realtà strutturale del manufatto;
- calcolare direttamente la risposta della struttura a fronte di qualsiasi azione dinamica agente con caratteristiche note (ad esempio un sisma o un carico dinamico d'esercizio);

- Forzamento dinamico della struttura reale
- Acquisizione dati accelerometrici
- Calibrazione dei modelli di calcolo



Casi di studio sviluppati mediante Analisi Dinamica sperimentale che identifica le strutture dal punto di vista dinamico

- Abbiamo utilizzato un sistema di forzamento armonico

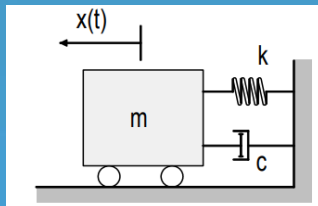
Tre casi di studio

EMA (Experimental Modal Analysis)

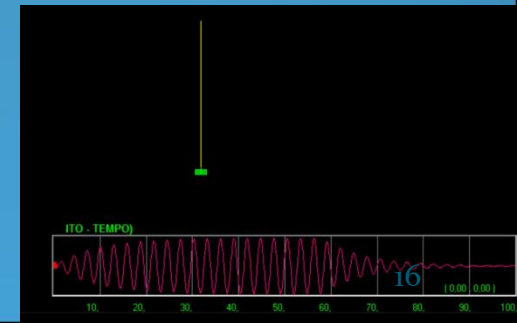
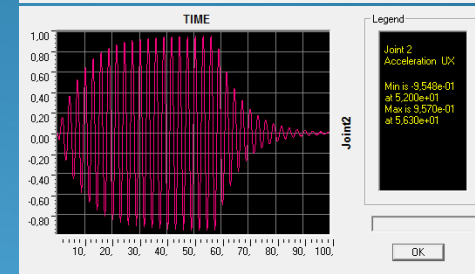
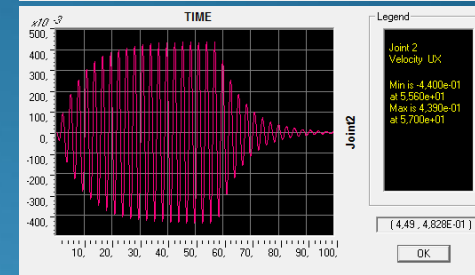
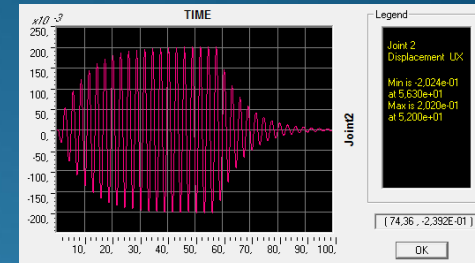
- Edificio a base fissa e a base isolata
- Edificio in acciaio
- Edificio con sistema costruttivo brevettato

Setup sperimentale

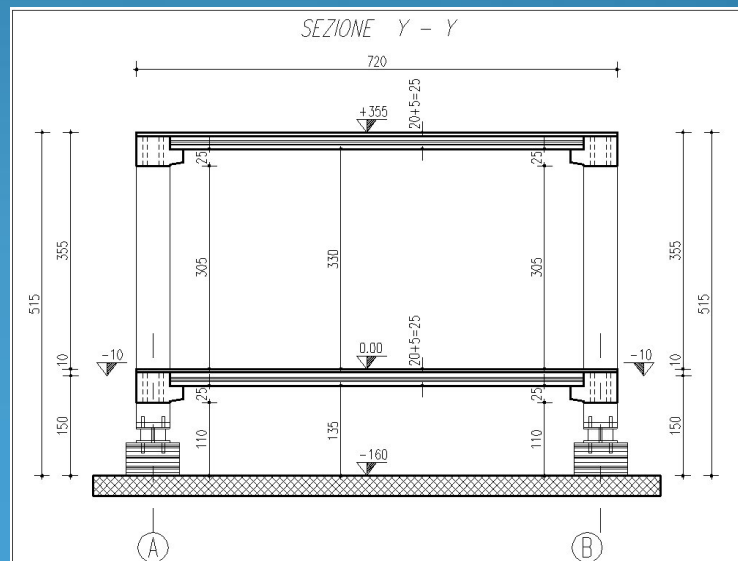
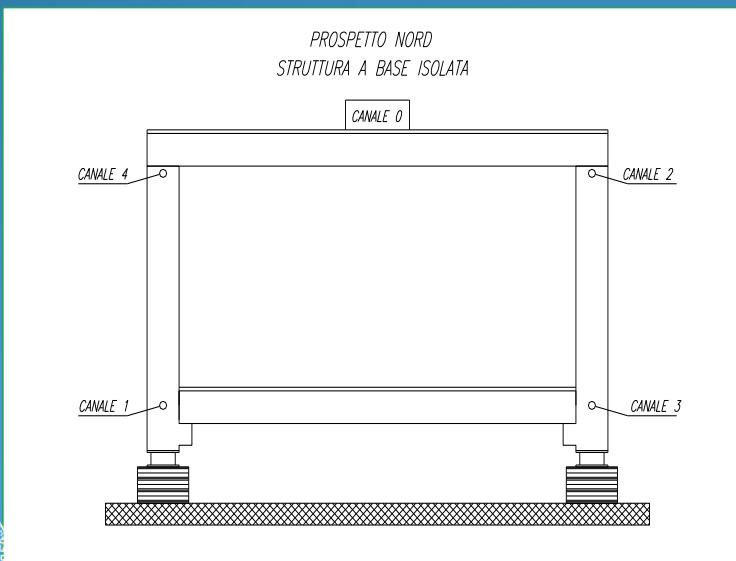
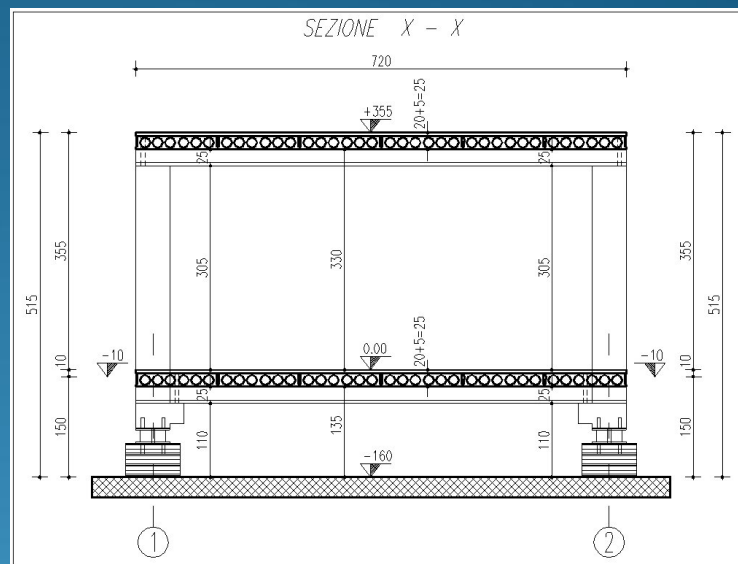
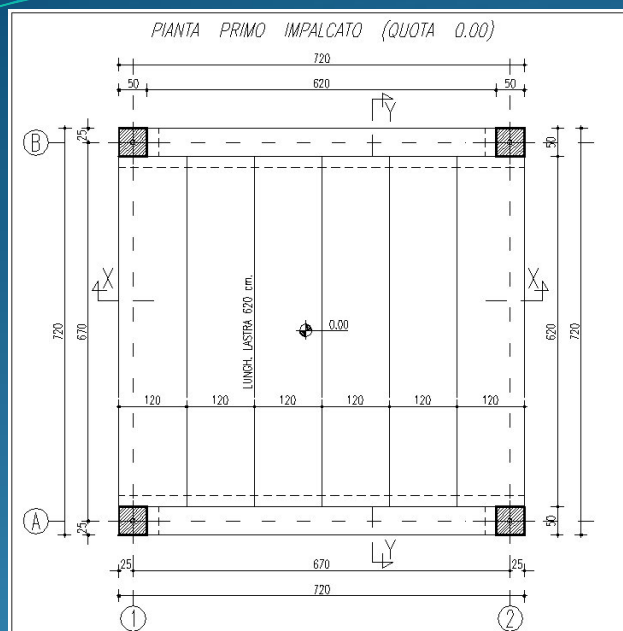
- Vibrochina - genera forzanti armoniche con intensità proporzionale alla frequenza
- Accelerometri (6 episensor, 6 wireless, 6 miniaccelerometri)
- Scheda acquisizione e software di gestione



$$m\ddot{x} + c\dot{x} + kx = F_0 \sin \omega t$$



Edificio prefabbricato (modulare) a base fissa e a base isolata

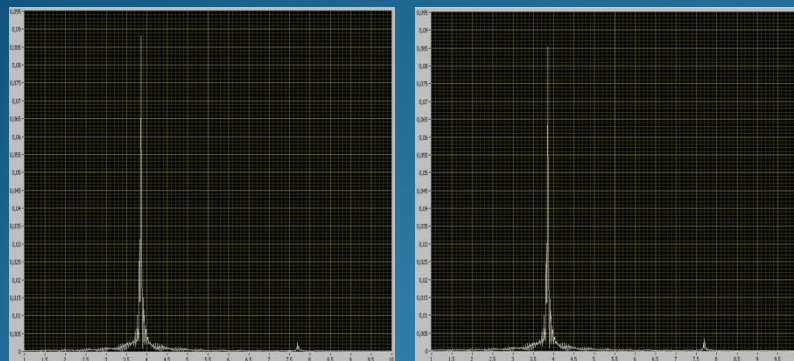


- Edificio prefabbricato (modulare) a base fissa e a base isolata

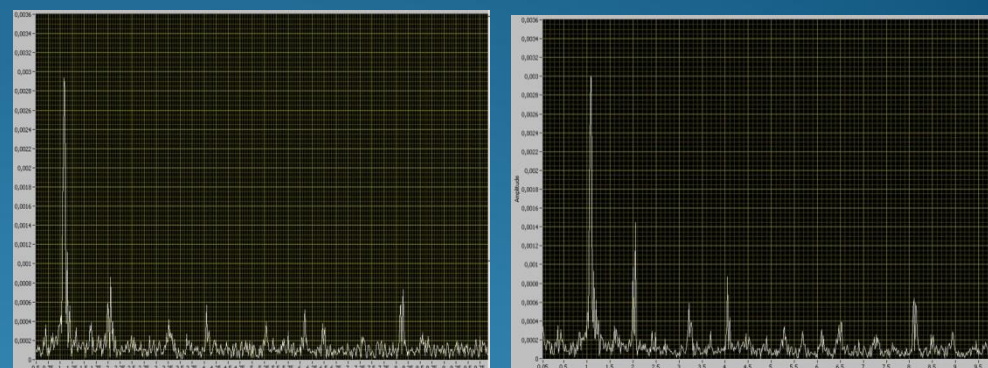


Accelerazioni in corrispondenza dei pilastri

STRUTTURA A BASE FISSA



STRUTTURA A BASE ISOLATA



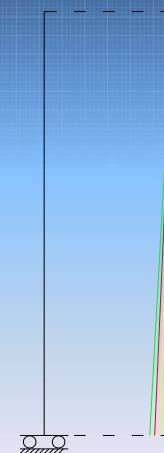
STRUTTURA A BASE FISSA



Deformata

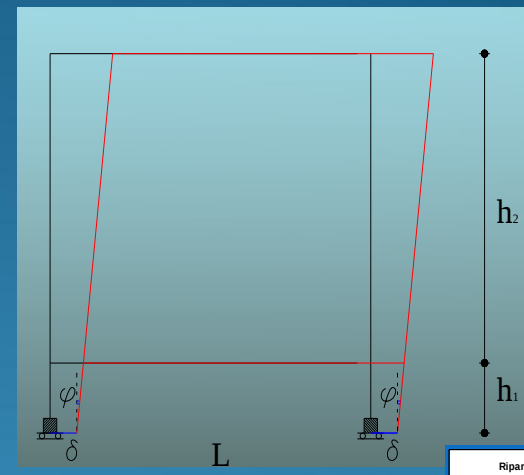
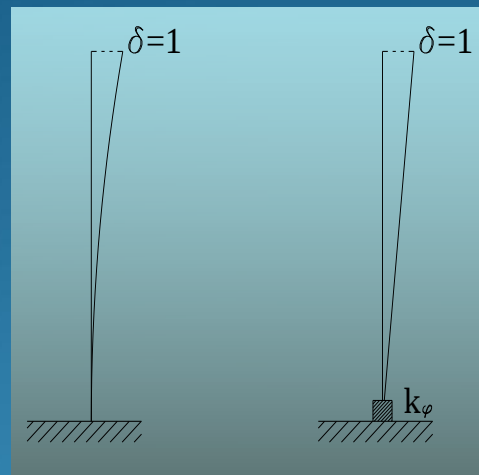
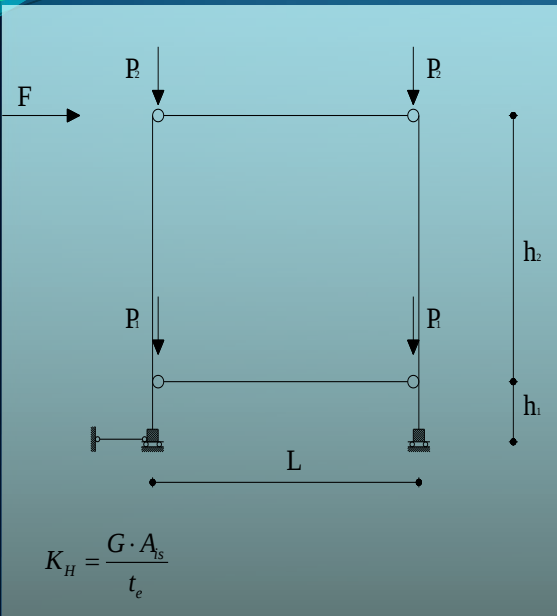
- Modello ad 1 g.d.l.
- Modello F.E.M.
- Dati sperimentali

STRUTTURA A BASE ISOLATA



Deformata rigida

- Modello ad 1 g.d.l.
- Modello F.E.M.
- E.P.T.
- Dati sperimentali



FEM

- Elementi monodimensionali
- Assenza di impalcato rigido
- Analisi dinamica lineare (*)
- Materiale elastico lineare
- Winstrand (Enexsys)

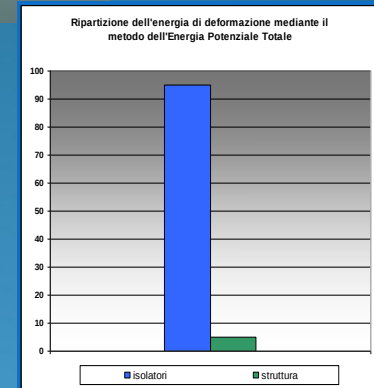
$$E_t = K_{is} \cdot \delta^2 + K_{str} \cdot \varphi^2 - F \cdot [\delta + \varphi \cdot (h_1 + h_2)] - 2 \cdot P_2 \cdot (h_1 + h_2) \cdot \frac{\varphi^2}{2} - 2 \cdot P_1 \cdot h_1 \cdot \frac{\varphi^2}{2}$$

$$\delta = \frac{F}{2 \cdot K_{is}}$$

$$\varphi = \frac{F \cdot (h_1 + h_2)}{2 \cdot [K_{str} - P_2 \cdot (h_1 + h_2) - P_1 \cdot h_1]}$$

• Commento dei risultati ottenuti

- Le prove dinamiche hanno consentito di calibrare adeguatamente un modello di calcolo anche con gli isolatori sismici.
- La particolare semplicità della struttura ha consentito di mettere a punto la procedura di identificazione dinamica anche per successive prove su strutture più complesse;
- E' emerso che con la tipologia di isolatore utilizzato nella struttura BIS mediante l'approccio con il metodo EPT oltre il 90% dell'energia elastica viene assorbita dal sistema di isolamento



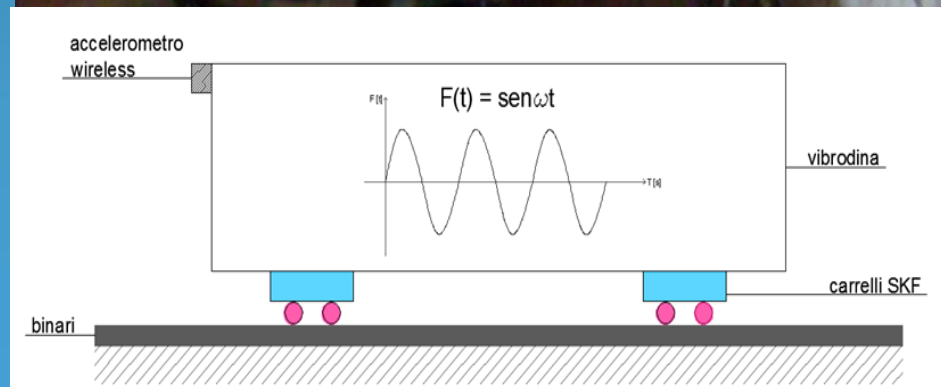
$$F_y(t) = 2 * m * r * \omega^2 * \sin \omega t$$

Per assicurarsi che le forzanti prodotte dalla macchina eccitatrice coincidano con quelle calcolate teoricamente, la vibrodina è stata tarata in laboratorio.

Lo schema di funzionamento per la misurazione della forzante e la calibrazione della vibrodina è il seguente:

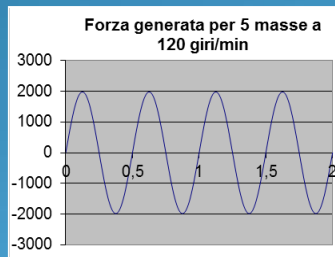
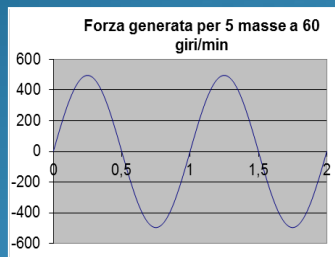
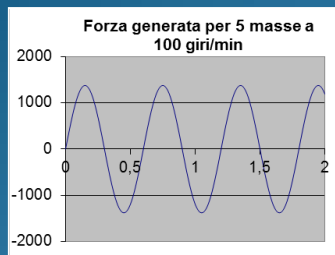
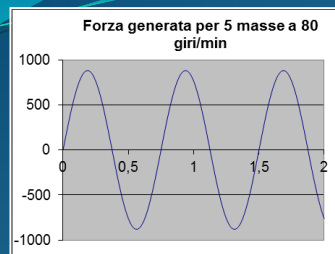
Vibrodina - Taratura della forzante armonica

Assenza di attività sperimentale in questo campo

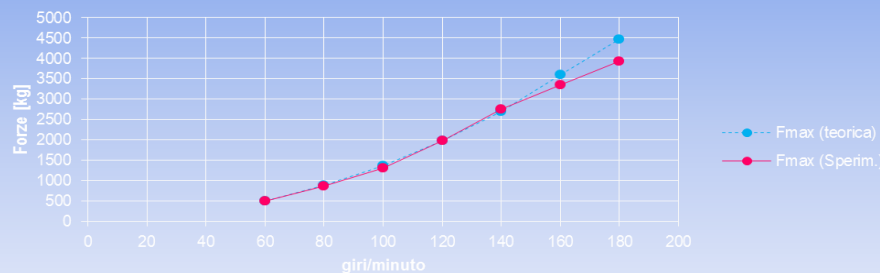


$$F_y(t) = 2 * m * r * \omega^2 * \sin \omega t$$

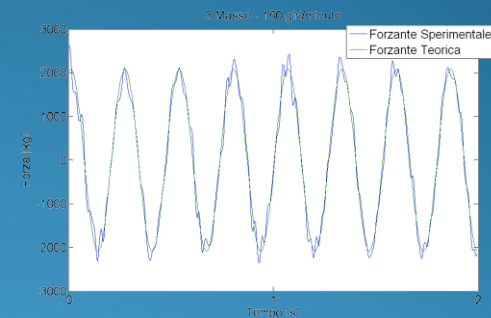
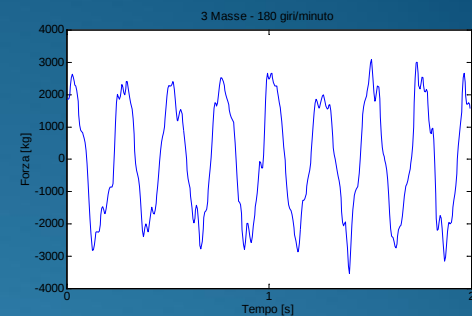
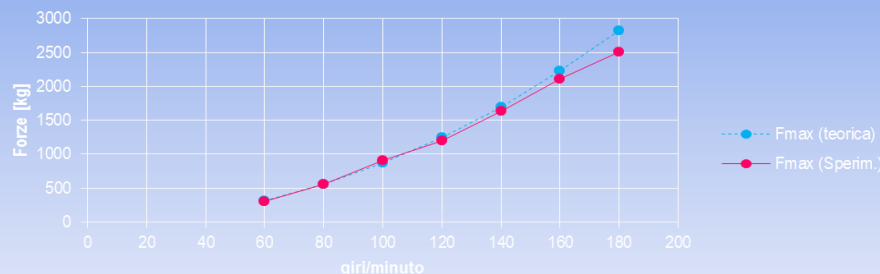
Vibrochina - Taratura della forzante armonica



Sperimentazione con 5 masse



Sperimentazione con 3 masse



- **Commento dei risultati ottenuti**
- Unico lavoro di questo genere, non è stato trovato alcun riferimento in letteratura
- Individuazione dei limiti e degli scostamenti della macchina dal funzionamento teorico
- Acquisizione risposta a tutte le frequenze e con diverse condizioni di carico delle masse per creare un database da cui estrarre le forzanti per inserimento in modelli FEM atti a simulare le prove dinamiche



Struttura in acciaio

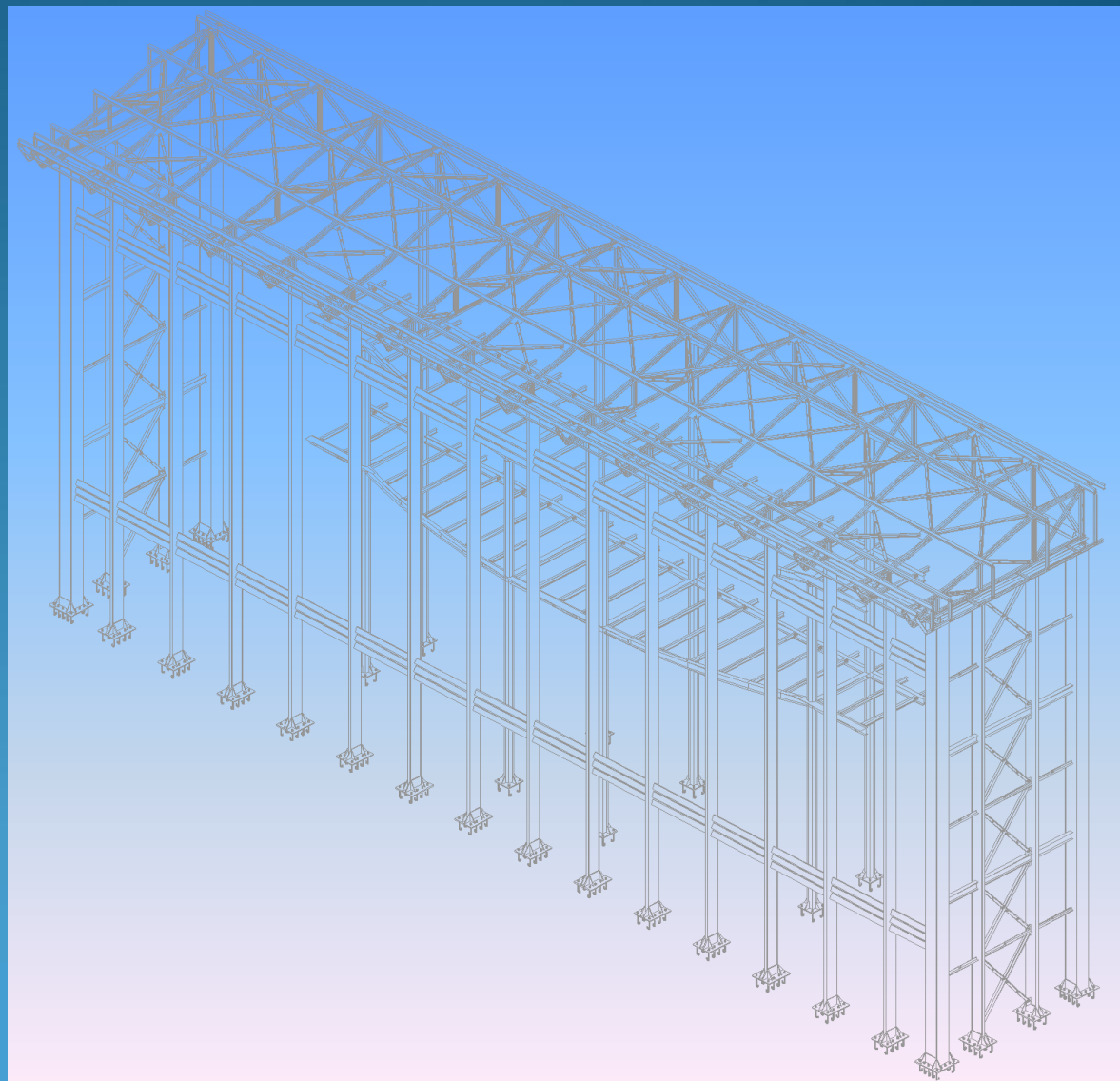
ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA VERIFICA DELLA FACCIATA VETRATA



Struttura in acciaio

ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA VERIFICA DELLA FACCIATA VETRATA

- Lunghezza (y) = 30m
- Lunghezza (x) = 6m
- Altezza = 24 m
- Colonne d'angolo 0.5x0.5 m
- Distanza tra le colonne di facciata <2m
- 2 impalcati interni
- Colonne posteriori tubolari



Struttura in acciaio

ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA VERIFICA DELLA FACCIATA VETRATA



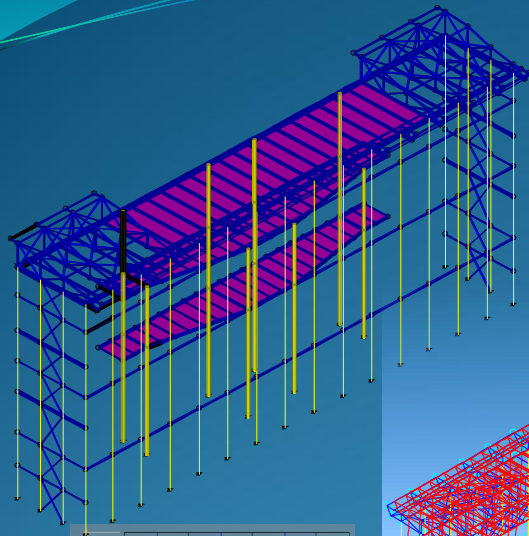
Struttura in acciaio

ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA VERIFICA DELLA FACCIATA VETRATA



● F_x, F_y

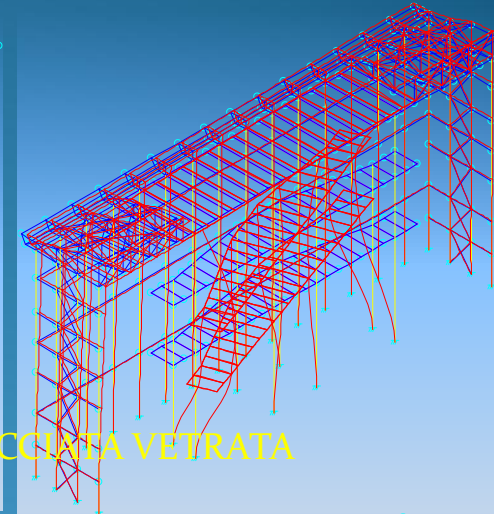
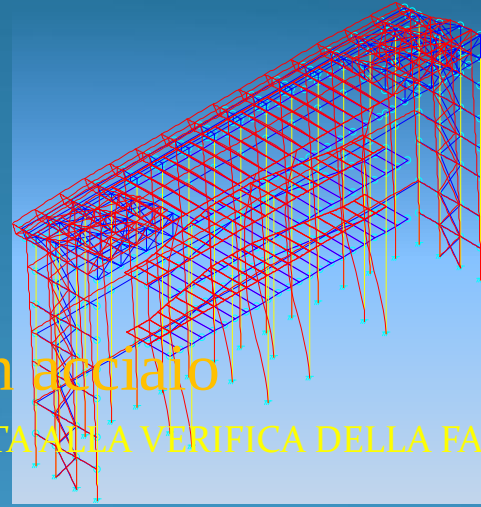
● F_y



- **Commento dei risultati ottenuti**
- Analisi di tipo time history
- Simulazione FEM della prova dinamica
- Sistema wireless copriva raggio di oltre 15 m.
- Calibrazione del modello di calcolo sulla base delle deformate modali riscontrate sperimentalmente

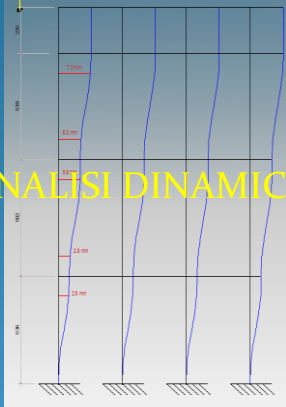
FEM

- Elementi monodimensionali
- Assenza di impalcato rigido
- Analisi dinamica lineare (*)
- Materiale elastico lineare
- Winstrand (Enxsys)

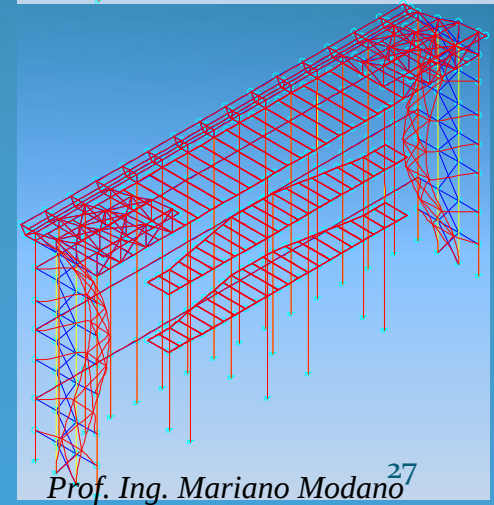
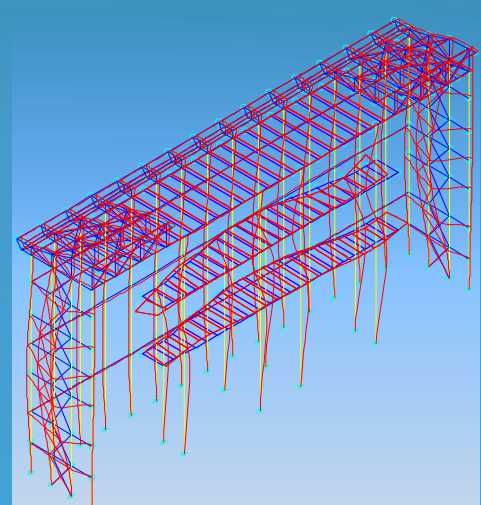
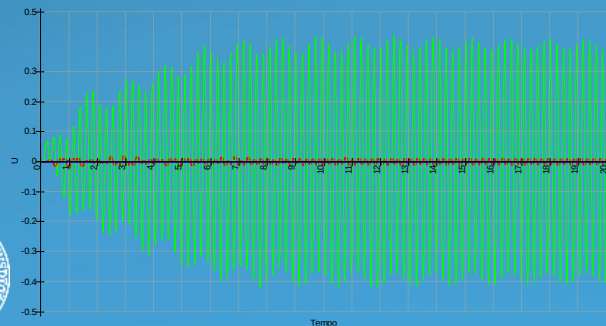


Struttura in acciaio

ANALISI DINAMICA Sperimentale FINALIZZATA ALLA VERIFICA DELLA FACCIA VETRATA



Modal deformations for the firsts three principle periods
 $T=1,35s$ $T=0,82s$ $T=0,73s$



Convenzione di Studio e Ricerca tra Dipartimento Ingegneria Strutturale e Presud Acanfora Srl:

“Analisi della risposta strutturale di pannelli portanti con struttura mista acciaio-clt e caratterizzazione del comportamento dinamico del sistema di prefabbricazione brevettato dalla Pre.Sud Acanfora srl” – Maggio Ottobre 2012

La struttura è costituita da 2 impalcati (piano rialzato e primo piano), con un'area complessiva di mq 220,25 ed un'altezza totale di m 8,60.

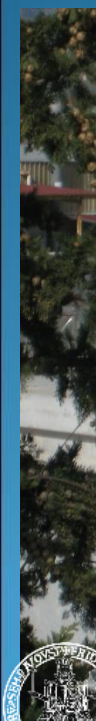
È composta da:

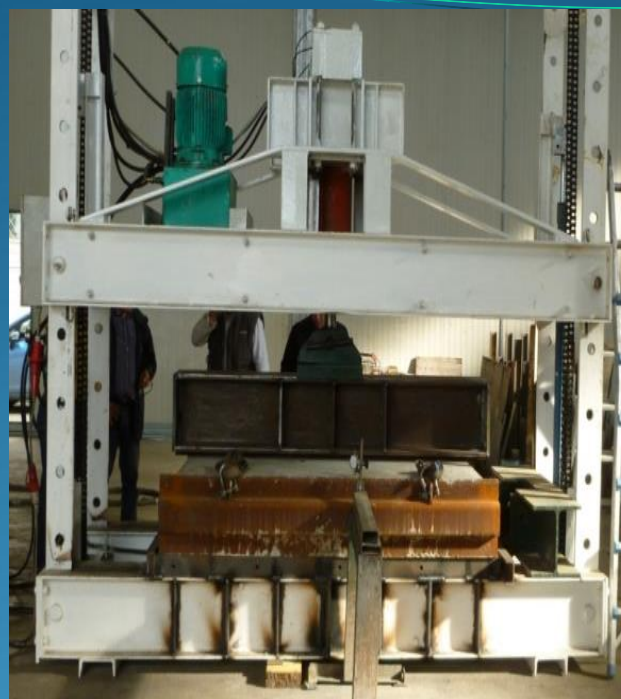
- plinti e travi di fondazione;
- solai;
- pannelli portanti;
- tetto.



Struttura prefabbricata – sistema innovativo brevettato

Ad ogni trave c'è un completo sistema di bullonati del primo livello che arrivano fino alla sommità della parete al livello superiore in modo da garantire un completo assemblaggio della struttura e nei canali lasciati liberi tra i pannelli contigui del primo livello. I cavi sono

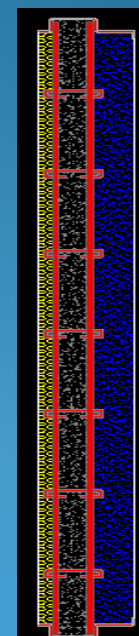




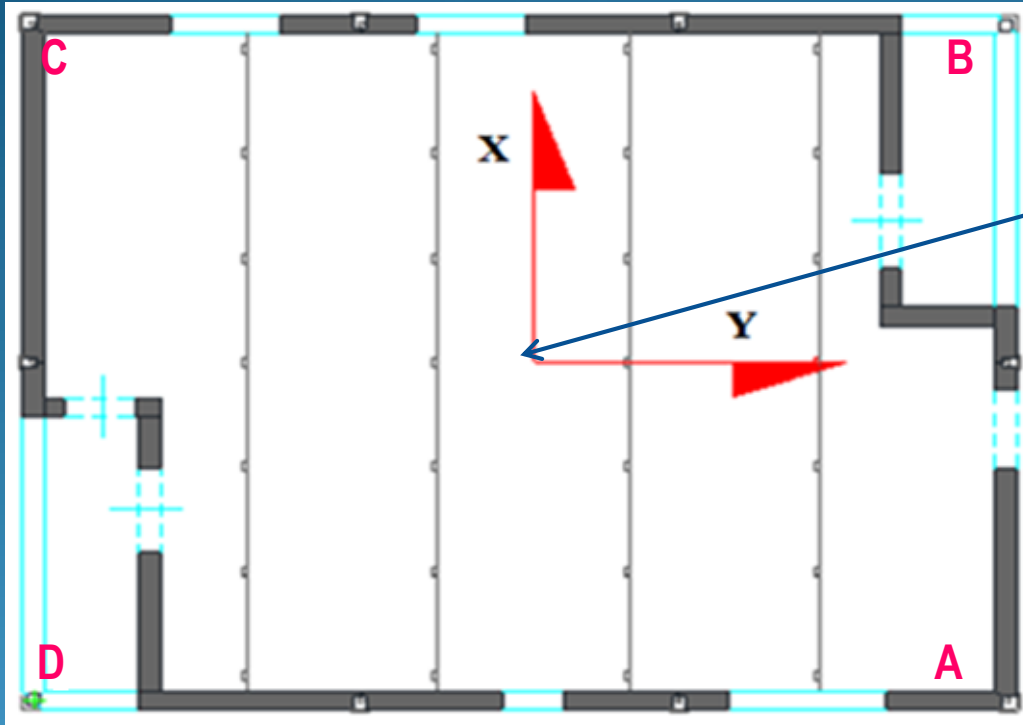
Prove statiche su macroelementi finalizzate ad individuare le sollecitazioni di progetto

*Prove a flessione pannello fuori piano
Prove a taglio pannello nel piano
Prove dinamiche con vibrodina
Modellazione FEM e calibrazione modello
Analisi dinamica Time History per simulazione test dinamici
Individuazione spessori equivalenti*

*Modello FEM
Assenza di impalcato rigido
Materiale elastico lineare
Winstrand (Enexsys)*



La struttura è sottoposta a prove dinamiche fissando la vibrodina sul solaio del secondo livello, mediante un sistema di piastre e tirafondi, prima in **direzione x** (lato più corto) e poi in **direzione y** (lato più lungo) in modo da ottenere un effetto forzante nelle due diverse direzioni.



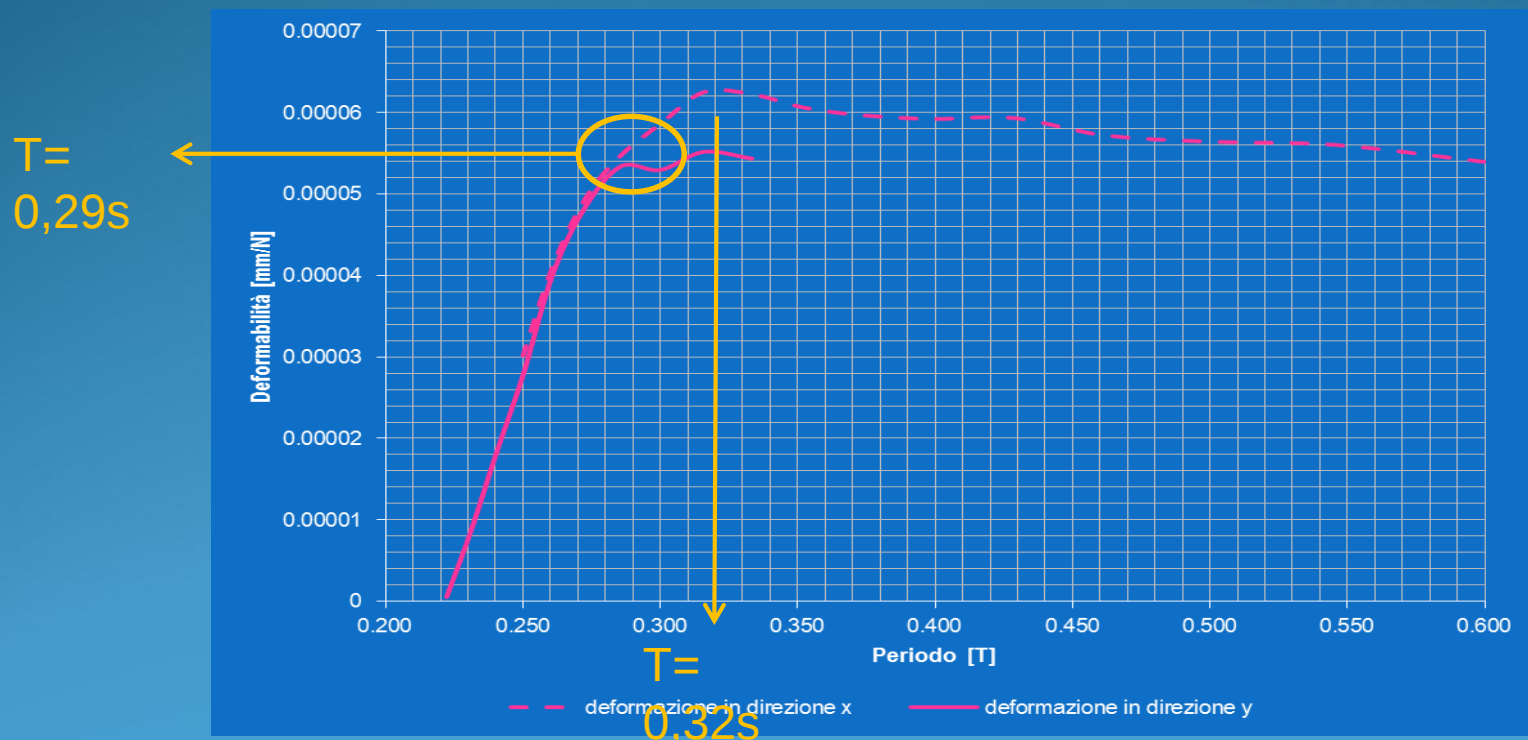
Le misurazioni di accelerazioni, velocità e spostamenti avvengono grazie a quattro **accelerometri** collocati nei quattro angoli del secondo impalcato.

Struttura prefabbricata – sistema innovativo brevettato

I dati sono influenzati dal valore della forzante e, quindi, da essi non sono deducibili i periodi propri della struttura che possono essere maggiori o uguali a quelli registrati. È necessario depurare i risultati dalle forzanti indotte dalla vibrodina. A tale scopo si effettua il rapporto:

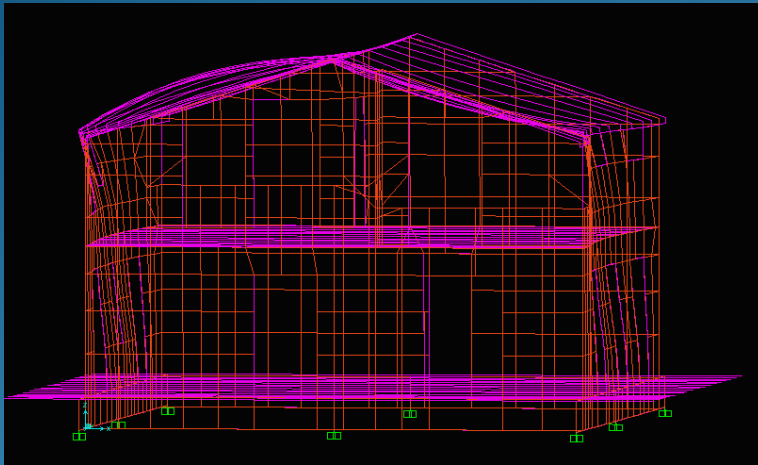
spostamenti
forzanti sviluppate

DEFORMABILITÀ
STRUTTURALE

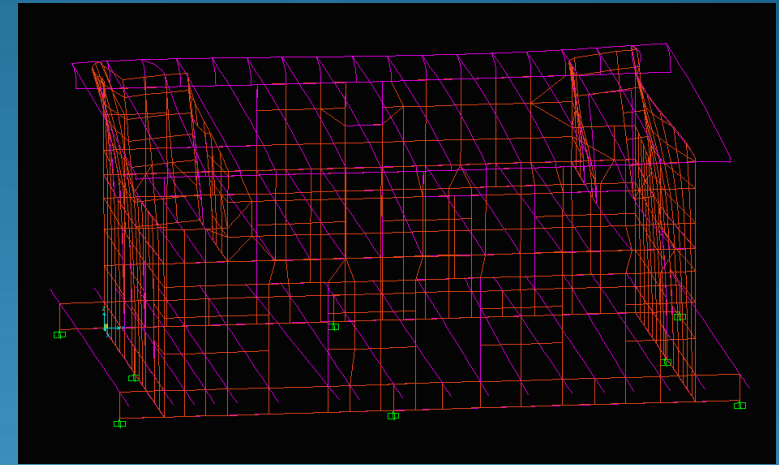


SPESSORI EQUIVALENTI E MODI DI VIBRARE

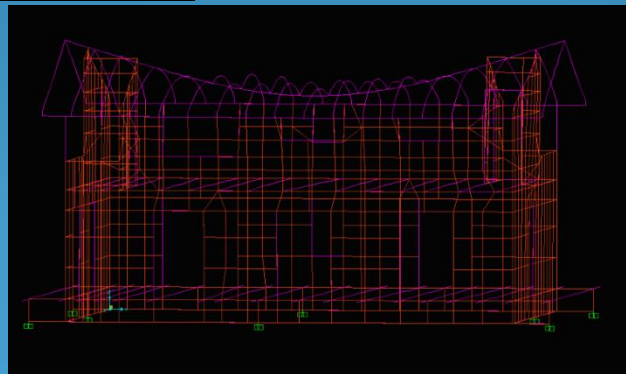
Procedendo per tentativi ed utilizzando per la modellazione delle **pareti** il cls **C35/45** (presente nello strato interno del pannello) si ricava uno **spessore equivalente** per la **parete inferiore** pari a **8,7 cm** ed uno per quella **superiore** pari a **7,2 cm**.



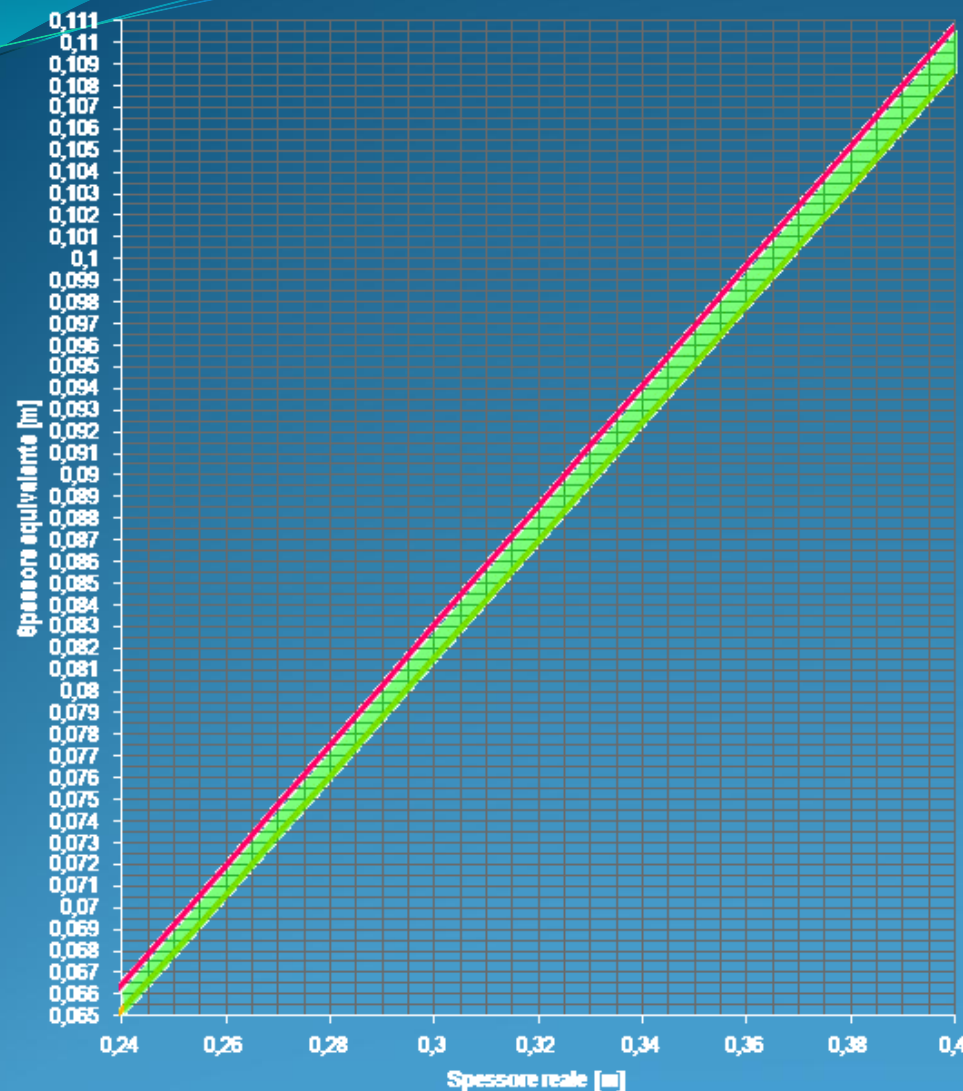
Primo modo in
direzione x (periodo
 $T = 0,322$ sec)



Terzo modo in direzione y
(periodo $T = 0,286$ sec)



Secondo modo in
direzione y
(periodo $T = 0,309$ sec)



— Trasformazione rispetto alla parete inferiore
 — Trasformazione rispetto alla parete superiore

La retta di trasformazione rispetto alla parete superiore è ottenuta moltiplicando il “coefficiente di conversione” della parete superiore per gli spessori reali utilizzabili nella pratica:

Allo stesso modo si ottiene la retta di trasformazione della parete inferiore

- **Commento dei risultati ottenuti**
- Con le analisi di tipo time history è stato calibrato il modello ottenendo periodi e spostamenti uguali al modello sperimentale
- E' stato proposto e testato una procedura di modellazione della struttura in fase di progettazione:
- Sono stati individuate le sollecitazioni di design ai fini del deposito della struttura al Genio Civile ;
- Sono stati individuati i limiti costruttivi e le altezze massime in zona sismica realizzabili con tale tecnologia
- **LA STRUTTURA E' STATA PROGETTATA E REALIZZATA CON DEPOSITO E AUTORIZZAZIONE SISMICA DEL GENIO CIVILE DI MANTOVA**

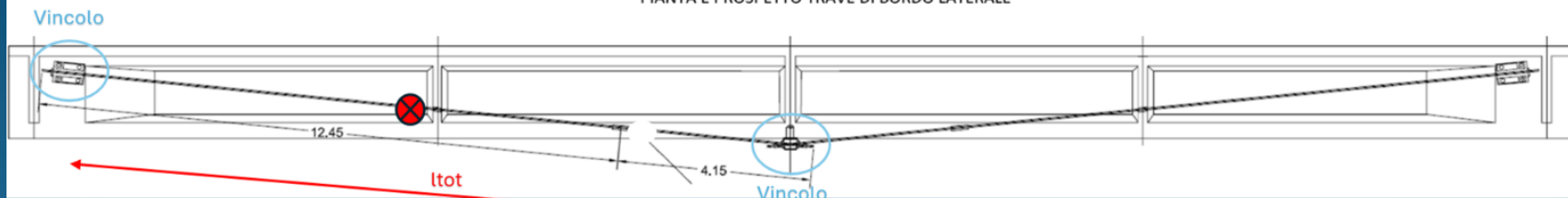
Prove vibrazionali

ANALISI FINALIZZATA ALLA DETERMINAZIONE DELLO STATO DI PRECOMPRESSIONE



Prove vibrazionali

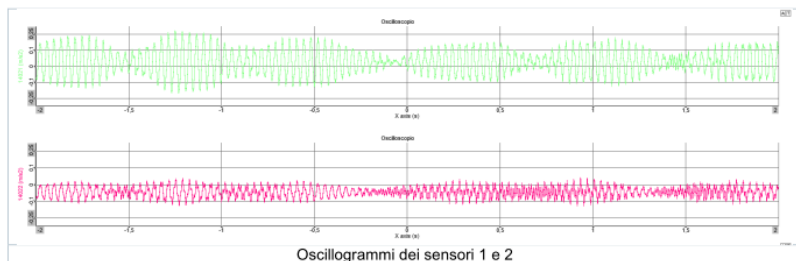
PIANTA E PROSPETTO TRAVE DI BORDO LATERALE



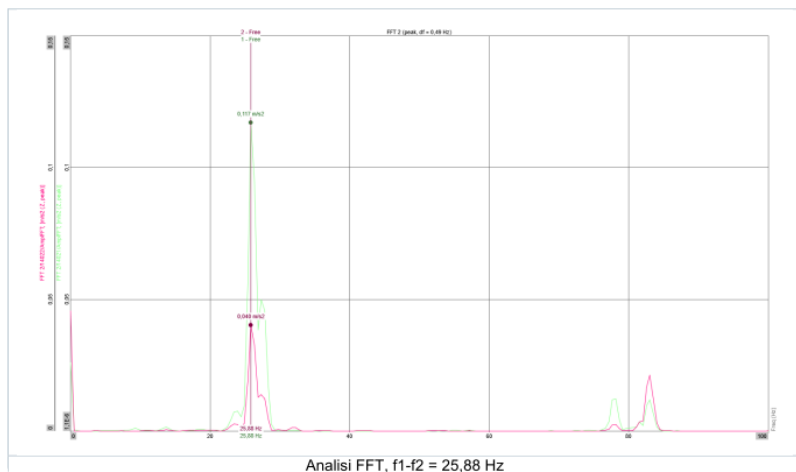
Prova dinamica PRV7
 Trave D, lato esterno. N.2 coppie di accelerometri, in mezzeria del segmento centrale e in mezzeria del segmento vicino alla pila 1
 rif. rapporto di prova n. 25CP0000607

Mezzeria del segmento vicino alla pila 1
 2,85 m dall'inizio del trefolo vicino la pila 1

specificare acquisizione in contemporanea come per PRV1



Oscillogrammi dei sensori 1 e 2



Analisi FFT, f1-f2 = 25,88 Hz



$$f_0 = \frac{1}{2L} \sqrt{\frac{T}{\mu}}$$

Conclusioni

Il monitoraggio strutturale rappresenta uno strumento fondamentale per garantire la sicurezza, l'affidabilità e la durata delle opere ingegneristiche. Attraverso l'utilizzo di tecnologie avanzate e sistemi di rilevamento in tempo reale, è possibile ottenere dati essenziali per la valutazione dello stato di salute delle strutture.

I principali vantaggi del monitoraggio strutturale includono:

- **Prevenzione dei rischi:** la capacità di individuare anomalie o degradi prima che possano compromettere la sicurezza.
- **Ottimizzazione della manutenzione:** permette di pianificare interventi mirati, riducendo i costi e i tempi di fermo delle strutture.
- **Prolungamento della vita utile:** l'analisi continua delle condizioni consente di adottare strategie per preservare le prestazioni delle strutture nel tempo.
- **Riduzione dei costi complessivi:** intervenire in modo predittivo e non reattivo limita le spese straordinarie e prolunga l'efficienza delle opere.

GRAZIE PER L'ATTENZIONE

Mariano Modano