



**ESSEBI Srl**

Monitoraggi e diagnostica strutturale



www.ingegneriromani.it

**Ingegneri Romani**

info@ingegneriromani.it



# RISPOSTA SISMICA DELLE STRUTTURE ANALISI MODALE SPERIMENTALE

Ing. Giorgio Sforza

Essebi srl – Viale G.Agricola 130 (Rm)

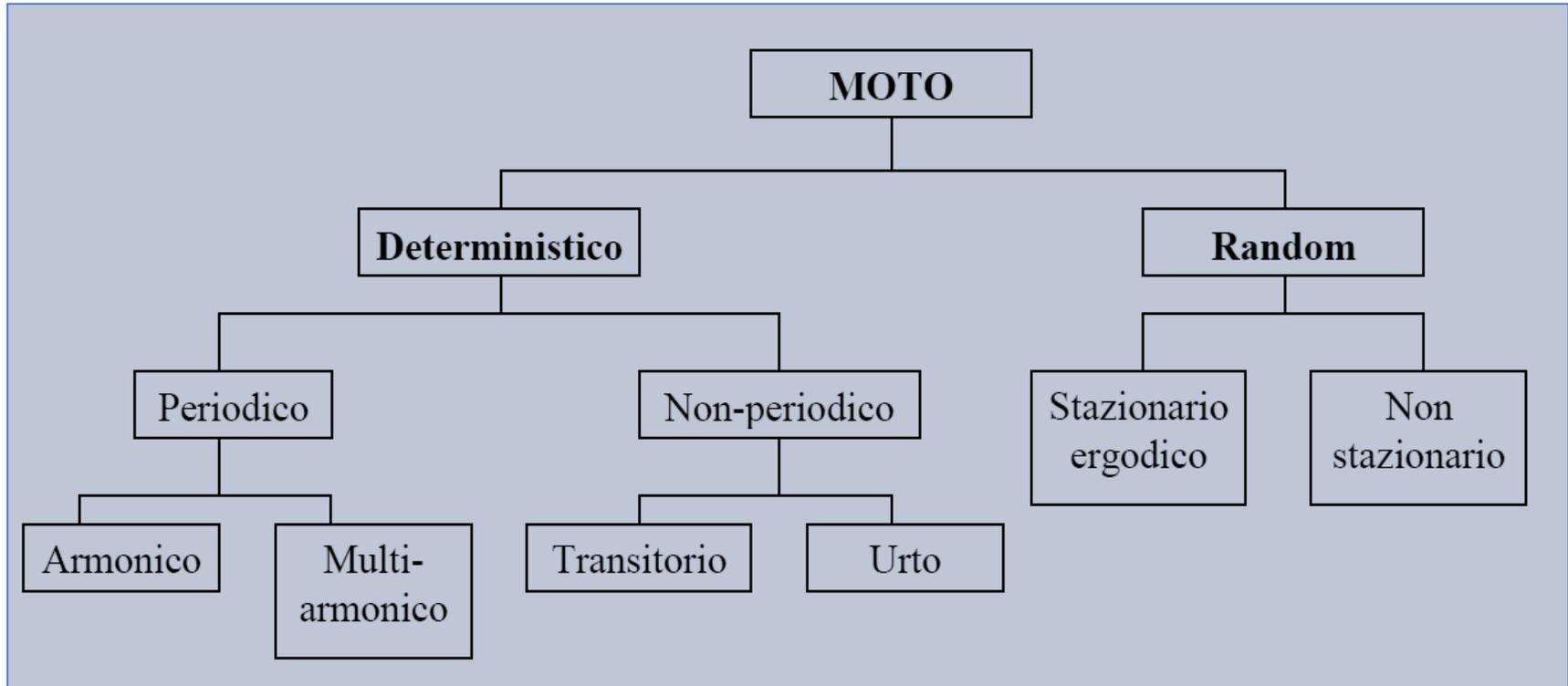
[www.essebiweb.it](http://www.essebiweb.it)



Roma, 20 giugno 2015



# FENOMENI VIBRATORI



Un corpo vibra quando descrive intorno ad una posizione di riferimento un moto oscillatorio i cui parametri (ampiezza, valore medio, etc.) non sono in generale costanti nel tempo.

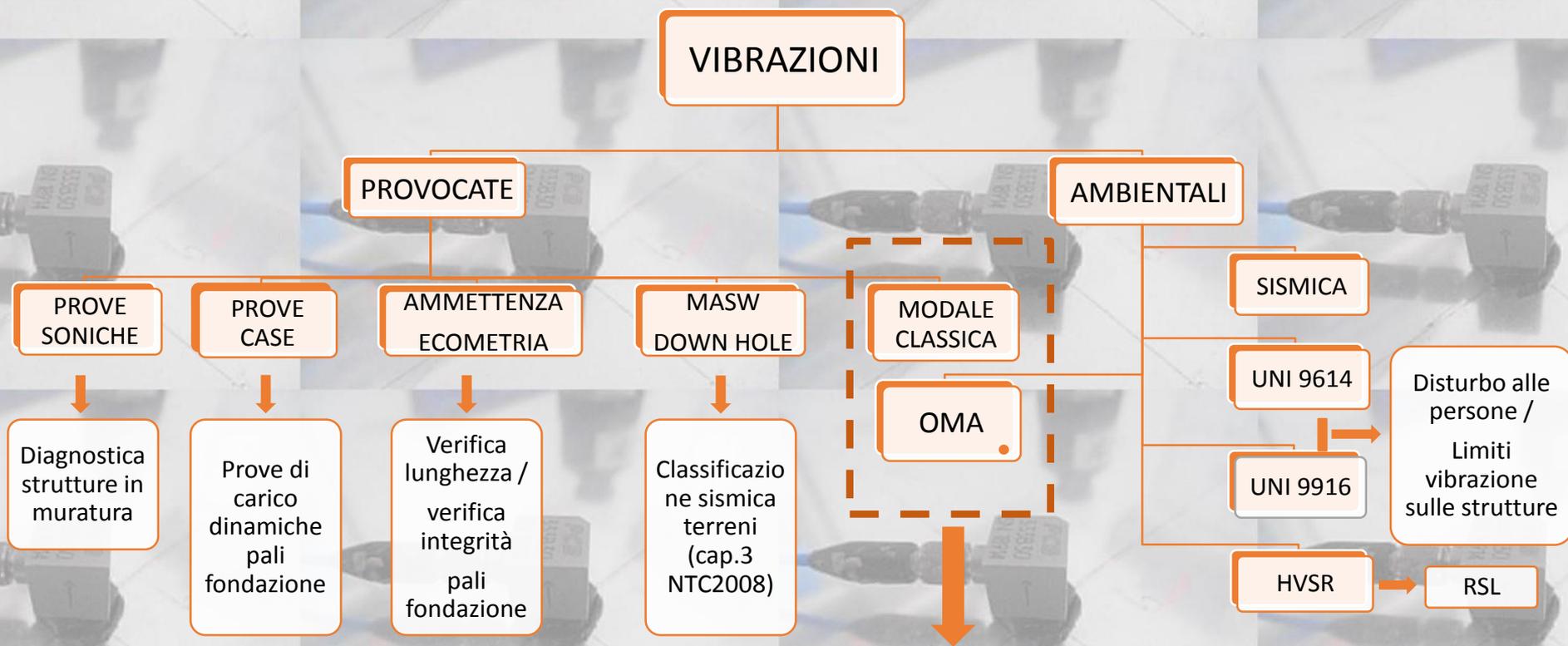
**Moto deterministico:** la natura di una vibrazione può essere prevedibile a partire dalla conoscenza di precedenti ricorrenze;

**Moto random:** il fenomeno è caratterizzato dall'avere solamente alcune proprietà che seguono leggi statistiche.



# CLASSIFICAZIONE DELLE VIBRAZIONI

Nell'ambito dell'ingegneria civile la misura dei fenomeni vibratorii trova applicazione nei seguenti ambiti a carattere strutturale e geotecnico. La macro distinzione riguarda l'origine della sorgente vibratoria ovvero se provocata volutamente o se di origine ambientale



## MODAL TESTING

TECNICA SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA DETERMINAZIONE DELLE CARATTERISTICHE DINAMICHE MODALI DI UNA STRUTTURA

**Frequenze proprie di vibrazione // Deformate modali // Coefficienti di smorzamento**

**EMA (Experimental Modal Analysis)**  
Eccitazione vibratoria imposta

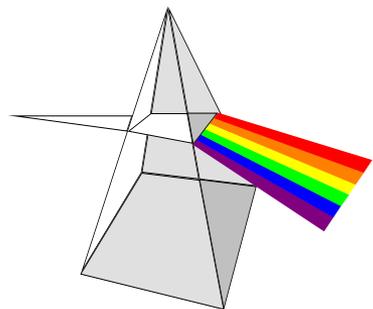


**OMA (Operational Modal Analysis)**  
Eccitazione vibratoria ambientale



# FENOMENI VIBRATORI

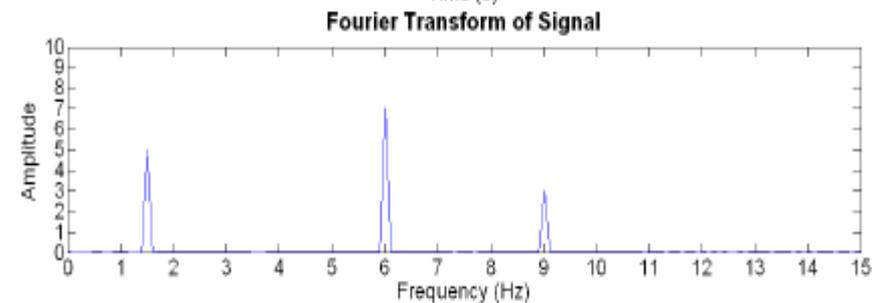
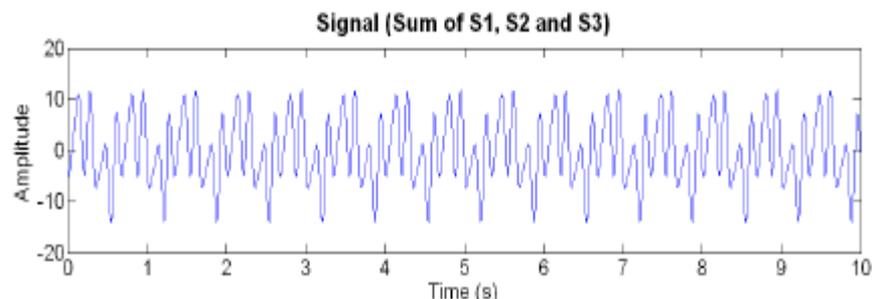
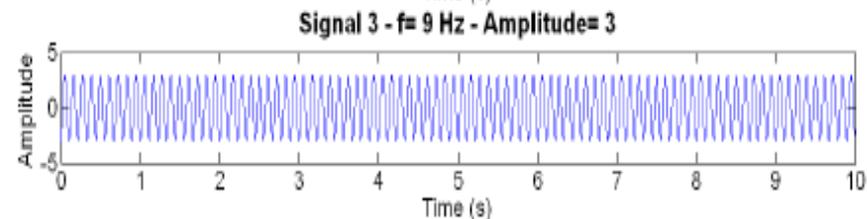
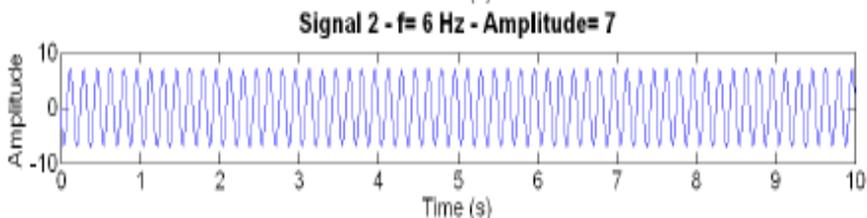
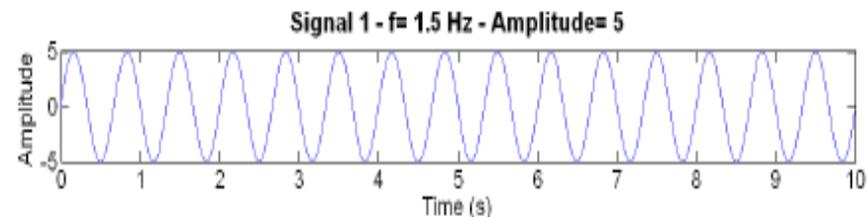
IN MANIERA ANALOGA A COME UN PRISMA SEPARA LA LUCE BIANCA NEI COLORI FONDAMENTALI, COSÌ UN QUALSIASI SEGNALE PUÒ ESSERE SEPARATO NELLE SUE COMPONENTI PIÙ SEMPLICI.



**Dominio del  
Tempo**



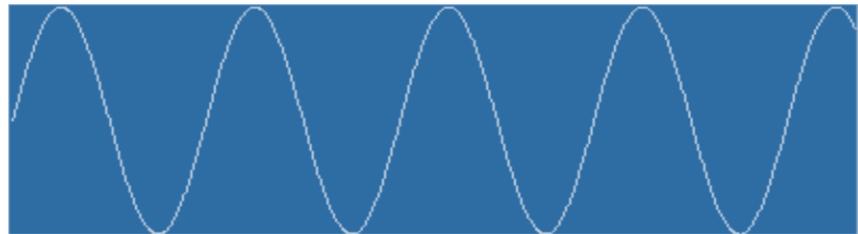
**Dominio delle  
Frequenze**



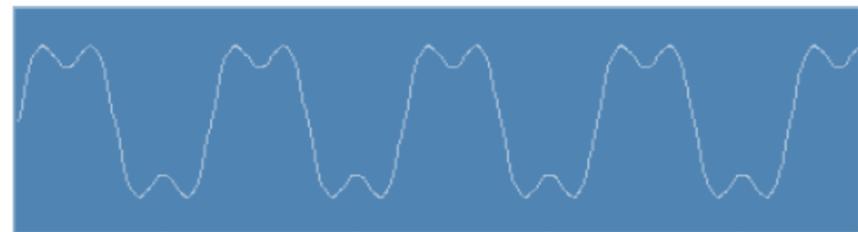


# ONDA QUADRA

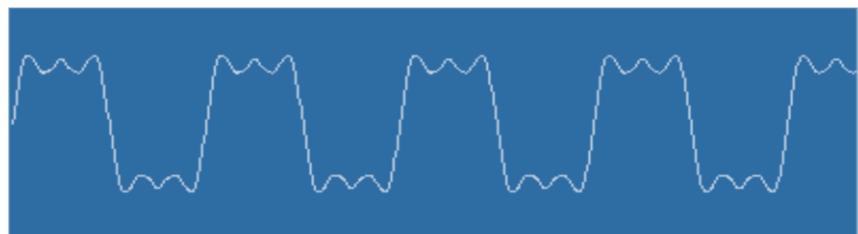
ONDA DI PARTENZA



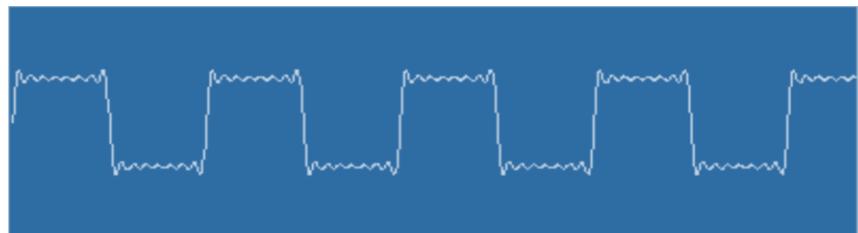
AGGIUNTA DI UNA SECONDA FREQUENZA DI AMPIEZZA  $1/3$   
DELL'ONDA BASE E CON FREQUENZA 3 VOLTE MAGGIORE



AGGIUNTA DI UNA TERZA FREQUENZA DI AMPIEZZA  $1/5$   
DELL'ONDA BASE E CON FREQUENZA 5 VOLTE MAGGIORE



PROCEDENDO FINO ALLA QUINDICESIMA ARMONICA SI  
OTTIENE LA SEGUENTE FORMA D'ONDA



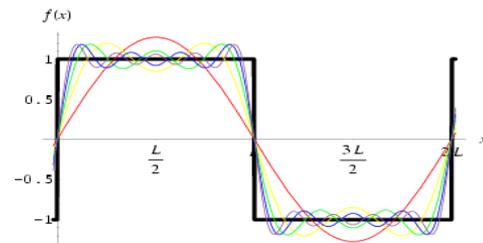


# ANALISI DI FOURIER

La trasformata di Fourier permette di calcolare le diverse componenti (ampiezza, fase e frequenza) delle onde sinusoidali che, sommate tra loro, danno origine al segnale di partenza.

$$x(t) = \frac{1}{2}a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos \omega_n t + b_n \sin \omega_n t) \quad \text{dove} \quad \omega_n = \frac{2\pi n}{T}$$

SERIE DI FOURIER

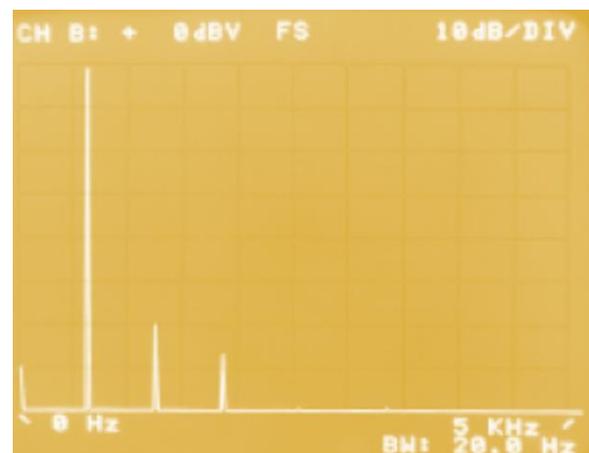
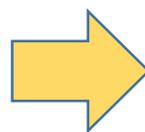
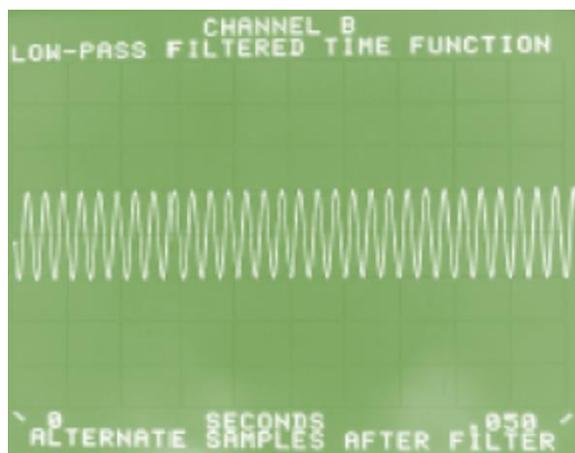


$$x(t) = \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{i\omega t} d\omega \quad \text{dove} \quad X(\omega) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) e^{-i\omega t} dt$$

TRASFORMATA DI FOURIER

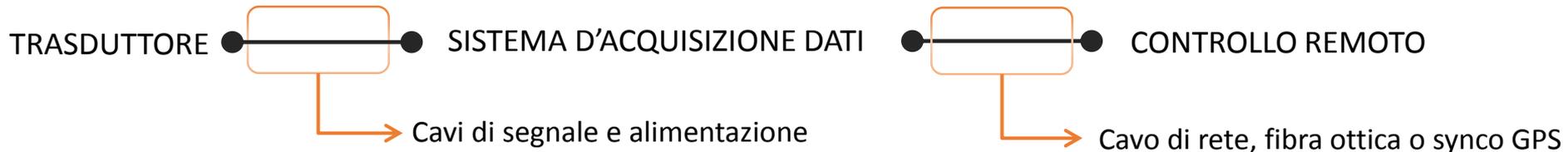
$$x(t_k) \equiv (x_k) = \sum_{n=0}^{N-1} X_n e^{\frac{2\pi i n k}{N}} \quad \text{dove} \quad X_n = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N x_k e^{-\frac{2\pi i n k}{N}}, \quad n = 1, N$$

TRASFORMATA DISCRETA DI FOURIER





# CATENA DI MISURA



ELEVATO NUMERO DI  
SENSORI A DISTANZA



DUE O PIÙ **SISTEMI DI ACQUISIZIONE** CON SINCRONIZZAZIONE SU  
TEMPO ASSOLUTO PER CAMPIONAMENTO DATI SIMULTANEO



UTILIZZANDO UN UNICO SISTEMA DI ACQUISIZIONE SAREBBERO NECESSARI LUNGHI CAVI CON  
CONSEQUENTE PERDITA DI QUALITÀ NEL SEGNALE E DIFFICOLTÀ DI INSTALLAZIONE.



# LMS SCADAS MOBILE 1/2



**Power Module:**  
Power managements, AC: 110/220V  
DC: 9-36V, Internal battery (4 hours)

**Controller module:**  
Synchronization of modules, Communication with front-end via LAN, 2 DAC outputs, 2 Tacho inputs incl. signal conditioning, Optional: GPS; memory stick

**Input modules with integrated signal conditioning:**  
4 - 40 channels (more with master/slave); AC/DC, ICP, Microphone, Bridge, Charge, 24bit ADC, 128 dB dynamic range, Low noise, Low power, Plug & play - Smart modules

## Eight-channel Voltage / ICP input module (V8-E)

- Single-ended input via BNC or high quality CAMAC connectors
- Voltage and ICP modes selectable per channel
- Analog anti-alias and digital re-sampling filter
- 24-bit  $\Sigma\Delta$  ADC with up to 204.8kHz sampling frequency
- Alias free bandwidth of 92kHz
- 150 dB dynamic range to eliminate range setting
- ICP sensor supply (2.7mA), cable check with LED indication
- AC coupling 0.5Hz or 7Hz high pass filter
- TEDS smart sensor support according to IEEE 1451.4
- Input range up to  $\pm 10V$
- Including appropriate set of cable adapters



*Lo **Spurious Dynamic Range** si riferisce ad una valutazione nel dominio delle frequenze e rappresenta il rapporto tra il massimo valore in tensione e qualsiasi altra componente spettrale spuria, relativamente ad una definita larghezza di banda (20 kHz).*

Il **range dinamico SDR** pari a **150 dB** elimina la necessità di dover ricorrere a alla scelta del range di misura (impostabile da un massimo di  $\pm 10 V$  ad un minimo  $\pm 316 mV$ ).

Spesso si fa riferimento al range dinamico **SNR (Signal to Noise Ratio)** riferito al dominio del tempo ed inteso più come quantitativo energetico del rumore piuttosto che la sua distribuzione spettrale. Per lo strumento in oggetto assume valori massimi di **115 dB**.



*Altro parametro significativo è l'**ODR (Overall Dynamic Range)** che fornisce una valutazione globale in quanto è rappresentato dal rapporto tra il massimo e il minimo segnale che può essere misurato in corrispondenza a tutti i range di input, nel nostro caso pari a **178 dB**.*



# LMS SCADAS MOBILE 2/2

L'acquisitore **SCADAS MOBILE** è progettato per costituire un sistema *embedded* consentendo l'acquisizione senza bisogno di pc esterno.

I parametri di misura (configurazione dei canali, frequenza di campionamento, durata dell'acquisizione ecc..) sono direttamente programmabili su piattaforma software esterna e salvati su scheda *compact flash* dedicata.

Il controllo in campo avviene mediante palmare con connessione *bluetooth*.

Il sistema è dotato di batteria con autonomia di ca. 2 h in modalità *stand alone*.

SCHEDA COMPACT FLASH



ACQUISIZIONE SU ESTRADOSSO  
TEGOLO DI COPERTURA



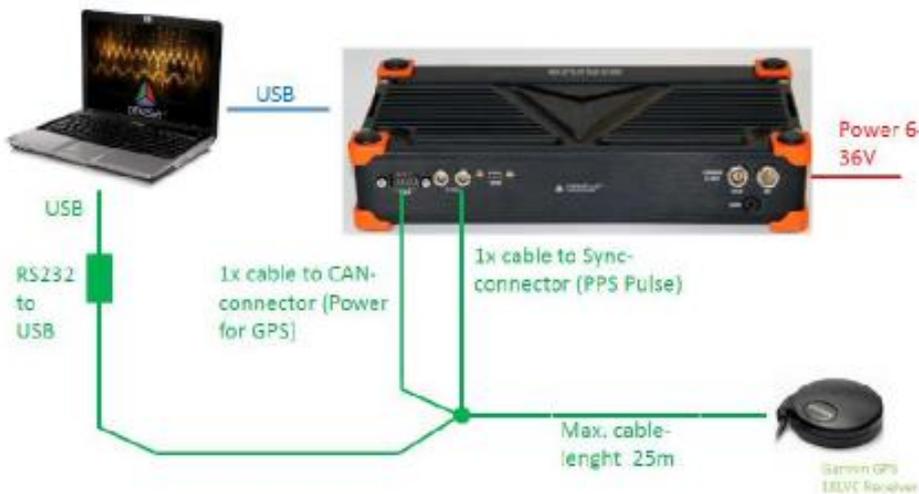
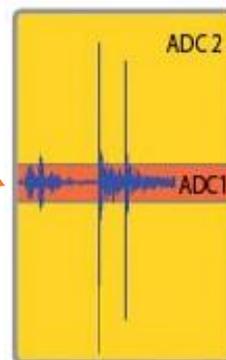
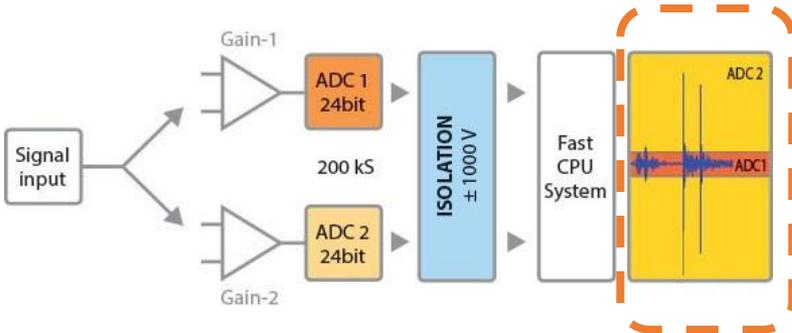
# DEWESOFT SIRIUS ACC8

## Dinamica a 160 dB !

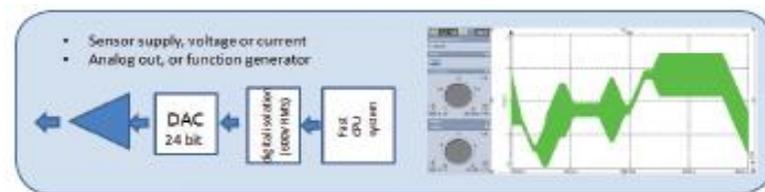


QUESTA NUOVA TECNOLOGIA, **DEWESOFT DUAL ADC NUCLEO**, RISOLVE IL PROBLEMA DI INDAGARE APPIENO IN TUTTO IL CAMPO DI MISURA, IN QUANTO IL SEGNALE È MISURATO CONTEMPORANEAMENTE CON UN BASSO ED ALTO GUADAGNO (DUAL CORE). L'UTILIZZATORE NON DEVE PIÙ PREOCCUPARSI DI IMPOSTARE LA GAMMA.

SIRIUS module types	SIRIUS <sup>i</sup> ACC 8	
No of channels	8	
Data rates / channels [Hz]	200 k	
Vertical resolution	2 * 24 bit	
Isolation voltage [V]	1 kV	
<b>Input types</b>		
U	<b>Voltage</b>	8 ch
	<b>Max. range</b>	± 10 V ± 500 mV auto range
	<b>Input coupling</b>	DC, AC 1 Hz
-	<b>IEPE/ICP Sensors</b>	8 ch
	<b>Sensor (excitation) supply per channel</b>	4 or 8 mA, max 25 V



Il Dewesoft SIRIUS, fornisce uscite analogiche e funzioni matematiche aggiuntive. Consente inoltre di generare (o impiegare) un segnale esterno da dare in pasto ad uno shecker per riprodurre condizioni dinamiche particolari ed effettuare analisi modali classiche.





# SAMPLING

E' LA COSIDDETTA DISCRETIZZAZIONE DEI TEMPI CHE CONSISTE NEL MISURARE L'AMPIEZZA DEL SEGNALE ANALOGICO AD INTERVALLI DI TEMPO FISSATI PER OTTENERE LA RICOSTRUZIONE E DIGITALIZZAZIONE DEL SEGNALE.

ETTORE GENERATO DALLA DISCRETIZZAZIONE

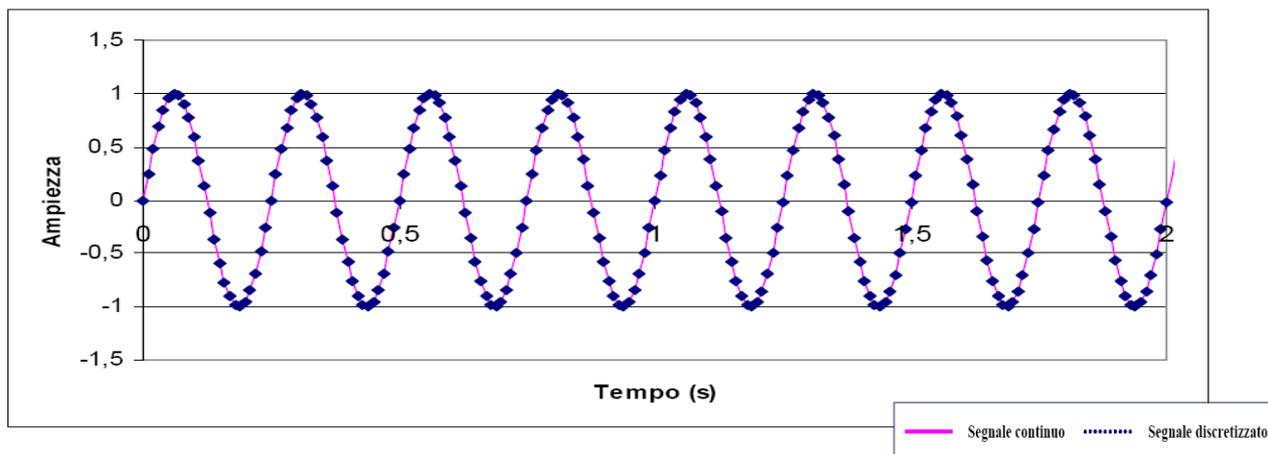
$$X_n = X(n \cdot \Delta T)$$

INTERVALLO DI TEMPO

## SHANNON

Il teorema del campionamento stabilisce che per ricostruire il contenuto in frequenza di un segnale, la frequenza di campionamento deve essere almeno il doppio della più alta frequenza contenuta nel segnale

Deve essere sufficientemente piccolo da poter individuare minime variazioni di segnale



$$f_s = \frac{1}{\Delta T}$$

**frequenza di CAMPIONAMENTO**

$$f_N = \frac{f_s}{2}$$

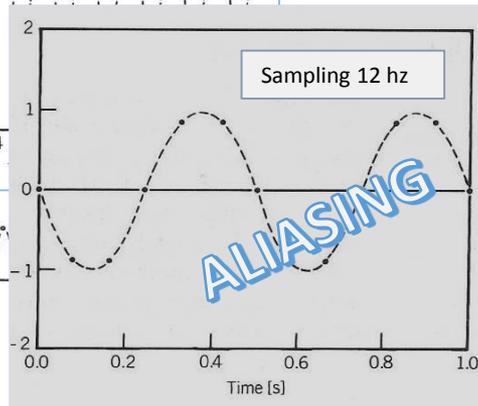
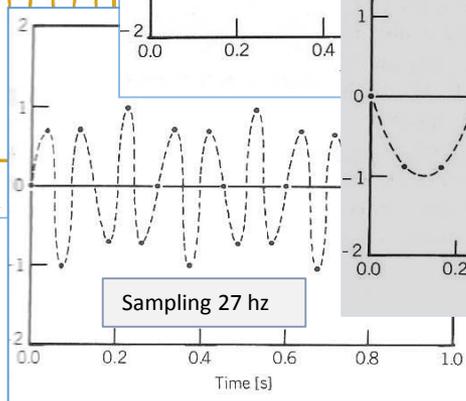
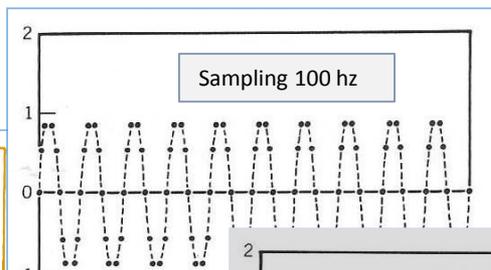
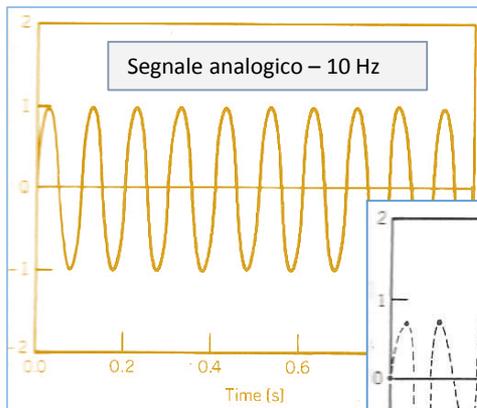
**frequenza di NYQUIST : massima frequenza campionabile senza errore**



# ALIASING

QUANDO UN SEGNALE E' CAMPIONATO AD UN RATE INFERIORE A  $2f_N$ , LE PIU' ALTE PREQUENZE CONTENUTE NEL SEGNALE ANALOGICO ASSUMERANNO UNA FALSA IDENTITA' APPARENDO COME FREQUENZE INFERIORI

$$\frac{1}{\Delta t} = f_s = 2f_N$$



$$y(t) = C \sin[2\pi ft + \Phi(f)]$$

$$y(r\Delta t) = C \sin[2\pi fr\Delta t + \Phi(f)] \quad r = 1, 2, \dots, N$$

$$\sin x = \sin(x + 2\pi q) \quad q = 0, 1, 2, \dots, N$$

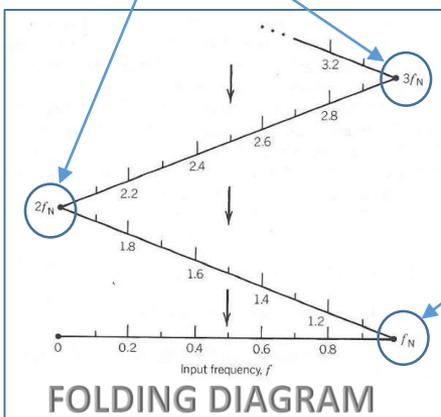
$$y(r\Delta t) = C \sin[2\pi fr\Delta t + 2\pi q + \Phi(f)] = C \sin[2\pi(f + \frac{q}{r\Delta t})r\Delta t + \Phi(f)]$$

ALIAS

Per ogni valore di  $\Delta t$ , indistinguibile da  $f$

IN ACCORDO AL TEOREMA DEL CAMPIONAMENTO, TUTTE LE FREQUENZE CON  $q/r \geq 0$  SARANNO ELIMINATE DAL SEGNALE CAMPIONATO ED ELIMINATA QUINDI L'AMBIGUITA' DI SEGNALE

Armoniche superiori



## ELIMINAZIONE ALIASING

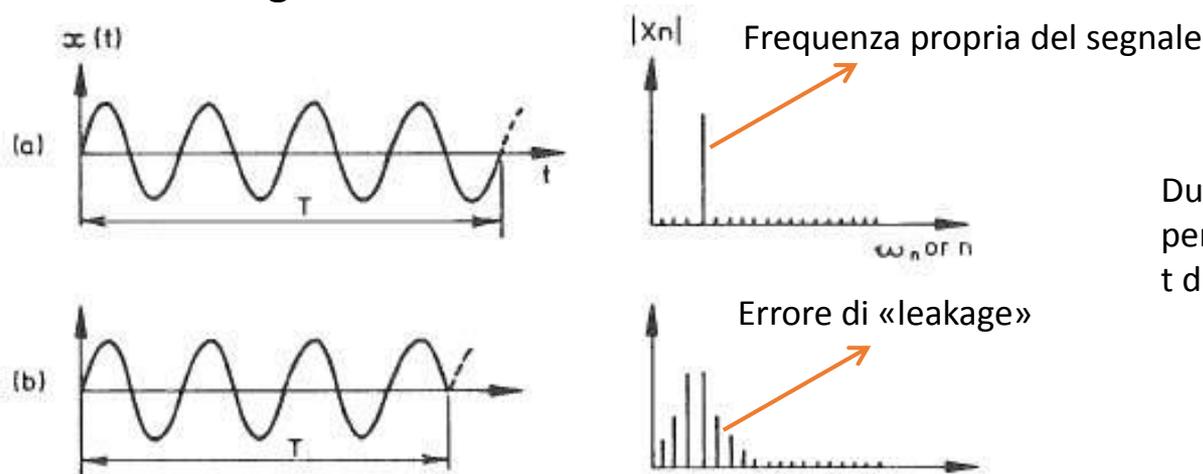
SCELTA LA FREQUENZA DI CAMPIONAMENTO, IN FUNZIONE DELLA FREQUENZA MASSIMA CONTENUTA NEL SEGNALE ANALOGICO, IL SEGNALE DEVE ESSERE FILTRATO (PASSA BASSO) ALLA FREQUENZA DI NYQUIST PRIMA DEL CAMPIONAMENTO



# LEAKAGE

Il leakage è una diretta conseguenza del fatto che il campionamento di un segnale avviene in un intervallo di tempo finito (porzione finita di una time history) e il taglio del segnale generalmente non corrisponde perfettamente con la periodicità del segnale.

La FFT del segnale così campionato presenta valori non nulli anche per valori di frequenza non contenuti nel segnale.



Due segnali sinusoidali con stesso periodo ma campionati con tempi  $t$  differenti.

Nel primo caso a) il segnale è campionato con un tempo perfettamente coincidente con il periodo  $T$ ; il risultante spettro (DFT) è semplicemente una linea in corrispondenza della frequenza dell'onda sinusoidale.

Nel secondo caso b), il segnale è campionato con un tempo non coincidente con il periodo  $T$  e pertanto il segnale campionato comporta la perdita di assunzione di periodicità. Come conseguenza, lo spettro risultante è individuato non dalla frequenza propria (caso a), ma da molteplici linee in cui si è dispersa «leaked» l'energia del segnale.

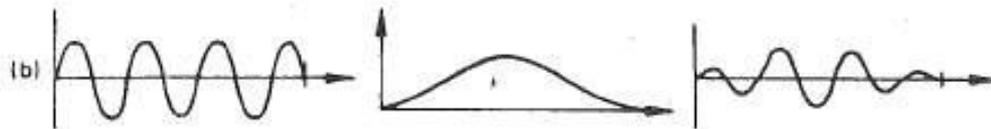
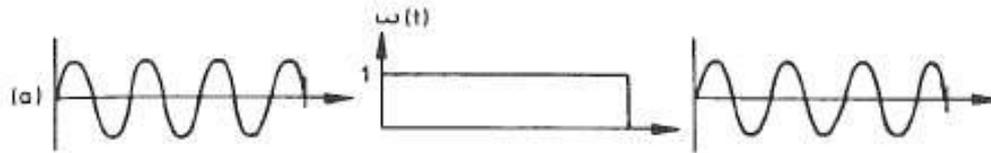


# WINDOWING

Poiché ogni segnale può essere espresso come una combinazione lineare di seni e coseni, il leakage si manifesta ogni volta che il segnale campionato contiene componenti in frequenza non periodiche.

La risoluzione del leakage si ottiene a mezzo di finestre (time windowing) di differente tipologia, a seconda della classe di problemi incontrati.

**BOX CAR**



**HANNING**

**COSINE TAPER**



**EXPONENTIAL**

La finestra comporta la ricalibrazione del segnale, nel dominio dei tempi, prima di procedere con l'analisi di Fourier. In ogni caso è sempre richiesta una riscalatura del segnale per compensare l'attenuazione a seguito della finestra



# FILTRI

Un filtro è un circuito che rimuove frequenze selezionate dal segnale di interesse. In condizioni ideali, il filtro non dovrebbe attenuare le frequenze desiderate, mentre l'attenuazione dovrebbe essere infinita per quelle indesiderate.

$$dB = 20 \log_{10} \frac{N_1}{N_2}$$

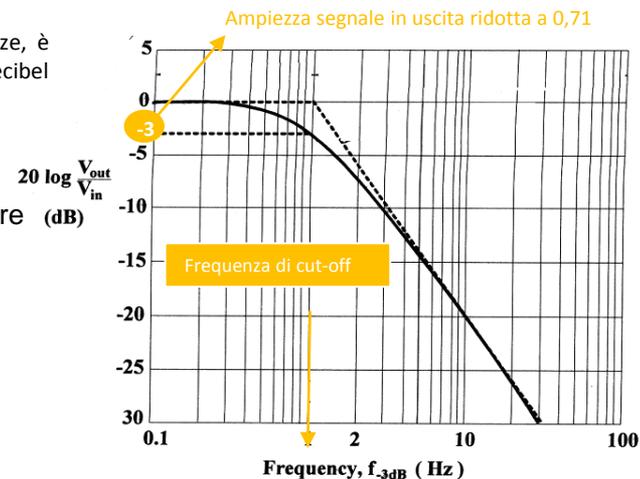
Dato che i filtri coprono molti ordini di grandezza di frequenze e ampiezze, è comune descriverne le caratteristiche usando una scala logaritmica. I decibel permettono di stabilire i rapporti tra due grandezze

Si assume che i rapporti in dB siano sempre relativi a energie o potenze, anche partendo da altre (dB) grandezze da cui energie e potenze dipendono non linearmente.

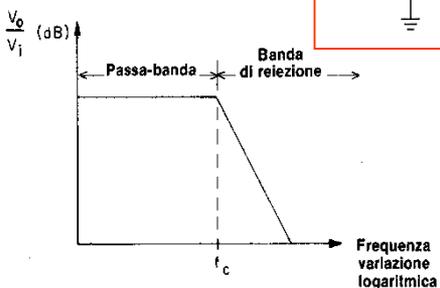
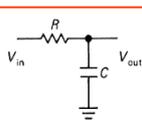
$$dB = 10 \log_{10} \frac{P_1}{P_2} = 10 \log_{10} \frac{V_1^2}{V_2^2} = 20 \log_{10} \frac{V_1}{V_2}$$

Potenze

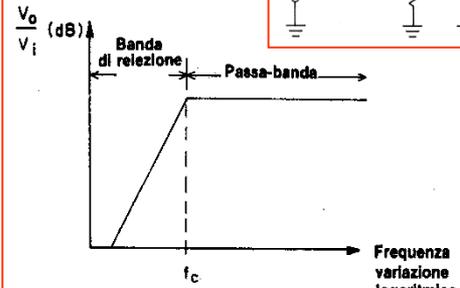
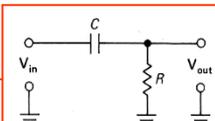
Tensioni proporzionali alle ampiezze delle accelerazioni



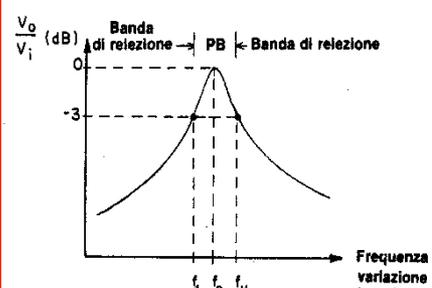
## LOW PASS



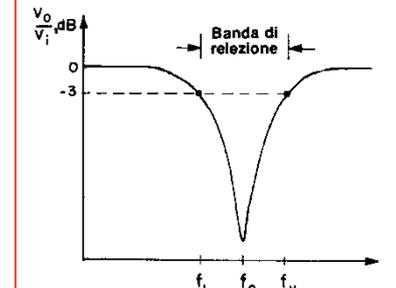
## HIGH PASS



## BAND PASS



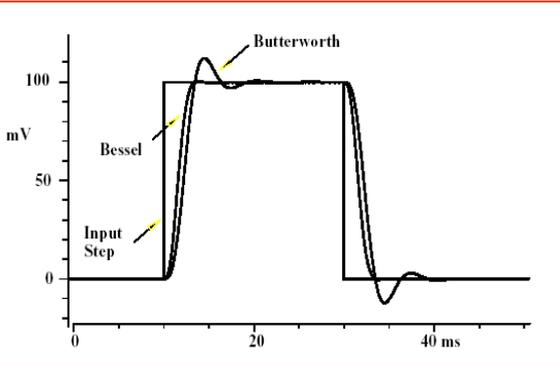
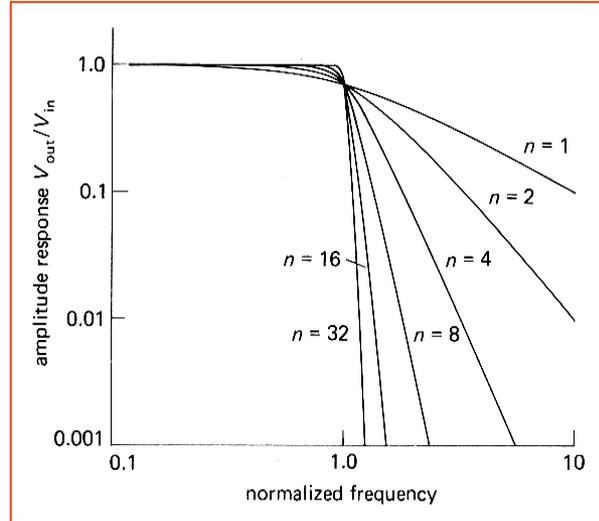
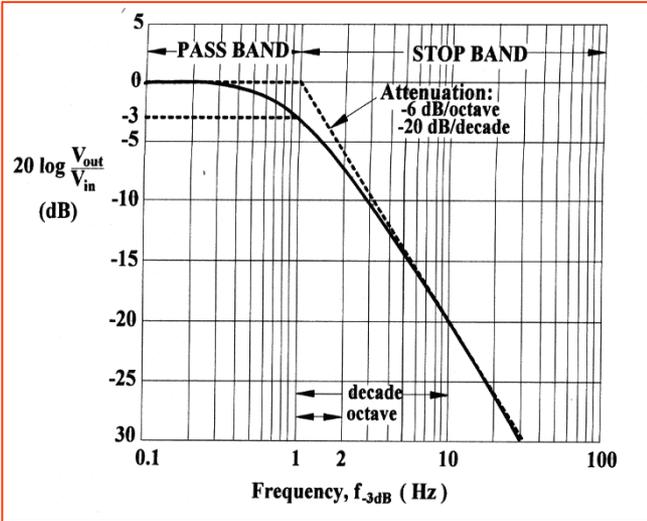
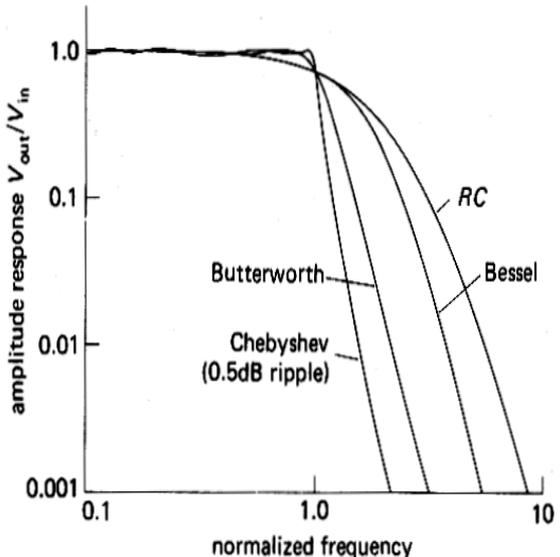
## NOTCH



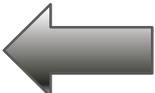


# TIPI DI FILTRO

Poli	Ordine	Pendenze (slope)	
1 polo	1° ordine	6 dB/ottava	20 dB/decade
2 poli	2° ordine	12 dB/ottava	40 dB/decade
4 poli	4° ordine	24 dB/ottava	80 dB/decade
8 poli	8° ordine	48 dB/ottava	160 dB/decade



## OVERSHOOT



Quando lo spostamento di fase nella banda passante non è linearmente dipendente dalla frequenza della componente sinusoidale il segnale filtrato presenta overshoot. In questo caso la risposta ad un impulso rettangolare è distorta.



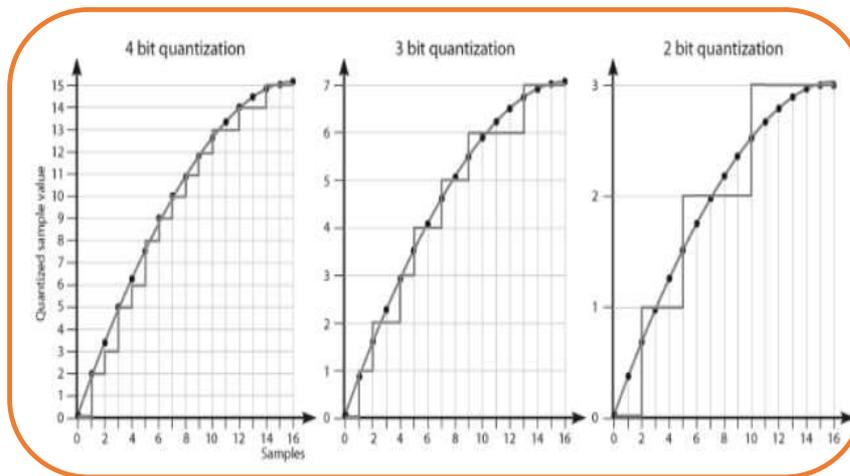
# QUANTIZZAZIONE

Segnale analogico  
(accelerogramma)



Acquisitore dinamico (A/D converter)

*Digitalizzazione del segnale*



$$SNR[db] = 20 \log_{10} 2^M$$

$$Q = \frac{E_{FSR}}{2^M}$$

**LSB**

1. Errore di quantizzazione
2. Errore di saturazione
3. Errore di conversione



**96 dB**

IMC 7800 i



**150 dB**

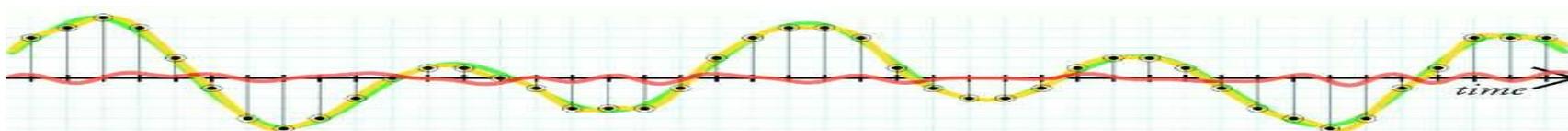
LMS SCADAS MOBILE



**160 dB**

DEWESORT SIRIUS

I TRE SISTEMI DI ACQUISIZIONE HANNO CARATTERISTICHE DIVERSE: OGNUNO SI CONTRADDISTINGUE PER PECULIARITA' SPECIFICHE





# TRASDUTTORI

CARATTERISTICHE ESSENZIALI DI UN TRASDUTTORE SONO:

- **Ampiezza** del segnale in uscita;
- **Accuratezza**, valutabile nel suo errore max (quello di linearità sul F.S.)
- **Risoluzione**, ovvero il minimo valore misurabile;
- **Velocità di risposta**, ovvero il tempo impiegato a fornire una risposta costante dopo una brusca variazione della grandezza da misurare.

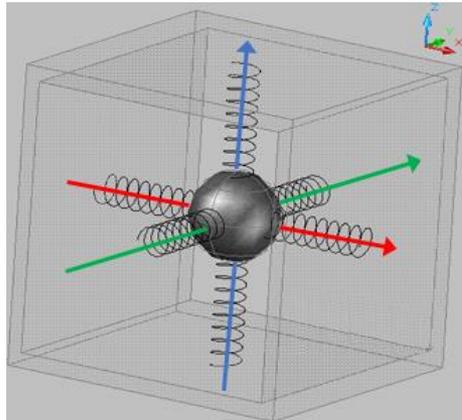




# TRASDUTTORE SISMICO

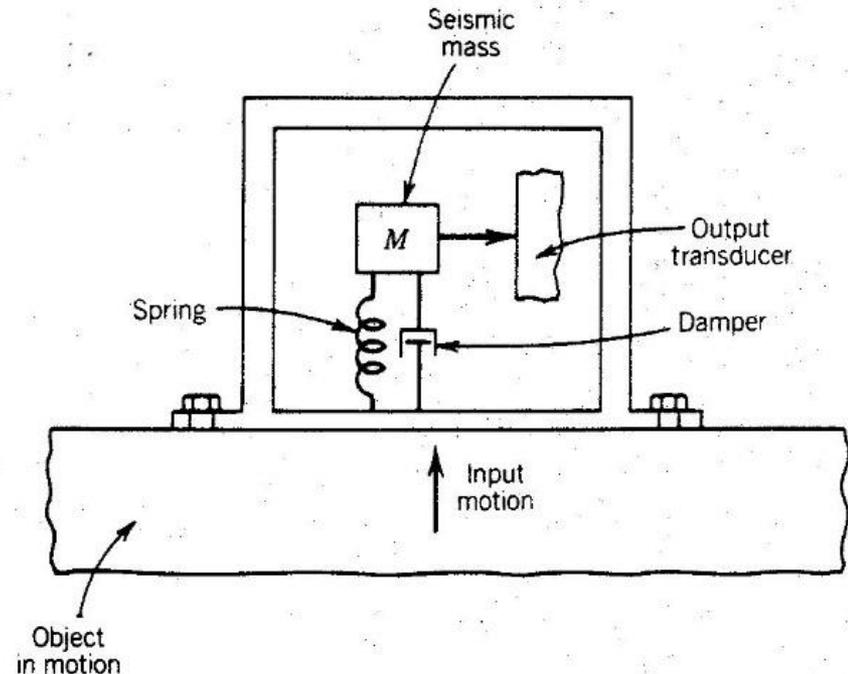
## VIBROMETRO

Se la frequenza di vibrazione aumenta molto, la massa tenderà a restare inerte: il movimento della cassa rispetto alla massa è quello rispetto ad un punto fisso. In tal caso lo strumento si comporta come un vibrometro ( $y_{rMax}$  circa uguale ad  $A$ ), ossia misura l'ampiezza delle oscillazioni.



## ACCELEROMETRO

Se invece la frequenza di vibrazione è inferiore alla frequenza propria del trasduttore lo spostamento relativo  $y_r$  risulta proporzionale all'accelerazione.

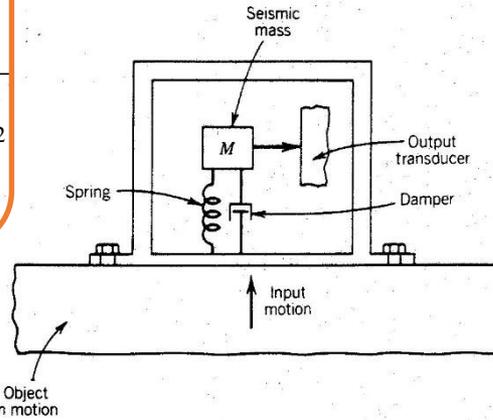
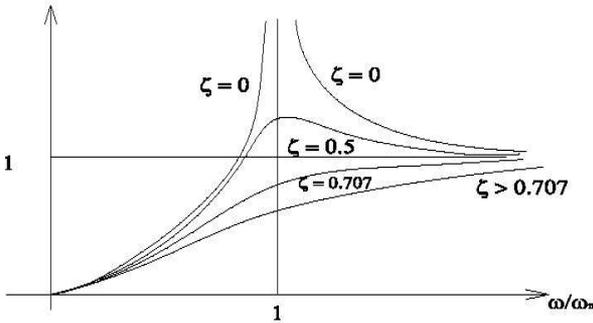




# TRASDUTTORE SISMICO

## VIBROMETRO

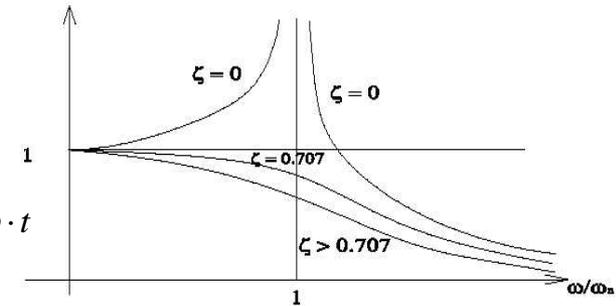
$$\frac{(y_r)_{Max}}{A} = \frac{(\omega/\omega_n)^2}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$



$$M \cdot \frac{d^2 y_r}{dt^2} + C \cdot \frac{dy_r}{dt} + K \cdot y_r = M \cdot A \cdot \omega^2 \sin \omega \cdot t$$

## ACCELEROMETRO

$$\frac{(y_r)_{Max}}{A_{acc}} = \frac{1}{\omega_n^2} \cdot \frac{1}{\sqrt{\left[1 - \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2\right]^2 + 4 \cdot \zeta^2 \cdot \left(\frac{\omega}{\omega_n}\right)^2}}$$



Quando  $\omega/\omega_n$  tende all'infinito,  $(y_r)_{Max}/A$  tende ad 1 il che conferma che, quando la frequenza dello strumento è molto bassa rispetto a quella di eccitazione, la massa  $M$  sta praticamente ferma ed esso si comporta come un **vibrometro** (misura cioè l'ampiezza).

**QUANDO LA FREQUENZA DA MISURARE È BASSA, RISPETTO A QUELLA PROPRIA DELLO STRUMENTO, SI È IN PRESENZA DI UN ACCELEROMETRO.**

Per  $\omega/\omega_n$  che tende a zero (ossia per frequenze di vibrazione molto piccole rispetto a quella propria dello strumento), il rapporto  $(y_r)_{Max}/A_{acc}$  tende all'unità, il che equivale a dire che lo spostamento massimo della massa rispetto alla cassa esterna è uguale all'ampiezza massima dell'accelerazione. Lo strumento si comporta come un **accelerometro**.

$$A_{acc} = -A \cdot \omega^2$$



# DEFINIZIONE DELLA GRANDEZZA DA MISURARE

L'ampiezza di vibrazione in termini di spostamento accentua le componenti a bassa frequenza rispetto a quelle ad alta frequenza. Viceversa, l'accelerazione enfatizza le componenti ad alta frequenza. Le tre curve coprono un intervallo di frequenza da 1 a 1000 Hz,

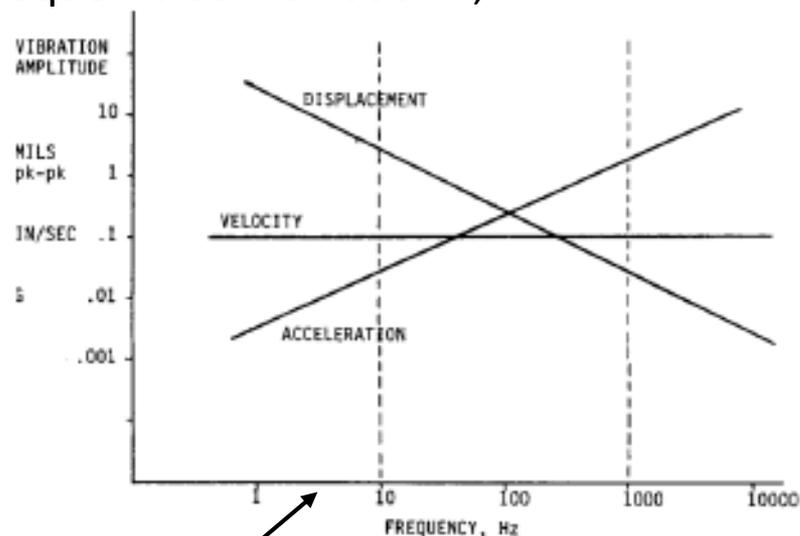
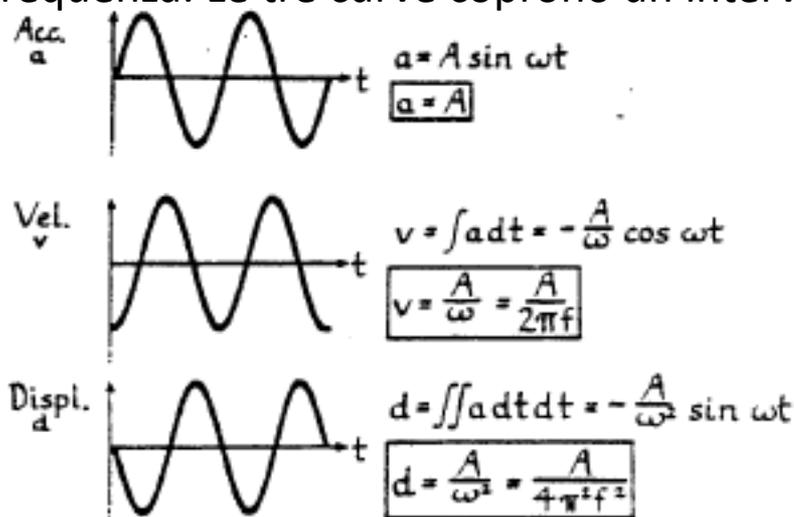


Grafico della velocità ad andamento costante per tutto lo spettro di frequenze, con le corrispondenti curve di spostamento e accelerazione.

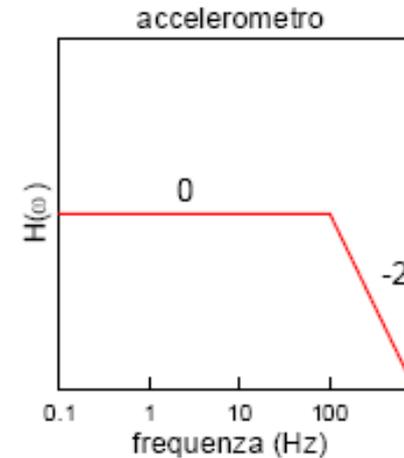
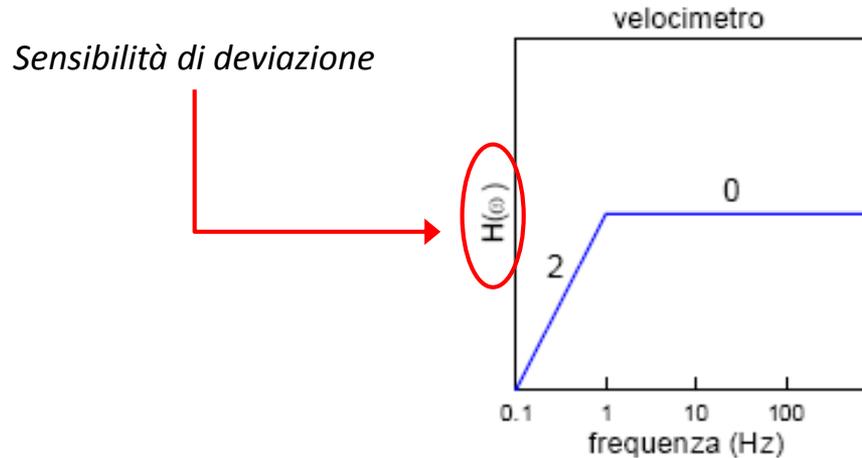
In relazione alle frequenze attese per il fenomeno indagato ed alle condizioni di prova (tipo di struttura, accessibilità, posizionamento dei sensori ecc..) è bene scegliere quale grandezza misurare in base alle caratteristiche proprie dei trasduttori disponibili .

Le normative ISO che valutano gli effetti delle vibrazioni sul corpo umano (ISO 2631-1 – Evaluation of human exposure to whole body vibration) o sul sistema mano-braccio (UNI EN ISO 5349-1 – Vibrazioni meccaniche - Misurazione e valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse alla mano) impongono la misura dell'accelerazione come grandezza di riferimento, rispettivamente nel range 0.5 ÷ 80 Hz nel caso del corpo intero e nel range 8 ÷ 1000 Hz per il sistema mano-braccio. La stima degli effetti delle vibrazioni sull'integrità strutturale degli edifici (UNI 9916:2004 – Criteri di misura e valutazione degli effetti delle vibrazioni sugli edifici) si basa invece sulla misura della velocità nell'intervallo di frequenza 1 ÷ 250 Hz.



# VELOCIMETRI O ACCELEROMETRI ?

RISPOSTA IN FREQUENZA DI UN VELOCIMETRO A 1 Hz E DI UN ACCELEROMETRO A 100 Hz



## VELOCIMETRO

- Banda passante: a partire da 0,7 Hz
- Frequenza propria bassa (< 1Hz)
- Sensibilità: 100 ÷ 1.000 V/(m/s)
- Massa inerziale: 5 ÷ 10 kg
- Strumento ingombrante
- Molle poco rigide
- Strumento pronto per frequenze superiori alla propria

## ACCELEROMETRO

- Scatola e massa ca. la stessa accelerazione
- Frequenza propria elevata (>1.000 Hz)
- Sensibilità: 1.000 ÷ 10.000 mV/g
- Piccole dimensioni
- Molle molto rigide
- Strumento pronto per frequenze inferiori alla propria



# TIPI DI ACCELEROMETRI

● **A VIBROMETRO RELATIVO (INDUTTIVO, CAPACITIVO, A POTENZIOMETRO)**

● **A DEFLESSIONE PIEZOELETTRICO**

È assente il vibrometro relativo; l'accelerazione della massa sospesa si traduce in una sollecitazione (e dunque in uno stato di deformazione) sul cristallo.

● **ICP**

INTEGRATED CIRCUIT PIEZOELECTRIC

● **CAPACITIVO**

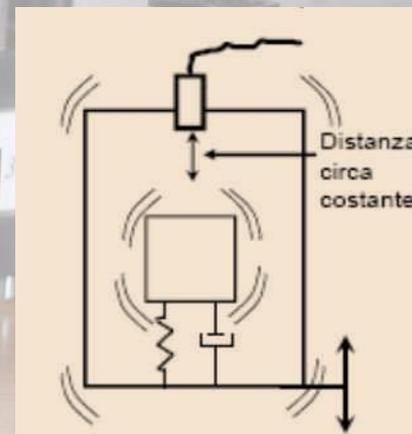
● **A ESTENSIMETRI**

● **SERVOACCELEROMETRO**

● **MEMS**

FORCE BALANCE O AD AZZERAMENTO

MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS





# ACCELEROMETRI PIEZOELETTRICI



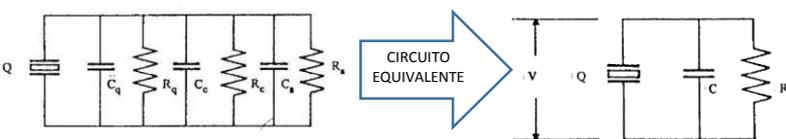
## PIEZOELETTRICITA'

Separazione e quindi accumulo di cariche elettriche positive e negative sulle opposte facce di un reticolo cristallino quando esso è sottoposto all'azione di una forza esterna.

$$V = d_{ij} \cdot \frac{F}{C} = d_{ij} \cdot \frac{m \cdot d \cdot a}{\epsilon \cdot S}$$

La catena di misura è detta ad alta impedenza poiché l'amplificatore per potere rilevare la differenza di potenziale prima che il condensatore (il cristallo) si scarichi deve avere una impedenza d'ingresso del primo stadio dello stesso ordine di grandezza dell'impedenza di uscita del cristallo (>10 G).

## ACCELEROMETRO PIEZOELETTRICO CON USCITA IN CARICA

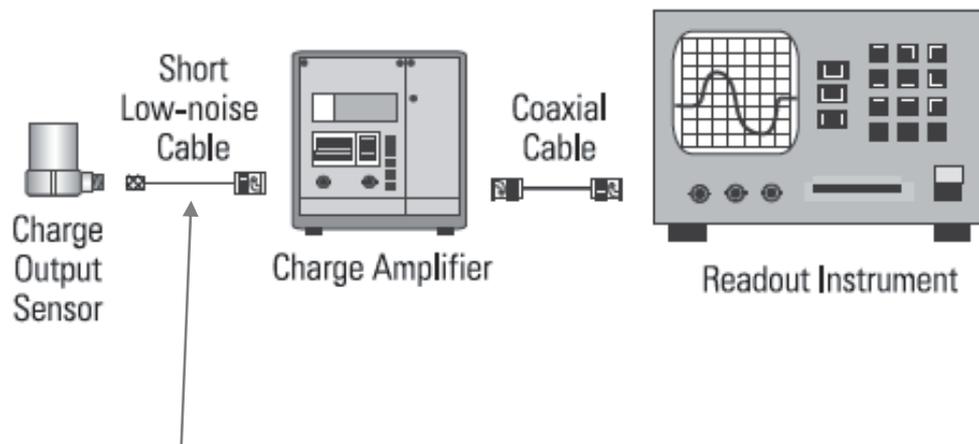


$$C = C_q + C_c + C_a$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_q} + \frac{1}{R_c} + \frac{1}{R_a}$$

$$V = V_0 e^{-\frac{t}{RC}}$$

Se il prodotto  $RC$  non è molto maggiore del periodo del segnale da misurare, il condensatore si scarica, rendendo impossibile o falsando la misura. Poiché il cavo ed i suoi connettori hanno una capacità finita, piccola e variabile con la lunghezza del cavo stesso, è indispensabile che l'impedenza d'ingresso dell'amplificatore sia la più elevata possibile.

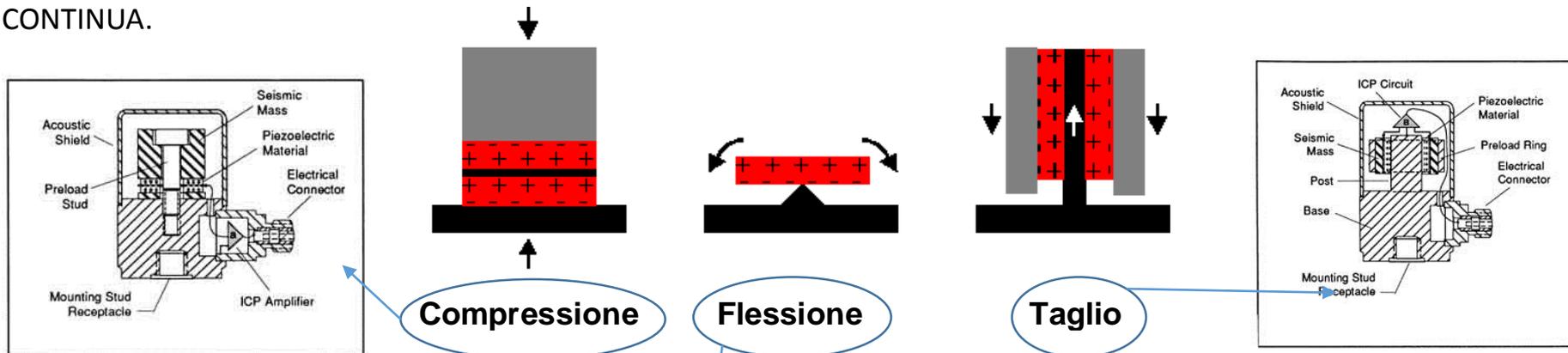


I cavi di collegamento tra l'accelerometro e l'amplificatore di carica costituiscono un elemento molto delicato della catena di misura e devono essere ad alto isolamento e basso rumore, inoltre la loro lunghezza non può eccedere qualche metro.

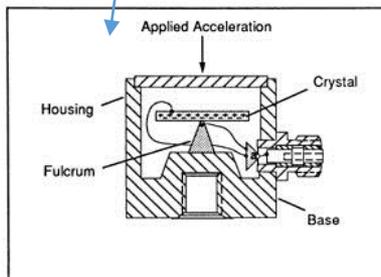


# ACCELEROMETRI IEPE

GLI ACCELEROMETRI ICP HANNO UN **CIRCUITO ELETTRONICO INTEGRATO** ALL'INTERNO DEL TRASDUTTORE E NON NECESSITANO PERTANTO DI UN PREAMPLIFICATORE ESTERNO, MA SOLO DI ALIMENTATORE ESTERNO A CORRENTE CONTINUA.

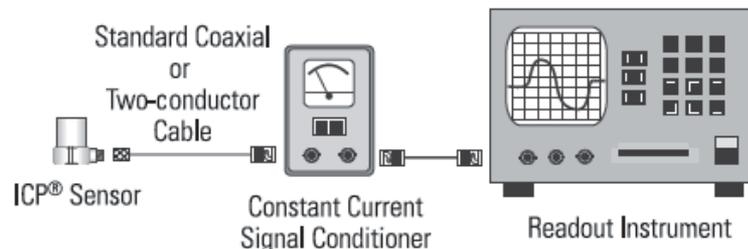
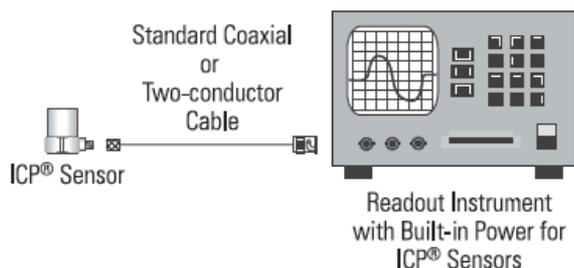


Il segnale in uscita dall'accelerometro è in questo caso una differenza di potenziale e la catena di misura è detta a bassa impedenza. L'alimentatore esterno o accoppiatore può avere anche la funzione di amplificare il segnale attraverso un guadagno regolabile.



Negli accelerometri ICP il segnale in uscita dal trasduttore è una tensione e pertanto la sensibilità del trasduttore si misura in  $\text{mV}/(\text{m/s}^2)$ .

L'accelerometro ICP è connesso alla sorgente di alimentazione mediante un semplice cavo coassiale, che può avere anche lunghezza dell'ordine della decina di metri. La sorgente deve fornire una tensione continua tra 18 e 30 V.





## ALTA SENSIBILITA' Triassiale – dimensioni ridotte

### Model 356B18

**Product Type:** Accelerometer, Vibration Sensor  
Triaxial, high sensitivity, ceramic shear ICP® accel., 1000 mV/g, 0.5 to 3k Hz, 4-pin conn.

### PERFORMANCE

#### ENGLISH

Sensitivity ( $\pm 10\%$ )

1000 mV/g

Measurement Range

$\pm 5$  g pk

Frequency Range ( $\pm 5\%$ )

0.5 to 3000 Hz Frequency Range ( $\pm 10\%$ )

0.3 to 5000 Hz

Resonant Frequency

$\geq 20$  kHz

Phase Response ( $\pm 5^\circ$ ) (at 70°F [21°C])

2 to 8000 Hz

Broadband Resolution (1 to 10,000 Hz)

0.00005 g rms

Non-Linearity

$\leq 1\%$

Transverse Sensitivity

$\leq 5\%$



## ELEVATO RANGE MISURA dimensioni minime

### Model 333B30

**Product Type:** Accelerometer, Vibration Sensor  
Modal array, ceramic shear ICP® accel., 100 mV/g, 0.5 to 3k Hz, 10-32 side conn., stud mount

### PERFORMANCE

#### ENGLISH

Sensitivity ( $\pm 10\%$ )

100 mV/g

Measurement Range

$\pm 50$  g pk

Frequency Range ( $\pm 5\%$ )

0.5 to 3000 Hz

Resonant Frequency

$\geq 40$  kHz

Phase Response ( $\pm 5^\circ$ ) (at 70°F [21°C])

2 to 3000 Hz

Broadband Resolution (1 to 10,000 Hz)

0.00015 g rms

Non-Linearity

$\leq 1\%$

Transverse Sensitivity

$\leq 5\%$





# IEPE SISMICI DELLA PCB PIEZOTRONICS

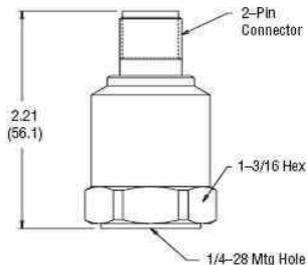
## ALTA DINAMICA

**Model 393A03** — General purpose, rugged

- 1000 mV/g [102 mV/(m/s<sup>2</sup>)] sensitivity
- 0.3 to 4000 Hz frequency range
- 210 gram (7.4 oz) weight
- 10 µg (100 µm/s<sup>2</sup>) resolution
- 5000 g (49k m/s<sup>2</sup>) shock survivability
- Electrical case isolation



CE



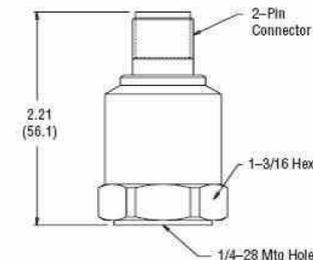
1/2x Actual Size

**Model 393B12** — High output signal in a relatively small package size

- 10 V/g [1.02 V/(m/s<sup>2</sup>)] sensitivity
- 0.1 to 2000 Hz frequency range
- 210 gram (7.4 oz) weight
- 8 µg (80 µm/s<sup>2</sup>) resolution
- 5000 g shock survivability
- Electrical case isolation



CE



1/2x Actual Size

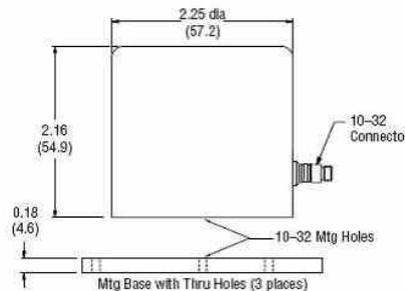
## ALTA SENSIBILITA' E BASSO RUMORE

**Model 393C** — Quartz sensing element provides stable, low-frequency measurement capability

- 1000 mV/g [102 mV/(m/s<sup>2</sup>)] sensitivity
- 0.01 to 1200 Hz frequency range
- 885 gram (31.2 oz) weight
- 100 µg (1mm/s<sup>2</sup>) resolution
- Electrical ground isolation



CE



1/2x Actual Size

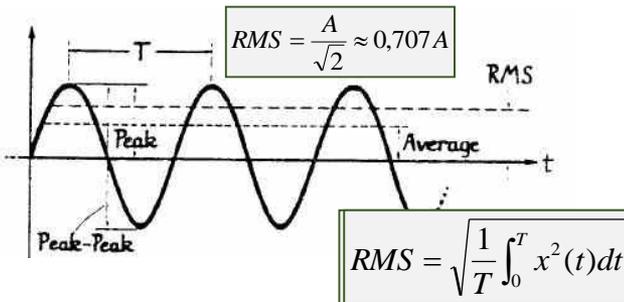
## BASSE FREQUENZE



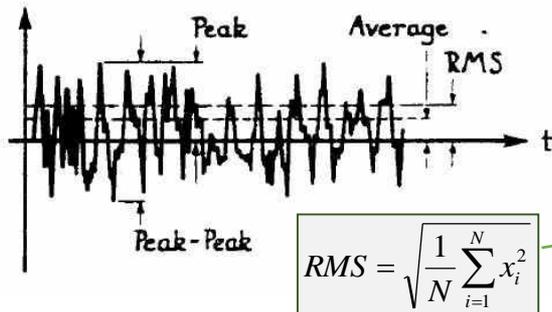
# RUMORE SPETTRALE

Frequenza [Hz]	PCB 393 A12 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$	PCB 393 B12 $\mu\text{g}/\sqrt{\text{Hz}}$
1	2,00	1,30
10	0,50	0,32
100	0,20	0,13
1000	0,10	0,10

$$\frac{W}{\text{Hz}} \Rightarrow \frac{V^2}{\text{Hz}} \Rightarrow \frac{V}{\sqrt{\text{Hz}}} \Rightarrow \frac{g}{\sqrt{\text{Hz}}}$$

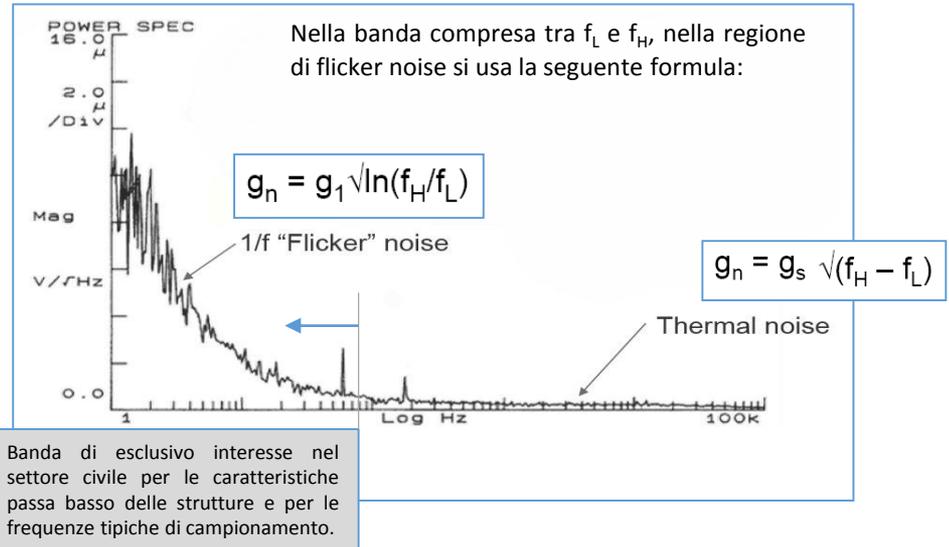


ROOT MEAN SQUARE: VALORE MEDIO EFFICACE

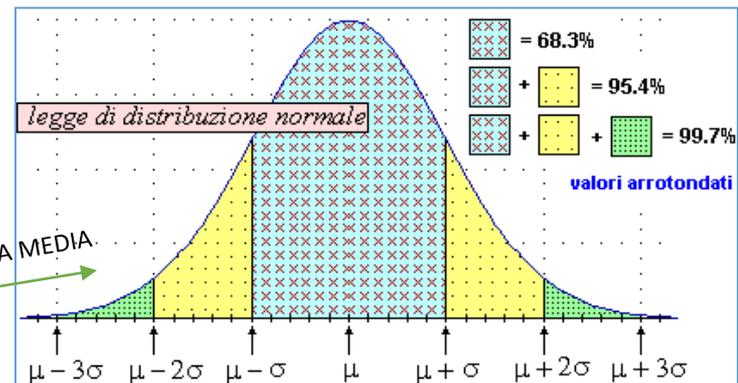


DEVIAZIONE STANDARD DALLA MEDIA.

A partire dal grafico della densità di potenza spettrale si giunge così ad un grafico di densità di rumore spettrale al quale si può fare riferimento per la determinazione del valore di rumore RMS relativo ad una ben definita larghezza di banda.



Effettuando una misurazione di livello più basso di  $10 \mu\text{g}$  o di  $8 \mu\text{g}$ , a seconda della tipologia di accelerometro, significa che si ha la probabilità del 31,7% di quanto misurato sia esclusivamente rumore. Se la misurazione ha un livello più basso di  $30 \mu\text{g}$  e  $24 \mu\text{g}$  ( $3\sigma$ ), la probabilità che si abbia solo rumore si riduce drasticamente allo 0,3 %.





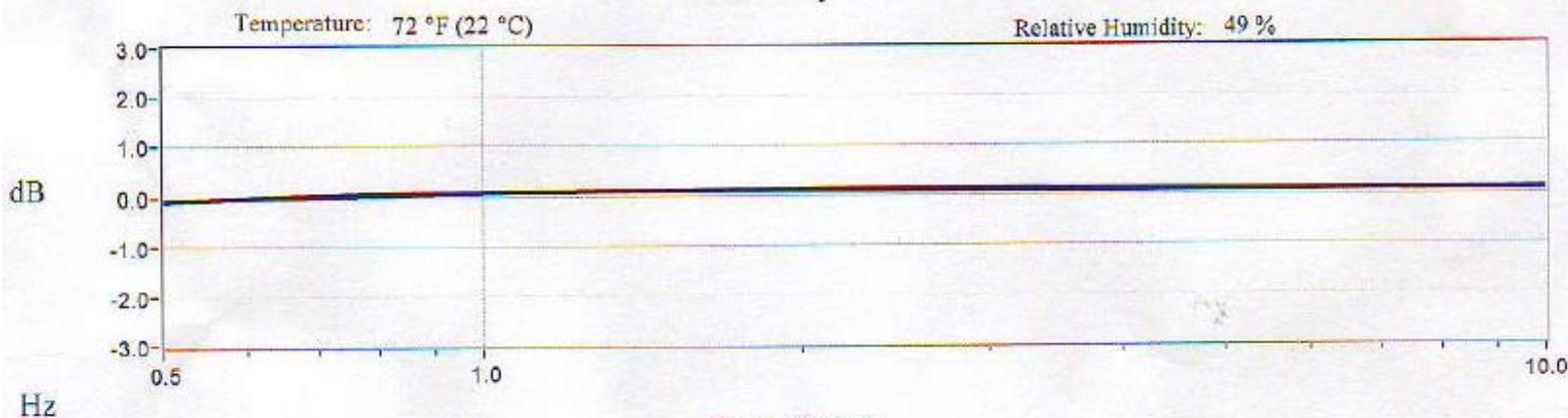
# ICP SISMICI DELLA PCB PIEZOTRONICS

## CURVA DI CALIBRAZIONE PER LA SERIE 393B12

### Calibration Data

Sensitivity @ 100 Hz      10.31 V/g  
(1.052 V/m/s<sup>2</sup>)

### Sensitivity Plot



### Data Points

Frequency (Hz)	Dev. (%)	Frequency (Hz)	Dev. (%)
0.5	-1.0	7	1.0
0.7	-0.1	10	0.9
1	0.7		
3	1.1		
5	1.0		

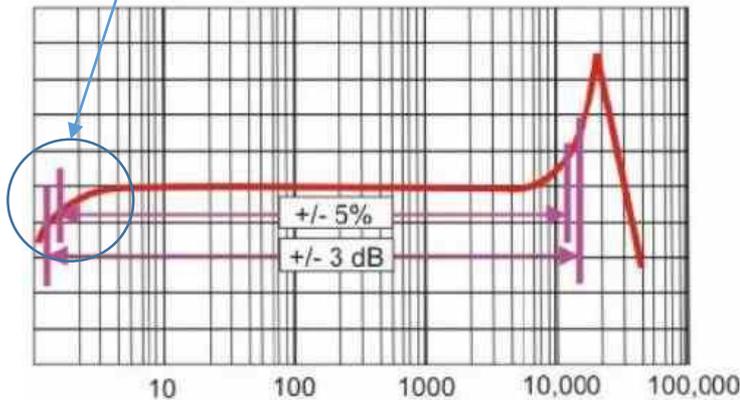
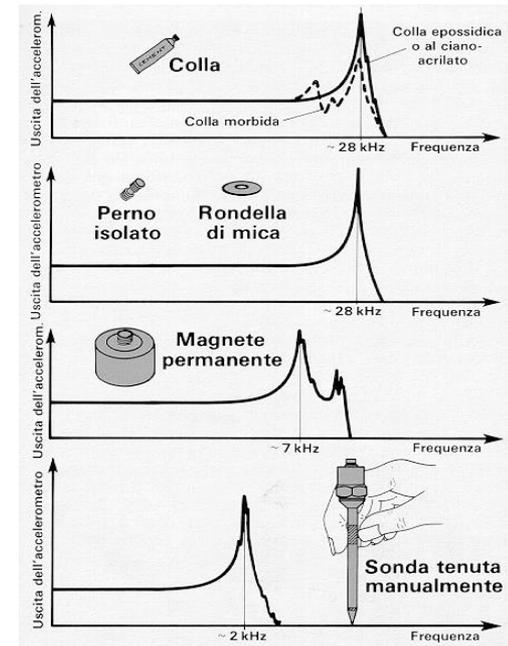
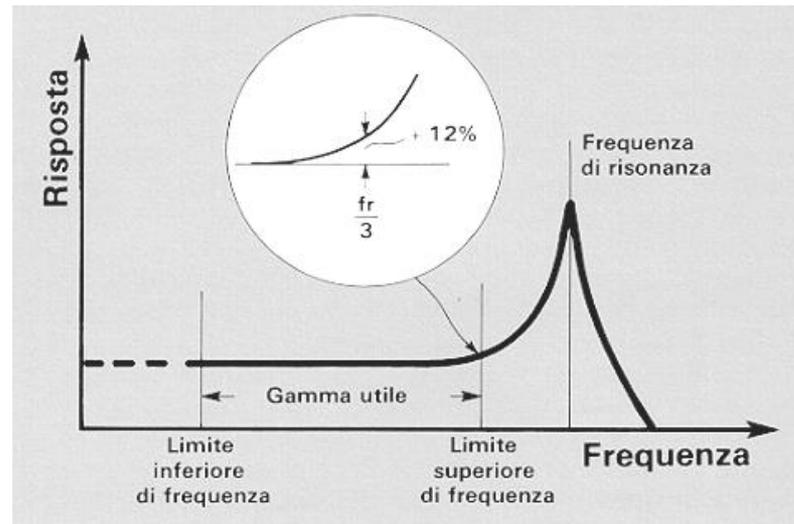
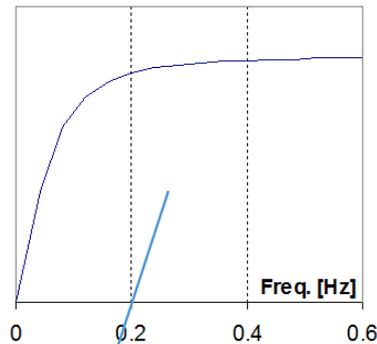




# RISPOSTA IN FREQUENZA DI UN ICP

LA RISPOSTA IN FREQUENZA È LIMITATA:

- ✓ SUPERIORMENTE DAI FENOMENI DI RISONANZA MECCANICA;
- ✓ INFERIORMENTE DALLE PROPRIETÀ PIEZOELETTRICHE DEL QUARZO.

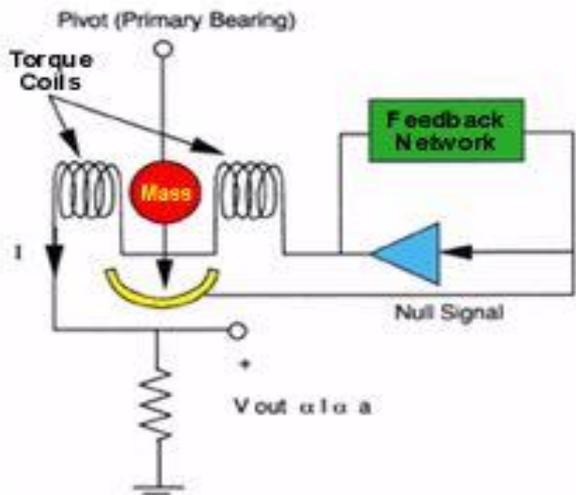


TIPICA BANDA PASSANTE

$$3/\tau \leq \omega \leq 0.2\omega_n$$

Aumentando  $\tau$  si migliora la risposta alle basse frequenze ma sorgono problemi legati alla sensibilità alle variazioni di temperatura.

# ACCELEROMETRI FORCE BALANCE



QUANDO AGISCE UNA ACCELERAZIONE, UNA FORZA E' APPLICATA ALLA MASSA CHE TENTERA' DI MUOVERSI DALLA POSIZIONE DI ZERO. QUANDO L'INDICE DI ZERO INDIVIDUA UN MOVIMENTO, LA CORRENTE NELL'AVVOGIMENTO E' AUMENTATA PER MEZZO DI UN SERVO-AMPLIFICATORE PER MANTENERE NULLA LA POSIZIONE.

- \* Seismic Event Sensor
- \* Ultra Low Noise
- \* High Level Output

Columbia SA-107 LN



## Specifications

	SA-107LN	SA-107LNC
Operational		
Ranges Available	$\pm 0.1$ G To $\pm 2$ G	
Output Voltage	$\pm 7.5$ Volts into 100K Load	
Excitation	$\pm 12$ To $\pm 15$ VDC < 10 mA	
Output Impedance	< 1000 Ohms	
Sensitive Axis Alignment	Better Than 0.25 Deg	
Scale Factor Tolerance	$\pm 1\%$	
Scale Factor Temp Coefficient	0.01% / Deg C Max.	
Zero Output		
A.C. Coupled	< 5 mV	
D.C. Coupled	< 1 mG	
Null Temp Sensitivity	75 $\mu$ V / Deg C	
Natural Frequency	100 To 200 Hz Dependent Upon Range	
Damping	0.7 $\pm$ 0.1	
Cross Axis Sensitivity	0.002 G/G Exclusive of Sensitive Axis Alignment	
Output Noise	< 2.5 $\mu$ V RMS From 0 To 50 Hz	
Non-Linearity	< $\pm$ 0.1% F.R.	
Hysteresis & Non-Repeatability	< 0.5 mG	
Threshold & Resolution	Better Than 1 $\mu$ G	

*3,25 V/g*

IL SERVOACCELEROMETRO **COLUMBIA SA-107LN**, AD **ALTA SENSIBILITA'** E **BASSO RUMORE**, E' STATO PROGETTATO PER IMPIEGHI SISMICI CARATTERIZZATI DA BASSI LIVELLI E DA MOVIMENTI A **BASSA FREQUENZA**. FORNISCE UN OUTPUT AD ALTO LIVELLO E A BASSA IMPEDENZA E, NELLA MAGGIOR PARTE DELLE APPLICAZIONI, NON E' RICHiesto ALCUN CONDIZIONAMENTO DEL SEGNALE.

*Parte dalla continua*

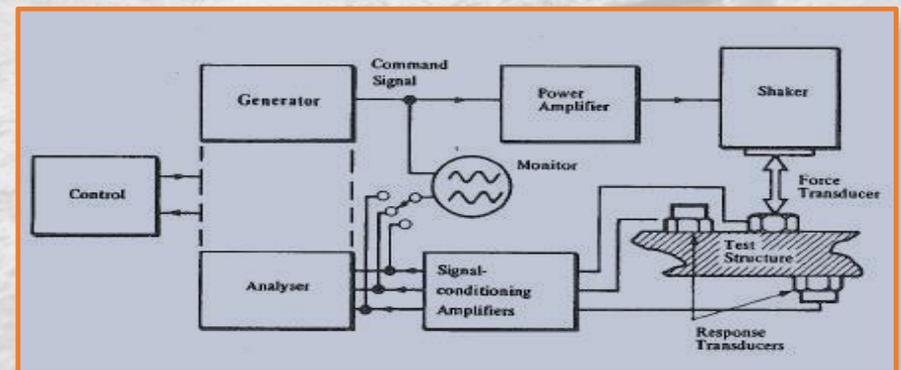
*< 2.5  $\mu$ g*



# ANALISI MODALE SPERIMENTALE

Con analisi modale sperimentale (*modal testing*) si indica il processo, comprensivo di acquisizione dati e successiva analisi, rivolto a provare componenti o strutture con l'obiettivo di ottenerne una descrizione del loro comportamento dinamico o vibrazionale.

Si arriva quindi alla definizione di un **modello matematico** che può avere i più disparati impieghi. Quasi sempre si provvede ad applicare un'azione dinamica nota, armonica od impulsiva, spesso al di fuori del suo normale campo di servizio.





# ANALISI MODALE CLASSICA



5 kg



1 kg

VIBRO D25

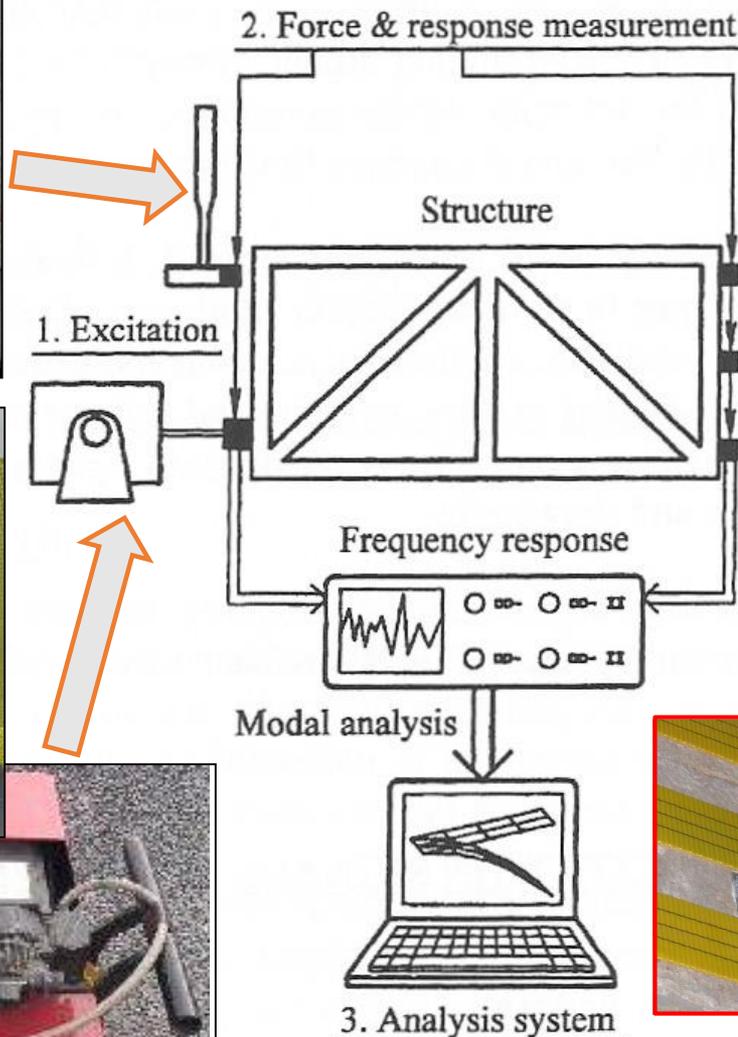
INDAPRO



STRAGO



VALTRONIC



**OUTPUT**

**INPUT**



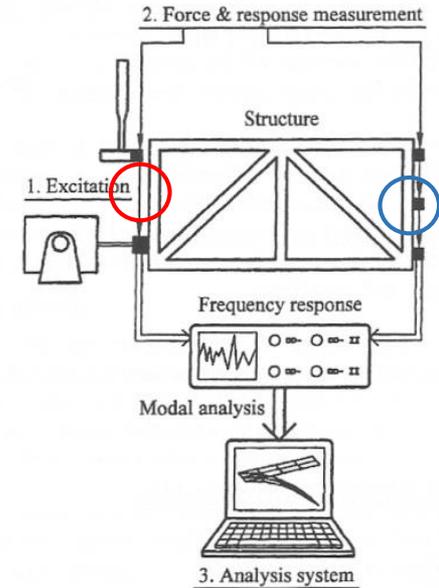


# ANALISI MODALE CLASSICA

*Nell'analisi strutturale, un sistema, costituito da elementi continui, viene modellato come un insieme di elementi discreti (nodi) interconnessi tra loro mediante elementi dotati di determinate caratteristiche (forma, materiale) che ne assegnano le caratteristiche di massa e rigidezza (es. telaio modellato da nodi connessi da elementi frame).*



## MODELLO STRUTTURALE (modellazione FEM)



**L'ANALISI MODALE CLASSICA SI BASA NELL'ECCITARE LA STRUTTURA IN ALCUNI PUNTI (INPUT) E NEL MISURARE LA RISPOSTA IN ALTRETTANTI PUNTI (OUTPUT)**

*Nell'analisi modale sperimentale la struttura è discretizzata in nodi, ma tali nodi sono quelli in cui sono misurati le grandezze di input (eccitazione) ed output (risposta - accelerometri)*



## MODELLO MODALE

**LE MISURE DELLE GRANDEZZE DI INPUT ED OUTPUT COSTITUISCONO I DATI DI PARTENZA CON CUI DETERMINARE LE CARATTERISTICHE DINAMICHE DEL SISTEMA MEDIANTE OPPORTUNE TECNICHE DI FITTING TRA I DATI MISURATI E LA RISPOSTA CARATTERISTICA DEL SISTEMA (FUNZIONE DI TRASFERIMENTO)**

# FUNZIONE DI TRASFERIMENTO

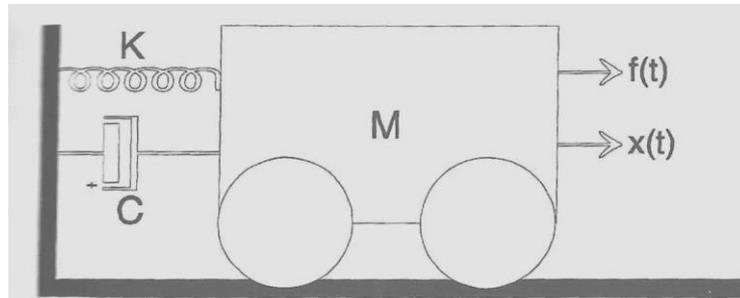
$$M \frac{d^2 x}{dt^2} + C \frac{dx}{dt} + Kx = f(t)$$



Dominio di Laplace (variabile p)

$$(Mp^2 + Cp + K)X(p) = f(p)$$

$$Z(p)X(p) = f(p) \quad X(p) = \frac{f(p)}{Z(p)} = H(p)f(p)$$



Funzione di trasferimento del sistema

$$H(p) = \frac{1}{p^2 + \frac{C}{M}p + \frac{K}{M}}$$

Equazione caratteristica

Radici, o poli del sistema

$$\lambda_{1,2} = -\left(\frac{C}{2M}\right) \pm \sqrt{\left(\frac{C}{2M}\right)^2 - (K/M)}$$

SE NON C'E' SMORZAMENTO (C=0) IL SISTEMA SI DEFINISCE CONSERVATIVO

1) FREQUENZA NATURALE DI UN SISTEMA SENZA SMORZAMENTO

$$\Omega_1 = \sqrt{\frac{K}{M}}$$

2) SMORZAMENTO CRITICO

$$C_c = 2M \sqrt{\frac{K}{M}}$$

Quello che azzerava il termine sotto radice

3) SI DENISCE FRAZIONE DELLO SMORZAMENTO CRITICO O RAPPORTO DI SMORZAMENTO IL SEGUENTE RAPPORTO:

$$\zeta_1 = \frac{C}{C_c}$$

$\zeta_1 < 1$  - SISTEMA SOTTOSMORZATO

$\zeta_1 = 1$  - SISTEMA CRITICO

$\zeta_1 > 1$  - SISTEMA SOVRASMORZATO

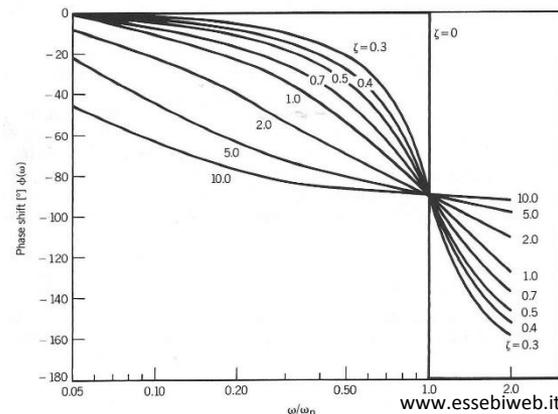
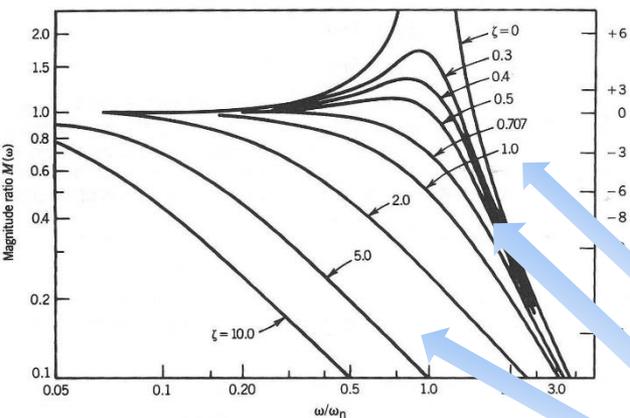
$$H(p) = \frac{1/M}{(p - \lambda_1)(p - \lambda_1^*)} \quad \lambda_1, \lambda_1^* = \sigma_1 \pm j\omega$$

$$\sigma_1 = \zeta_1 \Omega_1$$

Frequenza naturale del sistema smorzato  $\omega = \sqrt{(1 - \zeta_1^2)} \Omega_1$

Residui

$$H(p) = \frac{A}{(p - \lambda_1)} + \frac{A^*}{(p - \lambda_1^*)}$$



NELLE NTC SI FA RIFERIMENTO AD UNO SMORZAMENTO CONVENZIONALE DEL 5% PER SISTEMI NON DOTATI DI SPECIALI DISPOSITIVI DI SMORZAMENTO SUPPLEMENTARI



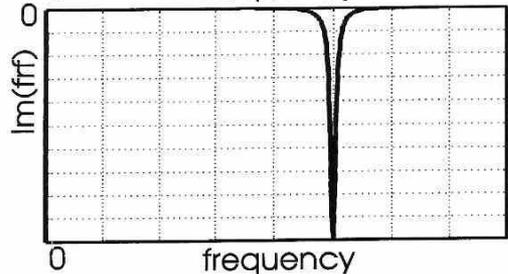
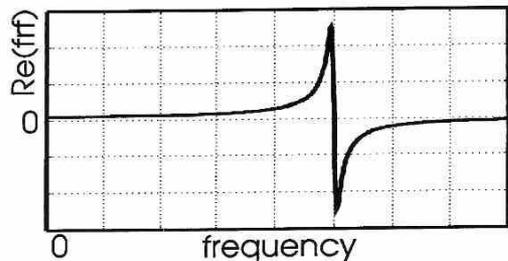
# FUNZIONE DI RISPOSTA IN FREQUENZA (FRF)

LA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO VALUTATA LUNGO L'ASSE DELLE FREQUENZE ( $j\omega$ ) E' CHIAMATA FUNZIONE DI RISPOSTA IN FREQUENZA (Frequency Response Function)

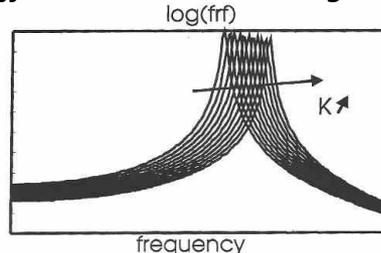
$$H(p)\Big|_{p=j\omega} = \frac{A_1}{(j\omega - \lambda_1)} + \frac{A_1^*}{(j\omega - \lambda_1^*)}$$

LA FRF E' UN SOTTOINSIEME DELLA FUNZIONE DI TRASFERIMENTO: E' LA SEZIONE ORTOGONALE LUNGO L'ASSE DELLE FREQUENZE ( $j\omega$ , o  $\sigma=0$ ). IL CONTRIBUTO DELLA PARTE COMPLESSA CONIUGATA (O PARTE A FREQUENZA NEGATIVA) E' TRASCURABILE NELL'INTORNO DELLA RISONANZA,  $\omega \cong \omega_1$ . QUINDI LA FRF PER UN SISTEMA AD UN SOLO GRADO DI LIBERTA' E' SPESSO APPROSSIMATA DA:

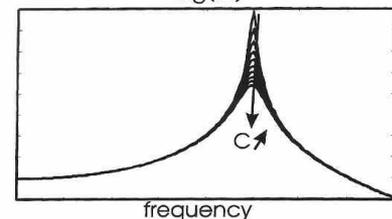
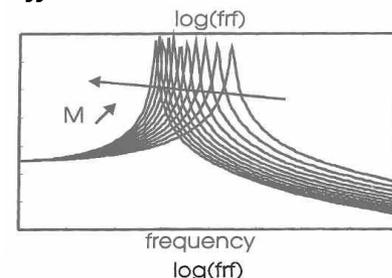
$$H(p) = \frac{A_1}{(j\omega - \lambda_1)}$$



**Effetto di incremento di rigidezza**



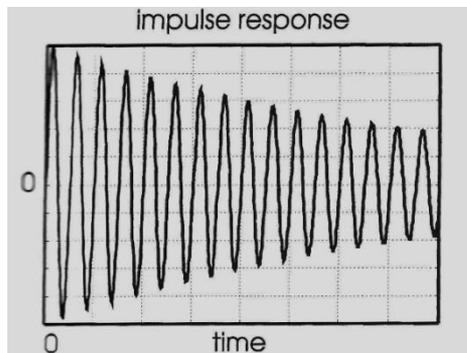
**Effetto di incremento di massa**



**Effetto di incremento di smorzamento**

## RISPOSTA IMPULSIVA

LA TRASFORMATA INVERSA DI LAPLACE FORNISCE L'ESPRESSIONE NEL DOMINIO DEL TEMPO :



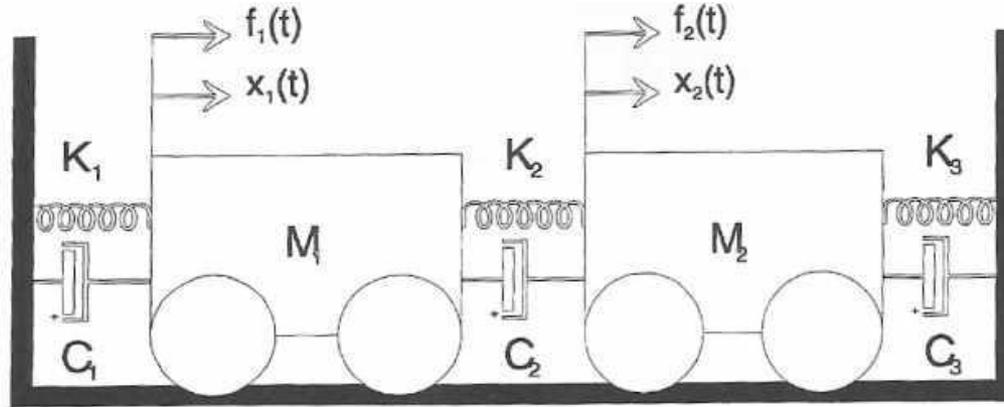
$$h(t) = A_1 e^{\lambda_1 t} + A_1^* e^{\lambda_1^* t} = e^{\sigma_1 t} (A_1 e^{j\omega_1 t} + A_1^* e^{-j\omega_1 t})$$

Annotations for the equation above:  
- Tasso di decadimento (points to  $\sigma_1$ )  
- Frequenza di oscillazione (points to  $\omega_1$ )  
- Ampiezza iniziale (points to  $A_1$ )



# SISTEMI A PIU' GRADI DI LIBERTA'

MDOF



$$M_1 \frac{d^2 x_1(t)}{dt^2} + (C_1 + C_2) \frac{dx_1}{dt} - C_2 \frac{dx_2}{dt} + (K_1 + K_2)x_1(t) - K_2 x_2(t) = f_1(t)$$

$$M_2 \frac{d^2 x_2(t)}{dt^2} + (C_2 + C_3) \frac{dx_2}{dt} - C_2 \frac{dx_1}{dt} + (K_2 + K_3)x_2(t) - K_2 x_1(t) = f_2(t)$$

Trasformazione nel dominio di Laplace + risoluzione problema agli autovalori =  $[H(p)]$

Esprimendo i residui in funzione dei vettori modali e proiettando lungo l'asse  $j\omega$ :

$$[H(p)] = \sum_{r=1}^N \left[ \frac{[A]_r}{(p - \lambda_r)} + \frac{[A]_r^*}{(p - \lambda_r^*)} \right]$$

Labels: **Modi** (above the sum), **Residui** (above the fraction), **Poli** (below the denominator).

**AUTOVETTORI (COPPIE DI COMPLESSI CONIUGATI)**

$$[H(j\omega)] = \sum_{r=1}^N \left[ \frac{Q_r \{\Psi\}_r \{\Psi\}_r^t}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{Q_r^* \{\Psi\}_r^* \{\Psi\}_r^{*t}}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right]$$

Labels: **AUTOVALORI (POLI)** (pointing to the denominator), **AUTOVETTORI (COPPIE DI COMPLESSI CONIUGATI)** (pointing to the numerator).

**PER SISTEMI LTI (LINEAR TIME INVARIANT) LA FRF E' SIMMETRICA !**



# SISTEMI A PIU' GRADI DI LIBERTA'

LA FRF IN TERMINI MATRICIALI ASSUME LA SEGUENTE FORMA:

$$[ H(j\omega) ] = [ V ] [ j\omega [ I ] - [ \Lambda ] ]^{-1} [ L ] \quad [ 2N \times 2N ] \text{ con } N \text{ nodi del sistema} \\ \text{(del modello modale)}$$

$$[ V ] = [ \{ \psi \}_1 \dots \{ \psi \}_N \quad \{ \psi \}_1^* \dots \{ \psi \}_N^* ] \quad \text{Matrice dei vettori modali}$$

$$[ L ] = [ Q_1 \{ \psi \}_1 \dots Q_N \{ \psi \}_N \quad Q_1^* \{ \psi \}_1^* \dots Q_N^* \{ \psi \}_N^* ] \quad \text{Matrice dei fattori di partecipazione modale}$$

$$[ I ] = \text{Matrice diagonale identit\`a}$$

$$[ \Lambda ] = \text{Matrice diagonale dei poli}$$

LA SINGOLA COLONNA  $j$  DELLA FRF RAPPRESENTA LA RISPOSTA DEL SISTEMA (TUTTI I NODI) AD UNA ECCITAZIONE PROVOCATA IN UN PUNTO  $j$

LA SINGOLA RIGA  $i$  DELLA FRF RAPPRESENTA LA RISPOSTA DI UN SINGOLO NODO  $i$  DEL SISTEMA AD UNA ECCITAZIONI PROVOCATA IN TUTTI I PUNTI DEL SISTEMA

IL SINGOLO ELEMENTO  $\alpha_{ij}(\omega)$  RAPPRESENTA LO SPETTRO, NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE, DELLA RISPOSTA DEL SISTEMA IN UN PUNTO  $i$  A SEGUITO DI UNA ECCITAZIONE DINAMICA APPLICATA IN  $j$ .

LA RISPOSTA TOTALE DI  $\alpha_{ij}(\omega)$  E' COSTITUITA DALLA SOMMATORIA DEI PRODOTTI DELLE COMPONENTI MODALI DI RISPOSTA IN  $i$  e  $j$  PER CIASCUNA **FREQUENZA CONTENUTA NELLA FORZANTE** IN RELAZIONE ALLA **FREQUENZA PROPRIA DI CIASCUN MODO**.

$$\alpha_{ij}(\omega) = \sum_{r=1}^N \frac{(\Phi_i)_r \cdot (\Phi_j)_r}{\Omega_{0r}^2 - \omega^2}$$



## ANALISI MODALE SPERIMENTALE DI TIPO CLASSICO

### 1) ECCITAZIONE DELLA STRUTTURA IN PUNTI OPPORTUNI:

VIBRODINA (FREQUENZA MODULABILE / SINE SWEEP)

MARTELLO STRUMENTATO (SPETTRO DI FREQUENZA)

Roving Hammer

Roving Accelerometer

### 2) MISURA DELLA RISPOSTA E DELLA FORZANTE

### 3) CALCOLO DELLA FRF $H(\omega)$

### 4) ESTRAZIONE DEI PARAMETRI MODALI COME FITTING TRA LA FRF MISURATA E L'ESPRESSIONE DELLA FRF IN TERMINI DI PARAMETRI MODALI

$$[H(j\omega)] = \sum_{r=1}^N \left[ \frac{Q_r \{\Psi\}_r \{\Psi\}_r^t}{(j\omega - \lambda_r)} + \frac{Q_r^* \{\Psi\}_r^* \{\Psi\}_r^{*t}}{(j\omega - \lambda_r^*)} \right]$$



# MARTELLLO STRUMENTATO

SENSIBILITA': 0,23 mV/N

MASSA: 1,1 kg

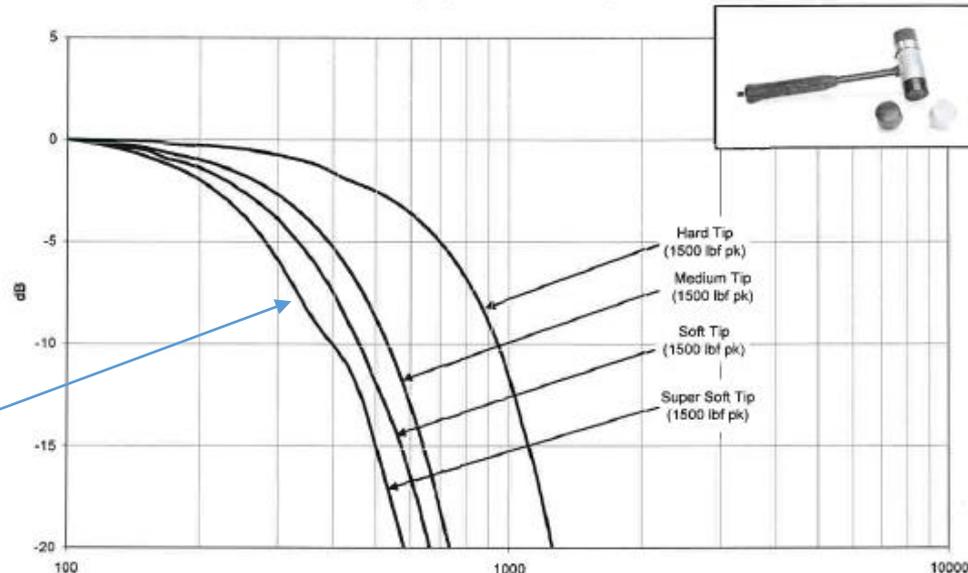
FONDO SCALA 22,240 kN pk

PCB 086D20

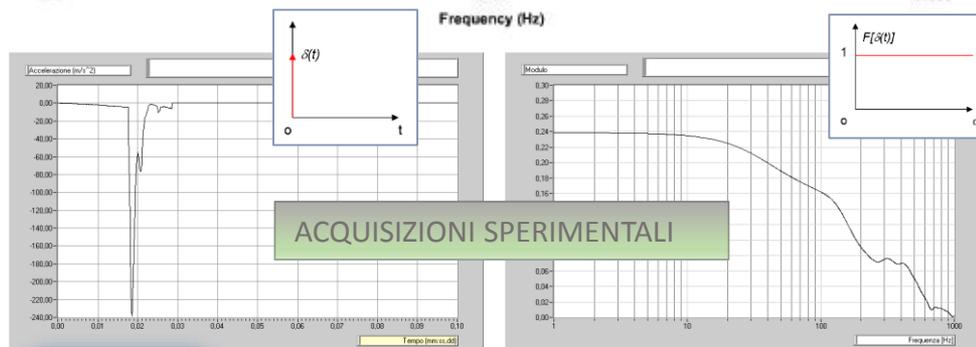
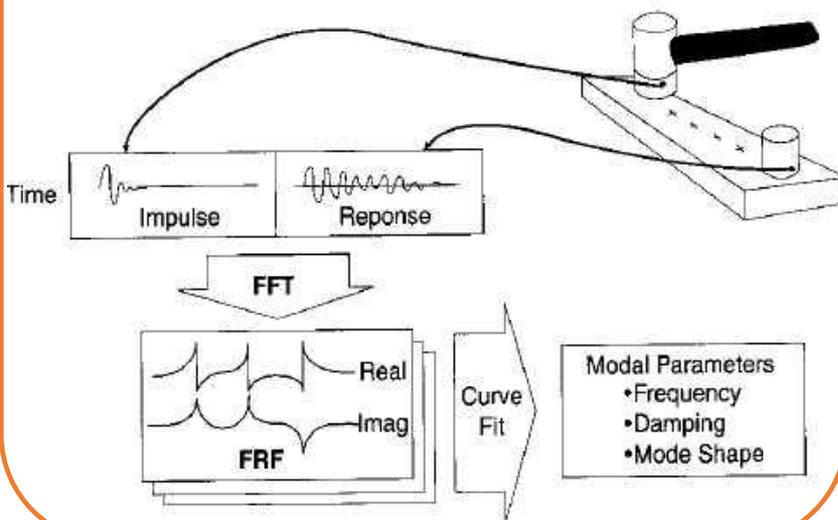
TIPS INTERCAMBIABILI



086D20, C41 Family Impulse Hammer Response Curves



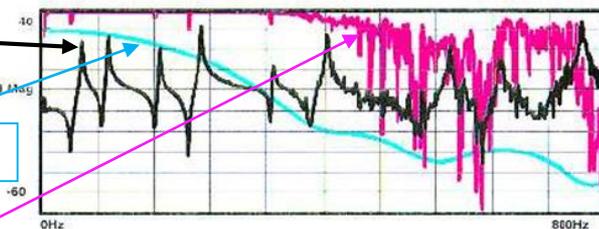
## SCHEMA PROVA «ROVING HAMMER»



FRF

SPETTRO ECCITAZIONE

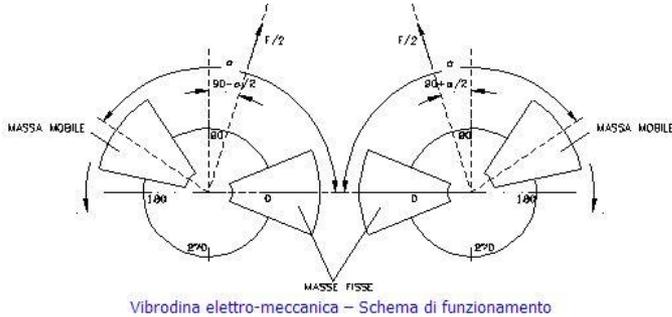
FUNZIONE COERENZA





# VIBRODINA (SHAKER)

La vibrodina è un dispositivo atto a generare vibrazioni d'intensità e frequenza opportune



La **massa eccentrica** della vibrodina è ottenuta per mezzo di due masse uguali vincolate sulla corona periferica di ogni singolo disco; spostando lungo la circonferenza della corona periferica una delle due masse (massa mobile) rispetto all'altra (massa fissa) è possibile regolare il valore della eccentricità

La **costante di utilizzo** della macchina è il rapporto fra la forza erogata ed il quadrato della frequenza:

$$|F| = K(\alpha) \times f^2$$

$$K(\alpha) = C \times \cos(\alpha/2)$$

Angolo di sfasamento tra le masse

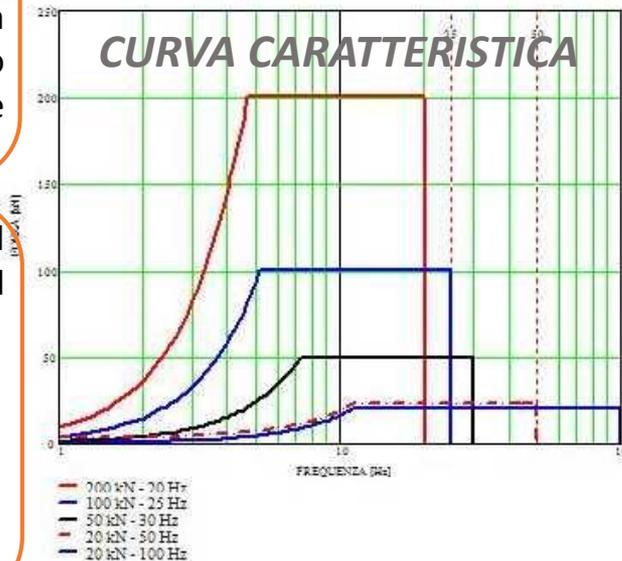
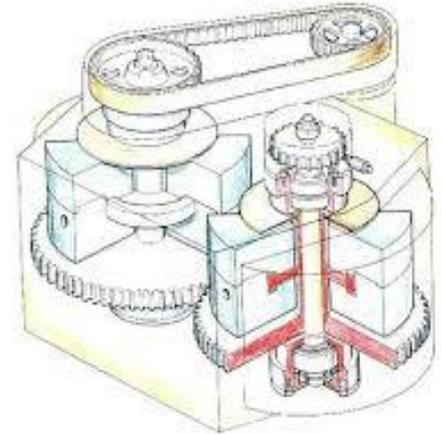
Il **principio di funzionamento** consiste nel fatto che una massa eccentrica rotante attorno ad un asse con una velocità angolare costante genera una forza centrifuga che può essere rappresentata da un vettore rotante nel piano ortogonale all'asse di rotazione e la cui ampiezza è fornita dalla seguente relazione:

$$|F| = m \cdot e \cdot \omega^2 = m \cdot e \cdot (2\pi f)^2$$

Massa

Frequenza

Eccentricità



La **costante caratteristica** definisce la «potenzialità meccanica» dell'attrezzatura. Tale costante viene indicata con C, è misurata in N/Hz<sup>2</sup> e rappresenterebbe la forza massima erogabile dalla macchina alla frequenza di 1 Hz qualora fosse possibile sovrapporre le masse sul medesimo raggio del disco.

Numero dei dischi

Numero delle masse

$$C = d \times n \times m \times e \times (2 \times \pi)^2$$



# LIMITI DELLA MODALE CLASSICA

- ✚ Il **martello strumentato** risulta particolarmente adatto per le strutture in acciaio, soprattutto se di limitate dimensioni. Il suo impiego cade progressivamente in difetto se si passa al calcestruzzo armato e alle murature. In quest'ultimo caso il suo impiego risulta limitato ad analisi per aree concentrate caratterizzate da molteplici acquisizioni a seguito di impulsi applicati su maglia fitta.
- ✚ La **vibroдина** è in linea teorica adatta per tutte le tipologie di strutture, anche se il suo impiego è fortemente condizionato dalla ricerca delle prime armoniche. A basse frequenze la forza di eccitazione è determinabile solo con masse molto elevate a discapito della facilità e speditezza di impiego.

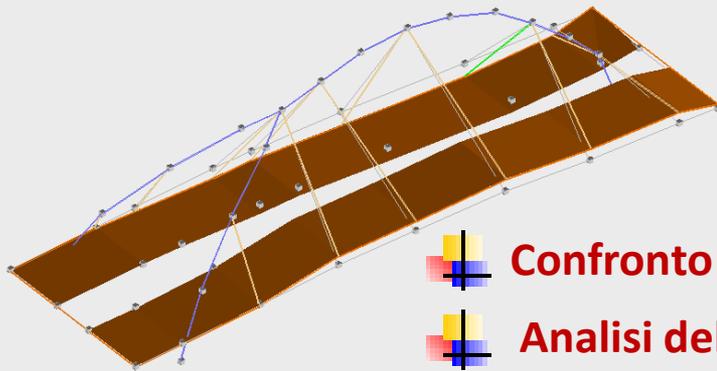


## Campo di applicazione

Trova applicazione non solo nei casi in cui risulti impegnativo ed economicamente oneroso eccitare dinamicamente strutture massive, quali ponti ed edifici, con i mezzi tradizionali dell'analisi modale sperimentale classica, ma praticamente in tutti i casi tipici dell'ingegneria civile.

## Basata su...

misura della sola risposta strutturale per eccitazione da sorgenti ambientali, quali il traffico veicolare ed il vento, assumendo che l'ente generatore delle vibrazioni sia un processo stocastico.



## Obiettivi

-  Confronto tra frequenze teoriche e quelle sperimentali
-  Analisi del danno, riscontrabile da modi anomali
-  Monitoraggi a cadenza periodica
-  Variazioni delle frequenze prima e dopo interventi strutturali

Mode 1 : 0.7137 Hz, 1.31 s  
Mode 7 : 0.3753 Hz, 1.37 s



## PRINCIPALI VANTAGGI

-  **VELOCITA' ED ECONOMIA** NELL'ESECUZIONE DELLE PROVE;
-  **COLLAUDO** CARATTERISTICHE PROPRIE DELLA STRUTTURA ;
-  **CONDIZIONI SIMILI A QUELLE DI REALE FUNZIONAMENTO;**
-  **POSSIBILITA' DI INDIVIDUARE FORME MODALI RAVVICINATE;**
-  **UTILE STRUMENTO PER MONITORAGGIO STRUTTURALE;**
-  **POSSIBILITA' D'UTILIZZO PER LA LOCALIZZAZIONE DEL DANNO.**

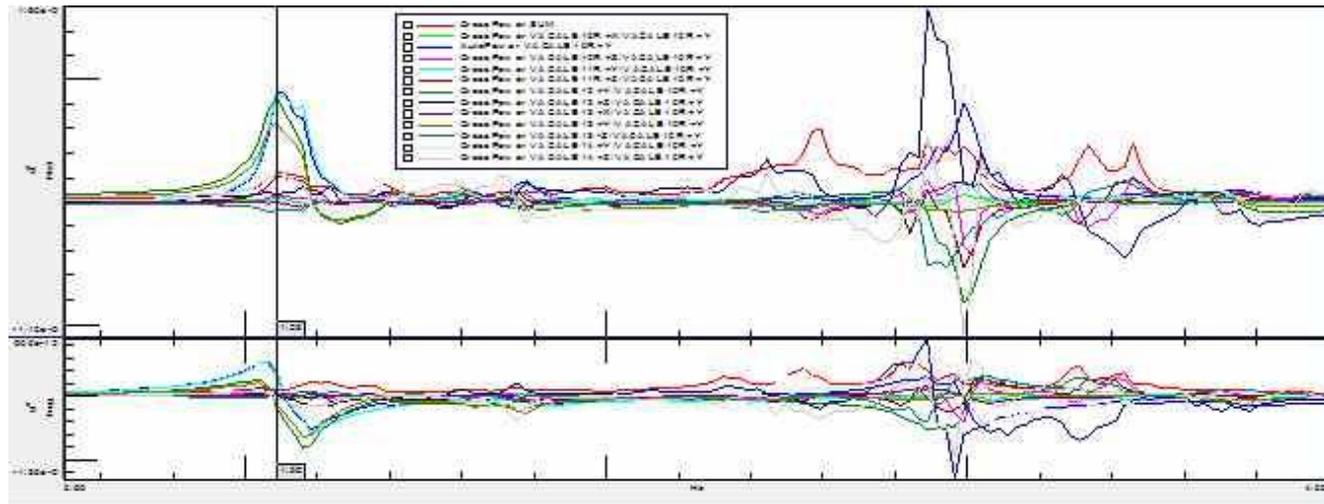


# SPIRITO DEL METODO

- PREVEDE DI MISURARE SOLO LE GRANDEZZE DI RISPOSTA DEL SISTEMA (es. accelerazioni) CAUSATE DA UNA ECCITAZIONE RANDOMICA NON MISURATA (anche nota come output only)
- L'ELABORAZIONE DEI DATI ACQUISITI SI BASA SULL'ANALISI DELLA FUNZIONE **SPETTRO DI POTENZA INCROCIATA (CROSS POWER SPECTRUM)**
- ESSA RAPPRESENTA LA DISTRIBUZIONE DI ENERGIA NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE CHE CARATTERIZZA I DUE SEGNALI CHE LA COMPONGONO
- MATEMATICAMENTE LA CSP E' LA TRASFORMATA DI FOURIER DELLA FUNZIONE DI CROSS-CORRELAZIONE, FUNZIONE CHE ESPRIME LA CORRELAZIONE NEL TEMPO TRA DUE SEGNALI DI TIPO RANDOMICO (come appunto l'eccitazione ambientale)
- L'IDEA E' DI INDAGARE LA CORRELAZIONE TRA I SEGNALI AVVERTITI DAI SENSORI, DISPOSTI SULLA STRUTTURA, NEL MEDESIMO TEMPO E TROVARE, TRAMITE LA TRASFORMAZIONE NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE, QUALI SIANO LE FREQUENZE PER CUI LA STRUTTURA RISULTA NATURALMENTE ECCITATA IN CORRISPONDENZA DI TUTTI I PUNTI DI MISURA PREDISPOSTI, TRA TUTTE LE COMPONENTI IN FREQUENZA CONTENUTE NEL SEGNALE IN RANDOMICO IN INGRESSO

PARTE REALE

PARTE IMMAGINARIA



## RELAZIONE FONDAMENTALE DELLA RISPOSTA DINAMICA IN FREQUENZA DI UN SISTEMA AD UNA FORZANTE OSCILLATORIA RANDOMICA

$$[S_{yy}(j\omega)] = [H(\omega)][S_{uu}][H(\omega)]^H$$

FRF DEL SISTEMA

TRASPOSTA DELLA MATRICE COMPLESSA E CONIUGATA

SPETTRO DI POTENZA INCROCIATO DEI SEGNALI MISURATI RISPETTO  
AD UN PUNTO DI MISURA DI RIFERIMENTO (REFERENCE)

SPETTRO DI POTENZA DELLA GRANDEZZA DI INPUT (FORZANTE)

SEGNALE IN INGRESSO DI NATURA RANDOMICA NON MISURABILE, SI ASSIMILA AD UN RUMORE BIANCO

SPETTRO DI POTENZA DI UN TALE SEGNALE RISULTA COSTANTE

$S_{uu}$  indipendente dalla frequenza

SCRITTURA DI  $S_{yy}$  IN TERMINI DI DECOMPOSIZIONE MODALE

$$[S_{yy}(j\omega)] = \sum \frac{(v_i)\langle g_i \rangle}{j\omega - \lambda_i} + \frac{(v_i^*)\langle g_i^* \rangle}{j\omega - \lambda_i^*} + \frac{\langle g_i \rangle(v_i)}{-j\omega - \lambda_i} + \frac{\langle g_i^* \rangle(v_i^*)}{-j\omega - \lambda_i}$$



# CROSS POVER SPECTRUM

$$[S_{yy}(j\omega)] = \sum \frac{(v_i)\langle g_i \rangle}{j\omega - \lambda_i} + \frac{(v_i^*)\langle g_i^* \rangle}{j\omega - \lambda_i^*} + \frac{\langle g_i \rangle(v_i)}{-j\omega - \lambda_i} + \frac{\langle g_i^* \rangle(v_i^*)}{-j\omega - \lambda_i^*}$$

CONTIENE I CROSSPETTRI DEI PUNTI DI MISURA CALCOLATI RISPETTO AD UN PUNTO DI RIFERIMENTO (REFERENCE)

$S_{yy}(\omega)$  = DFT della **funzione di cross correlazione**

$$S_{yy}(\omega) = \sum_{k=-L}^L w_k R_k e^{-j\omega k \Delta t}$$

Time window (riduce leakage)

E' calcolata in riferimento a pacchetti di dati contenuti in intervalli temporali (**Time lag**) in cui è conveniente suddividere l'intero periodo di acquisizione

Massimo numero Time lags in cui sono stimate le correlazioni

La DFT della correlazione tra due segnali è la somma pesata delle DFT calcolate per ciascun time lags

Per l'analisi è sufficiente considerare solo le correlazioni con time lag positivo

$S_{yy}^+ =$  **half power spectra**

$$S_{yy}(\omega) = S_{yy}^+(\omega) + (S_{yy}^+(\omega))^H$$

**SCRITTURA DI  $S_{yy}^+(\omega)$  IN TERMINI DI DECOMPOSIZIONE MODALE**

$$[S_{yy}^+(j\omega)] = \sum \frac{(v_i)\langle g_i \rangle}{j\omega - \lambda_i} + \frac{(v_i^*)\langle g_i^* \rangle}{j\omega - \lambda_i^*}$$

A partire dalla **matrice delle misure** si riescono a determinare i **parametri modali** contenuti a secondo membro

➡ **METODI DI ESTRAZIONE MODALE**



## ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE

### PROGETTAZIONE DELLA MISURA

- DEFINIZIONE DEI PUNTI DI MISURA
- DEFINIZIONE DEL TIPO DI SENSORE
- DEFINIZIONE DEL SISTEMA DI ACQUISIZIONE
- DEFINIZIONE DELLA CATENA DI MISURA

### ESECUZIONE DELLA MISURA

- POSIZIONAMENTO DEI SENSORI
- SETTAGGIO DEI CANALI DI ACQUISIZIONE
- VERIFICA DEL SEGNALE
- LANCIO DELL'ACQUISIZIONE

### ANALISI

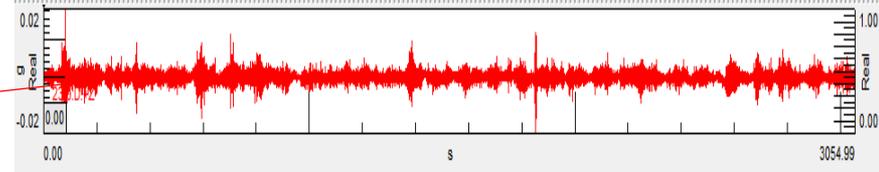
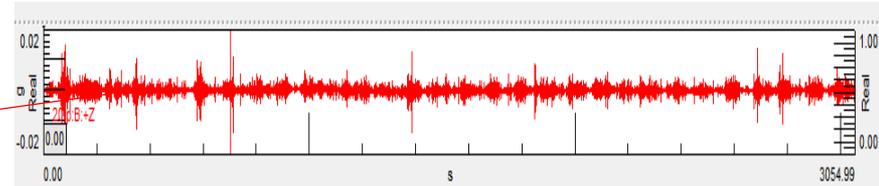
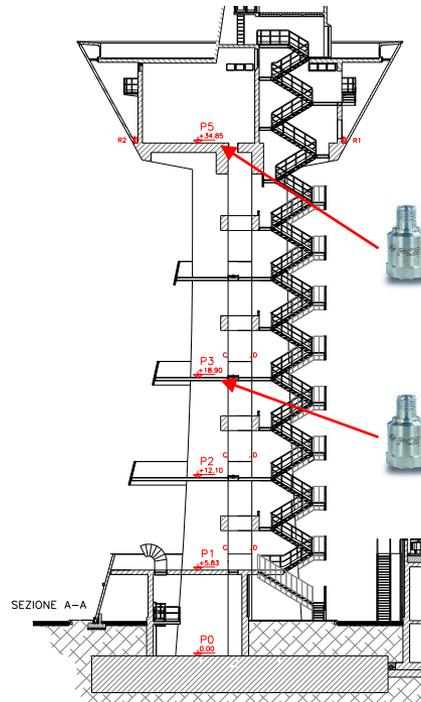
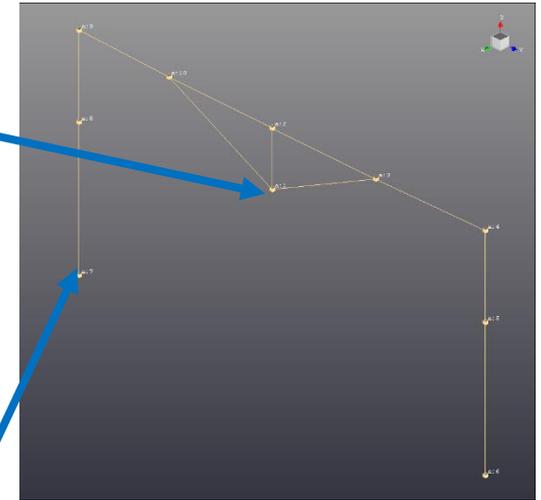
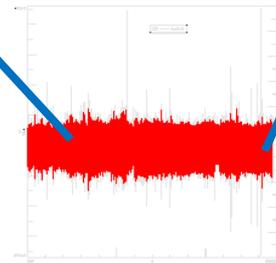
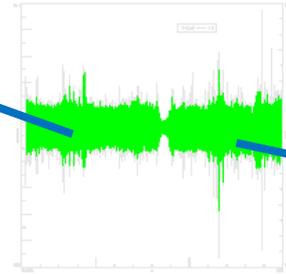
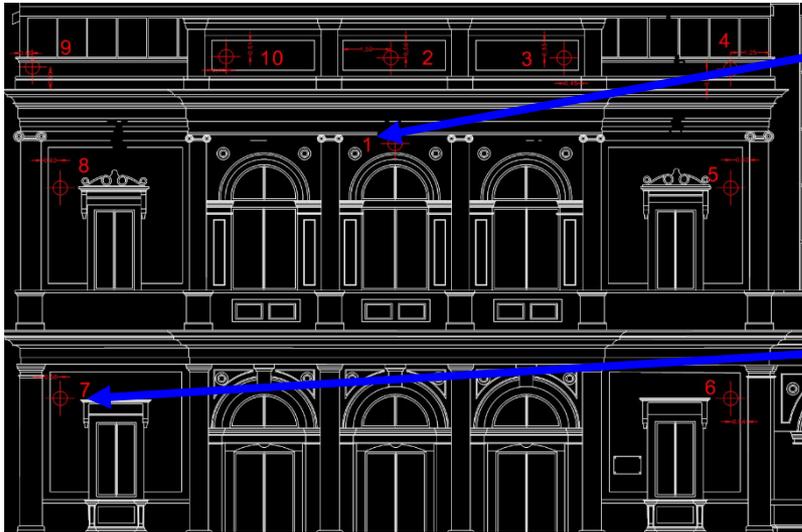
- POST POST-PROCESSAMENTO DEI DATI
- ESTRAZIONE MODALE
- VALIDAZIONE DEI PARAMETRI DETERMINATI

### VERIFICA RISPONDENZA CON PREVISIONI TEORICHE

- CONFRONTO CON RISULTATI MODELLO DI CALCOLO

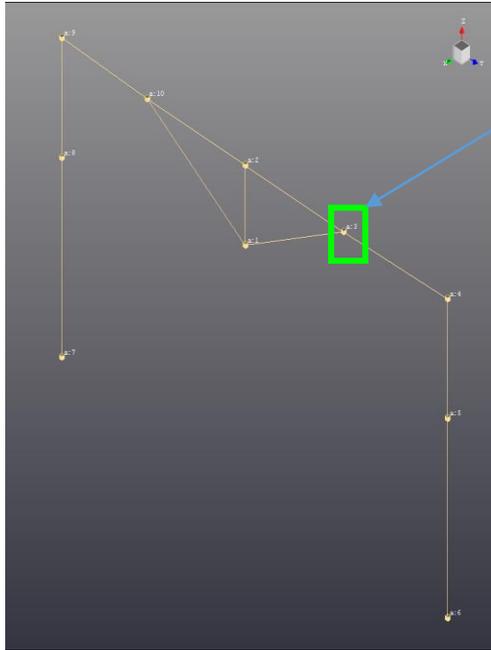


# SCHEMATIZZAZIONE CINEMATICA (modal model)





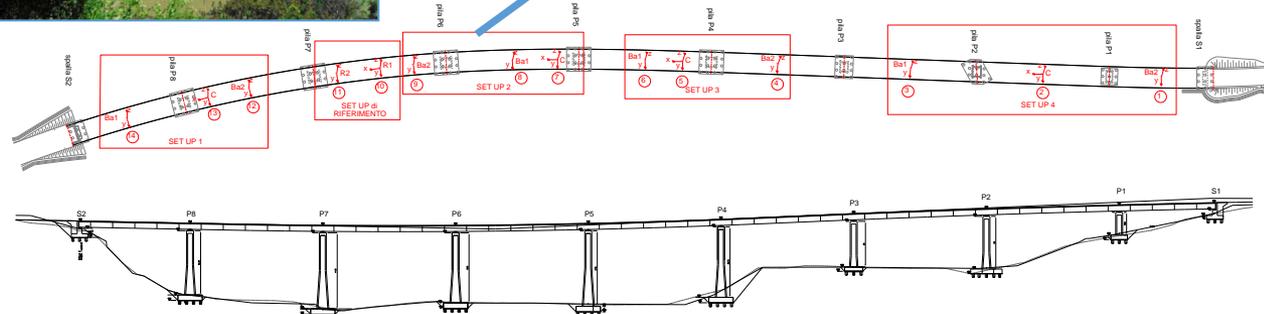
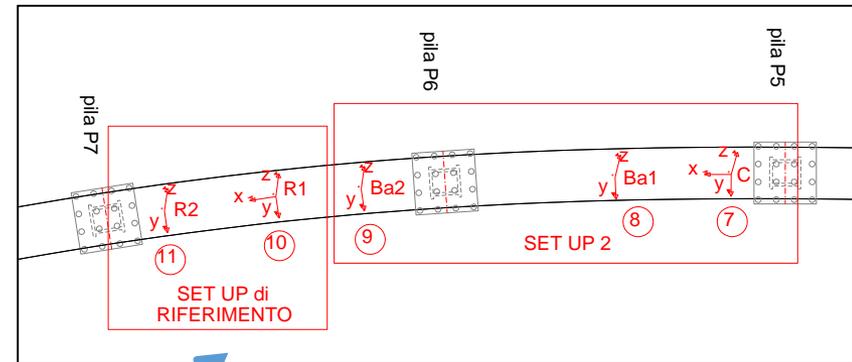
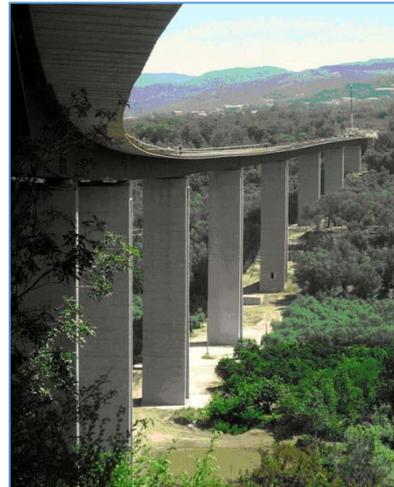
# MULTIRUN E PUNTI DI RIFERIMENTO



## REFERENCE

Il punto fisso o di riferimento (*reference*) è quel punto di misura rispetto al quale vengono calcolate le funzioni crosspettro (*cross power spectrum*) di tutti gli altri punti misurati nell'indagine.

Esso è utilizzato anche per effettuare la scalatura dei set di dati nei casi, come quello qui trattato, in cui si hanno più sessioni (*run*) di misura.



Esempio di acquisizione multirun per coprire un elevato numero di punti di misura dislocati lungo il manufatto, quale un ponte, con grande sviluppo in pianta.

Nel caso di acquisizioni multirun, si presta particolarmente l'impiego di più sistemi indipendenti, sincronizzati su tempo assoluto GPS.



# LMS TEST LAB - OPERATIONAL MODAL ANALYSIS



Metodo di estrazione SSI (non applicato)

Fase di validazione

Creazione e filtraggio dalla TH  
Selezione di un riferimento

Unione dei più set di misura a mezzo di riferimenti comune

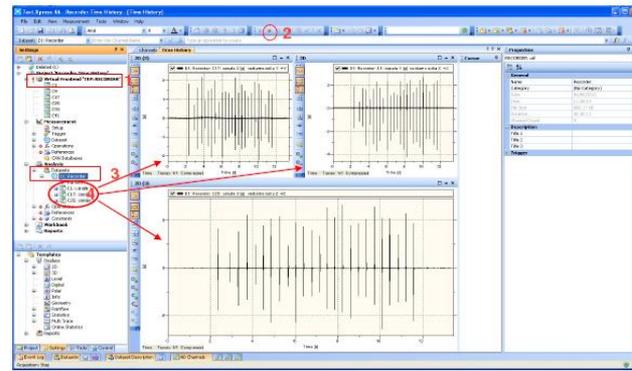


Creazione della geometria

Metodo di estrazione nel dominio delle frequenze

Selezione di un utile crosspower

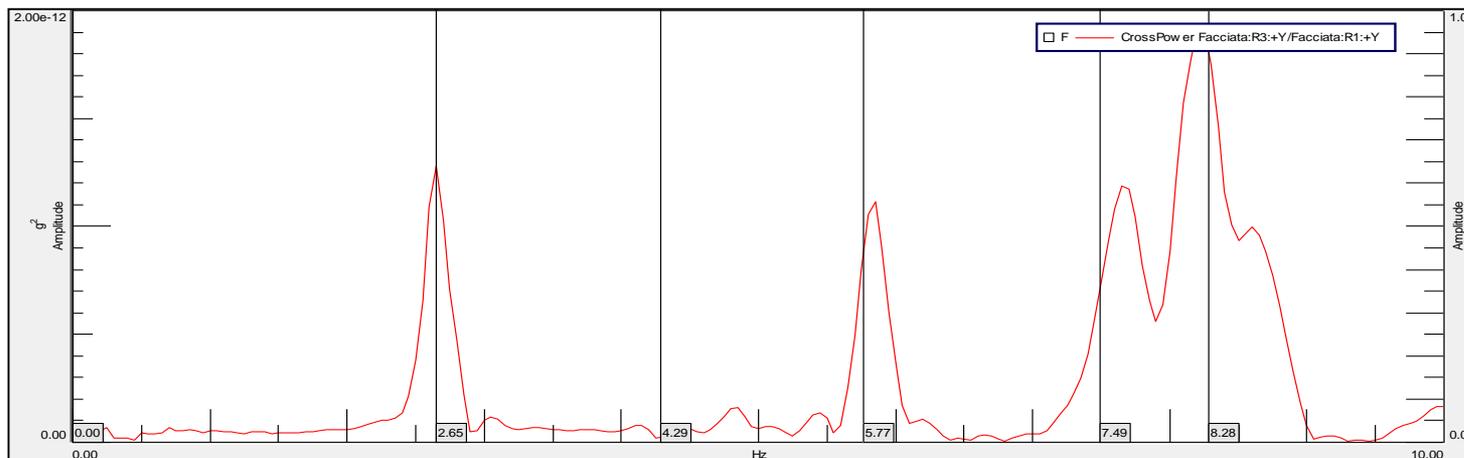
Confronto Synt&measured



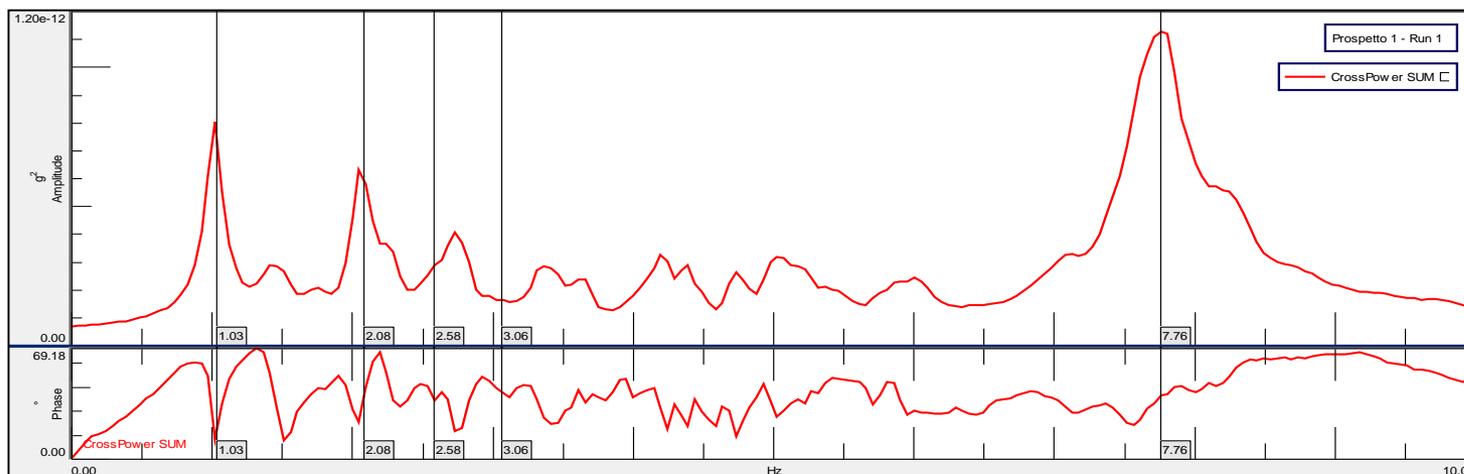


# CROSSPETTRI E FUNZIONE SOMMA

## FUNZIONE CROSSPETTRO DI UN SENSORE RISPETTO AD UN REFERENCE PRESELTO



## FUNZIONE SOMMA CROSPETTRI (AMPIEZZA E FASE)



**LA FUNZIONE SOMMA CROSPETTRI CONSENTE DI METTERE IN RISALTO LE RISPOSTE SIGNIFICATIVE DI TUTTI I PUNTI DI MISURA RISPETTO AL REFERENCE SCELTO PER L'ELABORAZIONE. SI INDIVIDUANO LE FREQUENZE SU CUI LA STRUTTURA RISULTA ECCITATA**

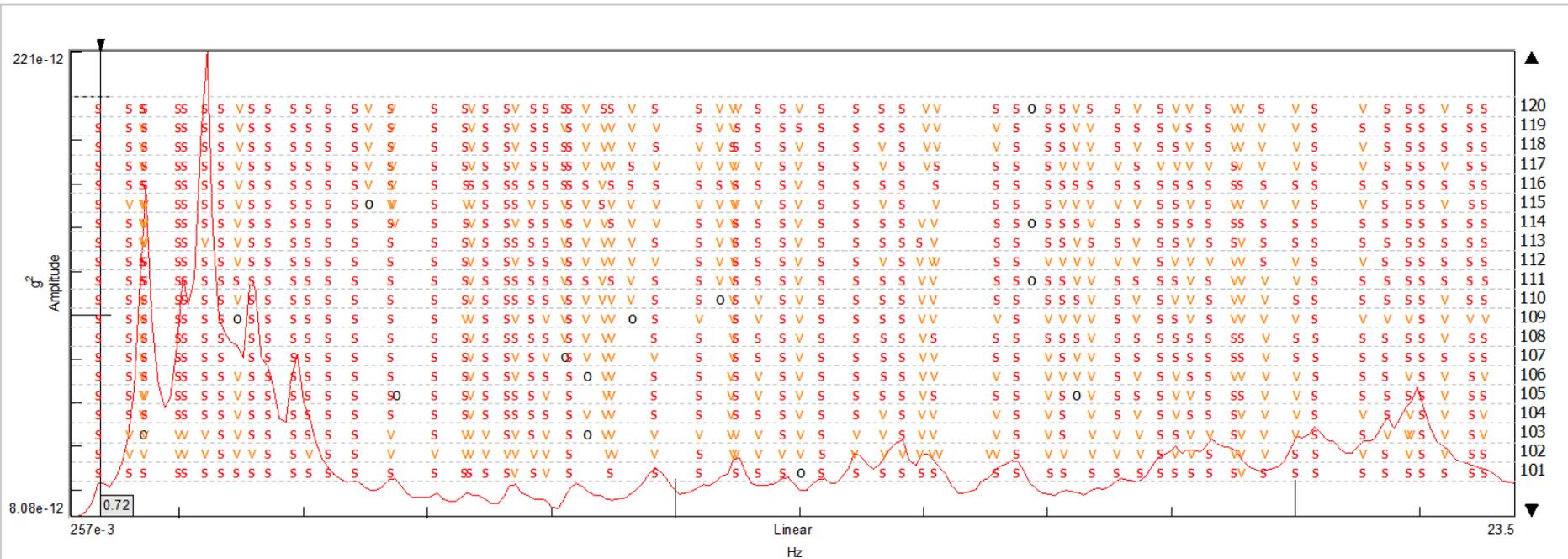


# POLYMAX E DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE

IL POLYMAX (ALGORITMO DI ESTRAZIONE MODALE IMPLEMENTATO NELLA SUITE LMS TEST-LAB) E' UN METODO DI ESTRAZIONE MODALE NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE E COSTITUISCE UNA EVOLUZIONE DEL METODO DI STIMA AI MINIMI QUADRATI NEL DOMINIO COMPLESSO (LSCF)

ORIGINARIAMENTE IL LSCF VENNE INTRODOTTO COME METODO DI STIMA DEI VALORI INIZIALI NEL METODO ITERATIVO DELLA MASSIMA VEROSIMIGLIANZA. SI È POI CONSTATATO CHE QUESTI "VALORI INIZIALI" ERANO IN GRADO DI PRODURRE PARAMETRI MODALI MOLTO PRECISI ED UN DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE MOLTO CHIARO. TUTTAVIA ESSO POTEVA ESSERE REALIZZATO SOLO IN RIFERIMENTO AI POLI.

IL POLYMAX VENNE QUINDI SVILUPPATO PER OTTENERE UN DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE PIU' COMPLETO, PIU' CHIARO, E CHE CONTENESSE INFORMAZIONI CIRCA LA STABILITA' NON SOLO DEI POLI MA ANCHE DELLE PARTECIPAZIONI MODALI E DEI VETTORI MODALI .



o: Stabilità del polo  
d: Stabilità dello smorzamento

v: Stabilità del vettore  
s: Stabilità totale



# CENNI SUL METODO DI ESTRAZIONE

IL METODO SI BASA SULLA DEFINIZIONE DEL POLINOMIO CHE MEGLIO APPROSSIMA, MEDIANTE MINIMIZZAZIONE DELL'ERRORE AI MINIMI QUADRATI, LA FUNZIONE FRF CONTENENTE I CROSSPETTRI CALCOLATI A PARTIRE DAI DATI MISURATI.

IL METODO E' ANCHE NOTO COME «RIGHT MATRIX-FRACTION MODEL» IN VIRTU' DELL'EQUAZIONE DI BASE

$$[H(\omega)] = [B(\omega)][A(\omega)]^{-1}$$

← Matrice dei crosspettri delle misure

↓ Matrice polinomiale del numeratore

→ Matrice polinomiale del denominatore

Le due matrici sono costituite da espressioni polinomiali tra funzioni di base (funzioni della frequenza) scelte ad hoc, per i coefficienti polinomiali incogniti

Si formula pertanto il problema scrivendo l'espressione dell'errore non lineare rappresentato dalla differenza tra la FRF misurata e la FRF costituita dall'espressione polinomiale.

Il goal è di determinare i coefficienti incogniti delle matrici che minimizzano l'errore tra la FRF misurata e la FRF calcolata.

## ESPRESSIONE DELL'ERRORE

$$e_0^{NLS} = w_0(\omega)(H_0(\omega_k, \theta) - \hat{H}_0(\omega_k))$$

In cui  $H_0(\omega_k, \theta)$  è la matrice FRF incognita ( $\theta$  racchiude i coefficienti incogniti delle matrici B ed A)

$\hat{H}_0(\omega_k)$  è la matrice FRF delle misure

Il pedice 0 indica che tale errore viene scritto per ciascuno degli output (punti di misura) del sistema.



# CENNI SUL METODO DI ESTRAZIONE

$$e_0^{NLS} = w_0(\omega)(H_0(\omega_k, \theta) - \hat{H}_0(\omega_k))$$

MINIMIZZANDO L'ERRORE RISPETTO AI COEFFICIENTI INCOGNITI SI DETERMINANO LE COMPONENTI POLINOMIALI CHE COSTITUISCONO LE DUE MATRICI A E B.

$$[H(\omega)] = [B(\omega)][A(\omega)]^{-1} = S_{yy}(j\omega)$$

DAL CONFRONTO TRA L'ESPRESSIONE POLINOMIALE DETERMINATA CON L'ESPRESSIONE DI H, SCRITTA SECONDO LA DECOMPOSIZIONE MODALE - TRAMITE TECNICHE DI RISOLUZIONE AGLI AUTOVALORI/AUTOVETTORI E AI MINIMI QUADRATI - SI DETERMINANO I PARAMETRI MODALI DEL SISTEMA

$$[S_{yy}^+(j\omega)] = \sum \frac{(v_i) \langle g_i \rangle}{j\omega - \lambda_i} + \frac{(v_i^*) \langle g_i^* \rangle}{j\omega - \lambda_i^*}$$

SI COSTRUISCE IL DIAGRAMMA DI STABILIZZAZIONE PER IDENTIFICARE QUALI SIANO LE FREQUENZE CORRISPONDENTI A MODI PROPRI E QUALI QUELLE CORRISPONDENTI A MODI NUMERICI

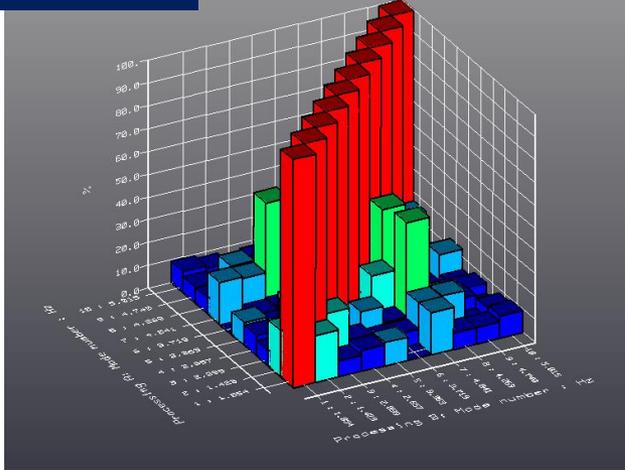
SI CONFRONTANO I POLI OTTENUTI PER UN CERTO ORDINE MODALE CON I POLI OTTENUTI CON UN ORDINE MODALE INFERIORE VERIFICANDO CHE LA DIFFERENZA È CONTENUTA ENTRO UN CERTO LIMITE DI TOLLERANZA. IN TAL CASO IL POLO È CONSIDERATO STABILE.

ANALOGAMENTE PER LE ALTRE GRANDEZZE (SMORZAMENTO, VETTORE, STABILITÀ COMPLESSIVA)



# VALIDAZIONE

## AUTOMAC



Il **MAC** (Modal Assurance Criterion) rappresenta il confronto eseguito tra due set di modi individuati, magari con differenti tecniche, per una stessa struttura. Se il MAC è pari all'unità, i vettori corrispondenti a due modi di vibrare sono perfettamente identici nell'ambito di un fattore di scala.



Un'estensione del MAC è rappresentata dall'**AutoMAC** in cui un set di vettori di forme modali sono correlati con se stessi. La diagonale centrale rappresenta il riferimento di un modo a se stesso, ovviamente pari all'unità. Gli altri elementi della matrice rappresentano le correlazioni tra i vari vettori (modi). Il fatto che gli elementi fuori della diagonale siano sufficientemente inferiori all'unità sta ad indicare l'indipendenza lineare tra gli stessi e quindi la bontà dell'estrazione effettuata

Il Mean Phase Deviation (**MPD**) è un indice che statisticamente indica lo scostamento della fase per ogni deformata rispetto al valore medio misurato su tutti i modi presi in considerazione. L'indicatore MPD assume valori di angolo prossimi a zero per modi reali.

## COMPLEXITY

L'indicatore **MPC** (Modal Phase Collinearity) rappresenta un indice della relazione che intercorre tra la parte reale e immaginaria del vettore relativo ad un generico modo. Questo indicatore assume valori alti (maggiori del 70%) per modi prettamente reali, cioè caratteristici di strutture debolmente smorzate e con una distribuzione uniforme del grado di smorzamento.

Compact Mode Complexity				
	Property Reference	Frequency	MPC (%)	MPD (°)
1	Mode1	4.082 Hz	38.462	54.982
2	Mode2	9.490 Hz	81.798	34.414
3	Mode3	15.088 Hz	89.938	23.609
4	Mode4	23.375 Hz	75.662	34.498



# IMPIEGO DELL'OMA



**COLLAUDO** DINAMICO VOLTO ESSENZIALMENTE AL CONFRONTO TRA PARAMETRI MODALI SPERIMENTALI CON QUELLI DI PROGETTO



**VULNERABILITA'** SISMICA INTESA COME CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE FINALIZZATA ALLA DETERMINAZIONE DEI PERIODI PROPRI DA CONFRONTARE CON QUELLI DESUMIBILI DAL GRIGLIATO NAZIONALE DI ZONAZIONE SISMICA



IDENTIFICAZIONE MODALE ATTA ALLA **CALIBRAZIONE** DI UN MODELLO FEM DI UNA STRUTTURA ESISTENTE CON SCARSE INFORMAZIONI RIGUARDANTI GLI ASPETTI PROGETTUALI



**MONITORAGGIO**, OSSIA VERIFICHE PERIODICHE A CADENZA PROGRAMMATA PER INDIVIDUARE VARIAZIONI NEI PARAMETRI MODALI, FORIERI DI MODIFICAZIONI STRUTTURALI



ANALISI DEL **DANNO** A MEZZO DEL MERO CONTROLLO VISIVO DELLE FORME MODALI



# VULNERABILITA' SISMICA



PONTE RISORGIMENTO (RM)



PONTE IN CEMENTO ARMATO SUL TEVERE A ROMA. È STATO INAUGURATO NEL 1911, IN OCCASIONE DEI 50 ANNI DELL'UNITÀ D'ITALIA, E COSTRUITO SU BREVETTO HENNEBIQUE. HA UN'UNICA ARCATA DI 100 m DI CORDA E CON FRECCIA DI 10 m.



L'ACQUEDOTTO CLAUDIO LA CUI COSTRUZIONE E' STATA AVVIATA NEL 38 D.C. DALL'IMPERATORE CALIGOLA E' UNO DEI PIU' IMPORTANTI DELLA ROMA ANTICA



ACQUEDOTTO CLAUDIO (RM)



TEATRO DI AMITERNUM (AQ)

L'ANFITEATRO ROMANO DI AMITERNUM ERA IL PRINCIPALE ANFITEATRO DELL'ANTICA CITTÀ SABINA DI AMITERNUM, I CUI RESTI ARCHEOLOGICI SONO SITUATI NEI PRESSI DELL'ABITATO DI SAN VITTORINO NEL TERRITORIO COMUNALE DELL'AQUILA.



# ACQUEDOTTO CLAUDIO



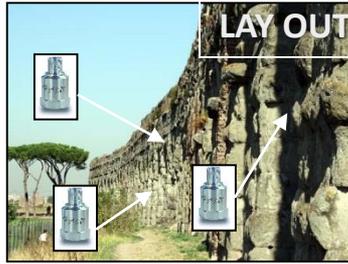
SISMICA A RIFRAZIONE

MASW

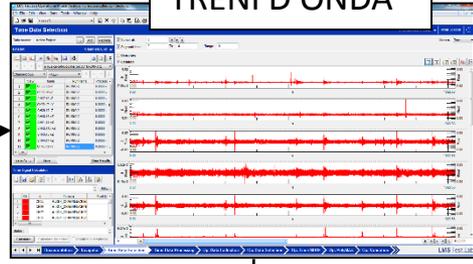
STRATIGRAFIA

V<sub>s30</sub>

$$V_{s30} = \frac{30}{\sum_{i=1}^n H_i / V_i}$$

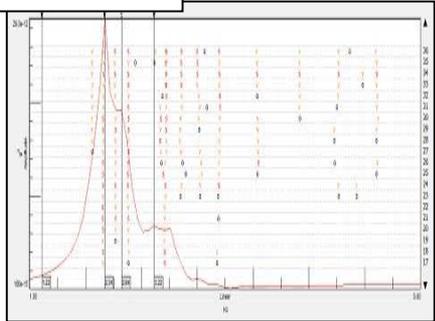


LAY OUT



TRENI D'ONDA

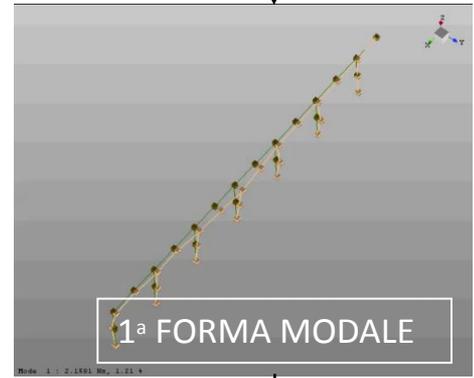
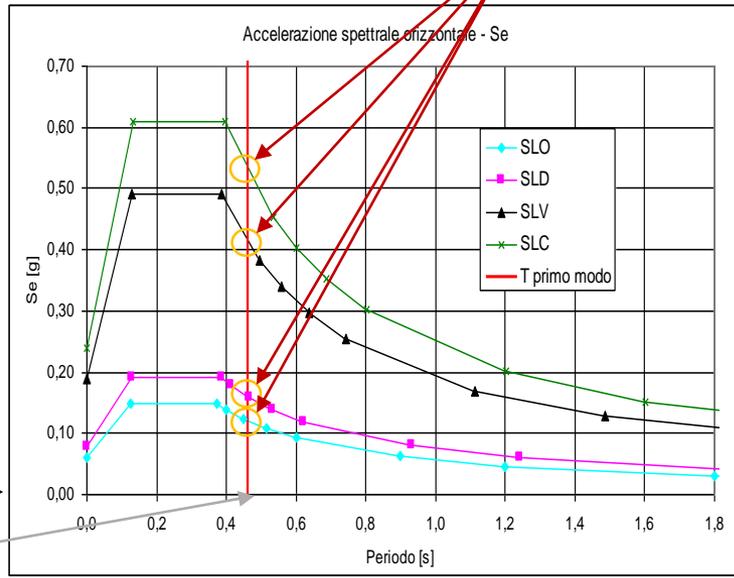
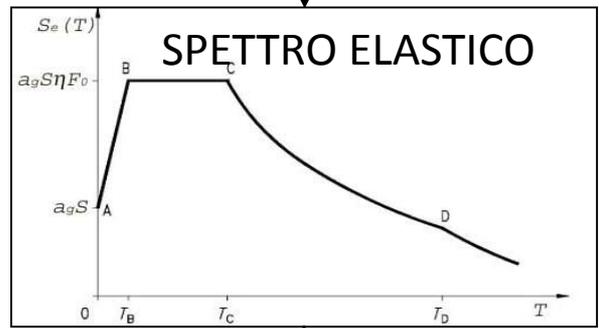
STABILIZZAZIONE



CLASSIFICAZIONE DEL SOTTOSUOLO

S<sub>s</sub>  
Coefficiente di amplificazione stratigrafica

ACCELERAZIONI MASSIME SUL MANUFATTO IN CASO DI SISMA



1ª FORMA MODALE

PERIODO FONDAMENTALE

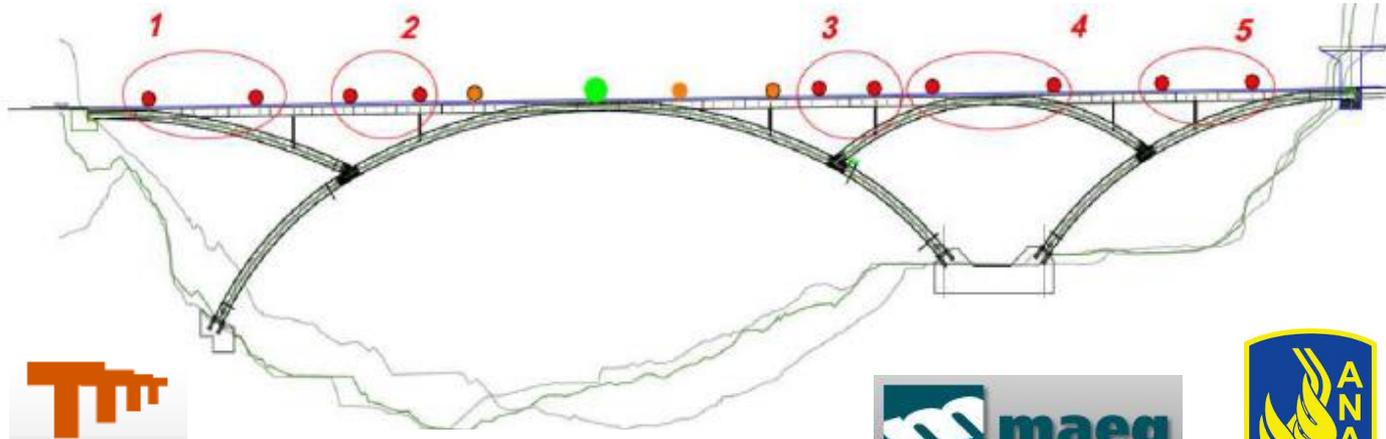


# COLLAUDO DINAMICO

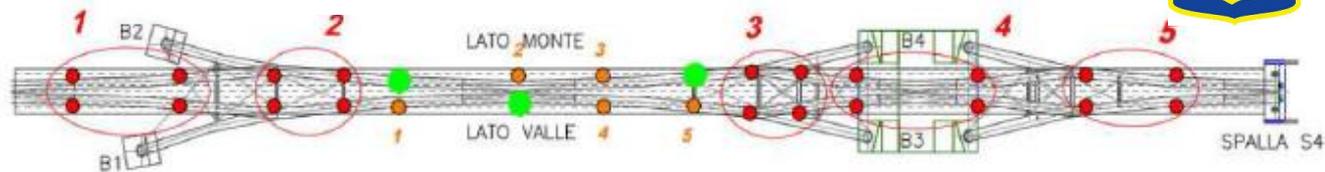




# PONTE ANAS SULLA VALNERINA (TR)



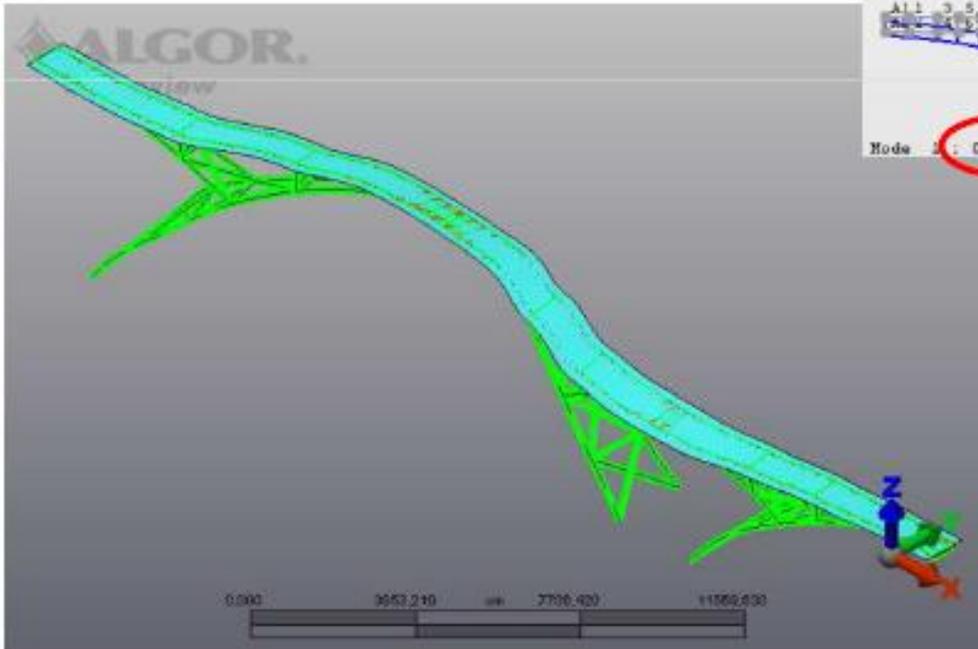
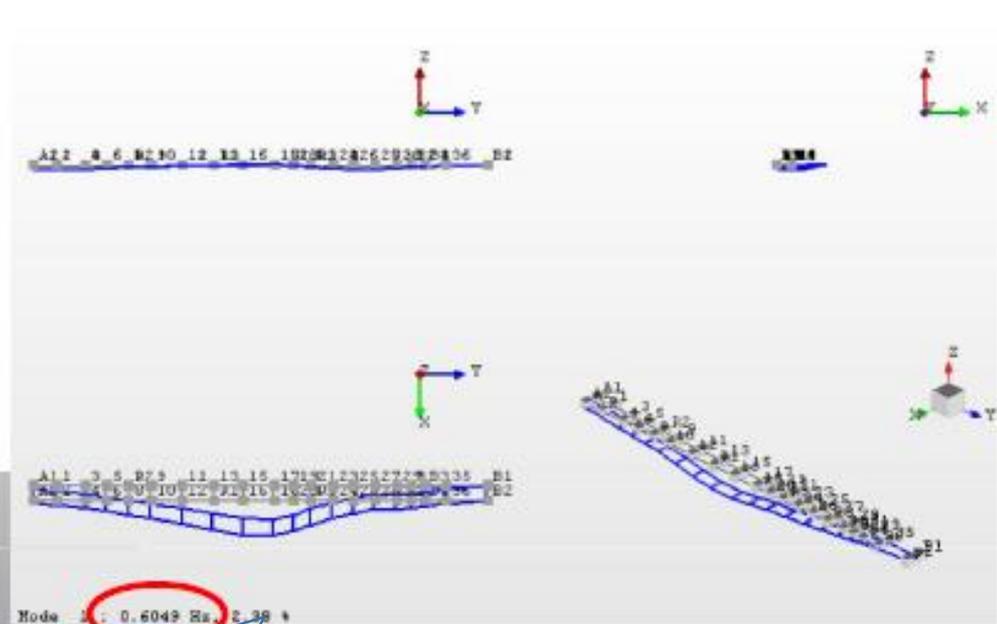
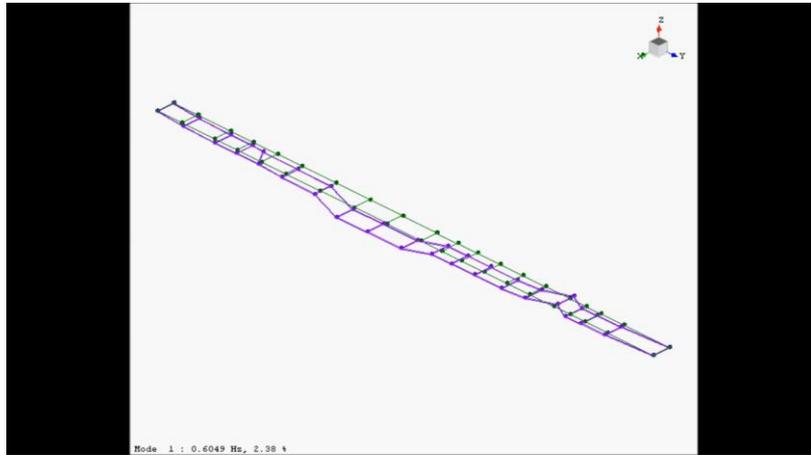
MATILDI+PARTNERS





# PONTE ANAS SULLA VALNERINA (TR)

CONFRONTO TRA PRIMA FREQUENZA SPERIMENTALE E PRIMA FREQUENZA TEORICA DETERMINATA CON IL SOLUTORE ALGOR

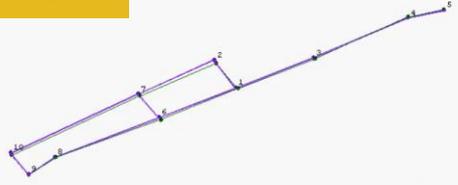


mode number	circular frequency (rad/sec)	frequency (Hertz)	period (sec)
1	3.5810E+00	5.6993E-01	1.7546E+00
2	4.1138E+00	6.5472E-01	1.5274E+00
3	5.5032E+00	8.7585E-01	1.1417E+00
4	5.8737E+00	9.3482E-01	1.0697E+00
5	6.9102E+00	1.0998E+00	9.0926E-01
6	6.9538E+00	1.1067E+00	9.0356E-01
7	8.0142E+00	1.2755E+00	7.8400E-01
8	8.2798E+00	1.3178E+00	7.5886E-01



# PONTE DELLA MUSICA (RM)

MODO 1

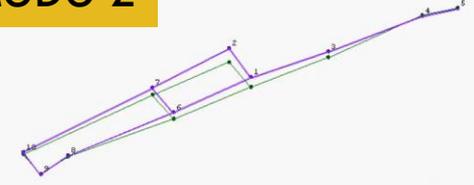


$f_1=0,97 \text{ Hz} - \zeta=0,94\%$



ROMA CAPITALE

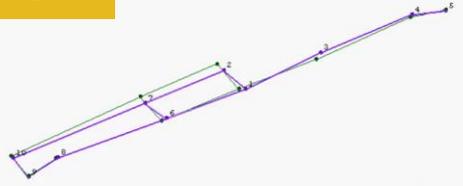
MODO 2



$f_2=1,29 \text{ Hz} - \zeta=3,51\%$



MODO 4



$f_4=1,97 \text{ Hz} - \zeta=0,36\%$



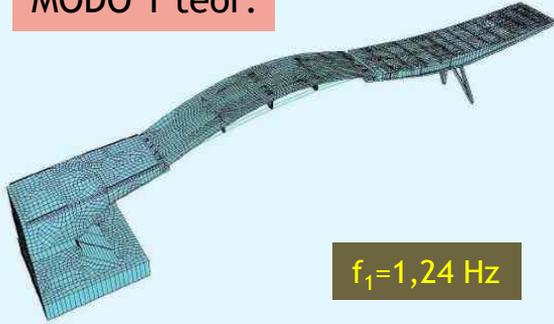
	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]
Modo 1	0,97	0,94
Modo 2	1,29	3,51
Modo 3	1,62	0,82
Modo 4	1,97	0,36
Modo 5	2,92	0,55
Modo 6	3,45	0,50
Modo 7	3,66	0,50
Modo 8	4,76	0,83



# PONTE DELLA SCIENZA (RM)

MODO 1 teor.

SOFIStIK

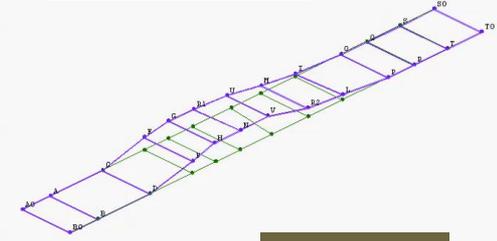


$f_1=1,24$  Hz



MODO 1 sper.

X  
Y  
Z

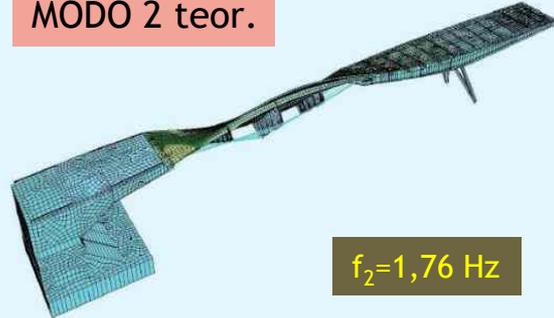


$f_1=1,38$  Hz

Mode 1 : 1.3762 Hz, 0.68 %

MODO 2 teor.

SOFIStIK

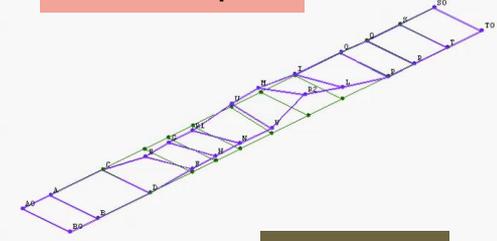


$f_2=1,76$  Hz

LE PRIME DUE FREQUENZE MISURATE RISULTANO MEDIAMENTE (CIRCA UN 10%) MAGGIORI DI QUELLE DI CALCOLO

MODO 2 sper.

X  
Y  
Z

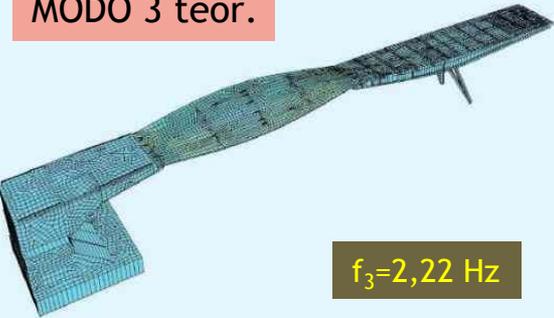


$f_2=1,92$  Hz

Mode 2 : 1.9177 Hz, 1.85 %

MODO 3 teor.

SOFIStIK

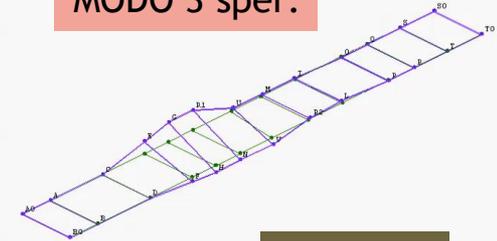


$f_3=2,22$  Hz



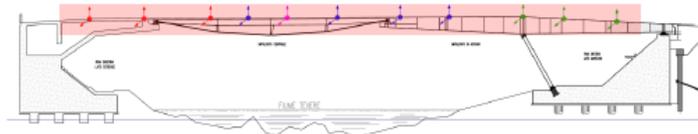
MODO 3 sper.

X  
Y  
Z



$f_3=2,16$  Hz

Mode 3 : 2.1654 Hz, 0.28 %





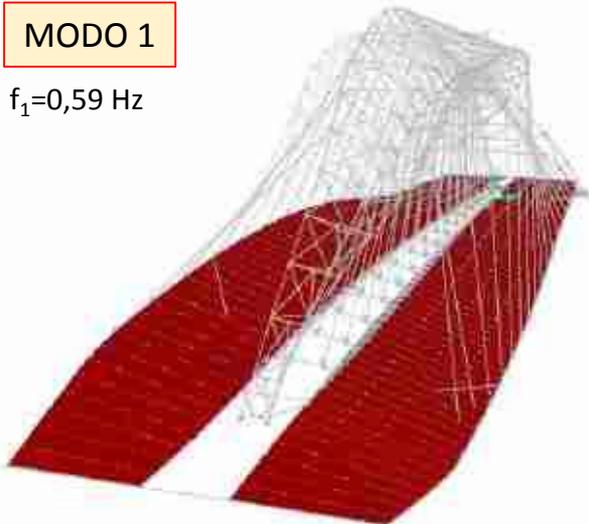
# CAVALCAFERROVIA SPIZZICHINA (RM)

## FORME MODALI TEORICHE



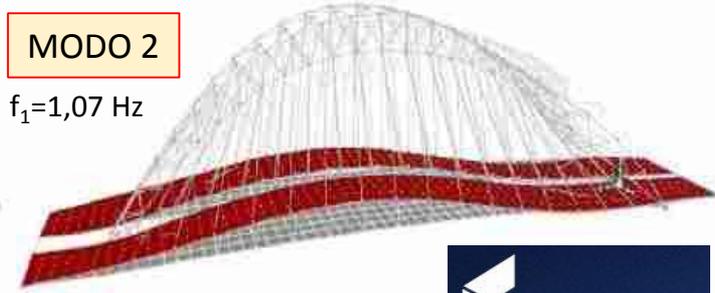
**MODO 1**

$f_1=0,59$  Hz



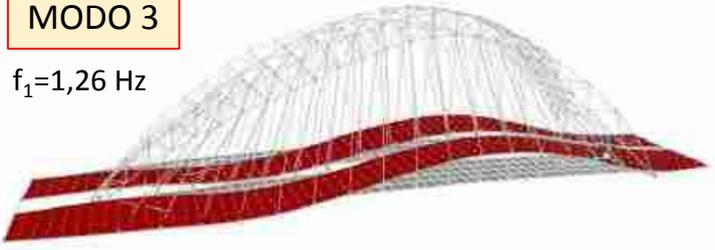
**MODO 2**

$f_1=1,07$  Hz



**MODO 3**

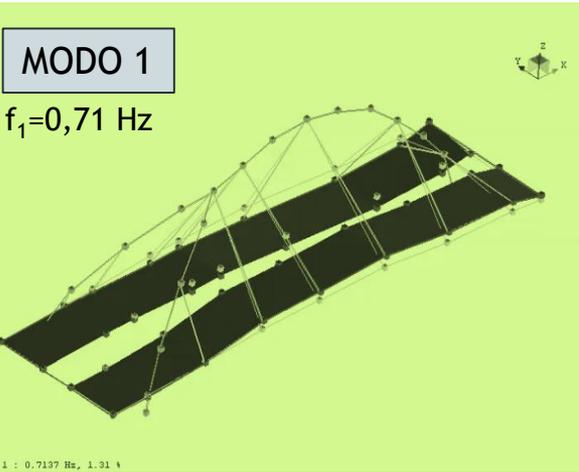
$f_1=1,26$  Hz



## FORME MODALI SPERIMENTALI

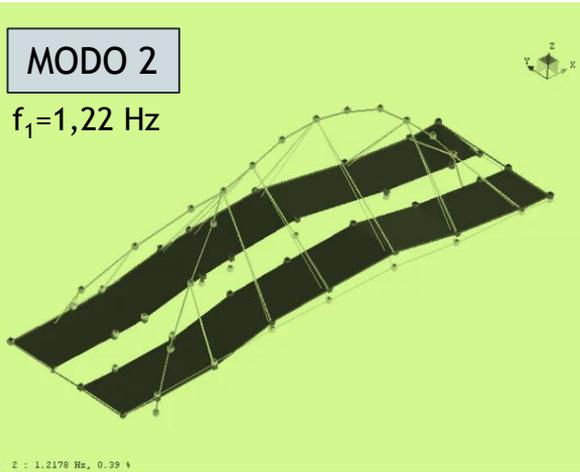
**MODO 1**

$f_1=0,71$  Hz



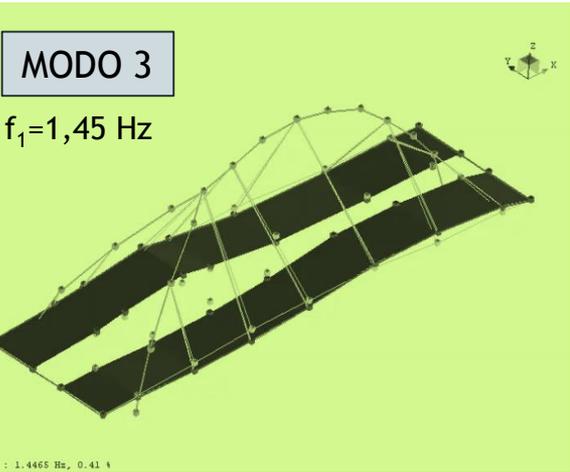
**MODO 2**

$f_1=1,22$  Hz



**MODO 3**

$f_1=1,45$  Hz



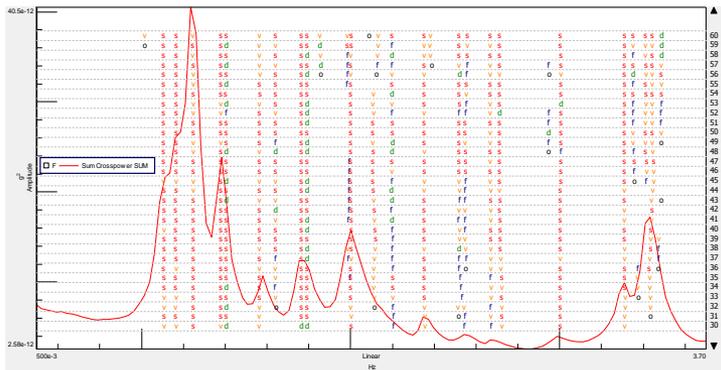
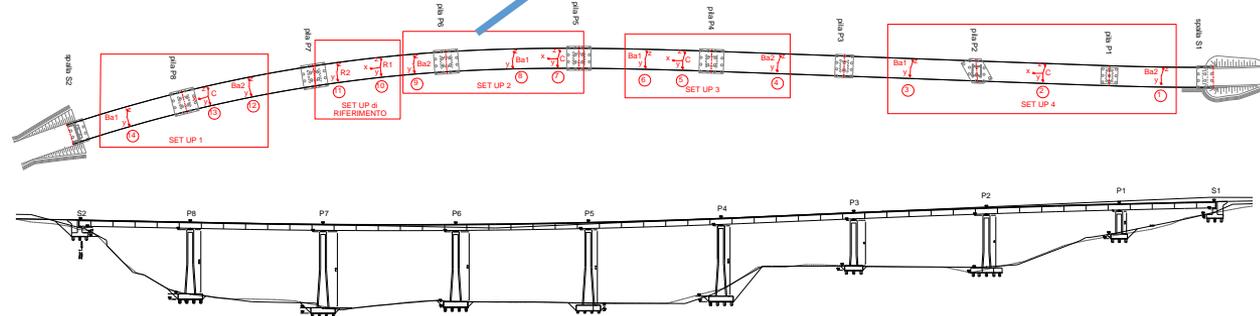
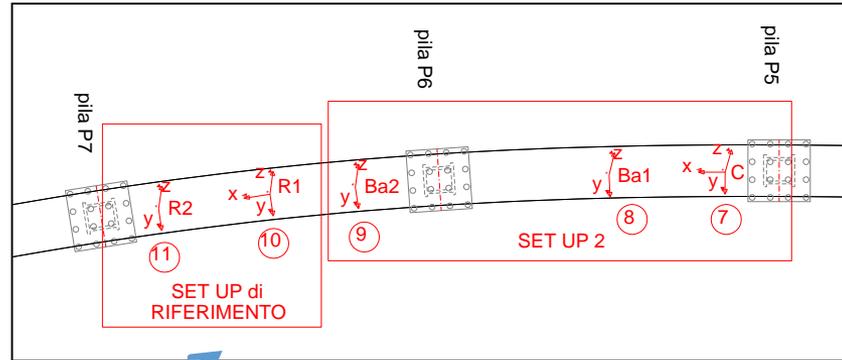
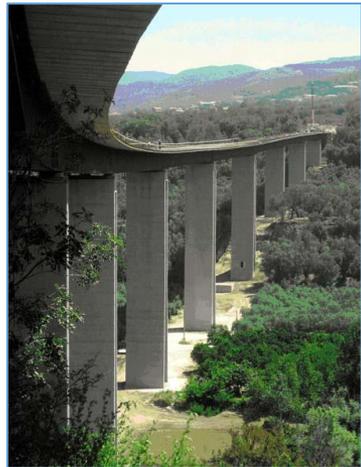
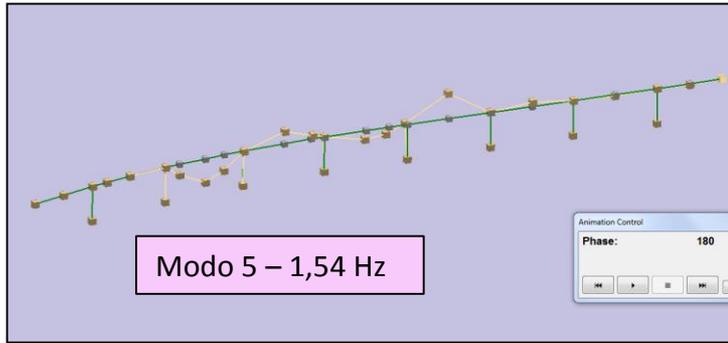
Mode 1 : 0.7137 Hz, 1.31 %

Mode 2 : 1.2178 Hz, 0.39 %

Mode 3 : 1.4465 Hz, 0.41 %

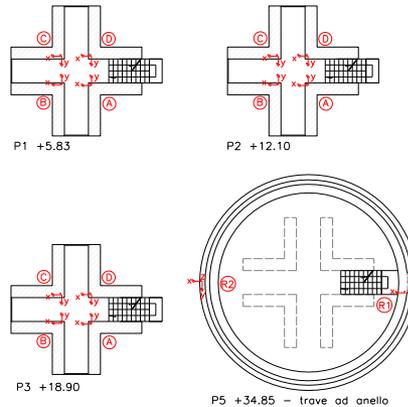
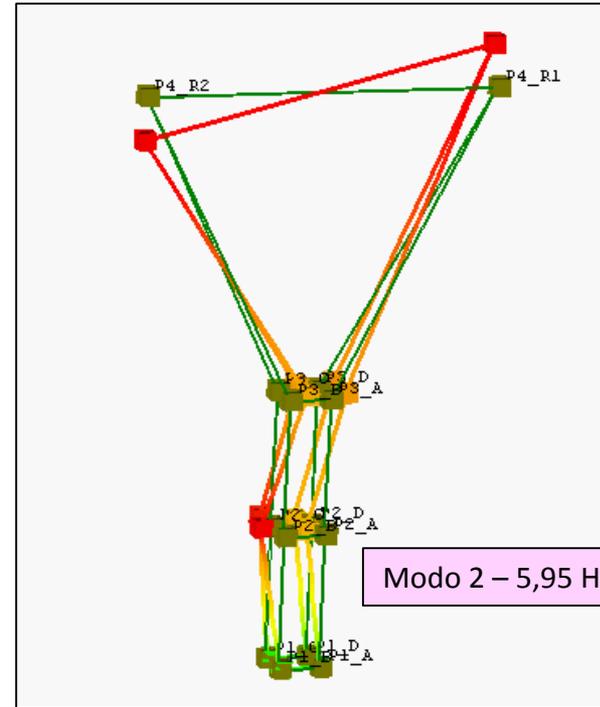
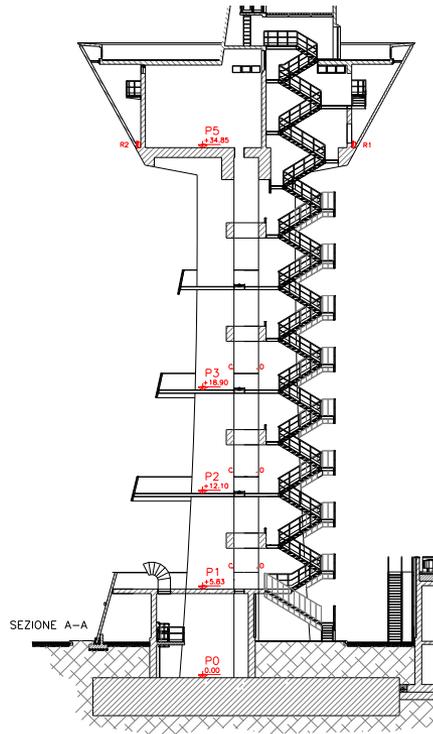


# VIADOTTO VARCALE (RC)



	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]
<b>Modo 1</b>	0.99	1.42
<b>Modo 2</b>	1.13	1.20
<b>Modo 3</b>	1.26	1.00
<b>Modo 4</b>	1.37	0.70
<b>Modo 5</b>	1.54	0.85
<b>Modo 6</b>	1.75	0.92
<b>Modo 7</b>	2.02	1.63
<b>Modo 8</b>	2.40	0.78
<b>Modo 9</b>	2.72	0.80

# TORRE PIEZOMETRICA ACEA (RM)



# CALIBRAZIONE DI MODELLI FEM

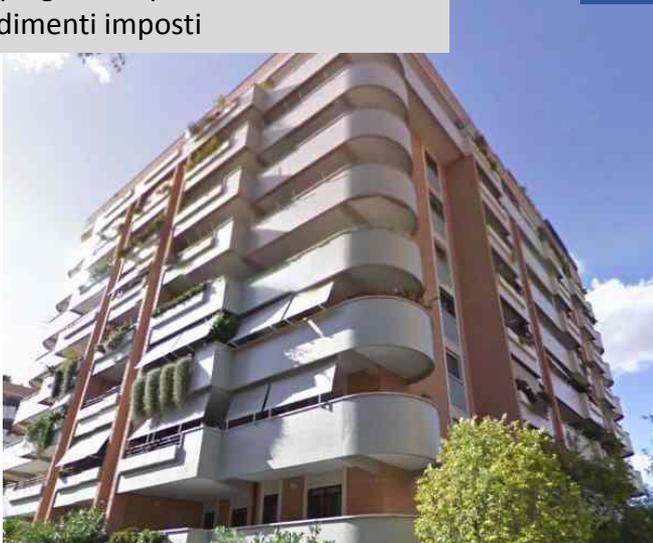


Taratura dei modelli FEM al fine effettuare analisi dei manufatti in condizioni post-sisma



Calibrazione di un modello FEM da impiegare per analisi con cedimenti imposti

EDIFICIO SEDE DELLA MSD ITALIA (RM)



EDIFICIO IN VIALE CITTA' D'EUROPA 646 - RM

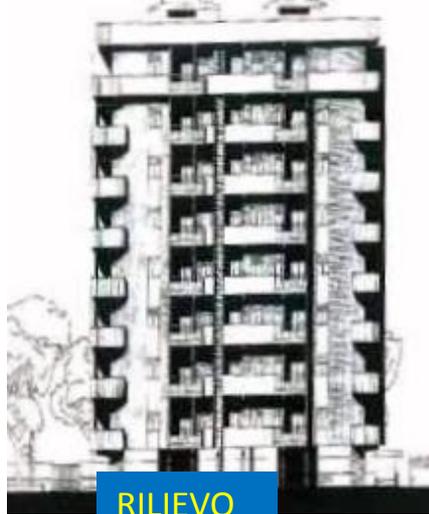
Calibrazione di un modello FEM per la verifica di una struttura esistente in c.a. priva di progetto



OSSATURA C.A. A MONTECOMPATRI (RM)

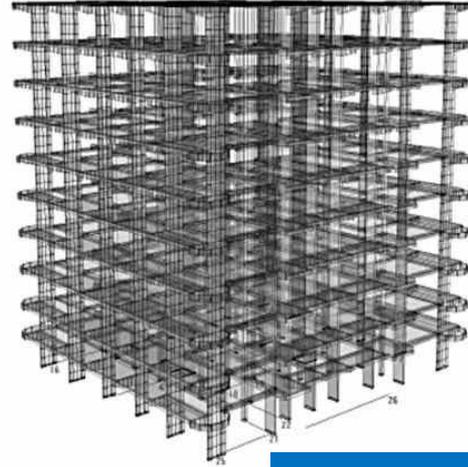


# EDIFICIO VIALE CITTA' D'EUROPA , 641 - (RM)

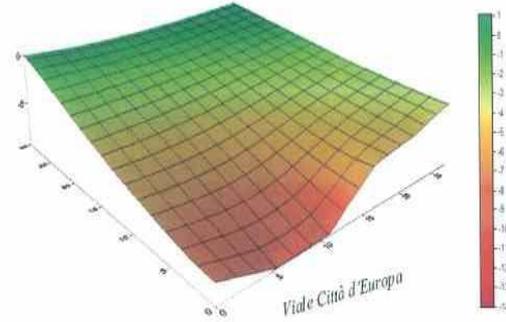


RILIEVO

MODELLO FEM

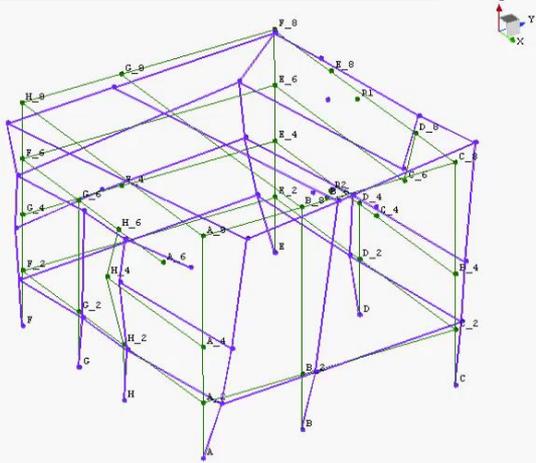


Andamento dei cedimenti relativi [mm] - monitoraggio Gennaio 2009



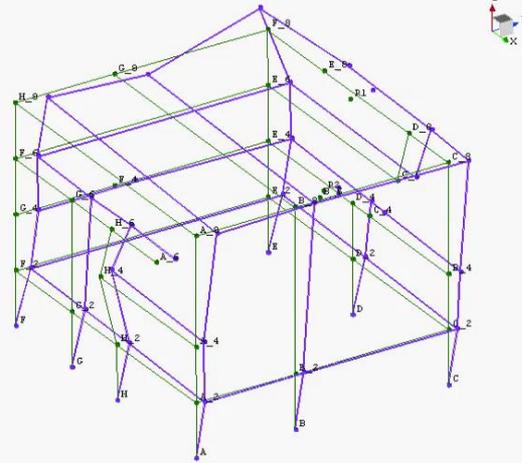
MAPPATURA CEDIMENTI DA LIVELLAZIONE

PRIMA MODALE TORSIONALE

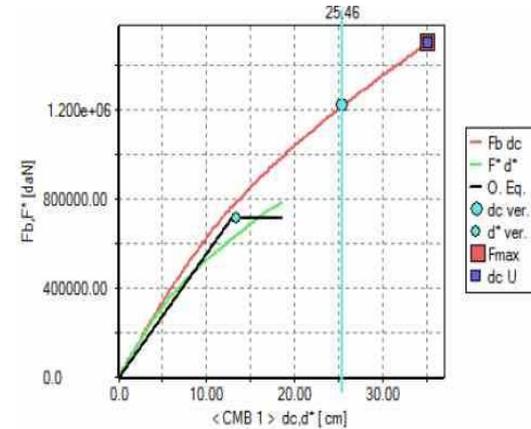


Mode 1 : 1.7711 Hz, 0.86 %

PRIMA MODALE FLESSIONALE



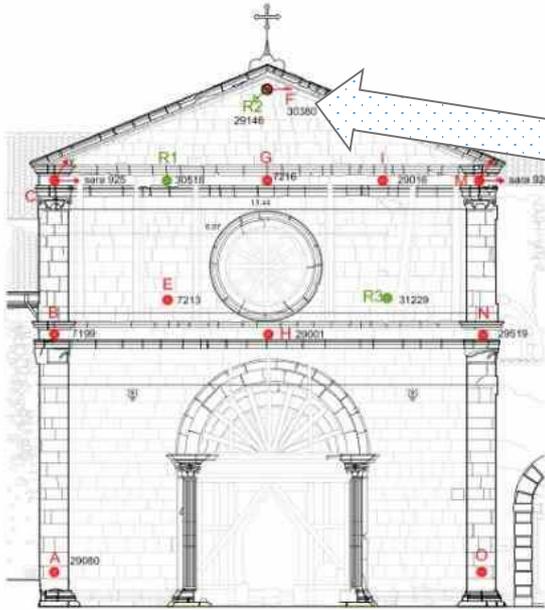
Mode 2 : 1.9235 Hz, 3.27 %



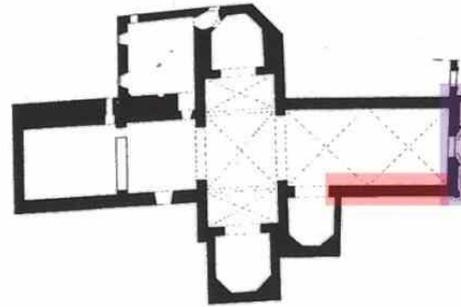
ANALISI PUSHOVER



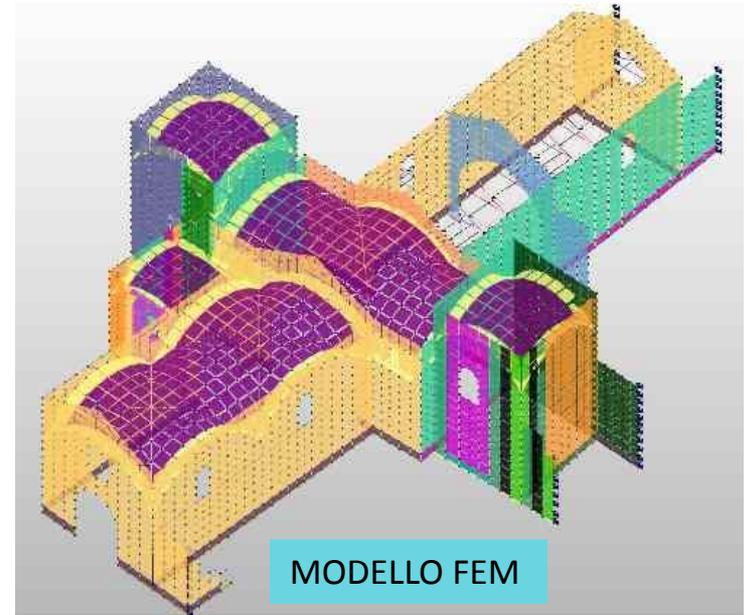
# CHIESA SANTA MARIA DEL SOCCORSO (AQ)



RUN 1



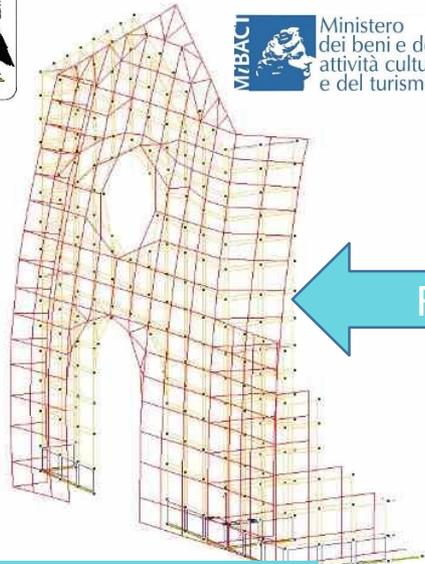
■ Facciata ■ Prospetto laterale



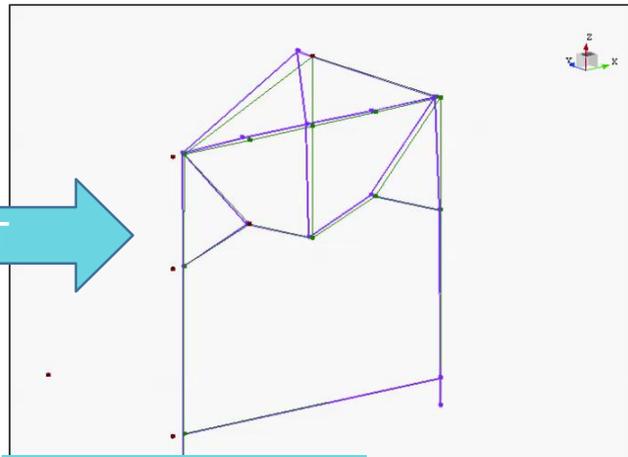
MODELLO FEM



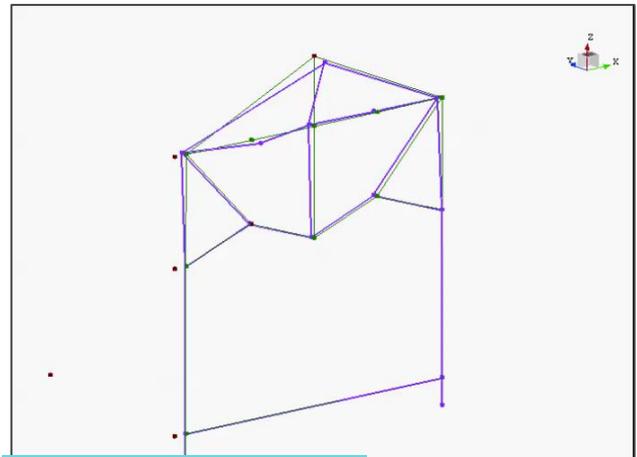
Ministero dei beni e delle attività culturali e del turismo



PRIMO MODO TEORICO



MODO 1  $f_1=3,70$  Hz



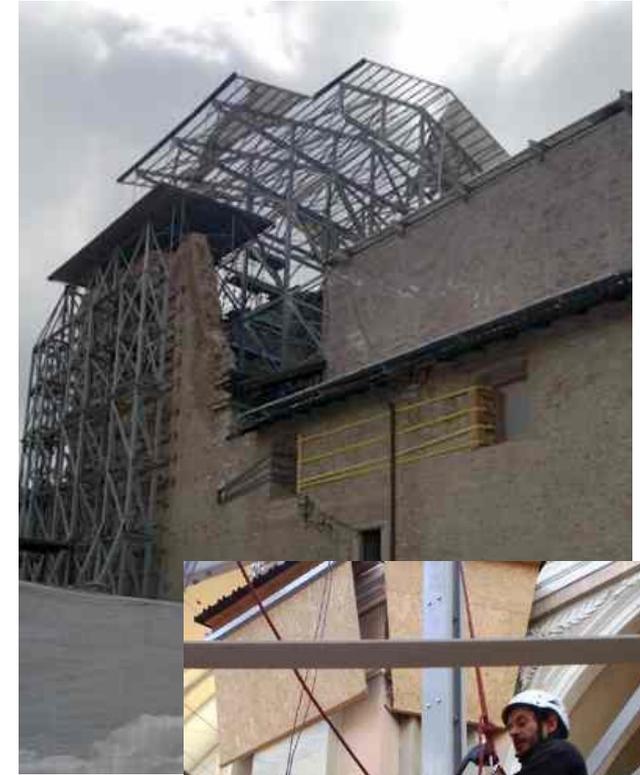
MODO 2  $f_2=4,10$  Hz



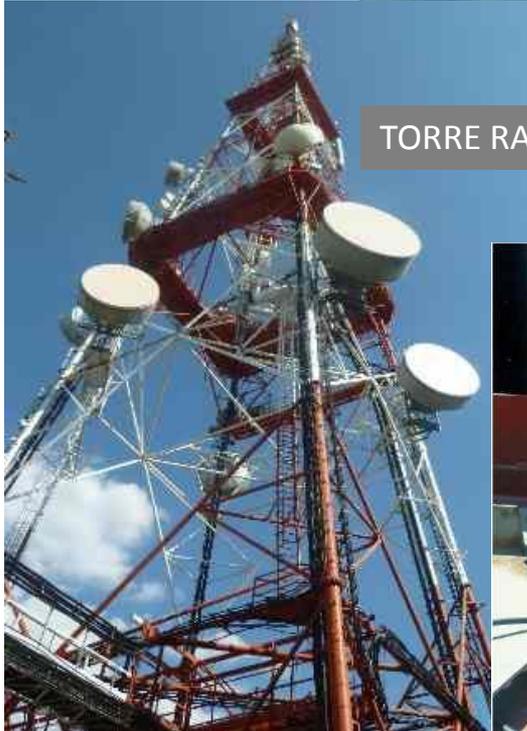
# MONITORAGGIO



VIADOTTO BARTOLI (FR)



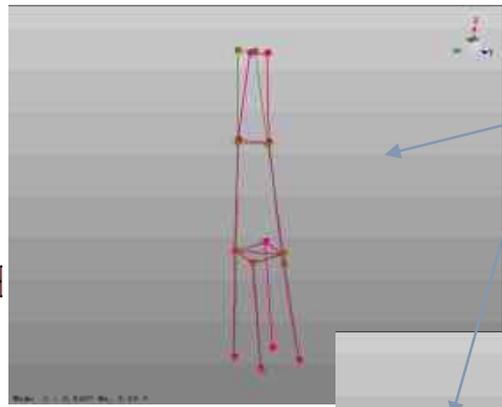
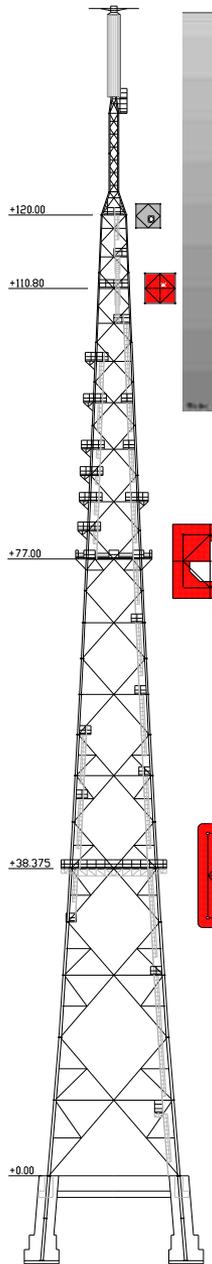
STRUTTURA IN FRP DI SOSTEGNO  
COPERTURA CHIESA DI S.MARIA  
PAGANICA (AQ)



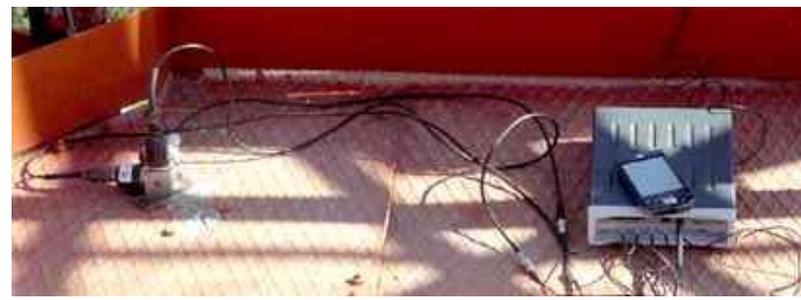
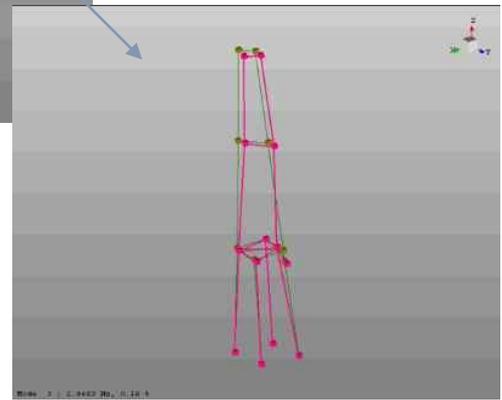
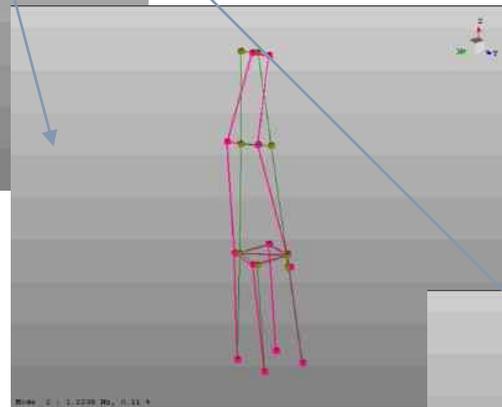
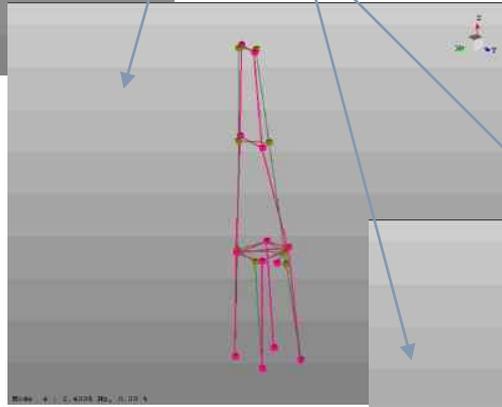
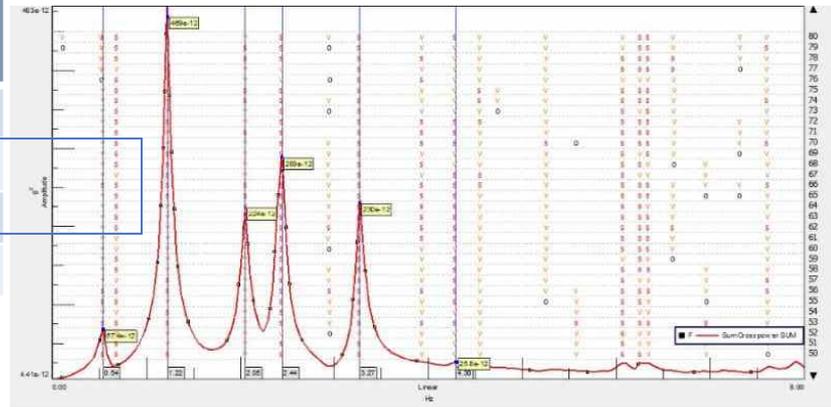
TORRE RAI WAY MONTE MARIO (RM)



# TORRE RAI MONTEMARIO (RM)



	f [Hz]	$\zeta$ [%]
Modo 1	0,54	1,26
Modo 2	1,22	0,47
Modo 3	2,08	0,26
Modo 4	2,44	0,24



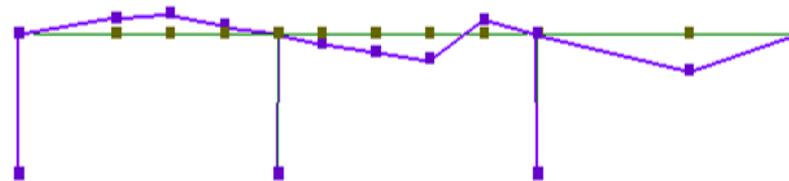


# VIADOTTO ALTA VELOCITA' VI39 BARTOLI (FR)



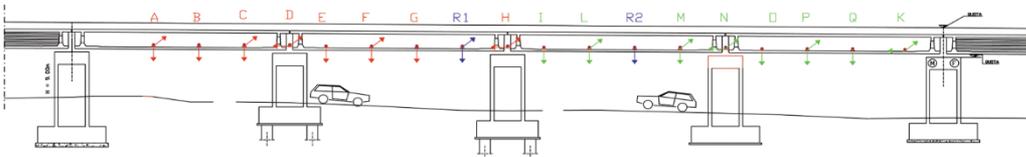
## CONFRONTO FORME MODALI

Acquisizione Marzo '13

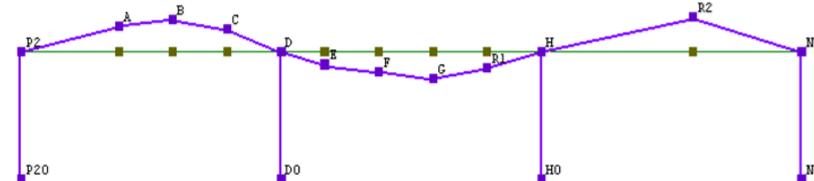


Primo modo -  $f = 8,49$  Hz

### DISPOSIZIONE STRUMENTI



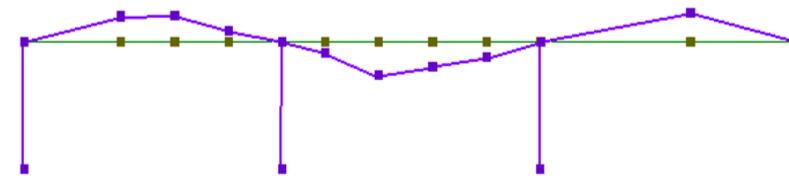
Acquisizione Maggio '13



Primo modo -  $f = 8,47$  Hz

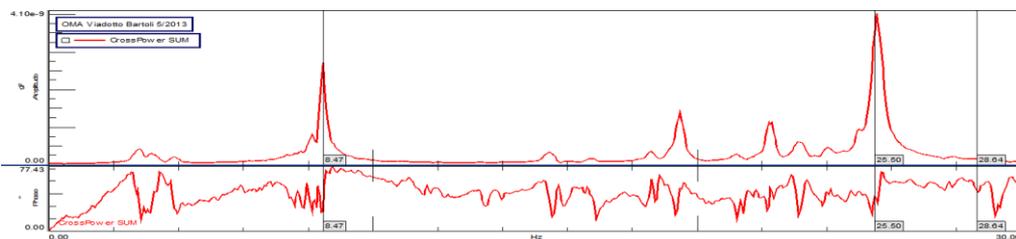


Acquisizione Giugno '13



Primo modo -  $f = 8,43$  Hz

### IDENTIFICAZIONE DELLE FREQUENZE PROPRIE

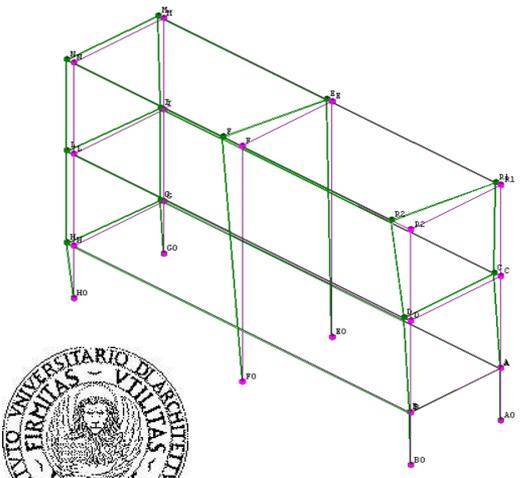
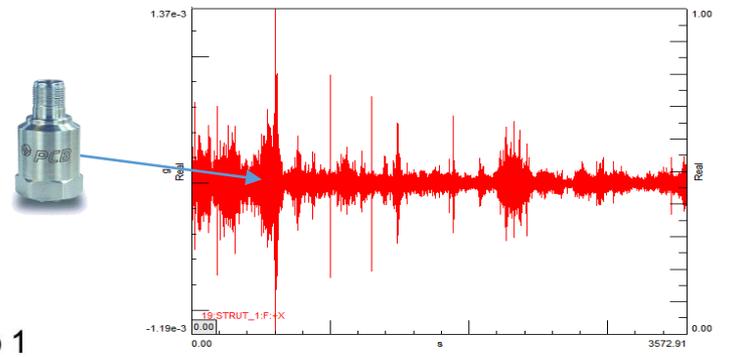
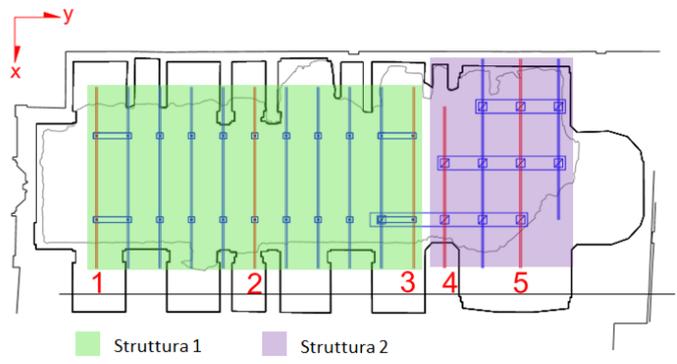
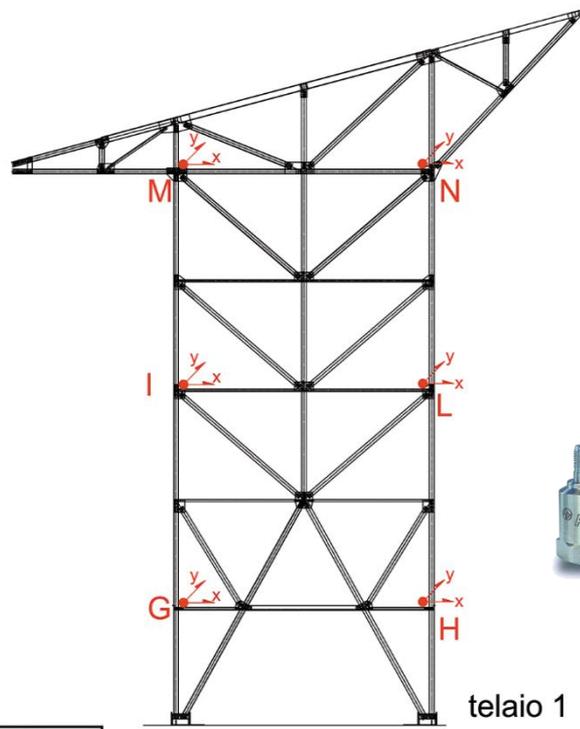




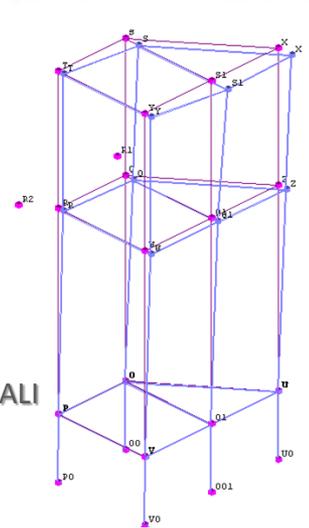
# CHIESA SANTA MARIA PAGANICA (AQ)



Analisi modale operativa finalizzata alla caratterizzazione dinamica della struttura di copertura provvisoria della Chiesa Santa Maria Paganica a L'Aquila. La suddetta struttura peculiare caratteristica di essere realizzata in pultrusi in vetro resina (GFRP) relativamente non si hanno specifiche raccomandazioni pro normative in merito.



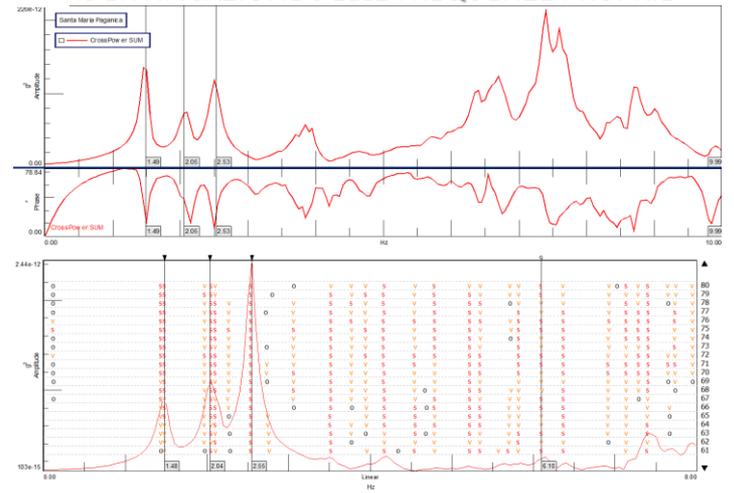
Città dell'Aquila



FORME MODALI

telai 1

## IDENTIFICAZIONE DELLE FREQUENZE PROPRIE





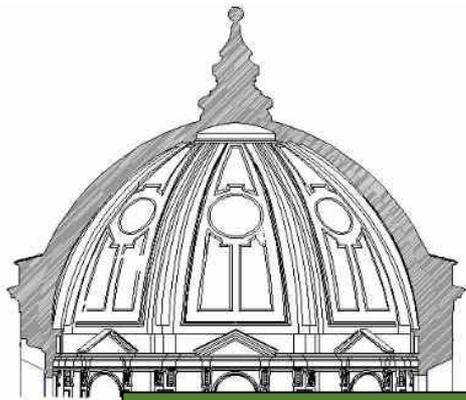
# ANALISI DEL DANNO



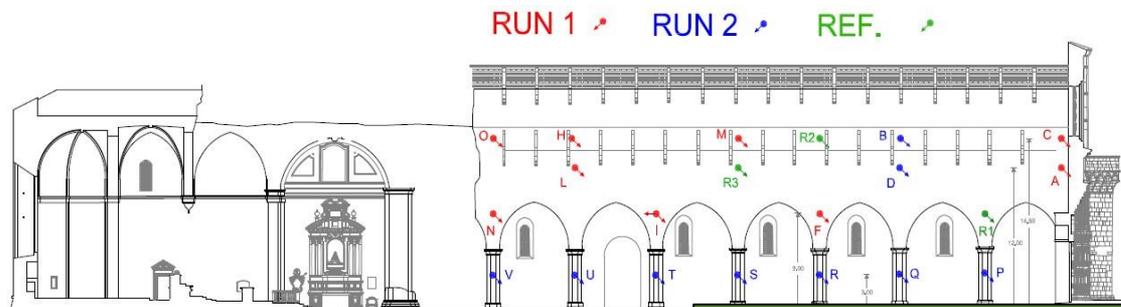
FACCIATA DEL TEATRO COMUNALE DI L'AQUILA



TORRE DEL PALAZZO COMUNALE - L'AQUILA



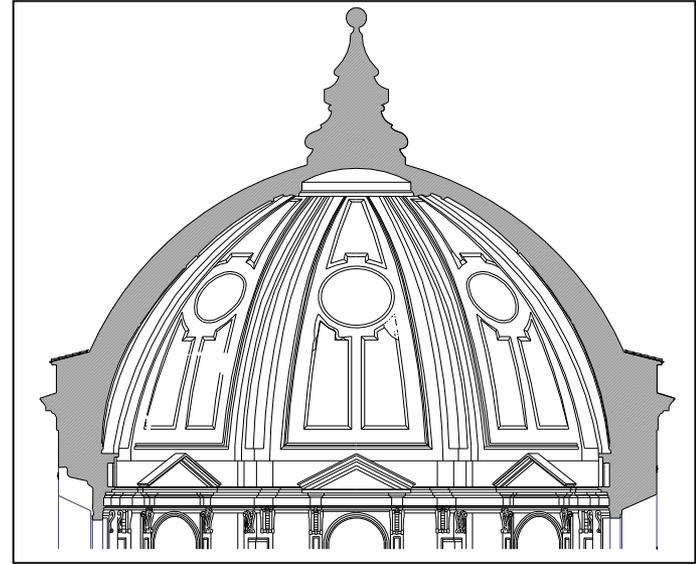
CUPOLA DELLA CHIESA DI SAN BERNARDINO - L'AQUILA



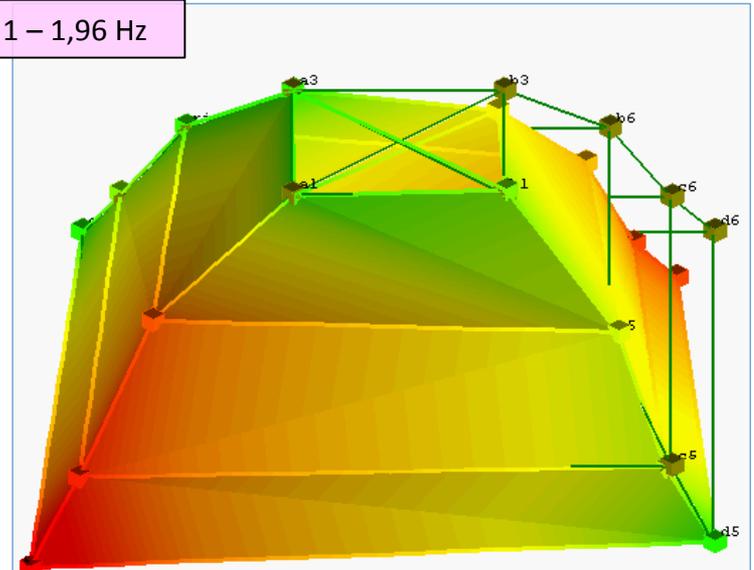
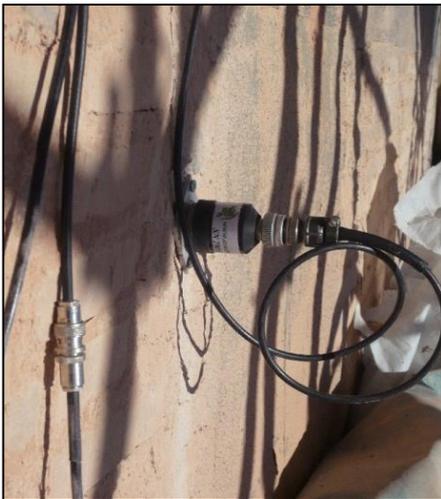
BASILICA DI COLLEMAGGIO - L'AQUILA



# CUPOLA SAN BERNARDINO (AQ)

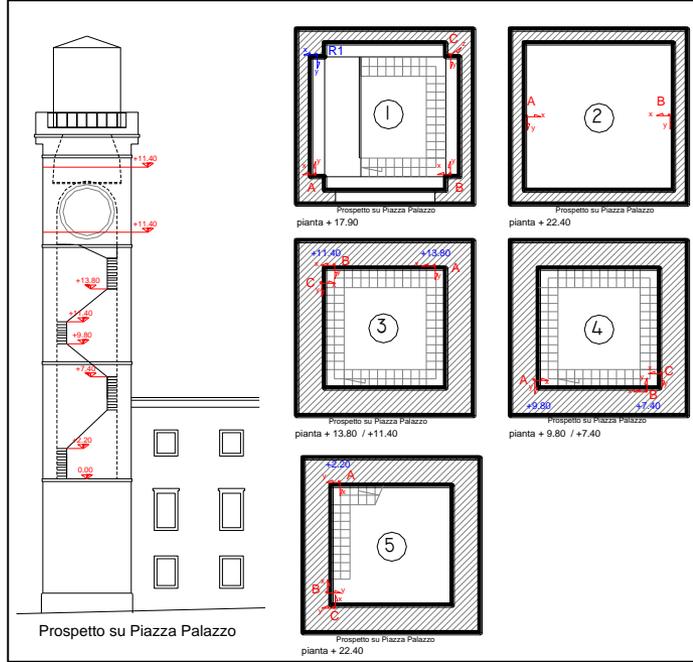


Modo 1 – 1,96 Hz

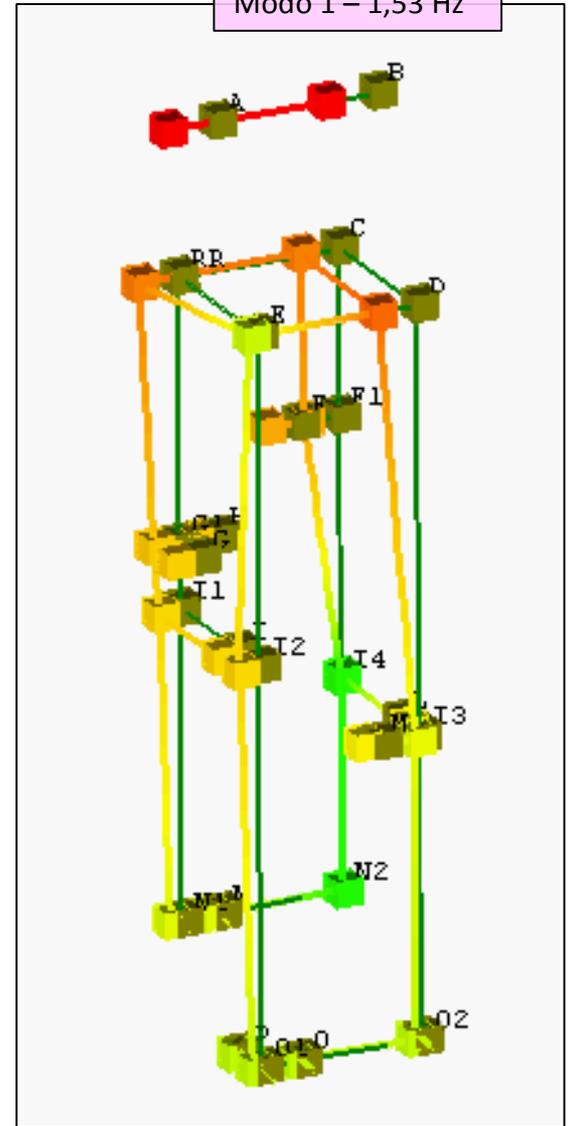




# TORRE DI PALAZZO MARGHERITA (AQ)

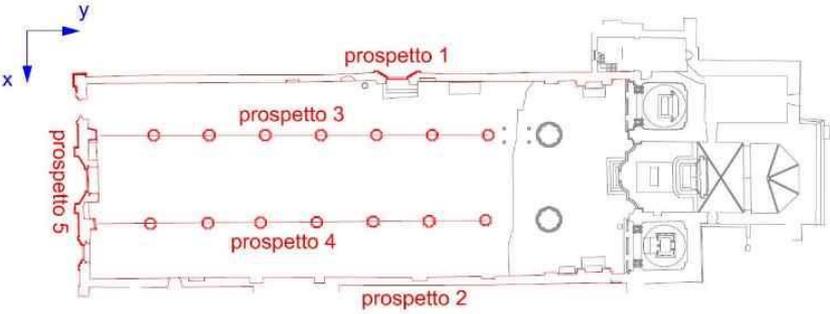


Modo 1 - 1,53 Hz

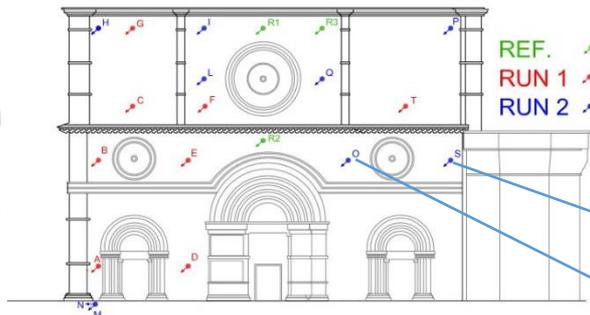




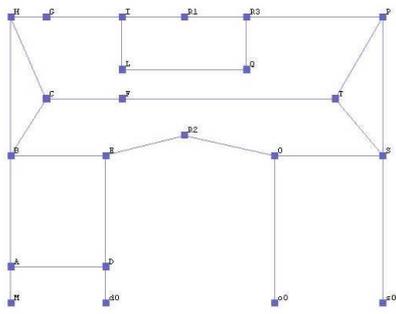
# CHIESA DI SANTA MARIA DI COLLEMAGGIO (AQ)



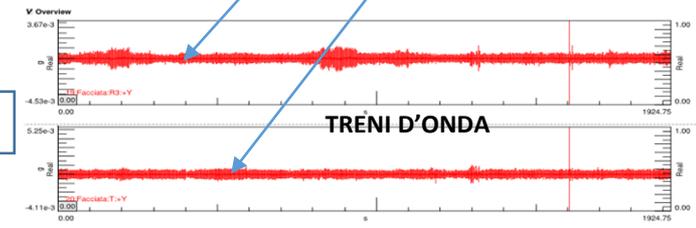
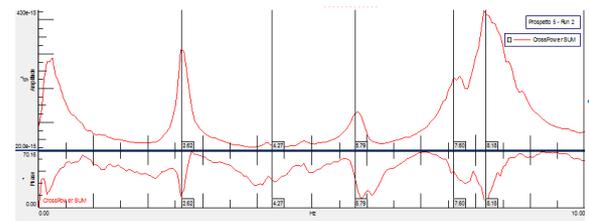
## LAYOUT DI MISURA



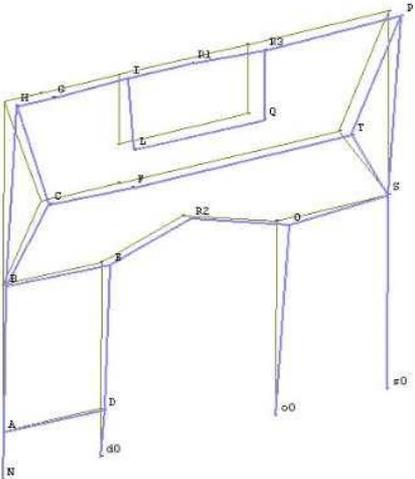
## MODELLO CINEMATICO FACCIATA



## FUNZIONE SOMMA NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE

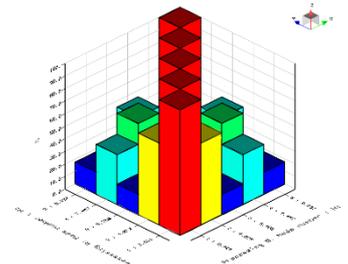
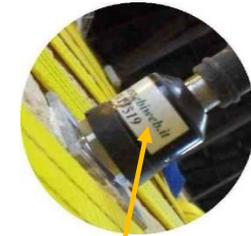


## PROSPETTO 5 - PRIMA FORMA MODALE



PROSPETTO 5		
	Frequenza [Hz]	Smorzamento [%]
modo 1	2,65	1,15
modo 2	4,28	0,47
modo 3	5,78	1,25

PER PROSPETTI DA 1 A 4, RELATIVI ALLE PARETI LONGITUDINALI DI NAVATA, ESTERNE E INTERNE, LA FREQUENZA FONDAMENTALE SI COLLOCA TRA 1,02 E 1,04 Hz A DIMOSTRAZIONE DI UN COMPORTAMENTO MONOLITICO DELLA SCATOLA MURARIA RIMANENTE



AUTOMAC PROSPETTO 5



ACCELEROMETRO SU PILASTRO DI NAVATA



LMS SCADAS MOBILE



# ASPETTI SALIENTI DELLA MODALE OPERATIVA

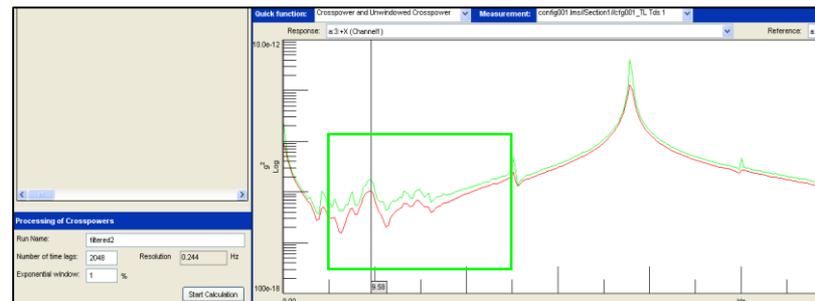
- ✦ **Basse frequenze;**
- ✦ **Frequenze molto ravvicinate che richiedono una elevata risoluzione della curva spettrale (modi accoppiati);**
- ✦ **Campo d'indagine ristretto;**
- ✦ **Scarsa cura nell'installazione dei sensori;**
- ✦ **Sistema di acquisizione a basso rumore intrinseco e a guadagno programmabile;**
- ✦ **Accelerometri ad alta risoluzione e a bassa frequenza.**

Time lag alto per avere una alta risoluzione laddove si hanno modi a frequenze molto ravvicinate con il rischio di individuare modi apparenti computazionali

1024 intervalli di tempo

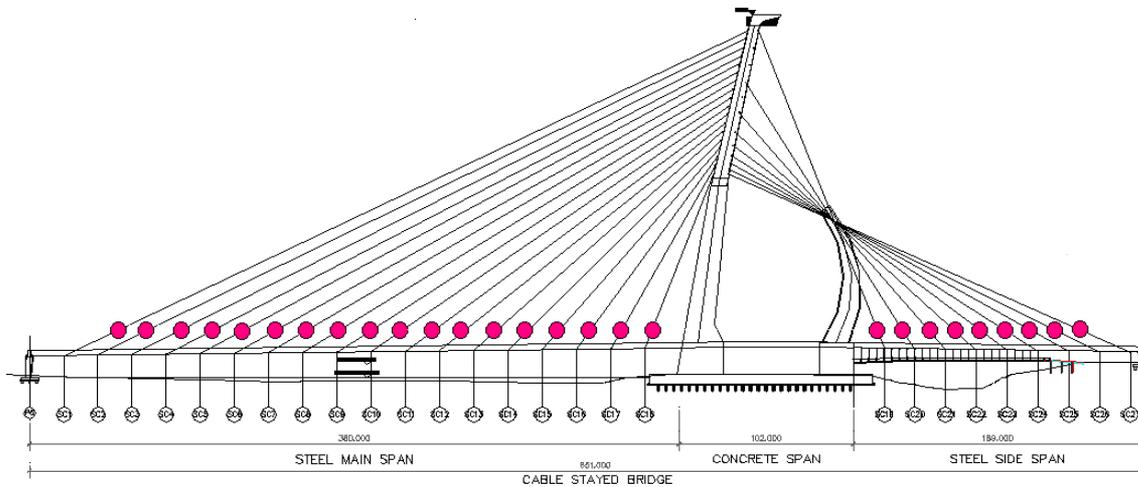


2048 intervalli di tempo





## Health Monitoring





**essebi** S.P.A.

Viale Giulio Agricola, 130 – 00174 Roma  
Tel. 06-71.00.152 06-710.75.339 Fax 06-64.78.00.53  
[www.essebiweb.it](http://www.essebiweb.it) [info@essebiweb.it](mailto:info@essebiweb.it)



**DOMANDE ?**



**SI RINGRAZIANO TUTTI I CONVENUTI PER LA  
PARTECIPAZIONE E L'INTERESSAMENTO RIVOLTO**