

METODOLOGIE INTEGRATE DI INDAGINE A SUPPORTO DELLO STUDIO DI VULNERABILITÀ SISMICA DI EDIFICI DI PREGIO: L'ESEMPIO DELLA TORRE DI NINFA



SECONDA PARTE

ANALISI DINAMICA SPERIMENTALE DELLA TORRE E CONFRONTO CON LO STUDIO DI RSL

- Richiami teorici di dinamica strutturale
- L'esempio di Amatrice – la torre civica
- Analisi dinamica – metodologie d'indagine sperimentale e cenni di elaborazione dati
- Confronto tra comportamento dinamico della torre e azione sismica ottenuta dallo studio di RSL



Geologo Francesco Aucone
OGL - A.P. n. 970
frauco@libero.it

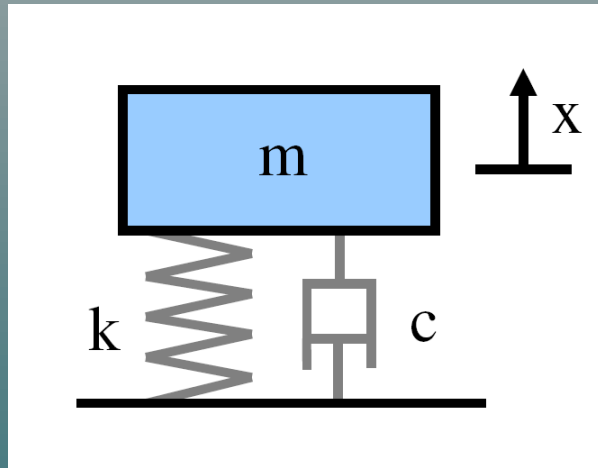
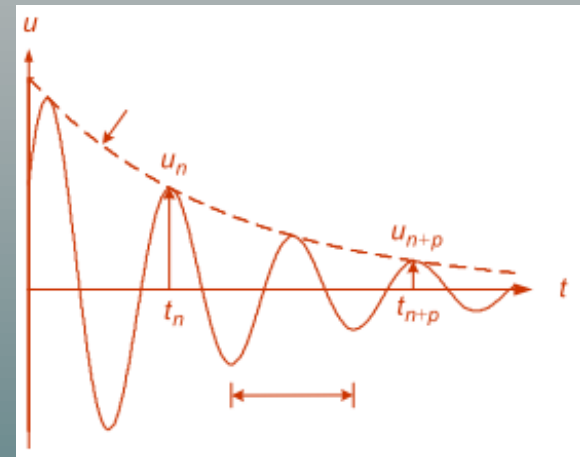


Geologo Pierluigi Friello
OGL - A.P. n.672 -
ggfriello@gmail.com

Qualche richiamo teorico

Nei casi reali il comportamento delle strutture soggette a sollecitazioni dinamiche può essere descritto con l'equazione di equilibrio delle forze (oscillazioni libere smorzate di un oscillatore ad un solo grado di libertà)

$$m \cdot \ddot{u}(t) + c \cdot \dot{u}(t) + k \cdot u(t) = 0$$



$$T = \frac{2\pi}{\omega}$$

$$f = \frac{\omega}{2\pi}$$

$$\omega = \sqrt{\frac{K}{m}}$$

Qualche richiamo teorico

Nel caso la struttura di prima sia sottoposta ad una forzante dinamica, l'equazione di equilibrio diventa

$$\ddot{u}(t) + 2\xi \cdot \omega \cdot \dot{u}(t) + \omega^2 \cdot u(t) = \frac{F_0}{m} \sin(\omega_0 \cdot t)$$

dove: ω è la frequenza angolare (pulsazione), ξ è il coefficiente di smorzamento, $F(t) = F_0 \cdot \sin(\omega_0 \cdot t)$ è la forzante assunta come armonica, ω_0 ed F_0 sono la pulsazione e l'ampiezza iniziale della forzante.

La cui soluzione è la seguente

$$u(t) = \frac{F_0}{k} \cdot \frac{(1 - \beta^2) \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) - 2\xi \cdot \beta \cdot \cos(\omega_0 \cdot t)}{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi \cdot \beta)^2} \quad \text{dove } \beta = \frac{\omega_0}{\omega}$$

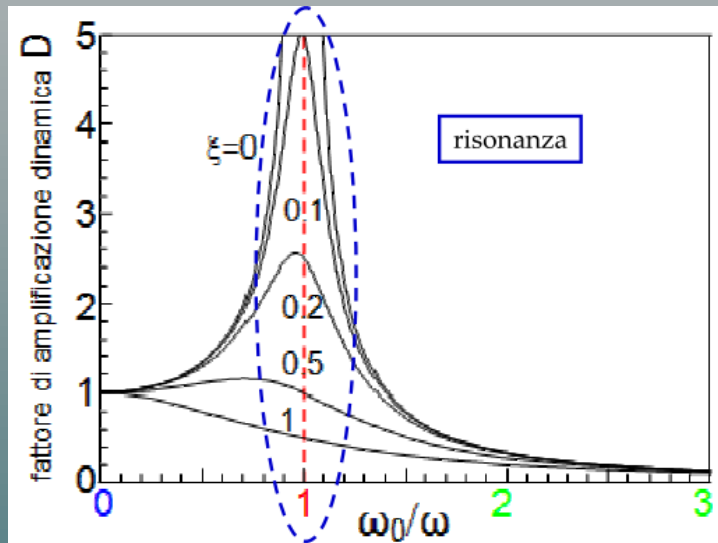
ovvero:

$$u(t) = D \cdot \frac{F_0}{k} \cdot \sin(\omega_0 \cdot t - \varphi) \quad \text{dove: } \varphi = \tan^{-1} \left(\frac{2\xi \cdot \beta}{1 - \beta^2} \right) \text{ e } D = \frac{1}{\sqrt{(1 - \beta^2)^2 + (2\xi \cdot \beta)^2}} = \frac{u_{\max}}{F_0/k}$$

Fattore di amplificazione dinamica

Qualche richiamo teorico

Le conclusioni logiche dell'equazione di equilibrio, in questo caso, sono descritte nel grafico seguente, dove il fattore di amplificazione dinamica è in relazione col rapporto tra le due frequenze: quella della forzante e quella della struttura. Si hanno diversi comportamenti in funzione dello smorzamento, ma come si può osservare il massimo dello spostamento si ha quando il rapporto tra le due frequenze è pari a 1



Per $\omega_0 \ll \omega$: $D \rightarrow 1$ e quindi $u(t) \rightarrow F(t)/k$ = spostamento causato dalla forza statica
Per $\omega_0 \rightarrow \omega$: $D \rightarrow 1/2 \xi$ e per smorzamento nullo $D \rightarrow \infty$ **risonanza!!**
Per $\omega_0 \gg \omega$: $D \rightarrow 0$ e $u(t) \rightarrow 0$ = la struttura non risente della forzante

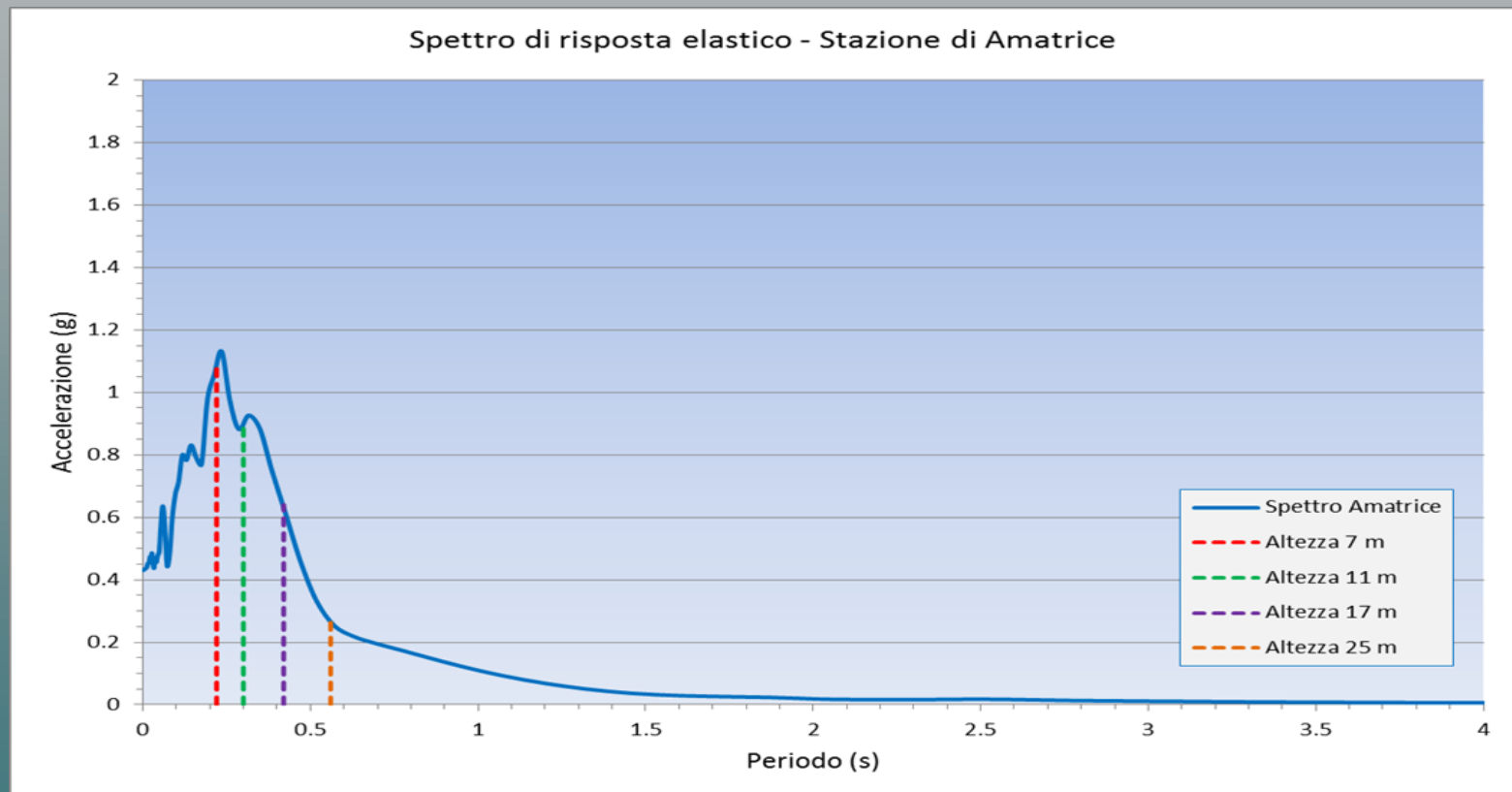
L'ESEMPIO DI AMATRICE

Perché la torre civica di Amatrice è rimasta in piedi?



L'ESEMPIO DI AMATRICE

Il terremoto è selettivo, a seconda del suo contenuto spettrale colpisce di più certe strutture che altre. Ogni terremoto è diverso dagli altri



Analisi dinamica: parametri del moto

Cosa significa effettuare l'analisi dinamica di una struttura?

Significa definire come questa risponde naturalmente alle sollecitazioni dinamiche

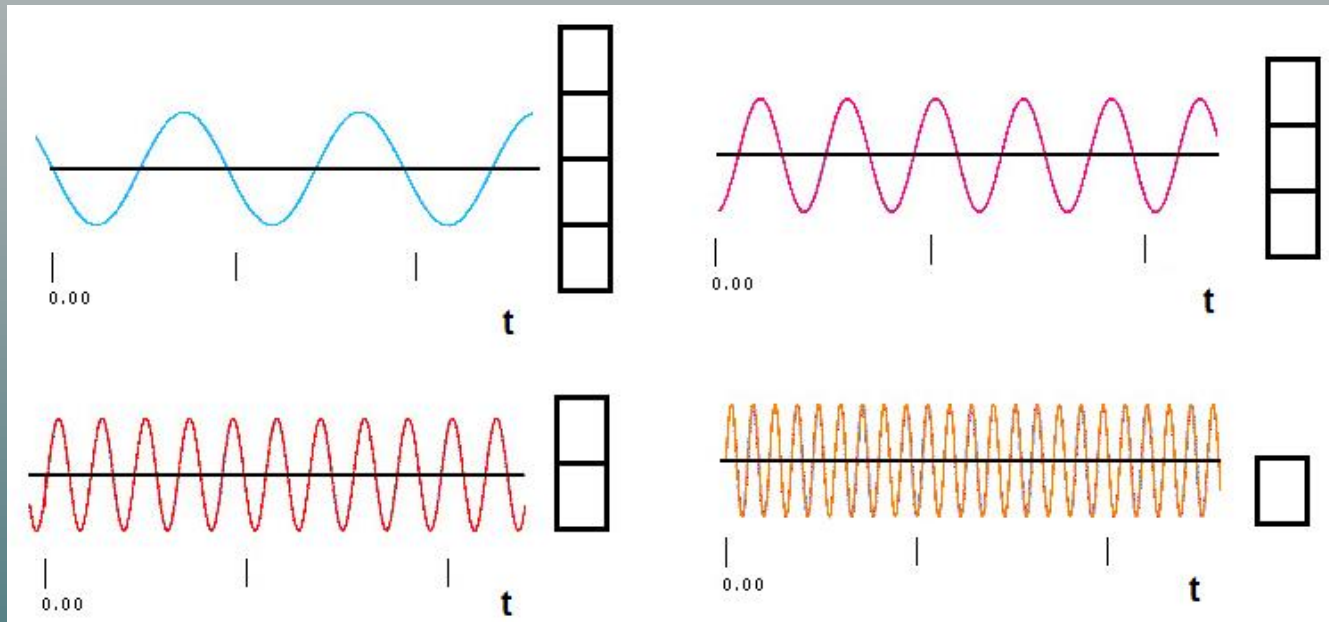
Ossia significa definirne i Modi naturali di vibrazione

Un modo di vibrare è caratterizzato dai seguenti parametri

- Frequenza caratteristica**
- Forma modale (o anche deformata)**
- Smorzamento**

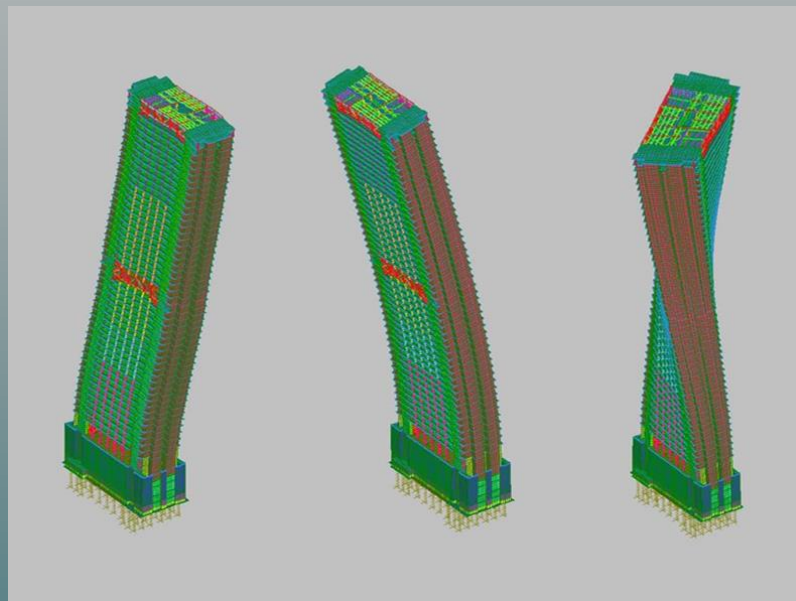
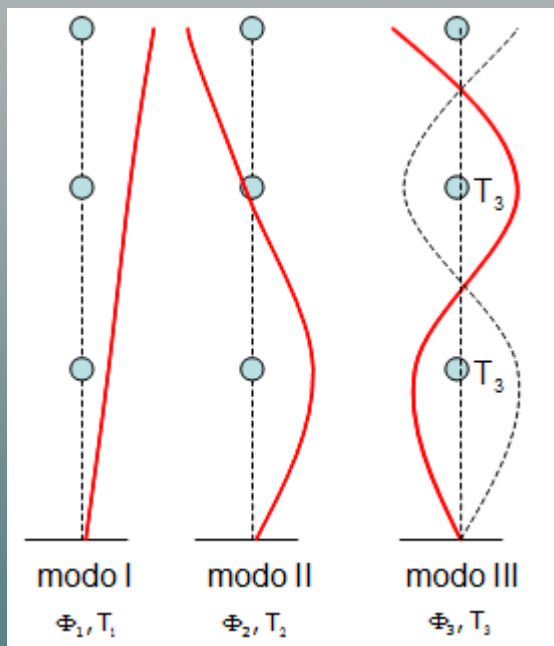
Analisi dinamica: parametri del moto

Frequenza caratteristica



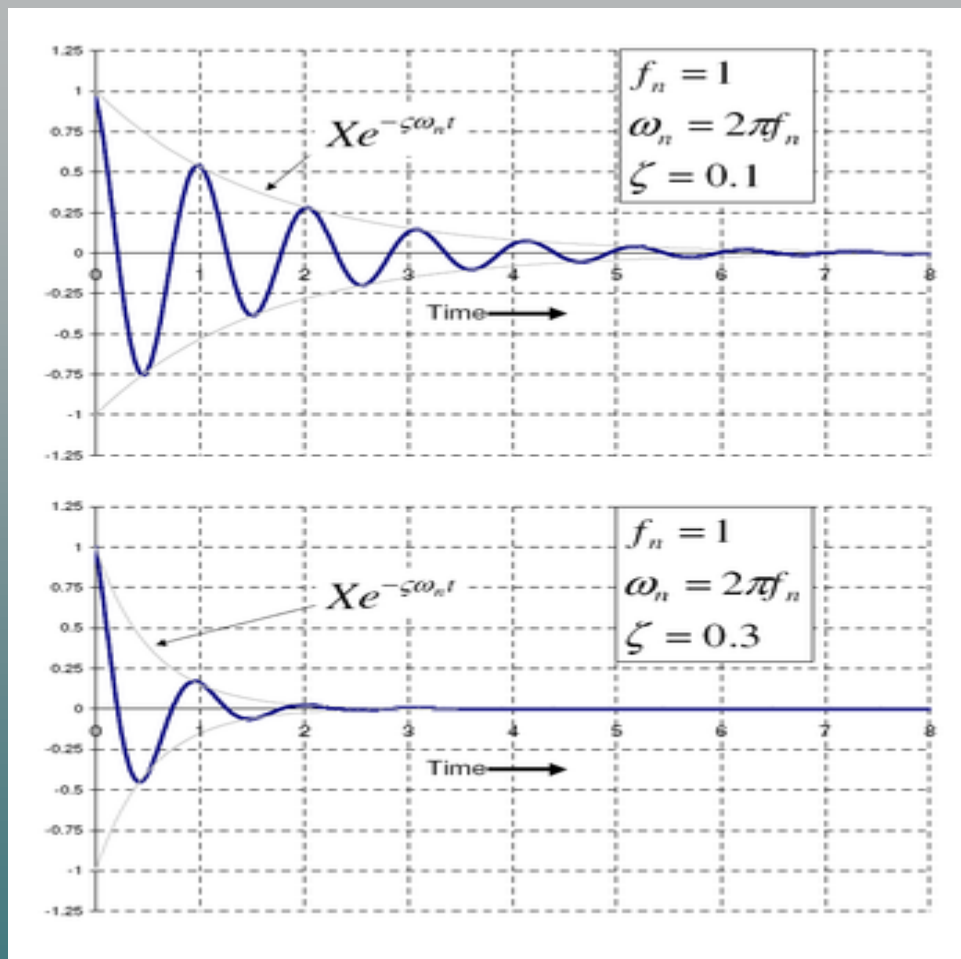
Analisi dinamica: parametri del moto

Forma modale



Analisi dinamica: parametri del moto

Smorzamento



Sollecitazione dinamica

Sollecitazioni controllate prodotte artificialmente ad hoc:
Sinusoidali (vibrochina) o **impulsive** (martello strumentato)



Sollecitazioni non controllate ambientali, naturali o artificiali:
L'azione sismica, il vento, l'attività di cantiere, le microvibrazioni ambientali



Analisi dinamica - acquisizione

QUALE SORGENTE DINAMICA IMPIEGARE PER LA SOLLECITAZIONE DI STRUTTURE SENSIBILI

Escludendo le vibrodine per la loro invasività statica e dinamica, si possono utilizzare le **vibrazioni ambientali** che avranno natura diversa a seconda, appunto, dell'ambiente dove è inserita la struttura.

QUANTI E QUALI SENSORI UTILIZZARE

Si possono utilizzare **accelerometri o geofoni**. I primi sono indicati per le basse frequenze ma di solito hanno bassa sensibilità. I secondi stentano di più alle basse frequenze ma di solito hanno alte sensibilità. Direi che un buon **geofono a 4,5 Hz, o ancora meglio a 2 Hz con sensibilità di 80-200 V/m/s**, è molto indicato per le **microvibrazioni ambientali**.

Sulla quantità: più sensori si hanno (e specialmente se triassiali) e meno misure si fanno. **Il minimo è di 2 sensori.**

È fondamentale che le misure siano sincronizzate

Analisi dinamica - acquisizione

PROCEDIMENTO IN SINTESI UTILIZZANDO COME INPUT LE VIBRAZIONI AMBIENTALI

SINCRONIZZAZIONE DELLE MISURE. È fondamentale che i sensori effettuino misure sincrone. Collegamento via cavo, wireless oppure sincronizzazione con gps.



Analisi dinamica - elaborazione

(Non posso calcolare la funzione di trasferimento – posso agire solo sui dati registrati sulla struttura – le registrazioni contengono sia l'input che l'output)

CROSS-CORRELAZIONE. La funzione di cross-correlazione è una misura di similitudine di due segnali. Mostra di quanto un segnale deve essere anticipato per renderlo identico all'altro.

$$R_{xy}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x(t)y(t + \tau)dt$$

CROSS-SPETTRO. È la Trasformata di Fourier della funzione di cross-correlazione. Contiene le frequenze comuni alle misure effettuate nei due diversi punti della struttura.

$$S_{xy}(f) = \int_{-\infty}^{\infty} R_{xy}(\tau) \cdot e^{-i2\pi f\tau} d\tau$$

Analisi dinamica - elaborazione

(Non posso calcolare la funzione di trasferimento – posso agire solo sui dati registrati sulla struttura – le registrazioni contengono sia l'input che l'output)

SPETTRO DI FASE. In genere il cross-spettro viene presentato in termini di modulo e fase.

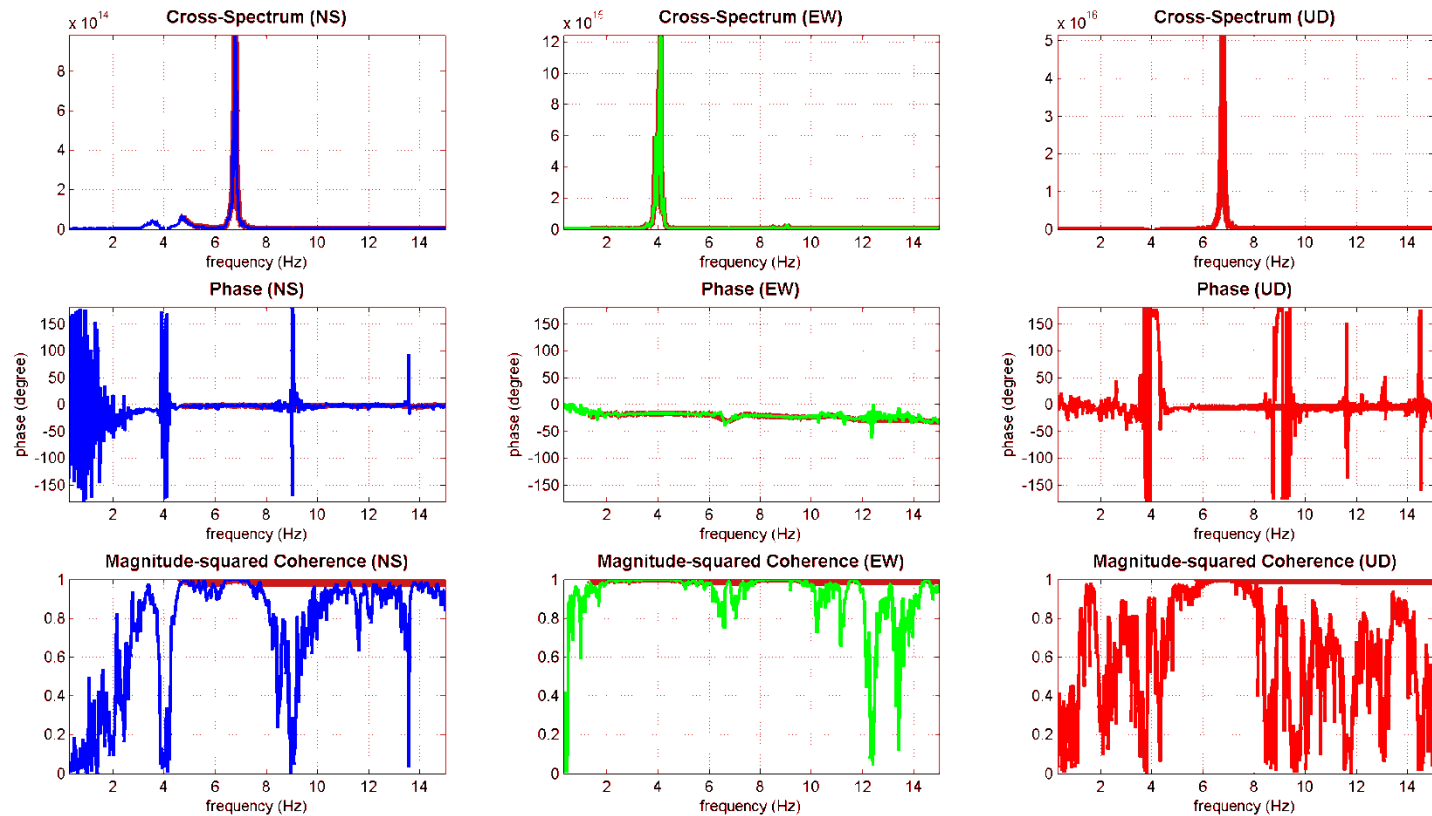
$$|G_{xy}(f)| = \sqrt{C_{xy}^2(f) + Q_{xy}^2(f)} \quad \theta_{xy}(f) = \tan^{-1} \left[\frac{Q_{xy}(f)}{C_{xy}(f)} \right]$$

COERENZA. È data dal rapporto tra il quadrato del cross-spettro ed il prodotto degli auto-spettri delle due misure correlate. Ci restituisce una misura di quanto la fase tra due segnali rimane stabile nel tempo.

$$\gamma_{xy}^2(f) = \frac{|G_{xy}(f)|^2}{G_{xx}(f) \cdot G_{yy}(f)}$$

Analisi dinamica - elaborazione

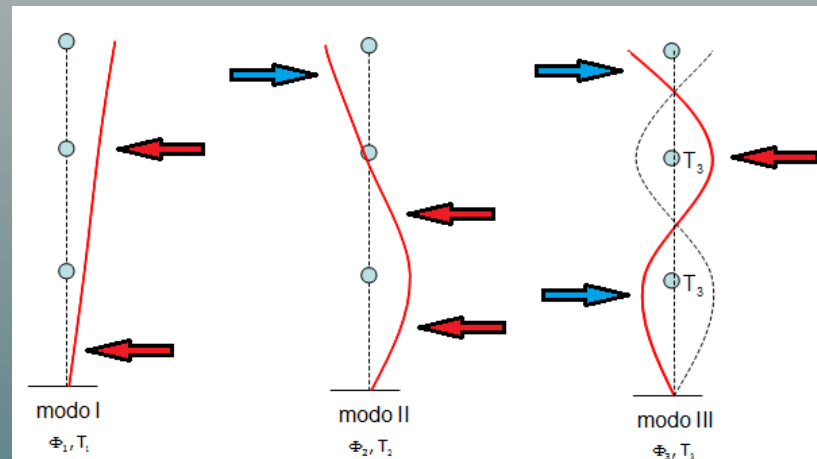
CROSS-SPETTRO, SPETTRO DI FASE E COERENZA



Analisi dinamica - elaborazione

QUANDO UNA FREQUENZA CONTENUTA NEL CROSS-SPETTRO PUÒ ESSERE CONSIDERATA COME LA FREQUENZA DI UN MODO DI VIBRARE?

QUANDO LA DIFFERENZA DI FASE è UGUALE A «0°» OPPURE A 180°



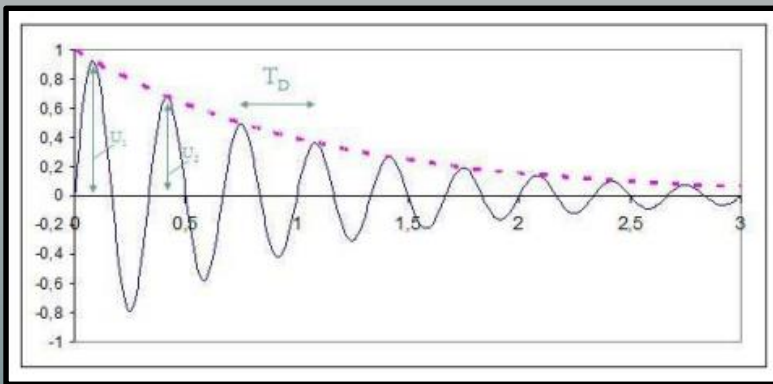
QUANDO LA COERENZA È PROSSIMA A 1

Analisi dinamica - elaborazione

SMORZAMENTO

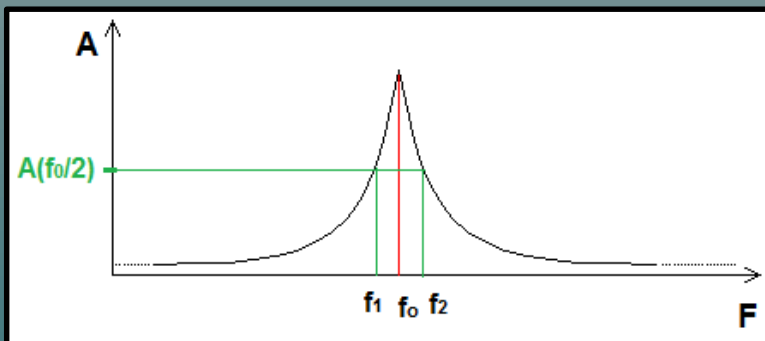
Contrariamente a quanto si possa pensare lo smorzamento è il parametro più difficile da determinare. I metodi utilizzati sono tutti empirici.

Metodo del decremento logaritmico



$$\delta = \ln \frac{U_n}{U_{n+1}}$$

Metodo della semi-ampiezza di banda

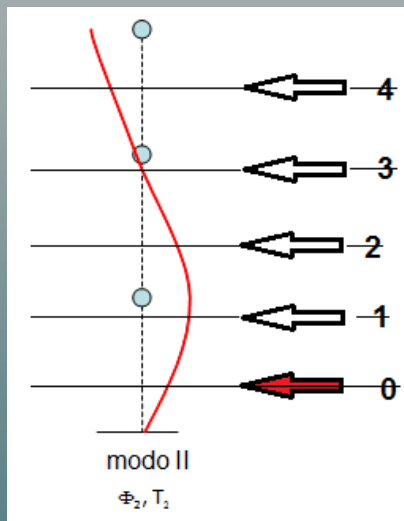


$$\delta = \frac{f_2 - f_1}{2f_0}$$

Analisi dinamica - elaborazione

DEFORMATA

Più punti copro durante le misure e più sarà accurata la deformata ottenuta con l'elaborazione.
 Più sensori uso contemporaneamente e meno sono le misure che devo fare.
 La tecnica consiste nel lasciare fisso un sensore e spostare gli altri.
 I valori delle ampiezze li prendo dagli auto-spettri



Misura	Ch		Misura	Ch		Misura	Ch		Misura	Ch	
	0	1		0	2		0	3		0	4
0-1	1,10	1,54	0-2	1,32	1,58	0-3	0,65	0,00	0-4	0,90	0,90

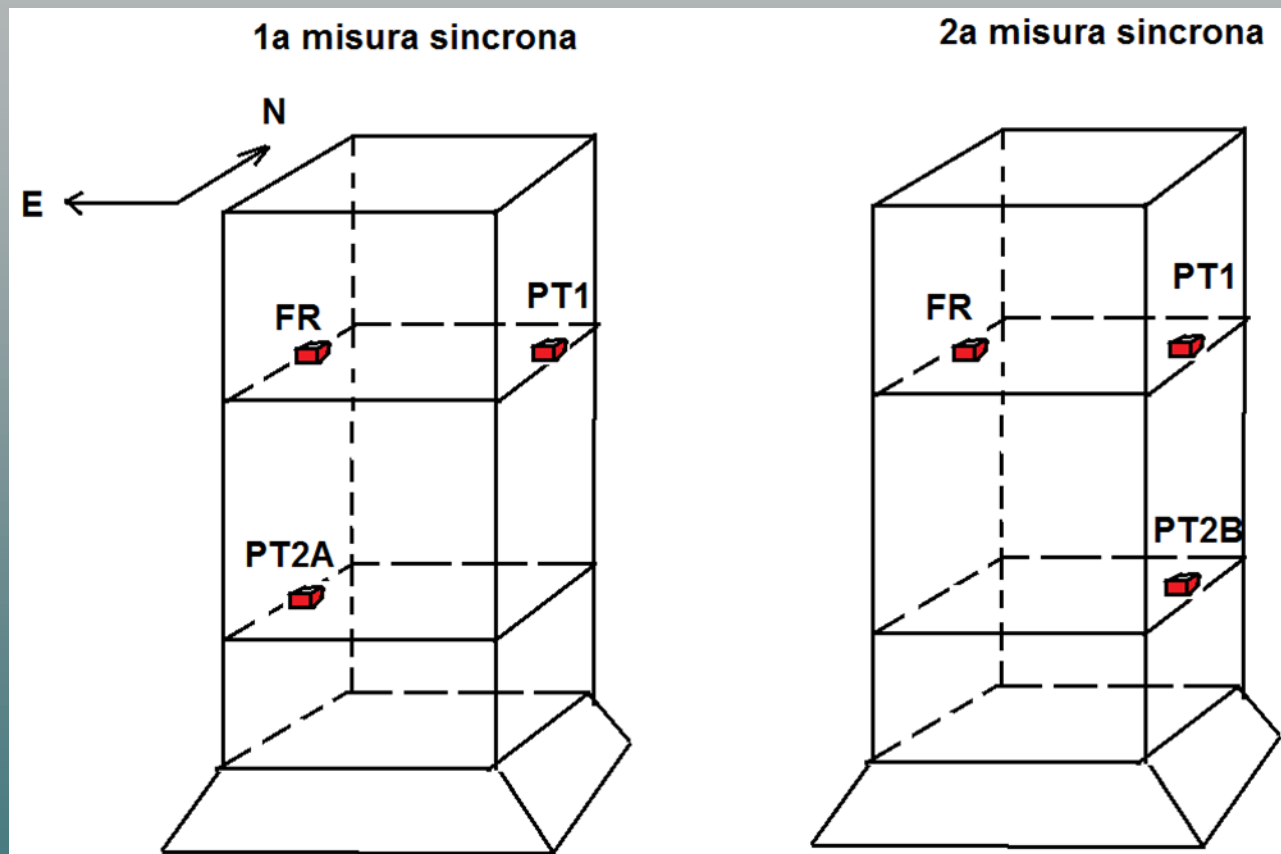
Deformata				
0	1	2	3	4
1,0	1,4	1,2	0,0	-1,0

Mentre la frequenza di risonanza varia al variare dell'energia dinamica impressa quando le deformazioni divengono molto grandi (specialmente in caso di sisma) a causa della non linearità del comportamento dinamico delle strutture, la deformata di un modo di vibrare rimane in sostanza proporzionalmente invariata.

Analisi dinamica – la torre di Ninfa



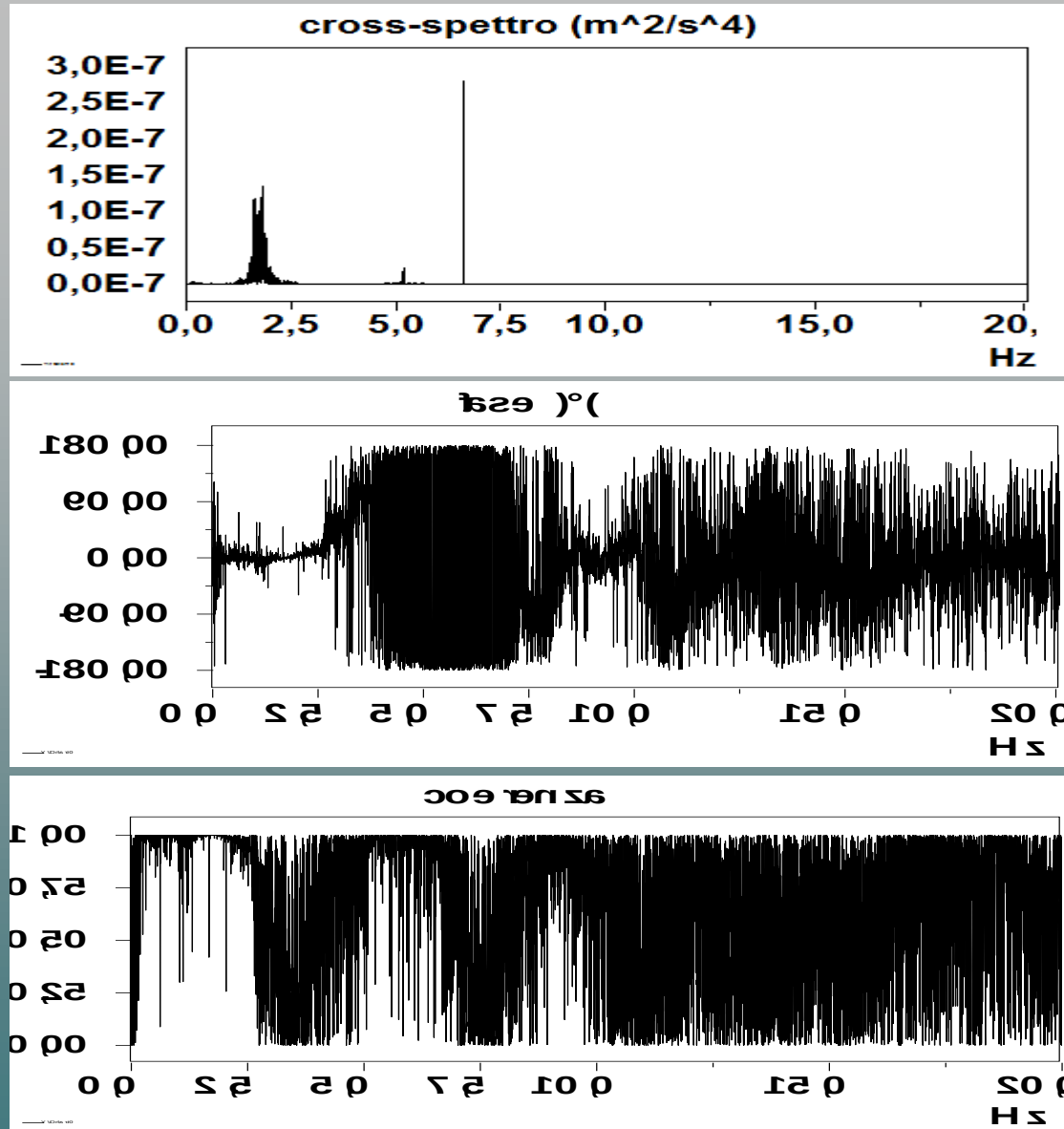
MISURE E DISPOSIZIONE DEI SENSORI GEOFONICI TRIASSIALI



RISULTATI DELLA CROSS CORRELAZIONE

Misura	Sincronia	Cross spettro (Hz)	Fase (°)	Coerenza
1	FR_PT1_PT2A	1,79	0	1,00
	PT1_FR_PT2A N	5,26	177	1,00
		6,59	164	0,94
1	FR_PT1_PT2A	1,81	1	1,00
	PT1_FR_PT2A E	5,26	3	1,00
		6,59	-9	0,97
1	FR_PT1_PT2A	1,78	1	1,00
	PT2A_PT1_FR N	5,26	0	1,00
		6,59	49	0,47
1	FR_PT1_PT2A	1,82	0	1,00
	PT2A_PT1_FR E	5,29	0	1,00
		6,60	-9	0,97
1	PT1_FR_PT2A	1,78	-2	1,00
	PT2A_PT1_FR N	5,26	-169	1,00
		6,59	-116	0,60
1	PT1_FR_PT2A	1,82	0	1,00
	PT2A_PT1_FR E	5,26	-1	1,00
		6,59	-4	0,99
2	FR_PT1_PT2B	1,80	0	1,00
	PT1_FR_PT2B N	5,26	-180	1,00
		6,59	168	0,92
2	FR_PT1_PT2B	1,83	0	1,00
	PT1_FR_PT2B E	6,59	-6	0,98

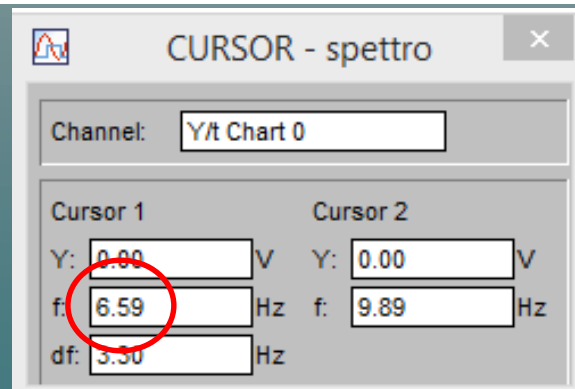
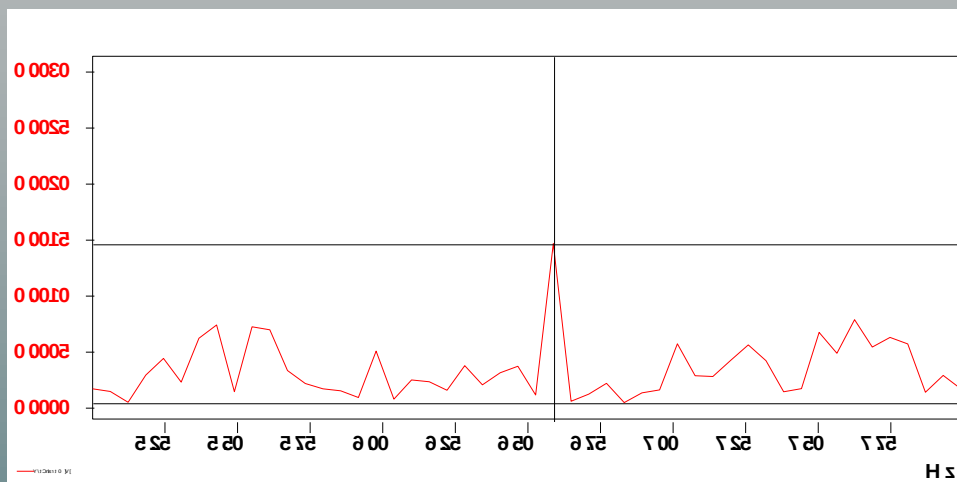
RISULTATO CROSS CORRELAZIONE TRA FR_PT1_PT2A E PT1_FR_PT2A COMPONENTE N



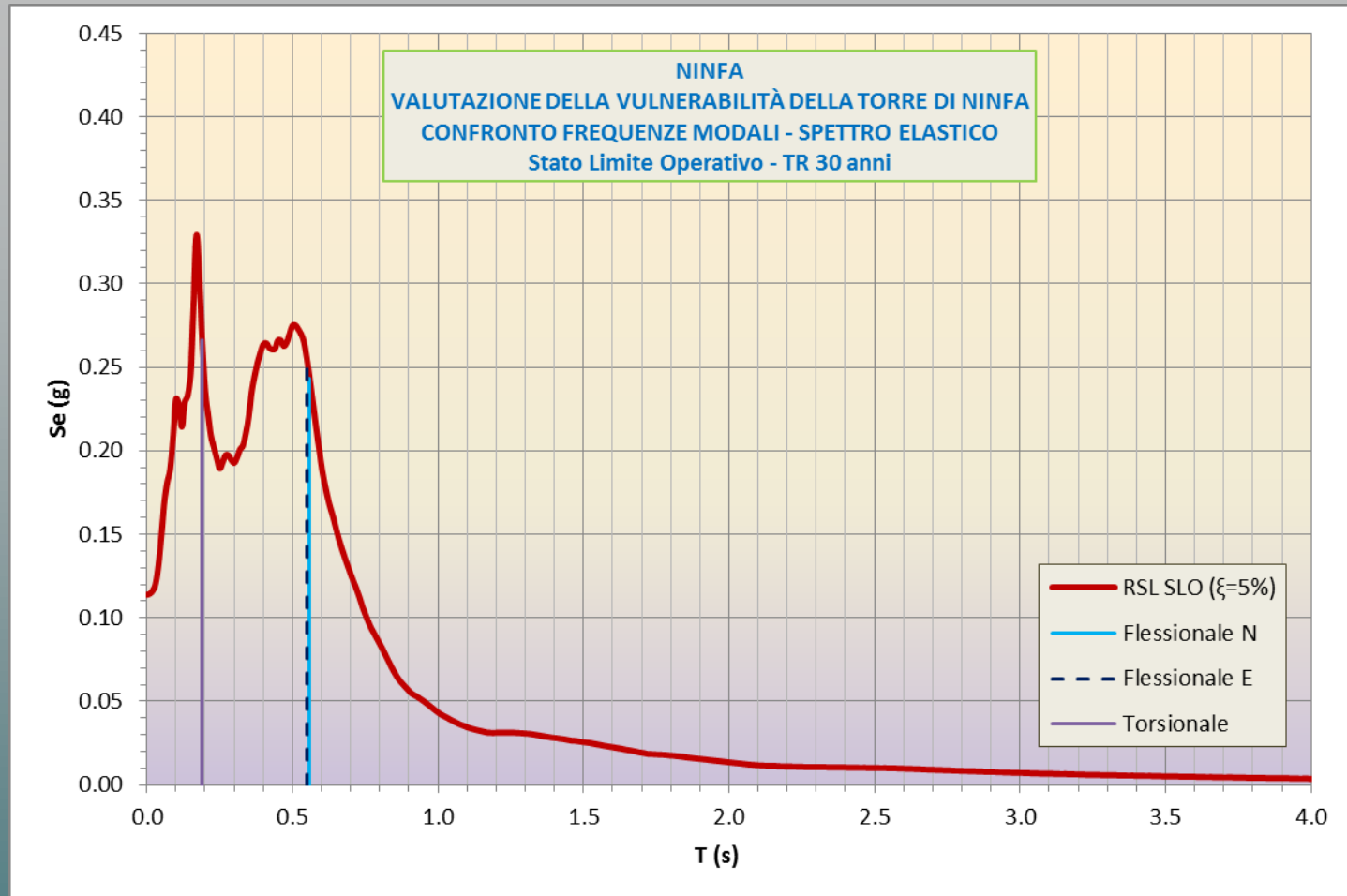
Turbina della centrale idroelettrica all'interno dell'Oasi, risalente ai primi del '900 e ultimamente rimessa in funzione.

Compie circa 400 giri/min, corrispondenti a circa 6,6 Hz

Riscontrati sulla Torre, sulle misure di sismica passiva nei dintorni della torre e direttamente con un accelerometro sulla turbina stessa

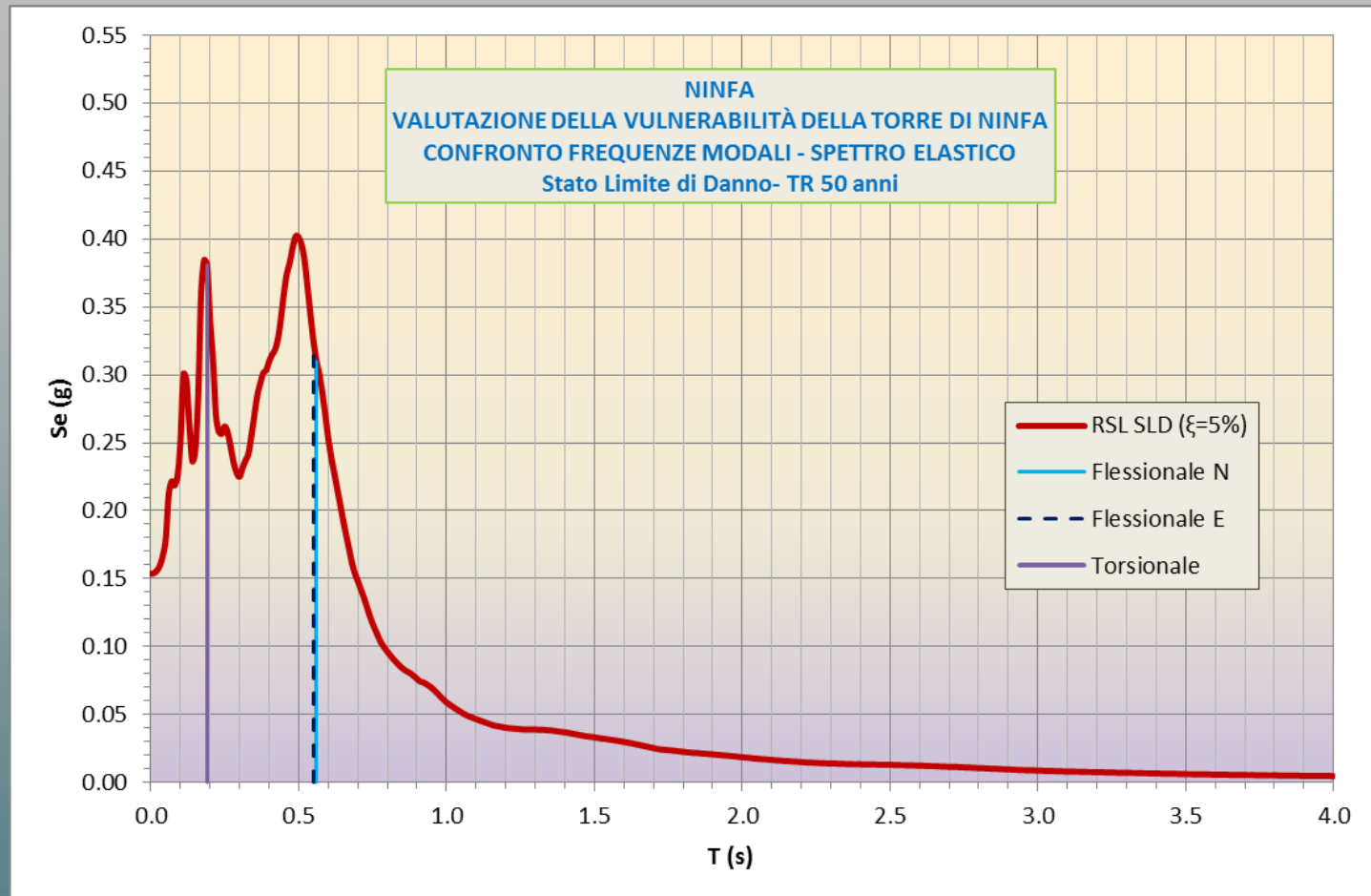


CONFRONTO FREQUENZE MODALI – SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO (SLO)



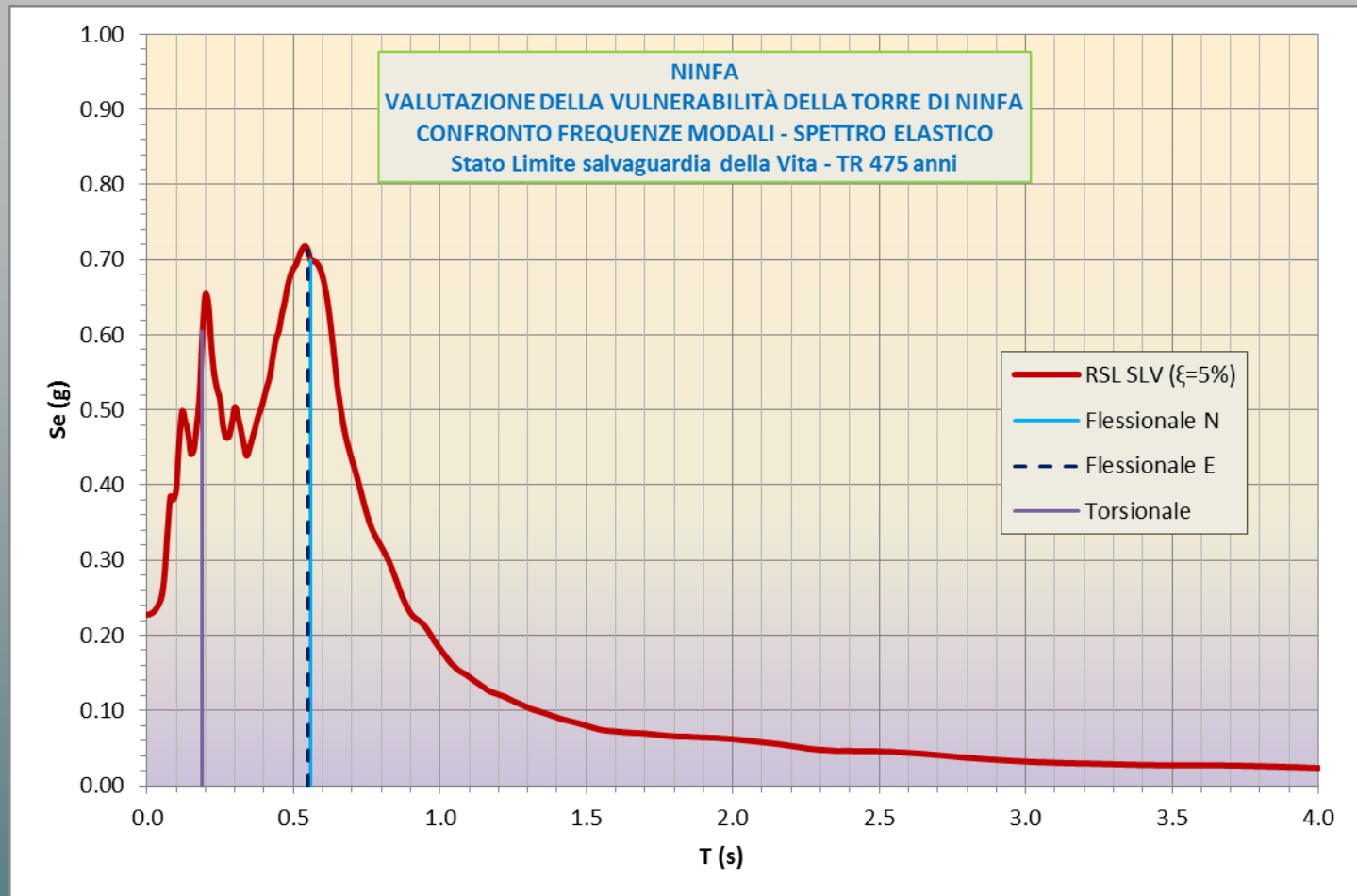
LSR2D	F (Hz)	T (s)	Acc (g)
Flessionale N	1.79	0.56	0.243
Flessionale E	1.82	0.55	0.255
Torsionale	5.26	0.19	0.266

CONFRONTO FREQUENZE MODALI – SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO (SLD)



LSR2D	F (Hz)	T (s)	Acc (g)
Flessionale N	1.79	0.56	0.310
Flessionale E	1.82	0.55	0.325
Torsionale	5.26	0.19	0.381

CONFRONTO FREQUENZE MODALI – SPETTRO DI RISPOSTA ELASTICO (SLV)



LSR2D	F (Hz)	T (s)	Acc (g)
Flessionale N	1.79	0.56	0.699
Flessionale E	1.82	0.55	0.712
Torsionale	5.26	0.19	0.605