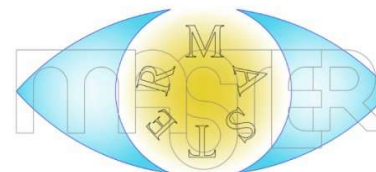


Convegno «Laboratori prove e controlli su strutture e costruzioni esistenti»



Ordine degli Ingegneri
della Provincia
di Roma



Materials and Structures Testing and Research
www.associazionemaster.org

"Le prove dinamiche sulle costruzioni e infrastrutture"

Ing. Giuseppe DI IORIO



Roma, 7 Settembre 2023

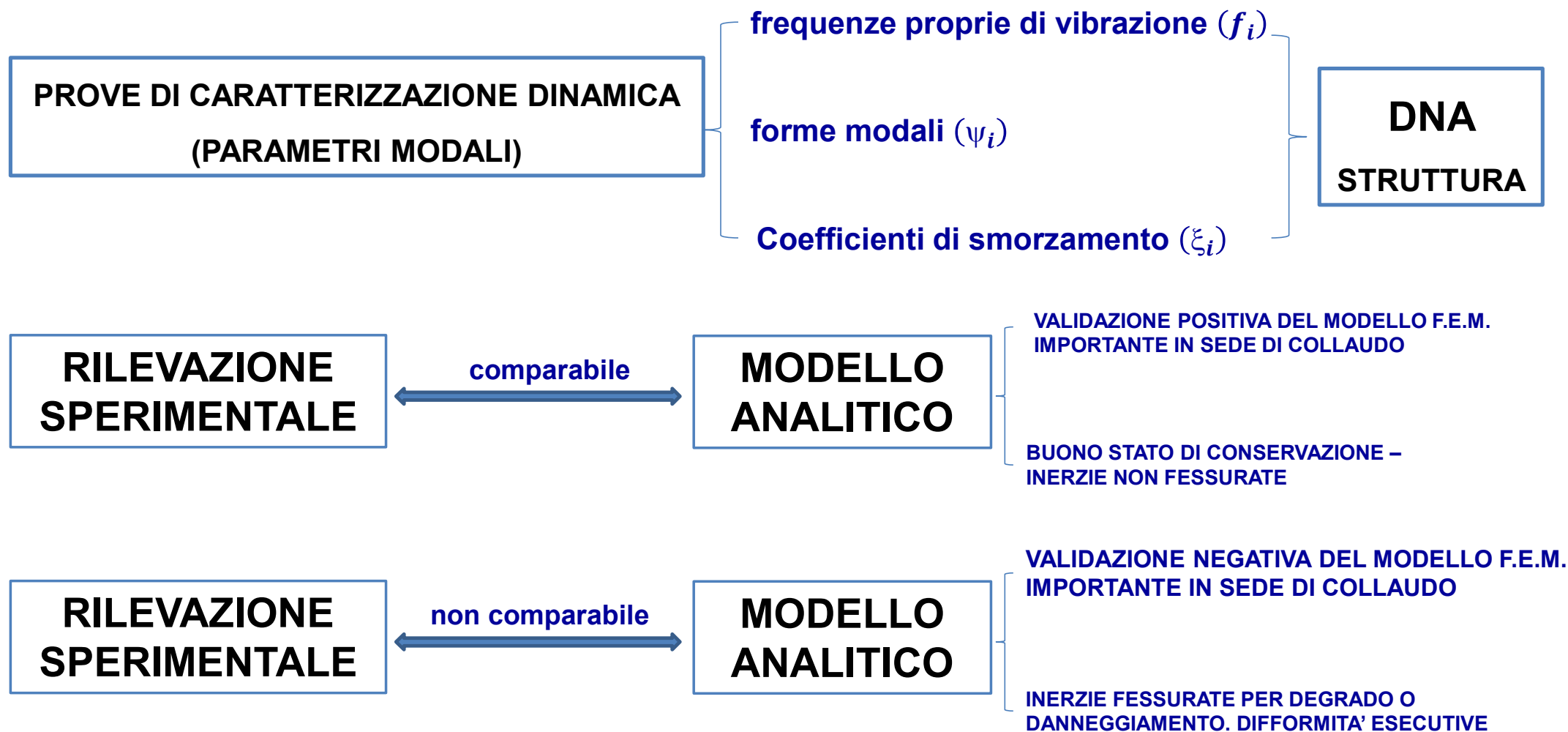
La sicurezza e la gestione di edifici, ponti, gallerie, dighe e altre strutture strategiche richiedono un monitoraggio in continuo, sia nel breve che nel lungo termine, per aumentare la conoscenza del comportamento dinamico della struttura e per poter pianificare gli interventi di manutenzione e riabilitazione necessari. Spesso, infatti, nelle strutture in calcestruzzo compaiono fenomeni che possono provocare una diminuzione locale della resistenza e, nel lungo termine, influire sulla sicurezza strutturale del complesso.



Il monitoraggio in continuo si sta affermando come uno degli strumenti gestionali essenziali per garantire la sicurezza in servizio delle opere, e per consentire sia l'attivazione tempestiva di eventuali processi di approfondimento che una programmazione economicamente vantaggiosa degli interventi di manutenzione; specialmente nel caso di strutture che devono svolgere la loro funzione per molte decine di anni e che vengono quindi utilizzate in condizioni fortemente variabili e spesso distanti da quelle inizialmente previste.

I seri danni e i collassi strutturali verificatisi in particolare nel corso degli ultimi anni, hanno sottolineato la necessità di garantire, per le costruzioni esistenti, il monitoraggio del loro degrado e una più efficace protezione nei riguardi di eventi naturali eccezionali come i terremoti, al fine di mitigare anche le perdite connesse.





PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DINAMICA IN SEDE DI PROGETTAZIONE

Nelle costruzioni esistenti può aiutare a ridurre le incertezze sulla geometria e sulle rigidezze dei materiali

La validazione positiva di un modello FEM consente di tarare, con maggiore precisione, le strategie di miglioramento/adequamento sismico

PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DINAMICA IN SEDE DI COLLAUDO

Rilevazione sperimentale comparabile con il modello analitico assicura una corretta esecuzione

Verifica della bontà di una tecnica di adeguamento o miglioramento sismico

MONITORAGGIO IN CONTINUO

Controllo delle variazioni dovute al degrado, ai danneggiamenti, a fattori ambientali

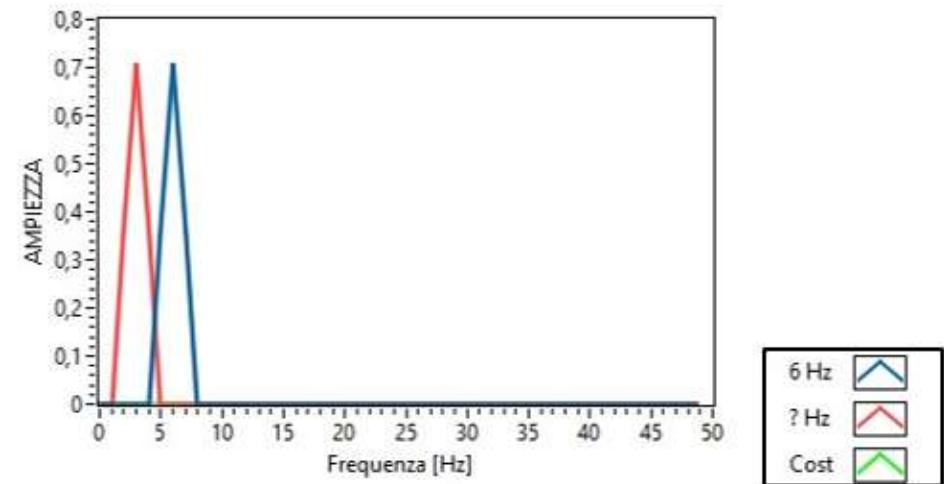
Verifica del comportamento dinamico durante l'azione eccezionale, come ad esempio un evento sismico

Ricordando che:

$$f = \frac{1}{T} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K^*}{m^*}}$$

se operiamo un intervento di adeguamento sismico che produce un irrigidimento della struttura, ad esempio tramite l'inserimento nei telai di controventature, osserviamo un aumento della frequenza di vibrazione e, pertanto, nella Trasformata di Fourier, una traslazione positiva del picco di frequenza tra gli stati ante e post-operam.

Analogamente, per una struttura che si danneggia per vetustà o a seguito di un evento sismico, osserviamo una riduzione della frequenza di vibrazione, ovvero una traslazione negativa del picco di frequenza nella trasformata di Fourier.



INPUT (FORZANTE) DELLE PROVE DINAMICHE

NOTO: Forzanti sinusoidali (misurabili), come ad esempio le vibrodine , oppure prove di rilascio o snap-back.

IGNOTO: Rumore ambientale (non misurabili), come ad esempio forzante naturale (vento e/o microtremori) o forzante antropica (traffico stradale e/o ferroviario, attività varie).

Forzanti sinusoidali (misurabili)

Prove impegnative

La vibrodina è una strumentazione pesante, difficile da spostare

Alti tempi di esecuzione

Elevati costi

Maggiore semplicità interpretativa

Forzanti ambientali (non misurabili)

Poco impegnative

Non richiede una specifica forzante

Tempi di esecuzione ridotti

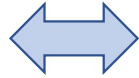
Minori costi

Nessuna interruzione delle condizioni operative dell'infrastruttura

Maggiore difficoltà interpretativa (i risultati possono essere inficiati se al rumore bianco si sovrappone un'eccitazione non casuale)

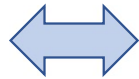
Il comportamento dinamico delle costruzioni civili può essere determinato attraverso due tecniche operative sperimentali:

**ECCITAZIONE FORZATA
(NOTA)**



**EMA (Experimental Modal Analysis)
ANALISI MODALE SPERIMENTALE**

**ECCITAZIONE NATURALE
(IGNOTA)**



**OMA (Operational Modal Analysis)
ANALISI MODALE OPERAZIONALE o ANALISI MODALE OPERATIVA**

La più grande differenza fra le tecniche EMA e OMA consiste nel fatto che, mentre le prime operano in un contesto deterministico, le seconde in uno stocastico.

E' importante sottolineare che la possibilità di effettuare un monitoraggio in continuo (o permanente) è legata alla sola Analisi Modale Operazionale (OMA).

Tali sistemi di monitoraggio sono infatti finalizzati a registrare in modo continuo la risposta (output) della struttura alle azioni che la sollecitano (input), senza che queste ultime siano misurate.

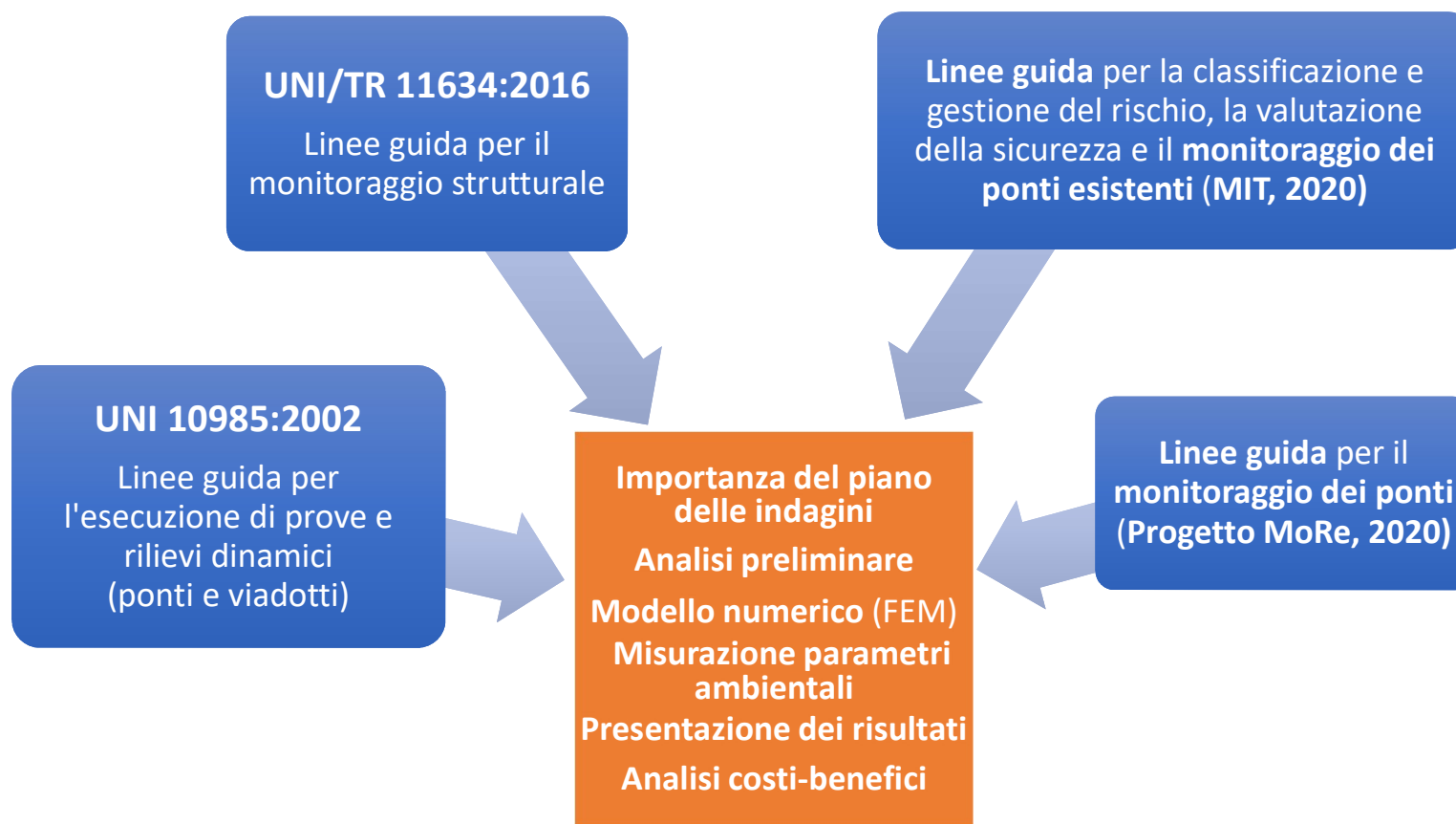
Lo stato dell'arte del quadro normativo nazionale attuale, nell'ambito delle prove dinamiche e sui monitoraggi dinamici, risulta decisamente carente, in particolare per le strutture civili, per le quali non vi sono norme cogenti che li regolamentino.

Obbligatorietà delle prove dinamiche

Le NTC18 e la relativa Circolare esplicativa non richiamano norme tecniche relativamente alle prove dinamiche e ai monitoraggi (nonostante negli ultimi due decenni siano state sviluppate nel resto del mondo diverse linee guida e raccomandazioni).

Per quanto concerne l'obbligatorietà di eseguire tali prove, le NTC18 (ai §§ 9.2.2 e 9.2.3) ne impongono l'uso per il collaudo di ponti stradali e ferroviari (solo periodo fondamentale), solo nel caso di opere di "significativa rilevanza" (non specificando tra l'altro quali siano considerate tali).

Per sopperire parzialmente a questa carenza, sono state emanate le seguenti normative tecniche e linee guida da parte di vari organi legislativi e dall'Ente Italiano di Normazione (UNI), riguardanti particolarmente le infrastrutture:



CATENA DI MISURA

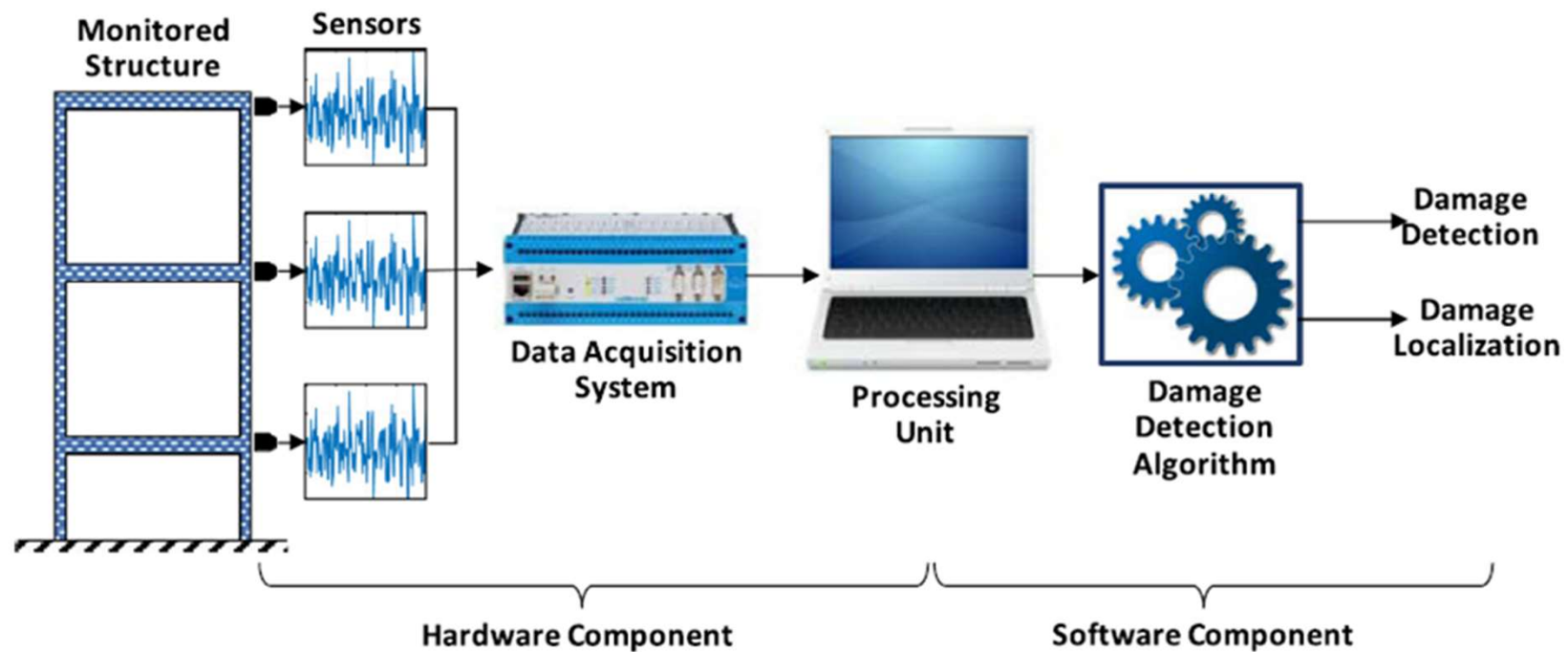
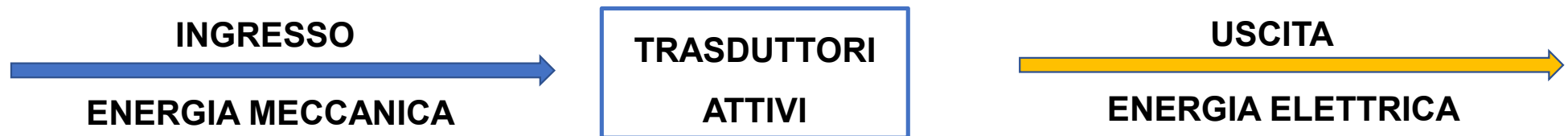


Immagine tratta da "A review of vibration-based damage detection in civil structures: From traditional methods to Machine Learning and Deep Learning applications", Avci et al., 2020.

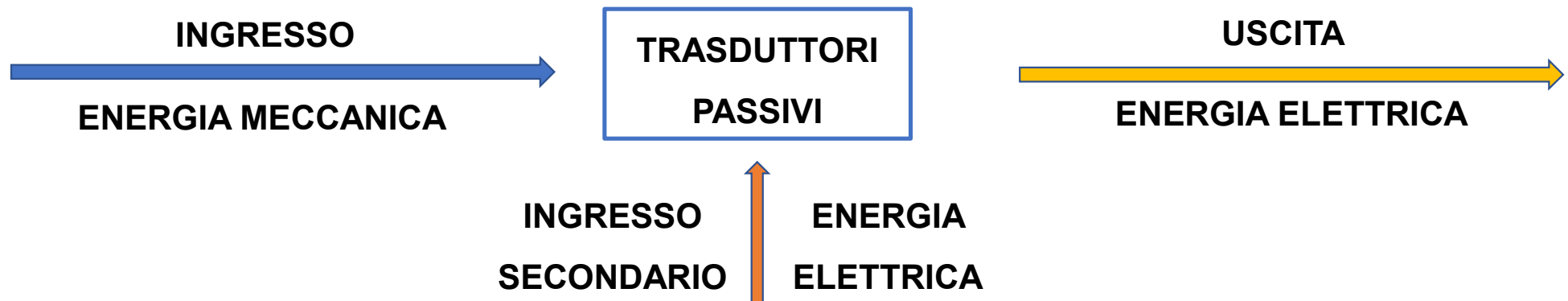
TRASDUTTORE: dispositivo che opera una trasformazione tra grandezze fisiche differenti, nel caso, ad esempio, di sensori di vibrazioni, convertono variazioni di grandezze meccaniche in variazioni di grandezze elettriche.

I trasduttori possono essere distinti in due categorie:

TRASDUTTORI ATTIVI: non hanno bisogno di nessun'altra fonte energetica all'ingresso



TRASDUTTORI PASSIVI: hanno bisogno di una fonte energetica all'ingresso



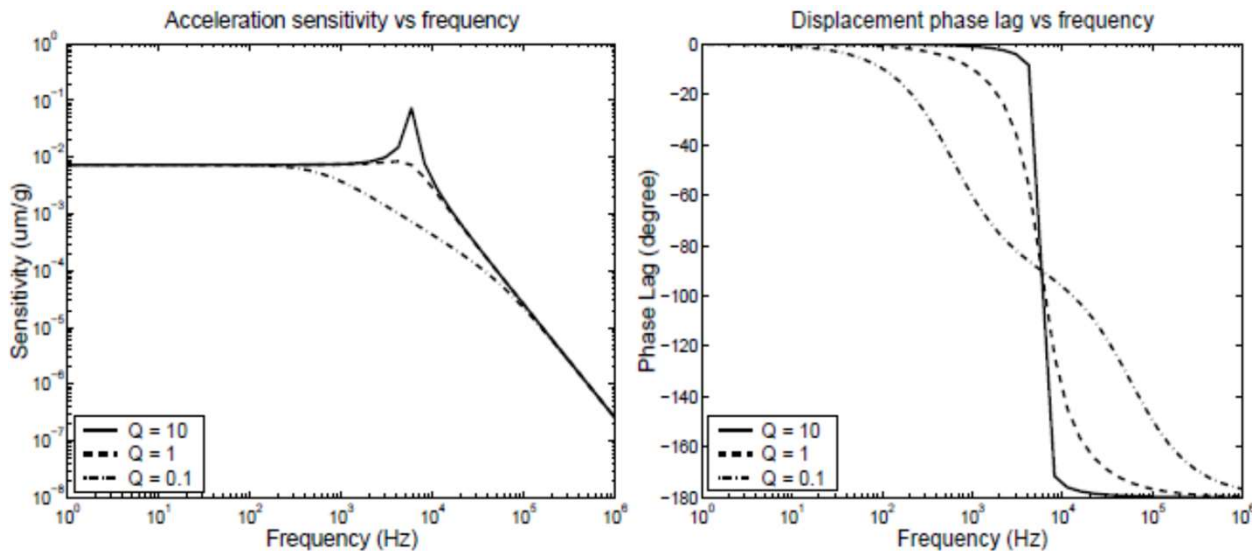
TRASDUTTORE: L'ACCELEROMETRO

Un accelerometro non è nient'altro che una massa inerziale sospesa connessa ad una struttura, come mostrato schematicamente nella figura a lato.

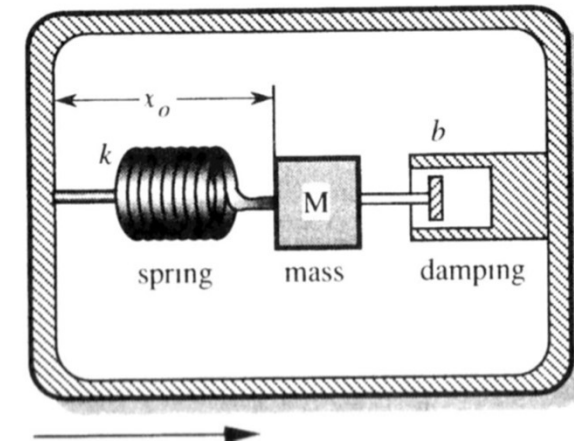
E' composto da tre elementi di base:

- una massa (M)
- una molla di costante elastica K
- uno smorzamento (generalmente costituito da un fluido) per il controllo dell'oscillazione, di coefficiente b .

Funzione di risposta in frequenza



Single Degree of Freedom (SDOF)

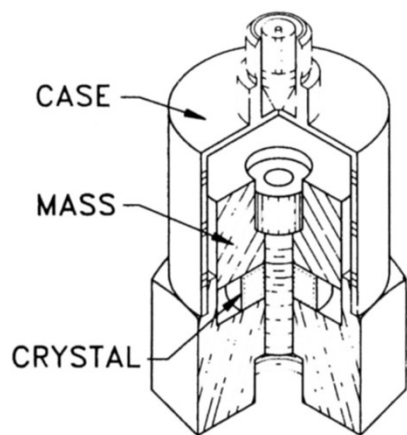


L'ACCELEROMETRO PIEZOELETTRICO

Il più semplice accelerometro piezoelettrico consiste in una base di materiale rigido, al quale viene appoggiato un disco di materiale cristallino piezoelettrico, sia naturale (quarzo) o ceramico di titanato o zirconato di piombo (PZT), che possono essere combinati con un peso calcolato chiamata massa sismica, il tutto assemblato con un bullone passante.

Il contatto elettrico è garantito per mezzo di due elettrodi su entrambi i lati del disco.

La base dell'accelerometro viene fissata all'oggetto sottoposto alla prova il cui movimento esercita una forza sulla massa sismica che induce una sollecitazione sul disco piezoelettrico. Dagli elettrodi si preleva il segnale elettrico che viene portato ad un amplificatore di segnale.



Questo tipo di sensori operano da frequenze minime di 2 Hz a valori dell'ordine dei 5 kHz, sono altamente lineari, operano in intervalli estesi di temperatura (fino a 120°C) e presentano un'alta reiezione ai disturbi.

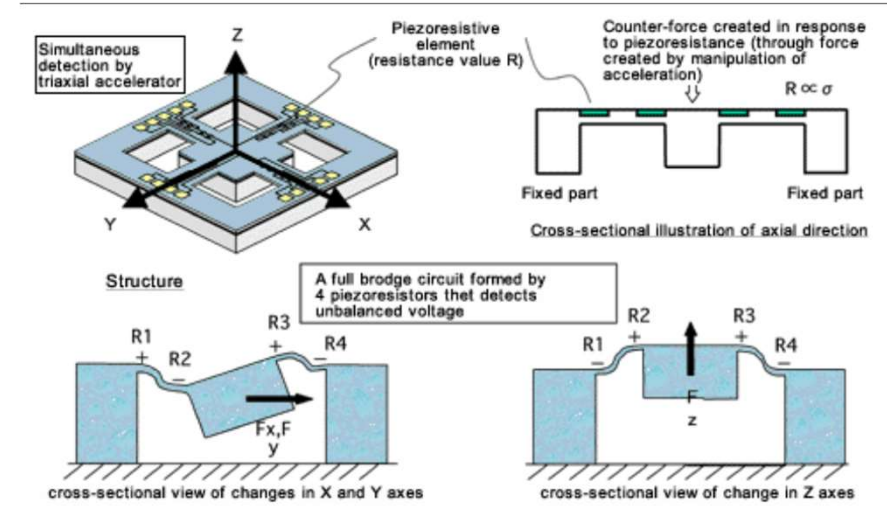
- Elettrodi metallici raccolgono gli ioni e trasmettono il segnale
- Smorzamento molto basso 0,01
- Risposta a basse frequenze dipendenti dalle caratteristiche del cristallo
- Risposta ad alte frequenze dipendente dalla risonanza meccanica
- Utilizzano un amplificatore di cariche
- Difficoltà quando le misure sono quasi statiche
- Frequenze < 1Hz possono presentare errori in presenza di transienti termici



L'ACCELEROMETRO PIEZORESISTIVO

Anche questa tecnologia comporta il movimento di una massa sismica, ma nei dispositivi tradizionali, l'elemento piezoresistivo (PR) è un estensimetro incollato alla mensola a sbalzo che è parte integrante della massa sismica. Come essa si flette in risposta alle forze d'accelerazione, il materiale è sollecitato e modifica la sua resistenza.

Quattro elementi sensibili (estensimetri) sono configurati a ponte di Wheatstone, provvedendo a un alto livello d'uscita e la possibilità di eliminare la sensibilità trasversale, gli effetti dovuti alla temperatura e altri effetti spuri. Poiché questi dispositivi sono passivi, devono essere alimentati con una tensione d'eccitazione, generalmente 10 Volt. L'uscita è poi inviata a un amplificatore o direttamente a un dispositivo di lettura.



- non forniscono alcuna uscita in risposta ad accelerazioni costanti, a causa del principio di base della misura di spostamento per via piezoelettrica;
- ampi segnali di tensione in uscita;
- piccole dimensioni;
- frequenze proprie molto alte, caratteristica necessaria per ottenere accurate misurazioni di fenomeni impulsivi;
- non è previsto alcuno smorzamento intenzionale, lasciando l'isteresi del materiale quale unica fonte di dissipazione energetica (valore dello smorzamento molto basso);
- la risposta alle basse frequenze è limitata dalla caratteristica piezoelettrica, mentre quella alle alte frequenze è limitata dalla risonanza meccanica.

L'ACCELEROMETRO CAPACITIVO CON TECNOLOGIA MEMS (MICROELECTROMECHANICAL SYSTEMS)

Motivazione dell'uso di tecnologie MEMS: ridurre le dimensioni e abbattere i costi.

Il primo accelerometro realizzato con tecniche di micro machining alla Stanford University nel 1979.

Dopo 15 anni la tecnologia divenne matura per realizzare prodotti commerciali su larga scala. Negli anni '90 gli accelerometri MEMS hanno rivoluzionato la sicurezza nel settore dell'auto con i sistemi airbag.

Oggi il loro mercato è vasto: protezione hard-disk, rivelatori di cadute per disabili, monitoraggio movimento corpo umano (settore medicale, intrattenimento), microsismica etc..

L'accelerometro capacitivo, per rilevare lo spostamento della massa, sfrutta la variazione di capacità elettrica di un condensatore.

Si costruiscono le due armature del condensatore: una è nel dispositivo, l'altra è la massa, con materiale conduttivo, sospesa su una membrana e posta a poca distanza. La corrente generata dalle due armature (dispositivo + massa conduttiva) ne cambia la variazione di tensione (capacità elettrica), e quindi la distanza.

Dalla rilevazione della capacità elettrica, il dispositivo deduce lo spostamento della massa e ne genera un segnale elettrico proporzionale. Gli accelerometri capacitivi possono essere a 3 o 4 fili, con amplificatore incorporato.

I sensori MEMS – Micro Electro-Mechanical System, microsistemi elettromeccanici, si distinguono per le ridotte dimensioni e per essere molto economici.



IL SERVOACCELEROMETRO (AD AZZERAMENTO O FORCE BALANCE)

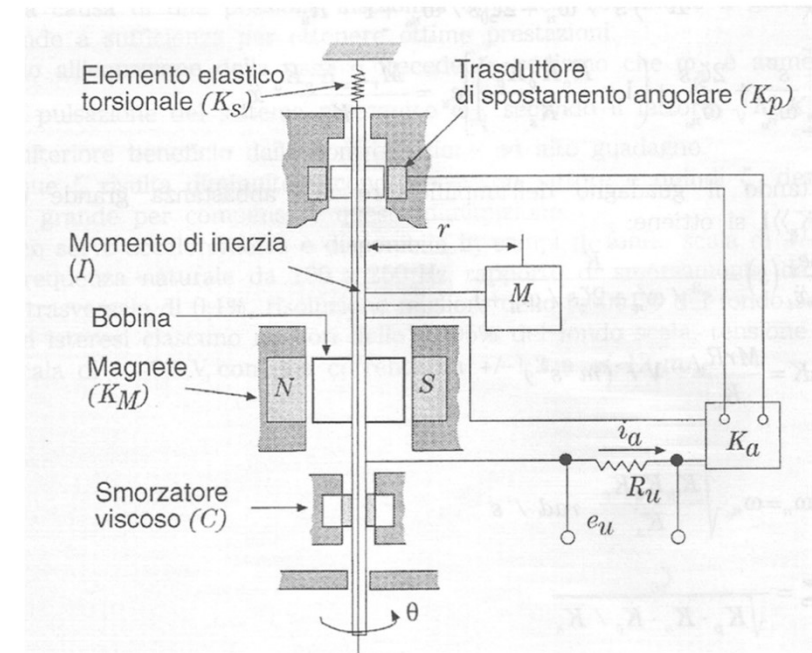
I cosiddetti servo accelerometri, che sfruttano il principio della retroazione, sono stati sviluppati per applicazioni che richiedono un'accuratezza maggiore.

In questi strumenti ad azzeramento, la massa sensibile all'accelerazione viene mantenuta molto vicino alla posizione di spostamento nullo, rilevando tale spostamento e generando una forza magnetica ad esso proporzionale, e in grado di opporsi in ogni circostanza al movimento della massa stessa rispetto alla posizione di riferimento.

Questa forza di richiamo svolge la stessa funzione della forza meccanica che si sviluppa nella molla di un accelerometro di tipo convenzionale.

Quindi, si può pensare di aver sostituito la molla meccanica con una 'elettrica'.

I vantaggi che derivano da questo approccio sono una maggior linearità e assenza di comportamento isteretico della molla elettrica rispetto a quella meccanica.



Gli accelerometri, così come indicato nelle norme UNI 10985 e UNI/TR 11634, devono essere installati seguendo le direttive della norma UNI ISO 5348 e il loro fissaggio deve essere riportato nel certificato/rapporto di prova insieme alla descrizione della catena di misura e alle caratteristiche di risposte in frequenza del sistema di misura completo.

Nel caso di un monitoraggio in continuo, devono essere protetti da possibili aggressioni meccaniche o ambientali e posti nel modo quanto più accessibile per effettuare la manutenzione e controllare eventuali danneggiamenti.

I cavi insieme agli altri sistemi di trasmissione dei dati sono fissati alla struttura, avendo cura che non siano soggetti a urti, vibrazioni o danneggiamenti vari.

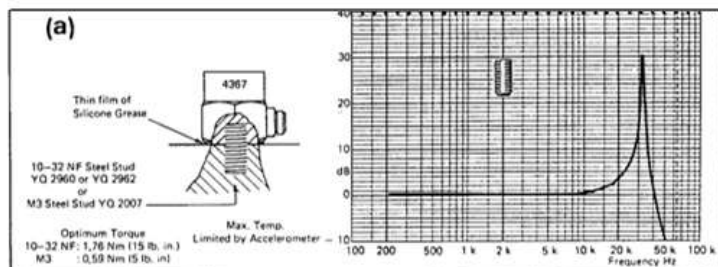
Il sistema di fissaggio dell'accelerometro sull'elemento da testare influenza la frequenza di risonanza dell'accelerometro, e quindi il range di frequenza.

Il fissaggio può essere visto come una molla di rigidezza k in serie con l'accelerometro: più alto è il valore, minore è la riduzione del range di frequenza.

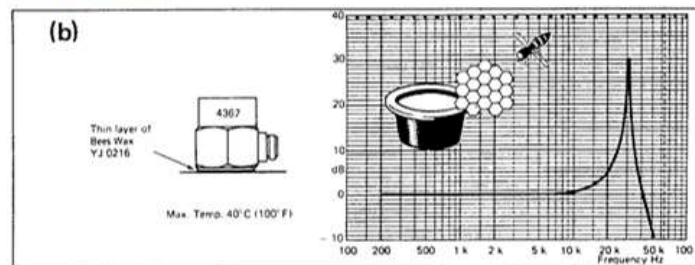
I diversi sistemi di montaggio sono:

- a) Perni filettati (20 kHz ÷ 50 kHz) necessità di filettare lo strumento da misurare**
- b) Cera d'api (20 kHz ÷ 50kHz)**

a) Perni filettati



b) Cera d'api



Montaggio degli accelerometri



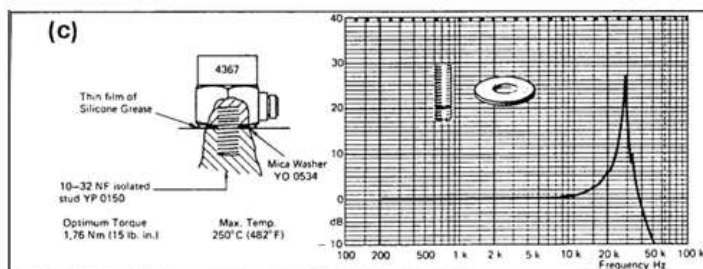
Ing. Giuseppe DI IORIO

I diversi sistemi di montaggio:

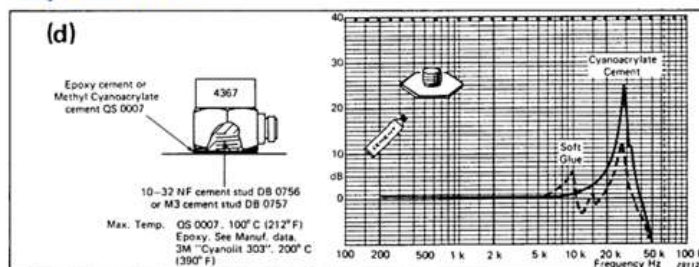
c) Perno filettato con rondella (20 kHz ÷ 50 kHz)

d) Adesivo soffice (sottile 8 kHz) – cianacrilico (20 kHz ÷ 50 kHz)

c) PERNI filettati con rondella



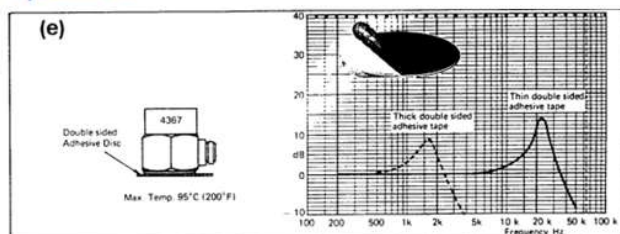
d) Adesivo



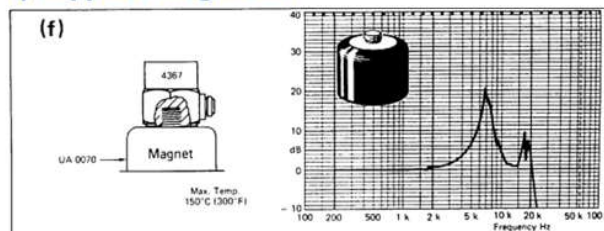
e) Collanti (funzione del tipo)

f) Supporto magnetico (5 kHz)

e) Collanti



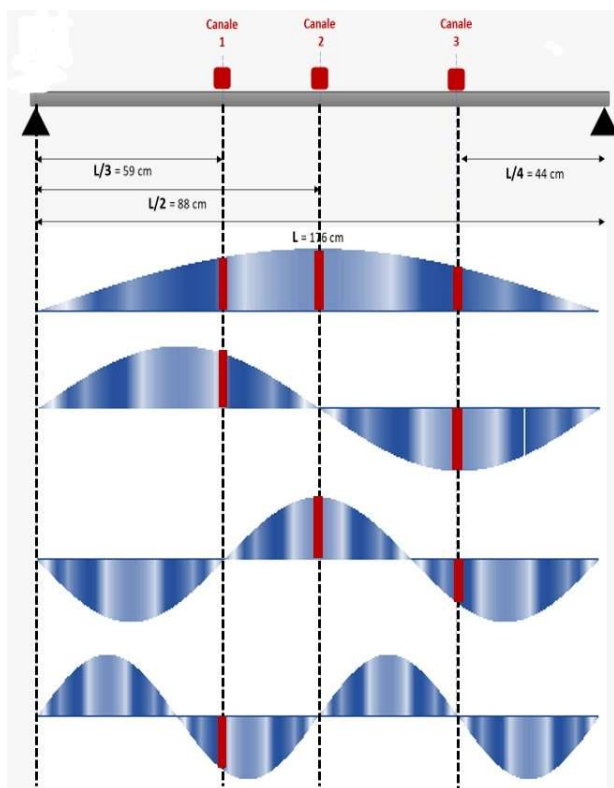
f) Supporto magnetico



POSIZIONAMENTO DEGLI ACCELEROMETRI

Il caso degli impalcati da ponte (ACCELERAZIONI VERTICALI)

Ipotizziamo un ponte a una campata con appoggi di tipo «Gerber», ben modellabile con uno schema di trave appoggiata. I modi di vibrazione flessionali di uno schema statico di questo tipo sono quelli riportati nella figura seguente:



Il numero di accelerometri posti sulla trave deve essere almeno pari al numero di forme modali flessionali che vogliamo determinare.

1° modo di vibrazione – nessuna inversione di segno – qualsiasi posizione degli accelerometri permette di identificare f_1

2° modo di vibrazione – n.1 inversione di segno ad $L/2$ da appoggio – il canale 2 non permette di identificare f_2

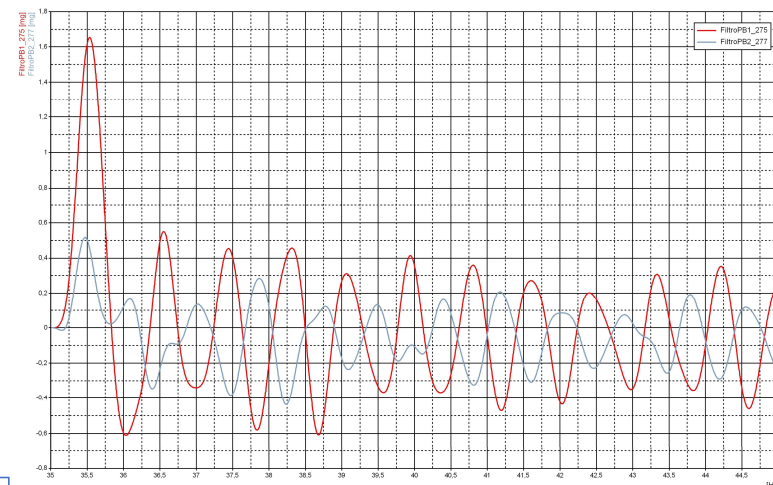
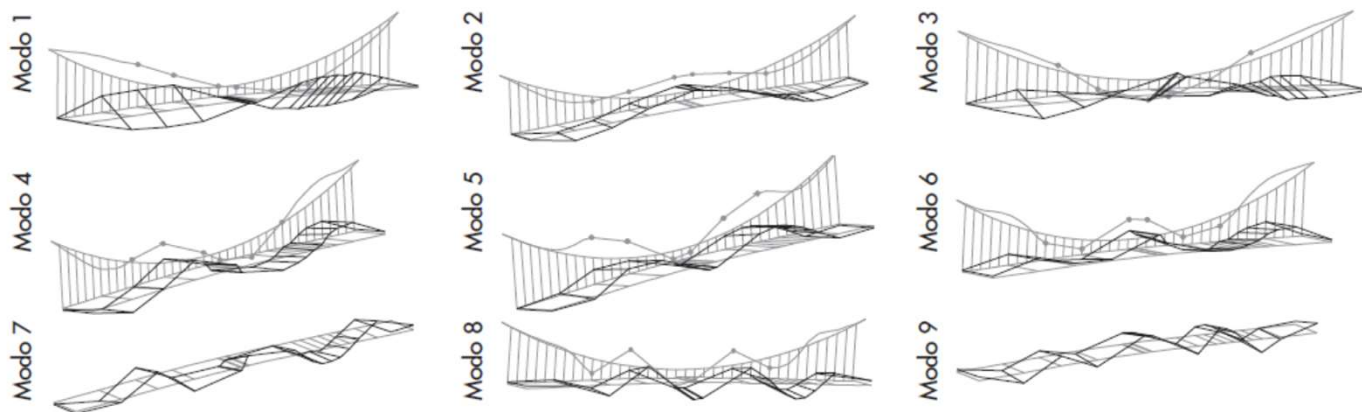
3° modo di vibrazione – n.2 inversioni di segno ad $L/3$ da appoggio – il canale 1 non permette di identificare f_3

4° modo di vibrazione – n.3 inversioni di segno ad $L/4$ da appoggio – i canali 2 e 3 non permettono di identificare f_4

POSIZIONAMENTO DEGLI ACCELEROMETRI

Il caso degli impalcati da ponte (ACCELERAZIONI VERTICALI)

E trasversalmente all'asse dell'impalcato che succede? Bisogna identificare i modi torsionali...



PER IDENTIFICARE I MODI DI VIBRAZIONE DI TIPO TORSIONALE BISOGNA POSIZIONARE N.2 SENSORI ACCELEROMETRICI NELLA STESSA SEZIONE TRASVERSALE IN N.2 PUNTI SUFFICIENTEMENTE DISTANTI AD ESEMPIO SULLE DUE TRAVI DI BORDO.

NEL DOMINIO DEI TEMPI È POSSIBILE OSSERVARE L'OPPOSIZIONE DI FASE DEGLI ACCELEROGRAMMI IN CORRISPONDENZA DI UN DETERMINATO MODO DI VIBRAZIONE.

Esempio pratico



Ing. Giuseppe DI IORIO

VIADOTTO TAMMARO II SS 212 VAL FORTORE

ENTE APPALTANTE. ANAS SpA

COMMITTENTE: Laboratorio
autorizzato CENTRO
SPERIMENTALE DI INGEGNERIA srl

PROGETTAZIONE:
INTEGRA - Ingegneria Territorio
Grandi infrastrutture srl

LUNGHEZZA TOTALE: 503 m

IMPALCATO:
bi-trave in acciaio Corten.

ALTEZZA TRAVE: tra 3,80 e 2,80m

N. CAMPATE: 8

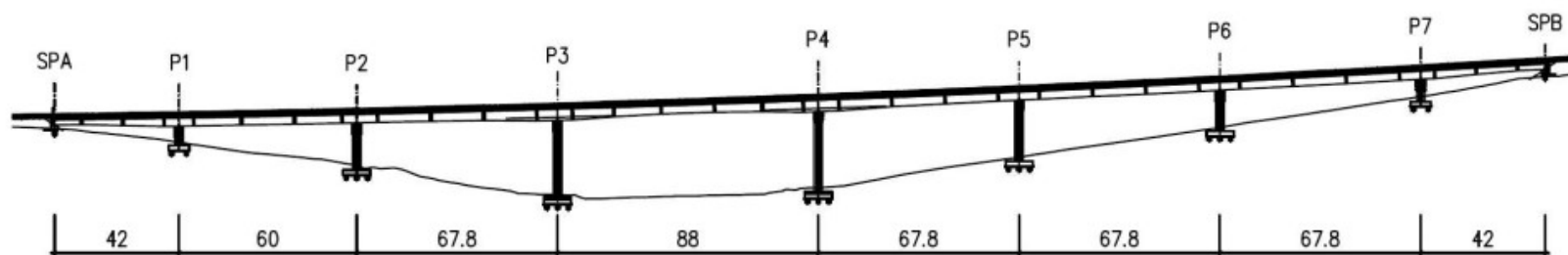
LUNGH. CAMPATA. 88 m

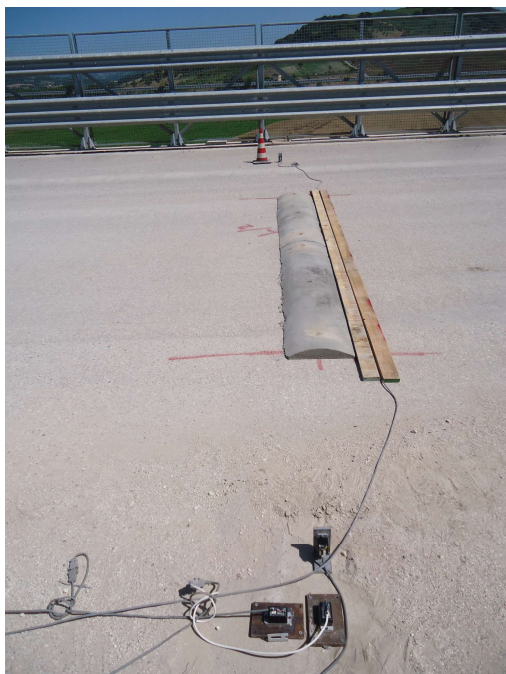
LARGH. CAMPATA: 11,8 m

APPOGGI: mobili longitudinalmente



Immagine tratta dal web site <https://www.integer.it/index.html>





Tipo di eccitazione

Nel corso della prova sono state registrate le vibrazioni indotte dalle seguenti eccitazioni:

1. vibrazioni ambientali (vento o microsismi);
2. forzante impulsiva.

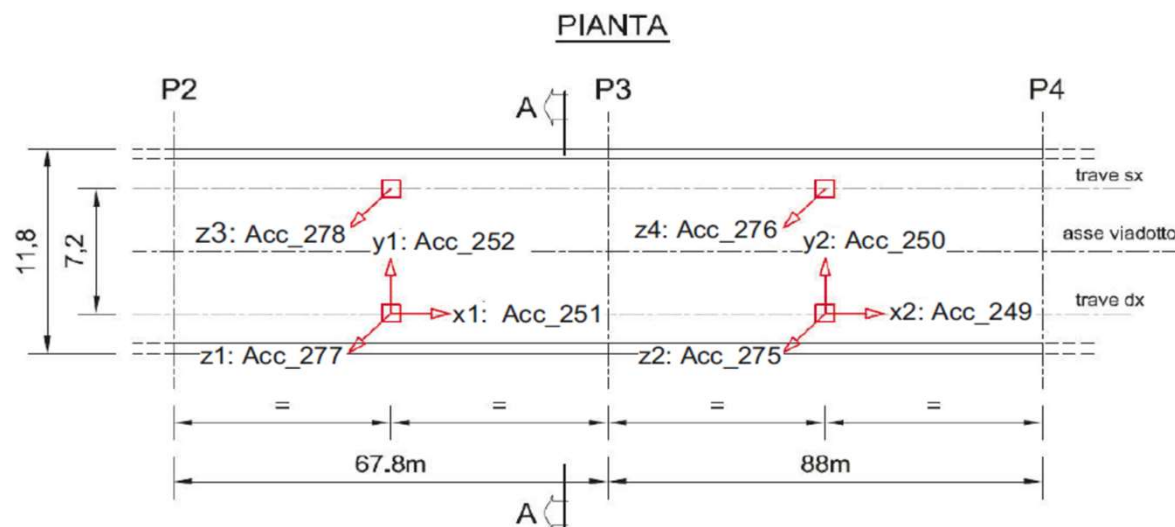
La forzante impulsiva è stata realizzata mediante il transito di un mezzo pesante su di un dosso artificiale in bitumato, posizionato in corrispondenza della mezzeria della campata compresa tra le pile P3 e P4.

Il mezzo pesante ha interrotto la propria marcia una volta attraversata la campata P3 - P4, fermandosi in corrispondenza della pila P4, in modo da non influenzare le oscillazioni libere dell'impalcato, attraversando le campate successive per uscire completamente dal viadotto.

Posizione degli accelerometri

Gli accelerometri sono stati posizionati tra la mezzeria della campata eccitata ed L/3 nella campata (P3-P4) direttamente eccitata e nella campata adiacente (P2-P3), in corrispondenza degli allineamenti delle travi metalliche.

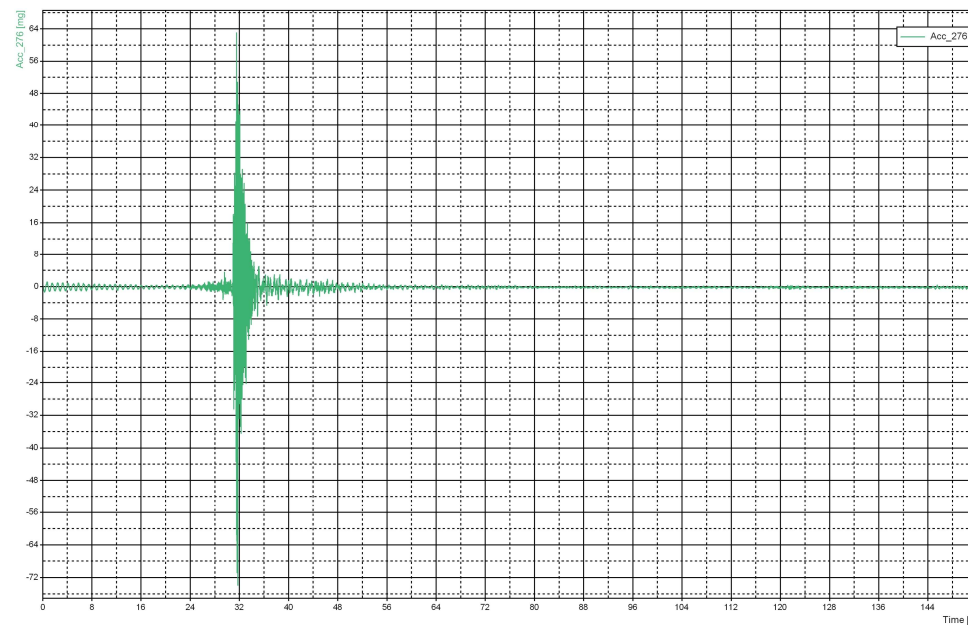
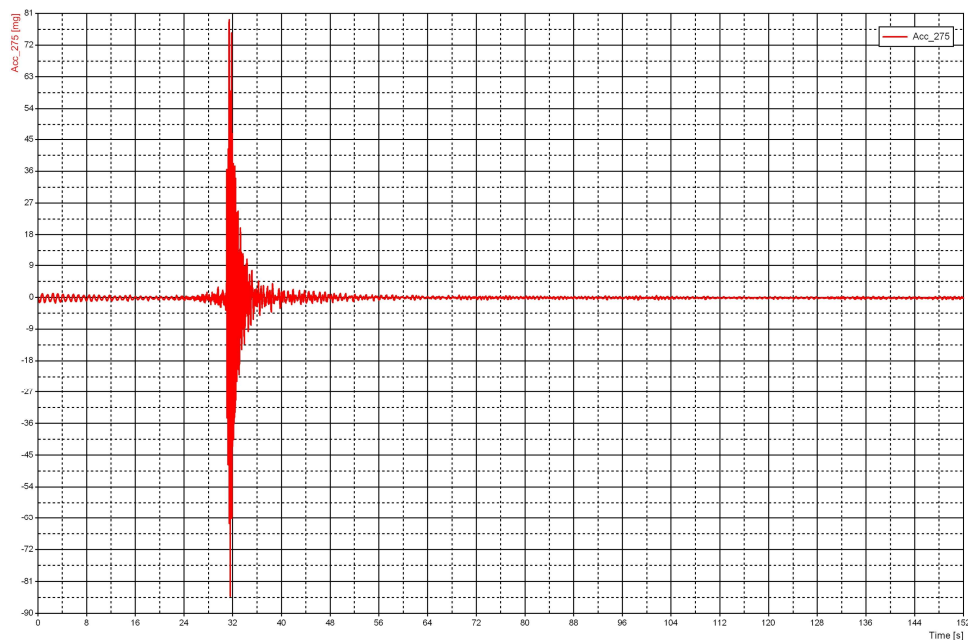
Nella Figura a lato si riporta la posizione sul viadotto degli accelerometri.



Prospetto dei test

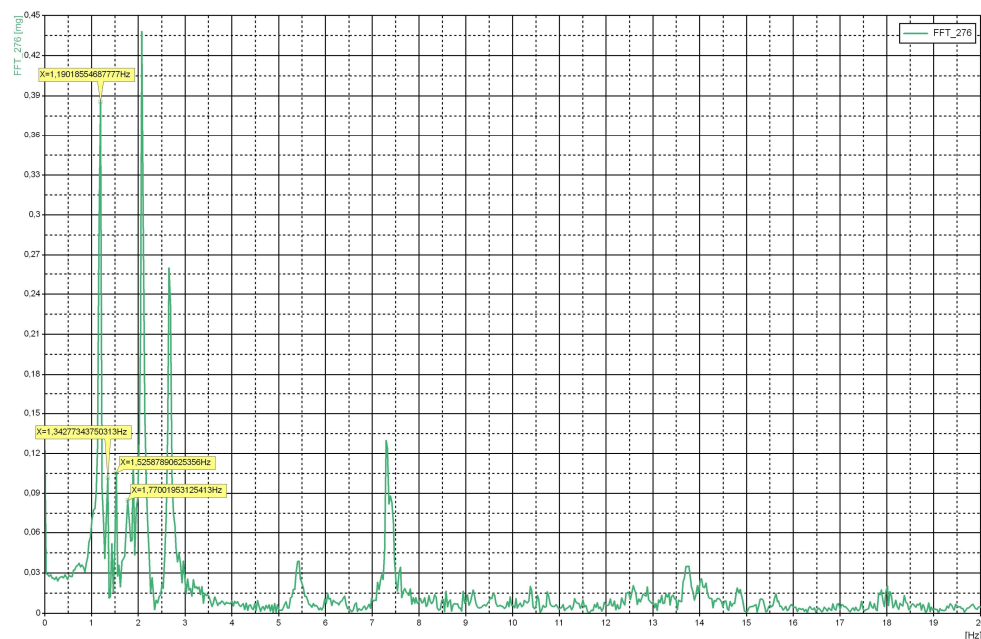
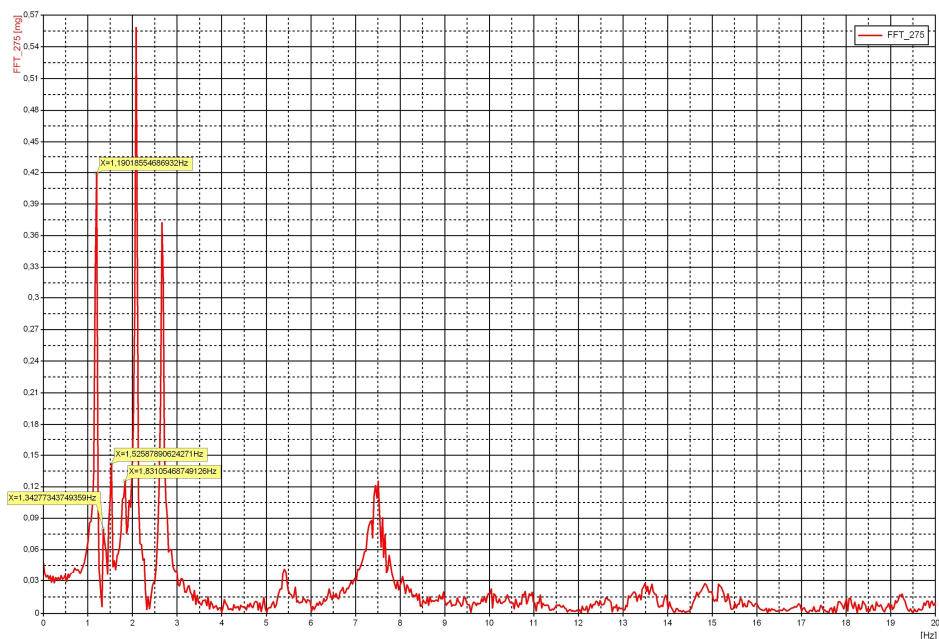
Test n.	Data	Ora	n° canali	N° campioni	Sampling Rate	FILTRO	Note
					[Hz]		
1	02/07/2014	13:35	8	624000	1000,10	Passa basso 40 Hz Butterworth	Registrazione ambientale
2	02/07/2014	13:47	8	158000	1000,10	Passa basso 40 Hz Butterworth	Camion 15 km/h
3	02/07/2014	13:51	8	152000	1000,10	Passa basso 40 Hz Butterworth	Camion 30 km/h

ACCELEROGRAMMI PROVA N.3



ANALISI NEL DOMINIO DELLE FREQUENZE

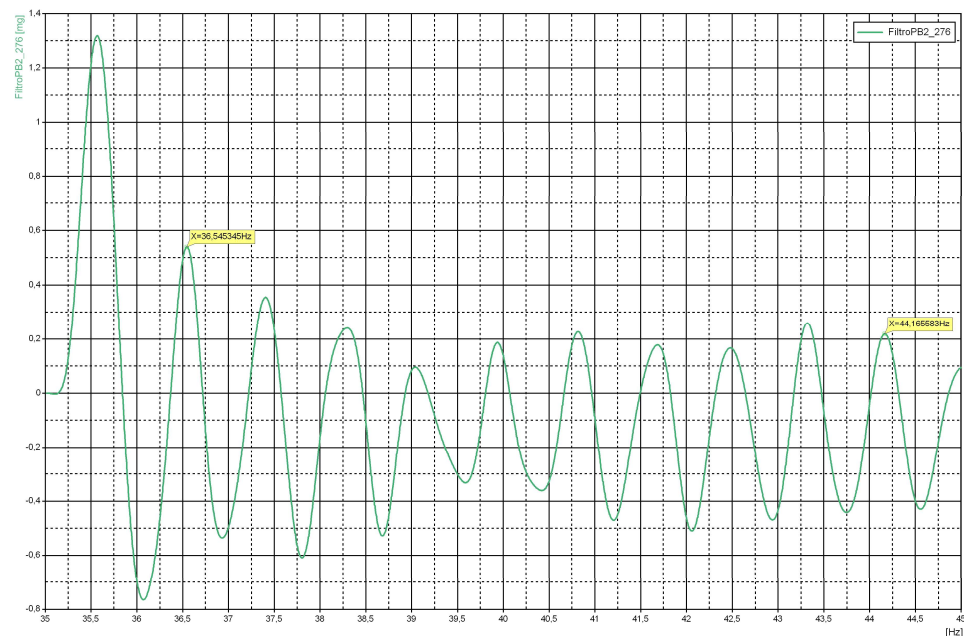
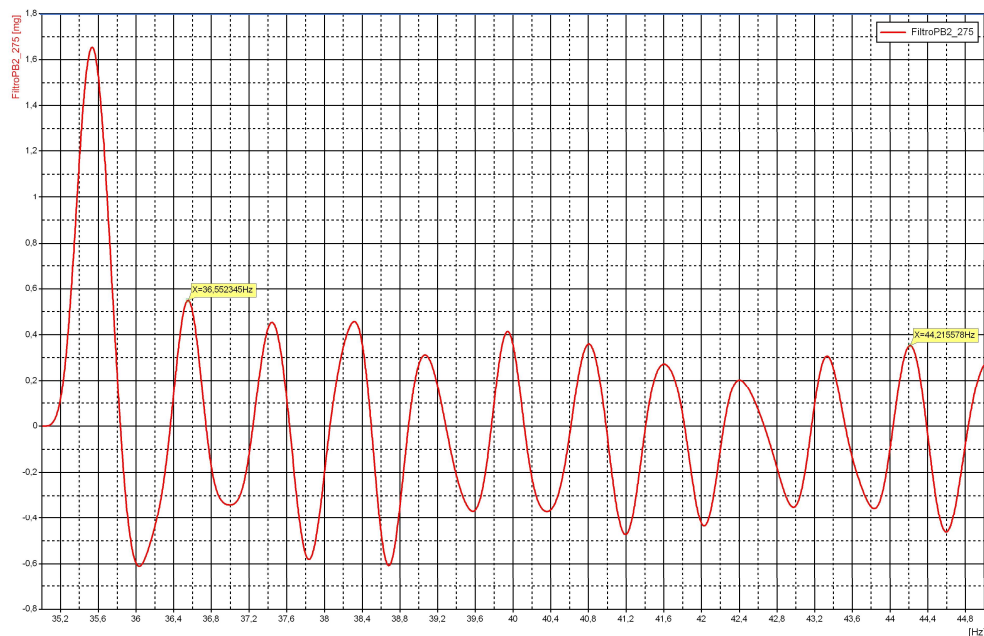
FAST FOURIER TRANSFORMER SEGNALI DIREZIONE Z - PROVA



Dall'analisi delle FFT sopra riportate si ricavano le frequenze del viadotto in direzione verticale di 1,2 Hz, 1,3 Hz, 1,5 Hz.

ANALISI NEL DOMINIO DEL TEMPO

FILTRO PASSA BASSO BUTTERWORTH SEGNALI DIREZIONE Z - PROVA N.3

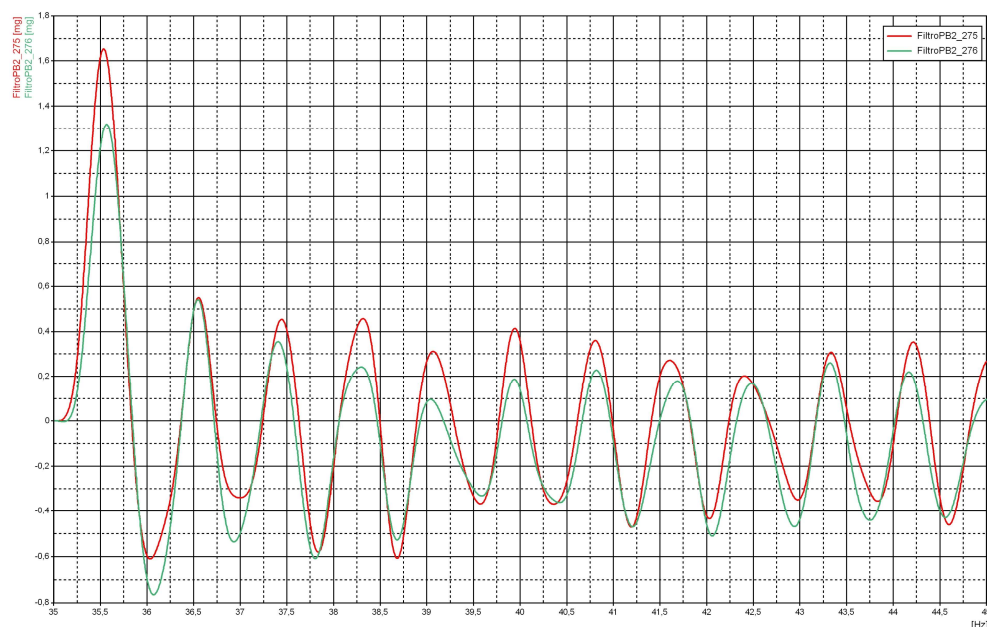


Le frequenze in questo caso sono ricavabili come $f = \frac{n^{\circ}\text{oscillazioni}}{\Delta t}$

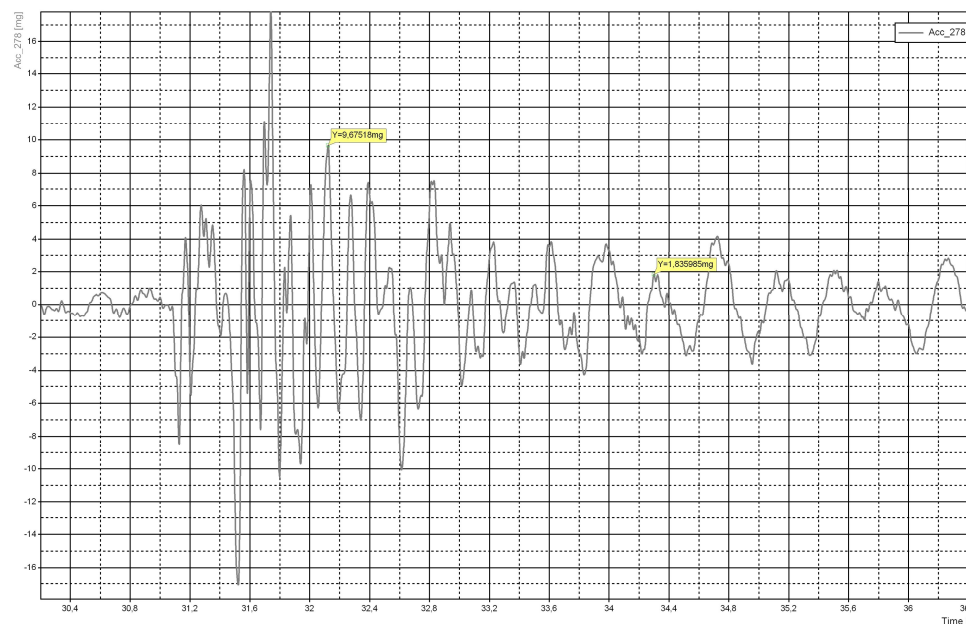
È indispensabile isolare l'armonica con l'utilizzo di un opportuno filtro al segnale.

ANALISI NEL DOMINIO DEL TEMPO

FILTRO PASSA BASSO BUTTERWORTH SEGNALI DIREZIONE Z - PROVA N.3

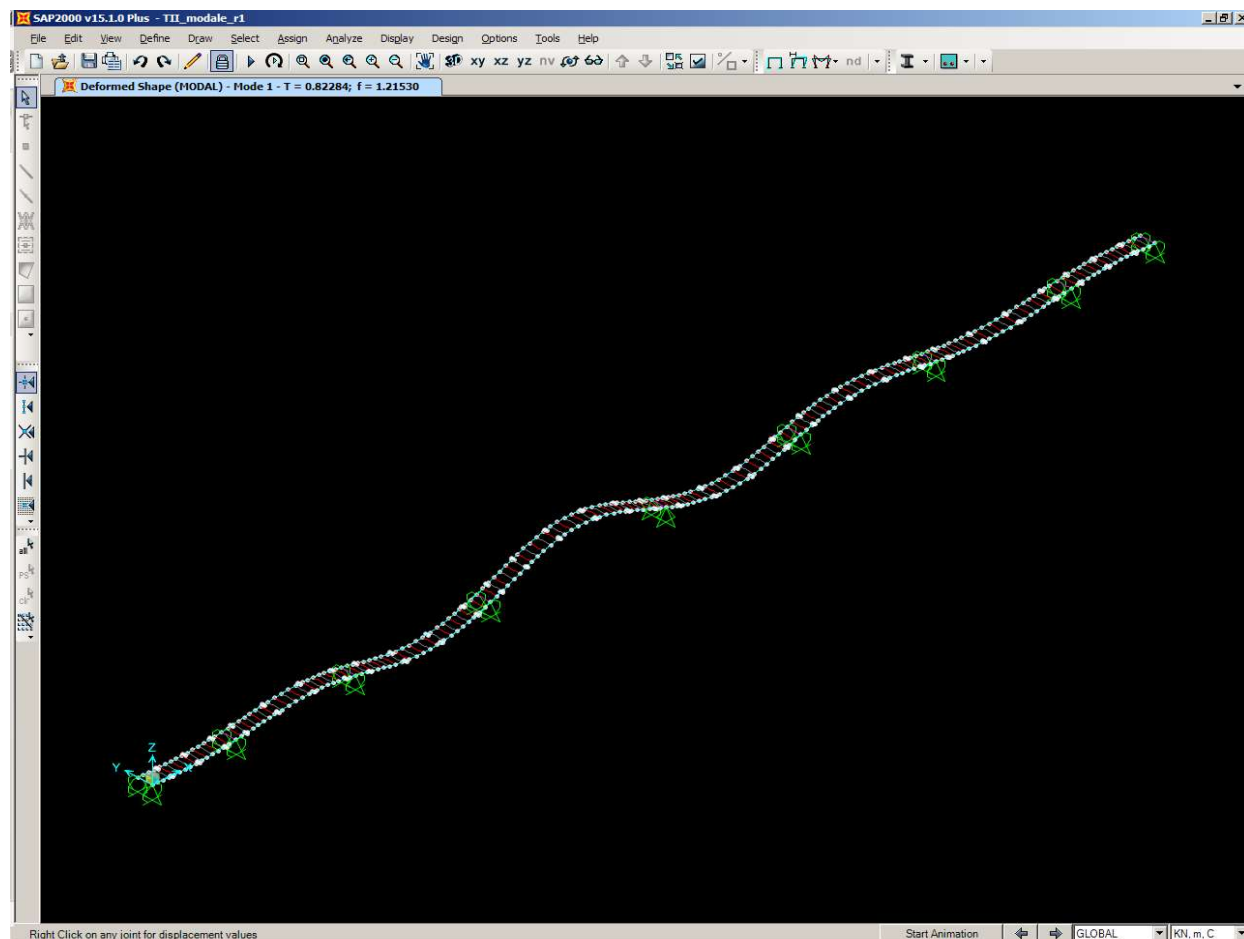


La concordanza di fase permette di considerare il modo di vibrare in direzione verticale, corrispondente alla frequenza di 1,2 Hz, come flessionale.



È possibile calcolare lo smorzamento sperimentale espresso in funzione del decremento logaritmico relativo tra due picchi distanti m cicli, come: $\xi = \frac{a_n - a_{n+m}}{2 \cdot \pi \cdot m \cdot a_{n+m}} 100$

ELABORAZIONI FEM (Finite Element Method) con software SAP2000 Non Linear

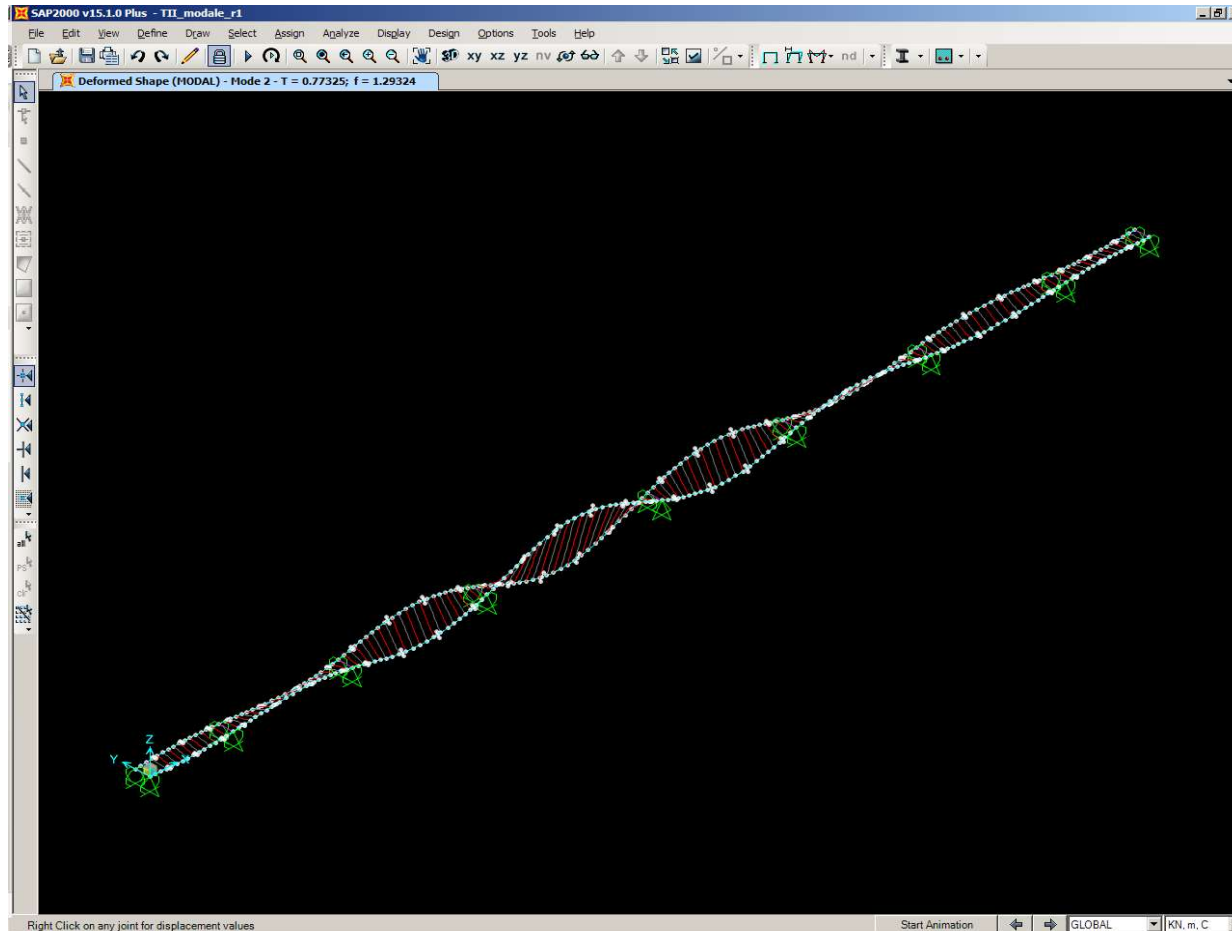


PRIMO MODO DI VIBRAZIONE IN DIREZIONE VERTICALE DI TIPO FLESSIONALE

$T_1 = 0,82 \text{ S}$

$f_1 = 1,22 \text{ Hz}$

ELABORAZIONI FEM (Finite Element Method) con software SAP2000 Non Linear

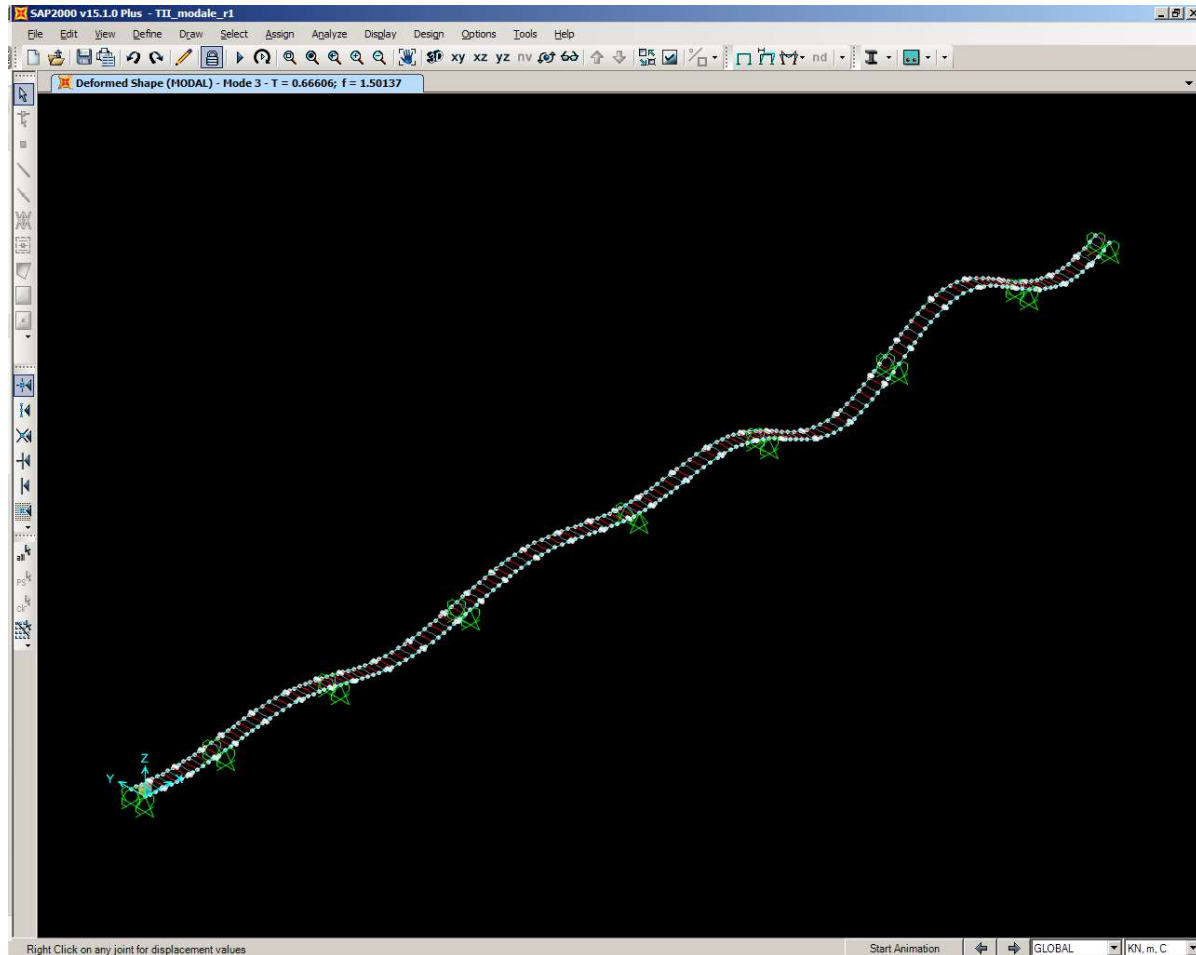


SECONDO MODO DI VIBRAZIONE IN DIREZIONE VERTICALE DI TIPO TORSIONALE

$$\underline{T_2 = 0,77 \text{ S}}$$

$$\underline{f_2 = 1,29 \text{ Hz}}$$

ELABORAZIONI FEM (Finite Element Method) con software SAP2000 Non Linear



TERZO MODO DI VIBRAZIONE IN DIREZIONE VERTICALE DI TIPO FLESSIONALE

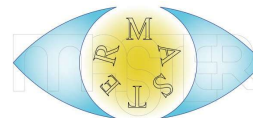
$$\underline{T3 = 0,67 \text{ S}}$$

$$\underline{f3=1,50 \text{ Hz}}$$

Confronto teorico/sperimentale



Ordine degli Ingegneri
della Provincia
di Roma



Materials and Structures Testing and Research



CONFRONTO TEORICO / SPERIMENTALE

StepNum	Period	freq (teorica)	tipo di modo	freq (sperimentale)
Unitless	Sec	Hz		Hz
1	0,82	1,22	traslaz. verticale	1,2
2	0,77	1,29	torsionale	1,3
3	0,67	1,50	traslaz. verticale	1,5

BUON ACCORDAMENTO TEORICO / SPERIMENTALE

**VALIDAZIONE POSITIVA DEL MODELLO F.E.M.
IMPORTANTE IN SEDE DI COLLAUDO**

Grazie per l'attenzione!

dott. ing. Giuseppe DI IORIO, Direttore

DI. GEO. S.r.l. - Ingegneria dei materiali

phone (+39) 0874 411239

mobile (+39) 347 9437500

giuseppediiorio@digeo.it

www.digeo.it

contrada San Giovanni in golfo, 208/N Campobasso CB