



SAIE

La Fiera delle Costruzioni
progettazione, edilizia, impianti

BARI 2023
19/21 ottobre

Nuove soluzioni per
i professionisti delle costruzioni



ALIG

ASSOCIAZIONE LABORATORI DI INGEGNERIA E GEOTECNICA

Via Giano Parrasio, n. 19 - 00152 ROMA

Tel 06-5201136

e-mail: alig@associazionealig.it - www.associazionealig.it

Riconoscimento della personalità giuridica con D.P.R. 17.06.85 n. 951
(G.U. 16 ottobre 1985 n. 244)

CONVEGNO ALIG

SAIE BARI

La Fiera delle Costruzioni. Progettazione, edilizia, impianti.

Giovedì 19 ottobre 2023 - ore 10,00/13,00

SALA QUATTRO

LA "CONOSCENZA" DELLE STRUTTURE ESISTENTI: ANATOMIA, INDAGINI E PROVE

Prove dinamiche per il monitoraggio e la verifica della resistenza delle strutture

SOMMARIO

- **RICHIAMI NORMATIVI**
- **PROVE DINAMICHE: INTRODUZIONE**
- **PROVE DINAMICHE: LA UNI 10985**
- **PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE**
- **PROVE DINAMICHE: SENSORI DI MISURA**
- **TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE**
- **MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE**
- **ELABORAZIONE DATI**
- **TECNICHE INNOVATIVE: INTERFEROMETRIA RADAR**
- **CASI STUDIO**
- **CENNI DI ANALISI MODALE**
- **CONCLUSIONI**

1. RICHIAMI NORMATIVI

Il termine **collaudo** indica l'insieme delle operazioni messe in atto per verificare il corretto funzionamento di un'opera, prima che questa venga destinata all'utilizzo. All'interno del **quadro normativo italiano** la Legge n.1086/71 evidenzia l'obbligatorietà del collaudo statico, le cui direttive per l'esecuzione sono definite nel **Cap.9** dell'

- **Aggiornamento delle «Norme tecniche per le costruzioni» - D.M. del 17/01/2018**
- e nella relativa CIRCOLARE 21 gennaio 2019, n. **7 C.S.LL.PP. -Istruzioni per l'applicazione dell'«Aggiornamento delle “Norme tecniche per le costruzioni”»** di cui al decreto ministeriale 17 gennaio 2018.

7.10.8. ACCORGIMENTI SPECIFICI IN FASE DI COLLAUDO

Ai fini del collaudo statico, di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

Il collaudatore può disporre l'esecuzione di speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento atte a verificare, nei riguardi di azioni di tipo sismico, che le caratteristiche della costruzione corrispondano a quelle attese.

1. RICHIAMI NORMATIVI

9.2 PROVE DI CARICO

Le prove di carico, ove ritenute necessarie dal Collaudatore, dovranno identificare la corrispondenza del comportamento teorico con quello sperimentale.

Le prove di carico sono prove di comportamento delle opere sotto le azioni di esercizio. Queste devono essere, in generale, tali da indurre le sollecitazioni massime di esercizio per combinazioni caratteristiche (rare).

In relazione al tipo della struttura ed alla natura dei carichi le prove possono essere convenientemente protratte nel tempo, ovvero ripetute su più cicli. Il giudizio sull'esito della prova è responsabilità del Collaudatore.

L'esito della prova va valutato sulla base dei seguenti elementi: le deformazioni si accrescano all'incirca proporzionalmente ai carichi; - nel corso della prova non si siano prodotte fratture, fessurazioni, deformazioni o dissesti che compromettono la sicurezza o la conservazione dell'opera;

- la deformazione residua dopo la prima applicazione del carico massimo non superi una quota parte di quella totale commisurata ai prevedibili assestamenti iniziali di tipo anelastico della struttura oggetto della prova. Nel caso invece che tale limite venga superato, prove di carico successive devono indicare che la struttura tenda ad un comportamento elastico.

- la deformazione elastica risulti non maggiore di quella calcolata.

1. RICHIAMI NORMATIVI

9.2 PROVE DI CARICO

....Le prove statiche, a giudizio del Collaudatore e in relazione all'importanza dell'opera, possono essere integrate da prove dinamiche e prove a rottura su elementi strutturali.

Nel caso di costruzioni dotate di dispositivi antisismici, ai fini del collaudo statico, di fondamentale importanza è il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

Il collaudatore può altresì disporre specifiche prove dinamiche atte a verificare il comportamento dinamico della costruzione.

1. RICHIAMI NORMATIVI

9.2.2 PONTI STRADALI

Fermo restando quanto sopra specificato, in particolare si dovrà controllare che le deformazioni sotto i carichi di prova, in termini di abbassamenti, rotazioni ecc, siano comparabili con quelle previste in progetto e che le eventuali deformazioni residue dopo il primo ciclo di carico, determinate come indicato più sopra, non risultino superiori al 15% di quelle massime misurate, ovvero successive prove di carico dimostrino che le deformazioni residue tendano ad esaurirsi.

Per i ponti a campata multipla, la prova di carico deve essere eseguita su almeno un quinto delle campate, secondo le modalità sopra precisate.

Per le opere di significativa rilevanza, le prove statiche andranno completate da prove dinamiche, che misurino la rispondenza del ponte all'eccitazione dinamica, controllando che il periodo fondamentale sperimentale sia confrontabile con quello previsto in progetto.

1. RICHIAMI NORMATIVI

9.2.3 PONTI FERROVIARI

Oltre a quanto specificato al precedente § 9.2, le prove di carico dovranno essere effettuate adottando carichi che inducano, di norma, le sollecitazioni di progetto dovute ai carichi mobili verticali nello stato limite di esercizio, in considerazione della disponibilità di mezzi ferroviari ordinari e/o speciali. Le deformazioni residue dopo il primo ciclo di carico, determinate come indicato più sopra, non devono risultare superiori al 15% di quelle massime misurate, ovvero successive prove di carico devono dimostrare che le deformazioni residue tendano ad esaurirsi.

Per i ponti a campata multipla, la prova di carico deve essere eseguita su almeno un quinto delle campate, secondo le modalità precisate nel capoverso precedente.

Per le opere di significativa rilevanza, le prove statiche andranno integrate da prove dinamiche, che misurino la rispondenza del ponte all'eccitazione dinamica, controllando che il periodo fondamentale sperimentale sia confrontabile con quello previsto in progetto.

1. RICHIAMI NORMATIVI

C9.2.4 PONTI STRADALI E FERROVIARI CON DISPOSITIVI DI ISOLAMENTO E/O DISSIPAZIONE

Nel collaudo statico di tali strutture e di fondamentale importanza il controllo della posa in opera dei dispositivi, nel rispetto delle tolleranze e delle modalità di posa prescritte dal progetto, nonché la verifica della completa separazione tra sottostruttura e sovrastruttura e tra quest'ultima ed altre strutture adiacenti, con il rigoroso rispetto delle distanze di separazione previste in progetto.

Il Collaudatore può disporre l'esecuzione di speciali prove per la caratterizzazione dinamica del sistema di isolamento atte a verificare, nei riguardi di azioni di tipo sismico, che il comportamento della costruzione corrisponda a quello atteso.

1. RICHIAMI NORMATIVI

« Per le opere di significativa rilevanza le prove statiche andranno completate da prove dinamiche che misurino la risposta del ponte all'eccitazione dinamica, controllando che il periodo fondamentale sperimentale sia confrontabile con quello previsto in progetto.

Nel complesso la norma, pone l'accento su tre punti fondamentali:

1. la necessità di effettuare prove dinamiche;
2. la necessità di prevedere il comportamento dinamico di una struttura già in fase di progetto;
3. l'importanza del confronto tra i risultati dei due approcci teorico e sperimentale.

Poiché la norma risulta carente di informazioni a riguardo del collaudo dinamico, si può fare affidamento a Norme Tecniche quali la **UNI 10985**, che fornisce le linee guida per l'esecuzione di prove e rilievi dinamici, la **UNI TR 11634:2016** (Linee Guida per il monitoraggio strutturale) e alle recenti

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti. (22A04700) (GU Serie Generale n.196 del 23-08-2022)

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.

6.3.3.5 Riduzione delle incertezze di modellazione

Relativamente ai coefficienti di sicurezza dei carichi permanenti, nel caso di strutture esistenti, in funzione del livello di approfondimento delle indagini condotte in termini di misure geometriche, caratteristiche dei materiali, modellazione strutturale, eventuali **analisi di identificazione dinamica**, riscontro con prove di carico di progetto, si può ottenere una **riduzione significativa delle incertezze di modello** e, quindi, un'ulteriore riduzione del fattore parziale, che dunque assume il seguente valore: $\gamma_c = 1.10$...

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.

Data la rilevanza delle strutture da ponte e la necessità di conoscenza del comportamento reale della struttura in vista del monitoraggio della stessa, è consigliata la scelta e l'aggiornamento del modello complessivo strutturale anche mediante confronti con prove statiche ed eventualmente con **analisi di identificazione dinamica**. È suggerito, specialmente nel caso di strutture da ponte dal comportamento complesso, **la riduzione dell'incertezza di modello strutturale**.

In altri termini, **l'identificazione dinamica**, in unione alla riproduzione delle prove di collaudo dell'epoca, ove disponibili, o con prove di carico progettate ad hoc, **consentono di calibrare opportunamente i modelli numerici alla base delle calcolazioni, ridurre le incertezze di modello nella definizione di coefficienti di sicurezza parziali e permettere un monitoraggio affidabile** (si veda per un'estensiva descrizione delle prove statiche e dinamiche e dei sistemi di monitoraggio i § 7.5 e § 7.6). Le prove di collaudo statico e prove eventualmente progettate ad hoc hanno il vantaggio di riprodurre stati tensionali, per quanto in regime di elasticità, più elevati rispetto alle condizioni ordinarie della struttura, riconducibili ad una combinazione rara dei carichi variabili.

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.

L'analisi modale sperimentale (EMA) basata sull'applicazione di un input noto alla struttura risulta particolarmente onerosa nel caso di grosse strutture quali i ponti. In alternativa, prove di identificazione dinamica in condizioni di input incognito (Analisi Modale Operativa - OMA) quale il rumore ambientale, consentono spesso di ottenere informazioni significative sul comportamento strutturale del ponte in esame.

I risultati dell'analisi modale sono finalizzati alla calibrazione del modello (c.d. "model updating"), oltre che alla eventuale individuazione di danni o malfunzionamenti strutturali. L'analisi modale operativa consente di sfruttare il rumore ambientale per l'identificazione strutturale evitando, così, il ricorso ad attrezzature particolari (vibroline, martelli strumentati, eccitatori oleodinamici o elettrodinamici) che eccitano direttamente la struttura. In tal modo, i parametri modali che si ottengono sono rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nelle sue reali condizioni di utilizzo, ancorché in presenza di bassi stati tensio-deformativi. La prova può essere condotta in assenza di traffico oppure, talvolta, in presenza di mezzi viaggianti che inducono carichi di esercizio di entità ridotta

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.

L'identificazione dinamica ha le seguenti finalità:

- consentire la calibrazione e successiva validazione del modello numerico sulla base delle forme modali e delle frequenze di vibrazione sperimentali;
- stimare i livelli di smorzamento della struttura e valutarne l'entità rispetto a eventuali scenari di danneggiamento.

Nella procedura di calibrazione del modello può essere necessario introdurre un modulo di elasticità dinamico del calcestruzzo più elevato di quello statico, che sia rappresentativo di un comportamento puramente elastico lineare per bassi livelli tensionali. In presenza di opere con schemi strutturali ripetitivi, tali prove possono essere eseguite su un numero ridotto di elementi che possano ritenersi rappresentative del comportamento della struttura. Qualora il modello strutturale sia realizzato interagendo con la prova di identificazione dinamica, fino a trovarsi con approssimazione da prefissare tanto con le frequenze proprie quanto con le forme modali più significative, e contemporaneamente il modello strutturale riproduca con approssimazione prefissata i risultati in termini di spostamenti e più in generale le deformate ottenute da prove di collaudo o da prove di carico progettate ad hoc, allora si può ritenere di aver portato a livelli trascurabili il coefficiente di incertezza di modello, in genere, incorporato nei fattori parziali delle azioni.

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.

7.5.2 RILIEVI DELLA RISPOSTA DINAMICA

In alternativa o in congiunzione con le prove di carico statiche possono essere condotti anche rilievi della risposta dinamica alle vibrazioni ambientali e al transito dei veicoli. **L'uso di vibrodine è da considerarsi limitato a manufatti di piccola dimensione.**

I rilievi dinamici devono essere condotti in conformità alla norma UNI 10985 *Vibrazioni su Ponti e Viadotti. Linee Guida per l'esecuzione di prove e rilievi dinamici* e alle norme ISO 14963:2003 *Mechanical Vibration and Shock – Guidelines for dynamic tests and investigations on bridges and viaducts* e ISO 18649:2004 *Mechanical Vibrations – Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges*.

Il rilevamento della risposta dinamica può essere effettuato con sensori di velocità, accelerazione, deformazione e spostamento (rotazione). Sono altresì possibili applicazioni della vibrometria laser, mentre per strutture con periodi propri molto grandi è possibile utilizzare sensori satellitari di posizione (stazioni GPS) per ottenere storie temporali di spostamento.

Si sottolinea che una corretta interpretazione della risposta ai fini della caratterizzazione della struttura richiede un numero e posizione dei sensori nonché una frequenza di lettura e tempi di osservazione tali da consentire l'identificazione di un congruo numero di frequenze proprie e di modi.

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.

7.5.2 RILIEVI DELLA RISPOSTA DINAMICA

La determinazione delle proprietà dinamiche sperimentali della struttura può essere condotta con tecniche OMA (*Operational Modal Analysis*), verificandone l'applicabilità ai segmenti di registrazione utilizzati. L'identificazione dinamica può essere condotta utilizzando storie temporali di accelerazione o di spostamento/deformazione. Le metodologie software impiegate per il trattamento delle registrazioni ed i relativi risultati devono essere accuratamente documentati nel rapporto di prova.

E' necessario il rilevamento delle temperature e delle altre condizioni meteorologiche durante l'esecuzione della prova e che le relative misurazioni siano riportate nel rapporto. L'eventuale confronto fra rilievi dinamici condotti in tempi diversi deve tener conto delle condizioni ambientali eventualmente diverse, della posizione, della tipologia e del numero dei sensori impiegati nelle diverse campagne di misura. Nel caso sia prevista una ripetizione periodica delle misure dinamiche, è quindi opportuno che i sensori vadano posizionati sempre negli stessi punti.

Le metodologie OMA non richiedono la conoscenza dell'eccitazione di ingresso, che viene assunta essere un rumore bianco. Tuttavia, per migliore interpretazione dei risultati è consigliabile predisporre per il periodo di prova un rilevamento dei transiti con sistemi *weigh-in-motion* abbinati a telecamere.



SAIE

1. RICHIAMI NORMATIVI

Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti.



7.5.2 RILIEVI DELLA RISPOSTA DINAMICA

Le proprietà dinamiche sperimentali sono confrontate con quelle teoriche derivate da modelli analitici o numerici, interpretando le eventuali differenze.

Le prove dinamiche occasionali hanno lo scopo primario di consentire l'aggiornamento dei modelli numerici, tenendo tuttavia conto dell'influenza dei parametri ambientali. Come più ampiamente discusso nel § 7.6, dedicato al monitoraggio strumentale, le prove dinamiche occasionali nella maggior parte dei casi pratici non consentono, da sole, di identificare in modo affidabile eventuali stati di danno strutturale

2. PROVE DINAMICHE: INTRODUZIONE

Principalmente le analisi dinamiche vengono effettuate col fine di determinare le **frequenze dei modi naturali di vibrazione**, le corrispondenti **forme modali** ed i **valori di smorzamento** associati.

L'insieme di tali parametri, i cosiddetti **parametri modali**, caratterizza compiutamente il comportamento dinamico della struttura.

La conoscenza di questo set di dati permette di:

- **Verificare la risposta dinamica;**
- **Verificare comfort e serviceability;**
- **Validare e migliorare i modelli numerici (migliora la definizione del comportamento presente della struttura e l'adeguatezza dei modelli nella previsione dei comportamenti futuri);**
- **Fissare un dato di riferimento per successive verifiche di idoneità e studi diagnostici, messi in atto nel caso in cui la struttura sia sottoposta a variazioni;**
- **Porre le premesse per un monitoraggio permanente (**Structural Health Monitoring – SHM**).**

2. PROVE DINAMICHE: LA UNI 10985

Si affrontano di seguito tutti gli aspetti operativi che riguardano un collaudo dinamico, includendo una breve descrizione delle tecniche utilizzate per l'analisi dei dati raccolti nel corso di una prova.

Sono di seguito riassunti quelli che sono i **criteri generali per eseguire rilievi dinamici** su ponti e viadotti, secondo quanto riportato nella UNI 10985:

“... Le indagini dinamiche hanno come obiettivo principale quello di raccogliere le informazioni necessarie a caratterizzare l'opera da un punto di vista meccanico.

I dati ottenuti possono quindi essere utilizzati per la messa a punto e la validazione di modelli di calcolo o a scopo diagnostico, per l'individuazione di degradi o danneggiamenti in atto, il cui sviluppo nel tempo può essere seguito, se necessario, attraverso la ripetizione ad intervalli successivi dell'indagine stessa.

2. PROVE DINAMICHE: LA UNI 10985

È opportuno che le indagini siano precedute da analisi condotte su un adeguato modello del ponte e finalizzate a fornire una delle grandezze che si intendono misurare. Tale studio potrà interessare il ponte o il viadotto nella sua totalità o anche i singoli elementi o parti strutturali a cui è necessario rivolgere l'attenzione.

Le analisi preliminari devono fornire i valori attesi del campo degli spostamenti, delle deformazioni, delle frequenze proprie e delle relative forme modali, degli sforzi, in modo da poter disporre di un complesso di dati teorici di guida nella scelta (tenendo ovviamente conto degli scopi dello studio) di:

- ✓ *modalità di eccitazione (tipo, durata dell'eccitazione, distribuzione spettrale);*
- ✓ *dislocazione sull'opera delle fonti di eccitazione;*
- ✓ *rete dei sensori;*
- ✓ *apparecchiature e loro caratteristiche;*
- ✓ *tecnica di indagine.*

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

Affinché sia possibile ricavare i parametri dinamici di una struttura è essenziale che essa sia posta in oscillazione nel corso della prova. Se una struttura fosse immobile, non si potrebbe acquisire alcun dato utile ad eseguire l'analisi dinamica.

Per porre in oscillazione la struttura in analisi sono disponibili essenzialmente due tecniche di eccitazione: **ARTIFICIALE** e **AMBIENTALE**

La UNI 10985 fornisce utili informazioni sugli aspetti più significativi delle diverse tecniche, oltre che una loro **classificazione**, come mostrato in Tabella 1.1:

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

Tabella 1.1: classificazione dei metodi d'analisi dinamica secondo UNI 10985 [6].

Natura delle sorgente di eccitazione	Sorgente di eccitazione	Andamento temporale delle vibrazioni
Artificiale	Vibrodina meccanica Vibratore elettroidraulico Vibratore elettrodinamico Rilascio improvviso di una forza impressa Urti (di massa)	Sinusoidale Sinusoidale/random Sinusoidale/random Transitorio Impulsivo
Ambientale	Microsisma Traffico Vento Sisma	Random Transitorio/random Transitorio/random Transitorio

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

Le **vibrazioni artificiali** sono causate da carichi, applicati nella fase sperimentale con appositi strumenti, di intensità ed andamento controllabili e misurabili; l'andamento del carico dinamico può essere sinusoidale, random, transitorio o impulsivo.

Le **vibrazioni ambientali** possono essere prodotte dal vento, dal traffico (su gomma e/o su ferro), da microsismi, da attività di cantiere, ecc., eventi generalmente non controllabili, che producono quindi vibrazioni prevalentemente di tipo random.

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

Le diverse tipologie di eccitazione possono imprimere alla struttura **due differenti condizioni di moto**:

- moto libero;
- moto forzato.

Il **moto libero** è conseguenza del rilascio improvviso di un carico statico o dall'annullamento di una distorsione impressa; esso può anche coincidere con la parte terminale della risposta ad un'eccitazione dinamica di breve durata (ivi compresa quella data da veicoli in transito o in frenata).

Il **moto forzato** si realizza invece quando un'eccitazione dinamica impedisce alla struttura di oscillare liberamente.

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

- **ECCITAZIONE ARTIFICIALE**

L'eccitazione artificiale **si realizza sfruttando diversi sistemi di eccitazione, tutti accomunati dalla possibilità di controllare e misurare l'entità della forzante.**

Per l'ampio campo di frequenze esplorabile ed il notevole livello di forza che può essere generato, **le vibrodine sono fra le attrezzature più comuni.**

Esse sono macchine che permettono di generare forze (con legge nel tempo di tipo armonico, periodico o random) senza aver bisogno di una struttura di contrasto esterno in quanto trovano reazione nelle forze di inerzia di una massa in movimento, opportunamente collegata al corpo della macchina stessa.

Esistono diversi tipi di vibrodine che funzionano su principi fisici differenti.

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

- **ECCITAZIONE ARTIFICIALE**

Di uso comune sono anche i **SISTEMI IMPULSIVI**.

Tali sistemi hanno lo scopo di eccitare **il moto libero** della struttura mediante l'applicazione di un carico di breve durata, per esempio, mediante l'urto di una massa incidente, il rilascio di un grave appeso alla struttura, il transito di un autocarro che supera un adeguato ostacolo o dosso, oppure il brillamento di cariche esplosive.

L'utilizzo di questi sistemi risulta particolarmente indicato nel caso in cui si vogliano eccitare in maniera operativamente semplice le frequenze proprie della struttura.

Questa tipologia di eccitazione comporta particolari accorgimenti: **l'eccitazione impulsiva deve fornire sufficiente energia per porre l'intero sistema in oscillazione (ad esempio non basta una martellata per far vibrare un intero viadotto), senza causare danni ad esso o a strutture limitrofe.**

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

- **ECCITAZIONE AMBIENTALE**

A differenza dell'eccitazione artificiale, l'eccitazione ambientale non richiede l'uso diretto dei macchinari per porre la struttura in oscillazione, ma **sfrutta le forme di eccitazione prodotte dall'ambiente** circostante l'opera.

Le sorgenti significative di eccitazione ambientale sono:

- **Vento**

L'eccitazione prodotta dal vento può considerarsi di tipo "random", almeno in una determinata **banda di frequenze**. La misurazione del carico dinamico effettivo prodotto dall'attività eolica è estremamente difficoltosa, e di fatto irrealizzabile a causa della distribuzione del carico stesso sulle superfici esposte. Il vento, infatti, è definito su base statistica ed il suo valore non è uniforme lungo la struttura.

2. PROVE DINAMICHE: TECNICHE DI ECCITAZIONE

- **ECCITAZIONE AMBIENTALE**

Sisma

Un sisma è un evento che produce una sollecitazione di tipo transitorio, il cui spettro varia tra un evento e l'altro. I limiti di applicabilità di questa eccitazione sono legati al fatto che un sisma è un evento molto raro e può essere rilevato solo con sistemi di monitoraggio permanente. In tal caso risulta opportuno strumentare anche la base dell'opera (pile e spalle nel caso di ponti e viadotti).

Traffico

Il traffico genera una risposta dinamica di ampiezza significativa e facilmente misurabile, e risulta inoltre facilmente utilizzabile per strutture in esercizio. Il traffico può essere opportunamente programmato (per esempio viene fatto transitare un solo veicolo con caratteristiche note) oppure si può utilizzare il traffico ordinario.

2. PROVE DINAMICHE: **SENSORI DI MISURA**

La norma UNI 10985 fornisce indicazioni esaustive circa i **sensori di misura** da utilizzare:

“... Essi sono trasduttori atti a misurare grandezze fisiche (siano esse cinematiche, meccaniche o di altro tipo) sia in campo statico sia in campo dinamico. Generalmente il trasduttore è collegato ad un circuito elettronico di condizionamento in grado di fornire un segnale elettrico legato alla grandezza da misurare; questo segnale può essere acquisito e registrato per le necessarie elaborazioni. I sensori più comunemente impiegati possono essere classificati:

a) in base alle grandezze da rilevare:

- ✓ Accelerometri (Figura 1.15a);
- ✓ Velocimetri (Figura 1.15b);
- ✓ Sismometri (Figura 1.15c);
- ✓ Trasduttori di spostamento (Figura 1.15d);
- ✓ Estensimetri (Figura 1.16a);
- ✓ Inclinatori (Figura 1.16b);
- ✓ Celle di carico (Figura 1.16c).

2. PROVE DINAMICHE: **SENSORI DI MISURA**

b) in base al principio fisico di funzionamento:

- ✓ *Trasduttori resistivi;*
- ✓ *Trasduttori capacitivi;*
- ✓ *Trasduttori induttivi;*
- ✓ *Strumenti piezoelettrici;*
- ✓ *Rilevamenti ottici,*

c) in base al tempo di permanenza in loco e di durata del rilievo:

- ✓ *sensori per applicazioni temporanee rivolte a caratterizzazioni dinamiche o verifiche occasionali (una tantum o sistematiche ma con intervalli di tempo di uno o più anni);*
- ✓ *sensori per monitoraggio continuo o periodico.*

2. PROVE DINAMICHE: **RETE DEI SENSORI DI MISURA**

Al fine di registrare correttamente le oscillazioni di una struttura è necessaria una **progettazione vera e propria della rete dei sensori.**

Una buona progettazione deve tenere conto dei seguenti aspetti:

- La scelta della disposizione della rete deve essere fatta in funzione delle specifiche informazioni che si intende ottenere dalle prove e sulla base delle previsioni ottenute dal modello di calcolo;
- **I sensori vanno disposti in numero e posizione tale da consentire la corretta ricostruzione delle forme modali reali. Sorge dunque la necessità di evitare di disporre gli strumenti di misura in quei punti, detti “nodi modali”, in cui l’osservabilità dei modi è praticamente nulla;**
- Qualora il modello di calcolo evidenzi la possibilità del verificarsi di fenomeni particolari, è necessario porre in campo una strumentazione mirata a cogliere tali fenomeni;
- Bisogna tener conto delle condizioni operative in cui la prova verrà effettuata (esempio eccessiva insolazione o vicinanza con mezzi d’opera), al fine di limitare i disturbi che posso incorrere nel corso delle analisi.

3. TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE

Nei paragrafi precedenti si sono descritti gli aspetti tecnici (sistemi di eccitazione e tipologie di eccitazione, sensori di misura e reti di sensori) legati all'esecuzione di prove dinamiche, considerando separatamente ogni aspetto trattato. In questo paragrafo invece, si vuole dare una **visione d'insieme delle diverse tecniche di analisi dinamica**, tenendo conto unitamente degli aspetti operativi e di elaborazione dei dati.

L'analisi dinamica di una struttura o parte di essa può avvenire principalmente mediante due differenti approcci:

- **Analisi Modale Sperimentale (EMA)**
- **Analisi Modale Operazionale (OMA)**

3. TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE:

- **ANALISI MODALE SPERIMENTALE (EMA)**

L'Analisi Modale Sperimentale (EMA) è una tecnica di indagine che presuppone l'utilizzo di una **eccitazione artificiale**.

Se l'insieme delle grandezze dinamiche misurate in punti diversi della struttura (es. accelerazioni) costituisce "l'output", e la grandezza associata alla quantità di energia che sollecita la struttura (forzante artificiale) costituisce "l'input".

L'Analisi Modale Sperimentale (EMA) consente di identificare le proprietà dinamiche della struttura basando le analisi sulla conoscenza delle misure sia dell'input che dell'output.

Le strutture infatti, vengono forzate sfruttando una o più sorgenti di eccitazione controllabili (attuatori meccanici o idraulici, attuatori elettrodinamici, elettroidraulici o ancora elettromeccanici), perciò l'input risulta noto.

3. TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE:

- **ANALISI MODALE SPERIMENTALE (EMA)**

Riguardo a questo metodo di indagine la norma UNI 10985 afferma che:

“Le prove di vibrazione forzata artificiale rappresentano lo strumento più collaudato per l'individuazione del comportamento dinamico globale dell'impalcato con valutazione delle funzioni di risposta in frequenza e dei parametri modali fondamentali (frequenze naturali, smorzamenti e forme).

“... La postazione di eccitazione deve essere scelta considerando sia la necessità di eccitare il tipo e il numero di modi che interessano l'indagine, sia aspetti operativi connessi con l'installazione. Per il primo aspetto ed in relazione alla complessità dell'opera ed a numero e tipo dei modi che si intende indagare, può non essere sufficiente una sola postazione di eccitazione. Per gli aspetti operativi deve essere considerato il fatto che è necessario collegare le macchine di eccitazione rigidamente all'impalcato (utilizzando per esempio tiranti passanti nelle solette o espansioni) evitando che vengano posizionate in zone di particolare flessibilità trasversale dell'impalcato...»

3. TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE:

- **ANALISI MODALE OPERAZIONALE (OMA)**

L'Analisi Modale Operazionale (OMA) è una tecnica di indagine che **sfrutta l'eccitazione prodotta dall'ambiente circostante** la struttura in analisi.

Essa quindi consente di determinare le proprietà dinamiche della struttura nel caso di **eccitazione ambientale, la quale viene assimilata ad un rumore bianco**. Tale assunzione è in generale tanto più vera quanto maggiore è il periodo della misurazione: mediando infatti nel dominio delle frequenze un numero di storie temporali sufficientemente elevato, lo spettro dell'eccitazione tende ad assumere valore costante.

I diversi metodi sviluppati per l'analisi operazionale lavorano, quindi, sfruttando i soli dati di output. In tal caso si può evitare il ricorso ad attrezzature particolari che eccitino direttamente la struttura

3. TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE:

- **ANALISI MODALE OPERAZIONALE (OMA)**

Nel ricorso all'approccio OMA la norma UNI 10985 pone attenzione sui seguenti aspetti:

"... L'eccitazione di tipo ambientale può essere utilizzata con successo in molti casi; deve essere però tenuto presente che:

- le vibrazioni ambientali causate dal vento costituiscono una tecnica di indagine particolare utile per strutture con grandi deformabilità e snellezza e frequenze naturali basse;*
- i microsismi forniscono un'eccitazione a bassa energia e possono, pertanto, essere utilizzati per l'identificazione dinamica lineare;*
- le vibrazioni indotte da traffico possono dare informazioni con un'accuratezza comparabile o maggiore di quella delle prove impulsive o eccitate artificialmente con eccitazione non sinusoidale."*

- **TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE:**
- **CONFRONTO EMA/OMA**

Rispetto all'Analisi Modale Sperimentale, l'**Analisi Modale Operazionale** presenta una serie di **vantaggi**:

1. La prova è solitamente più economica, dato che non sono necessarie attrezzature per l'eccitazione della struttura. Ciò risulta più vantaggioso nel caso di strutture civili pesanti, che richiedono, per raggiungere livelli di oscillazione significativi, l'uso di eccitatori di grandi dimensioni.
2. La prova è operativamente più semplice da eseguire, dato che è posto in opera un minor numero di dispositivi e che non è richiesto alcun controllo esterno. L'operatore avvia l'acquisizione e la prova procede autonomamente, col vantaggio che il rischio di guasti è inferiore, dato che i sistemi di controllo della forzante sono assenti.
3. Le misure vengono effettuate in condizioni più simili a quelle operative della struttura, per cui i parametri modali che si ottengono sono rappresentativi del comportamento dinamico della struttura nelle sue condizioni di utilizzo.
4. L'eccitazione ambientale è continua e permanente; ciò consente la realizzazione del monitoraggio continuo della struttura.

- **TECNICHE DI ANALISI DINAMICA MODALE:**
- **CONFRONTO EMA/OMA**

Tuttavia si hanno anche degli **svantaggi nell'uso dell'OMA**:

1. Si presuppone che il segnale di ingresso sia un rumore bianco. Una violazione di questa ipotesi (ad esempio picchi a banda stretta nello spettro di ingresso) restituirà picchi aggiuntivi nelle risposte che non sono un'indicazione di modi strutturali.
2. In alcuni casi, il livello globale di eccitazione ambientale può essere piuttosto basso. Se a questo problema si aggiunge una limitata quantità di dati disponibili (quindi i **dati non vengono mediati per tempi sufficientemente lunghi**) i risultati saranno affetti da rumore ed i parametri modali restituiti dall'analisi incerti. Al contrario, **nella prove forzate artificiale si ha il vantaggio di controllare il livello di energia in ingresso nella struttura**. Questo permette, nel caso in cui il forzamento sia correttamente progettato, di non incorrere nel problema descritto.
3. Visto il livello di eccitazione limitato, **le incertezze della strumentazione di misura possono influire sulla qualità dei dati**, andando a disturbare l'identificazione dei modi.

4. MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE: SHM Structural Health Monitoring

L'installazione di sistemi automatici di monitoraggio permanente è giustificata per strutture di notevole importanza storica o funzionale, qualora tali opere siano soggette a ripetute azioni dinamiche, oppure versino in un preoccupante stato di degrado.

E' importante sottolineare, come accennato nel confronto tra le tecniche EMA e OMA, che la possibilità di effettuare un monitoraggio permanente è legata alla sola Analisi Modale Operazionale.

I 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.

Sfruttando un'analisi dinamica sul solo output, eseguita ad intervalli di tempo regolari, è possibile monitorare l'evoluzione dello stato dell'opera, attraverso il confronto tra le risposte strutturali registrate. Si osserva che, se una struttura non subisce modifiche interne dovute ai danni, il suo comportamento rimane pressoché inalterato col passare del tempo. Se invece si nota una variazione di frequenze e smorzamenti associati ai modi propri di vibrare, la struttura potrebbe essere danneggiata.

4. MONITORAGGIO DELLE STRUTTURE : SHM

L'esame dei dati forniti dalla sperimentazione dinamica, accoppiata alla modellazione numerica, ad esempio mediante l'uso del Metodo degli elementi Finiti (FEM), può consentire di formulare un giudizio di integrità strutturale, quantificando l'eventuale degrado in atto.

A differenza di una comune prova ambientale, la cui durata solitamente non supera la singola giornata, un monitoraggio permanente (**Structural Health Monitoring – SHM**). «richiede più attenzione in fase di progettazione del set-up di prova, visto che quest'ultimo può restare in opera per tempi molto lunghi (anni).

In particolare è necessario studiare con cura la disposizione della rete di sensori, dato che la strumentazione di prova non deve limitare la normale funzionalità della struttura, ma deve di fatto diventare parte integrante di essa.

5. ELABORAZIONE DEI DATI

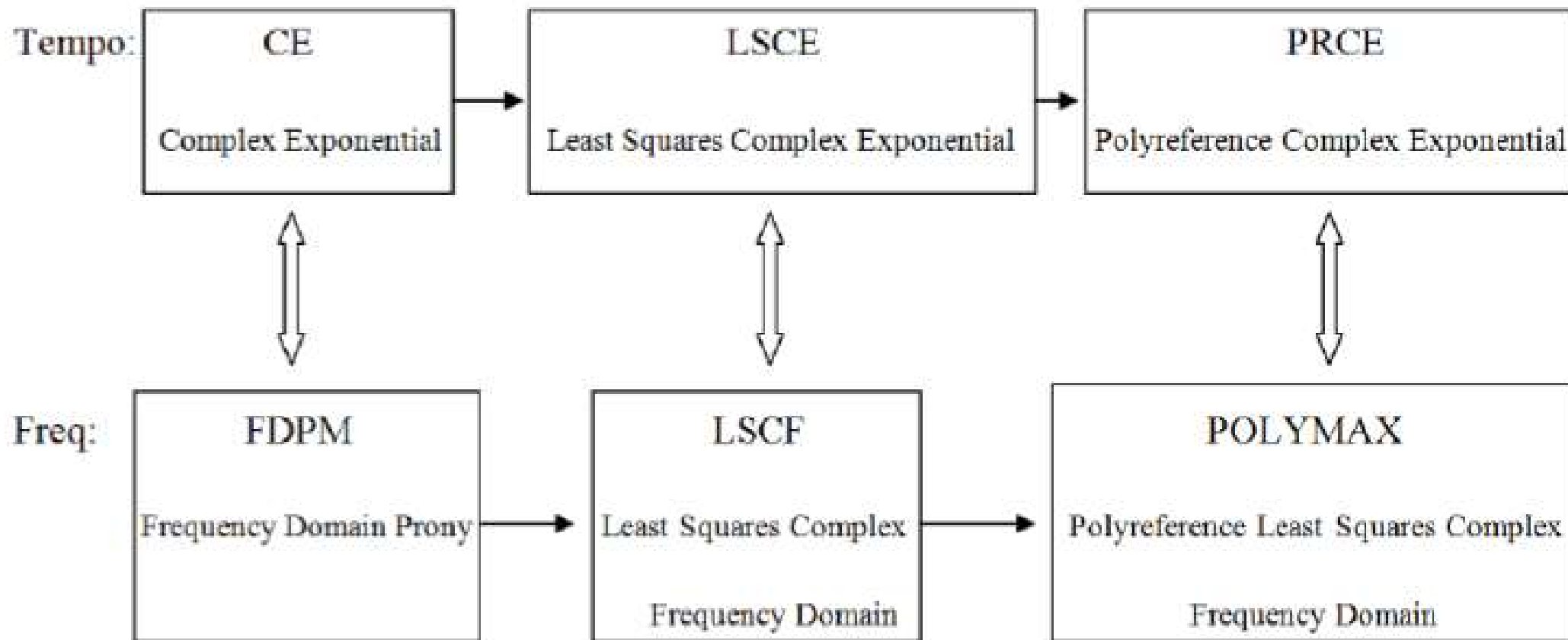
L'elaborazione dei dati raccolti nel corso di una prova dinamica è un passaggio fondamentale del processo di collaudo, dato che consente l'estrazione dei parametri modali che descrivono compiutamente il comportamento dinamico della struttura in analisi.

Le tecniche di analisi possono essere essenzialmente suddivise in:

- **Analisi nel dominio del tempo**
- **Analisi nel dominio delle frequenze**

I parametri modali della struttura vengono estratti sfruttando una complessa procedura, definita attraverso **un algoritmo di calcolo**. Nella successiva figura è mostrata una classificazione, secondo il dominio in cui operano, dei diversi algoritmi di uso comune.

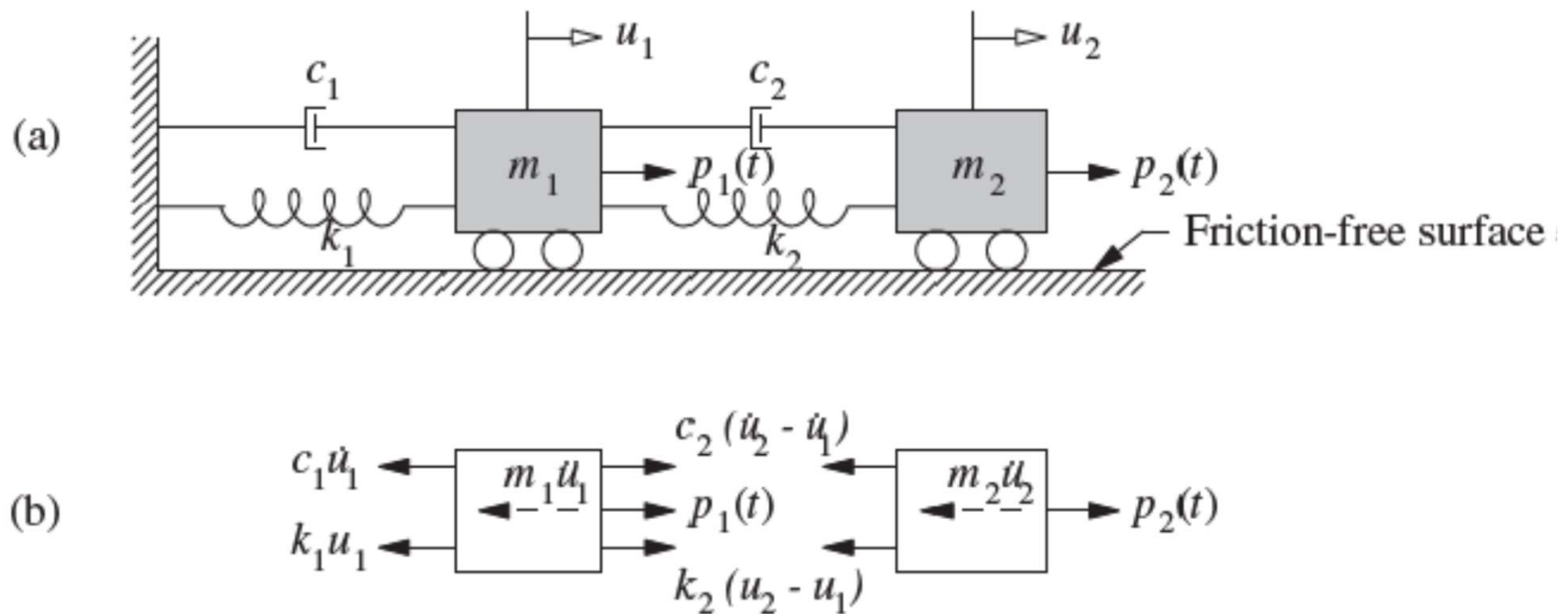
5. ELABORAZIONE DEI DATI



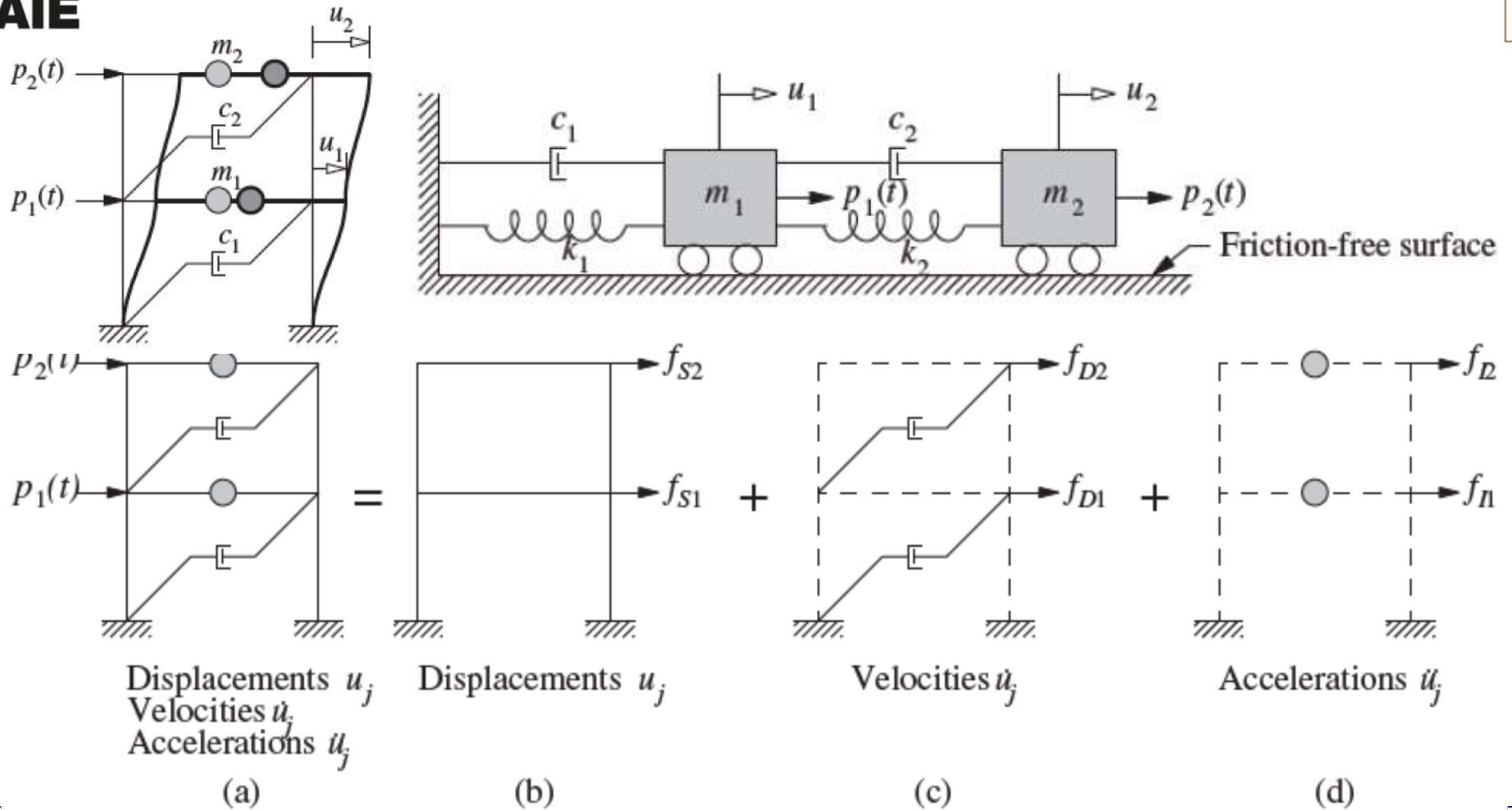
algoritmi per l'analisi modale suddivisi secondo il dominio in cui operano.

5. ELABORAZIONE DEI DATI

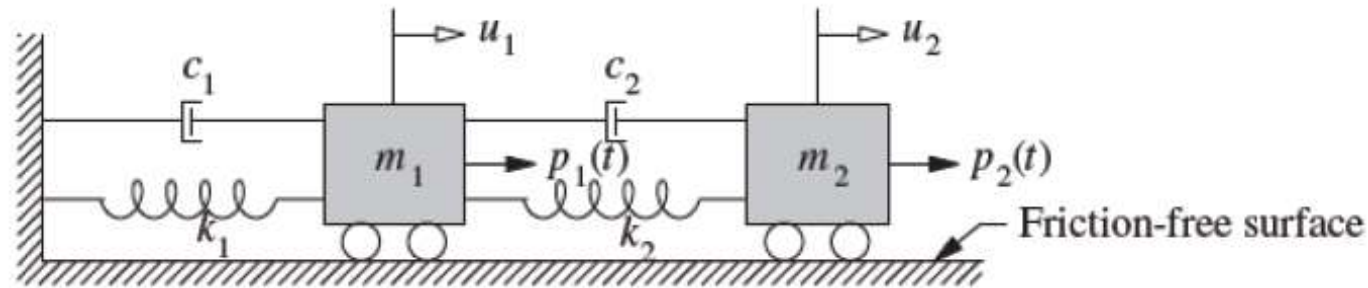
Essenzialmente si utilizza un **modello** a più gradi di libertà **MDOF [Multiple Degree Of Freedom]**, che descrive un qualsiasi sistema come un insieme di masse, molle e smorzatori dotati di vari gradi di libertà:



5. ELABORAZIONE DEI DATI



5. ELABORAZIONE DEI DATI



Le tecniche nel **dominio del tempo** quindi, sono basate sulle soluzioni del seguente sistema di equazioni differenziali, che descrive il sistema MDOF:

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} + \mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} + \mathbf{k}\mathbf{u} = \mathbf{p}(t)$$

in cui:

- m è la matrice delle masse;
- c è la matrice degli smorzamenti;
- k è la matrice delle rigidezze;
- $\mathbf{u}=\mathbf{u}(t)$ sono i gradi di libertà;
- $\mathbf{p}(t)$ è la forzante del sistema.

$$\mathbf{m}\ddot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} m_1 & 0 \\ 0 & m_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{c}\dot{\mathbf{u}} = \begin{bmatrix} c_1 + c_2 & -c_2 \\ -c_2 & c_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \dot{u}_1 \\ \dot{u}_2 \end{Bmatrix}$$

$$\mathbf{k}\mathbf{u} = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 \\ -k_2 & k_2 \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{Bmatrix}$$

5. ELABORAZIONE DEI DATI

Le tecniche nel **dominio delle frequenze**, utilizzano lo stesso modello, ma, passando dal dominio del tempo a quello delle frequenze sfruttando la trasformazione funzionale nota come **trasformata di Fourier**, il sistema di equazioni differenziali ordinarie diventa un sistema di equazioni algebriche di più semplice risoluzione:

$$(-m\omega^2 + ic\omega + k) \cdot X(\omega) = F(\omega)$$

in cui:

- ω è la pulsazione propria del sistema;
- $X(\omega)$ sono i gradi di libertà;
- $F(\omega)$ è la forzante del sistema.

5. ELABORAZIONE DEI DATI

Senza entrare nello specifico degli algoritmi di calcolo utilizzati per le elaborazioni, si osserva che la teoria dell'Analisi Modale è basata sulle seguenti ipotesi fondamentali:

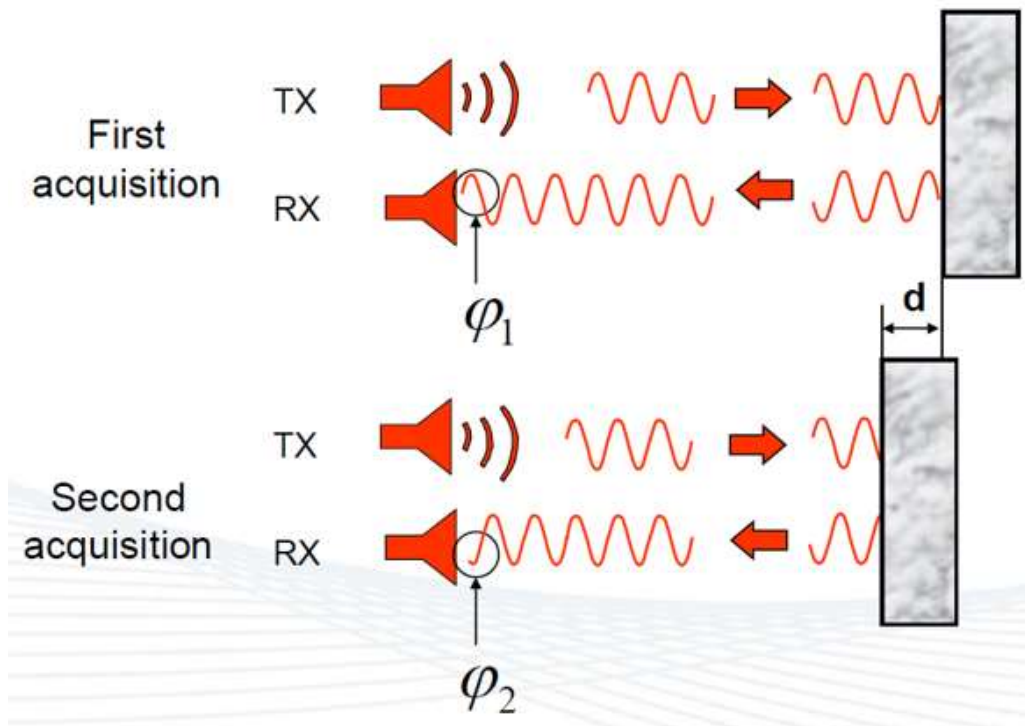
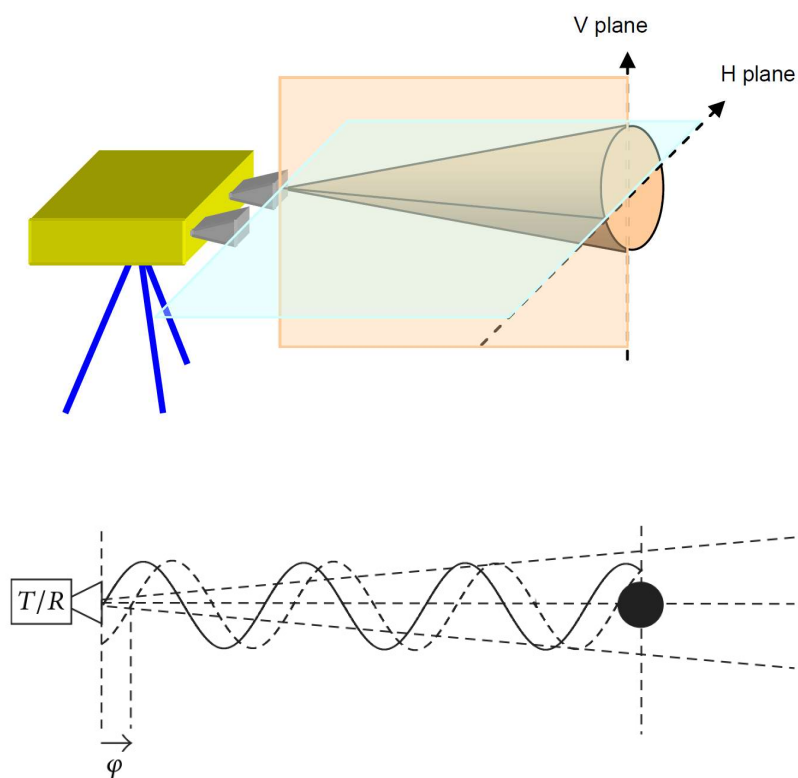
- **Linearità**: il comportamento dinamico della struttura è lineare, per cui la risposta a una certa combinazione di ingressi al sistema è uguale alla medesima combinazione delle rispettive risposte, ossia è applicabile il principio di sovrapposizione degli effetti;
- **Stazionarietà**: le caratteristiche meccaniche della struttura sono invarianti nel tempo;
- **Osservabilità**: i dati necessari a determinare le caratteristiche dinamiche di interesse devono poter essere misurati.

Le tecniche di Analisi Modale impongono in ogni caso un'approssimazione lineare del problema, nonostante quasi tutti i sistemi siano caratterizzati da alcune non-linearità. Nel corso delle prove è importante controllare che l'eccitazione, di qualsiasi natura essa sia, non porti il comportamento della struttura nel campo non lineare, compromettendo quindi l'utilizzo di queste metodologie di indagine.

MODELLAZIONE NUMERICA

Precedentemente si sono descritte le tecniche operative che portano all'individuazione delle caratteristiche dinamiche di strutture esistenti. È evidente che l'individuazione dei cosiddetti parametri modali non è sufficiente all'espletamento di un collaudo. Il collaudo, sia esso dinamico o statico, si attua nel momento in cui si vanno a confrontare i risultati ottenuti per via sperimentale con quelli teorici, attesi in fase di progettazione. La modellazione, sia in fase preliminare sia in seguito ad un updating effettuato a valle delle stesse analisi dinamiche, è quindi un aspetto fondamentale nel collaudo di un'opera.

TECNICHE INNOVATIVE: INTERFEROMETRIA RADAR

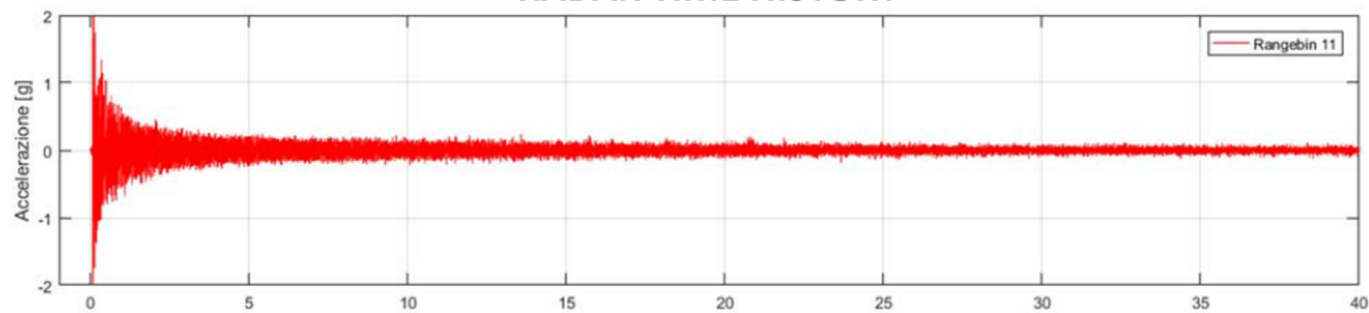


INTERFEROMETRIA RADAR

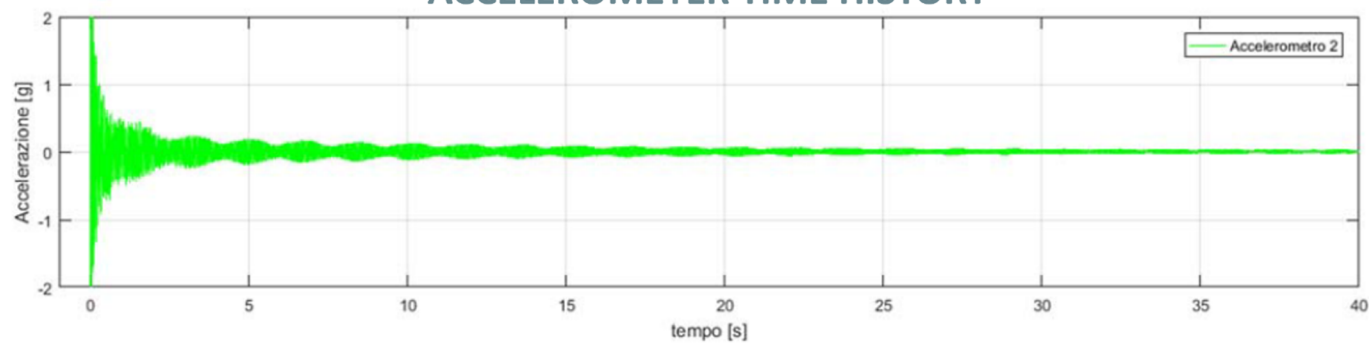


INTERFEROMETRIA RADAR

RADAR TIME HISTORY



ACCELEROMETER TIME HISTORY



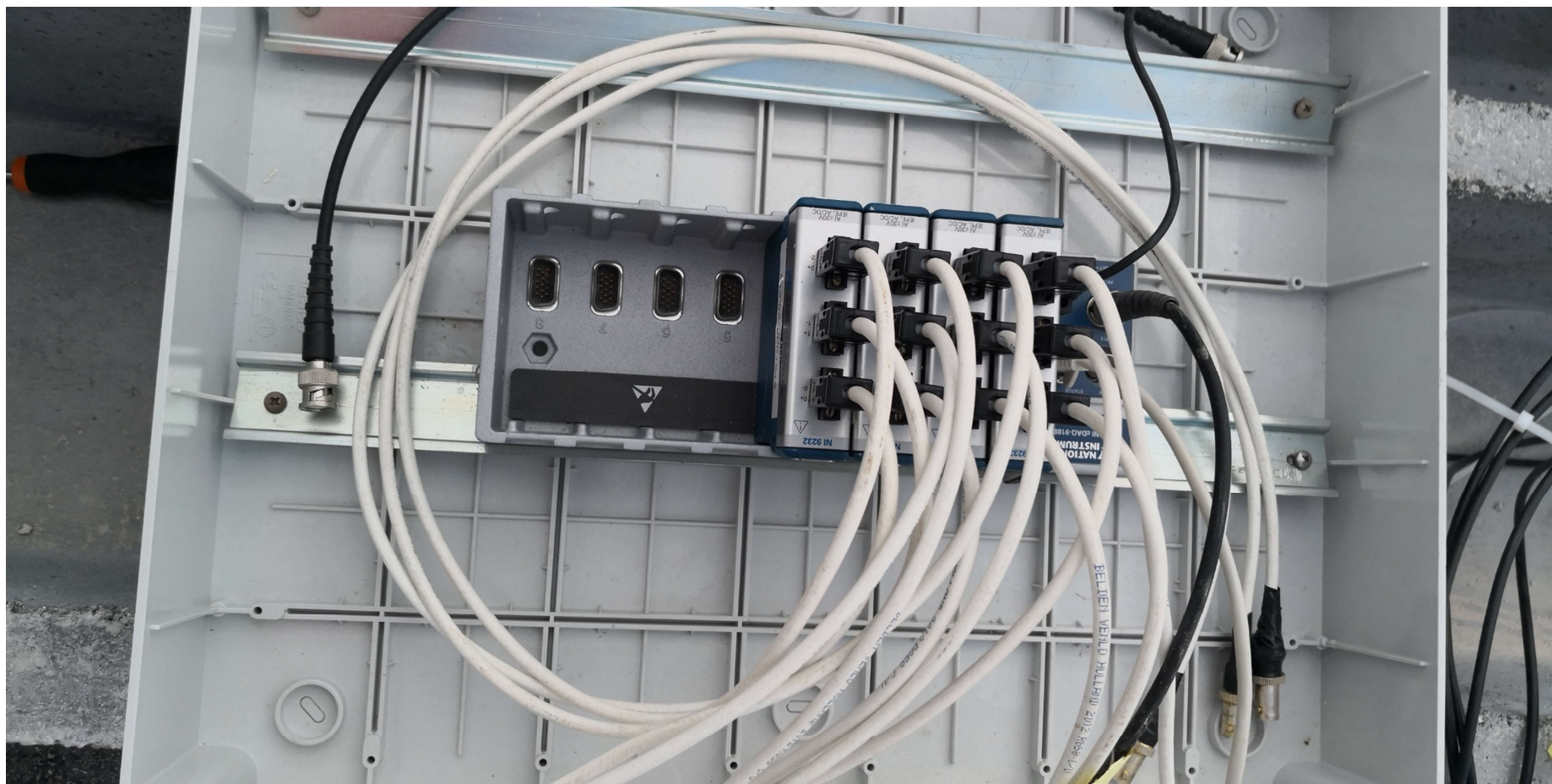
UN CASO DI STUDIO: VIADOTTO SULLA CAVA – LINEA FERROVIARIA BARI-BITETTO



UN CASO DI STUDIO: VIADOTTO SULLA CAVA - LINEA FERROVIARIA BARI-BITETTO



UN CASO DI STUDIO: VIADOTTO SULLA CAVA - LINEA FERROVIARIA BARI-BITETTO



UN CASO DI STUDIO – PONTE A BARI



UN CASO DI STUDIO – PONTE A BARI





UN CASO DI STUDIO – PONTE A BARI



Dott. Ing. Nicola Pecere, Ph.D.

UN CASO DI STUDIO – PONTE A BARI

fig. 5 analisi in frequenza dei segnali- prove con risalti

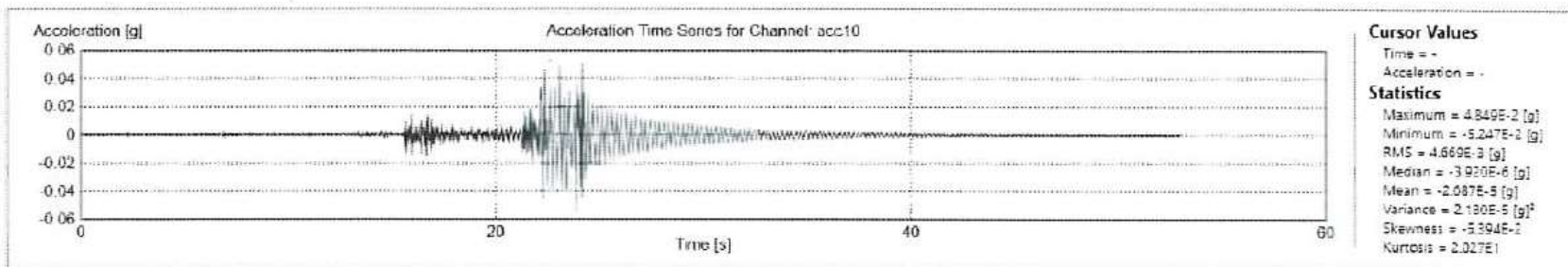


fig. 6 traccia completa accelerometro n°10

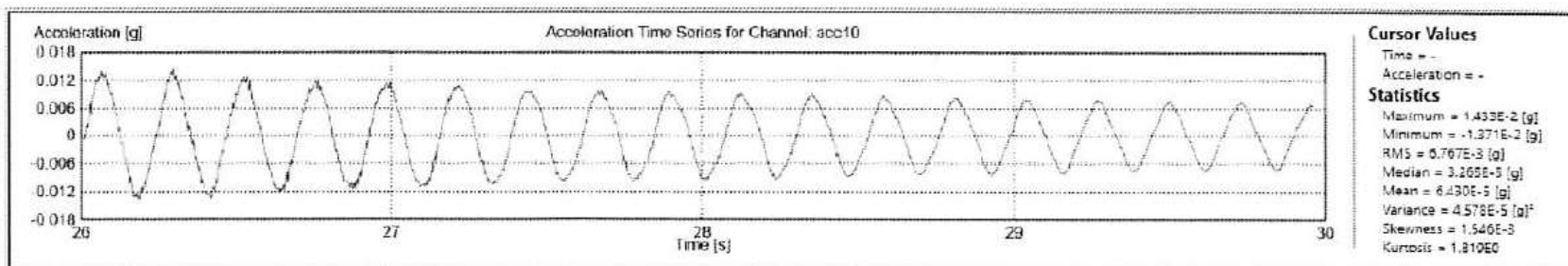
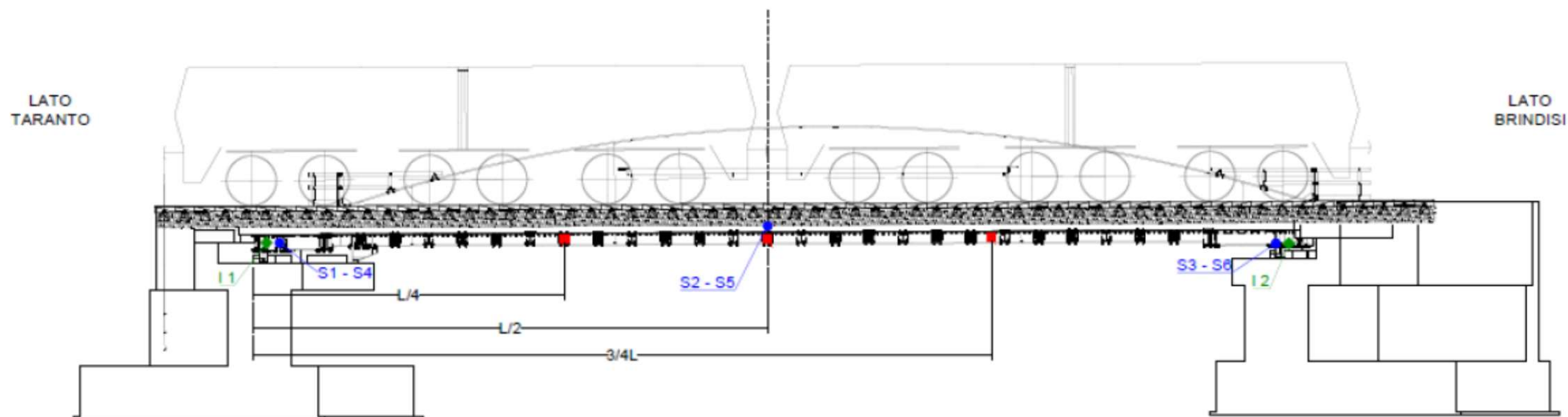


fig. 7 traccia parziale accelerometro 10 (mezzeria) in oscillazione libera della campata – *si contano circa 8,9 oscillazioni in 2 sec tra il secondo 27 e 29.*

UN CASO DI STUDIO – PONTE FERROVIARIO A GROTTAGLIE (TA)

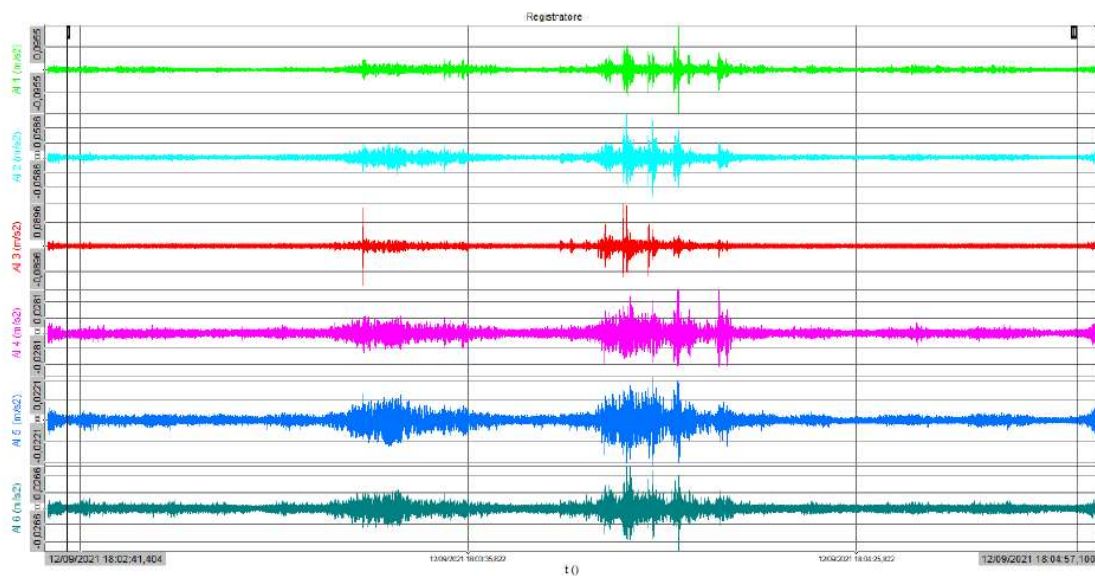


UN CASO DI STUDIO – PONTE FERROVIARIO A GROTTAGLIE (TA)



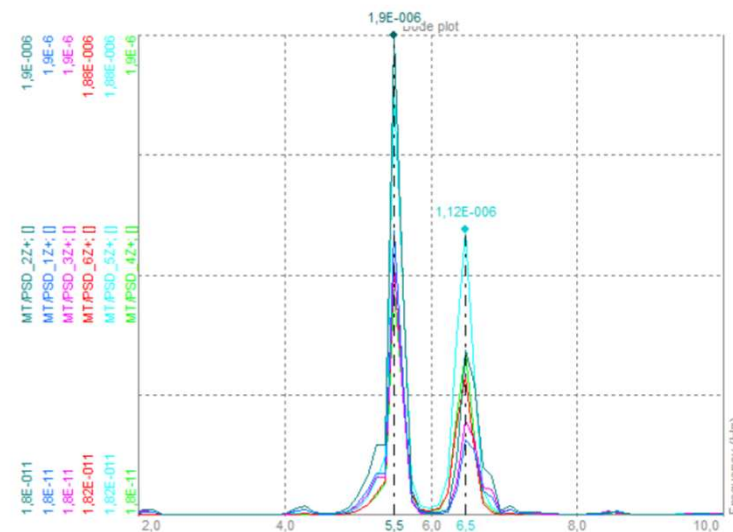
Ponte ferroviario al km 13+691-linea ferroviaria Taranto Brindisi – vista prospettica posizionamento trasduttori

UN CASO DI STUDIO – PONTE FERROVIARIO A GROTTAGLIE (TA)



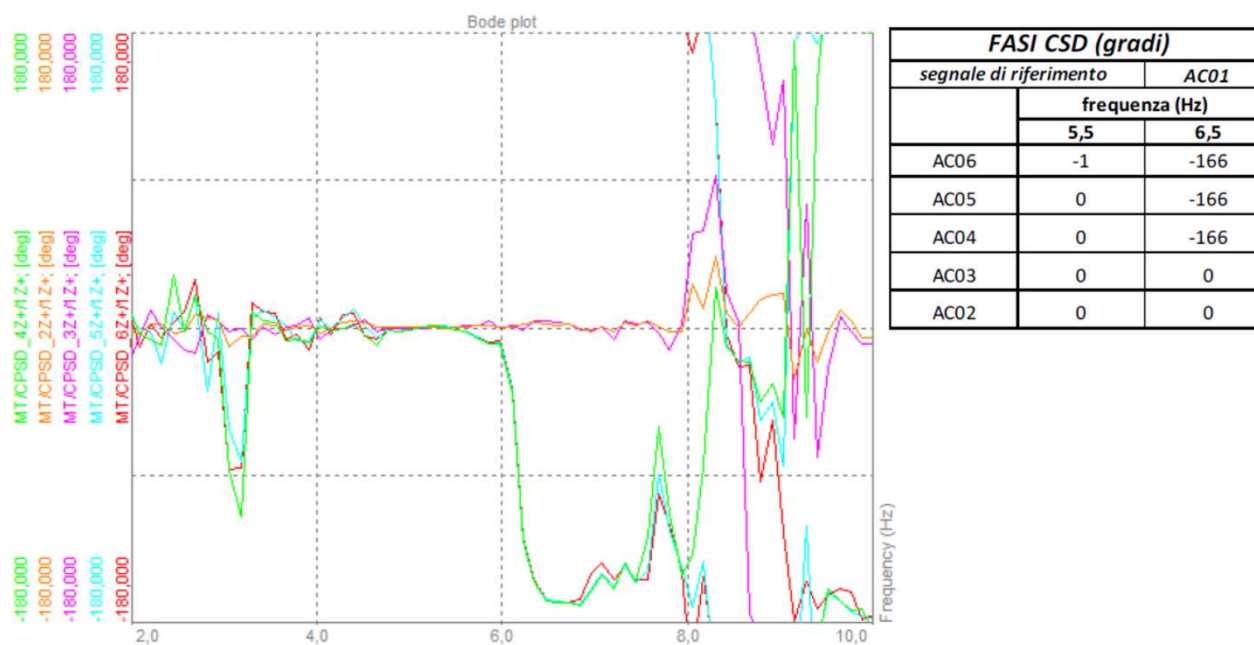
Segnali acquisiti dagli accelerometri - direzione z

Segnali acquisiti dagli accelerometri - direzione z



Funzioni densità spettrale di potenza (PSD) dei segnali AC06 - AC05-AC04-AC03-AC02-AC01

UN CASO DI STUDIO – PONTE FERROVIARIO A GROTTAGLIE (TA)



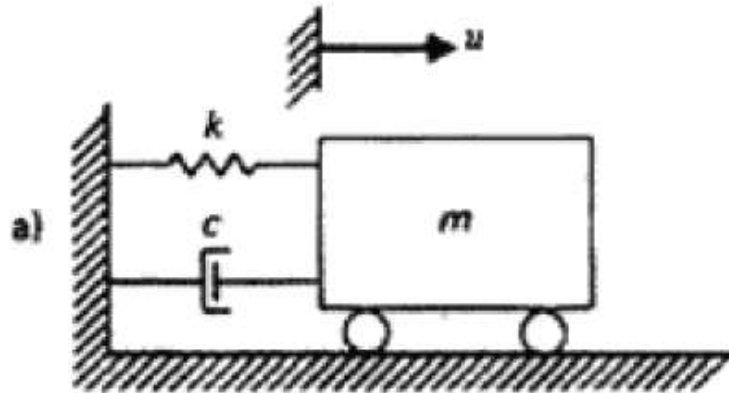
Fasi delle funzioni densità di potenza incrociata (CSD) dei segnali AC06, AC05, AC04, AC03, AC02– segnale di rif. AC01

6. CENNI DI ANALISI MODALE

VIBRAZIONI LIBERE DI UN SISTEMA SMORZATO E NON SOTTOPOSTO ALL'AZIONE DI FORZE ESTERNE $F(t)$

Equazione del moto

Nell'ipotesi di poter schematizzare il sistema strutturale con un semplice oscillatore con smorzamento viscoso, facciamo riferimento al seguente schema:



Dove

- m è la massa del corpo
- K è la costante elastica della molla
- c è il coefficiente di smorzamento viscoso

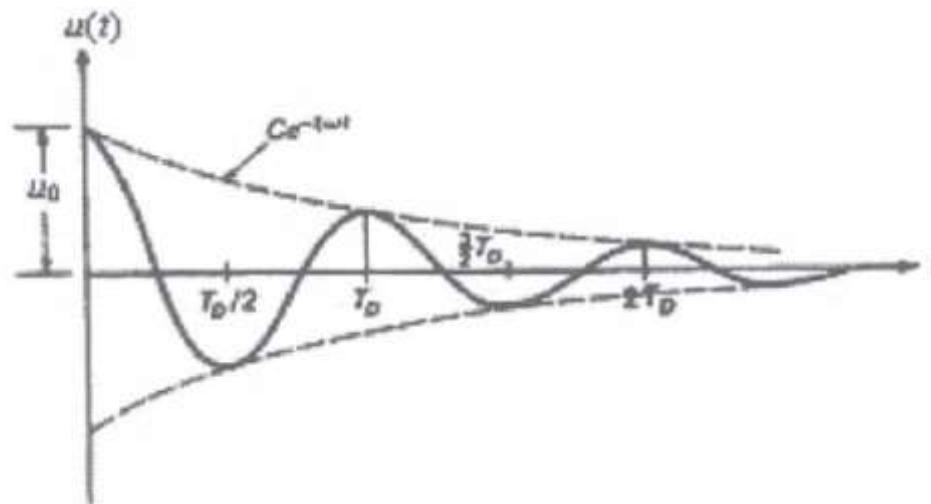
$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

$$u(t) = Ce^{-\xi\omega t} \cos(\omega_D t - \alpha)$$

VIBRAZIONI LIBERE DI UN SISTEMA SMORZATO E NON SOTTOPOSTO ALL'AZIONE DI FORZE ESTERNE $F(t)$

Sistema sottosmorzato ($c < c_{cr}$)

Il grafico della soluzione precedente, nel caso sia assegnato un valore $u(0)=u_0$ e $\dot{u}(0) = 0$ è il seguente



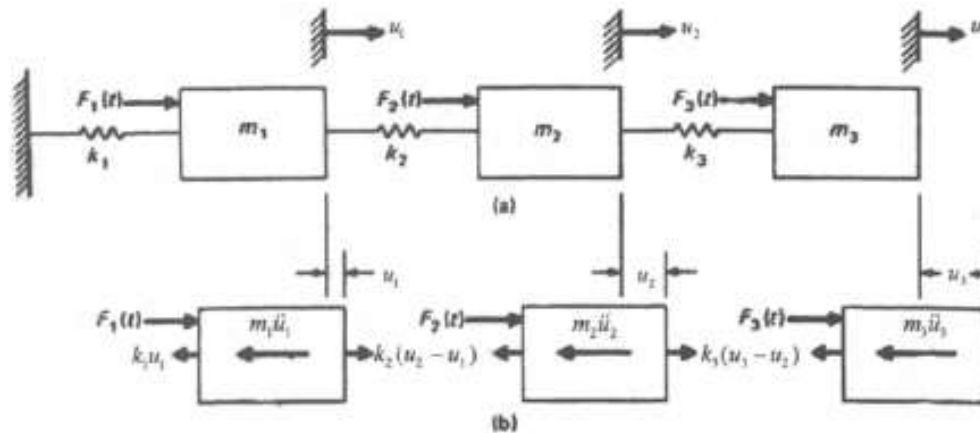
Si nota che il moto è oscillatorio ma non periodico, infatti l'ampiezza della vibrazione decresce ad ogni ciclo successivo, ma assume il massimo relativo ad intervalli di tempo uguali

$$m\ddot{u} + c\dot{u} + ku = 0$$

$$u(t) = C e^{-\xi \omega t} \cos(\omega_D t - \alpha)$$

SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTÀ' (MDOF) –**Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building)**

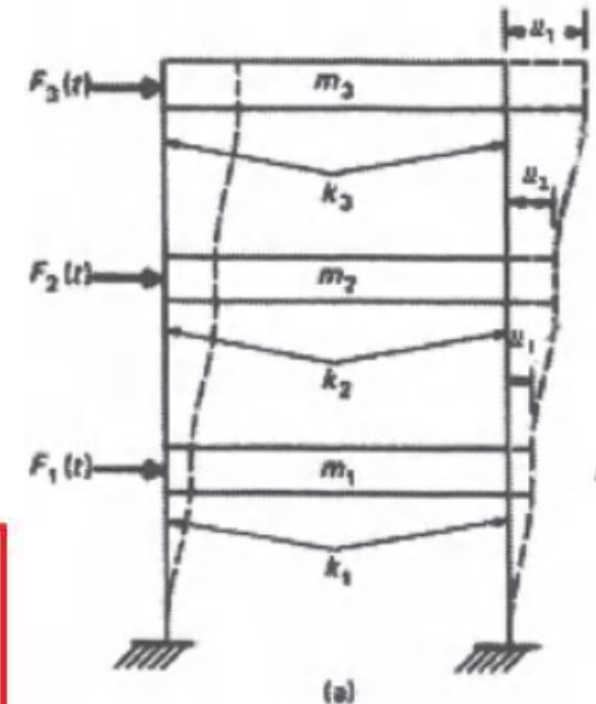
Considerando una qualsiasi delle tre rappresentazioni del sistema Shear-type si ottengono, dai diagrammi di corpo libero, le seguenti **equazioni del moto**:



$$m_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 - k_2 (u_2 - u_1) - F_1(t) = 0$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + k_2 (u_2 - u_1) - k_3 (u_3 - u_2) - F_2(t) = 0$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + k_3 (u_3 - u_2) - F_3(t) = 0$$



SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTA' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building)

Possiamo utilizzare la notazione matriciale per scrivere le equazioni del moto

$$m_1 \ddot{u}_1 + k_1 u_1 - k_2 (u_2 - u_1) - F_1(t) = 0$$

$$m_2 \ddot{u}_2 + k_2 (u_2 - u_1) - k_3 (u_3 - u_2) - F_2(t) = 0$$

$$m_3 \ddot{u}_3 + k_3 (u_3 - u_2) - F_3(t) = 0$$

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = \{F\}$$

$$[M] = \begin{bmatrix} m_1 & 0 & 0 \\ 0 & m_2 & 0 \\ 0 & 0 & m_3 \end{bmatrix}$$

$$[K] = \begin{bmatrix} k_1 + k_2 & -k_2 & 0 \\ -k_2 & k_2 + k_3 & -k_3 \\ 0 & -k_3 & k_3 \end{bmatrix}$$

Matrice di Massa

$$\{u\} = \begin{Bmatrix} u_1 \\ u_2 \\ u_3 \end{Bmatrix},$$

Vettore spostamento

$$\{\ddot{u}\} = \begin{Bmatrix} \ddot{u}_1 \\ \ddot{u}_2 \\ \ddot{u}_3 \end{Bmatrix},$$

Vettore accelerazione

Matrice di rigidezza

$$\{F\} = \begin{Bmatrix} F_1(t) \\ F_2(t) \\ F_3(t) \end{Bmatrix}$$

Vettore delle forze

SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTÀ' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building):
studio delle vibrazioni libere



$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0$$

$$u_i = a_i \sin(\omega t - \alpha), \quad i = 1, 2, \dots, n$$

$$\{u\} = \{a\} \sin(\omega t - \alpha)$$

$$-\omega^2 [M]\{a\} \sin(\omega t - \alpha) + [K]\{a\} \sin(\omega t - \alpha) = 0$$

$$[[K] - \omega^2 [M]]\{a\} = \{0\}$$

SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTÀ' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building):
studio delle vibrazioni libere

$$[M]\{\ddot{u}\} + [K]\{u\} = 0$$

$$[[K] - \omega^2[M]]\{a\} = \{0\}$$

Si tratta in generale di un sistema algebrico omogeneo (lato dx=0) di:

- **n** equazioni lineari
- con **n** spostamenti a_i incogniti
- un parametro ω^2 incognito

Tale formulazione rappresenta un classico **problema agli autovalori**

La soluzione non banale in cui NON tutti gli $a_i=0$, richiede che il DETERMINANTE DEI COEFFICIENTI $\{a\}$ SIA UGUALE A ZERO

$$\left| [K] - \omega^2[M] \right| = 0$$

SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTA' (MDOF) –

Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building): studio delle vibrazioni libere

$$|[K] - \omega^2 [M]| = 0$$

In generale l'equazione dà come risultato un'equazione polinomiale di grado n in ω^2 che dovrebbe essere soddisfatta per n valori di ω^2 .

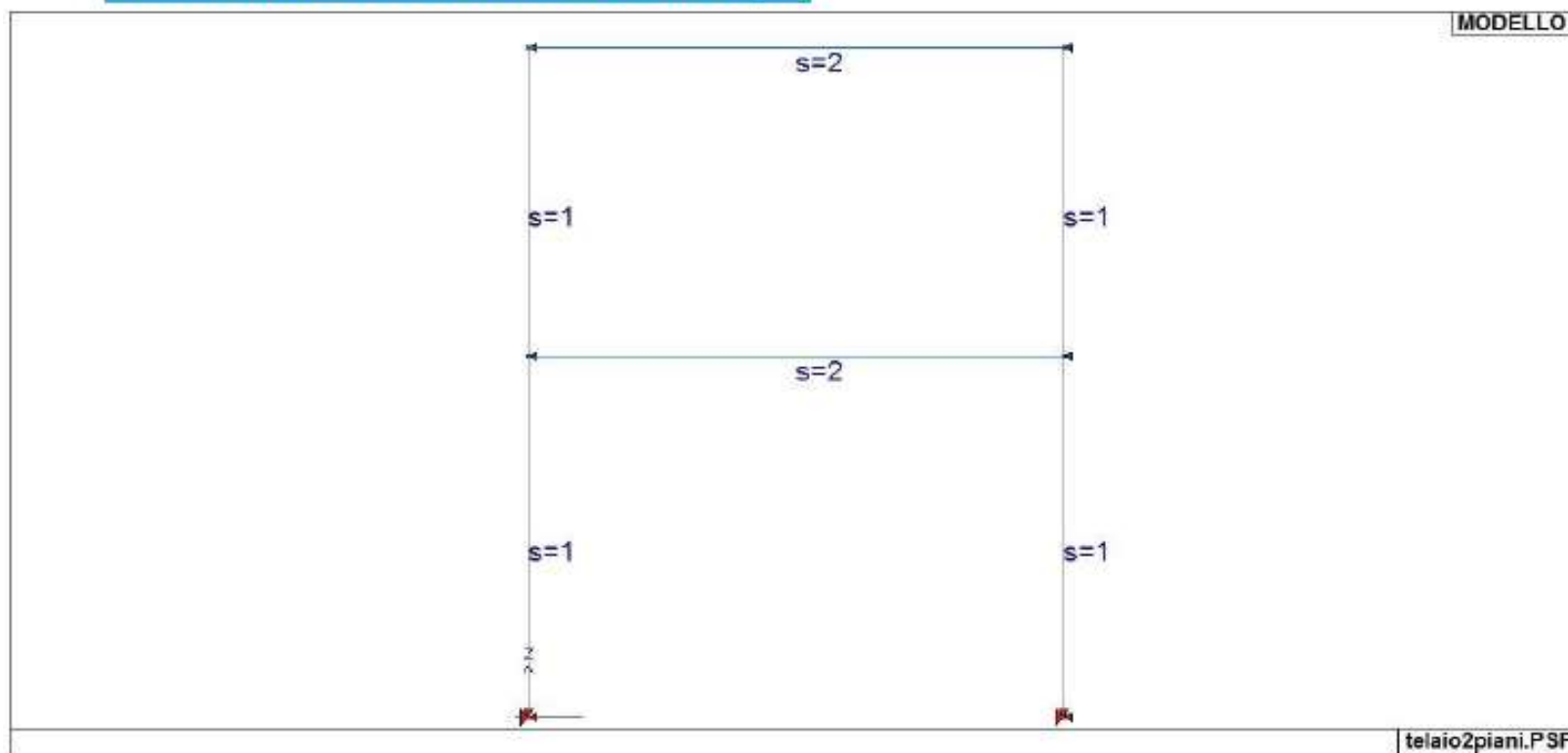
Tale equazione è detta equazione caratteristica del sistema.

Per ognuno di questi valori di ω^2 che soddisfino l'equazione

caratteristica $|[K] - \omega^2 [M]| = 0$ possiamo risolvere la $[[K] - \omega^2 [M]]\{a\} = \{0\}$

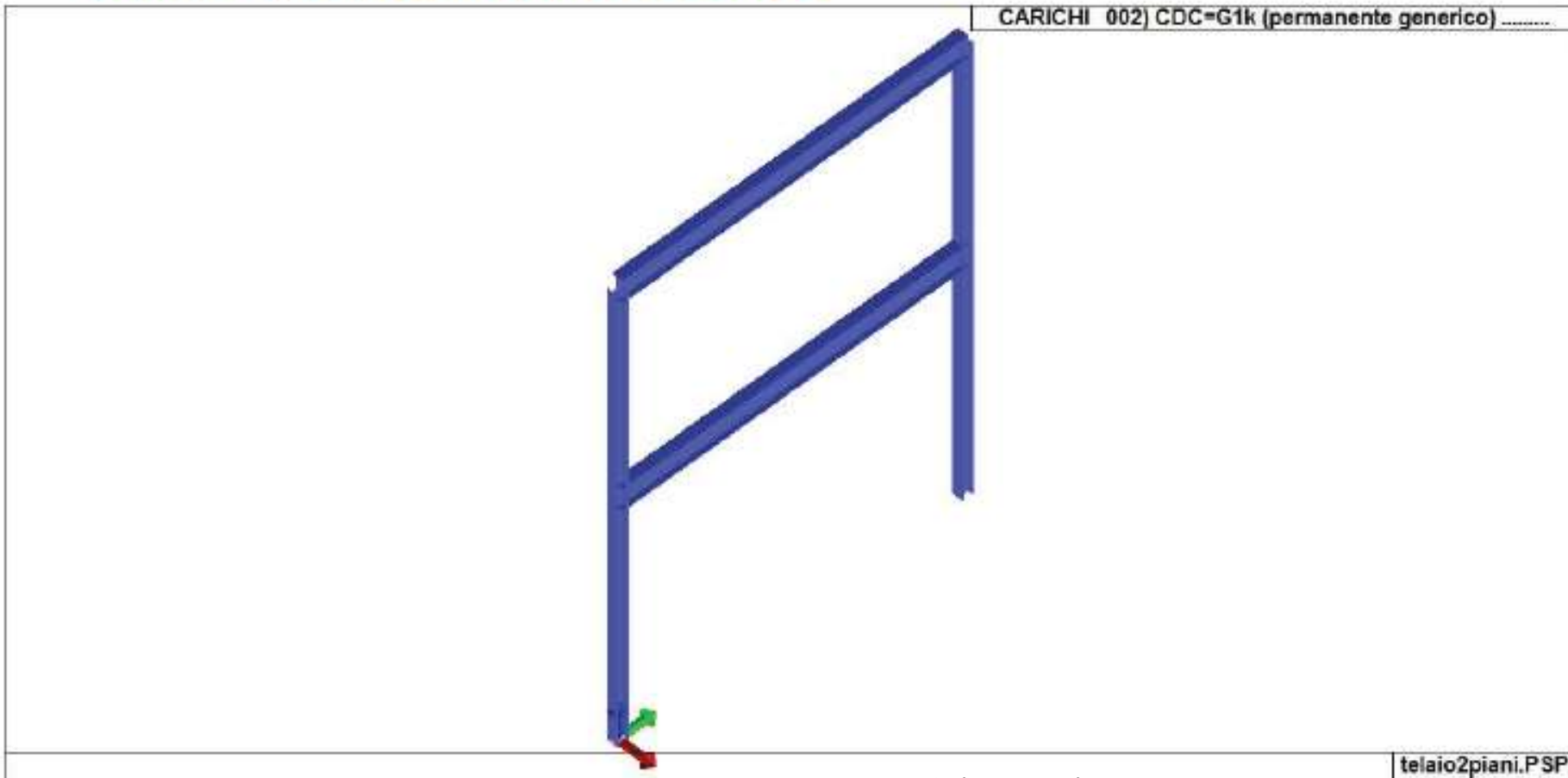
Per a_1, a_2, \dots, a_n nei termini di una costante arbitraria

SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTA' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building):
studio delle vibrazioni libere: esempio

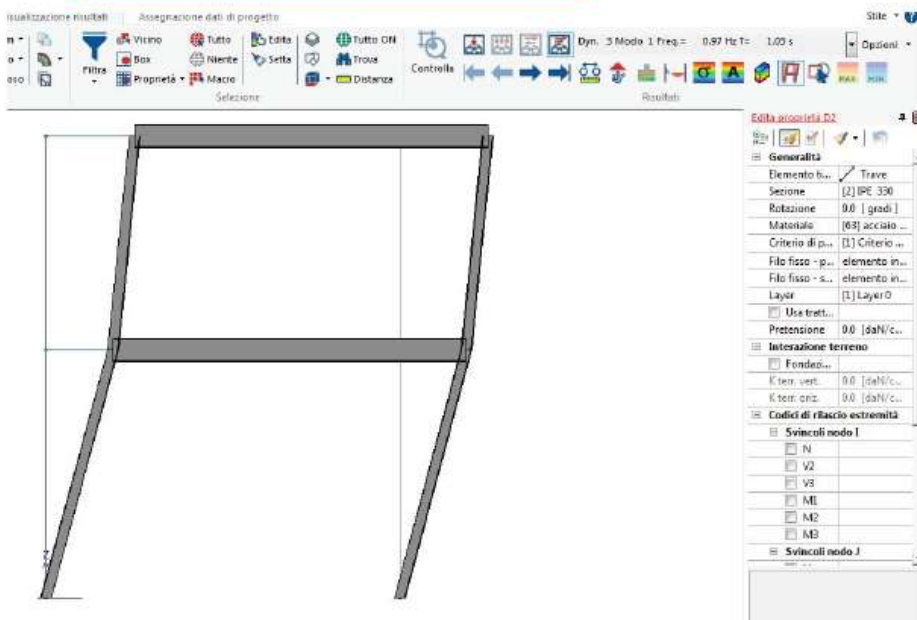


Luce trave= 5,0 m Altezza piano terra: 3,5 m Altezza primo piano: 3,0 m
 Pilastri in acciaio HEA160 e travi in acciaio IPE 330

SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTA' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building):
studio delle vibrazioni libere : esempio

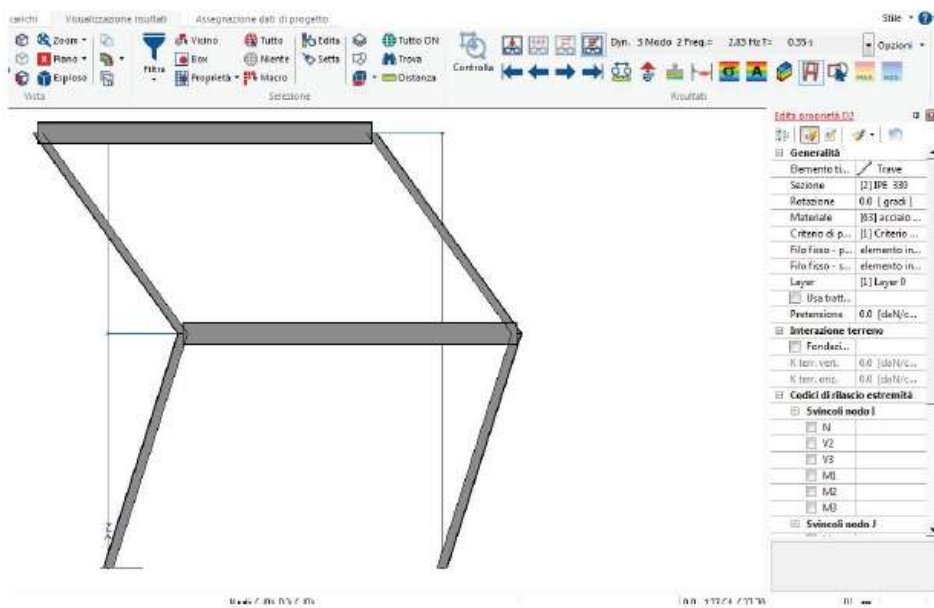


**SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTÀ' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building):
studio delle vibrazioni libere: : esempio**



1° MODO DI VIBRARE

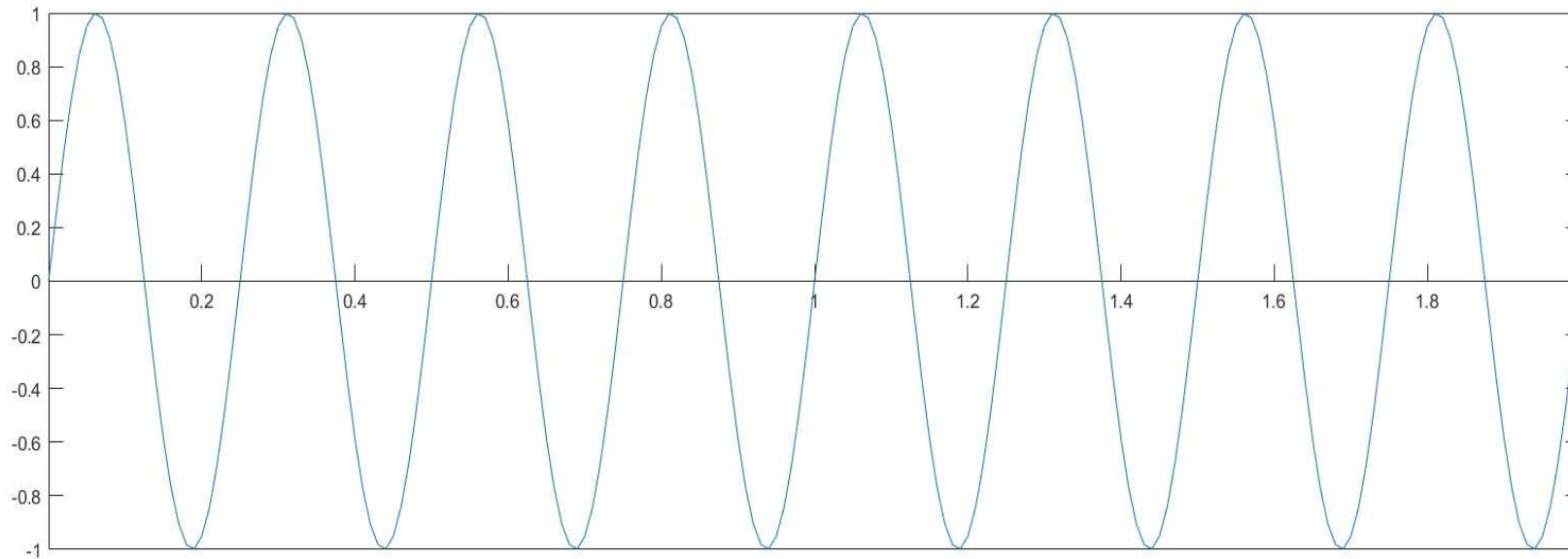
**SISTEMA A PIÙ GRADI DI LIBERTÀ' (MDOF) –
Telai con Traversi Infinitamente Rigidi (Shear-type, shear-frame, shear-building):
studio delle vibrazioni libere: esempio**



2° MODO DI VIBRARE

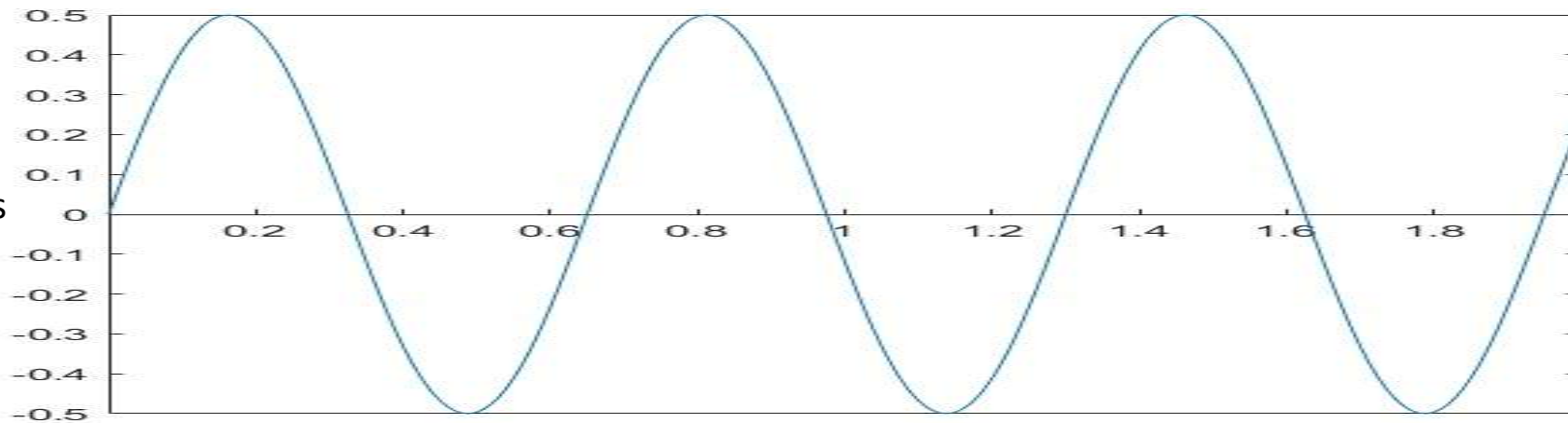
Periodo=0,25 s

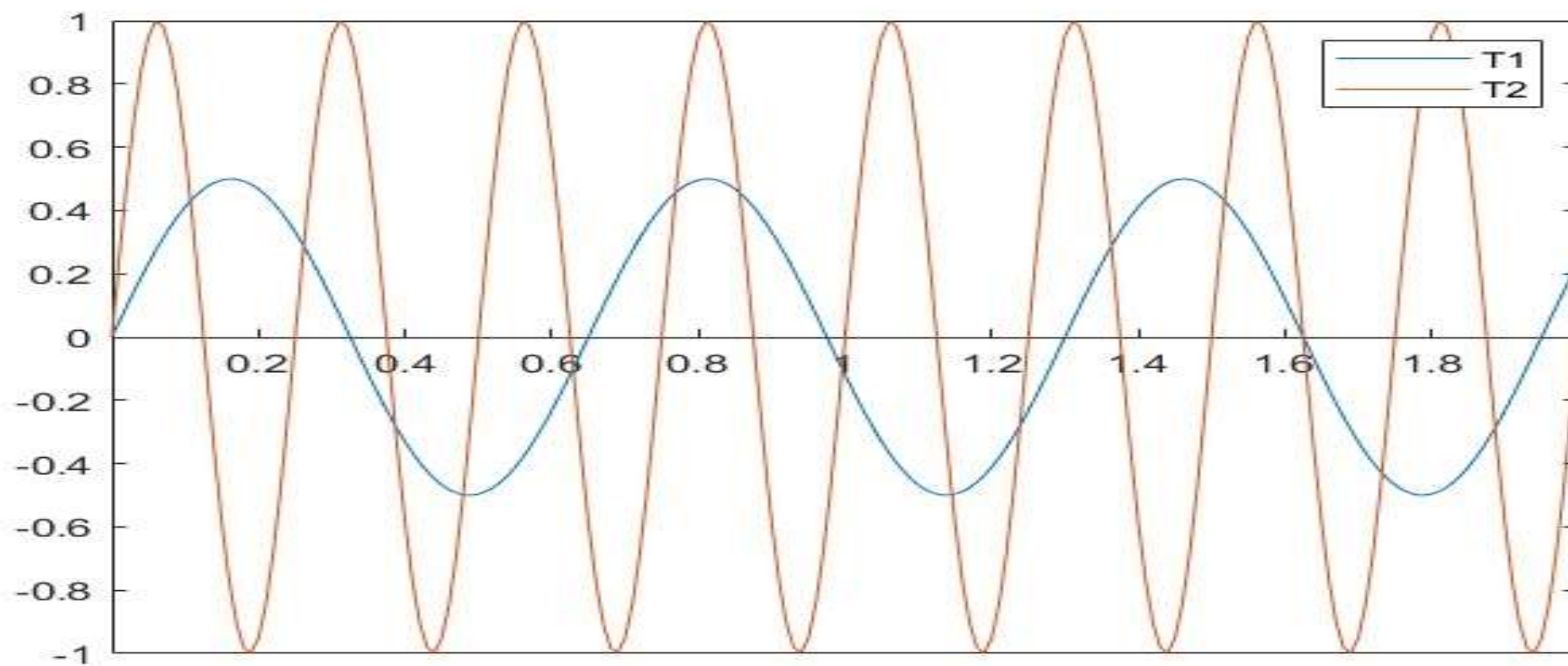
Freq.=4,00 Hz



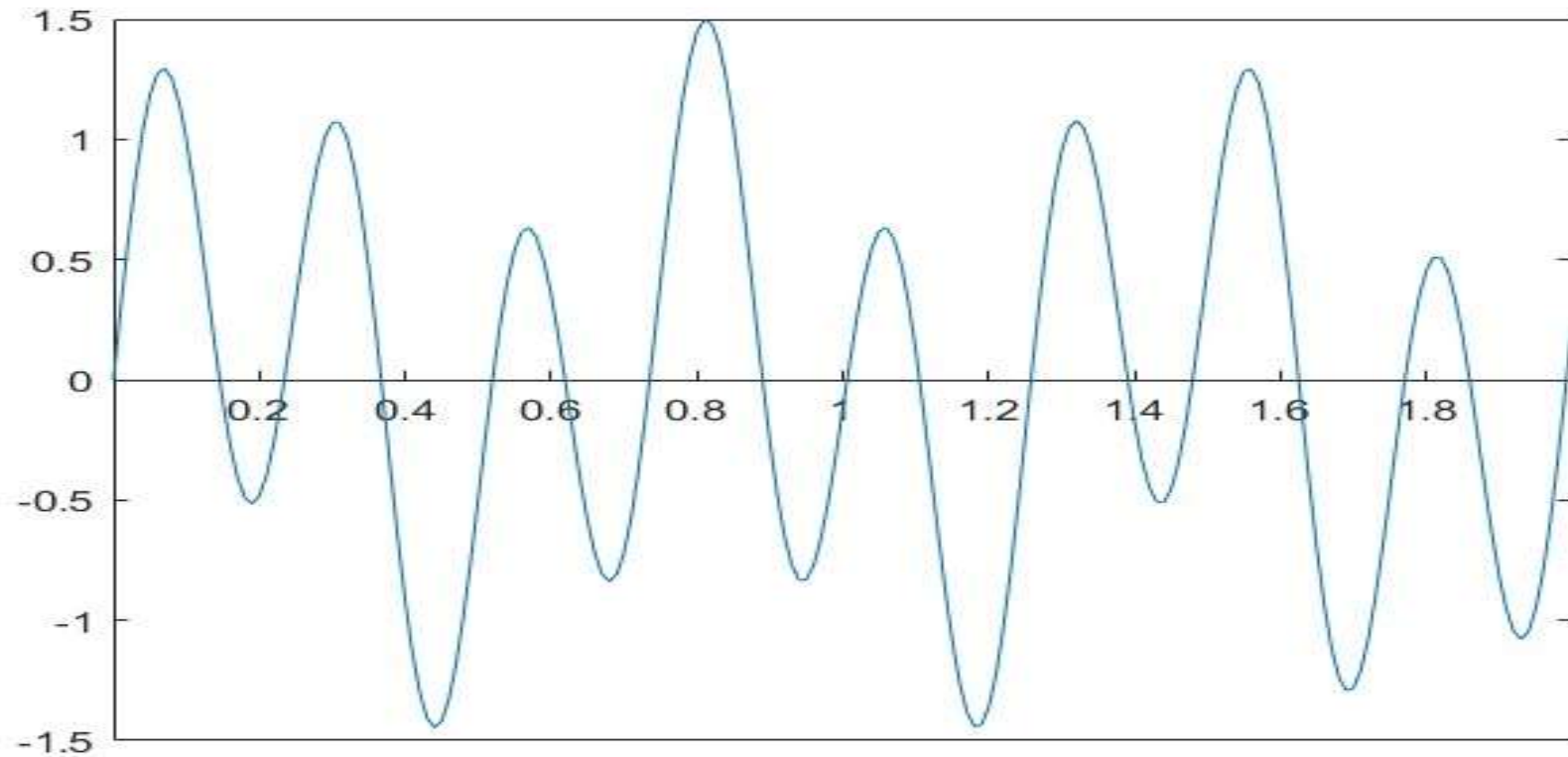
Periodo=0,65 s

Freq.=1,54 Hz

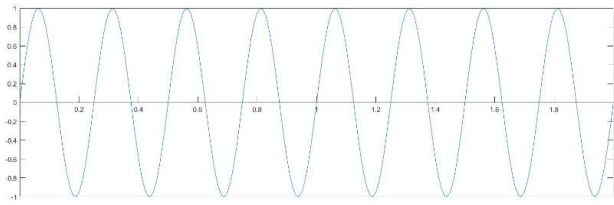




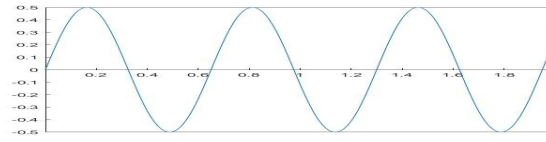
Sovrapposizione dei due segnali con frequenze di 1,54 Hz (T1) e 4,00 Hz (T2)



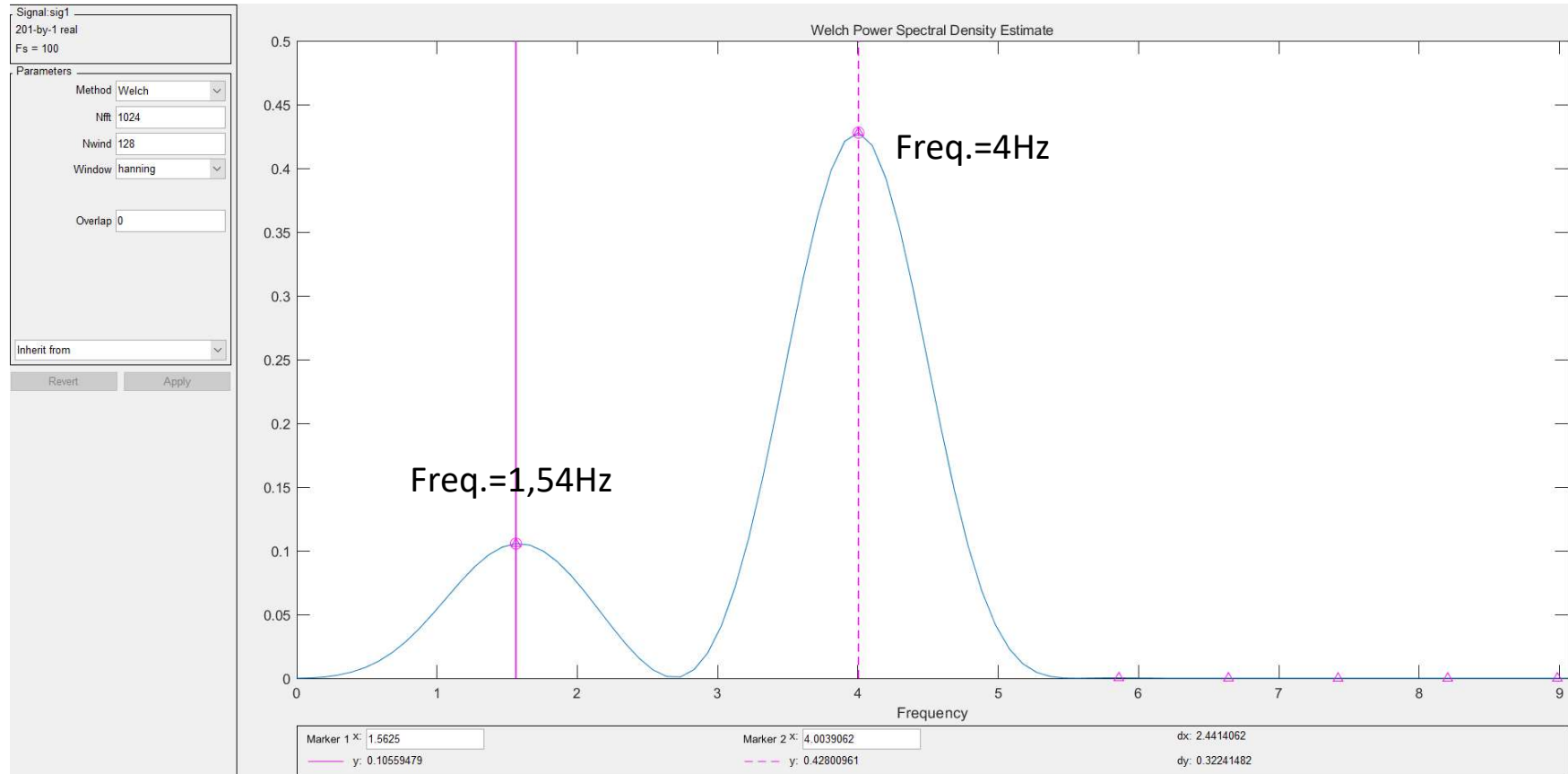
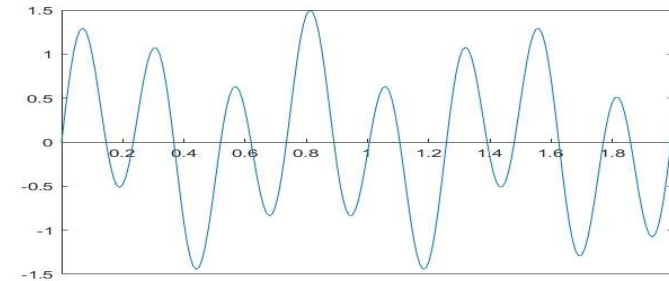
Somma dei due segnali



Freq.=4Hz



Freq.=1,54Hz



CONCLUSIONI

Le prove dinamiche consentono ai progettisti, direttori dei lavori e collaudatori di valutare il reale comportamento delle strutture sia di nuova costruzione che esistenti e sono previste dalle norme più recenti (NTC 2018, Linee guida per la classificazione e gestione del rischio, la valutazione della sicurezza ed il monitoraggio dei ponti esistenti, UNI 10985, UNI TR 11634:2016).

Nel complesso la norma, pone l'accento su:

- necessità di prevedere il comportamento dinamico di una struttura già in fase di progetto;
- l'importanza del confronto tra i risultati dei due approcci teorico e sperimentale;
- la calibrazione e successiva validazione del modello numerico sulla base delle forme modali, delle frequenze di vibrazione sperimentali e degli smorzamenti;
- stimare i livelli di smorzamento della struttura e valutarne l'entità rispetto a eventuali scenari di danneggiamento;

Nel conseguire tali risultati è fondamentale il contributo dei laboratori di prova.