

DATI COPERTINA E PREMESSA DEL PROGETTO

UNI1615033

UNI 10985

Lingua

Italiana

Titolo Italiano

Vibrazioni su ponti e viadotti - Linee guida per l'esecuzione di prove e rilievi dinamici

Titolo Inglese

Vibrations on bridges and viaducts - General guidelines for the execution of dynamic tests and investigations

Commissione Tecnica

Organo Competente

UNI/CT 002/SC 02 - Vibrazioni

Coautore

UNI/CT 021 - Ingegneria strutturale

Sommario

La norma descrive i criteri generali per eseguire prove e rilievi dinamici su ponti e viadotti; descrive la strumentazione e le possibili metodologie.

I destinatari di questo documento sono invitati a presentare, insieme ai loro commenti, la notifica di eventuali diritti di brevetto di cui sono a conoscenza e a fornire la relativa documentazione.

Questo testo NON è una norma UNI, ma è un progetto di norma sottoposto alla fase di inchiesta pubblica, da utilizzare solo ed esclusivamente per fini informativi e per la formulazione di commenti. Il processo di elaborazione delle norme UNI prevede che i progetti vengano sottoposti all'inchiesta pubblica per raccogliere i commenti degli operatori: la norma UNI definitiva potrebbe quindi presentare differenze -anche sostanziali- rispetto al documento messo in inchiesta.

Questo documento perde qualsiasi valore al termine dell'inchiesta pubblica, cioè il:

2026-03-21

UNI non è responsabile delle conseguenze che possono derivare dall'uso improprio del testo dei progetti in inchiesta pubblica.

Relazioni Nazionali

La presente norma sostituisce la UNI 10985:2002.

Relazioni Internazionali

Premessa

La presente norma è stata elaborata sotto la competenza delle Commissioni Tecniche UNI Acustica e vibrazioni
Ingegneria strutturale

© UNI - Milano. Riproduzione vietata.

Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte di questo documento può essere riprodotta o diffusa con un mezzo qualsiasi, fotocopie, microfilm o altro, senza il consenso scritto di UNI.

Introduzione

Le tecniche di indagine dinamica forniscono un contributo al controllo delle strutture mediante il rilievo e l'interpretazione della risposta a eccitazioni di tipo dinamico.

Le misure usualmente consentono la caratterizzazione del comportamento dinamico della struttura, incluse le fondazioni, o di singoli elementi strutturali nel dominio delle frequenze e/o del tempo.

La presente norma è indirizzata all'impiego delle misure dinamiche nel processo di progettazione, negli interventi temporanei, nella costruzione e nella manutenzione di ponti e viadotti. Programmi di misura della risposta dinamica possono essere intrapresi con lo scopo di:

- valutare la sicurezza delle strutture dei ponti durante la costruzione;
- confermare al termine della costruzione i valori usati nel progetto;
- valutare le caratteristiche dinamiche da usare nelle analisi degli effetti del vento, del sisma e delle azioni dovute ai carichi;
- monitorare il reale comportamento in servizio dei ponti e rilevare la presenza di danneggiamenti;
- confermare l'effetto degli interventi di rinforzo o adeguamento;
- effettuare diagnosi dei ponti in condizioni di emergenza;
- effettuare prove diagnostiche come base per il monitoraggio dello stato di condizione.

Studi dinamici possono essere utilizzati come parte del processo di progettazione (basato su prove) di nuove costruzioni o per la gestione della manutenzione e della riabilitazione di ponti esistenti.

L'impostazione della sperimentazione è in generale adeguata al tipo di struttura e alle finalità specifiche dell'indagine.

1 Scopo e campo di applicazione

La presente norma definisce le metodologie per eseguire indagini dinamiche su ponti e viadotti e:

- riporta una classificazione delle opere in funzione delle caratteristiche costruttive e d'impiego;
- indica tipologie d'indagine e controlli su singole parti strutturali o sull'intera opera;
- elenca le attrezzature di eccitazione e di misura;
- classifica le tecniche di indagine con specifici riferimenti alle metodologie più appropriate di elaborazione ed interpretazione dei dati sperimentali.

La presente norma non esonera dall'effettuazione delle prove previste in sede di collaudo statico. Essa fornisce unicamente i criteri generali per le prove e rilievi dinamici, che possono anche costituire un'integrazione a supporto del collaudo stesso, in quanto forniscono utili informazioni sul comportamento in regime dinamico delle strutture indagate.

La presente norma si applica a ponti e viadotti (in fase di costruzione, collaudo e d'esercizio) destinati al transito stradale e/o ferroviario e ad altre opere (o tipologie di opere) qualora la loro particolare struttura ne giustifichi l'applicazione.

L'applicazione della norma a opere di speciale tipologia (ponti strallati, sospesi) richiede una programmazione che tenga conto delle caratteristiche particolari dell'opera.

L'esecuzione delle misure è effettuata in conformità alle UNI 11568, ISO 16063-21 e UNI ISO 5348 rispetto alle quali il personale che esegue le misure possiede appropriata conoscenza ed esperienza. Relativamente a tali competenze si può fare riferimento alla UNI 11931.

Sono escluse dalla certificazione, secondo la UNI 11931, la progettazione, la supervisione delle prove, l'interpretazione delle misure e la valutazione dei risultati.

2 Riferimenti normativi

La presente norma rimanda, mediante riferimenti datati e non, a disposizioni contenute in altre pubblicazioni. Tali riferimenti normativi sono citati nei punti appropriati del testo e sono di seguito elencati. Per quanto riguarda i riferimenti datati, successive modifiche o revisioni apportate a dette pubblicazioni valgono unicamente se introdotte nella presente norma come aggiornamento o revisione. Per i riferimenti non datati vale l'ultima edizione della pubblicazione alla quale si fa riferimento (compresi gli aggiornamenti).

UNI 11568:2015, *Vibrazioni - Strumentazione e analisi per la misura delle vibrazioni - Strumentazione di misura*

UNI/TR 11634, *Linee guida per il monitoraggio strutturale*

UNI 11931 *Certificazione del personale tecnico addetto alle prove non distruttive nel campo dell'ingegneria civile*

UNI EN 1998-4, *Eurocodice 8 - Progettazione delle strutture per la resistenza sismica - Parte 4: Silos, serbatoi e condotte*

UNI ISO 2041:2025, *Vibrazioni meccaniche, urti e monitoraggio delle condizioni - Vocabolario*

UNI ISO 2631-1, *Vibrazioni meccaniche e urti - Valutazione dell'esposizione dell'uomo alle vibrazioni trasmesse al corpo intero - Parte 1: Requisiti generali*

UNI ISO 5348, *Vibrazioni meccaniche e urti - Montaggio meccanico degli accelerometri*

ISO 8608, *Mechanical vibration — Road surface profiles — Reporting of measured data*

ISO 16063-21, *Methods for the calibration of vibration and shock transducers — Part 21: Vibration calibration by comparison to a reference transducer*

ISO 18649, *Mechanical vibration — Evaluation of measurement results from dynamic tests and investigations on bridges*

3 Termini e definizioni

Ai fini della presente norma si applicano i termini e le definizioni di cui alla UNI ISO 2041, UNI CEI 70099 e UNI CEI 70098-3.

4 Classificazione dei viadotti

4.1 Generale

Il comportamento dinamico dei ponti è fortemente influenzato da numerosi fattori quali la tipologia della sovrastruttura, il sistema statico, il metodo di costruzione, la tipologia della sezione, le condizioni di supporto, la tipologia di fondazione e di struttura di elevazione (pile e spalle).

La specifica classe d'uso del ponte, inoltre, condiziona sia il progetto della prova che la scelta delle modalità di elaborazione dei risultati. Per ponti esistenti può essere necessario considerare, durante la progettazione delle prove dinamiche, gli effetti di eventuali interventi locali o di riparazione, di interventi di miglioramento o di adeguamento che l'opera ha ricevuto successivamente alla costruzione.

Al fine di un'impostazione delle indagini si riportano le classificazioni che inquadrano le opere in funzione delle loro caratteristiche fondamentali.

4.2 Classificazione tipologica

4.2.1 Generale

Con riferimento al materiale costituente le parti strutturali di maggiore importanza, i ponti e viadotti possono essere identificati come segue:

- ponti di calcestruzzo con armatura normale gettati in opera o prefabbricati a elementi successivamente assemblati;
- ponti di calcestruzzo armato precompresso gettati in opera o prefabbricati a elementi successivamente assemblati. La precompressione (a cavi interni o esterni, resi aderenti e non) può essere totale o parziale (cioè, a sezione parzialmente interessata dalla precompressione, a sezione precompressa solo per un'aliquota delle azioni di progetto, oppure una combinazione dei due casi precedenti);
- ponti di acciaio (con impalcato a piastra ortotropa o altre orditure in acciaio);
- ponti di acciaio con soletta in calcestruzzo (ponti a sezione mista);
- ponti con solettone di calcestruzzo, a travi di acciaio incorporate;
- ponti di muratura;
- ponti di legno;

- ponti realizzati mediante altre tecnologie (per esempio, calcestruzzo rinforzato con fibre, elementi pultrusi).

4.2.2 Schema statico e schemi costruttivi

4.2.2.1 Schema statico

Lo schema statico del ponte e i dispositivi di vincolo, inclusi eventuali dissipatori, ritegni e masse accordate, influenzano alla base il comportamento dinamico dell'opera e di essi deve essere tenuto conto nella programmazione delle prove e dei rilievi dinamici.

Gli schemi statici generalmente adottati possono essere così elencati:

- a) ponti a semplice campata appoggiata agli estremi con adeguati dispositivi di vincolo;
- b) viadotti con campate appoggiate agli estremi con adeguati dispositivi di vincolo, specifici e indipendenti per ogni campata;
- c) viadotto a travata continua su n campate (con n numero totale di campate) appoggiate sulle pile con adeguati dispositivi di vincolo in genere comuni per le due campate adiacenti. Il profilo longitudinale può essere a sezione costante o variabile;
- d) viadotto a travata "GERBER". Tali viadotti riprendono lo schema a travata continua con l'introduzione di sconnessioni in campata al fine del recupero della isostaticità;
- e) ponti e viadotti a telaio con solidarizzazione delle travate di impalcato alle sottostrutture. Il profilo longitudinale può essere a sezione costante o variabile;
- f) ponti e viadotti ad arco classico e impalcato portato (con impalcato sospeso, intermedio o superiore);
- g) ponti e viadotti ad arco sottile e impalcato irrigidente;
- h) ponti a travature reticolari appoggiate o continue con profilo costante o variabile;
- i) ponti sospesi;
- j) ponti strallati.

4.2.2.2 Schemi costruttivi

I ponti e i viadotti, a esclusione di opere di limitata luce, in genere sono realizzati secondo sequenze costruttive e per fasi delle quali l'opera conserva memoria. Tali caratteristiche costruttive possono assumere significato nel quadro delle indagini di natura dinamica, nella modellazione dei sottosistemi di cui si compone l'opera e nell'interpretazione dei risultati.

A titolo esemplificativo si elencano alcuni processi costruttivi di normale impiego:

- ponti e viadotti a travate appoggiate realizzate con travi prefabbricate in calcestruzzo (in genere precomprese) o in acciaio successivamente collegate con soletta in calcestruzzo (gettata in opera o prefabbricata);
- ponti e viadotti a travate appoggiate o continue in calcestruzzo armato normale o precompresso gettati in opera. L'impiego di tali tecnologie è piuttosto limitato;
- ponti e viadotti a vario schema statico realizzati in avanzamento con varie tecnologie. Caratteristica di tali ponti e viadotti è l'evoluzione progressiva dello schema statico.

4.2.3 Tipologie fondamentali della sezione di impalcato

Le principali tipologie delle sezioni di impalcato possono così configurarsi:

- ponti a sezione aperta: la sezione trasversale dell'impalcato è costituita da travi (anche reticolari) a vario interasse mutuamente collegate con traversi e soletta;

- ponti a sezione chiusa: la sezione di impalcato è a cassone mono o pluricellulare. Di frequente si adottano sbalzi laterali o campi di soletta di notevole estensione, i quali possono dare luogo a effetti dinamici locali;
- ponti con nuclei a cassone isolati, collegati mutuamente con soletta ed eventualmente traversi;
- ponti a piastra a sezione piena o alleggeriti monolitici o costituiti da elementi lineari collegati con getti integrativi.

4.2.4 Tipologie delle fondazioni

Le principali tipologie delle fondazioni possono così riassumersi:

- fondazioni dirette;
- fondazioni indirette su pali di vario diametro o diaframmi;
- fondazioni a pozzo;
- fondazioni su terreno trattato;
- fondazioni a cassone.

Il comportamento di tali fondazioni e del terreno può variamente influenzare il grado di vincolo delle strutture in elevazione (pile o spalle) e di conseguenza si dovrebbe, ove possibile, indagare su tali loro comportamenti, con esperienze condotte preferibilmente in corso d'opera.

4.2.5 Tipologie delle strutture in elevazione

4.2.5.1 Pile

Le tipologie delle pile possono essere fondamentalmente così riassunte:

- pile monofusto a sezione piena costante o variabile;
- pile monofusto a sezione cava mono o pluricellulare (in calcestruzzo o in acciaio), a profilo verticale costante o variabile con spessore delle pareti costante o variabile;
- pile a fusto binato in genere a sezione piena e profilo verticale costante;
- pile a telaio.

Altri tipi di pile possono ricondursi a una combinazione delle tipologie sopra elencate.

4.2.5.2 Spalle

Le tipologie delle spalle possono essere così riassunte:

- spalle di calcestruzzo armato massicce o nervate gettate in opera;
- spalle cave, generalmente di calcestruzzo armato, gettate in opera;
- spalle realizzate con elementi prefabbricati in calcestruzzo assemblati in opera;
- spalle di terra mista rinforzata e trave cuscino.

4.2.6 Ponti a schema o a tipologia speciale

Per tutte le tipologie di ponti di cui ai punti precedenti possono presentarsi situazioni plano-altimetriche che ne modificano il comportamento. Possono aversi:

- ponti e viadotti in obliquo (obliquità $>15^\circ$, intesa come angolo tra l'allineamento degli appoggi e la normale all'asse del ponte);
- ponti e viadotti in curva ($R/L < 10$) dove:
 - R è il raggio di curvatura;
 - L è la lunghezza del ponte;
- ponti e viadotti in notevole pendenza (con inclinazione globale $>5\%$).

Tra i ponti a tipologia speciale di frequente impiego si elencano:

- ponti strallati;
- ponti sospesi.

In genere, per tali tipologie, sia la progettazione delle indagini sia le interpretazioni dei risultati devono tenere conto della specificità del caso considerato e dei fenomeni connessi (per esempio fenomeni aeroelastici).

4.3 Classificazione d'uso

In funzione dell'utilizzo si individuano le seguenti tipologie d'uso.

- ponti e viadotti stradali: ponti e viadotti destinati esclusivamente al traffico stradale o autostradale;
- ponti e viadotti ferroviari: ponti e viadotti destinati esclusivamente al traffico ferroviario dedicato (solo passeggeri) o misto (passeggeri e merci);
- ponti e viadotti a esercizio misto: ponti e viadotti destinati al traffico sia stradale sia ferroviario. In tale categoria sono inclusi anche i ponti e viadotti a servizio di ferrovie e metropolitane urbane ed extraurbane;
- passerelle pedonali: opere destinate esclusivamente al traffico pedonale. Le loro luci e la leggerezza strutturale le rendono particolarmente sensibili ai problemi dinamici;
- ponti mobili: ponti la cui geometria e schema statico possono variare in funzione di particolari esigenze estranee all'esercizio del ponte stesso (per esempio, ponti su corsi d'acqua navigabili). I ponti mobili possono essere di tipo stradale, ferroviario o semplici passerelle pedonali.

5 CRITERI GENERALI DI IMPOSTAZIONE DELLE INDAGINI

5.1 Generalità

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 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 a intervalli successivi dell'indagine stessa oppure mediante la realizzazione di un monitoraggio continuo.

Le indagini dovrebbero essere precedute da analisi condotte su un adeguato modello del ponte e finalizzate a simulare le grandezze che si intendono misurare. Tale studio può 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 riferimento per la scelta (tenendo conto degli scopi dello studio) del tipo di:

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

5.2 Scelta delle tecniche di indagine

La scelta delle tecniche di indagine dipende da numerosi fattori: campo delle frequenze proprie dell'opera, smorzamento a esse associato, intensità dell'eccitazione necessaria per una corretta rilevazione della risposta (in relazione sia alla risoluzione dei trasduttori sia all'entità del rumore ambientale presente). In ogni caso la scelta della tecnica di indagine deve essere rivolta a garantire una idonea eccitazione della struttura.

Particolare attenzione deve essere posta nella verifica del rapporto segnale-rumore: l'analisi della vibrazione dovuta all'eccitazione imposta può essere effettuata direttamente solo quando il rapporto tra il valore efficace complessivo del segnale misurato e il valore efficace del rumore di fondo è maggiore di 3. Nel caso in cui tale rapporto sia minore di 3, le misure devono essere elaborate con particolare attenzione e di ciò si deve fare menzione nel rapporto di prova, indicando i metodi di correzione e la stima degli errori attesi.

Nel caso di impiego di tecniche di indagine basate sullo studio della risposta dinamica prodotta dalle eccitazioni ambientali, particolare attenzione deve essere adottata nella valutazione del rapporto segnale/rumore. In questo caso, tale rapporto non dovrebbe essere minore di 40 dB.

5.3 Scelta delle modalità di eccitazione

5.3.1 Generalità

Nella scelta del tipo di eccitazione da adottare si dovrebbero distinguere fra due differenti condizioni di moto della struttura: quella di moto libero e quella di moto forzato. In entrambi i casi le analisi successive possono essere effettuate sia nel dominio del tempo, sia nel dominio delle frequenze, sia nel dominio tempo-frequenza.

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

L'eccitazione imposta può essere di tipo "forzata ambientale" o "forzata artificiale".

La prima, dovuta per esempio al vento, al traffico stradale, a microsismi, ad attività di cantiere, è di tipo aleatorio con energia distribuita su uno spettro più o meno ampio di frequenza.

La seconda, che prevede il ricorso a uno o più eccitatori con ampiezza e frequenza imposte e controllate, è particolarmente adatta per concentrare l'energia della forzante nell'intorno delle diverse frequenze naturali. Quest'eccitazione può consentire la valutazione dello smorzamento e l'identificazione di eventuali non linearità dell'opera.

5.3.2 Tipo della macchina

Per la scelta del tipo di macchina da utilizzare nel caso di vibrazioni forzate artificiali si rimanda all'Appendice A. Nella scelta della macchina di eccitazione, si devono valutare preliminarmente, oltre al campo di frequenze di interesse, anche i livelli di vibrazione che si desiderano ottenere e quindi il livello di forza da applicare e la potenza necessaria.

5.3.3 Prestazioni della macchina

Nell'impostazione della prova devono essere verificati vari aspetti in funzione delle previsioni teoriche e numeriche del comportamento della struttura, quali:

- campo di frequenza;
- entità del carico;
- potenza disponibile.

5.3.4 Postazione di eccitazione

In caso di utilizzo di tecniche di indagine basate sulla misura della risposta dinamica prodotta da azioni "forzate artificiali", in relazione al numero e tipo dei modi di vibrare che si intendono identificare devono essere scelti il numero e l'ubicazione più opportuna dei punti di eccitazione (possibilmente coincidenti con le zone di massima ampiezza modale) tenendo presenti le caratteristiche geometriche meccaniche e lo schema di funzionamento dell'opera.

Una volta scelta la disposizione delle apparecchiature, può essere necessario verificare la capacità locale della struttura di sopportare il carico dinamico prodotto dalla macchina.

5.4 Scelta della rete di sensori per il rilievo della risposta

5.4.1 Generalità

La scelta della rete dei sensori deve essere fatta in funzione delle specifiche informazioni che si intende ottenere dalle prove e possibilmente sulla scorta delle previsioni ottenute dal modello di calcolo. Generalmente sono misurati, per esempio, accelerazioni, spostamenti, inclinazioni, sollecitazioni.

Qualora il modello di calcolo e l'esperienza evidenzino la possibilità del verificarsi di fenomeni particolari, si devono porre in atto una strumentazione mirata a cogliere tali fenomeni. In questo modo, per esempio, se vi è la possibilità che insorgano fenomeni di fatica in zone caratteristiche della struttura, si dovrebbe provvedere a misurare in quelle zone il campo delle deformazioni e delle tensioni.

Tali informazioni sono di grande utilità nel prevedere i possibili danneggiamenti locali e globali rilevanti ai fini della durata dell'opera.

5.4.2 Misura delle risposte globali

La rete dei sensori deve permettere di cogliere con sufficiente accuratezza il comportamento d'insieme della struttura (o di suoi sottosistemi, per esempio pile, impalcato). Tale comportamento è in genere caratterizzato attraverso i parametri modali: frequenza, smorzamento, forme dei primi modi di vibrare.

La misurazione della risposta globale richiede in genere la disposizione di strumentazione diffusa lungo lo sviluppo dell'opera o dei suoi elementi anche con configurazioni diverse tra una prova e l'altra (convenientemente programmata sulla base delle analisi preliminari). Si deve, in questo caso, mantenere alcune posizioni di misura invariate al fine di controllare la ripetibilità della prova e di correlare tra loro le diverse misure.

Nella disposizione degli strumenti deve essere evitato di scegliere posizioni in corrispondenza di elementi sensibili alle vibrazioni locali.

5.4.3 Misura delle risposte locali

Per una migliore interpretazione del comportamento d'insieme e/o di parti dell'opera, e/o per una verifica delle ipotesi progettuali e del modello di calcolo adottato, vengono in genere effettuati rilievi delle risposte locali quali per esempio: la rotazione in sommità di blocchi di fondazione, la distribuzione degli sforzi in sezioni trasversali caratteristiche dell'impalcato, il moto degli sbalzi.

La programmazione di questo tipo di misurazioni deve essere fatta sulla base delle analisi preliminari che possono anche indicare la disposizione più opportuna degli strumenti.

5.4.4 Tecniche di installazione e calibrazione della strumentazione di misura

Le modalità di installazione dei sensori devono consentire la misura delle vibrazioni dell'elemento sul quale vengono fissati, in tutto il campo di frequenze da analizzare. Il sistema di montaggio deve essere il più rigido possibile per evitare fenomeni di risonanza locale associati alle modalità stesse di fissaggio.

Il fissaggio dei trasduttori deve essere conforme alle indicazioni del costruttore o, quando esistano, a norme applicabili (per esempio, la UNI ISO 5348 per gli accelerometri); tali modalità devono essere indicate nel resoconto di prova. Metodi di fissaggio senza una specifica norma di riferimento devono essere oggetto di verifica secondo la UNI 11568.

La catena complessiva di misura (trasduttori, apparecchi per il condizionamento del segnale e sistema di registrazione dati) deve essere calibrata in conformità con le specifiche del costruttore o a norme applicabili (per esempio la ISO 16063-21).

Qualora la geometria dell'opera non consenta l'impiego di un'unica catena di misura, è possibile l'utilizzo di più catene di misura indipendenti per le quali sia possibile garantire la sincronizzazione del *clock* dei convertitori analogico-digitale non maggiore di un decimo del periodo di acquisizione. In questo caso si dovrebbe distribuire un segnale di clock cablato a tutti gli acquisitori.

Nel resoconto di prova deve essere completamente descritta la catena di misura e acquisizione dati e devono essere precisate le caratteristiche di risposta in frequenza del sistema di misurazione completo.

6 ATTREZZATURE SPERIMENTALI

6.1 Sistemi di eccitazione

In caso di utilizzo di una tecnica di indagine basata su eccitazione "forzata artificiale", l'attrezzatura selezionata per l'eccitazione deve essere adatta allo scopo. L'appendice A fornisce dettagli sui generatori di vibrazioni e sistemi impulsivi e sulle loro caratteristiche prestazionali.

6.2 Sensori di misura

6.2.1 Generalità

I sensori di misura 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 a un circuito elettronico di condizionamento in grado di fornire un segnale in uscita legato alla grandezza da misurare. Questo segnale può essere acquisito e registrato per le necessarie elaborazioni. Per ulteriori informazioni sulle tipologie e sulle caratteristiche dei sensori si rimanda alla UNI 11568.

6.2.2 Classificazione

I sensori (trasduttori) per la misura delle vibrazioni sono classificati nella UNI 11568 con riferimento alle grandezze fisiche che sono destinati a rilevare. Le tecnologie per la realizzazione di sensori sono tuttavia assai ampie e in continuo sviluppo. Ai fini delle applicazioni alla misura delle vibrazioni in strutture, e in particolare in ponti e viadotti, sono inoltre di interesse sensori per il rilevamento dei parametri ambientali (per esempio, temperature, vento, umidità) e delle caratteristiche del traffico. Per tali applicazioni può essere anche opportuna una ulteriore classificazione in base:

a) al principio fisico di funzionamento:

- trasduttori elettrici resistivi;
- trasduttori elettrici capacitivi;
- trasduttori elettrici induttivi;
- trasduttori basati su tecnologie a fibra ottica (interferometrici, spettrometrici, intensimetrici, polarimetrici, ecc.);
- trasduttori piezoelettrici;
- trasduttori basati su principi di misura ottici ed elettromagnetici (comprese tecnologie basate su laser e radar terrestri o satellitari);
- altri.

b) al tipo di riferimento relativo o assoluto rispetto al quale viene effettuata la misurazione:

- nel caso di riferimento relativo possono individuarsi due diverse famiglie:

- 1) riferimento e punto di misurazione appartenenti entrambi alla struttura (per esempio gli estensimetri);
- 2) riferimento esterno alla struttura e punto di misura appartenente alla struttura (per esempio i trasduttori ottici);

- nel caso di riferimento assoluto (inerziale), si tratta di trasduttori che misurano grandezze cinematiche relative fra il contenitore esterno dello strumento (fissato alla struttura) e una massa sospesa interna che può considerarsi fissa e costituisce quindi un riferimento assoluto entro un determinato campo di frequenza. Appartengono a questa famiglia, con caratteristiche di massa e di rigidità differenti, sia gli accelerometri sia i sismometri.

6.2.3 Definizione delle caratteristiche dei sensori

Per ogni sensore e per il relativo circuito di condizionamento devono essere definite e note le caratteristiche prestazionali. Le caratteristiche metrologiche generali dei sensori per la misura delle vibrazioni sono definite al punto 5.2.2 della UNI 11568:2015 e sono riassunte in forma schematica nell'Appendice B.

Oltre alle caratteristiche metrologiche dei sensori e alle loro modalità di alimentazione, si dovrebbero considerare anche le caratteristiche relative all'intera catena di misurazione, in particolare per i sensori elettrici cablati:

- le caratteristiche dei cavi;
- lo schermaggio e la messa a terra (per esempio, congruenza tra i riferimenti di massa);
- le caratteristiche degli amplificatori e dei filtri, se necessari;
- la distanza tra i trasduttori e le unità di condizionamento (che può rendere necessaria l'adozione di sensori alimentati in corrente, ripetitori di segnale);
- la protezione delle unità di condizionamento e dei sistemi di acquisizione da sovratensioni elettriche (con l'eventuale adozione di separatori galvanici).

6.2.4 Sistemi di controllo, acquisizione e analisi

Il sistema per la realizzazione della prova è composto dal sistema di acquisizione dei segnali trasmessi dai sensori, dal sistema di registrazione e di analisi delle misure e, in caso di utilizzo di tecniche di indagine con "forzata artificiale", dal sistema di controllo. La funzione del sistema di controllo è quella di pilotare l'attrezzatura di eccitazione e quindi di controllare le azioni che si applicano alle strutture durante la prova. A seconda del tipo di sistema di eccitazione può essere necessaria o meno la presenza di rilevatori di forza tra il basamento dell'attrezzatura e la struttura.

I segnali generati dai sensori devono essere registrati per renderli disponibili per la successiva elaborazione.

La registrazione può essere fatta in forma digitale dopo aver convertito il segnale analogico in forma digitale attraverso opportuno sistema di conversione A/D (sistema di acquisizione). In questo caso si deve utilizzare una frequenza di campionamento opportuna in relazione alle caratteristiche del segnale e alle proprietà attese della risposta strutturale, stimate nella fase iniziale del progetto della prova.

In caso di segnali provenienti da sistemi di misura differenti e in funzione del caso d'uso, prima della loro elaborazione si dovrebbe verificare l'effettiva sincronia delle misure e l'uguaglianza tra i diversi parametri di acquisizione.

7 CLASSIFICAZIONE DELLE TECNICHE DI INDAGINE

7.1 Natura delle tecniche di indagine

7.1.1 Classificazione

Le tecniche di indagine dinamica sono classificabili in base alla natura dell'eccitazione che può essere artificiale o ambientale.

7.1.2 Vibrazioni forzate

Le vibrazioni forzate possono essere indotte sia da cause artificiali che ambientali.

Le eccitazioni di tipo artificiale sono causate da carichi applicati per l'esecuzione della prova e quindi generalmente di intensità e andamento controllabili e misurabili. L'andamento del carico dinamico può essere sinusoidale, random di tipo stazionario o non-stazionario, o di tipo transitorio.

Le vibrazioni forzate ambientali possono essere prodotte, per esempio, dal vento, dal traffico (su gomma e/o su ferro), da microsismi, da attività di cantiere. In funzione della sua natura l'eccitazione, solo in alcuni casi misurabile, ha un andamento random stazionario o non stazionario o di tipo transitorio.

7.1.3 Vibrazioni libere

Le vibrazioni libere sono ciò che persiste dopo che la causa che le ha prodotte è cessata. Sono caratterizzate dalla combinazione di segnali sinusoidali smorzati. Le vibrazioni libere dipendono dalle caratteristiche modali della struttura. Possono essere indotte artificialmente o per cause ambientali. Nel primo caso sono dovute ad azioni transitorie, per esempio l'uso della tecnica di tiro e rilascio rapido o utilizzando dispositivi che generano carichi impulsivi.

Nel secondo caso, possono essere indotte sulla struttura dall'interruzione di azioni transitorie ambientali come, per esempio, il passaggio dei veicoli o la cessazione del vento.

7.1.4 Elaborazione dei dati

Le tecniche di elaborazione dei dati sono fortemente condizionate dalle caratteristiche del segnale (periodico, random, transitorio) e possono operare nel dominio delle frequenze, del tempo e nel dominio bidimensionale tempo-frequenza. Le procedure di identificazione strutturale utilizzate devono essere ragionevolmente consolidate e/o documentate in letteratura. Il rapporto di prova, come meglio specificato nel punto 12.3 deve descrivere accuratamente le procedure utilizzate e gli specifici riferimenti bibliografici. Per un'illustrazione dei criteri di elaborazione vedere l'Appendice C.

7.2 Prove con eccitazione artificiale

7.2.1 Generalità

Le prove di vibrazione forzata artificiale rappresentano tecniche di indagine oggi meno diffuse, a causa dell'onere di esecuzione sia in termini economici che logistici (per esempio, chiusura temporanea del traffico, modalità operative di esecuzione), e grazie al concomitante sviluppo di tecniche alternative basate su eccitazioni di tipo ambientale.

Per le prove di vibrazione forzata artificiale si devono installare uno o più eccitatori (che possono in tempi successivi essere ubicati in postazioni differenti) e si deve montare una rete di trasduttori di misura il cui numero e la cui disposizione dipendono dalla tipologia strutturale del ponte o del viadotto che si intende esaminare e dagli obiettivi prefissati dall'indagine (vedere Appendice D). I metodi di fissaggio dell'eccitatore alla struttura o all'elemento strutturale non dovrebbero indurre movimenti anomali in una direzione diversa da quella desiderata. Laddove la massa dell'eccitatore e/o di qualsiasi sistema di fissaggio alla struttura sia significativa, se ne devono valutare gli effetti sulla risposta dinamica.

La descrizione delle caratteristiche delle prove, delle macchine impiegabili, dei limiti d'applicabilità e delle modalità interpretative si ritrovano nell'Appendice C rispettivamente per i tre casi descritti nei punti 7.2.2, 7.2.3 e 7.2.4.

7.2.2 Eccitazione sinusoidale

L'eccitazione sinusoidale consiste nell'applicazione di forze variabili nel tempo con legge di tipo armonico. Nel corso della prova la frequenza dell'eccitazione viene fatta variare in un intervallo opportuno, in modo da cogliere i modi di interesse della struttura. La variazione di frequenza può essere lenta o rapida. Le prove sinusoidali comportano, rispetto alle altre, il vantaggio di concentrare l'energia di eccitazione su una sola frequenza per volta e di produrre pertanto risposte di grande ampiezza.

7.2.3 Eccitazione random

L'eccitazione random consiste nell'applicazione di azioni dinamiche variabili nel tempo con legge random stazionaria e aventi contenuto in frequenza tale da eccitare i modi di interesse della struttura.

7.2.4 Eccitazione impulsiva

L'eccitazione impulsiva consiste nell'applicazione di un'azione dinamica di carattere impulsivo (per esempio, tiro e rilascio rapido, impatto di gravi, uso di vibrodine idrauliche, esplosioni in vicinanza del manufatto). Questo tipo di tecnica d'eccitazione viene utilizzato per l'analisi delle oscillazioni libere indotte.

7.3 Prove con eccitazione ambientale

7.3.1 Generalità

Le prove di vibrazione ambientale (per esempio interpretate con tecniche OMA) rappresentano attualmente le tecniche di indagine più diffuse grazie alla minore invasività e maggiore rapidità di esecuzione rispetto alle prove con eccitazione artificiale.

Le sorgenti di eccitazione utilizzabili sono descritte nei punti dal 7.3.2 al 7.3.6.

7.3.2 Vento

L'eccitazione prodotta del vento può considerarsi di tipo "quasi-random".

La misurazione del carico dinamico effettivo prodotto dall'attività eolica è di fatto irrealizzabile a causa della distribuzione del carico stesso su tutte le superfici esposte. Per le tecniche di analisi vedere l'Appendice C.

7.3.3 Sisma

L'eccitazione prodotta del sisma è un transitorio di durata variabile fino a qualche decina di secondi.

Il carico dinamico effettivo prodotto dall'attività sismica è da correlare ai movimenti della base dell'opera (pile e spalle); pertanto, la misurazione dell'eccitazione deve essere condotta disponendo sensori alla base. Nel caso si vogliano valutare eventuali fenomeni di interazione suolo-struttura, devono essere collocati strumenti di misurazione in campo libero ("free field").

I limiti di applicabilità sono ristrettissimi in quanto il sisma è un evento raro e quindi può ragionevolmente essere registrato solo con sistemi di monitoraggio permanenti.

Per le tecniche di analisi si rimanda a quelle descritte nel punto C.4 nel caso di eccitazione alla base non misurata e nel punto C.5 nel caso di eccitazione alla base misurata.

7.3.4 Microsisma

L'attività microsismica (Magnitudo Locale (M_L) minore di 2,0), costituita da tremori di piccola entità sempre presenti nella crosta terrestre, rappresenta per la struttura un'eccitazione di tipo random praticamente stazionaria.

L'eccitazione prodotta del microsisma è una sequenza di transitori di breve durata.

Molti siti presentano una successione quasi continua di micro-tremori (onde superficiali) che possono essere attribuiti a "rumore indotto da attività umane". Inoltre, si possono riscontrare vibrazioni con periodi lunghi generate da fonti meteorologiche, come i microsismi a lungo periodo collegati al formarsi di centri di bassa pressione e all'azione delle onde sui litorali.

Per quanto riguarda la misurazione del carico dinamico effettivo prodotto dall'attività microsismica e le tecniche di analisi, si rimanda alle considerazioni riportate nel punto 7.3.2.

I limiti di applicabilità sono ristrettissimi in quanto il microsisma genera livelli di vibrazioni che spesso possono essere colti solo da sensori di risoluzione spinta (per esempio sismometri) e spesso sono mascherati dalla presenza di altri segnali di origine ambientale o di misura (*noise*).

7.3.5 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 facendo transitare un solo veicolo con caratteristiche note) oppure si può utilizzare il normale traffico. Nel caso di traffico viario ordinario, la misura dell'effettiva eccitazione dinamica è poco utilizzata; in ogni caso esiste la possibilità di impiego di tecniche di monitoraggio al fine di ottenere informazioni relative alla presenza e consistenza del traffico stesso (sensori *weigh-in-motion*). Per il traffico ferroviario, attraverso l'impiego di sensori, è possibile individuare la posizione degli assi del convoglio, l'entità del carico per asse, la velocità e la composizione del convoglio.

Il traffico pedonale può essere utilizzato per eccitare ponti leggeri, compresi i ponti pedonali. Le persone che camminano a frequenza costante forniscono un carico a quella frequenza e a multipli interi della stessa. Pertanto, la frequenza di eccitazione può essere opportunamente selezionata per eccitare il modo di interesse della struttura. L'interruzione della camminata o un singolo salto possono essere utilizzati per indurre vibrazioni libere del ponte.

Le tecniche di identificazione da utilizzarsi nel caso in cui non si disponga della misura diretta delle cause eccitanti sono descritte nel punto C.4.

7.3.6 Altre azioni dinamiche

Esistono altre azioni dinamiche che possono produrre significative e misurabili vibrazioni nei ponti e viadotti, come per esempio l'interazione con l'acqua prodotta da onde o da correnti.

8 INDAGINI E CONTROLLI

8.1 Generalità

Vengono di seguito descritti i tipi e le finalità delle indagini più comunemente adottate per tenere sotto controllo la realizzazione di un viadotto (prove in corso d'opera), per verificare la qualità dell'opera costruita e la sua rispondenza ai criteri di progettazione (prove di collaudo) e per garantire un corretto esercizio (prove e rilievi in esercizio).

8.2 Indagini e controlli in fase di costruzione

8.2.1 Generalità

Le indagini di tipo dinamico su ponti o complessi strutturali parziali in corso di costruzione dovrebbero essere svolte soprattutto al fine di ottenere indicazioni sulla validità delle ipotesi utilizzate in sede di progettazione e modellazione strutturale e per una verifica della qualità del processo realizzativo. Vengono di seguito descritte le tipologie di prove che possono essere utilizzate durante o dopo la costruzione. Il numero e il tipo di prova dipendono dalle caratteristiche e dall'importanza dell'opera.

Alcune di tali indagini relative alle fondazioni possono fornire un utile complemento alle indagini geotecniche.

8.2.2 Indagini su fondazioni superficiali

Le prove dinamiche per le fondazioni superficiali rivestono in genere un carattere eccezionale in quanto sono generalmente limitate a terreni soffici e hanno interesse soprattutto come verifica delle ipotesi geotecniche di progetto.

Data l'atipicità della prova si dovrebbe svolgere uno studio preliminare con modello numerico al fine di individuare gli intervalli di variazione dei parametri dinamici, orientare la scelta di mezzi e le modalità di prova.

Il sistema di eccitazione, generalmente di tipo artificiale (per esempio la vibrodina), deve essere rigidamente fissato alle strutture di fondazione e posizionato in maniera da eccitare il moto di vibrazione nelle direzioni ritenute di specifico interesse. Il numero e la disposizione dei sensori sono correlati alle finalità di indagine.

8.2.3 Indagini su pali e/o diaframmi

Le prove dinamiche su pali (singoli o in gruppo) sono finalizzate a valutare la correttezza delle ipotesi assunte in fase di progettazione e a rilevare la variazione delle proprietà del suolo e delle caratteristiche della fondazione. Tali variazioni dovrebbero essere conosciute particolarmente per strutture estese soggette a carichi laterali di tipo sismico. Inoltre, tali prove hanno l'obiettivo di integrare la conoscenza del quadro geotecnico generale e infine, per scopi diagnostici, sono utili a un controllo della realizzazione. I diaframmi devono essere considerati in quanto essi possono essere realizzati con pannelli di calcestruzzo armato gettati in opera o prefabbricati. Deve essere in particolare tenuta in considerazione l'entità della partecipazione alla risposta dinamica quando si eseguono prove a diverse e successive fasi di costruzione.

I parametri dinamici caratteristici da identificare per gli scopi sopra enunciati sono: frequenze proprie, smorzamenti e curve di ammettenza. Generalmente tali tipi di prove sono condotti mediante vibrazioni forzate, applicando in sommità al palo (o gruppo di pali) forze sinusoidali o impulsive. Si rimanda ai casi d'uso D.4, D.5 e D.6 dell'Appendice D per le specifiche della prova e la determinazione dei parametri dinamici di interesse.

Ulteriori tecniche di prova sono descritte nella ASTM 4945.

8.2.4 Comportamento dinamico verticale

8.2.4.1 Prove dinamiche su un singolo palo

Le prove possono essere condotte su uno o più pali campioni a seconda delle dimensioni e importanza dell'opera e dell'omogeneità o meno del suolo, realizzate nelle adiacenze della fondazione.

Le prove dinamiche verticali hanno l'obiettivo di determinare la frequenza e lo smorzamento modale nella direzione verticale del palo e quindi, attraverso opportune elaborazioni, informazioni sulle caratteristiche geometriche del palo e sul modo di sviluppare le forze di resistenza. Si deve prestare attenzione per garantire che solo forze verticali siano applicate al palo, specialmente se una parte di esso risulta fuori terra.

La testa del palo deve essere opportunamente predisposta per la collocazione e l'ancoraggio dell'attrezzatura di eccitazione che deve essere in grado di generare forze di elevata intensità (vibrodine o mezzi impulsivi adeguati) nonché per il fissaggio degli strumenti di misura.

Nel caso in cui si utilizzino eccitatori di grandi dimensioni e molto pesanti, devono essere presi in considerazione gli effetti della massa aggiuntiva applicata. A basse frequenze potrebbe essere difficile ottenere uno spostamento dinamico sufficiente per produrre valori di smorzamento realistici. A frequenze più elevate i valori di smorzamento possono essere dipendenti dalla frequenza.

8.2.4.2 Prove dinamiche su un gruppo di pali

Le prove dinamiche su un gruppo di pali devono essere condotte in parallelo alle prove sul singolo palo per mettere in evidenza il comportamento dinamico verticale di gruppo e ottenere una verifica del modello di calcolo adottato per il blocco di fondazione. Il blocco di fondazione deve permettere il montaggio dell'eccitatore in modo da minimizzare movimenti e rotazioni rigide (*rocking*), tenendo conto della geometria della fondazione e della disposizione dei pali.

8.2.5 Comportamento dinamico orizzontale

8.2.5.1 Generalità

Le prove dinamiche orizzontali sono di particolare rilevanza per la verifica del modello geotecnico utilizzato nel calcolo della risposta sismica. La sequenza di una prova su un singolo palo dovrebbe tenere conto dei potenziali effetti sul funzionamento in esercizio del palo stesso. Si devono prendere in considerazione gli spostamenti da generare nel corso della prova nel caso in cui da progetto siano previste non-linearità della risposta e smorzamenti dipendenti dalle deformazioni.

8.2.5.2 Prove dinamiche su un singolo palo

Le prove con eccitazione orizzontale possono fornire informazioni utili sull'interazione fra palo e terreno, in particolare la curva di ammettenza dinamica, le frequenze modali e lo smorzamento.

In relazione a possibili alterazioni del contatto palo-terreno negli strati superficiali, indotte dalle prove orizzontali, tale tipo di prova deve essere effettuato prevalentemente su pali campione e si deve, caso per caso, valutare l'opportunità che le prove orizzontali precedano o seguano quelle verticali.

Il palo campione selezionato per la prova deve essere rappresentativo dell'elemento strutturale completo. Quando un palo viene sottoposto a prova con una lunghezza libera al di sopra del livello del terreno, si dovrebbe prevedere un riempimento da effettuarsi prima del completamento della costruzione. Nel caso in cui il palo sia dotato di plinto terminale, i suoi effetti devono essere presi in considerazione.

Al fine di indagare la risposta alle basse frequenze, potrebbe essere necessario installare un blocco o un gruppo di pali di reazione e qualsiasi effetto di prossimità deve essere esaminato. Dove sono richiesti grandi spostamenti a frequenze elevate, è probabile che sia necessaria la predisposizione di un attuatore servo-idraulico in grado di gestire grandi flussi di fluido idraulico.

I pali singoli di grande diametro, ovvero i cassoni o i diaframmi, sono generalmente difficili da eccitare. Di solito non è possibile mobilitare spostamenti sufficienti per riprodurre la risposta che ci si attende in condizioni di esercizio estreme e qualsiasi estrapolazione dovrebbe basarsi su teorie geotecniche consolidate.

8.2.5.3 Prove dinamiche su un gruppo di pali

Le prove orizzontali su un blocco di fondazione supportato da un gruppo di pali o da un diaframma possono essere progettate utilizzando gli stessi criteri per le prove verticali, per la determinazione delle frequenze modali e dello smorzamento.

L'attrezzatura di prova deve essere in grado di eccitare adeguatamente gli spostamenti orizzontali del sistema costituito dall'interazione tra gruppo di pali e suolo. Nel caso di pali con plinti di testa e/o elementi di fondazione di grandi dimensioni, potrebbe non essere praticabile il raggiungimento di spostamenti e deformazioni che si avvicinino agli stati limite di esercizio e le conclusioni sul comportamento correlato alla deformazione dovranno essere estrapolate dalla prova su palo singolo. L'apparecchiatura di misura deve essere in grado di rilevare spostamenti e rotazioni del blocco di

calcestruzzo, poiché il movimento globale può essere influenzato anche dal comportamento verticale dei pali.

I risultati delle indagini sul blocco di fondazione possono essere confrontati con le prove su singolo palo, con l'obiettivo di stabilire il comportamento del gruppo di pali in condizione di piccoli spostamenti. Fonti esplosive "stand-off" possono essere utilizzate per studiare questi aspetti. Se durante la prova sul singolo palo si verifica un cedimento eccessivo oltre il limite statico di progetto, si devono prendere le dovute precauzioni nell'esecuzione delle prove sul gruppo di pali.

8.2.6 Indagini su strutture di sostegno

Le prove vibrazionali sulle strutture di sostegno (pile e spalle) rivestono particolare importanza quando i manufatti sono ubicati in zone sismiche e quando fenomeni di instabilità delle pile possono acquistare importanza. Possono essere adottate (preferibilmente in combinazione con altre tecniche di indagine) per la valutazione di fenomeni di erosione e/o scalzamento alla base e per indagare l'interazione suolo-struttura (*soil-structure interaction* - SSI). I parametri dinamici che si devono identificare sono: frequenze proprie, smorzamenti, forme modali e funzioni di risposta in frequenza. In ogni caso si dovrebbero eseguire analisi numeriche preliminari anche al fine di valutare l'importanza della deformabilità del suolo sul comportamento dinamico del sistema analizzato e per la successiva calibrazione dei modelli interpretativi del fenomeno oggetto di studio.

Per quanto riguarda le tecniche di eccitazione, nella maggior parte dei casi possono rivelarsi sufficienti le eccitazioni ambientali (quali quelle indotte dal vento) o eccitazioni artificiali di tipo impulsivo, mentre nel caso di pile più rigide si dovrebbe fare ricorso a forzanti orizzontali fornite da vibrodine il cui campo di impiego copre solitamente le frequenze di maggior interesse. In relazione alle finalità dell'indagine, possono essere utilizzate anche eccitazioni di tipo impulsivo.

Si rimanda ai casi d'uso di cui ai punti D.4, D.5, D.6 e D.7 dell'Appendice D per le specifiche della prova e la determinazione dei parametri dinamici di interesse.

Per quanto concerne le spalle, le prove dinamiche possono acquistare interesse nel caso di spalle aventi strutture particolari e/o specificamente se relative a ponti e viadotti in zone sismiche. Le prove devono essere effettuate a terrapieno ultimato stante l'importante ruolo che il terreno a tergo svolge nel comportamento statico e dinamico della spalla.

8.3 Indagini e controlli sull'opera ultimata

8.3.1 Generalità

Prima della messa in esercizio dell'opera possono essere eseguiti indagini e controlli che rappresentano validi contributi alla fase di collaudo in senso tradizionale (verifica che la risposta strutturale anche in campo dinamico sia in linea con quella attesa per via di calcolo) e forniscono, al tempo stesso, il quadro iniziale di riferimento con cui confrontare i risultati di indagini e monitoraggi periodici o permanenti successivi.

8.3.2 Comportamento globale dell'opera

8.3.2.1 Generalità

A opera ultimata è possibile valutarne il comportamento dinamico attraverso l'eccitazione dell'impalcato inserito nell'effettivo contesto strutturale (per esempio, la continuità o meno tra campata e campata, le reali caratteristiche dei vincoli, le tipologie degli apparecchi di sostegno e di ritegno degli impalcati).

In generale l'indagine prevede l'installazione di una rete di sensori (per esempio, velocimetrici o accelerometrici) in grado, per numero e disposizione, di descrivere in modo adeguato le caratteristiche modali e i parametri che si intendono individuare (frequenze proprie, smorzamenti, forme modali e funzioni di risposta in frequenza).

In tal senso, per l'identificazione sia dei modi flessionali sia di quelli torsionali dell'impalcato si devono impiegare più accelerometri nella stessa sezione (per esempio almeno due installati in direzione verticale).

Il numero di posizioni da strumentare (eventualmente ridotto in base alle simmetrie strutturali) deve essere scelto in relazione alla geometria della forma attesa dei modi flessionali e torsionali di interesse.

Qualora si desiderino individuare anche modi principali caratterizzati da deformazioni del profilo trasversale delle sezioni, si deve disporre nella stessa sezione di un numero adeguato di sensori.

Per lo studio dei moti verticali e trasversali è in genere sufficiente un'eccitazione verticale eccentrica rispetto all'asse dell'impalcato. Per lo studio del comportamento d'assieme orizzontale, caratterizzato da frequenze basse in cui si collocano le componenti più significative dei moti sismici si dovrebbe ricorrere a eccitazioni orizzontali applicate all'impalcato stesso o in sommità alle pile.

Si rimanda ai casi d'uso di cui ai punti D.4, D.5, D.6 e D.7 dell'Appendice D per le specifiche della prova e la determinazione dei parametri dinamici di interesse.

8.3.2.2 Vibrazioni ambientali

Le prove di vibrazione di tipo ambientale rappresentano lo strumento più utilizzato per l'individuazione del comportamento dinamico globale dell'impalcato con valutazione delle funzioni di densità spettrale della risposta e dei parametri modali (frequenze naturali, smorzamenti e forme). Deve essere tenuto presente che:

- le vibrazioni ambientali causate dal vento costituiscono una tecnica di indagine particolarmente utile per strutture deformabili e snelle, caratterizzate da basse frequenze naturali di vibrazione;
- 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.

L'impiego della tecnica di analisi delle vibrazioni indotte dal traffico può essere utilizzato così come è indicato nel punto 7.3.5 e nel caso d'uso di cui al punto D.3 dell'Appendice D.

8.3.2.3 Vibrazioni forzate artificiali

Le prove di vibrazione forzata artificiale rappresentano uno strumento utile a integrazione delle prove di vibrazione ambientale nel caso in cui l'opera oggetto di misura sia particolarmente rigida e le fonti di eccitazione non siano in grado di attivare i modi propri strutturali nell'intervallo di frequenze di interesse.

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 gli aspetti operativi connessi con l'installazione.

Per il primo aspetto e in relazione alla complessità dell'opera e a numero e tipo dei modi che si intende indagare, può non essere sufficiente una sola posizione di applicazione dell'input.

Per gli aspetti operativi deve essere considerato il fatto che si devono collegare i sistemi di eccitazione rigidamente all'impalcato (utilizzando per esempio tiranti passanti nelle solette o tasselli ad espansione) evitando che vengano posizionate in zone di particolare flessibilità trasversale dell'impalcato. In tal senso possono essere scelte sezioni con presenza di travi o diaframmi trasversali, oppure posizioni in corrispondenza di travi principali (per le sezioni aperte) o di pareti (per le sezioni chiuse).

8.3.3 Comportamento locale dell'impalcato e di altre parti strutturali

In parallelo alle indagini di caratterizzazione dinamica dell'impalcato illustrate nel punto 8.2.1 può risultare utile l'esame del comportamento locale o di dettaglio di parti dell'impalcato quali per esempio sbalzi, campi di soletta, o di altre parti strutturali quali i sostegni o i ritegni degli impalcato, alcune sezioni delle opere di sostegno (spalle e pile).

Questo tipo di indagine può essere per esempio applicato nel caso in cui la struttura sia interessata da stati fessurativi la cui importanza strutturale non sia facilmente valutabile, eventualmente integrando le indagini con rilievi estensimetrici.

Il tipo di strumentazione e le modalità di installazione sono studiate caso per caso in funzione del tipo di informazione sul comportamento strutturale che si vuole indagare.

8.4 Indagini e controlli periodici in esercizio

Durante l'esercizio dell'opera si dovrebbero prevedere indagini e controlli periodici che rappresentano validi contributi per la gestione dell'opera, in quanto capaci di fornire indicazioni sulla durabilità e di suggerire eventuali interventi manutentivi in relazione ai fenomeni di degrado in atto.

Per la valutazione in esercizio del comportamento dinamico dell'opera valgono le stesse osservazioni generali già riportate nel punto 8.2 e nei casi d'uso di cui ai punti D.3, D.4, D.5, D.6 e D.7 dell'Appendice D, con ulteriori vincoli legati al fatto che le indagini in questa fase devono, senza perdere di efficacia tecnica, comportare minimi impatti con l'esercizio dell'infrastruttura.

8.5 Monitoraggio permanente

8.5.1 Generalità

Per strutture complesse o in situazioni critiche il monitoraggio con strumentazione permanentemente installata e acquisizione in continuo dei dati costituisce lo strumento più efficace di controllo in esercizio dell'opera.

Va inoltre tenuto presente il vantaggio di disporre di informazioni continue e in tempo reale dell'evoluzione dello stato dell'opera.

In generale i sistemi di monitoraggio devono poter fornire informazioni anche sulle condizioni ambientali ritenute importanti ai fini dei parametri strutturali monitorati (per esempio, temperature e umidità dell'aria e delle opere, piovosità, irraggiamento solare, vento).

È possibile ottimizzare l'impiego della strumentazione prevedendo l'installazione di sistemi di monitoraggio nei quali sono integrate più funzioni.

Per esempio, con la stessa rete di sensori, è possibile monitorare sia le vibrazioni indotte dal traffico sia quelle prodotte da meno probabili sismi. In questo caso, si deve prevedere un sistema che operi con due campi di misura.

Oltre al rilievo dinamico, il sistema svolge solitamente anche funzioni di monitoraggio statico delle strutture e geotecnico. Le caratteristiche polifunzionali possono consentire, per esempio, l'estensione al monitoraggio meteorologico e al rilievo di numero, tipo e velocità dei veicoli in transito.

La progettazione, l'installazione e la gestione del sistema di monitoraggio dinamico devono tenere conto delle indicazioni fornite nella UNI/TR 11634. La valutazione della condizione strutturale in base ai risultati acquisiti attraverso il monitoraggio può essere condotta in base a quanto esposto nel punto 11.

8.5.2 Monitoraggio in continuo dei parametri modali

Il monitoraggio in continuo del comportamento dinamico dell'opera e dei parametri modali permette di:

- identificare il danno;
- valutare l'effetto di interventi e/o modifiche strutturali;
- valutare la sicurezza di ponti e viadotti danneggiati in seguito a eventi eccezionali.

Si rimanda ai casi d'uso di cui ai punti D.4, D.5, D.6 e D.7 dell'Appendice D per le specifiche della prova e la determinazione dei parametri dinamici di interesse.

8.5.3 Monitoraggio delle vibrazioni indotte dal traffico

Oltre a costituire una fonte di eccitazione fondamentale per il monitoraggio delle caratteristiche dinamiche, le vibrazioni indotte dal traffico possono essere causa, per esempio, di perdita di comfort nei ponti pedonali o misti, di aggravio dei danneggiamenti superficiali nelle strutture di cemento armato semplice o precompresso e di fenomeni di fatica nelle strutture di acciaio. Il monitoraggio di tali vibrazioni va condotto con le tecniche e le modalità descritte nel punto 7.3.4., tenendo presente la grandezza fisica e lo specifico campo di frequenze di interesse. A tali fini, per quanto applicabili, si può fare riferimento alla UNI 9916, specifiche per gli edifici.

Si rimanda al caso d'uso di cui al punto D.3 dell'Appendice D per le specifiche della prova e la determinazione dei parametri dinamici di interesse.

8.5.4 Monitoraggio sismico

Il monitoraggio sismico può essere previsto per opere ubicate in aree soggette a rischio sismico.

Il monitoraggio, attraverso un'opportuna rete di sensori installati sull'opera e sul terreno, ha lo scopo di fornire informazioni anche in tempo reale sulla risposta a eventi sismici significativi. Tali informazioni costituiscono elementi fondamentali per valutare in tempi ristretti la possibilità o meno di mantenere l'opera in esercizio.

Questo aspetto è rilevante nelle fasi di gestione dell'emergenza, soprattutto in quei casi in cui l'opera è presente su un'infrastruttura (stradale o ferroviaria) considerata strategica.

Si rimanda al caso d'uso di cui al punto D.8 dell'Appendice D per le specifiche della strumentazione e la determinazione dei parametri dinamici di interesse.

8.5.5 Monitoraggio degli effetti del vento

Il monitoraggio degli effetti del vento dovrebbe essere adempiuto nei casi particolari in cui l'eccitazione dinamica del vento rappresenti un aspetto importante per l'opera (ponti sospesi e viadotti con opere di sostegno elevate), e in quelle aree ove l'attività eolica sia significativamente presente. In tal caso, deve essere predisposta una rete di sensori anemometrici di caratteristiche opportune.

Le vibrazioni indotte dagli effetti dinamici del vento causate da fluttuazioni della pressione dell'aria o da variazioni non stazionarie della pressione dell'aria dipendono dalle caratteristiche del vento. I parametri che si devono determinare attraverso le misure per tener conto degli effetti del vento sono:

- deviazione standard dell'azione del vento;
- densità spettrale di potenza della velocità del vento;
- scala spaziale della variazione casuale;

- correlazione spaziale della velocità del vento;
- angolo verticale del vento;
- distribuzione di frequenza della velocità.

9 ANALISI DEI DATI E METODI DI IDENTIFICAZIONE STRUTTURALE

9.1 Generalità

L'identificazione strutturale ha l'obiettivo di fornire una stima quanto più possibile attendibile del modello numerico di una struttura, nella fattispecie del ponte, basandosi su dati sperimentali, quali i parametri modali (frequenze modali, forme modali associate e rapporti di smorzamento).

I parametri dinamici del ponte risultanti dal processo di identificazione possono essere utilizzati per il confronto con le previsioni progettuali e, qualora le misure dinamiche siano ripetute nel tempo, per la determinazione delle distribuzioni statistiche della loro variazione, ovvero per la calibrazione al comportamento della struttura reale di modelli numerici, per esempio a elementi finiti (*digital twins*), utilizzabili ai fini della valutazione dello stato di conservazione dell'opera. Maggiori informazioni in proposito possono trovarsi nella UNI/TR 11634.

9.2 Dominio e analisi dei dati

L'analisi dei dati può essere condotta nel dominio del tempo, nel dominio delle frequenze, o nel dominio combinato tempo-frequenza, a seconda del problema. Per la scelta dei metodi di analisi dei dati si dovrebbe fare riferimento alla letteratura tecnico-scientifica più aggiornata. Nei successivi punti da 9.3 a 9.6 sono riportate alcune definizioni e criteri di base per l'effettuazione del processo nei casi più semplici, secondo la ISO 18649. Ulteriori informazioni sono presentate nelle Appendici C e D alla presente norma.

9.3 Influenza dei parametri dell'acquisizione

9.3.1 Generalità

Come specificato al punto 6.2.4 i dati ottenuti dalle prove sperimentali in forma di segnale analogico devono essere digitalizzati mediante un convertitore analogico-digitale (A/D). La scelta della frequenza di campionamento o dell'intervallo temporale da utilizzare nella procedura di digitalizzazione è determinante: si deve conservare dal segnale analogico l'accuratezza richiesta in funzione del caso d'uso (vedere Appendice D). Dovrebbero inoltre essere considerati i problemi descritti nei punti dal 9.3.2 al 9.3.5.

9.3.2 Errore nella conversione A/D

La frequenza di campionamento del convertitore A/D dovrebbe essere scelta in base a una risoluzione coerente con il campo di frequenze sperimentali di interesse. Inoltre, si dovrebbe scegliere la risoluzione del convertitore secondo le indicazioni dell'Appendice D.

9.3.3 Errata identificazione dei valori di picco

Sia nel dominio del tempo che delle frequenze c'è la possibilità che i reali valori di picco possano non venire identificati. I parametri di acquisizione, intervallo di acquisizione e lunghezza della registrazione devono essere determinati in modo adeguato ai campi di frequenza e di smorzamento attesi.

9.3.4 Inadeguatezza della FFT (Fast Fourier Transform)

Nella trasformata di Fourier dei dati digitalizzati la frequenza più alta identificabile è limitata dall'intervallo di campionamento, Δt . In particolare, questa frequenza limite è chiamata frequenza di Nyquist ed è espressa come $f_N = \frac{1}{2\Delta t}$. La risoluzione in frequenza della trasformata di Fourier Δf dipende invece dall'inverso del tempo totale di acquisizione T attraverso la relazione $\Delta f = \frac{1}{T}$.

9.3.5 Saturazione del segnale

Una non adeguata scelta delle caratteristiche del sensore, del sistema di acquisizione e del campo di misura può causare la saturazione del segnale che, a sua volta, causa la perdita del picco di ampiezza e la distorsione della FFT. Raccomandazioni per una corretta scelta di tali parametri sono fornite nell'Appendice D.

9.4 Identificazione delle caratteristiche della vibrazione nel dominio del tempo

9.4.1 Generalità

Si riportano, di seguito, delle proposte metodologiche di base per l'analisi dei dati nel dominio del tempo. Tuttavia, la presente norma consente l'applicazione di metodologie di elaborazione più raffinate, purché adeguatamente validate nell'ambito della comunità scientifica internazionale. La scelta della metodologia di analisi più appropriata in relazione alla struttura oggetto di prova è decisa dall'ingegnere e deve essere opportunamente motivata.

9.4.2 Identificazione delle caratteristiche del sistema

Per determinare le caratteristiche vibrazionali di un sistema, devono essere identificate le frequenze naturali, le forme modali e i coefficienti di smorzamento. I coefficienti di smorzamento si dovrebbero identificare nel dominio del tempo. In presenza di non linearità e quando in generale la risposta dipende in maniera significativa dall'ampiezza della vibrazione, si dovrebbe condurre l'analisi nel dominio del tempo utilizzando appropriati modelli di interpretazione.

Per una corretta identificazione delle caratteristiche del sistema è possibile considerare metodi a singolo grado di libertà, eventualmente applicando opportuni filtri per isolare le risposte modali, solo nei casi in cui la struttura sia caratterizzata da modi ben separati. In presenza di modi vicini, invece, si deve fare ricorso a metodi a molteplici gradi di libertà al fine di pervenire a una stima affidabile dei parametri modali, in particolare forme modali e rapporti di smorzamento.

9.4.3 Estrazione dei parametri di un singolo modo

Le misure sperimentali comprendono generalmente più modi di vibrare e è difficile identificare accuratamente i parametri modali nel dominio del tempo. Quando possibile, dati su modi singoli dovrebbero essere estratti dalle misure sperimentali. I parametri di un singolo modo possono essere estratti nel dominio del tempo mediante filtri passa-basso, passa-alto o passa-banda, a seconda delle circostanze.

9.4.4 Frequenze naturali

L'identificazione della frequenza naturale di un singolo modo a partire dalla storia temporale del segnale può considerare il periodo di tempo tra:

- i picchi in ampiezza della risposta;
- gli attraversamenti dello zero (zero-crossing).

Se il ponte è dotato di dispositivi di isolamento oppure se gli appoggi o altre componenti del ponte hanno una rigidità dipendente dall'ampiezza, le frequenze naturali di solito variano con l'ampiezza degli spostamenti. In questo caso l'interpretazione della prova deve essere effettuata con metodi idonei (non-lineari).

9.4.5 Modi di vibrare

Se lo smorzamento è piccolo e può essere considerata valida l'ipotesi di smorzamento proporzionale, il vettore spostamento corrispondente al modo di vibrare non dipende dal tempo. In questo caso, il modo di vibrare può essere ottenuto graficando le corrispondenti ampiezze normalizzate. Nel caso in cui il ponte sia dotato di dissipatori, le caratteristiche della vibrazione possono presentare uno smorzamento non proporzionale; pertanto, il modo misurato potrebbe essere complesso e mostrare uno scostamento di fase tra le componenti; la deformata potrebbe inoltre variare nel tempo anche all'interno di un singolo periodo di vibrazione. In questo caso l'interpretazione della prova deve essere effettuata con metodi idonei.

9.4.6 Smorzamento

Il coefficiente di smorzamento ζ può essere identificato a partire dalla vibrazione libera secondo un singolo modo (vedere Figura 1). Il decremento logaritmico δ si ottiene da:

$$\delta = \ln \frac{x_{i-1}}{x_i}$$

e il coefficiente di smorzamento è dato da:

$$\zeta = \frac{\delta}{2\pi}$$

I coefficienti di smorzamento misurati possono variare a seconda dell'effetto della vibrazione transitoria. Pertanto, essi dovrebbero essere calcolati come media dei valori estratti da diverse porzioni del segnale di diversa ampiezza. Per l'identificazione del coefficiente di smorzamento può essere utilizzato il metodo di approssimazione ai minimi quadrati della curva non lineare di decremento dei picchi.

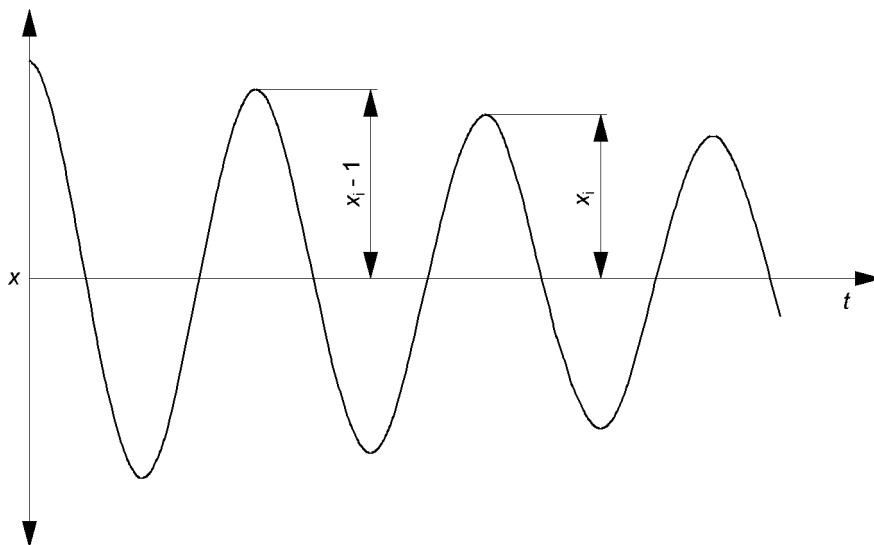


Figura 1 – Identificazione del coefficiente di smorzamento nel dominio del tempo

9.4.7 Identificazione delle caratteristiche della vibrazione con modi ravvicinati

Nelle grandi strutture con una varietà di tipologie strutturali, ci possono essere modi con frequenze ravvicinate, per esempio:

- ponti sospesi: il primo modo simmetrico è tipicamente vicino al primo modo antisimmetrico a seconda del rapporto freccia-luce della campata;
- ponti strallati: nei ponti strallati con cavi multipli, spesso si manifestano frequenze ravvicinate tra la vibrazione dell'intero sistema e quella del sistema dei cavi;
- ponti con sistema di smorzamento a massa accordata (*tuned mass damper*): in queste strutture si verifica il fenomeno del battimento per cui è difficile identificare le caratteristiche della vibrazione.

In questi casi si dovrebbero utilizzare metodi di identificazione nel dominio del tempo o nel dominio delle frequenze estesi a trattare i modi ravvicinati.

9.5 Identificazione delle caratteristiche della vibrazione nel dominio delle frequenze

Il presente punto riporta delle proposte metodologiche di base per l'analisi dei dati nel dominio delle frequenze. Tuttavia, la presente norma consente l'applicazione di metodologie di elaborazione più raffinate, purché adeguatamente validate nell'ambito della comunità scientifica internazionale. La scelta della metodologia di analisi più appropriata in relazione alla struttura oggetto di prova è decisa dall'ingegnere e deve essere opportunamente motivata.

L'analisi nel dominio delle frequenze consente di ottenere diversi vantaggi, fra cui:

- le frequenze sono facilmente identificabili nella funzione di trasferimento e nello spettro di potenza;
- i parametri modali possono essere identificati usando tecniche largamente disponibili e consolidate;
- l'analisi statistica può essere applicata facilmente assumendo un processo stazionario. In ogni caso, gli effetti non stazionari (impulsivi) della vibrazione devono essere attentamente considerati per estrarre i parametri modali.

D'altra parte, ci sono anche degli svantaggi.

Nel caso di sistemi non lineari o con caratteristiche dipendenti dal tempo l'analisi deve essere condotta mediante l'analisi spettrale non stazionaria.

9.6 Identificazione strutturale mediante analisi inversa

Nell'ambito della teoria dell'identificazione dei sistemi applicata all'identificazione strutturale viene individuato un modello matematico in maniera da correlare l'eccitazione (input) con la risposta vibrazionale (output). I parametri del modello matematico possono essere determinati minimizzando una funzione obiettivo che dipende dall'errore tra la risposta del modello matematico e quella della struttura reale, ed eventualmente dalla conoscenza dei parametri a priori. Le matrici caratteristiche sono definite come le matrici dei coefficienti delle equazioni che governano il moto di un sistema a più gradi di libertà come la matrice di massa, la matrice di smorzamento e la matrice di rigidità. I parametri modali sono individuati usando l'analisi agli autovalori complessi su queste equazioni. Al fine di valutare la qualità del modello si deve stimare l'incertezza dei parametri identificati.

Per i modi con frequenza più elevata devono essere presi molti punti di misura per ricavare la forma modale. L'applicazione dell'identificazione strutturale mediante l'analisi inversa può essere utilizzata per individuare le caratteristiche della vibrazione (parametri modali) a partire da un numero più limitato di punti di misura. Per valutare l'accuratezza dei parametri individuati, può essere utilizzata anche l'analisi della funzione di errore stocastico.

Il punto D.7 fornisce informazioni con cui può essere condotto il processo di identificazione in funzione del contesto operativo. Altre informazioni sono contenute nella UNI/TR 11634.

10 MODELLAZIONE DEI PONTI E DELL'AMBIENTE CIRCOSTANTE

10.1 Modellazione di strutture da ponte

10.1.1 Generalità

La progettazione della campagna di prove dinamiche, l'elaborazione e l'interpretazione dei dati possono richiedere la modellazione della risposta dinamica del ponte in base ai casi d'uso riportati nell'Appendice D. Il presente punto fornisce alcune indicazioni per lo sviluppo di tali modelli con riferimento alle diverse tipologie dei ponti e alle condizioni di sollecitazione che si intendono studiare.

Un ponte è una struttura tridimensionale che ha travi, piastre, cavi, pile, fondazioni e altri elementi. Per modellare questi elementi geometrici devono essere considerate le caratteristiche strutturali e dei materiali che li compongono. Generalmente, si dovrebbe utilizzare nell'analisi un modello appropriato e dettagliato. Compatibilmente con il problema che deve essere modellato, possono essere utilizzati modelli basati sulla teoria della trave e delle piastre. Nell'analisi dinamica condotta usando un metodo agli elementi finiti (FEM), sono disponibili diversi metodi con cui modellare la massa della struttura come, per esempio, modelli a masse concentrate o distribuite.

Ai fini della modellazione per i suddetti scopi, i ponti possono essere classificati nelle seguenti tipologie:

- ponti a travata (punto 4.2.2.1 lettere a), b), c), d));
- ponti a struttura reticolare (punto 4.2.2.1 lettera h));
- ponti a telaio (punto 4.2.2.1 lettera e));
- ponti ad arco (punto 4.2.2.1 lettere f) e g));
- ponti sospesi (punto 4.2.2.1 lettera i));

- ponti strallati (punto 4.2.2.1 lettera j)).

Questi ponti sono solitamente supportati da pile e spalle per trasferire le forze al terreno. Se la larghezza del ponte è piccola se comparata con la sua lunghezza, nell'analisi dinamica la struttura viene modellata usando elementi trave bidimensionali o tridimensionali. La rigidità assiale, flessionale e torsionale di quegli elementi deve essere considerata nell'analisi. Ulteriori informazioni per la modellazione di differenti tipologie di ponte sono presentate nei punti da 10.1.2 a 10.1.6.

10.1.2 Ponti a travata

I ponti a travata consistono nei casi più comuni in travi principali a sezione aperta o chiusa, e da traversi che collegano le travi principali. Se la larghezza del ponte è piccola rispetto alla lunghezza della campata, il ponte può essere modellato con elementi trave considerando le vibrazioni flessionali. Ove rilevante, come nel caso di travi curve, deve essere considerato l'effetto accoppiato delle vibrazioni flessionali e torsionali.

10.1.3 Ponti a struttura reticolare

I ponti a struttura reticolare consistono in elementi trave tridimensionali in cui le connessioni tra gli elementi sono considerate delle cerniere in modo tale da considerare solo la deformazione assiale dell'elemento. I ponti a struttura reticolare hanno di solito molti elementi: nel modello numerico per l'analisi dinamica è possibile, per esempio per eliminare i modi locali ove non di interesse, ridurre il numero di gradi di libertà. Per semplificare, si dovrebbe per esempio sostituire una struttura tridimensionale a sviluppo lineare con semplici elementi trave di equivalenti massa e rigidità assiale, flessionale, tagliante e torsionale.

10.1.4 Ponti telaio

La deformabilità assiale di una membratura di un ponte telaio dovrebbe essere considerata. Le deformazioni fuori del piano e torsionale devono essere considerate nell'analisi tridimensionale della risposta dinamica. Se un ponte telaio è supportato da un terreno cedevole, gli effetti delle reali condizioni di vincolo devono essere considerate nel modello numerico. Le condizioni di vincolo possono contribuire allo smorzamento, quindi ogni variazione del terreno e dell'ambiente circostante deve essere appropriatamente considerata.

10.1.5 Ponti ad arco

Nella modellazione dei ponti ad arco si dovrebbe impiegare l'approssimazione poligonale usando elementi rettilinei. L'effetto della connessione tra l'arco (inclusa la corda inferiore) e gli elementi verticali di irrigidimento viene considerato, a seconda del problema, come una cerniera o un giunto rigido. La non linearità geometrica delle membrature ad arco dovrebbe essere considerata in alcuni casi; gli sforzi e gli spostamenti sono quindi differenti dai risultati ottenuti mediante la teoria delle piccole deformazioni. Se la campata dell'arco è corta, la teoria delle piccole deformazioni è applicabile.

10.1.6 Ponti sospesi

Il comportamento vibrazionale dei ponti sospesi è considerato in due sistemi a seconda del problema da risolvere. Un sistema consiste nella combinazione di cavi, travi di irrigidimento e tiranti verticali; l'altro è il sistema completo che include la torre, la pila, la fondazione e l'ambiente circostante. Il primo è usato soprattutto per l'analisi delle prestazioni in caso di vento e l'analisi della risposta dinamica sotto carichi da traffico; il secondo è usato principalmente per studiare la risposta durante un sisma. I cavi e gli elementi strutturali delle travi di irrigidimento hanno differenti caratteristiche vibrazionali. Quindi il comportamento dinamico è complicato e il sistema ha effetti di accoppiamento tra i modi verticali e torsionali. Di solito è impiegata l'analisi in grandi spostamenti per modellare questi ponti.

10.1.7 Ponti strallati

Questi ponti consistono in torri, cavi inclinati, travi di irrigidimento e sottostrutture. Gli elementi hanno differenti caratteristiche vibrazionali e si manifestano vibrazioni accoppiate. A volte le vibrazioni accoppiate tra cavi e travi sono significative. I modi a elevata frequenza hanno significativi effetti di accoppiamento tra loro. Si dovrebbe utilizzare la modellazione tridimensionale. Per lo studio del comportamento dinamico in caso di vento è possibile applicare una modellazione semplificata.

10.2 Modellazione dei carichi da traffico

10.2.1 Modellazione di veicoli

Nell'analisi delle vibrazioni accoppiate tra il ponte e i veicoli sono disponibili numerosi metodi di modellazione dei veicoli. A seconda del problema da risolvere, per la modellazione dei veicoli sono usati modelli a un grado di libertà (1-DOF), due gradi di libertà (2-DOF) e a più gradi di libertà (M-DOF). La modellazione dei veicoli dovrebbe essere applicata per allineare le misurazioni con la simulazione numerica. Deve essere anche considerato l'effetto di una serie continua di veicoli se si considera l'effetto di accoppiamento. Se viene considerato l'effetto del traffico continuo, l'effetto dell'amplificazione dinamica nella simulazione numerica si riduce rispetto ai risultati ottenuti per un modello a un veicolo soltanto. Anche la distribuzione delle distanze tra i veicoli è un fattore che deve essere considerato.

Per la modellazione di un veicolo ferroviario può farsi riferimento a norme specifiche di settore.

10.2.2 Rugosità della superficie

Gli effetti della scabrezza della superficie del percorso dovrebbero essere considerati quando si analizzano gli effetti di accoppiamento delle vibrazioni tra il ponte, la superficie del percorso e il veicolo. Per la valutazione degli effetti di accoppiamento si può utilizzare la ISO 8608.

10.3 Modellazione della camminata umana e i suoi effetti dinamici

Per valutare le vibrazioni in esercizio delle passerelle pedonali possono essere usati sia modelli di camminata sia carichi dinamici sul ponte.

Il modo di vibrare orizzontale di un ponte pedonale di tipo sospeso è accelerato dall'effetto dall'accoppiamento tra (metà) della frequenza della camminata e la frequenza naturale del modo traslazionale orizzontale del ponte. In questo caso, il modello del carico laterale è utilizzabile per valutare questi effetti di accoppiamento¹.

10.4 Modellazione dell'azione e degli effetti del vento

La modellazione dell'azione e degli effetti del vento deve tener conto delle caratteristiche attese della risposta della struttura ed essere in grado di riprodurre i comportamenti come di seguito rappresentati:

a) Comportamento statico:

- deformazione statica indotta dalla pressione statica dell'aria;
- fenomeni instabili causati dalla pressione statica dell'aria (divergenza, instabilità orizzontale).

b) Comportamento dinamico:

¹ Per la modellazione delle azioni dinamiche dovute alla camminata umana, può farsi riferimento alla BS 5400-2 o alla Linea Guida Europea Hivoss.

- vibrazioni indotte da vortici;
- fenomeni di *galloping* e *flutter*.

Ove rilevante per gli effetti sul ponte, l'azione dinamica del vento può essere modellata attraverso i parametri indicati nel punto 8.5.5.

10.5 Effetti del terreno circostante

Nell'analisi delle vibrazioni accoppiate tra il ponte e il terreno circostante, la modellazione del terreno deve considerare le caratteristiche dello stesso, che può includere anche stratificazioni, strutture interrato e altro. Tuttavia, normalmente si utilizzano la modellazione semplificata di semispazio semi-infinito elastico uniforme oppure, qualora l'assorbimento di energia per effetto di irradiazione sia significativo, si utilizzano rigidezze e smorzatori equivalenti definiti per esempio nella UNI EN 1998-4.

11 VALUTAZIONE DEI DATI E APPLICAZIONI

11.1 Metodi e criteri di valutazione

11.1.1 Classificazione e valutazione

I dati acquisiti sono analizzati per ottenere informazioni sulle prestazioni del ponte, e sulla base di queste informazioni possono essere prese decisioni quantitative o qualitative. La valutazione dei dati di monitoraggio è rivolta allo studio della sicurezza, della diagnosi di integrità, dell'utilizzabilità e degli effetti dell'ambiente sulla struttura. Nel processo di valutazione dovrebbe essere chiarita l'affidabilità della struttura, in modo da definire opportuni standard di valutazione. In generale, come standard di valutazione vengono utilizzati valori derivanti da valutazioni ingegneristiche di tipo empirico o standardizzati oppure valori limite dei parametri di riferimento.

Vista la differenza dei valori standard in base alla situazione, essi devono essere suddivisi in categorie. In alcuni casi, la valutazione è eseguita per una combinazione di categorie. Se la valutazione è qualitativa e non quantitativa, devono essere eseguite valutazioni comparabili nel modo descritto per le seguenti quattro categorie.

- categoria 1: quando esistono valori di soglia definiti dalla legislazione. La base della valutazione è verificare se i valori monitorati superano il valore di soglia;
- categoria 2: quando esistono valori di soglia o loro campi di variazione comunque definiti a priori in base a criteri di tipo generale. La base della valutazione è confrontare i valori monitorati con questi valori o con i limiti del loro campo di variazione;
- categoria 3: quando esistono valori stimati rappresentativi della struttura in buone condizioni o assimilabili. Se non sono noti i valori limite di valutazione dalla legislazione o valori limite comunque definiti, si possono utilizzare i valori che sono stimati numericamente per il caso di struttura in buone condizioni o in condizioni analoghe. In questo caso, la base della valutazione è verificare se i valori monitorati eccedono quei valori stimati oppure se sono compresi con un errore accettabile in un intervallo di valori stimati;
- categoria 4: quando esistono dati di monitoraggio per condizioni precedenti oppure valori numerici per condizioni simili. Se sono disponibili dati di monitoraggio precedenti oppure dati per una condizione di riferimento, i valori misurati possono essere confrontati con essi per valutare quanto la struttura sia migliorata oppure si sia deteriorata.

Ulteriori indicazioni possono essere tratte dal punto A.5 della UNI/TR 11634.

11.1.2 Fattori che devono essere considerati nella valutazione

Nella valutazione dei risultati delle misure dinamiche devono essere presi in considerazione tutti i fattori di incertezza metrologici e di modello. Inoltre, devono essere adeguatamente compensati gli effetti delle condizioni ambientali sulla struttura. Il UNI/TR 11634 fornisce indicazioni sulla compensazione degli effetti della temperatura.

11.2 Valutazione durante la costruzione

Durante le fasi di costruzione di un ponte chi progetta o chi dirige i lavori può definire valori limite delle vibrazioni in funzione della gestione delle diverse fasi di realizzazione dell'opera.

Qualora le vibrazioni eccedano il limite può essere necessaria l'introduzione di ritegni provvisori o di dispositivi di smorzamento.

11.3 Valutazione di sicurezza strutturale in esercizio

11.3.1 Identificazione del danno

Se il danneggiamento aumenta in una struttura, le frequenze naturali diminuiscono e i coefficienti di smorzamento aumentano. Poiché tali cambiamenti sono piccoli, e possono essere oscurati dalle variazioni prodotte da altri fenomeni, come le variazioni termiche, è difficile identificare il danno in maniera accurata. Altre caratteristiche dinamiche come la distribuzione della densità spettrale di potenza (PSD) e i modi della deformazione (*modal strain*) possono risultare maggiormente significativi nell'identificazione del danno. Danni locali identificati mediante analisi della risposta dinamica nel tempo sono più facilmente osservabili raffittando le misure nelle parti della struttura dove la probabilità di occorrenza di danno è più elevata. Poiché la propagazione del danno è generalmente lenta, a seconda delle condizioni esterne, il monitoraggio delle caratteristiche di vibrazione a lungo termine può essere utilizzato per la valutazione dell'integrità e della salute strutturale. Si può valutare la tendenza generale al cambiamento delle caratteristiche strutturali al propagarsi del danno. Le tecniche di identificazione del danno attraverso il monitoraggio della risposta dinamica sono tuttavia ancora in fase di studio o validazione.

11.3.2 Valutazione dell'efficacia di interventi e/o modifiche strutturali

Nel caso in cui un ponte sia oggetto di interventi di riparazione e/o rinforzo o subisca modifiche strutturalmente rilevanti la misura continua delle vibrazioni prima e dopo (e, se possibile, durante) l'esecuzione degli interventi, consente di valutarne l'efficacia in termini di cambiamento della risposta dinamica. Si distinguono due casi:

- caso 1: gli interventi sono realizzati per ridurre le vibrazioni del ponte stesso. Le misurazioni consentono quindi di valutare la riduzione della vibrazione;
- caso 2: vengono effettuate misurazioni per valutare gli effetti indiretti dell'intervento, rilevando il cambiamento delle caratteristiche di vibrazione e/o i parametri modali della struttura o di parti di essa.

11.3.3 Valutazione della sicurezza di ponti in seguito a eventi eccezionali

In una situazione di emergenza dopo un terremoto, un incendio, un uragano o un'alluvione, si deve valutare la sicurezza delle infrastrutture strategiche per garantire le operazioni di soccorso e di protezione civile. In questo caso, la capacità residua dei ponti danneggiati deve essere valutata rapidamente, anche grazie ai parametri dinamici ricavati da sistemi di monitoraggio permanenti. Inoltre, dopo la riparazione di eventuali danni o la messa in sicurezza dell'opera si devono effettuare misurazioni per confermare l'efficacia degli interventi provvisori eseguiti.

11.3.4 Valutazione di condizioni di fatica

Ai fini della valutazione del danneggiamento da fatica in un ponte si deve conoscere la distribuzione statistica delle tensioni nelle posizioni critiche. Tale distribuzione può essere ottenuta indirettamente mediante misure vibrazionali nella forma di una storia temporale delle vibrazioni o direttamente mediante la misura della storia temporale delle deformazioni. Il metodo *rain flow* è usato per ottenere la distribuzione dell'intervallo di sforzo e la sua frequenza di occorrenza. La valutazione delle condizioni di fatica è condotta principalmente mediante la legge di Miner:

$$D_d = \sum_i \frac{n_i}{N_i}$$

Dove:

D_d è il danno cumulativo

n_i è il numero di cicli attuale per ciascun intervallo di tensione ($i = 1, 2, \dots, k$)

N_i è il numero limite per avere la rottura per ciascun intervallo di tensione ($i = 1, 2, \dots, k$)

NOTA N_i è ottenuto dalla norma di riferimento (per esempio, UNI EN 1993-1-9) o da specifici studi sperimentali.

Nell'analisi dei dati del monitoraggio si ottengono le distribuzioni statistiche di forze, deformazioni, tensioni, velocità, accelerazione e spostamento. Le distribuzioni di tali parametri possono essere utilizzate per la valutazione delle condizioni del ponte.

11.3.5 Sicurezza della corsa dei treni sui binari

Il criterio di sicurezza è determinato dal rischio di deragliamento di un treno in movimento. Il rischio di deragliamento è valutato principalmente usando le forze che agiscono tra i binari e le ruote. Per la prevenzione dell'instabilità del binario zavorrato, viene utilizzata anche l'accelerazione dell'impalcato del ponte. Per la valutazione di tali aspetti in base alla misura della risposta dinamica di un ponte si rimanda a norme specifiche di settore.

11.4 Valutazione del comportamento in esercizio

11.4.1 Valutazione del comportamento in esercizio di ponti stradali

Il criterio di sensibilità per il corpo umano su un marciapiede di un ponte stradale non è stato concordato a livello internazionale, ma esiste un criterio generale sulla sensibilità umana (vedere UNI 9614 e UNI ISO 2631-1). A seconda del problema, vengono misurate l'accelerazione o la velocità, le quali sono valutate mediante un confronto con il criterio.

11.4.2 Valutazione del comportamento in esercizio di ponti ferroviari

Il comportamento in esercizio di un ponte ferroviario è valutato principalmente dalla qualità del viaggio per i passeggeri. Per la valutazione di tale aspetto in base alla misura della risposta dinamica di un ponte si rimanda a norme specifiche di settore.

11.4.3 Valutazione del comportamento in esercizio di passerelle pedonali

La frequenza e l'accelerazione o la velocità della risposta misurata sono i parametri che devono essere valutati per il comportamento in esercizio delle passerelle pedonali. Il criterio di sensibilità per il corpo umano esiste inteso come un livello di vibrazione accettabile (vedere UNI 9614).

11.5 Valutazione delle vibrazioni ambientali indotte

Le vibrazioni del terreno e gli infrasuoni indotti nell'area circostante dalla presenza di un viadotto possono essere valutati mediante dati sperimentali. Le modalità di esecuzione delle misure e i limiti di vibrazione accettabili negli edifici e per il comfort del corpo umano sono forniti dalla UNI 9916 e UNI 9614, rispettivamente.

12 PRESENTAZIONE DEI RISULTATI

12.1 Premessa

L'esecuzione delle prove deve essere condotta a cura del gestore dell'opera, sulla base di un progetto redatto da un tecnico specialista. Tale progetto deve dettagliatamente descrivere:

- l'opera da analizzare;
- le finalità dell'indagine;
- le metodologie da seguire durante l'indagine (in relazione al tipo di prove da effettuarsi e, eventualmente, al trattamento delle misure e a metodi e algoritmi di identificazione strutturale);
- la dislocazione della strumentazione;
- le specifiche minime della strumentazione da utilizzare.

L'esecuzione delle prove deve inoltre essere condotta da personale qualificato secondo la UNI 11931 come indicato al punto 1.

Il rapporto di prova deve essere redatto dall'esecutore in conformità a quanto contenuto nel punto 12.3.

L'elaborazione, la validazione e la valutazione dei risultati della prova devono essere condotte a cura di un tecnico specialista incaricato da chi gestisce l'opera.

12.2 Progetto della prova

12.2.1 Descrizione dell'opera

Devono essere specificate la classificazione tipologica e d'uso dell'opera o della parte di opera da sottoporre a indagine, l'età, lo stato di conservazione e la presenza di eventuali difetti strutturali. La descrizione dell'opera deve essere approfondita fino all'illustrazione dei dettagli costruttivi e degli eventuali interventi successivi alla costruzione che possono influire sul comportamento dinamico della stessa (per esempio, giunti, appoggi e/o condizioni vincolari, presenza e tipo di scurvia, tipo di pavimentazione), compreso il loro stato di conservazione e di funzionamento.

12.2.2 Finalità dell'indagine

Devono essere citati gli obiettivi generali e specifici dell'indagine, le motivazioni che hanno fatto propendere per la scelta dell'indagine dinamica e per il tipo di indagine dinamica prescelta.

12.2.3 Metodologie di indagine e dislocazione della strumentazione

In rapporto agli obiettivi specificati in 12.2.2, devono essere descritte la natura e il tipo delle indagini da condurre; ciò deve essere effettuato in coerenza con la classificazione riportata nel punto 7.

Devono essere giustificate e commentate l'adozione, l'ubicazione e le modalità di applicazione del tipo di eccitazione forzata ovvero delle condizioni di effettuazione della prova nel caso di rilievi dinamici

mediante eccitazioni ambientali. Questa procedura deve essere attuata anche per la scelta del numero e per l'ubicazione dei punti di misura e per il tipo o i tipi di parametri misurati.

Qualora la sperimentazione sia affiancata o preceduta da analisi numeriche oppure qualora lo scopo della sperimentazione sia l'identificazione di un modello strutturale, si devono fornire indicazioni circa le (attese) corrispondenze fra simulazione e sperimentazione, evidenziando anche i limiti di applicabilità e le (attese) difficoltà di validazione del modello con particolare riferimento agli obiettivi dell'indagine.

12.2.4 Modalità di trasmissione dei dati misurati

Nel progetto deve essere specificato il formato richiesto per la trasmissione dei dati misurati al fine della loro elaborazione. Si dovrebbero utilizzare dei formati aperti.

12.3 Rapporto di prova

12.3.1 Generalità

Il rapporto di prova, da parte del laboratorio d'indagine incaricato dell'esecuzione dei rilievi, deve contenere una sintetica descrizione dell'opera, unitamente a un elenco chiaro ed esauriente delle prove o registrazioni raccolte.

Il rapporto di prova deve riportare in modo esauriente informazioni su tutti gli aspetti rilevanti dell'indagine eseguita. In particolare devono essere trattati i seguenti punti:

- le condizioni ambientali e di esercizio durante l'esecuzione della prova;
- la descrizione della strumentazione utilizzata;
- la descrizione del campo di misura;
- la conformità dei dati e la descrizione delle elaborazioni effettuate;
- i risultati delle misure.

Nel rapporto di prova deve essere specificato: la persona committente, chi gestisce l'opera, chi progetta le prove, chi esegue le prove, la data delle indagini e, ove disponibili, i riferimenti a prove e le indagini già condotte sulla stessa opera.

Si dovrebbero allegare fotografie dell'insieme e delle parti strumentate, nonché disegni planimetrici e sezioni significative e comunque pertinenti le prove.

12.3.2 Descrizione della strumentazione utilizzata e del campo di misura

Devono essere elencate le attrezzature utilizzate per effettuare le prove elencate al punto precedente. Devono essere, in particolare, precisati:

- il tipo di eccitazione;
- la marca, il modello e le prestazioni della macchina di prova eventualmente utilizzata;
- il tipo di sensori utilizzati;
- la marca, il modello e le prestazioni dei sensori di misura;
- la catena di misura, le sue caratteristiche e le sue prestazioni;
- i cablaggi;

- i certificati di taratura dei sensori.

Deve essere inoltre fornito l'elenco dei punti di eccitazione e di misura. Tali punti devono essere chiaramente identificati con lettere e/o numeri e riportati su disegni che ne consentano una chiara individuazione anche attraverso una documentazione fotografica.

Devono essere descritti nei dettagli i singoli punti di misura e di eccitazione, la preparazione degli stessi e tutte le informazioni riguardanti l'installazione del campo di prova, quali per esempio la lunghezza dei cavi utilizzati, i disturbi che si possono attendere, temperatura dell'opera all'atto della prova, variazioni termiche misurate nel breve periodo, condizioni metereologiche.

12.3.3 Qualità dei dati e descrizione delle elaborazioni

Devono essere elencate e descritte le elaborazioni effettuate a seguito di ciascuna delle prove elencate. Deve, in particolare, essere espresso un giudizio sulla congruenza dei dati rispetto alle prescrizioni e sull'adeguatezza della strumentazione impegnata con particolare riferimento al rapporto segnale/rumore e alla sensibilità dei sensori impiegati.

12.3.4 Risultati

I risultati delle misure effettuate, oltreché allegati nel formato digitale richiesto, devono essere descritti nel rapporto di prova e adeguatamente illustrati mediante grafici, tabelle e note, segnalando la presenza di eventuali anomalie.

12.3.5 Valutazione finale

I risultati delle prove possono concorrere, unitamente a quelli di altri eventuali tipi di indagine, a una valutazione complessiva sullo stato di efficienza del manufatto a opera di un tecnico specialista incaricato dalla parte responsabile per la gestione. Adeguata cautela deve essere rivolta ai confronti con i risultati di eventuali indagini precedenti, soprattutto se tali confronti sono finalizzati a un riscontro su possibili variazioni intervenute nel comportamento strutturale.

Appendice A (normativa) Eccitazione forzata artificiale

A.1 Vibrodine

Le vibrodine 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.

Per l'ampio campo di frequenze esplorabile e il notevole livello di forza che può essere generato sono fra le attrezzature più comuni per l'applicazione su strutture di modeste dimensioni.

Esistono tre tipi di vibrodine che funzionano su principi fisici differenti:

- **Meccaniche:** sono costituite essenzialmente da masse controrotanti ed eccentriche rispetto ai loro assi (o al loro asse) di rotazione; quest'ultimi sono vincolati a un telaio rigido (corpo della vibrodina) che viene fissato alla struttura. La componente della forza è perpendicolare al piano contenente gli assi di rotazione e a forma rigorosamente sinusoidale e l'intensità risulta funzione dell'eccentricità delle masse e della velocità di rotazione e quindi della frequenza. Indicativamente, il campo delle frequenze esplorabili può andare da 1 Hz a 100 Hz con ampiezza della forza generata fino a 500 kN alle frequenze più elevate.
- **Elettrodinamiche:** sono costituite essenzialmente da due corpi: un magnete (o avvolgimento) vincolato al basamento e una bobina mobile, collegata a una massa inerziale, fra loro connessi da un sistema di sospensioni. Indicativamente, il campo delle frequenze esplorabili può andare da 5 Hz a 1 000 Hz con ampiezza di forzante fino a 50 kN.
- **Idrauliche:** sono composte da un attuatore idraulico a doppio effetto al cui stelo è collegata una massa inerziale. Indicativamente, il campo delle frequenze esplorabili può andare da 0 Hz a 200 Hz con ampiezza di forzante fino a 1 000 kN.

Per le caratteristiche prestazionali ("dati di targa") delle vibrodine meccaniche, elettrodinamiche e idrauliche vedere rispettivamente i punti A.3, A.4 e A.5.

La scelta della vibrodina, in ragione delle caratteristiche prestazionali, deve essere individuata nella fase di progetto dell'indagine dinamica: in genere si dovrebbero impiegare vibrodine in grado di erogare forzanti di ampiezza elevata a frequenze contenute.

Vibrodine che operano nel campo delle alte frequenze erogando forze modeste trovano impiego soprattutto nell'indagine dell'integrità di parti strutturali e in particolare dei pali di fondazione con metodi basati sull'ammettenza meccanica.

A.2 Sistemi impulsivi

I sistemi impulsivi 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 o il rilascio di un grave appeso alla struttura, oppure mediante il transito di un autocarro che supera un adeguato ostacolo o dosso oppure con eventuali altre tecnologie. Il problema posto dall'eccitazione impulsiva è quello di fornire sufficiente energia per eccitare, in modo significativo, la struttura senza causare danni a essa o a strutture limitrofe.

L'utilizzo dei sistemi impulsivi risulta particolarmente indicato nel caso in cui si vogliono eccitare in maniera operativamente semplice le frequenze proprie della struttura.

A.3 Dati di targa di vibrodine meccaniche

Le caratteristiche prestazionali "dati di targa" della vibrodina meccanica, per una determinata costante caratteristica in funzione delle opzioni previste dal produttore, sono definite dai seguenti parametri:

- costante caratteristica della macchina $C = \dots\dots\dots kN/Hz^2$
- campo dell'angolo di regolazione in gradi:
 - valore massimo $\alpha_{max} = \dots\dots\dots^\circ$
 - valore minimo $\alpha_{min} = \dots\dots\dots^\circ$
 - passo regolazione
- campo di frequenza:
 - valore massimo $f_{max} = \dots\dots\dots Hz$
 - valore minimo $f_{min} = \dots\dots\dots Hz$
- massima forza erogabile $F_{max} = \dots\dots\dots kN/s$
- potenza disponibile:
 - valore a f_{max} $P_{max} = \dots\dots\dots kNm/s$
 - valore a f_{min} $P_{min} = \dots\dots\dots kNm/s$
- componenti erogabili:
 - orizzontale SI oppure NO
 - verticale SI oppure NO
- ingombro operativo:
 - longitudinale $A = \dots\dots\dots cm$
 - trasversale $B = \dots\dots\dots cm$
 - altezza $H = \dots\dots\dots cm$
 - peso $G = \dots\dots\dots kN$

In base a questi parametri le massime ampiezze delle forze erogabili in regime sinusoidale dalla vibrodina meccanica sono date da:

- campo a "bassa frequenza", dove si ha la presenza di limiti legati al massimo sbilanciamento delle parti rotanti:

$$F_{max}(f) = C f^2 \cos\left(\frac{\alpha_{min}}{s}\right) \quad (A.1)$$

- campo ad "alta frequenza" dove si ha la presenza del limite F_{max} legato alla massima forza assunta per il dimensionamento dei componenti meccanici della macchina (per esempio, cuscinetti, involucro):

$$F_{max}(f) = F_{max} \quad (A.2)$$

La frequenza di transizione, f_{ba} , fra il campo a "bassa frequenza" e quello ad "alta frequenza", è data da:

$$f_{ba} = \sqrt{\frac{F_{max}}{C \cos\left(\frac{\alpha_{min}}{2}\right)}} \quad (A.3)$$

A.4 Dati di targa di vibrodine elettrodinamiche

Le caratteristiche prestazionali “dati di targa” della vibrodina elettrodinamica sono definite, in funzione delle opzioni di configurazione previste dal produttore, dai seguenti parametri:

- ampiezza della corsa picco-picco dell'eccitatore $\delta = \dots\dots\dots cm$
- massa della zavorra inerziale mobile $M = \dots\dots\dots kg$
- campo di frequenza:
 - valore massimo $f_{max} = \dots\dots\dots Hz$
 - valore minimo $f_{min} = \dots\dots\dots Hz$
- massima forza erogabile $F_{max} = \dots\dots\dots kN$
- potenza disponibile:
- valore a f_{max} $P_{max} = \dots\dots\dots kNm/s$
- valore a f_{min} $P_{min} = \dots\dots\dots kNm/s$
- componenti erogabili:
 - orizzontale SI oppure NO
 - verticale SI oppure NO
- ingombro operativo:
 - longitudinale $A = \dots\dots\dots cm$
 - trasversale $B = \dots\dots\dots cm$
 - altezza $H = \dots\dots\dots cm$
 - peso $G = \dots\dots\dots kN$

In base a questi parametri le massime forze erogabili in regime sinusoidale dalla vibrodina elettrodinamica sono date da:

- campo a “bassa frequenza”, dove si ha la presenza di limiti legati alla ampiezza della corsa dell'eccitatore:

$$F_{max}(f) = M(2\pi f)^2 \frac{\delta}{2} \quad (A.4)$$

- campo ad “alta frequenza” dove si ha la presenza del limite F_{max} legato alla massima forza erogata dall'eccitatore:

$$F_{max}(f) = F_{max} \quad (A.5)$$

La frequenza di transizione, f_{ba} , fra il campo a “bassa frequenza” e quello ad “alta frequenza”, è data da:

$$f_{ba} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{F_{max}}{M \frac{\delta}{2}}} \quad (A.6)$$

A.5 Dati di targa di vibrodine idrauliche

Le caratteristiche prestazionali “dati di targa” della vibrodina idraulica sono definite, in funzione delle opzioni di configurazione previste dal produttore, dai seguenti parametri:

- sezione dell'attuatore idraulico $\Omega = \dots\dots\dots cm^2$
- ampiezza della corsa picco-picco dell'attuatore $\delta = \dots\dots\dots cm$
- massa della zavorra inerziale mobile $M = \dots\dots\dots kg$

- massima pressione in regime dinamico erogata dal sistema di alimentazione idraulico $p = \dots\dots\dots \frac{N}{cm^2}$
- massima portata in regime dinamico erogata dal sistema di alimentazione idraulico $Q = \dots\dots\dots cm^3/s$
- campo di frequenza:
 - valore massimo $f_{max} = \dots\dots\dots Hz$
 - valore minimo $f_{min} = \dots\dots\dots Hz$
 - passo di regolazione $\Delta f = \dots\dots\dots Hz$
- massima forza erogabile $F_{max} = \dots\dots\dots kN$
- potenza disponibile:
 - valore a f_{max} $P_{max} = \dots\dots\dots kNm/s$
 - valore a f_{min} $P_{min} = \dots\dots\dots kNm/s$
- componenti erogabili:
 - orizzontale SI oppure NO
 - verticale SI oppure NO
- ingombro operativo:
 - longitudinale $A = \dots\dots\dots cm$
 - trasversale $B = \dots\dots\dots cm$
 - altezza $H = \dots\dots\dots cm$
 - peso $G = \dots\dots\dots kN$

In base a questi parametri le massime forze erogabili in regime sinusoidale della vibrodina idraulica sono date da:

- campo a “bassa frequenza”, dove si ha la presenza del limite legato alla massima corsa dell'attuatore:

$$F_{max}(f) = M(2\pi f)^2 \frac{\delta}{2} \quad (A.7)$$

- campo a “media frequenza”, dove si ha la presenza del limite legato alla massima portata in regime dinamico erogata dal sistema di alimentazione idraulico:

$$F_{max}(f) = M(2\pi f)^2 \frac{Q}{\Omega} \quad (A.8)$$

- campo ad “alta frequenza”, dove si ha la presenza del limite F_{max} legato alla massima pressione in regime dinamico erogata dal sistema di alimentazione idraulico:

$$F_{max}(f) = \Omega p \quad (A.9)$$

Le frequenze di transizione, f_{bm} , tra il campo a “bassa frequenza” e quello a “media frequenza”, e f_{ma} , tra il campo a “media frequenza” e quello ad “alta frequenza”, sono date rispettivamente da:

$$f_{bm} = \frac{Q}{\Omega p \delta} \quad (A.10)$$

$$f_{ma} = \frac{p \Omega^2}{4\pi Q} \quad (A.11)$$

A.6 Caratteristiche dei sistemi impulsivi

Le caratteristiche del sistema impulsivo, che consiste nella caduta di una zavorra sono definiti dai seguenti parametri:

- Massima corsa della zavorra di impatto $d = \dots\dots\dots \text{cm}$
- massa della zavorra di impatto $M = \dots\dots\dots \text{kg}$
- elasticità del "cuscino" elastomerico $k = \dots\dots\dots \frac{\text{kN}}{\text{mm}}$
- ingombro operativo:
 - longitudinale $A = \dots\dots\dots \text{cm}$
 - trasversale $B = \dots\dots\dots \text{cm}$
 - altezza $H = \dots\dots\dots \text{cm}$
 - peso $G = \dots\dots\dots \text{kN}$

Per altri sistemi impulsivi devono essere definite le adeguate caratteristiche prestazionali.

piatta in ampiezza.....

piatta o lineare in fase.....(7)

- indicare se nell'elaborazione viene considerata la risposta in frequenza della catena:

SI NO

- Modalità.....

- campi di impiego ambientali:

• temperatura.....

• umidità.....

• presenza di campi magnetici

- tipi di calibrazione e/o controllo effettuati in sito

- tipi di tarature e/o calibrazioni e/o controlli effettuati in centri di taratura e calibrazione

- altre notizie.....

Istruzioni e note:

(1) Accelerometro, velocimetro, inclinometro, ...

(2) Accelerazione, velocità, spostamento, inclinazione, ...

(3) Piezoelettrico, piezoresistivo, induttivo, resistivo, ottico, servo-trasduttore (null balance transducer), ...

(4) Meccanico (viti e/o spine), a base magnetica, incollaggio, ..., misto (specificare caratteristiche).

(5) Descrivere tipo o caratteristiche e lunghezza dei cavi e tipo dei connettori. Indicare le modalità di messa a terra.

(6) $k_s = \frac{a}{b}$ dove:

$a = mV, pC, \dots$ (grandezza elettrica)

$b = ms^{-2}, ms^{-1}, m, g, \dots$ (grandezza meccanica)

(7) Se disponibile.

Annex C Appendice C (normativa)

Tecniche di indagine: macchine utilizzabili, limiti di applicabilità e modalità interpretative

C.1 Premessa

Nella presente appendice sono fornite alcune indicazioni sulle modalità operative e le tecniche di interpretazione più appropriate da adottarsi nelle differenti prove di vibrazione contemplate dalla presente norma.

C.2 Definizioni

Le principali caratteristiche di segnali random stazionari (ergodici) possono essere descritte attraverso:

- indici globali;
- funzioni nel dominio del tempo;
- funzioni nel dominio delle frequenze.

La definizione di alcune tra le grandezze di maggior diffusione ed interesse nella fase di interpretazione dei segnali e di identificazione strutturale è qui di seguito richiamata.

1) Indici globali:

- valore di picco

$$x_r^{max} = \max\{|x_r(t)|\} \quad (C.1)$$

- valore efficace

$$x_r^{eff} = \left[\frac{1}{T} \int_0^T x_r^2(t) dt \right]^{\frac{1}{2}} \quad (C.2)$$

2) Funzioni nel dominio del tempo:

- funzione di autocorrelazione

$$R_{x_r x_r}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_r(t) x_r(t + \tau) dt \quad (C.3)$$

- funzione di correlazione incrociata

$$R_{x_r x_s}(\tau) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \int_0^T x_r(t) x_s(t + \tau) dt \quad (C.4)$$

3) Funzioni nel dominio delle frequenze:

- trasformata di Fourier finita

$$X_f(f) = \int_0^T x_r(t) e^{-j2\pi f t} dt \quad (C.5)$$

- autospettro o densità spettrale del segnale $x_r(t)$

- la densità spettrale di un segnale, definita come la Trasformata di Fourier della funzione di autocorrelazione. In alternativa, data la diffusione e l'efficienza computazionale delle procedure automatiche per il calcolo della Trasformata di Fourier, la densità spettrale può essere definita utilizzando direttamente la Trasformata di Fourier del segnale. In questo caso, essendo il processo (segnale) $x_r(t)$ assegnato attraverso N_d campioni $x_r^{(k)}(t)$, di eguale lunghezza T e valutando la Trasformata di Fourier discreta $x_r^{(k)}(f)$ di ogni campione, l'autospettro può essere definito tramite la formula seguente:

$$S_{x_r x_r}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left\{ \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} [X_r^{(k)}(f)]^* X_r^{(k)}(f) \right\} \quad (\text{C.6})$$

Dove il simbolo * indica il complesso coniugato.

- densità spettrale incrociata tra i segnali $x_r(t)$ ed $x_s(t)$. In modo analogo all'autospettro, la densità spettrale incrociata tra due segnali $x_r(t)$ e $x_s(t)$ viene definita come la Trasformata di Fourier della funzione di correlazione incrociata tra i due segnali. In alternativa, anche la densità spettrale incrociata può essere definita utilizzando direttamente la Trasformata di Fourier dei segnali. Assegnati, quindi, i processi (segnali) $x_r(t)$, $x_s(t)$ attraverso N_d realizzazioni $x_r^{(k)}(t)$, $x_s^{(k)}(t)$ di eguale lunghezza T e valutate le Trasformate di Fourier discrete $x_r^{(k)}(f)$, $x_s^{(k)}(f)$ la densità spettrale incrociata può essere definita tramite la formula seguente:

$$S_{x_r x_s}(f) = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{T} \left\{ \frac{1}{N_d} \sum_{k=1}^{N_d} [X_s^{(k)}(f)]^* X_r^{(k)}(f) \right\} \quad (\text{C.7})$$

dove il simbolo * indica il complesso coniugato.

- funzione di coerenza tra i segnali $x_r(t)$ ed $x_s(t)$:

$$\gamma_{x_r x_s}^2(f) = \frac{|S_{x_r x_s}(f)|^2}{S_{x_r x_r}(f) S_{x_s x_s}(f)} \quad (\text{C.8})$$

- funzione di trasferimento tra i segnali $x_r(t)$ (uscita) e $p_e(t)$ (ingresso):

$$H_{re}(f) = \frac{S_{x_r p_e}(f)}{S_{p_e p_e}(f)} \quad (\text{C.9a})$$

$$H_{re}(f) = \frac{S_{x_r x_r}(f)}{S_{p_e x_r}(f)} \quad (\text{C.9b})$$

Le due formule (C.9a), (C.9b) precedenti risultano del tutto equivalenti nel caso di un singolo campione. Altrimenti, la formula (C.9a) minimizza gli effetti del rumore presente in $x_r(t)$ laddove formula (C.9b) minimizza gli effetti del rumore presente in $p_e(t)$.

C.3 Eccitazione forzata

C.3.1 Eccitazione forzata sinusoidale

C.3.1.1 Descrizione

Le prove di eccitazione forzata sinusoidale prevedono l'applicazione di un carico $p_e(t)$ variabile nel tempo, t , con legge sinusoidale. Nel corso della prova la frequenza, f , dell'eccitazione viene fatta variare tra f_i e f_f , attraverso incrementi o passi discreti, Δf :

$$f = f_i(f_i + \Delta f), (f_i + 2\Delta f), (f_i + 3\Delta f), \dots, (f_f - \Delta f), f_f \quad (\text{C.10})$$

Nel corso della prova dinamica forzata devono essere previste la misurazione e la registrazione delle storie temporali relative al carico applicato $p_e(t)$ e alle risposte strutturali $x_r(t)$ (in termini di spostamento e/o velocità e/o accelerazione) del sistema analizzato. Le misurazioni devono essere effettuate a transitorio esaurito.

Le modalità di registrazione più in uso prevedono, per ciascuna delle frequenze di analisi considerate, di raccogliere un numero di cicli sinusoidali completi, N_c , campionati nel tempo in modo che ciascun ciclo sia descritto attraverso un numero intero di misurazioni pari a Δc . In questo modo si ha che:

- la risoluzione nel tempo, Δt , non è costante ma variabile con la frequenza del carico dinamico applicato $\Delta t = 1/\Delta_c f$. In tal senso devono essere considerate le modalità di impostazione di "filtri analogici antialiasing"; infatti la frequenza antialiasing, $f_{\text{antialiasing}}$, deve essere maggiore di quella di eccitazione e minore (o uguale) di quella di analisi (legata a Δt); ossia:

$$f \leq f_{\text{antialiasing}} \leq \frac{\Delta_c f}{2} \quad (\text{C.11})$$

- il numero di misure, N_m , raccolte, per ciascun trasduttore, nel corso dell'intera prova è dato da:

$$N_m = (N_c \Delta_c + 1) \left(\frac{f_f - f_i}{\Delta f} + 1 \right) \quad (\text{C.12})$$

Le specifiche di prova sono definite attraverso i seguenti parametri:

-	entità del carico dinamico:	carico iniziale (minimo)	$P_i = \dots\dots\dots kN$
		carico finale (massimo)	$P_f = \dots\dots\dots kN$
		costante vibrodina	$C = \dots\dots\dots \frac{kN}{Hz^2}$
-	campo di frequenza:	frequenza iniziale	$f_i = \dots\dots\dots Hz$
		frequenza finale	$f_f = \dots\dots\dots Hz$
		incremento di frequenza	$\Delta f = \dots\dots\dots Hz$
-	modalità di registrazione:	numero di cicli	$N_c = \dots\dots\dots Hz$
		misure per ciclo	$\Delta_c = \dots\dots\dots$
		numero di misurazioni	
		raccolte per sensore	$N_m = \dots\dots\dots$

Orientativamente per ponti e viadotti il campo di variabilità dei parametri che definiscono le specifiche di prova sono:

-	entità del carico dinamico:	carico iniziale (minimo)	$P_i = > 1 \text{ kN}$
		carico finale (massimo)	$P_f < 200 \text{ kN}$
		costante vibrodina	$C = 1000 \div 2000 \frac{\text{kN}}{\text{Hz}^2}$
-	campo di frequenza:	frequenza iniziale	$f_i > 1 \text{ Hz}$
		frequenza finale	$f_f < 100 \text{ hz}$
		incremento di frequenza	$\Delta f = 0.05 \div 1 \text{ Hz}$
-	modalità di registrazione:	numero di cicli	$N_c = 3 \div 50$
		misure per ciclo	$\Delta_c = 4 \div 64$

C.3.1.2 Macchine utilizzate

L'eccitazione sinusoidale può essere fornita da vibrodine (di tipo meccanico o idraulico) o da eccitatori di tipo elettrodinamico.

La misurazione della forza con trasduttori specifici non è richiesta nel caso di impiego di vibrodine meccaniche in quanto esse generano forze rigorosamente sinusoidali; nel caso di rilievo non diretto della forza devono essere misurate sia la velocità di rotazione della macchina (frequenzimetro) sia la posizione angolare delle parti rotanti (fasometro).

La misurazione della forza deve invece avvenire per le vibrodine di tipo idraulico e per gli eccitatori elettrodinamici in quanto generano forze sinusoidali con presenza di distorsioni non sempre trascurabili. Per le vibrodine idrauliche è anche consentita la misurazione indiretta della forza mediante accelerometri installati sulla massa "accelerata" della macchina idraulica.

C.3.1.3 Limiti e applicabilità

La tecnica di indagine con eccitazione forzata di tipo sinusoidale non presenta particolari limitazioni concettuali e pratiche.

Il successo delle indagini è legato all'entità delle vibrazioni indotte, alla risoluzione dei sensori di misura e all'entità del rumore di fondo presente sulla struttura.

Si deve considerare che per questo tipo di indagine il segnale analizzato è di volta in volta concentrato in modo selettivo a una determinata frequenza (frequenza di eccitazione) in corrispondenza della quale possono essere concentrate le potenzialità delle macchine meccaniche.

Questo aspetto consente di elaborare registrazioni anche nel caso di bassi rapporti segnale/rumore.

C.3.1.4 Modalità interpretative

L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti nel corso della prova dinamica forzata di tipo sinusoidale deve partire dall'esame, per ogni frequenza di analisi, delle forzanti dinamiche e delle risposte del ponte o del viadotto (fornite dai trasduttori installati) che sono caratterizzate da andamenti prevalentemente sinusoidali:

$$p_e(t) = P_e(f) \sin[2\pi f t + \theta_e(f)] + p_e^d(t) \quad (\text{C.13})$$

$$x_r(t) = X_r(f) \sin[2\pi ft + \theta_r(f)] + x_r^d(t) \quad (C.14)$$

ove gli indici ($e = 1, 2, \dots, n_e$) e ($r = 1, 2, \dots, n_r$) sono rispettivamente riferiti ai punti di eccitazione e di misura della risposta.

Le "distorsioni" $x_r^d(t)$ e $p_e^d(t)$, dipendenti dalle vibrazioni ambientali presenti, dal rumore elettrico del sistema di misura e da eventuali non linearità strutturali dell'opera indagata, devono risultare di entità tale da non influenzare la stima delle componenti isofrequenziali di eccitazione e risposta. A tal fine, deve essere valutato il rapporto segnale/rumore utilizzando le espressioni di seguito riportate e rispettate le relative limitazioni:

$$\frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T x_r^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [x_r^d(t)]^2 dt}} > 1 \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T p_e^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T [p_e^d(t)]^2 dt}} \quad (C.15)$$

Una volta valutate le componenti dinamiche isofrequenziali del carico $P_e(f)$ e delle risposte strutturali $X_r(f)$ e i corrispondenti sfasamenti $J_e(f)$ e $J_r(f)$ è possibile il calcolo delle funzioni di trasferimento della struttura analizzata, attraverso la formula:

$$H_{re}(f) = \frac{X_r(f)}{P_e(f)} e^{j[\theta_r(f) - \theta_e(f)]} \quad (C.16)$$

dove j è l'unità immaginaria.

La valutazione dei parametri modali del ponte o viadotto deve essere effettuata in base all'interpretazione delle funzioni di trasferimento stimate mediante le procedure note in letteratura. In particolare, nel caso in cui sia ritenuto trascurabile il grado di accoppiamento tra i modi di vibrare dell'opera (i picchi dominanti nell'ampiezza della funzione di trasferimento sono piuttosto distanziati) è sufficiente l'utilizzo di metodi in cui l'interazione tra i modi viene trascurata cosicché ciascun picco è, in definitiva, approssimato alla risposta di un opportuno oscillatore semplice. Viceversa, nel caso di picchi ravvicinati nell'ampiezza della funzione di trasferimento si dovrebbero utilizzare le procedure più raffinate che, per esempio, operino la valutazione dei parametri modali in modo da minimizzare le differenze tra le funzioni di trasferimento misurate e le corrispondenti teoriche².

C.3.2 Eccitazione random

C.3.2.1 Descrizione

Le modalità delle prove di eccitazione random forzate prevedono l'applicazione di un carico $p_e(t)$ variabile nel tempo, t , con legge random stazionaria con energia distribuita in un intervallo assegnato di frequenza.

In genere una prima caratterizzazione dell'entità del carico è descritta attraverso il valore di picco (o massimo assoluto) e il valore efficace, laddove il contenuto in frequenza è rappresentato attraverso la Trasformata di Fourier ovvero mediante la densità autospettrale. In particolare, un segnale random di tipo "rumore bianco" è caratterizzato da uno spettro costante in un definito campo di frequenza.

Nel corso della prova dinamica forzata deve essere prevista la misurazione e la registrazione delle storie temporali relative al carico applicato $p_e(t)$ e alle risposte strutturali $x_r(t)$ (in termini di spostamento e/o velocità e/o accelerazione) del ponte o del viadotto.

² Per una dettagliata descrizione di ambedue le classi di metodologie considerate si rimanda alla letteratura specializzata, per esempio Ewins, D.J. (2000).

Le modalità di registrazione prevedono di raccogliere dati per un periodo di tempo, T , con risoluzione nel tempo Δt costante.

Le specifiche di prova sono definite attraverso i seguenti parametri:

- entità del carico dinamico:	carico efficace a f_f	$p^{eff}(f_f) = \dots\dots\dots kN$
	carico efficace globale	$p_g^{eff} = \dots\dots\dots kN$
	tipo di spettro	$\dots\dots\dots$
- campo di frequenza:	frequenza iniziale	$f_i = \dots\dots\dots Hz$
	frequenza finale	$f_f = \dots\dots\dots Hz$
- modalità di registrazione:	risoluzione nel tempo	$\Delta t = \dots\dots\dots s$
	tempo di registrazione	$T = \dots\dots\dots s$

C.3.2.2 Macchine utilizzate

L'eccitazione random può essere fornita da vibrodine idrauliche o da eccitatori di tipo elettrodinamico.

Si deve sempre misurare la forza; per le vibrodine idrauliche è consentita la misurazione indiretta della forza mediante accelerometri installati sulla massa "accelerata" della macchina idraulica.

C.3.2.3 Limiti e applicabilità

La tecnica di indagine con eccitazione forzata di tipo random non presenta particolari limitazioni concettuali e pratiche.

Il successo delle indagini dipende dall'entità delle vibrazioni indotte, dalla posizione degli eccitatori, dalla risoluzione dei sensori di misura e dall'entità del rumore di fondo presente sulla struttura.

Rispetto al caso di eccitazione sinusoidale, deve essere considerato che per questo tipo di indagine il segnale analizzato è distribuito in un definito campo di frequenza in corrispondenza del quale possono essere concentrate le risorse delle attrezzature di eccitazione.

In alcune situazioni critiche per quanto riguarda il rapporto segnale/rumore, può risultare conveniente effettuare più prove caratterizzate da differenti campi di frequenza che globalmente devono coprire l'intero campo di interesse per le indagini; questo aspetto consente di elaborare in modo ottimale registrazioni anche nel caso di presenza di elevato rumore ambientale.

C.3.2.4 Modalità interpretative

L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti nel corso della prova dinamica forzata random deve partire dall'esame delle risposte dinamiche del ponte o del viadotto (fornite dai trasduttori installati). In particolare, devono essere valutati gli autospettri del carico $S_{p_e p_e}(f)$ e delle risposte $S_{x_r x_r}(f)$ e le densità spettrali incrociate tra eccitazione e risposte $S_{x_r p_e}(f)$ ove gli indici e e $(r = 1, 2, \dots, n_r)$ sono rispettivamente riferiti alle posizioni di eccitazione e di misura della risposta.

È quindi possibile il calcolo delle funzioni di trasferimento in frequenza del ponte o del viadotto $Hre(f)$. La valutazione dei parametri modali del sistema è effettuata in base all'analisi di tali funzioni di trasferimento mediante le procedure note in letteratura.

Si dovrebbero inoltre calcolare le funzioni di coerenza tra causa (eccitazione) ed effetto (risposte dinamiche del ponte o del viadotto) al fine di valutare la qualità dei dati, l'attendibilità delle stime spettrali ottenute e la presenza di eventuali non linearità.

C.3.3 Eccitazione impulsiva

C.3.3.1 Descrizione

Le modalità delle prove di eccitazione impulsiva forzate prevedono l'applicazione di un carico $p_e(t)$ variabile nel tempo t e con durata estremamente contenuta.

C.3.3.2 Macchine utilizzate

L'eccitazione impulsiva può essere fornita da macchine e sistemi differenti quali "tiro e rapido rilascio" o "impatto di gravi". Le stesse vibrodine idrauliche possono fornire carichi transitori di breve durata, dell'ordine del secondo.

La forza deve essere misurata nel caso in cui l'esame dei dati avvenga considerando le vibrazioni forzate indotte dall'eccitazione impulsiva (fase in cui $p_e \neq 0$). Non è invece richiesta nel caso vengano prese in considerazione le vibrazioni libere indotte dall'eccitazione impulsiva stessa (fase in cui $p_e(t) = 0$).

C.3.3.3 Limiti e applicabilità

La tecnica di indagine con eccitazione forzata impulsiva presenta risvolti teorici e pratici per i quali appare meno efficace delle tecniche di eccitazione forzata con carichi di tipo sinusoidali o random (ossia segnali di natura stazionaria).

La tecnica può essere utilizzata successivamente alla sua messa a punto sulla specifica opera da effettuarsi in parallelo con le tecniche di eccitazione più consolidate (sinusoidale e random). In particolare, in questa fase devono essere individuate caso per caso le modalità di prova (numero e tipo degli eventi impulsivi da esaminare) e di analisi.

C.3.3.4 Vibrazioni forzate durante lo shock

L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti nel corso della prova dinamica forzata impulsiva deve partire dall'esame del carico e delle risposte dinamiche del ponte o del viadotto (fornite dai trasduttori installati) durante la fase forzata (nel corso della quale $p_e(t) \neq 0$).

In linea di massima possono essere utilizzate le stesse modalità descritte per le indagini random.

C.3.3.5 Vibrazioni libere dopo lo shock

L'elaborazione dei dati sperimentali raccolti nel corso della prova dinamica forzata impulsiva deve partire dall'esame delle sole risposte dinamiche del ponte o del viadotto (fornite dai trasduttori installati) durante la fase di oscillazione libera (nel corso della quale $p_e(t) = 0$).

Le oscillazioni libere di un ponte o di un viadotto sono fornite dal contributo dei differenti modi di vibrare dell'opera caratterizzati da oscillazioni sinusoidali smorzate. Tra le tecniche di identificazione modale utilizzabili in questo caso ci sono, per esempio, il metodo degli esponenziali complessi e il metodo Ibrahim Time Domain (ITD) nell'ambito delle procedure di analisi non iterative. In alternativa, possono utilizzarsi algoritmi iterativi, operanti nel dominio del tempo o in quello delle frequenze, che minimizzino una misurazione della discrepanza tra le misure $x_r(t)$ raccolte nel corso delle indagini e le oscillazioni libere calcolate $x_r^c(t)$.

C.4 Vibrazioni indotte da cause ambientali

C.4.1 Descrizione

Le prove basate sul rilievo delle vibrazioni indotte da forzanti ambientali (Ambient Vibration Tests) consentono di identificare sperimentalmente i parametri modali di una costruzione a partire dalla misura della sola risposta strutturale senza la necessità di imporre o misurare la forzante. Per le strutture in esercizio, le cause eccitanti sono rappresentate dalle normali azioni d'esercizio, antropiche (per esempio,

traffico veicolare, attività industriali) e ambientali (per esempio, vento, microtremori). Per l'identificazione delle caratteristiche modali della costruzione a partire dalle misure delle vibrazioni ambientali si utilizzano procedure di analisi modale operativa (Operational Modal Analysis, OMA) anche note come tecniche di identificazione output-only, che si basano sulla sostituzione dell'eccitazione artificiale deterministica (misurata) con un input stocastico che si ipotizza assimilabile a un rumore bianco.

C.4.2 Modalità interpretative

Lo studio delle registrazioni ottenute per effetto di traffico viario, vento e microtremori viene in genere effettuato attraverso la valutazione e la successiva interpretazione delle densità autospettrali $S_{x_r x_r}(f)$ e delle densità spettrali incrociate $S_{x_r x_s}(f)$ per $(r, s = 1, 2, \dots, n_r)$. In tal caso, la stima delle frequenze modali è basata sull'individuazione dei picchi degli autospettri e degli spettri incrociati e sull'analisi della fase di questi ultimi. Infatti, quando un sistema lineare dotato di basso smorzamento è sottoposto a eccitazione casuale, l'autospettro della risposta in un punto qualsiasi presenta dei massimi relativi sia in corrispondenza delle frequenze dominanti dell'eccitazione sia in corrispondenza delle frequenze modali della struttura. È, inoltre, possibile distinguere le frequenze proprie della struttura in base alla fase degli spettri incrociati che deve approssimativamente risultare pari a 0 o π , dal momento che due punti di un sistema eccitati secondo un modo proprio oscillano in fase o in opposizione di fase.

Una volta stimate le frequenze modali, una valutazione approssimata degli smorzamenti può, per esempio, ottenersi mediante il metodo "half-power bandwidth".

Il valore delle forme modali in corrispondenza della r^{esima} stazione di misura e dell' i^{esima} frequenza modale è determinato tramite la formula seguente:

$$\phi_{ri} = \sqrt{S_{x_r x_r}(f_i)} \quad (C.17)$$

e quindi normalizzato rispetto al valore massimo modale ovvero a quello di una stazione assunta come riferimento.

Al fine di valutare l'attendibilità delle stime ottenute, si dovrebbe utilizzare il calcolo della funzione di coerenza. Per segnali reali, corrotti in qualche modo dalla presenza di rumore, è usuale che la coerenza sia approssimativamente unitaria nell'intorno delle frequenze modali dove gli effetti strutturali (amplificati dal picco della funzione risposta in frequenza) divengono solitamente predominanti sul rumore. L'utilizzo degli autospettri e della formula C.17 per definire l'ampiezza della forma modale deve essere condotto solo se la misura sperimentale (riferita alle altre stazioni di misura) produce coerenza circa unitaria (e fase circa pari a 0 o π).

Il calcolo degli autospettri e degli spettri incrociati da utilizzarsi nell'ambito della procedura dinanzi descritta è in genere condotto mediante approcci di tipo non parametrico riconducibili alle due classi principali dei metodi del correlogramma (basato sulla trasformata delle sequenze di correlazione $R_{x_r x_r}(\tau)$ e $R_{x_r x_s}(\tau)$) e del periodogramma (basato sul calcolo delle trasformate dei segnali). Qualora si utilizzi il metodo del periodogramma, il quale ha una maggiore efficienza computazionale, dopo aver suddiviso ogni segnale registrato $x_r(t)$ in N_d sequenze temporali $x_r^{(k)}(t)$ ($k = 1, 2, \dots, N_d$) ciascuna costituita da N campioni e aver calcolato la Trasformata di Fourier discreta di ogni sequenza $X_r^{(k)}(f)$, per la stima di $S_{x_r x_r}(f)$ e $S_{x_r x_s}(f)$ ($r, s = 1, 2, \dots, n_d$) sono utilizzate le formule seguenti:

$$S_{x_r x_r}(f) = \frac{1}{N_d N \Delta t} \sum_{k=1}^{n_d} [X_r^{(k)}(f)]^* X_r^{(k)}(f) \quad (C.18)$$

$$S_{x_r x_s}(f) = \frac{1}{N_d N \Delta t} \sum_{k=1}^{n_d} [X_r^{(k)}(f)]^* X_s^{(k)}(f) \quad (C.19)$$

La dimensione N di ogni sequenza temporale e il passo di campionamento Δt devono essere fissati in modo da ottenere un'adeguata risoluzione in frequenza. Inoltre, la durata complessiva della registrazione deve tener conto che l'errore percentuale commesso nella stima di autospettri (formula C.18) e spettri incrociati (formula C.19), risulta approssimativamente pari a $\frac{1}{\sqrt{N_d}}$. Ciò implica che per ottenere, per esempio, una stima degli autospettri con errore minore del 10% è necessario disporre di un segnale di lunghezza tale da poter essere suddiviso in $N_d = 100$ sequenze temporali; nell'ipotesi di operare con $\Delta t = 0,01$ s, risoluzione in frequenza di circa 0,025 Hz e nessuna sovrapposizione nella definizione delle sequenze temporali, è necessaria un'acquisizione di quasi 67 minuti. Qualora nella definizione delle sequenze temporali si assuma una dimensione di sovrapposizione del segnale pari al 50%, la durata complessiva della registrazione è ridotta a circa 33 minuti. D'altra parte, un errore accettabile nella definizione degli spettri di potenza può essere ottenuto effettuando registrazioni di durata pari a 1000-2000 volte il periodo del primo modo di vibrare della struttura.

In alternativa ai metodi suindicati e qualora non si ritenga sufficiente la valutazione delle sole densità autospettrali, l'identificazione dinamica può essere eseguita utilizzando algoritmi di identificazione più raffinati. Sono disponibili metodi non parametrici nel dominio delle frequenze (Frequency Domain Decomposition, FDD; Enhanced Frequency Domain Decomposition, EFDD); metodi parametrici nel dominio delle frequenze (PolyMAX); metodi parametrici nel dominio del tempo (metodi AR e ARMA, metodi appartenenti alla classe degli algoritmi di identificazione del sottospazio stocastico, SSI-data e SSI-cov).

C.5 Vibrazioni indotte da sisma

C.5.1 Descrizione

L'eccitazione prodotta dal sisma è un transitorio di breve durata (fino a qualche decina di secondi). Il carico dinamico effettivo prodotto dall'attività sismica è associato a moti impressi alla base dell'opera (pile e spalle); pertanto, la misurazione dell'eccitazione deve essere condotta disponendo sensori accelerometrici alla base.

C.5.2 Modalità interpretative

Le procedure di identificazione disponibili in letteratura per questo caso risultano molteplici. Nell'ambito delle procedure volte alla valutazione dei parametri modali si dovrebbero utilizzare due classi di metodologie:

- procedure volte alla stima delle funzioni di trasferimento tra le accelerazioni di risposta al sisma e l'eccitazione sismica calcolate mediante le Trasformate di Fourier dei segnali registrati. Tali metodi sono operativamente simili a quelli illustrati in C.3.2 per il caso delle eccitazioni forzate random;
- procedure (operanti nel dominio del tempo o in quello delle frequenze) in cui i parametri modali del sistema analizzato vengono determinati in modo da minimizzare un'opportuna misura della discrepanza tra la risposta (o le risposte) registrata per effetto del sisma e la corrispondente risposta di un modello numerico modale³.
- La precedente classificazione non può ritenersi esaustiva delle numerose procedure disponibili per l'analisi delle registrazioni sismiche, soprattutto nel caso di comportamento altamente non lineare del sistema strutturale indagato.

³ Per studiare l'effetto di eventuali non linearità indotte da un evento violento è possibile fare riferimento alla letteratura rilevante, per esempio Beck e Jennings (1980) e McVerry (1980).

Annex D Appendice D (normativa) Casi d'uso

D.1 Premessa

Nella presente appendice sono fornite raccomandazioni sulla progettazione ed esecuzione di prove e rilievi dinamici in funzione del caso d'uso.

In particolare, i casi d'uso considerati sono:

- misurare lo spettro della vibrazione (punto D.3);
- identificare le sole frequenze naturali della struttura (punto D.4);
- identificare la funzione di risposta in frequenza (punto D.5);
- estrarre i parametri modali (punto D.6);
- identificare i parametri di un modello (punto D.7);
- misurare la risposta sismica (punto D.8).

Per ciascuno dei casi d'uso sono specificati:

- l'obiettivo della prova;
- le condizioni per le quali la prova è fattibile;
- le specifiche della domanda del committente;
- le tecniche di indagine che possono essere utilizzate (con riferimento al punto 7);
- l'elenco della strumentazione necessaria e le corrispondenti specifiche minime (con riferimento alle Appendici A e B);
- la modalità di acquisizione delle registrazioni (con riferimento all'Appendice C);
- la rappresentazione dei risultati.

D.2 Definizioni

Alla presente appendice si applicano i termini, le definizioni e i relativi simboli di cui ai punti 6 e 7 della UNI 11568:2015 e i termini e le definizioni seguenti:

- Frequenza minima f_i e frequenza massima f_f d'interesse. Sono le frequenze massima e minima che interessa misurare, in funzione dell'obiettivo della prova. Per esempio, f_i e f_f definiscono il campo di frequenze in cui interessa acquisire lo spettro di vibrazione di un ponte.
- Frequenza massima di misura f_{mm} : è la frequenza massima che deve essere misurata dal sensore per la particolare prova o rilievo nell'assunzione che sia presente un efficace filtro anti-aliasing.

- Ampiezza del rumore di fondo σ_N : è la deviazione standard della combinazione di tutti i segnali (per esempio, vibrazioni di fondo, rumore termico ed elettronico) con l'esclusione di quello sotto indagine, che può essere calcolata come segue:

$$\sigma_N^2 = \sigma_{\text{ambientale}}^2 + e_{\text{termico}}^2 + \sigma_{\text{trasduttore}}^2 + \dots \quad (\text{D.1})$$

- Rumore ambientale $\sigma_{\text{ambientale}}$: è la componente del rumore di fondo di origine meccanica.
- Errore termico e_{th} : è l'errore dovuto all'effetto della variazione di temperatura sulla risposta del sensore. Se non viene eseguita una compensazione termica sulla risposta del sensore, l'ampiezza dell'errore termico può essere stimata come segue:

$$e_{th} = k_{s,th} \Delta\theta \quad (\text{D.2})$$

dove $k_{s,th}$ è sensibilità termica e $\Delta\theta$ è l'escursione termica.

Se viene eseguita una compensazione termica sulla risposta del sensore, la deviazione standard dell'errore è data da:

$$\sigma_{th} = \sqrt{\left(\sigma_{k_{s,th}}^2 \Delta\theta^2 + k_{s,th}^2 \sigma_{\theta}^2\right)} \quad (\text{D.3})$$

Dove

$\sigma_{k_{s,th}}$ è la deviazione standard della sensibilità termica $k_{s,th}$

σ_{θ} è la deviazione standard dell'errore di misura della temperatura.

- Rumore del trasduttore (o precisione del trasduttore) $\sigma_{\text{trasduttore}}$: è il massimo tra il rumore elettrico e il rumore digitale, la cui deviazione standard è data dalla seguente formula:

$$\sigma_{\text{trasduttore}} = \max(\sigma_{\text{elettrico}}, \sigma_{\text{quantizzazione}}) \quad (\text{D.4})$$

- Rumore elettrico $\sigma_{\text{elettrico}}$: è il rumore generato dal circuito di amplificazione.
- Risoluzione del convertitore n_{bit} : è il numero dei bit di conversione del convertitore A/D.
- Intervallo di quantizzazione δV : è la minima differenza tra due valori convertiti, espresso in unità elettrica data dalla seguente formula:

$$\delta V = \frac{V_{sup} - V_{inf}}{2^{n_{bit}} - 1} \quad (\text{D.5})$$

- Errore di quantizzazione (o rumore digitale) $\sigma_{\text{quantizzazione}}$: è l'errore di conversione dovuto all'intervallo di quantizzazione. La sua deviazione standard può essere calcolata assumendo che l'errore sia uniforme all'interno dell'intervallo di quantizzazione:

$$\sigma_{\text{quantizzazione}} = \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{\delta V}{k_s} = 0.289 \frac{\delta V}{k_s} \quad (\text{D.6})$$

- Errore di calibrazione σ_{k_s} : è l'errore dovuto all'incertezza sulla sensibilità k_s . Se si trascura l'errore dell'offset, la sua deviazione standard può essere calcolata come:

$$\sigma_{k_s} = CoV_{k_s} \cdot x_{max} \quad (\text{D.7})$$

- Errore di sincronizzazione: È il massimo intervallo di tempo che può intercorrere tra due campioni nominalmente sincroni.
- Ampiezze del segnale analogico e digitale:

- x_{max} , x_{min} : ampiezza massima e minima del segnale analogico in unità ingegneristiche (accelerazione, velocità, spostamento);
- V_{max} , V_{min} : ampiezza massima e minima del segnale analogico in unità elettriche;
- V_{sup} , V_{inf} : limite superiore e inferiore del segnale acquisibile dal convertitore A/D.

La trasduzione da unità analogiche ingegneristiche e digitale generalmente avviene con l'espressione lineare $V = V_0 + k_s x$, dove V_0 è l'offset di trasduzione, cioè il valore dell'unità elettrica trasdotta corrispondente all'ampiezza del segnale in unità ingegneristica nulla.

D.3 Misura delle vibrazioni

D.3.1 Obiettivo

L'obiettivo della prova è misurare lo spettro di vibrazione.

D.3.2 Specifiche della domanda

Le informazioni che devono essere specificate nella richiesta di prova sono:

- frequenza minima f_i e frequenza massima f_f d'interesse;
- risoluzione minima in frequenza richiesta Δf_{rqd} ;
- punti di misura;
- ordine di grandezza dell'ampiezza attesa del segnale x_{max} ;
- accuratezza minima richiesta della misura $\sigma_{x,lim}$.

D.3.3 Tecniche d'indagine

La tecnica d'indagine che deve essere utilizzata consiste in prove con eccitazione ambientale con sorgente di eccitazione vento o traffico (vedere i punti 7.3.1 e 7.3.4).

D.3.4 Fattibilità della prova

La prova può essere considerata fattibile se, in relazione al rapporto segnale/rumore σ_S/σ_N atteso, sono soddisfatti i seguenti criteri di accettabilità del segnale registrato:

- se il rapporto $\sigma_S/\sigma_N > 10$ dB, il valore trovato di σ_S può essere accettato;
- se $6 < \sigma_S/\sigma_N < 10$ dB si deve procedere a correzione matematica del segnale σ_S , descrivendo nel rapporto di prova il procedimento adottato;
- se $\sigma_S/\sigma_N < 6$ dB il valore di σ_S trovato deve essere considerato come indicativo.

D.3.5 Strumentazione

La strumentazione che deve essere utilizzata è la seguente:

- accelerometri o velocimetri da installare su ciascuno dei punti di misura richiesti;
- convertitore A/D;
- amplificatori o condizionatori del segnale;
- filtri.

D.3.6 Specifiche della strumentazione

D.3.6.1 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- il campo di frequenza deve essere tra la frequenza minima richiesta f_i e la frequenza massima di misura f_{mm} ;
- il fondo scala $x_{max,lim}$ deve essere tale per cui lo strumento non vada in saturazione durante l'esecuzione della prova;
- l'accuratezza $\sigma_{trasduttore}$ deve essere tale per cui il rapporto segnale/rumore σ_S/σ_N sia sufficientemente basso. In mancanza di requisiti più precisi, è possibile assumere $\sigma_S/\sigma_N > 10$ dB. Questo generalmente è verificato se la deviazione del trasduttore non è dominante in σ_N e quindi è migliore del rumore ambientale $\sigma_{ambientale}$;
- la sensibilità k_S deve essere tale per cui il segnale elettrico trasdotto sia acquisibile dal convertitore A/D;
- la calibrazione σ_{k_S} deve essere tale per cui l'errore di calibrazione dell'accelerometro soddisfi la relazione seguente:

$$\sigma_x^2 = \sigma_N^2 + \sigma_{k_S}^2 + \sigma_{th}^2 \leq \sigma_{x,lim}^2 \quad (D.8)$$

L'errore di calibrazione σ_{k_S} non deve essere maggiore dell'accuratezza richiesta $\sigma_{k_S} \leq \sigma_{x,lim}$. Essendo CoV_{k_S} l'errore percentuale di calibrazione sul fondo scala, la condizione $\sigma_{k_S} \leq \sigma_{x,lim}$ può essere equivalentemente espressa dalla formula (D.9):

$$CoV_{k_S} \leq \frac{\sigma_{x,lim}}{x_{max,lim}} \quad (D.9)$$

D.3.6.2 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- la frequenza di campionamento deve consentire una frequenza di campionamento minima f_s per ciascun canale;
- l'errore di sincronizzazione deve essere considerato rispetto alla densità spettrale. Se esso interessa solo la densità autospettrale, la sincronia non è richiesta. Se invece l'errore di sincronizzazione interessa il calcolo di densità spettrali incrociate, deve essere minore di 1/10 del periodo di campionamento $\Delta t = 1/f_s$, salvo diversa richiesta del committente;
- il range deve soddisfare le seguenti condizioni:

$$V_{sup} > V_{max} = V_0 + k_S \cdot x_{max} \quad (D.10)$$

$$V_{inf} < V_{min} = V_0 + k_S \cdot x_{min} \quad (D.11)$$

- la risoluzione in bit del convertitore deve essere tale per cui l'errore di quantizzazione $\sigma_{quantizzazione}$ non sia maggiore dell'accuratezza richiesta, e cioè $\sigma_{quantizzazione} \leq \sigma_{x,lim}$.

L'intervallo di quantizzazione δV è definito dall'equazione (D.5), mentre l'errore di quantizzazione, assunto uniforme nell'intervallo, è definito dall'equazione (D.6). Utilizzando le formule (D.5) e (D.6) si ricava che la risoluzione in bit, che deve essere almeno:

$$n_{bit} \geq \log_2 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{12}} \frac{V_{sup} - V_{inf}}{k_s \cdot \sigma_{x,lim}} \right] \quad (D.12)$$

Assumendo che le ampiezze massima e minima della vibrazione siano simili, $x_{max} = |x_{min}|$, e ricordando che $(V_{sup} - V_{inf}) = k_s(x_{max} - x_{min}) = 2k_s x_{max}$ la relazione (D.12) diventa:

$$n_{bit} \geq \log_2 \left[1 + \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{x_{max}}{\sigma_{x,lim}} \right] \quad (D.13)$$

D.3.6.3 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori del segnale devono essere scelti in modo soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D, e da mantenere il rumore di fondo σ_N minore dell'accuratezza ammissibile $\sigma_{x,lim}$.

D.3.6.4 Filtri

Un filtro è un dispositivo o una trasformazione che elimina (parzialmente o totalmente) delle componenti in frequenza di un segnale. A seconda della banda di frequenze rimossa, i principali filtri possono essere classificati in:

- Passa basso: filtro avente una banda passante che si estende dalla frequenza zero fino a una frequenza determinata;
- Passa alto: filtro avente una banda passante che si estende da una frequenza diversa da zero fino a una frequenza infinita, o, in pratica, fino alla più alta frequenza interessata ;
- Passa banda: filtro avente una banda passante che si estende da una frequenza di taglio minore (maggiore di zero) a una frequenza di taglio dal valore più elevato;
- Arresta banda: filtro avente una grande attenuazione in una banda determinata di frequenze e modesta attenuazione per le frequenze al di fuori di questa banda.

Si deve verificare che l'applicazione di un filtro non comporti la perdita di componenti significative del segnale utile secondo la UNI 9916. La scelta del filtro più appropriato può essere effettuata secondo il punto 6 della UNI 11568:2015.

D.3.7 Modalità di acquisizione

La modalità di acquisizione deve essere svolta rispettando i seguenti parametri:

La frequenza di campionamento f_s deve essere maggiore o uguale a $2.56 \times 1.5 \cdot x$ la frequenza massima di misura f_{mm} (vedere la UNI 11568).

$$f_s \geq 2.56 * 1.5 f_{mm} \quad (D.14)$$

- il tempo di registrazione T deve essere:

$$T \geq \frac{1}{\Delta f_{rqd}} \quad (D.15)$$

dove Δf_{rqd} è la risoluzione in frequenza minima richiesta

D.3.8 Numero di segnali

Si dovrebbe calcolare lo spettro di vibrazione mediando lo spettro ottenuto da diversi segnali. Detta $\sigma_N^{(1)}$ la deviazione standard del rumore in frequenza dello spettro ottenuto da un unico segnale, la deviazione standard ottenuta dalla media di N_d spettri può essere calcolata secondo la formula seguente:

$$\sigma_N^{(N_d)} = \frac{\sigma_N^{(1)}}{\sqrt{N_d}} \quad (D.16)$$

Pertanto, quando il rumore di fondo è dominante nella stima dell'incertezza di misura, per soddisfare l'accuratezza richiesta $\sigma_N^{(N_d)} \leq \sigma_{x,lim}$ il numero minimo di segnali che devono essere acquisiti deve essere calcolato tramite la formula seguente:

$$N_d = \left(\frac{\sigma_N^{(1)}}{\sigma_{x,lim}} \right)^2 \quad (D.17)$$

Per maggiori informazioni vedere il punto C.4.2.

D.4 Identificare le sole frequenze naturali della struttura

D.4.1 Obiettivo

L'obiettivo della prova è identificare le sole frequenze naturali della struttura all'interno di un determinato campo di frequenza.

D.4.2 Specifiche della domanda

Le informazioni che devono essere specificate nella richiesta di prova sono:

- frequenza minima f_i e frequenza massima f_f d'interesse;
- risoluzione minima in frequenza richiesta Δf_{rqd} ;
- punti di misura;
- ordine di grandezza dell'ampiezza attesa del segnale x_{max} .

D.4.3 Tecniche d'indagine

Le tecniche d'indagine che devono essere utilizzate sono le seguenti:

- prove con eccitazione ambientale con sorgente di eccitazione vento o traffico (vedere i punti 7.3.1 e 7.3.4);
- prove con eccitazione artificiale impulsiva (vedere il punto 7.2.3);
- prove con eccitazione artificiale sinusoidale o random (vedere i punti 7.2.1 e 7.2.2).

D.4.4 Misura delle frequenze con prova con eccitazione ambientale

D.4.4.1 Fattibilità della prova

In aggiunta a quanto contenuto al punto D.3.4, nel caso si intenda usare una tecnica OMA per identificare le frequenze naturali, si dovrebbero utilizzare dati con rapporto fondo scala del segnale e rumore pari a $\frac{x_{max,lim}}{\sigma_N} > 100$.

D.4.4.2 Strumentazione

La strumentazione che deve essere utilizzata è la seguente:

- accelerometri che devono essere installati in numero e posizioni tali per cui ne risulti almeno uno non in prossimità di una posizione nodale per ciascuna frequenza. Il numero minimo di sensori per poter eseguire correttamente una prova con eccitazione ambientale non deve essere minore di 6. Nel caso in cui si decida di utilizzare un metodo basato sulla correlazione (per esempio una *Frequency Domain Decomposition*, FDD), il rango della matrice della densità spettrale deve essere maggiore o uguale al numero delle frequenze che si vogliono identificare in ciascuna banda di frequenza;
- convertitore A/D;
- amplificatori o condizionatori del segnale.

D.4.4.3 Specifiche della strumentazione

D.4.4.3.1 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- campo di frequenza: vedere il punto D.3.6.1;
- accuratezza $\sigma_{trasduttore}$: vedere il punto D.3.6.1;
- fondo scala $x_{max,lim}$: vedere il punto D.3.6.1;
- sensibilità k_s : vedere il punto D.3.6.1;
- calibrazione σ_{k_s} : non è necessario che l'accelerometro sia calibrato.

D.4.4.3.2 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- frequenza di campionamento: vedere il punto D.3.6.2;
- errore di sincronizzazione: vedere il punto D.3.6.2;
- range: vedere il punto D.3.6.2;
- risoluzione: vedere il punto D.3.6.2.

D.4.4.3.3 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori dei segnali devono essere scelti in modo da soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D, e garantire il successo della prova.

D.4.4.4 Modalità di acquisizione

La modalità di acquisizione deve essere svolta rispettando i seguenti parametri:

- frequenza di campionamento f_s : vedere il punto D.3.7;

- tempo di registrazione T : in aggiunta a quanto specificato al punto D.3.7, si dovrebbe considerare la lunghezza minima delle storie temporali da considerare per una prova con eccitazione ambientale:

$$T > \frac{1}{2\zeta f_{min}} \quad (D.18)$$

Dove

f_{min} è la più bassa frequenza naturale del sistema

ζ è una stima del relativo rapporto di smorzamento

- numero di campioni N : vedere punto D.3.7.

D.4.4.5 Numero di segnali

I segnali registrati durante una prova ambientale sono solitamente di tipo casuale. Per poter trattare segnali di questa tipologia si deve ottenere una stima sufficientemente accurata delle funzioni di densità spettrale e delle funzioni di correlazione; per questo motivo si devono mediare i risultati di più registrazioni di durata T allo scopo di diminuire il rumore.

Solitamente quando si realizzano prove con eccitazione ambientale si registra un unico segnale di durata T_{tot} e successivamente lo si spezza in segnali più brevi di durata T . L'operazione di media può essere eseguita considerando campioni di durata T sia senza che con una certa percentuale di sovrapposizione (*overlap averaging*). Sperimentalmente si è visto che questo secondo procedimento produce spettri più puliti.

Per maggiori informazioni vedere il punto C.4.2.

D.4.5 Misura delle frequenze con prova forzata con eccitazione artificiale impulsiva

D.4.5.1 Fattibilità della prova

Vedere il punto D.3.4.

D.4.5.2 Strumentazione

La strumentazione che deve essere utilizzata è la seguente:

- accelerometri da installare in numero e posizioni tali per cui ne risulti almeno uno non in prossimità di una posizione nodale per ciascuna frequenza;
- percussore avente le caratteristiche indicate al punto A.6;
- convertitore A/D;
- amplificatori o condizionatori del segnale.

D.4.5.3 Specifiche della strumentazione

D.4.5.3.1 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- il campo di frequenza deve essere tra la frequenza minima richiesta f_i e la frequenza massima di misura f_{m} ;

- il fondo scala $x_{max,lim}$ deve essere tale per cui lo strumento non vada in saturazione durante l'esecuzione della prova;
- l'accuratezza $\sigma_{trasduttore}$ deve essere tale per cui il rapporto segnale/rumore $\sigma_S/\sigma_N \geq 10 \text{ dB}$. Questo generalmente è verificato se l'accuratezza del trasduttore non è dominante in σ_N e quindi è migliore del rumore di fondo ambientale $\sigma_{ambientale}$;
- la sensibilità k_s deve essere tale per cui il segnale elettrico trasdotto sia acquisibile dal convertitore A/D;
- calibrazione σ_{ks} : non è necessario che l'accelerometro sia calibrato.

D.4.5.3.2 Percussore

Le specifiche che deve avere il percussore sono le seguenti:

- il campo di frequenza deve essere tra la frequenza minima richiesta f_i e la frequenza massima di misura f_{mm} ;
- la frequenza di taglio (cutoff frequency) f_{cut} deve essere tale per cui il percussore strumentato deve avere una massa M e una rigidità K tale da eccitare allo stesso modo tutte le frequenze fino alla frequenza di taglio data dall'espressione:

$$f_{cut} = 0.8 \left(\frac{3}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{M}} \right) = 0.8 (3f_{percussore}) \quad (D.19)$$

Nella formula (D.19) l'impulso dato dal colpo del percussore è stato approssimato con una funzione semisinusoidale di durata $\tau = \pi \sqrt{\frac{M}{K}} = \frac{1}{2f_{percussore}}$ (vedere Figura 2).

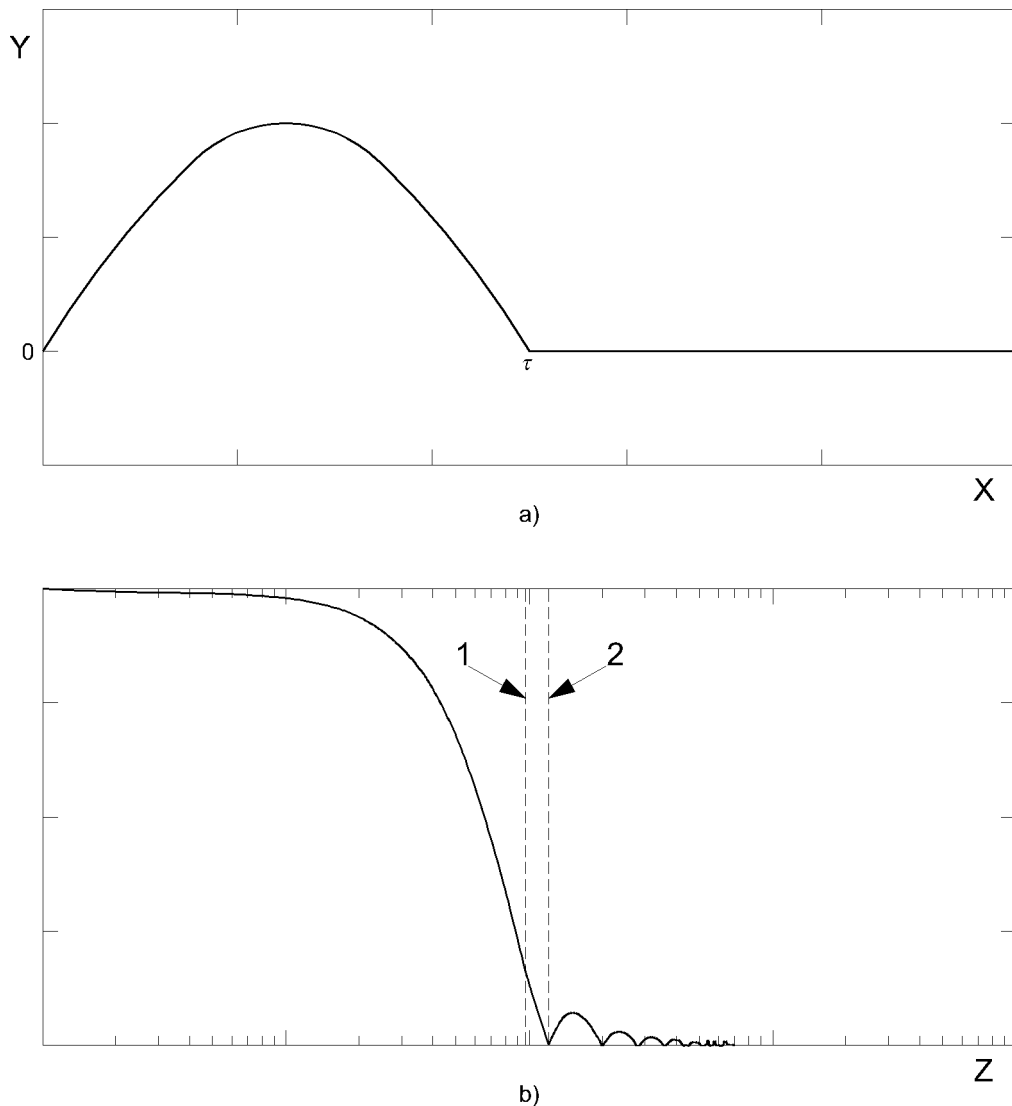


Figura 2 Impulso semisinusoidale: (a) dominio del tempo, (b) trasformata di Fourier (dominio delle frequenze)

Legenda

Y	Forza [N]
X	Tempo [s]
Z	Frequenza [Hz]
1	$f_{cut} = 0.8 f_c$
2	$f_c = \frac{3}{2\tau} = 3f_{percussore}$

- la forza di impatto data dal percussore deve essere tale per cui:
 - la densità spettrale della risposta strutturale nel punto r -esimo $S_{x_r x_r}(f)$ sia maggiore del rumore spettrale dello strumento di misura σ_N^2 :

$$S_{x_r x_r}(f) \geq \sigma_N^2$$

(D.20a)

- l'ampiezza massima della risposta nel punto r -esimo non produca la saturazione dello strumento, e cioè sia minore di $x_{max,lim}$:

$$|X_r^{max}| \leq x_{max,lim} \quad (D.20b)$$

Per quanto riguarda il rispetto della prima condizione (D.20a), considerando un impulso semisinusoidale di durata τ applicato nel punto e -esimo della struttura, e calcolata la sua trasformata di Fourier, lo spettro di potenza dell'impulso può essere calcolato con la seguente formula, riportata anche al punto C.2:

$$S_{p_e p_e}(f) = \frac{1}{\tau} P_e^*(f) P_e(f) = \frac{P_e^2 f_{percussore}^3 (1 + \cos(2\pi f \tau))}{\pi^2 (f + f_{percussore})^2 (f - f_{percussore})^2} \quad (D.21)$$

Data la natura impulsiva della forzante applicata, nel tratto compreso tra 0 e la frequenza di taglio f_{cut} , lo spettro di potenza è ad andamento pressochè costante pari al valore per $f = 0$. Nel caso in esame si ottiene quindi:

$$S_{p_e p_e}(f = 0) = \frac{1}{\tau} P_e^*(f = 0) P_e(f = 0) = \frac{2P_e^2}{\pi^2 f_{percussore}} \quad (D.22)$$

La relazione che lega tra loro le densità spettrali di potenza dell'input (forzante in posizione e -esima) e output (risposta strutturale in posizione r -esima) è la seguente:

$$S_{x_r x_r}(f) = S_{p_e p_e}(f) |H_{re}(f)|^2 \quad (D.23)$$

dove $H_{re}(f)$ è la funzione di risposta in frequenza (FRF) data dall'espressione:

$$H_{re}(f) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{4\pi^2} \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{f_k^2 - f^2 + 2j\zeta_k f_k f} \text{ in spostamento} \quad (D.24a)$$

$$H_{re}(f) = \sum_{k=1}^N f_k^2 \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{f_k^2 - f^2 + 2j\zeta_k f_k f} \text{ in accelerazione} \quad (D.24b)$$

in cui $\phi_r^{(k)}$ e $\phi_e^{(k)}$ sono le componenti r -esima e e -esima del k -esimo modo di vibrare normalizzate rispetto alla massa modale m_k , mentre f_k e ζ_k sono rispettivamente la frequenza propria e il rapporto di smorzamento del k -esimo modo di vibrare.

In condizione di risonanza per il k -esimo modo di vibrare ($f = f_k$ con $f_k < f_{cut}$), il termine k -esimo della sommatoria di $H_{re}(f)$ è dominante sui rimanenti per cui:

$$H_{re}(f = f_k) \cong \frac{1}{4\pi^2} \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2j\zeta_k f_k^2} \text{ in spostamento} \quad (D.25a)$$

$$H_{re}(f = f_k) \cong \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2i\zeta_k} \text{ in accelerazione} \quad (D.25b)$$

Nel caso di misura con accelerometri, la disequaglianza (D.20a) si traduce quindi nella condizione:

$$P_e \geq \sqrt{\frac{2\pi^2 \zeta_k^2 \sigma_N^2 f_{percussore}}{|\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}|^2}} \quad (D.26)$$

Nel caso specifico di un impalcato da ponte schematizzabile con un modello unidimensionale di trave semplicemente appoggiata e con massa totale $M_{impalcato}$ uniformemente distribuita lungo la sua lunghezza L , la componente modale r -esima, corrispondente alla coordinata lineare s_r , può essere espressa come:

$$\phi_r^{(k)} = \left(\sqrt{\frac{2}{M_{impalcato}}} \sin\left(\frac{k\pi}{L} s_r\right) \right) \text{ con } k = 1, 2 \dots \quad (D.27)$$

Pertanto, il valore minimo della forza di impatto del percussore risulta:

$$P_e \geq \frac{\pi \zeta_k \sigma_N M_{impalcato} \sqrt{f_{percussore}}}{\sqrt{2}} \quad (D.28)$$

Per quanto riguarda il rispetto della seconda condizione (D.20b), dato che con una prova forzata impulsiva si eccitano allo stesso modo tutte le frequenze proprie della struttura fino alla frequenza di taglio f_{cut} , per il principio di sovrapposizione degli effetti, il limite superiore della risposta strutturale può essere cautelativamente espresso come somma dei valori ottenuti in corrispondenza di tutti gli R punti di risonanza fino a f_{cut} :

$$|X_r^{max}| \leq \sum_{k=1}^R |P_e(f_k)| |H_{re}(f_k)| \quad (D.29)$$

In questo caso si è ipotizzato che vi sia perfetta sincronia dei modi di vibrare fino a f_{cut} .

Affinché lo strumento di misura non vada in saturazione si deve verificare che:

$$|X_r^{max}| \leq \sum_{k=1}^R |P_e(f_k)| |H_{re}(f_k)| \leq x_{max,lim} \quad (D.30)$$

D.4.5.3.3 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- frequenza di campionamento: vedere il punto D.3.6.2;
- errore di sincronizzazione: normalmente se si è interessati alle sole frequenze l'errore di sincronizzazione non è critico e può essere trascurato;
- range: vedere il punto D.3.6.2;
- risoluzione: vedere il punto D.3.6.2.

D.4.5.3.4 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori del segnale devono essere scelti in modo da soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D, e garantire il successo della prova.

D.4.5.4 Modalità di acquisizione

La modalità di acquisizione deve essere svolta rispettando i seguenti parametri:

- frequenza di campionamento f_s : vedere il punto D.3.7;
- tempo di registrazione T: vedere il punto D.3.7;
- numero di campioni N: vedere il punto D.3.7.

D.4.5.5 Numero di segnali

Si deve eseguire la prova in un numero sufficiente di punti per cui ci sia almeno uno dei punti di battuta che non sia nodo per le forme modali corrispondenti alle forme modali che si vogliono indagare.

D.4.6 Misura delle frequenze con prova forzata eccitazione artificiale sinusoidale o random

D.4.6.1 Fattibilità della prova

Vedere il punto D.3.4.

D.4.6.2 Strumentazione

La strumentazione che deve essere utilizzata è la seguente:

- accelerometri da installare in numero e posizioni tali per cui ne risulti almeno uno non in prossimità di una posizione nodale per ciascuna frequenza;
- vibrodina avente le caratteristiche indicate nell'Appendice A;
- convertitore A/D;
- amplificatori o condizionatori del segnale.

D.4.6.3 Specifiche della strumentazione

D.4.6.3.1 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- il campo di frequenza deve essere tra la frequenza minima richiesta f_i e la frequenza massima di misura f_{mm} ;
- il fondo scala $x_{max,lim}$ deve essere tale per cui lo strumento non vada in saturazione durante l'esecuzione della prova;
- l'accuratezza $\sigma_{trasduttore}$ deve essere tale per cui il rapporto segnale/rumore $\sigma_S/\sigma_N \geq 10 \text{ dB}$. Questo generalmente è verificato se l'accuratezza del trasduttore non è dominante in σ_N e quindi è migliore del rumore di fondo ambientale $\sigma_{ambientale}$;
- la sensibilità k_s deve essere tale per cui il segnale elettrico trasdotto sia acquisibile dal convertitore A/D;
- calibrazione σ_{k_s} : non è necessario che l'accelerometro sia calibrato.

D.4.6.3.2 Vibrodina

Le specifiche che deve avere la vibrodina sono le seguenti:

- il campo di frequenza deve essere tra la frequenza minima richiesta f_i e la frequenza massima di misura f_{mm} ;
- la forza erogabile deve essere tale per cui:
 - il rapporto fra l'ampiezza della risposta strutturale nel punto r -esimo per ciascuna delle frequenze naturali $|X_r(f = f_k)|$ e il rumore σ_N sia sufficientemente alto, e comunque non minore di 10dB:

$$|X_r(f = f_k)| \geq 10 \sigma_N \quad (\text{D.31a})$$

- l'ampiezza massima della risposta non produca la saturazione dello strumento, e cioè sia minore di $x_{max,lim}$:

$$|X_r(f = f_k)| \leq x_{max,lim} \quad (\text{D.31b})$$

- l'ampiezza della risposta nel punto r -esimo, quando la vibrodina è applicata nel punto e -esimo, può essere stimata con:

$$|X_r(f = f_k)| = |P_e(f = f_k)| |H_{re}(f = f_k)| \quad (D.32)$$

dove $H_{re}(f)$ è la funzione di risposta in frequenza (FRF) data dall'espressione:

$$H_{re}(f) = \sum_{k=1}^N \frac{1}{4\pi^2} \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{f_k^2 - f^2 + 2j\zeta_k f_k f} \text{ in spostamento} \quad (D.33a)$$

$$H_{re}(f) = \sum_{k=1}^N f_k^2 \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{f_k^2 - f^2 + 2j\zeta_k f_k f} \text{ in accelerazione} \quad (D.33b)$$

dove

$\phi_r^{(k)}$ e $\phi_e^{(k)}$ sono le componenti r -esima e e -esima del k -esimo modo di vibrare normalizzate rispetto alla massa modale m_k ,

f_k e ζ_k sono rispettivamente la frequenza propria e il rapporto di smorzamento del k -esimo modo di vibrare.

In condizione di risonanza per il k -esimo modo di vibrare ($f = f_k$), il termine k -esimo della sommatoria di $H_{re}(f)$ è dominante sui rimanenti per cui:

$$H_{re}(f = f_k) \cong \frac{1}{4\pi^2} \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2j\zeta_k f_k^2} \text{ in spostamento} \quad (D.34a)$$

$$H_{re}(f = f_k) \cong \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2j\zeta_k} \text{ in accelerazione} \quad (D.34b)$$

Nel caso di misura con accelerometri, assumendo, in accordo con l'espressione (D.31a), che sia richiesto un rapporto segnale rumore di almeno 10 dB, il valore minimo della forza erogabile dalla vibrodina per ciascuna frequenza naturale risulta:

$$|P_e(f = f_k)| \geq \frac{2\zeta_k 10\sigma_N}{|\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}|} \quad (D.35)$$

Analogamente, il valore massimo della forza erogabile dalla vibrodina per evitare la saturazione degli accelerometri risulta:

$$|P_e(f = f_k)| \leq \frac{2\zeta_k x_{max,lim}}{|\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}|} \quad (D.36)$$

Nel caso specifico di un impalcato da ponte schematizzabile con un modello unidimensionale di trave semplicemente appoggiata e con massa totale $M_{impalcato}$ uniformemente distribuita lungo la sua lunghezza L , la componente modale r -esima corrispondente alla coordinata lineare s_r può essere espressa come:

$$\phi_r^{(k)} = \left(\sqrt{\frac{2}{M_{impalcato}}} \sin\left(\frac{k\pi}{L} s_r\right) \right) \text{ con } k = 1, 2, \dots \quad (D.37)$$

Pertanto, i valori minimo e massimo della forza erogabile dalla vibrodina risultano:

$$|P_e(f = f_k)| \geq 10 \zeta_k M_{impalcato} \sigma_N \quad (D.38)$$

$$|P_e(f = f_k)| \leq \zeta_k M_{impalcato} x_{max,lim} \quad (D.39)$$

D.4.6.3.3 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- frequenza di campionamento: vedi punto D.3.6.2;
- errore di sincronizzazione: normalmente se si è interessati alle sole frequenze l'errore di sincronizzazione non è critico e può essere trascurato;

- range: vedere il punto D.3.6.2;
- risoluzione: vedere il punto D.3.6.2.

D.4.6.3.4 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori del segnale devono essere scelti in modo da soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D, e garantire il successo della prova.

D.4.6.4 Modalità di acquisizione

La modalità di acquisizione deve essere svolta rispettando i seguenti parametri:

- frequenza di campionamento f_s : vedere il punto D.3.7;
- tempo di registrazione T: vedere il punto D.3.7;
- numero di campioni N: vedere il punto D.3.7.

D.4.6.5 Numero di segnali

Per il numero di segnali vedere il punto C.3.

D.5 Identificare la funzione di risposta in frequenza

D.5.1 Obiettivo

L'obiettivo della prova è identificare la funzione di risposta in frequenza (FRF) per determinate coppie di punti della struttura.

D.5.2 Specifiche della domanda

Le informazioni che devono essere specificate nella richiesta di prova sono:

- frequenza minima f_i e frequenza massima f_f d'interesse;
- risoluzione minima in frequenza richiesta Δf_{rqd} ;
- coppie di punti di misura ed eccitazione;
- ordine di grandezza dell'ampiezza attesa della FRF $H_{max} = \max(|H_{re}(f)|)$ in corrispondenza delle frequenze di risonanza della struttura;
- ampiezza minima della FRF che si intende risolvere $\sigma_{H,lim}$ in corrispondenza delle frequenze di antirisonanza della struttura.

D.5.3 Tecniche d'indagine

Le tecniche d'indagine che devono essere utilizzate sono le seguenti:

- prove con eccitazione artificiale impulsiva (vedere il punto 7.2.3);
- prove con eccitazione artificiale sinusoidale o random (vedere i punti 7.2.1 e 7.2.2).

D.5.4 Misura della FRF con prova forzata con eccitazione artificiale impulsiva

D.5.4.1 Fattibilità della prova

Vedere il punto D.3.4.

D.5.4.2 Strumentazione

La strumentazione che deve essere utilizzata è la seguente:

- accelerometri da installare in numero e posizioni tali per cui ne risulti almeno uno non in prossimità di una posizione nodale per ciascuna frequenza;
- percussore avente le caratteristiche indicate al punto A.6;
- convertitore A/D;
- amplificatori o condizionatori del segnale.

D.5.4.3 Specifiche della strumentazione

D.5.4.4 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- campo di frequenza: vedere il punto D.4.5.3;
- accuratezza $\sigma_{trasduttore}$: vedere il punto D.4.5.3;
- fondo scala $x_{max,lim}$: vedere il punto D.4.5.3;
- sensibilità k_s : vedere il punto D.4.5.3;
- calibrazione σ_{ks} : vedere il punto D.3.6.1.

D.5.4.5 Percussore

Le specifiche che deve avere il percussore sono le seguenti:

- campo di frequenza: vedere il punto D.4.5.3;
- frequenza di taglio (*cutoff frequency*): vedere il punto D.4.5.3;
- forza di impatto: il colpo dato dal percussore deve essere tale che per cui:
 - si possano distinguere nel grafico della FRF i punti di antirisonanza del sistema (punti di minimo);
 - l'ampiezza massima della risposta nel punto r -esimo non produca la saturazione dello strumento, e cioè sia minore di $x_{max,lim}$.

Per quanto riguarda la prima condizione, propagando l'incertezza delle misure e assumendo che l'incertezza su $P_e(f)$, denominata con $\sigma_{P_e}^2$, sia trascurabile rispetto all'incertezza σ_{x_r} , della misura dell'accelerometro, si ottiene che per poter distinguere i punti di antirisonanza deve valere la condizione:

$$\sigma_{H_{re}} \cong \frac{\sigma_{x_r}}{P_e(f)} \leq \sigma_{H,lim} \quad (D.40)$$

Da cui si ricava

$$P_e(f) \geq \frac{\sigma_{X_r}}{\sigma_{H,lim}} \quad (D.41)$$

Ipotizzando che l'impulso dato dal percussore sia approssimabile come una funzione semisinusoidale di durata τ si ha che la trasformata di Fourier è pressoché costante fino al valore della frequenza di taglio f_{cut} e pari circa a $P_e(f=0) = \frac{P_e}{\pi f_{percussore}}$. La forza minima di impatto è quindi data dall'espressione:

$$P_e \geq \frac{\pi \sigma_{X_r} f_{percussore}}{\sigma_{H,lim}} \quad (D.42)$$

Per quanto riguarda invece la seconda condizione si rimanda al punto D.4.5.3.

D.5.4.6 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- frequenza di campionamento: vedere il punto D.3.6.2;
- l'errore di sincronizzazione deve essere minore di 1/10 del periodo di campionamento $\Delta t = 1/f_s$, salvo diversa richiesta del committente;
- range: vedere il punto D.3.6.2;
- risoluzione: vedere il punto D.3.6.2.

D.5.4.7 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori del segnale devono essere scelti in modo da soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D, e garantire il successo della prova.

D.5.4.8 Modalità di acquisizione

La modalità di acquisizione deve essere svolta rispettando i seguenti parametri:

- frequenza di campionamento f_s : vedere il punto D.3.7;
- tempo di registrazione T: vedere il punto D.3.7;
- numero di campioni N: vedere il punto D.3.7.

D.5.4.9 Numero di segnali

In maniera analoga a quanto svolto al punto D.3.6.8, si dovrebbe calcolare la funzione di risposta in frequenza (FRF) mediando le funzioni ottenute da diversi segnali. Chiamata $\sigma_H^{(1)}$ la deviazione standard del rumore in frequenza della FRF ottenuta da un unico segnale, la deviazione standard ottenuta dalla media di N_d funzioni è:

$$\sigma_H^{(N_d)} = \frac{\sigma_H^{(1)}}{\sqrt{N_d}} \quad (D.43)$$

Pertanto, per soddisfare l'accuratezza richiesta $\sigma_H^{(N_d)} \leq \sigma_{H,lim}$ il numero minimo di segnali da acquisire è:

$$N_d = \left(\frac{\sigma_H^{(1)}}{\sigma_{H,lim}} \right)^2 \quad (D.44)$$

D.5.5 Misura della FRF con prova forzata eccitazione artificiale sinusoidale o random

D.5.5.1 Fattibilità della prova

Vedere il punto D.3.4.

D.5.5.2 Strumentazione

La strumentazione che deve essere utilizzata è la seguente:

- accelerometri da installare in numero e posizioni tali per cui ne risulti almeno uno non in prossimità di una posizione nodale per ciascuna frequenza;
- vibrodina avente le caratteristiche indicate nell'Appendice A;
- convertitore A/D;
- amplificatori o condizionatori del segnale.

D.5.5.3 Specifiche della strumentazione

D.5.5.3.1 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- campo di frequenza: vedere il punto D.4.6.3;
- accuratezza: vedere il punto D.4.6.3;
- fondo scala $x_{max,lim}$: vedere il punto D.4.6.3;
- sensibilità k_s : vedere il punto D.4.6.3;
- calibrazione σ_{k_s} : vedere il punto D.3.6.1.

D.5.5.3.2 Vibrodina

Le specifiche che deve avere la vibrodina sono le seguenti:

- campo di frequenza: vedere il punto D.4.6.3;
- la forza erogabile deve essere tale per cui la vibrodina è in grado di erogare una forza tale che si possano distinguere nel grafico della FRF i punti di antirisonanza del sistema (punti di minimo) e nel contempo anche i punti di risonanza (punti di massimo) senza mandare in saturazione gli strumenti di misura.

Propagando l'incertezza delle misure e assumendo che l'incertezza su $P_e(f)$, denominata con $\sigma_{P_e}^2$, sia trascurabile rispetto all'incertezza σ_{X_r} della misura dell'accelerometro, si ottiene che per poter distinguere i punti di antirisonanza deve valere la condizione:

$$\sigma_{H_{re}} \cong \frac{\sigma_{X_r}}{P_e(f)} \leq \sigma_{H,lim} \quad (D.45)$$

Da cui si ricava

$$P_e(f) \geq \frac{\sigma_{X_r}}{\sigma_{H,lim}} \quad (D.46)$$

Per quanto riguarda il valore massimo della forza erogabile dalla vibrodina, essa deve essere tale che gli strumenti di misura non vadano in saturazione nel corso della prova (vedere il punto D.4.6.3).

D.5.5.3.3 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- frequenza di campionamento: vedere il punto D.3.6.2;
- l'errore di sincronizzazione deve essere minore di 1/10 del periodo di campionamento $\Delta t = 1/f_s$, salvo diversa richiesta del committente;
- range: vedere il punto D.3.6.2;
- risoluzione: vedere il punto D.3.6.2.

D.5.5.3.4 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori del segnale devono essere scelti in modo da soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D, e garantire il successo della prova.

D.5.5.4 Modalità di acquisizione

La modalità di acquisizione deve essere svolta rispettando i seguenti parametri:

- frequenza di campionamento f_s : vedere il punto D.3.7;
- tempo di registrazione T: vedere il punto D.3.7;
- numero di campioni N: vedere il punto D.3.7.

D.5.5.5 Numero di segnali

Vedere il punto C.3.

D.6 Estrarre i parametri modali

D.6.1 Obiettivo

L'obiettivo della prova è estrarre i parametri modali della struttura (frequenze naturali, rapporti di smorzamento e forme modali). L'operazione di estrazione può essere effettuata mediante tecniche sia nel dominio del tempo che delle frequenze.

D.6.2 Specifiche della domanda

Le informazioni che devono essere specificate nella richiesta di prova sono:

- frequenza minima f_i e frequenza massima f_f d'interesse;
- accuratezza delle frequenze naturali che devono essere estratte $\sigma_{f,lim}$;
- accuratezza dei rapporti di smorzamento che devono essere estratti $\sigma_{\zeta,lim}$;
- modi per i quali devono essere estratte le componenti modali e i corrispondenti punti di misura;
- se i modi devono essere normalizzati rispetto alla massa, oppure rispetto alla componente modale massima;

- accuratezza delle componenti modali che devono essere estratte $\sigma_{\phi,lim}$;
- incertezza a priori di ciascuno dei parametri modali.

D.6.3 Tecniche d'indagine

Le tecniche d'indagine che devono essere utilizzate sono le seguenti:

- prove con eccitazione ambientale con sorgente di eccitazione vento o traffico (vedere i punti 7.3.1 e 7.3.4);
- prove con eccitazione artificiale impulsiva (vedere il punto 7.2.3);
- prove con eccitazione artificiale sinusoidale o random (vedere i punti 7.2.1 e 7.2.2).

D.6.4 Misura dei parametri modali con prova con eccitazione ambientale

L'estrazione dei parametri modali può essere eseguita mediante tecniche sia nel dominio del tempo che delle frequenze. Due delle tecniche di estrazione attualmente più utilizzate sono:

- *Stochastic Subspace Identification* (SSI) per quanto riguarda l'estrazione nel dominio del tempo;
- *Frequency Domain Decomposition* (FDD) per quanto riguarda l'estrazione nel dominio delle frequenze.

Le tecniche di estrazione nel dominio del tempo consistono nel ricavare i parametri modali partendo dalle funzioni di correlazione mentre le tecniche di estrazione nel dominio delle frequenze utilizzano le densità spettrali.

In ogni caso, la prova con eccitazione ambientale non permette l'estrazione diretta delle componenti modali normalizzate rispetto alla massa.

D.6.4.1 Fattibilità della prova

La fattibilità della prova può basarsi su indicazioni operative ricavate dalla letteratura per casi analoghi. In alternativa, si riporta di seguito un possibile approccio per la valutazione. Per brevità è indicato con y_i il generico parametro modale che deve essere estratto, che può essere una frequenza naturale, un rapporto di smorzamento o una componente modale.

La prova è fattibile se l'incertezza di ciascun parametro modale che ci si aspetta di ottenere dopo aver eseguito la prova è inferiore all'incertezza accettabile specificata nella domanda di prova.

Nel caso in cui l'incertezza sia rappresentata attraverso la varianza del parametro modale, la prova è fattibile se la stima a priori della varianza a posteriori di ciascuno dei parametri modali $\sigma_{y_i|x}^2$ è migliore della corrispondente accuratezza richiesta $\sigma_{y_i,lim}^2$:

$$\sigma_{y_i|x}^2 \leq \sigma_{y_i,lim}^2 \quad (D.47)$$

Non si esegue alcuna prova nel caso in cui l'incertezza a priori di ciascun dei parametri modali sia migliore dell'accuratezza richiesta:

$$\sigma_{y_i}^2 \leq \sigma_{y_i,lim}^2 \quad (D.48)$$

D.6.4.2 Specifiche della strumentazione, modalità di acquisizione e numero di segnali

Le specifiche della strumentazione, le modalità di acquisizione e il numero di segnali devono essere scelti come specificato al punto D.5.4 in maniera tale da soddisfare i criteri di cui al punto D.6.4.1.

D.6.4.3 Stima dell'incertezza a posteriori dei parametri modali

In generale l'incertezza a posteriori dei parametri estratti dipende dal metodo di estrazione utilizzato. A ogni modo, per ciascuno dei parametri modali estratti deve valere la condizione (D.47).

D.6.5 Misura dei parametri con prova forzata con eccitazione artificiale impulsiva

L'estrazione dei parametri modali può essere eseguita mediante tecniche sia nel dominio del tempo che delle frequenze.

Le tecniche di estrazione nel dominio del tempo consistono nel ricavare i parametri modali approssimando opportunamente i punti sperimentali delle oscillazioni libere della risposta strutturale causata da una forzante esterna mentre le tecniche di estrazione nel dominio delle frequenze si basano su un'opportuna approssimazione della FRF.

D.6.5.1 Specifiche della strumentazione, modalità di acquisizione e numero di segnali

Le specifiche della strumentazione, le modalità di acquisizione e il numero di segnali devono essere scelti come specificato al punto D.5.4 in maniera da ottenere un'accuratezza della FRF σ_H tale da soddisfare la relazione (D.47).

D.6.5.2 Stima a priori dell'incertezza a posteriori dei parametri modali

D.6.5.2.1 Generale

In generale l'incertezza a posteriori dei parametri estratti dipende dal metodo di estrazione utilizzato. Si riportano nel seguito alcune indicazioni pratiche per l'estrazione dei parametri modali usando il metodo del *curve fitting* della FRF, nota l'incertezza in ampiezza della FRF σ_H e la risoluzione in frequenza Δf_{rqd} .

D.6.5.2.2 Frequenze modali

In generale l'incertezza attesa nella stima delle frequenze naturali σ_f è dello stesso ordine di grandezza della risoluzione in frequenza della FRF $\Delta f_{rqd} = \frac{1}{T_{eff}}$ dove T_{eff} è il tempo efficace di acquisizione definito come il minimo fra il tempo di acquisizione e il tempo necessario alle oscillazioni libere per smorzarsi, ossia diventare più piccole del rumore di fondo σ_N dello strumento di misura. L'ampiezza (in spostamento) delle oscillazioni libere è data dalla formula seguente:

$$|x(t, f)| = |x_{max} e^{-\zeta 2\pi f t} \sin(2\pi f t)| = |x_{max}| e^{-\zeta 2\pi f t} \quad (D.49)$$

Dove con x_{max} è indicata l'ampiezza massima della risposta (in spostamento).

La condizione da imporre per il calcolo di $T_{eff}(f)$ è:

$$|x(t, f)| = \sigma_N \quad (D.50)$$

Da cui si ottiene:

$$T_{eff}(f) = \frac{1}{\zeta 2\pi f} \ln\left(\frac{x_{max}}{\sigma_N}\right) \quad (D.51)$$

L'incertezza σ_f può quindi essere espressa come:

$$\sigma_f \cong \frac{1}{T_{eff}(f)} = \frac{\zeta 2\pi f}{\ln\left(\frac{x_{max}}{\sigma_N}\right)} \quad (D.52)$$

Quando viene utilizzata una tecnica di *peak-picking* per l'estrazione delle frequenze modali, l'incertezza σ_f può anche essere molto maggiore di Δf_{rqd} a seconda dell'incertezza della FRF σ_H .

D.6.5.2.3 Rapporti di smorzamento

L'incertezza attesa nella stima dei rapporti di smorzamento σ_ζ può essere calcolata in prima approssimazione attraverso la propagazione degli errori.

Ponendosi nella condizione di risonanza per il k -esimo modo di vibrare ($f = f_k$) la FRF, espressa come inerzia, è data da:

$$H_{re}(f = f_k) = \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2\zeta_k} \quad (D.53)$$

Supponendo di effettuare il *curve fitting*, nell'intorno del punto di risonanza $f = f_k$, andando a modificare il solo rapporto di smorzamento ζ_k risulta la seguente relazione tra le incertezze della FRF σ_H e del rapporto di smorzamento σ_{ζ_k} :

$$\sigma_H = \frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial \zeta_k} \sigma_{\zeta_k} \quad (D.54)$$

Da cui:

$$\sigma_{\zeta_k} = \left(\frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial \zeta_k} \right)^{-1} \sigma_H \quad (D.55)$$

La sensitività $\frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial \zeta_k}$ è data dall'espressione:

$$\frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial \zeta_k} = \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2} \left(-\frac{1}{\zeta_k^2} \right) \quad (D.56)$$

E quindi, trascurando il segno, si ottiene che:

$$\sigma_{\zeta_k} = \frac{2\zeta_k^2}{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}} \sigma_H = \zeta_k \frac{2\zeta_k}{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}} \sigma_H = \zeta_k \frac{\sigma_H}{H_{re}(f=f_k)} \quad (D.57)$$

La formula (D.57) può essere espressa equivalentemente in termini di coefficienti di variazione $CoV_{\zeta_k} = \frac{\sigma_{\zeta_k}}{\zeta_k}$ e $CoV_H = \frac{\sigma_H}{H_{re}(f=f_k)}$:

$$CoV_{\zeta_k} = CoV_H \quad (D.58)$$

D.6.5.2.4 Componenti modali

L'incertezza attesa nella stima delle componenti modali $\sigma_{\phi_r^{(k)}}$ e $\sigma_{\phi_e^{(k)}}$ può essere calcolata in prima approssimazione attraverso la propagazione degli errori.

Ponendosi nella condizione di risonanza per il k -esimo modo di vibrare ($f = f_k$) si ha che la FRF, espressa come inerzia, è data da:

$$H_{re}(f = f_k) = \frac{\phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}}{2\zeta_k} = \frac{A_{re}^{(k)}}{2\zeta_k} \quad (D.59)$$

Dove si è indicato con $A_{re}^{(k)}$ il prodotto delle componenti modali $\phi_r^{(k)}$ e $\phi_e^{(k)}$.

Supponendo di effettuare il *curve fitting*, nell'intorno del punto di risonanza $f = f_k$, andando a modificare il solo parametro $A_{re}^{(k)}$ si ha che è valida la seguente relazione tra le incertezze della FRF σ_H e del rapporto di smorzamento $\sigma_{A_{re}^{(k)}}$:

$$\sigma_H = \frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial A_{re}^{(k)}} \sigma_{A_{re}^{(k)}} \quad (D.60)$$

Da cui si ottiene:

$$\sigma_{A_{re}^{(k)}} = \left(\frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial \zeta_k} \right)^{-1} \sigma_H \quad (D.61)$$

La sensitività $\frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial A_{re}^{(k)}}$ è data dall'espressione:

$$\frac{\partial H_{re}(f=f_k)}{\partial \zeta_k} = \frac{1}{2\zeta_k} \quad (D.62)$$

E quindi si ottiene che:

$$\sigma_{A_{re}^{(k)}} = 2\zeta_k \sigma_H \quad (D.63)$$

A questo punto si distinguono due casi distinti:

- stima della componente modale nel punto in cui viene applicata la forzante ($r = e$): $A_{rr}^{(k)} = (\phi_r^{(k)})^2$;
- stima della componente modale in un qualsiasi altro punto diverso da quello in cui viene applicata la forzante ($r \neq e$): $A_{re}^{(k)} = \phi_r^{(k)} \phi_e^{(k)}$;

Nel primo caso la componente modale $\phi_r^{(k)}$ è data dall'espressione:

$$\phi_r^{(k)} = \sqrt{A_{rr}^{(k)}} \quad (D.64)$$

Da cui, effettuando la propagazione degli errori si ottiene:

$$\sigma_{\phi_r^{(k)}} = \frac{\partial \phi_r^{(k)}}{\partial A_{rr}^{(k)}} \sigma_{A_{rr}^{(k)}} = \frac{1}{2\sqrt{A_{rr}^{(k)}}} \sigma_{A_{rr}^{(k)}} = \frac{1}{2} \phi_r^{(k)} \frac{\sigma_{A_{rr}^{(k)}}}{A_{rr}^{(k)}} \quad (D.65)$$

La formula (D.65) può essere espressa equivalentemente in termini di coefficienti di variazione $CoV_{\phi_r^{(k)}} =$

$$\frac{\sigma_{\phi_r^{(k)}}}{\phi_r^{(k)}} \text{ e } CoV_{A_{rr}^{(k)}} = \frac{\sigma_{A_{rr}^{(k)}}}{A_{rr}^{(k)}}:$$

$$2CoV_{\phi_r^{(k)}} = CoV_{A_{rr}^{(k)}} \quad (D.66)$$

Nel secondo caso la componente modale $\phi_e^{(k)}$ è data dall'espressione:

$$\phi_e^{(k)} = \frac{A_{re}^{(k)}}{\phi_r^{(k)}} \quad (D.67)$$

Da cui, effettuando la propagazione degli errori si ottiene:

$$\sigma_{\phi_e^{(k)}}^2 = \left(\frac{\partial \phi_e^{(k)}}{\partial A_{re}^{(k)}} \right)^2 \sigma_{A_{re}^{(k)}}^2 + \left(\frac{\partial \phi_e^{(k)}}{\partial \phi_r^{(k)}} \right)^2 \sigma_{\phi_r^{(k)}}^2 \quad (D.68)$$

Sviluppando i termini contenuti nell'equazione (D.68) e sapendo che $\sigma_{A_{re}^{(k)}} = \sigma_{A_{rr}^{(k)}} = 2\zeta_k \sigma_H$, si ottiene la formula:

$$\sigma_{\phi_e^{(k)}} = \frac{\sigma_{A_{re}^{(k)}}}{\phi_r^{(k)}} \sqrt{1 + \left(\frac{\phi_e^{(k)}}{2\phi_r^{(k)}} \right)^2} \quad (D.69)$$

D.6.6 Misura dei parametri modali con prova forzata eccitazione artificiale sinusoidale o random

D.6.6.1 Specifiche della strumentazione, modalità di acquisizione e numero di segnali

Le specifiche della strumentazione, le modalità di acquisizione e il numero di segnali devono essere scelti come specificato al punto D.5.5 in maniera ottenere un'accuratezza della FRF σ_H tale da soddisfare la relazione (D.47).

D.6.6.2 Stima a priori dell'incertezza a posteriori dei parametri modali

D.6.6.2.1 Generalità

In generale l'incertezza a posteriori dei parametri estratti dipende dal metodo di estrazione utilizzato. Si riportano nel seguito alcune indicazioni pratiche per l'estrazione dei parametri modali usando il metodo del *curve fitting* della FRF, nota l'incertezza in ampiezza della FRF σ_H e la risoluzione in frequenza Δf_{rqd} .

D.6.6.2.2 Frequenze modali

In generale l'incertezza attesa nella stima delle frequenze naturali σ_f è dello stesso ordine di grandezza della risoluzione in frequenza della FRF Δf_{rqd} .

Di solito quando si realizza una prova forzata con vibrodina, si dovrebbero infittire i punti sperimentali della FRF in prossimità dei punti di risonanza in modo tale da avere localmente una maggiore risoluzione in frequenza, diminuendo di conseguenza l'incertezza σ_f .

D.6.6.2.3 Rapporti di smorzamento

Vedere il punto D.6.4.5.

D.6.6.2.4 Componenti modali

Vedere il punto D.6.4.5.

D.7 Identificare i parametri di un modello

D.7.1 Obiettivo

L'obiettivo è identificare i parametri meccanici di un modello numerico (per esempio un modello ad elementi finiti) della struttura a partire dalla conoscenza dei parametri modali estratti (frequenze naturali, componenti dei modi di vibrare e smorzamenti modali). Alcuni tipici esempi di parametri meccanici di interesse sono rigidità, masse e condizioni di vincolo.

D.7.2 Specifiche della domanda

Le informazioni che devono essere specificate nella richiesta di prova sono:

- l'elenco dei parametri meccanici del modello da identificare, nel seguito rappresentati da un vettore θ ;
- l'accuratezza con cui questi parametri sono richiesti. Questa può essere rappresentata dalla matrice di covarianza a posteriori (cioè, del modello aggiornato) accettabile $\Sigma_{\theta,lim}$, oppure dall'elenco delle varianze massime a posteriori accettabili per l'*i*-esimo parametro meccanico $\sigma_{\theta_i,lim}^2$, ovvero dalla corrispondente deviazione standard;
- il valore dei parametri a priori (cioè il valore dei parametri di primo tentativo) μ_{θ} ;

- l'incertezza a priori dei parametri. Questa può essere rappresentata dalla matrice di covarianza a priori dei parametri Σ_{θ} ;
- i parametri modali con cui si intende procedere all'identificazione (elenco delle frequenze, delle componenti e degli smorzamenti modali).

D.7.3 Tecniche d'indagine

Nel caso in cui si intenda procedere all'identificazione del modello con le sole frequenze naturali, le tecniche di indagine e i metodi per stimare l'accuratezza delle frequenze devono essere quelli riportati nel caso d'uso di cui al punto D.4.

Nel caso in cui si intenda procedere all'identificazione del modello anche con le componenti modali e/o smorzamenti modali, le tecniche di indagine e i metodi per stimare l'accuratezza attesa dei parametri modali estratti devono essere quelli riportati nel caso d'uso di cui al punto D.6.

D.7.4 Fattibilità della prova

La prova è fattibile se la stima a priori della varianza a posteriori (cioè, l'incertezza che ci si aspetta di avere dopo aver eseguito l'aggiornamento del modello a valle delle prove) di ciascuno dei parametri meccanici $\sigma_{\theta_i|y}^2$ è migliore dell'accuratezza richiesta $\sigma_{\theta_i,lim}^2$.

$$\sigma_{\theta_i|y}^2 \leq \sigma_{\theta_i,lim}^2 \quad (D.70)$$

Ovviamente, non ha senso eseguire alcuna prova nel caso in cui la varianza a priori di ciascun parametro sia migliore dell'accuratezza richiesta.

$$\sigma_{\theta_i}^2 \leq \sigma_{\theta_i,lim}^2 \quad (D.71)$$

D.7.5 Stima a priori della varianza a posteriori

La varianza a posteriori di ciascun parametro meccanico $\sigma_{\theta_i|y}^2$ può essere stimata a priori (cioè, prima di eseguire la prova) con le seguenti ipotesi semplificative:

- la relazione fra i parametri meccanici θ e i parametri modali forniti dal modello numerico $\hat{y}(\theta)$ è approssimativamente lineare attorno al valore a priori dei parametri meccanici μ_{θ} :

$$\hat{y}(\theta) = D \cdot \theta + \hat{y}(\mu_{\theta}) \quad (D.72)$$

Dove D è la matrice di sensitività che approssima il modello numerico con una funzione lineare.

- l'incertezza a priori dei parametri meccanici è gaussiana:

$$\theta \sim N(\mu_{\theta}, \Sigma_{\theta}) \quad (D.73)$$

- l'incertezza del residuo, cioè lo scarto fra i parametri modali sperimentali della struttura e i parametri modali del modello, è gaussiana:

$$y - \hat{y}(\theta) \sim N(0, \Sigma_y) \quad (D.74)$$

Dove Σ_y è la covarianza attesa dei parametri modali sperimentali.

Sotto queste ipotesi, la stima a priori della covarianza a posteriori $\Sigma_{\theta|y}$ può essere calcolata con l'espressione:

$$\Sigma_{\theta|y} = [D^T \Sigma_y^{-1} D + \Sigma_{\theta}^{-1}]^{-1} \quad (D.75)$$

La stima a priori della varianza a posteriori di ciascun parametro $\sigma_{\theta_i|y}^2$ è data da ciascuno degli elementi della diagonale della matrice di covarianza $\Sigma_{\theta|y}$.

D.7.6 Identificazione dei parametri meccanici del modello

Ci sono molti metodi per identificare i parametri meccanici del modello sulla base dei parametri modali. Un approccio generale consiste nel minimizzare una funzione obiettivo che rappresenta la misura dello scarto fra i parametri modali sperimentali della struttura e i parametri modali del modello.

Si dovrebbe utilizzare una funzione obiettivo che tenga conto della conoscenza a priori dei parametri, quale ad esempio:

$$T(\theta) = \frac{1}{2}z^T \Sigma_y^{-1} z + \frac{1}{2}\Delta\theta^T \Sigma_\theta^{-1} \Delta\theta \quad (D.76)$$

Dove:

$$z = y - \hat{y}(\theta) \quad (D.77)$$

è il residuo del modello e

$$\Delta\theta = \theta - \mu_\theta \quad (D.78)$$

è lo scarto del parametro meccanico rispetto alla stima a priori.

Nell'ipotesi di indipendenza a priori dei parametri meccanici e dei parametri modali sperimentali, l'espressione (D.76) può essere scritta come:

$$T(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \frac{z_i^2}{\sigma_i^2} + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \frac{\Delta\theta_i^2}{\sigma_{\theta,i}^2} = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i(\theta)}{\sigma_i} \right)^2 + \frac{1}{2} \sum_{i=1}^p \left(\frac{\theta - \mu_\theta}{\sigma_{\theta,i}} \right)^2 \quad (D.79)$$

Nell'ipotesi in cui la stima a priori dei parametri meccanici sia molto incerta, l'espressione della funzione obiettivo si riduce a:

$$T(\theta) = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^N \left(\frac{y_i - \hat{y}_i(\theta)}{\sigma_i} \right)^2 \quad (D.80)$$

ovvero la somma quadratica dei residui del modello pesati con la corrispondente varianza.

Nel caso siano soddisfatte le ipotesi semplificate assunte in D.7.5, esiste una soluzione in forma chiusa dei valori ottimi che minimizzano la funzione obiettivo (D.80), ovvero dei valori massimi a posteriori (MAP):

$$\theta_{MAP} = \mu_\theta + \Sigma_{\theta|y} D^T \Sigma_{y|\theta}^{-1} (y - \hat{y}(\mu_\theta)) \quad (D.81)$$

Dove:

$$\Sigma_{\theta|y} = [D^T \Sigma_y^{-1} D + \Sigma_\theta^{-1}]^{-1} \quad (D.82)$$

Nel caso in cui la stima a priori dei parametri sia molto incerta, la stessa espressione si riduce a:

$$\theta_{MAP} = \theta_0 + (D^T \cdot D)^{-1} \cdot D^T (y - \hat{y}(\theta_0)) \quad (D.83)$$

Si dovrebbero in ogni caso rappresentare i parametri modali e i parametri meccanici in maniera tale per cui la loro relazione sia lineare. Per esempio, nel caso in cui i parametri meccanici da identificare siano una serie di rigidità sostanzialmente in serie, esiste una relazione lineare fra l'inverso delle rigidità (le deformabilità) e l'inverso delle frequenze al quadrato (i periodi al quadrato). Pertanto, si dovrebbero rappresentare i parametri meccanici come deformabilità e i parametri modali come periodi al quadrato.

D.8 Misura della risposta sismica

D.8.1 Obiettivo

L'obiettivo è misurare la risposta sismica della struttura in termini di spostamenti e distorsioni durante un evento sismico.

D.8.2 Specifiche della domanda

Le informazioni che devono essere specificate nella richiesta di prova sono:

- frequenza minima f_i e frequenza massima f_f d'interesse;
- punti della struttura in cui interessa misurare lo spostamento relativo;
- accuratezza minima richiesta per la misura dello spostamento relativo;
- punti in cui interessa misurare l'accelerazione al suolo;
- accuratezza minima richiesta della misura di accelerazione al suolo;
- intensità massima del terremoto in sito (PGA);
- spettro di risposta in accelerazione del terremoto di intensità massima che si vuole registrare ($S_{a,max}$);
- spettro di risposta in accelerazione del terremoto di intensità minima che si vuole registrare ($S_{a,min}$).

D.8.3 Tecniche d'indagine

Nel caso in cui si intenda procedere all'identificazione del modello con le sole frequenze naturali, la tecnica di indagine che deve essere utilizzata consiste in una prova con eccitazione ambientale con sorgente di eccitazione sisma (vedere il punto 7.3.2). Data la rarità dell'azione sismica, per poter effettuare le opportune misurazioni si deve installare sulla struttura un sistema di monitoraggio permanente così come indicato al punto 8.4.3.

D.8.4 Fattibilità della prova

La prova è fattibile se:

- con il terremoto di intensità massima nessuno dei sensori raggiunge il fondo scala;
- con il terremoto di intensità minima il rapporto segnale/rumore è maggiore di 6 dB.

D.8.5 Strumentazione

Tipicamente per misurare la risposta sismica di un ponte si deve misurare la differenza tra due spostamenti, per esempio:

- la differenza tra lo spostamento in sommità e alla base di una pila. In questo caso la strumentazione solitamente utilizzata consiste in:
 - accelerometri orizzontali;
 - convertitore A/D;
 - amplificatori o condizionatori del segnale.

- apertura e chiusura dei giunti. In questo caso la strumentazione solitamente utilizzata consiste in:
 - estensimetri;
 - convertitore A/D.

In aggiunta alla misura degli spostamenti relativi in punti specifici della struttura può essere richiesta anche la misura dell'input sismico alla base, effettuata tipicamente tramite accelerometri solidali al terreno.

D.8.6 Specifiche della strumentazione

D.8.6.1.1 Accelerometro

Le specifiche che deve avere l'accelerometro sono le seguenti:

- campo di frequenza: vedere il punto D.3.6.1;
- in merito all'accuratezza, per poter ricavare una stima dell'incertezza attesa nel calcolo degli spostamenti in caso di sisma si suppone che il rumore dell'accelerometro σ_x possa essere assunto come rumore bianco gaussiano. Da questa ipotesi consegue che la trasformata di Fourier del rumore è una funzione costante.
 - La deviazione standard dello spostamento σ_{spost} può essere calcolata utilizzando la seguente espressione:

$$\sigma_{spost} = \frac{\sigma_x}{\omega^2} = \frac{\sigma_x}{(2\pi f)^2} \quad (D.84)$$

- Si può assumere che il rapporto tra la frequenza del primo modo di vibrare della struttura f_1 e la frequenza di taglio del filtro passa-alto $f_{high\ pass}$ con cui si filtrano le storie temporali nel modello di interpretazione sia tale che:

$$\frac{f_1}{f_{high\ pass}} = 2 \quad (D.85)$$

- A questo punto sostituendo $f = f_{high\ pass} = \frac{f_1}{2}$ si ottiene:

$$\sigma_{spost} = \frac{\sigma_x}{\left(2\pi\frac{f_1}{2}\right)^2} = \frac{\sigma_x}{(\pi f_1)^2} \quad (D.86)$$

- Da cui si ricava la formula (D.87) che lega l'accuratezza dello strumento di misura (accelerometro) con quella della grandezza obbiettivo che si intende misurare (spostamento):

$$\sigma_x = \sigma_{spost}(\pi f_1)^2 \quad (D.87)$$

- il fondo scala $x_{max,lim}$ deve essere tale per cui lo strumento non vada in saturazione nel caso in cui si verifichi l'evento sismico di intensità massima per il sito in oggetto;
- sensibilità k_s : vedere il punto D.3.6.1;
- Calibrazione σ_{k_s} : vedere il punto D.3.6.1.

D.8.6.1.2 Estensimetro

Le specifiche che deve avere l'estensimetro sono le seguenti:

- in merito al campo di frequenza, lo strumento deve poter effettuare le misure di spostamento anche in condizioni dinamiche, all'interno del campo di frequenze di interesse;
- in merito al range di misura, il valore massimo atteso dell'apertura del giunto in condizioni sismiche a_{giunto} può essere valutato con la formula (D.88) combinando gli spostamenti massimi attesi alla sommità delle pile $S_{d,max}$ con il metodo SRSS (Square Root of Sum of Squares) dato che è improbabile che due pile raggiungano contemporaneamente lo spostamento massimo in direzioni opposte, assumendo i loro moti come statisticamente indipendenti:

$$a_{giunto} = \sqrt{2} S_{d,max} \quad (D.88)$$

Il range di misura dello strumento deve essere quindi tale da poter effettuare correttamente la misura di a_{giunti} ;

- la sensibilità deve essere tale per cui il segnale elettrico trasdotto sia acquisibile dal convertitore A/D;
- in merito alla calibrazione, l'estensimetro deve essere scelto in modo che l'errore di calibrazione soddisfi la relazione:

$$\sigma_x^2 = \sigma_N^2 + \sigma_{ks}^2 + \sigma_{th}^2 \leq \sigma_{x,lim}^2 \quad (D.89)$$

L'errore di calibrazione σ_{ks} non può essere maggiore dell'accuratezza richiesta $\sigma_{ks} \leq \sigma_{x,lim}$. Molto spesso nelle schede tecniche l'errore di calibrazione è espresso come errore percentuale sul fondo scala. Essendo CoV_{ks} l'errore percentuale di calibrazione sul fondo scala, la condizione $\sigma_{ks} \leq \sigma_{x,lim}$ può essere equivalentemente espressa dalla formula (D.90):

$$CoV_{ks} \leq \frac{\sigma_{x,lim}}{x_{max,lim}} \quad (D.90)$$

D.8.6.1.3 Convertitore A/D

Le specifiche che deve avere il convertitore A/D sono le seguenti:

- frequenza di campionamento: vedere il punto D.3.6.2;
- errore di sincronizzazione: vedere il punto D.3.6.2;
- range: vedere il punto D.3.6.2;
- risoluzione: vedere il punto D.3.6.2.

D.8.6.1.4 Amplificatori o condizionatori del segnale

Gli amplificatori o condizionatori del segnale devono essere scelti in modo da soddisfare i requisiti di range e risoluzione del convertitore A/D e garantire il successo della prova.

D.8.7 Modalità di acquisizione

Si dovrebbe effettuare l'acquisizione dei dati in continuo e archiviare solo i dati corrispondenti al superamento di una soglia predefinita (*trigger*). La soglia può essere impostata basandosi sull'ampiezza del segnale oppure via software attraverso la segnalazione di un evento sismico.

Bibliografia

- UNI EN 1993-1-9 + EC 2-2011, *Eurocodice 3 - Progettazione delle strutture di acciaio - Parte 1-9: Fatica*
- UNI CEI 70099, *Vocabolario Internazionale di Metrologia - Concetti fondamentali e generali e termini correlati (VIM)*
- UNI CEI 70098-3 + EC 1-2018, *Incertezza di misura - Parte 3: Guida all'espressione dell'incertezza di misura*
- ASTM D4945-17, *Standard Test Method for High-Strain Dynamic Testing of Deep Foundations*
- BS 5400-2:2006 *Steel, Concrete and Composite Bridges – Specifications for Loads: Appendix C: Vibration Serviceability Requirements for Foot and Cycle Track Bridges*
- S-K Au, J. M. W. Brownjohn, B. Li, A. Raby, Understanding and managing identification uncertainty of close modes in operational modal analysis, *Mechanical Systems and Signal Processing*, 147, 2021
- Beck J. L., Jennings P. C., Structural identification using linear models and earthquake records, *Earthquake Eng. Struct. Dynamics*, 1980
- Bendat J., Piersol A., *Random Data: Analysis and Measurement Procedures: 4th Edition*. Wiley, 2010
- Brincker R., Ventura C., *Introduction to operational Modal Analysis*, Wiley, 2015
- Ewins, D.J., *Modal Testing, Theory, Practice, and Application*. 2nd ed. Philadelphia: Research Studies Press, 2000
- Limongelli M. P., Celebi M., *Seismic Structural Health Monitoring*, Springer Cham, 2020
- McVerry G. H., Structural identification in the frequency domain from earthquake records, *Earthquake Eng. Struct. Dyn.* 8, 161-180, 1980
- HiVoSS, *Human Induced Vibrations of Steel Structures*, EU Publications, 2010
- Pender M. J., *Design of Earthquake Resistant Foundations*, Taylor & Francis, 2015
- Rainieri C., Fabbrocino G., *Operational modal analysis of civil engineering structures*. Springer, New York, 2014
- Wenzel H., *Health Monitoring of Bridges*, Wiley, 2009

Copyright

Riproduzione vietata. Tutti i diritti sono riservati. Nessuna parte del presente documento può essere riprodotta o diffusa con un mezzo qualsiasi, fotocopie, microfilm o altro, senza il consenso scritto dell'UNI.