

Caratterizzazione dinamica sperimentale del Ponte della Costituzione e degli Scalzi a Venezia

Vincenzo d'Oriano
Geologo
STGA Studio di Geologia e Ingegneria Ambientale, Firenze

Experimental dynamic characterisation of Costituzione and Calzi bridges in Venice

Parole chiave: Caratterizzazione dinamica delle strutture, Risposta sismica locale, HVSR, ReMi

Key words: Experimental dynamic analysis; Site Response Analysis; HVSR. ReMi

ABSTRACT

Le strutture sono oscillatori complessi che vibrano con la massima ampiezza solo a specifiche frequenze denominate frequenze proprie, autofrequenze o frequenze di risonanza. Il riconoscimento di queste frequenze è di importanza centrale nell'ingegneria e nella geotecnica sismica. Poiché le strutture vibrano principalmente a queste frequenze non solo in presenza di terremoto ma anche in condizioni di eccitazione da tremore ambientale, tali frequenze possono essere misurate anche nelle condizioni operative quotidiane delle strutture. Secondo la sismologia storica, Venezia non è mai stata colpita in modo diretto da terremoti nel suo immediato sottosuolo, tuttavia ha riportato diversi danni in occasione di terremoti limitrofi. Nella presente tesi è stata valutata la dinamica sotto eccitazione ambientale di due principali opere veneziane: il ponte degli Scalzi (1934) progettato dall'ing. E. Miozzi e il ponte della Costituzione (2008), disegnato dall'architetto S. Calatrava. Usando il periodo proprio dei ponti misurato sperimentalmente come valore di ingresso nello spettro di risposta del sito, abbiamo riscontrato che il ponte della Costituzione si colloca nel plateau dello spettro, quindi a periodi per i quali l'accelerazione attesa sulla struttura è massima. Il ponte degli Scalzi presenta invece una rigidità tale da non mostrare amplificazione significativa tra il moto alla fondazione e quello della struttura sovrastante. Le misure di microtremore ambientale effettuate sul sottosuolo in prossimità delle fondazioni dei due ponti hanno mostrato che esso amplifica il moto per risonanza a 0.5 Hz. Questa frequenza è sufficientemente lontana da quelle proprie dei due ponti in esame, per cui si può ritenere che non ne influenzi significativamente la dinamica. Infine, abbiamo osservato

che i valori di accelerazione verticale misurati sulla sua sommità del ponte della Costituzione, generati principalmente dal traffico pedonale, superano i limiti di comfort proposti dall'Eurocodice EN UNI 1990. Le indagini eseguite possono essere raggruppate in due classi: la prima comprende tutte le misure sotto condizioni di eccitazione ambientale eseguite sul ponte della Costituzione e sul ponte degli Scalzi, mentre la seconda concerne la caratterizzazione sismica del sottosuolo al fine della risposta sismica locale.

1. ACQUISIZIONE E ANALISI SULLE STRUTTURE

1.1 PONTE DELLA COSTITUZIONE.

Per la caratterizzazione dinamica del Ponte della Costituzione abbiamo effettuato 3 serie (blu, rossa e verde) di 5 misure sincronizzate ubicate come in Fig. 1, per mezzo di sismometri tricomponenti (5 strumenti Tromino® sincronizzati via radio)

Per ciascuna serie temporale si è analizzato solo mezzo ponte, nell'assunto che l'altra metà abbia comportamento simmetrico rispetto al centro.

L'esecuzione sincrona delle misure ha due vantaggi:

- Le misure non devono essere normalizzate per l'effetto della sorgente del microtremore. Gli strumenti misureranno un moto generato da una medesima perturbazione.

Quindi nei processi di convoluzione le misure non differiranno a causa di un diverso contenuto in frequenza della sorgente, ma principalmente dalla differente oscillazione che presenta ciascun punto della struttura.

- Le misure sincronizzate permettono la ricostruzione delle fasi nei punti di misura e quindi consentono di costruire le deformate modali.

Le serie temporali così acquisite sono state analizzate in finestra contigua di 20 secondi. Ciascuna finestra è stata corretta per la linea di base; è stato applicato un tapering con finestra Bertlett e un *pad a zero*. Per ciascuna finestra è stata successivamente effettuata una FFT (Fast Fourier Transform) e lo spettro risultante corrisponde alla media di tutti gli spettri appartenenti a ciascuna finestra ed è stato liscio all'1% della frequenza fondamentale.

L'allineamento lungo l'asse centrale (rosso in Fig. 1) ha permesso, in un primo



Figura 1. Ubicazione indagini velocimetriche

momento, di individuare i principali modi flessionale sia verticale che orizzontale. Successivamente esso è stato messo a confronto con uno dei due allineamenti laterali così da enfatizzare le torsioni, ossia meccanismi che inducono velocità minime in corrispondenza dell'asse centrale e massime esternamente.

1.1.1 1° e 2° modo di oscillare: trasversale e verticale a 1.5 Hz

In *Fig. 2* si possono osservare assieme i 5 spettri dello spostamento (A, B, C, D, E) appartenenti alle suddette posizioni. La lettera A identifica la mezzeria, mentre le altre le progressive posizioni intermedie fino alla spalla del ponte.

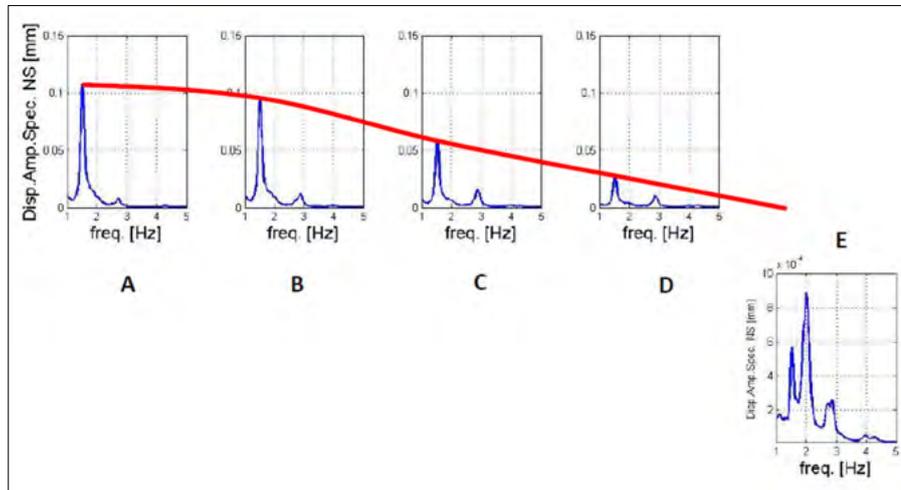


Figura 2. Interpretazione della deformata trasversale in direzione NS dalla mezzeria alla spalla v del Ponte della Costituzione

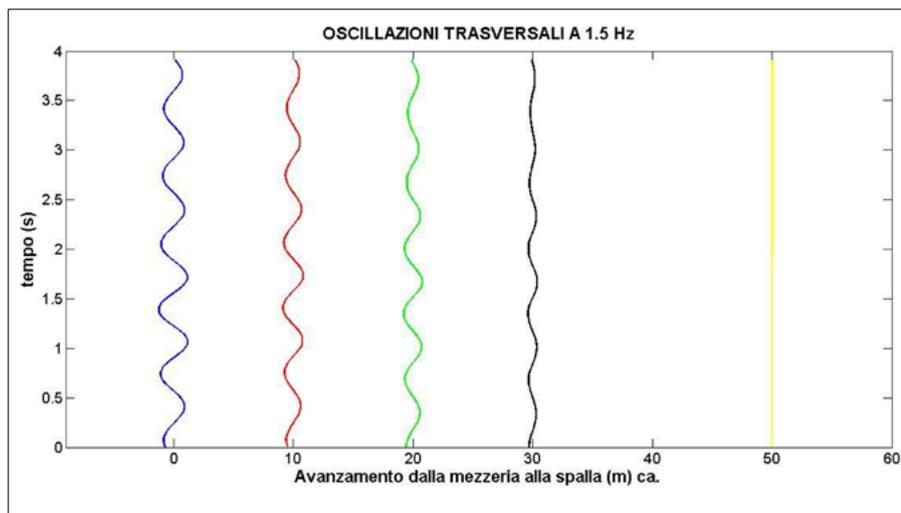


Figura 3. Analisi delle fasi delle armoniche a 1.5 Hz

Accostare i cinque spettri dello spostamento permette di comprendere la deformazione spaziale che la struttura subisce ad una particolare frequenza. È importante sottolineare che la deformazione complessiva (cioè quella che realmente si verifica) della struttura sarà data dalla somma dei vari modi deformativi, ciascuno alla propria frequenza, a cui essa è sottoposta. Gli spettri in *Fig. 2* mettono in evidenza il primo modo flessionale trasversale a 1.5 Hz. L'ampiezza spettrale della componente trasversale a 1.5 Hz è massima al centro del ponte e decresce spostandosi verso la spalla, che è considerata fissa in senso ingegneristico. L'ampiezza del moto cala da 0.1 mm a $6 \cdot 10^{-4}$ mm, nelle condizioni operative sperimentate. Poiché le misure erano sincrone, dall'involuppo dei massimi spettrali a 1.5 Hz possiamo ottenere la deformata del primo modo trasversale, che ha la stessa fase su tutto il ponte. La deformata è indicata in rosso in *Fig. 2*. La conferma che a questa frequenza il moto del ponte è tutto in fase deriva dal confronto delle fasi dei singoli segnali, filtrate con un filtro passa banda a 1.5 Hz *Fig. 3*. Abbiamo ripetuto le stesse operazioni sulla componente verticale registrata lungo l'allineamento esterno blu (*Fig. 1*) e interno rosso. Ancora una volta, si riscontra un'amplificazione netta del moto a 1.5 Hz.

Il modulo della deformata ottenuta dall'involuppo dei massimi spettrali mostra che l'ampiezza di tale moto aumenta progressivamente allontanandosi dalla mezzeria fino ad un massimo collocato circa a 2/3 dell'impalcato e termina con valori prossimi allo zero sulla spalla. Il risultato è mostrato in *Fig. 4*.

(1.1.2) - 3° modo di oscillare: flessionale verticale (2 Hz): Abbiamo ripetuto

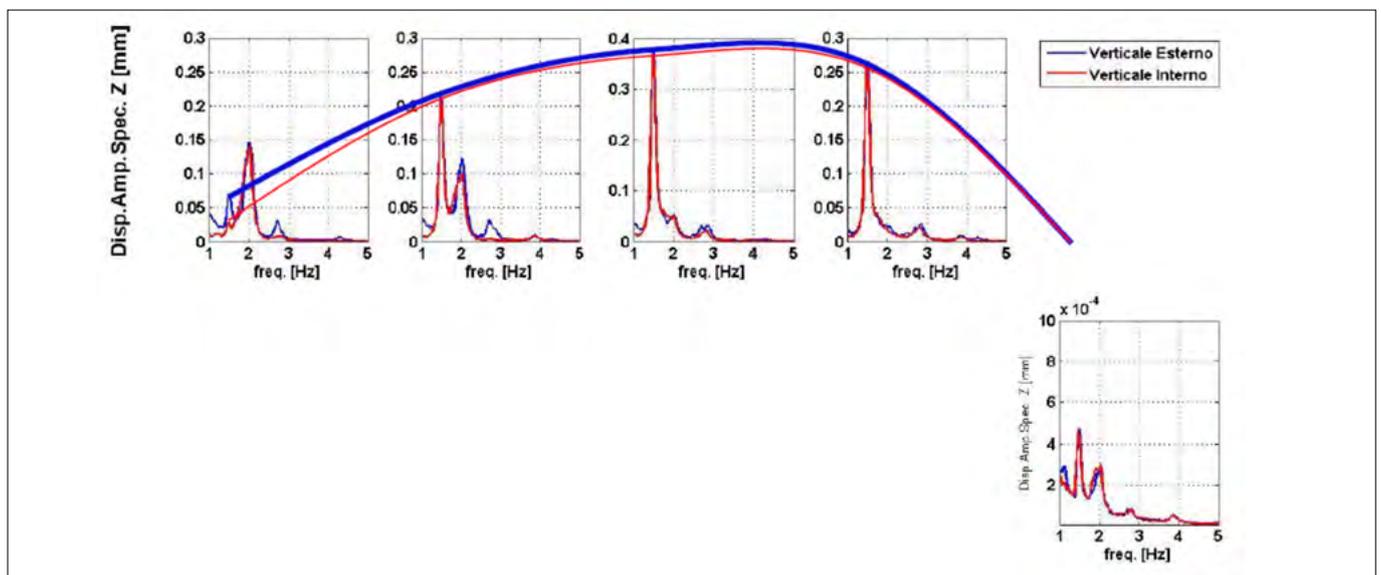


Figura 4. Interpretazione della deformata verticale a 1.5 Hz dalla mezzeria alla spalla del Ponte della Costituzione

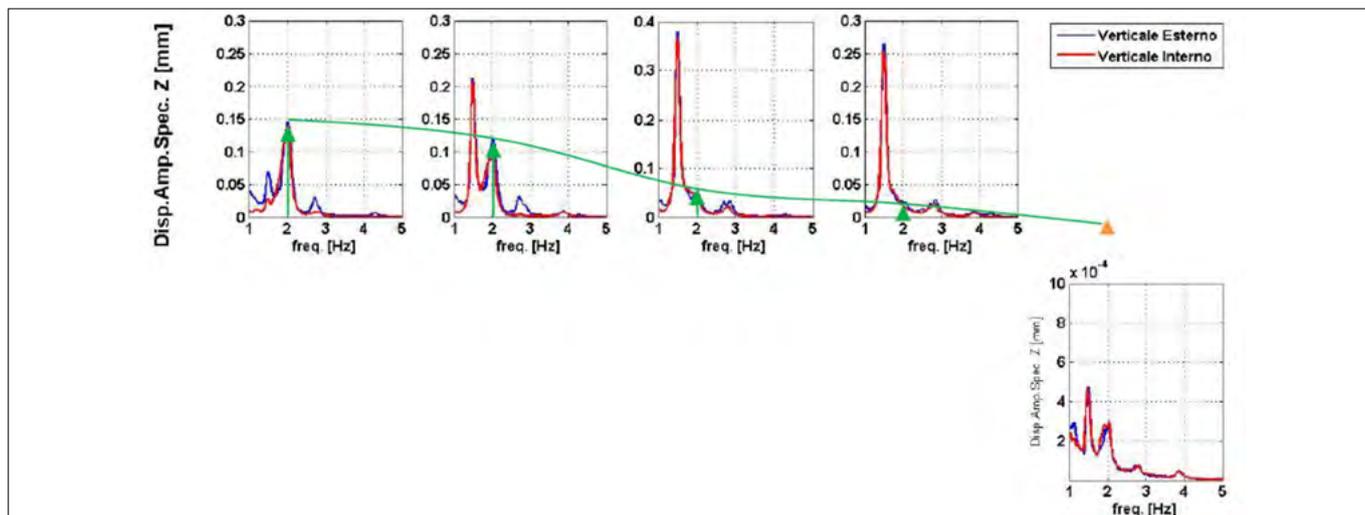


Figura 5. Interpretazione della deformata verticale a 2 Hz dalla mezzeria alla spalla del Ponte della Costituzione

le operazioni sopra descritte per il picco spettrale riconosciuto a 2 Hz nella componente verticale, ottenendo il modulo della deformata rappresentato in Fig. 5

È possibile constatare che gli spostamenti decrescono allontanandosi dalla mezzeria, passando da 0.15 mm a $3 \cdot 10^{-4}$ mm in corrispondenza della spalla.

Al fine di confrontare le fasi delle armoniche appartenenti a questo modo,

abbiamo eseguito un filtraggio passabanda a 2 Hz sulla componente verticale, rappresentando le tracce acquisite in modo sincrono nei 5 punti di misura. Anche in questo caso si tratta di cinque segnali in fase. Ancora una volta siamo di fronte ad una flessione verticale che coinvolge tutta la struttura. Si tratta pertanto del secondo modo flessionale verticale.

1.1.3 4° Modo di oscillare: torsionale (trasversale + verticale 2.7 Hz)

Confrontiamo ora gli spettri della componente trasversale del moto (asse NS strumentale) con la componente verticale (asse Z strumentale). Entrambe le componenti sono state misurate sia lungo il parapetto (ampiezze spettrali esterne in blu in Fig. 6) sia lungo l'asse

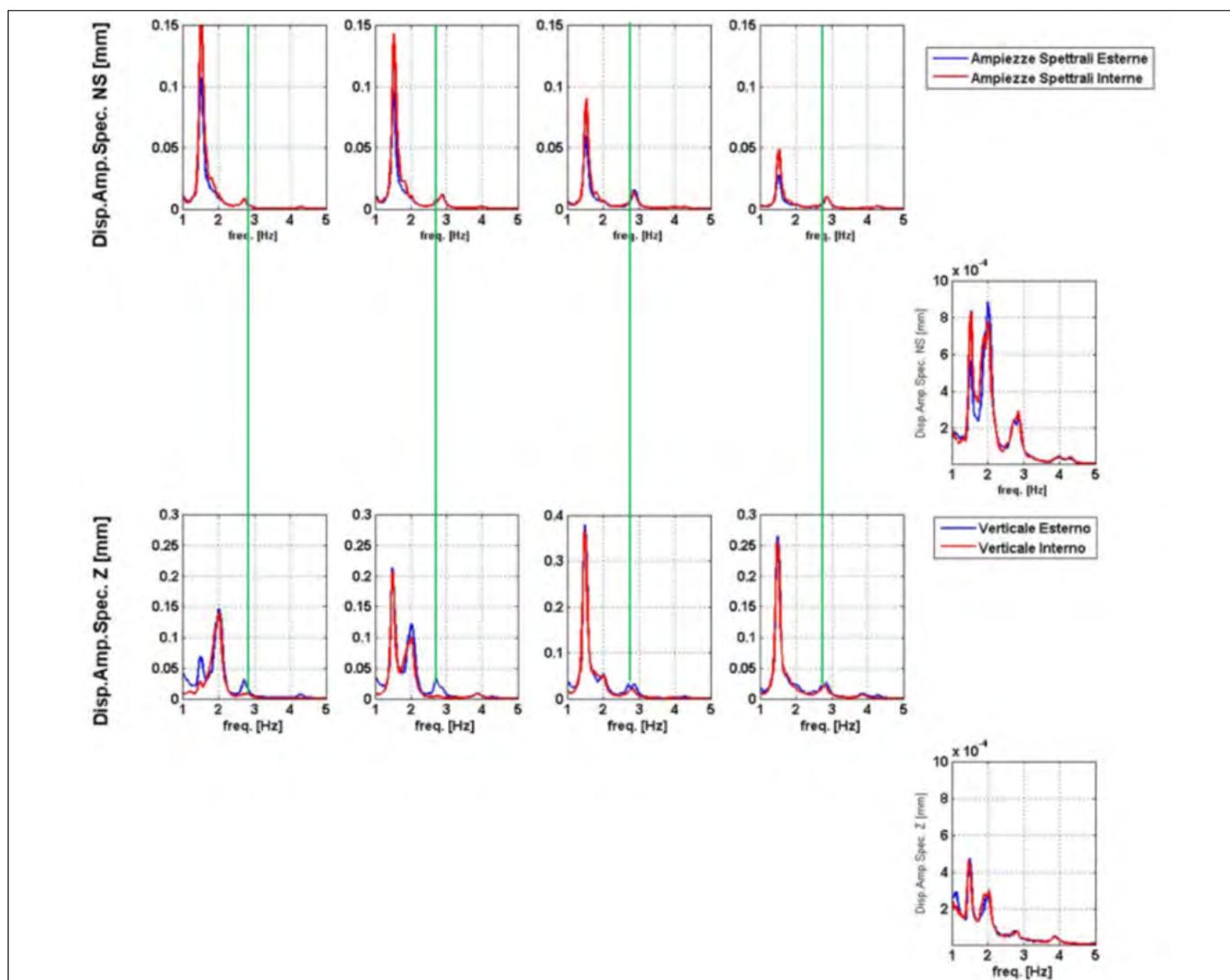


Figura 6. Interpretazione della deformata verticale a 2.7 Hz dalla mezzeria alla spalla del Ponte della Costituzione

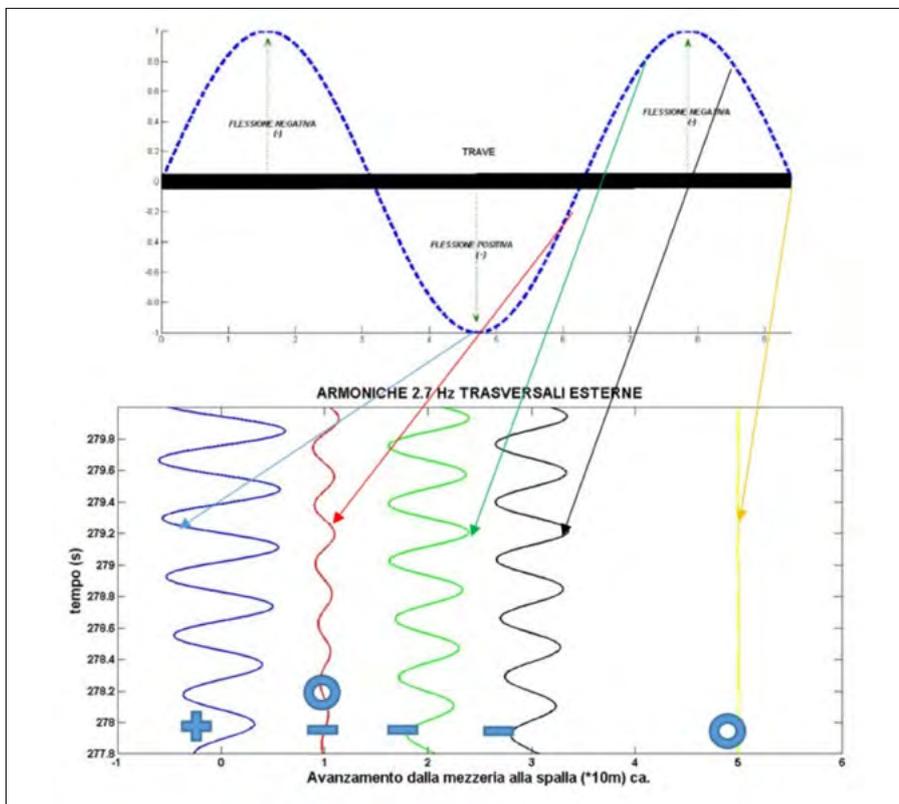


Figura 7. Fasi delle singole armoniche a 2.7 Hz: il simbolo '+' per la fase positiva; il simbolo '-' se la fase è negativa e 'o' invece è nulla. Ciascuna armonica è associata, tramite una freccia, al corrispondente punto di una trave vincolata alle estremità (rappresentata in alto in nero), nell'assunzione che essa possa simulare la nostra struttura

centrale del ponte (ampiezze spettrali interne in rosso in Fig. 6). Soffermeriamoci alla frequenza 2.7 Hz.

Le oscillazioni trasversali (asse NS strumentali) sono presenti sia in corrispondenza del parapetto (misure esterne blu) sia lungo l'asse centrale. Viceversa, le componenti verticali del moto,

rappresentate in basso nella Fig. 6, subiscono una brusca diminuzione nel passaggio dalle misure esterne a quelle interne. Questo fenomeno può essere giustificato da un movimento torsionale del ponte. Inoltre, nei due paragrafi precedenti abbiamo preso in considerazione oscillazione in fase. Ciascun punto di

misura partecipa con lo stesso verso alla deformazione. Graficando le serie temporali a 2.7 Hz (Fig. 7) ci accorgiamo invece che le singole armoniche presentano fase diversa. Questo implica che la struttura subisce contemporaneamente spostamenti di verso opposto. In particolare a spostamenti verso il basso del punto di mezzeria e di spalla (rispettivamente primo e quinto) si oppongono spostamenti verso l'alto in corrispondenza dei tre punti centrali. Siamo in presenza di un modo flessionale più complesso. Per comprendere tale movimento è possibile fare un'astrazione e ridurre la complessità strutturale del ponte a quella di una trave ideale sollecitata da un carico uniforme. Considerando solo metà trave (per il fatto che abbiamo solo misure di metà arcata, dalla mezzeria alla spalla di S. Lucia) notiamo una flessione positiva in corrispondenza della parte centrale che si esaurisce rapidamente spostandosi verso destra. La deformazione prosegue quindi con una flessione negativa che tende a zero in corrispondenza dell'appoggio destro. Ora, prendendo in considerazione le nostre misure, ci accorgiamo di essere in presenza dello stesso fenomeno. Nella Fig. 7 sono graficate le diverse armoniche a 2.7 Hz nei cinque punti di misura. I risultati così ottenuti possono essere sintetizzati nella Tab. 1 che raggruppa i primi quattro modi oscillatori del ponte della Costituzione: 3 flessionali ed uno torsionale.

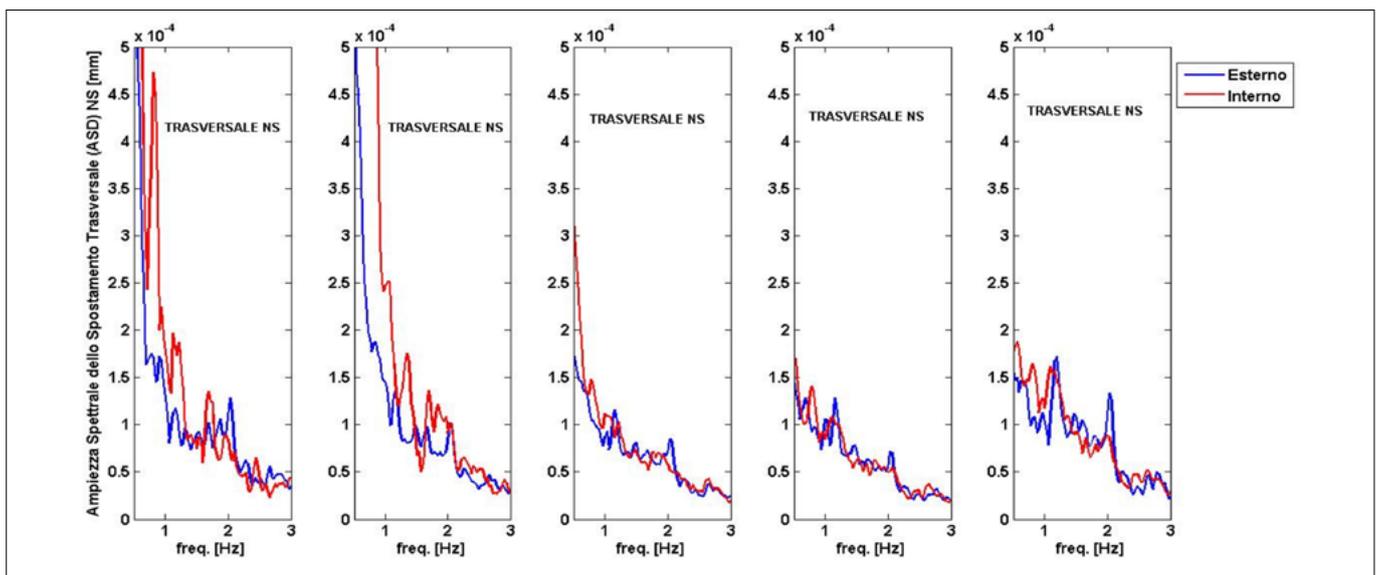


Figura 8. Ampiezza Spettrale dello Spostamento TRASVERSALE delle cinque misure esterne (blu) ed interne (rosso).

Tabella 1. Dinamica Ponte della Costituzione

MODO	TIPOLOGIA DEL MODO	FREQUENZA	PERIODO
I e II	Flessionale trasversale e verticale	1.5 Hz	0.66 s
III	Flessionale verticale	2.0 Hz	0.50 s
IV	Torsionale	2.7 Hz	0.37 s

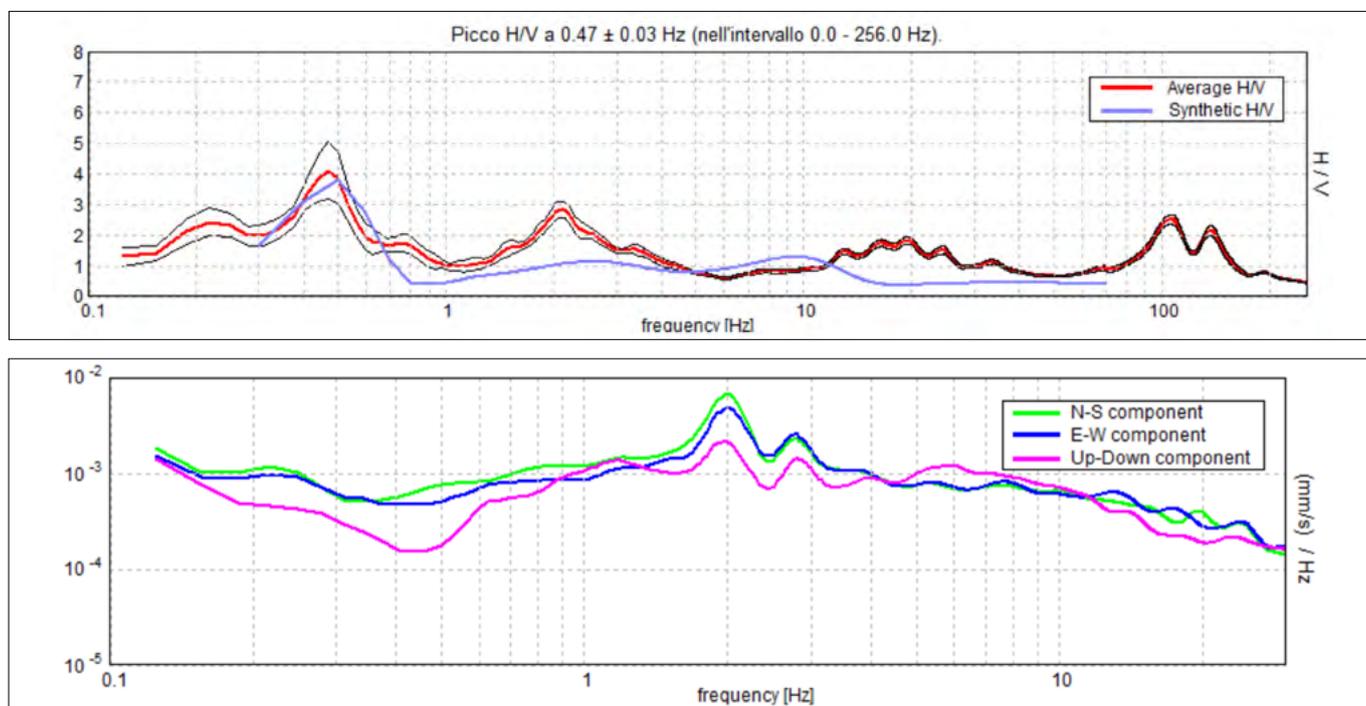


Figura 9. H/V C in rosso (con relativa deviazione standard in nero) sovrapposta alla curva sintetica elaborata

1.2 PONTE DEGLI SCALZI

La stessa procedura è stata poi applicata al Ponte degli Scalzi, scoprendo – come prevedibile – che questo presenta un comportamento dinamico molto diverso da quello della Costituzione. La maggior rigidezza complessiva dell'opera infatti provoca un'ampiezza spettrale molto minore di circa tre ordini di grandezza a parità di sollecitazione esterna. La Fig. 8 infatti mostra valori massimo di $5 \cdot 10^{-4}$ mm. Il ponte degli Scalzi è realizzato in *Pietra d'Istria* che presenta bassa porosità e alta resistenza all'alterazione superficiale dagli agenti atmosferici. In Fig. 8 sono rappresentati parte degli spettri ricavati dalle tracce temporale acquisite sul ponte degli Scalzi. Le ampiezze spettrali, dell'ordine di 10^{-4} mm, risultano decisamente inferiori rispetto a quelle del ponte della Costituzione. Risulta perciò difficoltosa la ricerca dei diversi modi vibrazionali e l'elaborazione

delle deformate, poiché il ponte si muove in modo indistinguibile dal sottosuolo. Non potremo quindi approfondire lo studio della dinamica così come abbiamo fatto in precedenza e di conseguenza non possiamo valutare l'effetto di risonanza suolo-struttura. La causa del diverso comportamento dei due ponti è da ricercare nei diversi parametri meccanici appartenenti ai materiali con cui sono stati edificati i due ponti e alle diverse tipologie e geometrie di costruzione, più in generale. Il ponte degli Scalzi muove così poco che non risulta possibile individuare i modi di oscillazione e costruire le relative deformate.

2. ACQUISIZIONE E ANALISI DATI DEL SOTTOSUOLO

Riportiamo ora i risultati delle due tipologie di indagini sismiche effettuate nella nostra area di studio e appena illu-

strate: la prova passiva a stazione singola per la registrazione del microtremore ambientale (delle tre effettuate, una è riportata in Fig. 9) e la prova passiva multicanale ReMi™ per la determinazione della categoria di sottosuolo (Fig. 10). La curva H/V ottenuta dalle misure a stazione singola di microtremore ambientale, intorno al ponte della Costituzione, mostra un picco a 0.45 Hz, uno a 2 Hz. La curva H/V deve essere analizzata sempre assieme agli spettri delle singole componenti dai quali essa ha origine. Alla frequenza di risonanza di un sito si genera un picco nel grafico H/V legato ad un minimo locale della componente spettrale verticale. Tale minimo si distacca dall'andamento delle altre componenti (orizzontali) e con esse dà vita ad una forma ad occhio o ogiva. Questa forma indica una risonanza stratigrafica. Da quanto precisato risulta evidente che il picco a 2 Hz presente nella nostra

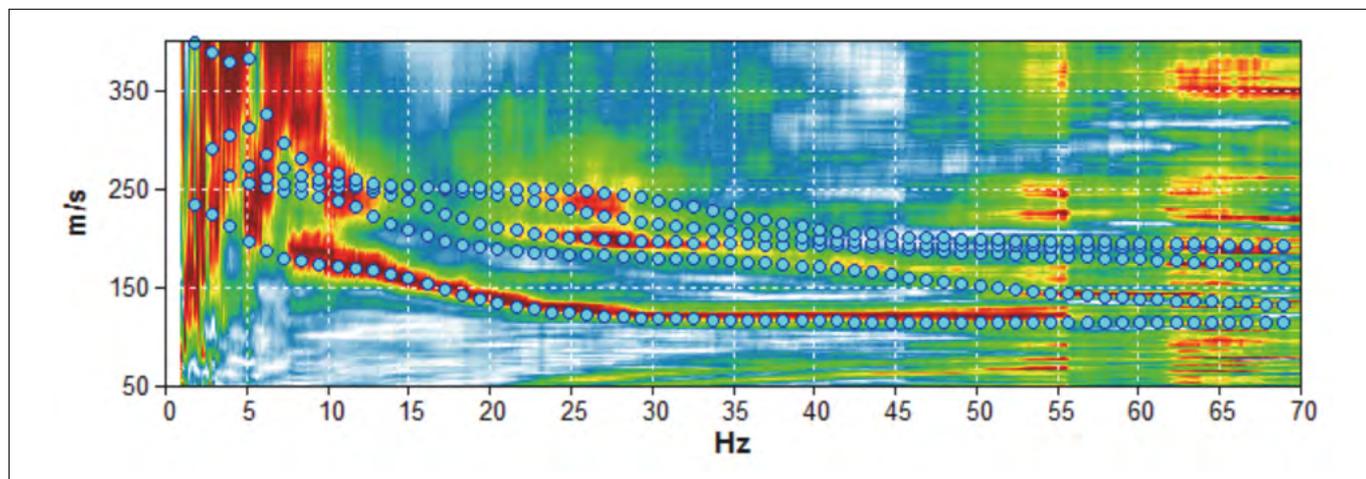


Figura 10. Curva di dispersione misurata sovrapposta alle curve sintetiche elaborate. Quella più in basso rappresenta il primo modo di vibrare dei sismo-strati individuati.

Tabella 2. Sismostratigrafia inserita nel programma per l'elaborazione di curve spettrali sintetiche, con l'intento di farle combaciare al meglio con quelle sperimentali

Profondità alla base di ciascun livello [m]	Spessore di ciascun livello [m]	Velocità media delle onde di taglio, Vs [m/s]	Rapporto di Poisson
15.00	15.00	190	0.49
125.00	110.00	250	0.48
inf.	inf.	480	0.48

misura non provenga da un'amplificazione stratigrafica in quanto tutte e tre componenti spettrali subiscono un picco nell'intorno di questa frequenza. In pratica non si verifica la diminuzione in ampiezza della componente verticale che ci aspetteremmo nel caso di risonanza *Castellaro (2016)*. Il picco a 2 Hz e le sue componenti spettrali presentano una morfologia che solitamente è propria di artefatti, cioè sorgenti di natura antropica che emettono vibrazioni ad una specifica frequenza. Successivamente, abbiamo effettuato due indagini geosfiche passive in array ReMi, nei due giardini pubblici più vicini ai ponti. La curva di dispersione ottenuta dalla prima indagine è riportata in *Fig. 10*.

3. ELABORAZIONE DEL PROFILO DEL SOTTOSUOLO

Le due tecniche di indagine passiva espone in precedenza permettono di dedurre in modo più raffinato il profilo di velocità delle Vs. Utilizzati in modo congiunto, i due metodi possono colmare reciprocamente le diverse mancanze che ciascuno singolarmente porta con sé. Le prove in array in generale (SASW, MASW, ReMi, SPAC, etc.) adottano modelli per l'inversione (cioè per l'estrapolazione del profilo di velocità delle Vs) basati sull'ipotesi di sottosuolo a strati piani e paralleli. Questa ipotesi, che solitamente non viene verificata durante l'esecuzione della prova, può essere confermata realizzando alcune misure H/V lungo lo stendimento; queste ultime permettono di individuare geometrie non planari qualora la forma spettrale H/V risultasse diversa. Altra insufficienza della prova in array è che in presenza di un riflettore importante caratterizzato da un aumento di rigidità non riesce ad investigare al di là del riflettore stesso, in quanto l'energia prodotta (nel caso di metodi attivi) viene riflessa verso la superficie. La tecnica sismica a stazione singola è meno sensibile a questo limite e permette di estendere l'indagine anche al di là di situazioni stratigrafiche sfavorevoli. Dalla curva di dispersione (*Fig. 10*) abbiamo calcolato che il terreno nei pressi

del ponte della Costituzione è suddivisibile sostanzialmente in 2 strati: uno di circa 10 m a 190-200 m/s e uno più superficiale di 2- 4 m con Vs intorno ai 120 m/s. Questi due livelli sono stati uniti in uno solo da 15 m perché le azioni sismiche intervengono alla base della fondazione A questa profondità la curva di dispersione esaurisce le informazioni sulla sismostratigrafia ed è necessario studiare le curve H/V. Queste mostrano, oltre all'artefatto a 2 Hz, un massimo a 0.45 Hz legato presumibilmente alla risonanza della copertura sedimentaria posta al tetto del bedrock. La copertura più profonda è sicuramente caratterizzata da una velocità di propagazione maggiore rispetto ai livelli superficiali. Con queste conoscenze a disposizione possiamo ipotizzare una velocità di propagazione delle onde di taglio per il secondo strato, ed è possibile creare delle curve H/V e di dispersione sintetiche da confrontare con quelle sperimentali: una buona sovrapposizione tra le due permette di confermare la plausibilità delle ipotesi sulla velocità del secondo strato.

Impostando una velocità di 250 m/s, utilizzando la relazione di risonanza per un modello monostrato $f=Vs/4H$ ricaviamo la stima dello spessore dello secondo strato da inserire nel modello pari 110 m. I parametri ulteriori che è necessario stimare sono i moduli di Poisson e le densità degli strati. Dato che la misura è stata effettuata in un'isola della laguna veneta in cui i sedimenti sono saturi, usiamo un modulo di Poisson molto alto per ottenere una velocità delle onde P di circa 1400 m/s, che è la velocità tipica di queste onde nei suoli saturi. Scegliamo quindi una densità superficiale tipica di $1.6 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, che andremo gradualmente ad aumentare presupponendo una compressione dei materiali dovuti alla compattazione gravitazionale. In *Tab. 2* sono riportati i valori numerici del modello inserito per riprodurre il più fedelmente possibile lo spettro H/V e la curva di dispersione.

Inserendo questa sismostratigrafia è possibile estrapolare delle curve sintetiche H/V e di dispersione da confrontare con quelle misurate. Piccoli accor-

gimenti e modifiche possono aiutare ad ottenere una maggiore coincidenza tra le due curve, tenendo sempre presente la correttezza geologica che tali modifiche comportano. Le due curve sintetiche sono rappresentate in *Fig. 9* e *Fig. 10*.

Si può apprezzare come la sismostratigrafia assunta permetta di calcolare una curva sintetica che combacia abbastanza bene con quella empirica. Si ha inoltre ulteriore conferma che il picco a 2 Hz non deriva da fenomeni di risonanza stratigrafica, ma proviene da una sorgente antropica.

4. ANALISI DELLA RISPOSTA SISMICA LOCALE

Le analisi di risposta sismica locale sono finalizzate alla definizione del moto sismico in superficie in corrispondenza di un determinato sito geologico. Si assume di conoscere l'input sismico alla base del sito in corrispondenza del bedrock e si cerca di comprendere le modifiche che il sito opera sull'input stesso (tramite lo studio geologico, geotecnico e sismico dell'area), al fine di valutare gli effetti prodotti in superficie in termini di accelerazioni massime orizzontali. Queste saranno poi utilizzate nella progettazione o nell'adeguamento sismico delle varie opere che dovranno essere ubicate in corrispondenza del luogo di indagine. I metodi che cercano di dare una soluzione a questo problema sono raggruppabili in più classi:

- I) Metodi empirici: basati su analisi statistiche (proposto dalla normativa italiana NTC 08, *spettro di risposta semplificato*)
- II) Metodi analitici: utilizzano un approccio lineare al problema e sono basati sulla soluzione in forma chiusa di equazioni differenziali della dinamica.
- III) Metodi numerici: Il terreno viene schematizzato come un mezzo multistrato; ogni strato viene considerato omogeneo a comportamento visco elastico (Tali metodi sono implementati in codici di calcolo come EERA, STRATA e permettono di ottenere uno *spettro di risposta non semplificato*).

Gli spettri di risposta sono utilizzati per valutare l'entità della forzante sismica attesa in un determinato sito in termini probabilistici.

Lo spettro di risposta semplificato (o di progetto) differisce da quello non semplificato. Quest'ultimo appare molto irregolare, infatti la sua forma riflette i dettagli del suo specifico contenuto in frequenza e di fase del segnale sismica da cui esso è derivato. Al contrario, lo spettro di progetto è generalmente liscio. Una volta terminata la scelta dei vari parametri di input si ottiene la forma dello spettro di risposta semplificato. Esso fornisce importanti indicazioni sulle accelerazioni massime (esprese in frazione di g) attese nel sito di interesse e l'intervallo di frequenze nel quale esse si manifestano. Il risultato è riportato in Fig. 11.

densità dei livelli stratigrafici, della variazione del modulo di rigidezza (μ e G) e dello smorzamento con la profondità (ζ).

III) Calcolo della risposta sismica locale attraverso codici come ad esempio EERA (*Equivalent-linear Earthquake site Response Analyses*).

Per ogni accelerogramma in ingresso avremo, quindi, uno spettro di risposta in uscita.

Poiché abbiamo utilizzato 14 accelerogrammi abbiamo ottenuto 14 spettri di risposta differenti. Il risultato è mostrato in Fig. 11.

Da questo spettro di risposta è possibile osservare quale accelerazione massima subisce un sistema oscillante ad un grado di libertà in caso di sisma con magnitudo compresa tra 5.5 e 7 nel sito di Venezia.

Costituzione, che di seguito riportiamo nuovamente.

Dalla Fig. 11 risulta che i 4 modi vibrazionali orizzontali del ponte della Costituzione (*Tab. 1*) ricadono completamente nell'intervallo di frequenze alle quali lo spettro di risposta è massimo. I modi verticali sono sempre marginali rispetto alle sollecitazioni sismiche, per cui non vengono trattati in questa analisi dinamica. Possiamo quindi stabilire che il ponte della Costituzione sarà soggetto alle massime accelerazioni attese, cosa che non deprime a favore della sua sicurezza, considerati i grandi problemi statici che la struttura presenta sin dalla costruzione ed il fatto che non sia stata concepita per essere antisismica. Le prove H/V eseguite nel sito di indagine permettono di misurare le frequenze di risonanza del sito: ne è stata individuata

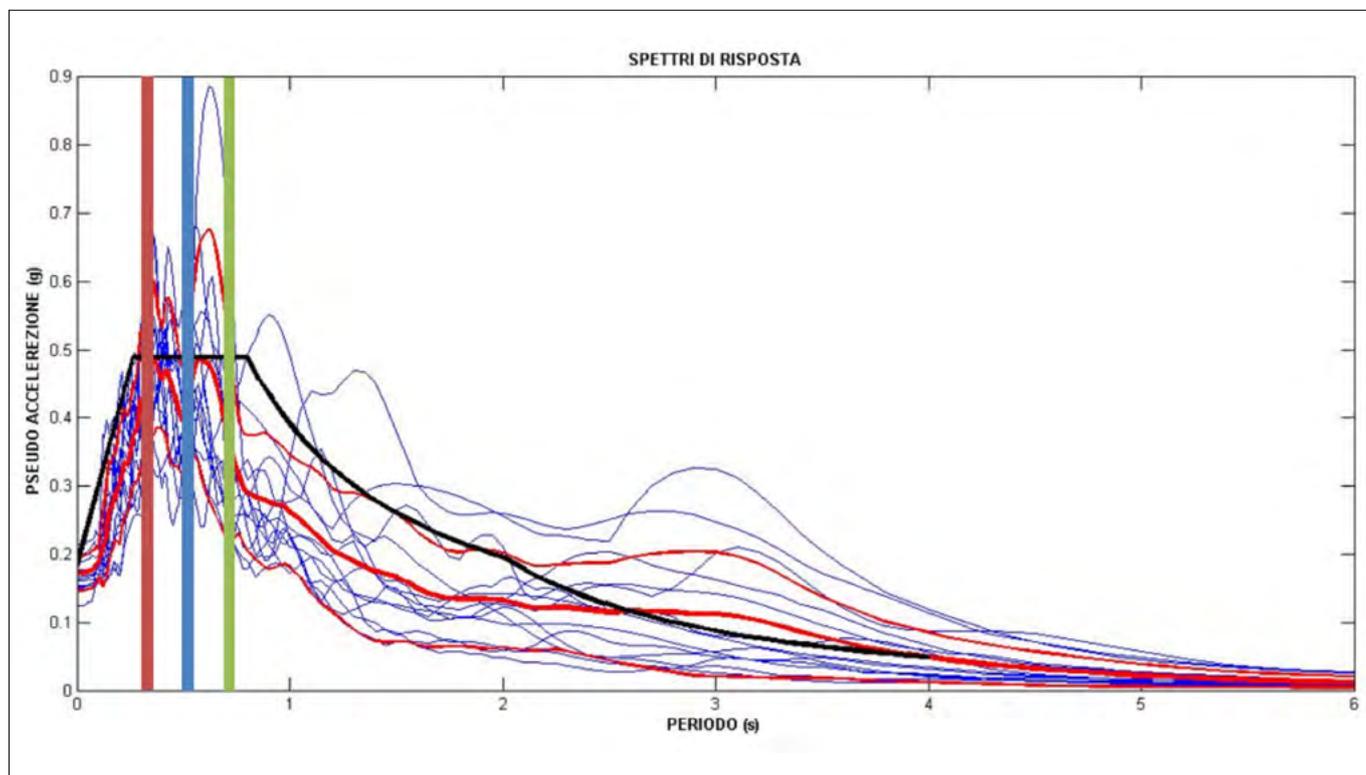


Figura 11. Sovrapposizione dei modi oscillatori sugli spettri di risposta semplificato (nero) secondo il metodo empirico proposto dalla normativa italiana, NTC 08; (classe di suolo D; vita nominale 100 anni; coefficiente d'uso 1.5); e medio non semplificato (rosso)

Il calcolo dello spettro di risposta elastico non semplificato di un determinato sito prevede l'esecuzione della seguente procedura:

- i) Estrazione degli accelerogrammi naturali da utilizzare come input sismici opportunamente scalati al valore di accelerazione del sito registrati sul bedrock o deconvoluti se fosse registrato in superficie.
- ii) Definizione del modello sismostratigrafico: spessori dei livelli stratigrafici sottostanti il sito in esame nei termini del profilo velocità delle onde di taglio sotto il sito; della

5. INTERAZIONI SUOLO - STRUTTURA: STUDIO DELLA VULNERABILITÀ SISMICA DEL PONTE DELLA COSTITUZIONE

Il confronto dei modi di vibrare del sottosuolo con quelli delle strutture permette di riconoscere i presupposti per l'instaurarsi di una coincidenza di risonanza tra suolo e struttura, detta doppia risonanza, che è una condizione molto gravosa in caso di terremoto.

L'analisi sperimentale dinamica ha evidenziato in modo chiaro i principali quattro modi di vibrare del ponte della

in particolare una, a 0.5 Hz (2 s). Come illustrato in Figure 11, tale frequenza è sufficientemente lontana da quelle proprie del ponte, per cui si può ritenere che non ne influenzi la dinamica. Ciononostante, va ulteriormente osservato che se il ponte fosse sismicamente isolato secondo i principi classici dell'isolamento sismico (ossia l'allungamento del periodo proprio del ponte), verrebbe ad avere una frequenza propria inferiore all'attuale ed in quel caso, in caso di una progettazione non attenta alla risposta dinamica del sottosuolo, si potrebbe avere coincidenza di risonanze.

Un altro aspetto interessante emerso per il ponte della Costituzione è che i valori di accelerazione verticale misurati sulla sua sommità, generati principalmente dal traffico pedonale in una giornata di affollamento normale, superano i limiti di comfort proposti dall'Eurocodice EN UNI 1990. Questo problema si è verificato in tempi recenti anche su altri celebri attraversamenti pedonali, quali il Millennium bridge di Londra. Abbiamo effettuato infine la caratterizzazione dinamica del ponte degli Scalzi ed abbiamo trovato che, in condizione di eccitazione da microtremore, esso presenta una rigidità tale da non mostrare amplificazione tra il moto della fondazione e quello della struttura sovrastante. Il moto della struttura risulta cioè completamente solidale con quello del suolo. In pratica, in caso di sismi, paragonabili a quelli utilizzati per la nostra analisi di riposta sismica locale, la struttura mostrerebbe oscillazioni confrontabili con quelle del suolo su cui è fondata, cosa che si traduce in una minor vulnerabilità sismica rispetto a strutture meno rigide.

6. DISCUSSIONE E CONCLUSIONE

Il confronto dei modi di vibrare del sottosuolo con quelli delle strutture permette di riconoscere i presupposti per l'instaurarsi di una coincidenza di risonanza tra suolo e struttura, detta doppia risonanza, che è una condizione molto gravosa in caso di terremoto. Abbiamo iniziato effettuando una campagna di indagine sismica sui terreni di fondazione delle opere. Allo scopo sono state effettuate due indagini sismiche passive in array ad onde di superficie (ReMi™) e tre indagini a stazione singola di microtremore ambientale (HVSR). La situazione è apparsa sufficientemente omogenea in corrispondenza dei due ponti, così che è stato definito un unico modello sismo-stratigrafico in termini di variazione di velocità di propagazione delle onde di taglio e di alcuni parametri meccanici quali rigidità e smorzamento. Noto il modello del sottosuolo sono stati selezionati dal database europeo dei terremoti 14 accelerogrammi caratterizzati da contenuti in frequenza ed ampiezza che possono essere attesi al bedrock per il sito in esame in un periodo di 475 anni. Questi sono stati inseriti come input in un opportuno codice di calcolo per il definire la funzione di trasferimento bedrock-superficie. Nota la funzione di trasferimento è immediato calcolare gli spettri di risposta in superficie. Di questi 14, uno per ogni terremo-

to di input, abbiamo effettuato la media e calcolato l'intervallo di confidenza. Lo spettro di risposta semplificato (per la categoria di sottosuolo D, NTC 2008) e non semplificato, per l'area di Venezia da noi indagata, sono riportati in 15 rispettivamente. Da queste si evince che nel nostro sito la massima accelerazione attesa con probabilità di eccedenza del 10% in 50 anni è pari a circa 0.5 g per le strutture con periodo proprio compreso tra 0.3 e 0.9 s. e smorzamento del 5%. Strutture con periodo proprio esterno a questo intervallo andranno soggette ad accelerazioni orizzontali inferiori. Abbiamo quindi verificato se i modi vibrazionali dei ponti in esame ricadono in tale intervallo. L'analisi sperimentale dinamica ha evidenziato in modo chiaro i principali 4 modi di vibrare del ponte della Costituzione, come riportato in Tab. 1. Dalla Fig. 11 risulta che i 4 modi vibrazionali orizzontali del ponte della Costituzione ricadono completamente nell'intervallo di frequenze alle quali lo spettro di risposta è massimo. I modi verticali sono sempre marginali rispetto alle sollecitazioni sismiche, per cui non vengono trattati in questa analisi dinamica. Possiamo quindi concludere che il ponte della Costituzione sarà soggetto alle massime accelerazioni attese, cosa che non depone a favore della sua sicurezza, considerati i grandi problemi statici che la struttura presenta sin dalla costruzione ed il fatto che non sia stata concepita per essere antisismica.

Le prove H/V eseguite nel sito di indagine permettono di misurare le frequenze di risonanza del sito: ne è stata individuata in particolare una, a 0.5 Hz (2 s). Come illustrato in Fig. 9, tale frequenza è sufficientemente lontana da quelle proprie del ponte, per cui si può ritenere che non ne influenzi la dinamica. Va osservato invece che se il ponte fosse sismicamente isolato secondo i principi classici dell'isolamento sismico (ossia l'allungamento del periodo proprio del ponte), verrebbe ad avere una frequenza propria inferiore all'attuale ed in quel caso, in caso di una progettazione non attenta alla risposta dinamica del sottosuolo, si potrebbe avere coincidenza di risonanze.

Un altro aspetto interessante emerso per il ponte della Costituzione è che i valori di accelerazione verticale misurati sulla sua sommità, generati principalmente dal traffico pedonale in una giornata di affollamento normale, superano i limiti di comfort proposti dall'Eurocodice EN UNI 1990. Questo problema si è verificato in tempi recenti anche su

altri celebri attraversamenti pedonali, quali il Millennium bridge di Londra.

Abbiamo effettuato infine la caratterizzazione dinamica del ponte degli Scalzi ed abbiamo trovato che, in condizione di eccitazione da microtremore, esso presenta una rigidità tale da non mostrare amplificazione tra il moto della fondazione e quello della struttura sovrastante. Il moto della struttura risulta cioè completamente solidale con quello del suolo. In pratica, in caso di sismi, paragonabili a quelli utilizzati per la nostra analisi di riposta sismica locale, la struttura mostrerebbe oscillazioni confrontabili con quelle del suolo su cui è fondata, cosa che si traduce in una minor vulnerabilità sismica rispetto a strutture meno rigide.

BIBLIOGRAFIA ESSENZIALE

- ALBARELLO D., CASTELLARO S. (2011), *Tecniche sismiche passive: indagini a stazione singola*. Ingegneria sismica p. 32-49.
- BONNEFOY-CLAUDET S. et al. (2008), *Effects of Love Waves on Microtremor H/V Ratio*. Bull. Seism. Soc. Am. p. 288-300.
- BONOMO F. (2007), *Il ponte di Calatrava sul Canal Grande*. Strade&costruzioni.
- BORTOLAMI G., CARBOGNIN L., GATTO P. (1985), *The natural subsidence in the Lagoon of Venice, Italy*. p. 777-785.
- CASTELLARO S., MULARGIA F. (2009), *The Effect of Velocity Inversions on H/V*. Pure and Applied Geophysics. p. 567-592.
- CASTELLARO S. (2016), *The complementarity of H/V and dispersion curves*. Geophys.
- FACCIORUSSO, J. A. (2001), *Valutazione degli effetti sismici locali mediante prove*. Firenze: DICEA.
- FÄH D., KIND F., GIARDINI D. (2001), *A theoretical investigation of average H/V ratios*. Geophys. J. Int., 145, p. 535-549.
- FOTI, S. et al. (2015), *Surface Wave Methods for Near-Surface Site Characterization*. London: Taylor & Francis Group, 2015.
- HEATH R. K. (2011), *A Critical Analysis of Ponte della Costituzione, Venice. Il ponte del Littorio*. Venezia: Edir. Zanetti, 1934.
- MIOZZI, E. (1935), *Dal ponte di Rialto al nuovo ponte degli Scalzi*. Roma: Stabilimento topografico del Genio Civile.
- NTC (2008), *Norme Tecniche per le Costruzioni*. s.l.: Ministero delle Infrastrutture e dei Trasporti.
- SABBADINO C. (1930), *Discorsi sopra la laguna di Cristoforo Sabbadino*. [a cura di] Roberto Cessi. Venezia: s.n.
- SARÀ G. (1985), *Ingegneria Antisismica*. Napoli: Liguori s.r.l. p. 72-127. Vol. 1.
- SIMONINI P. et al. (2014), *Geotechnical Characterization of Shallow Foundation and Wide Area: the Case Study of Venice Airport (Italy)*.
- STRINGA G. (1604), *Venezia, città nobilissima e singolare*. Venezia: s.n., 1604.
- TANZILLI S. E. VIGATO F. (2012), *Il ponte della Costituzione a Venezia: il nuovo ponte sul Canal Grande tra ingegneria ed accessibilità*. Venezia: Università degli Studi di Venezia.