

# Sistema di Monitoraggio di un Ponte Strallato nel Porto di Venezia

Ing. Alessandro Torre  
*D'Appolonia S.p.A.*

Prof. Andrea Del Grosso  
*Università degli Studi di Genova*

Dott. Giorgio Brunetti  
*Tecniter S.r.l.*

## SOMMARIO

L'articolo descrive le caratteristiche del sistema di monitoraggio installato su un ponte strallato recentemente costruito nel porto di Venezia. Il sistema è basato sull'uso di sensori a fibra ottica SOFO ed è stato concepito per il monitoraggio statico continuo e per il monitoraggio dinamico periodico della struttura. Il ponte, ad asse curvilineo di raggio 175 m, è costituito da un impalcato a struttura mista di travi in acciaio e soletta in calcestruzzo armato su due campate rispettivamente di circa 105 e 126 m sorrette ciascuna da 9 stralli collegati alla parte sommitale di un'antenna in calcestruzzo armato precompresso dell'altezza di circa 80 m, inclinata rispetto alla verticale di circa  $21^\circ$ . Il sistema comprende 48 sensori di deformazione lineari SOFO, 2 inclinometri a fibre ottiche e 24 sensori di temperatura installati sulle due campate. L'antenna è strumentata con 12 sensori di deformazione lineare SOFO e 6 termocoppie annegati nel getto e due inclinometri a fibra ottica in sommità. Infine ogni strallo è stato equipaggiato con un sensore a fibre ottiche SOFO.

Nell'articolo vengono, inoltre, presentate le prime analisi dei dati raccolti durante le fasi di messa in tiro degli stralli e dei dati statici e dinamici raccolti durante le prove di collaudo.

## Introduzione

L'Autorità Portuale di Venezia, con la finalità di sviluppare il traffico dei terminal container e merci varie del Porto di Marghera, ha deciso la costruzione di una nuova strada di collegamento tra le aree portuali e la rete autostradale. Tale strada di collegamento attraversa il Canale Industriale Ovest e la ferrovia di servizio dei terminali, il superamento dei quali si è reso necessario per mezzo di un ponte a lunga campata (Figura 1)

La struttura principale dell'opera è costituita da un ponte strallato di prima categoria, curvilineo di raggio pari a 175 m, impostato su due campate di cui la prima di 105 m e la seconda di 126 m. L'appoggio in alveo è costituito da una base fondata su pali, sulla quale poggia l'impalcato e dalla quale si sviluppa un'antenna in c.a. che raggiunge la quota di circa 74 m sul livello del mare, con sezione a forma di triangolo isoscele variabile sulla quale sono intestati gli stralli che sorreggono le due campate. L'antenna è inclinata di un

angolo di circa  $20^\circ$ , pari a quello formato dalla risultante delle trazioni negli stralli e le consente, quindi, di lavorare in compressione, in modo tale che le uniche azioni flettenti siano determinate dal vento e del peso proprio, quest'ultima peraltro contrastata dalla presenza di armature di pre-compressione a cavi post-tesi nella zona tesa.

Gli stralli, in numero di 9 per parte, sono collegati all'asse dell'impalcato e all'antenna mediante appositi sistemi di ancoraggio: essi sono costituiti da trefoli galvanizzati da 1770 MPa, in numero variabile da 31 a 85 a seconda del carico di progetto che sono chiamati a sopportare. Al fine di evitare che questi siano sollecitati a compressione per effetto dei carichi mobili che attraversano il ponte, vengono pretesi con un carico di trazione variabile da strallo a strallo.

L'impalcato, continuo sugli appoggi, è costituito da una soletta mista formata da due travi in acciaio laterali a doppio T dell'altezza di 190 cm parallele all'asse stradale e da una trave a cassone centrale, sempre di altezza 190 cm e larghezza 3,0 m, per limitare gli effetti torsionali. Quest'ultima è collegata alle travi laterali per mezzo di traversi di irrigidimento torsionale disposti con interasse di 5,0 m e controventi a X nella parte intradossale. A questo reticolo di travi è resa collaborante, per mezzo di pioli saldati alle ali superiori delle travi stesse, una soletta di calcestruzzo dello spessore di 25 cm, formata da predalles prefabbricate che costituiscono il cassero per il successivo getto di completamento.



Figura 1 – Vista aerea del ponte

La modalità di costruzione dell'impalcato ha previsto l'assemblaggio delle parti metalliche delle due campate fuori opera e il loro successivo posizionamento mediante varo tramite apposita chiatta e l'utilizzo di appoggi intermedi provvisori. Una volta posizionate le due campate si è proceduto al montaggio degli stralli e una contestuale prima fase di tesatura

avvenuta secondo una precisa procedura, consistente in una serie di aggiustamenti successivi, fino al raggiungimento della configurazione di progetto.

Una volta terminata la prima fase di tesatura, sono stati disconnessi gli appoggi provvisori e successivamente si è proceduto con la seconda tesatura, avvenuta per coppie di stralli, seguendo una procedura che prevede il getto della soletta a porzioni di 10.50 m simmetricamente rispetto alla pila P3 e successivo incremento del tiro nei due stralli interessati dal getto fino ad arrivare ai tiri finali di progetto.

Vista la complessità di alcune attività connesse alla realizzazione e del comportamento sia statico che dinamico previsti in fase di esercizio, è stato deciso di progettare ed installare un sistema di monitoraggio permanente, al fine di verificare la corretta rispondenza della struttura alle assunzioni progettuali durante tutta la sua vita di servizio.

Per la realizzazione del sistema di monitoraggio, vista la particolarità dell'opera e la necessità di mantenere un elevato grado di affidabilità nel tempo, si è optato per la scelta di un sistema a fibre ottiche: in particolare si è scelto il sistema SOFO (1), recentemente utilizzabile sia per letture statiche che per letture dinamiche con lo stesso set di sensori (2). Il sistema di monitoraggio è stato installato durante la costruzione, al fine di avere un controllo già a partire dalle fasi di costruzione più significative.

## Descrizione del sistema SOFO

Il sistema SOFO si basa sul principio dell'interferenza ottica, un tipico fenomeno che prende origine dalla sovrapposizione di due o più onde, provenienti da una sorgente, che si propagano nella stessa direzione con uguale ampiezza e frequenza e con una certa differenza di fase.

Nel sistema SOFO la sorgente di luce è costituita da un LED ad infrarosso con  $\lambda = 1300\text{nm}$ , e lunghezza di coerenza  $l_c = 40\mu\text{m}$ . L'impianto è un interferometro di Michelson a cammino accoppiato, dove dell'infinita successione di pacchetti emessi dalla sorgente ne viene isolato uno che raggiunge un primo accoppiatore, per mezzo del quale viene ripartita in due fibre ottiche di lunghezza diversa costituenti il sensore, la prima collegata alla struttura di cui si seguono i movimenti e la seconda libera. All'estremità di ciascuna fibra è posto uno specchio che riflette il raggio verso il primo accoppiatore, il quale da origine a due pacchetti d'onda distanti quanto la differenza di lunghezza delle fibre, inviati ad un secondo accoppiatore, interno all'interferometro analizzatore. Qui vengono, a loro volta, ripartite in due fibre, una di lunghezza fissa ed un'altra terminante con uno specchio mobile, in modo tale da sovrapporre i quattro pacchetti d'onda e creare, quindi dei profili di interferenza, costituiti da tre picchi positivi con le relative intensità, dei quali il centrale risulta dall'interferenza contemporanea delle due pacchetti d'onda riflessi dalle due fibre dell'analizzatore, mentre i laterali, di minore intensità, risultano dall'interferenza di uno solo dei pacchetti d'onda. La posizione dei picchi laterali dipende dal  $\Delta L$  esistente tra le due fibre ottiche costituenti il sensore, mentre la posizione del picco centrale dipende unicamente dalla lunghezza delle fibre interne all'analizzatore.

## Algoritmo di analisi statica

L'analisi dei dati statici richiede un post-processing dei dati che consente di risalire dalle deformazioni assiale dei sensori alla deformata della struttura inflessa. Il principio di base

del metodo consiste nel suddividere la struttura in un numero di macroelementi il cui comportamento può essere ritenuto omogeneo (3). Tali macroelementi sono suddivisi a loro volta in celle che contengono un certo numero di sensori di deformazione lineare in posizioni ben definite della sezione. Dalla misura della deformazione assiale di ogni sensore è possibile risalire alla curvatura media della cella, mediante applicazione della ben nota legge di Bernoulli, che nel caso si disponga di due sensori di lunghezza L posti in due posizioni  $y_1$  e  $y_2$  che misurano deformazioni assiali  $\Delta L_1/L$  e  $\Delta L_2/L$  permette di ottenere una curvatura media data dalla seguente relazione:

$$1/r_m = (\Delta L_1 - \Delta L_2)/[(y_1 - y_2) L]$$

Tale calcolo può essere esteso al caso bi-dimensionale mediante estensione della relazione precedente ad una relazione matriciale.

Dopo aver ottenuto le curvature medie all'interno di ogni cella si risale alla curvatura all'interno di ogni macroelemento come funzione dell'ascissa curvilinea, mediante interpolazione ai minimi quadrati con polinomio di grado  $N-1$ , dove  $N$  è il numero di celle all'interno del macroelemento.

Infine, combinando le funzioni di curvatura di ogni macroelemento si risale per doppia integrazione all'inflessione dell'intero sistema, applicando le condizioni alle estremità e le condizioni di continuità tra macroelementi adiacenti, queste ultime garantite dall'uguaglianza di spostamenti e rotazioni.

## Descrizione del sistema di monitoraggio del Ponte Strallato

Il sistema di monitoraggio comprende tre sottosistemi per la misurazione dello stato deformativo dell'antenna centrale, dell'impalcato e degli stralli: i primi due sono stati progettati con la finalità di applicare l'algoritmo interpretativo descritto, mentre il terzo è stato progettato per la misura di semplici deformazioni assiali.

L'impalcato del ponte è stato suddiviso in due macroelementi corrispondenti alle due campate strallate, ognuno dei quali è stato suddiviso in 4 celle, strumentate con sensori di deformazione lineare SOFO di lunghezza attiva di 1,5 m sull'anima delle due travi di estremità e della trave centrale a cassone parallelamente all'asse delle travi, ad una distanza di 1,10 m e resi solidali alla struttura mediante squadrette alle due estremità, saldate all'anima delle travi. Ciascuna coppia di estensimetri è integrata con un sensore di temperatura, al fine di poter associare le deformazioni misurate con i cicli termici cui la struttura è soggetta. Lo schema di installazione di ogni coppia di sensori è mostrato in Figura 2.



Figura 2 – Disposizione dei sensori nell'impalcato

Le condizioni alle estremità sono costituite da spostamenti nulli e rotazioni flessionali misurate mediante due inclinometri SOFO, mentre le condizioni di continuità sull'appoggio centrale sono state assegnate imponendo l'uguaglianza delle rotazioni e degli spostamenti, nulli per la direzione verticale.

L'antenna centrale è stata suddivisa in un solo macroelemento, a sua volta suddiviso in 4 celle, ognuna strumentata con tre sensori di deformazione lineare SOFO della lunghezza attiva di 7,5 m. L'installazione dei sensori è avvenuta mediante inserimento nell'armatura esistente di un ferro al quale sono collegate le estremità del sensore mediante fascette e successivo annegamento dei sensori nel getto del calcestruzzo. Le ultime due sezioni sono state dotate di termocoppie per la misura della temperatura.

Le condizioni al contorno sono state assegnate mediante imposizione di spostamenti e rotazioni nulli alla base, e rotazioni in sommità misurate da due inclinometri SOFO, montati a 90° secondo le due direzioni principali e protetti da una scatola in acciaio inox fissata a pavimento.

Infine ciascuno dei 18 stralli è stato strumentato con un estensimetro SOFO della lunghezza attiva di 250 mm. L'installazione degli estensimetri è stata realizzata in corrispondenza del manicotto di ispezione, come mostrato in Figura 3, a seguito delle operazioni di montaggio e di tesatura degli stralli, mediante accoppiamento del sensore ad uno dei trefoli esterni dello strallo, garantendo comunque a quest'ultimo il grado di protezione richiesto dalla normativa.



Figura 3 – Disposizione dei sensori nell'impalcato

I sensori dei tre sottosistemi sono stati collegati alla Centrale Automatica di Acquisizione Dati posizionata alla base dell'antenna, che, a partire dal 3 Marzo 2005 è stata programmata per effettuare automaticamente due campagne di letture giornaliere.

#### Monitoraggio statico durante le fasi di costruzione

I sistemi di monitoraggio dell'impalcato e dell'antenna sono stati utilizzati per la misura delle deformazioni conseguenti alla seconda fase di tesatura: i dati ricavati sono stati elaborati secondo le procedure precedentemente descritte.

Nel grafico in Figura 4 viene mostrato il confronto tra la deformata ricavata mediante l'algoritmo descritto e le misure topografiche effettuate: tale confronto evidenzia una buona corrispondenza tra le due misurazioni, con differenze imputabili al fatto che le misure non sono state eseguite contemporaneamente, con conseguente differenza di influenza della temperatura.

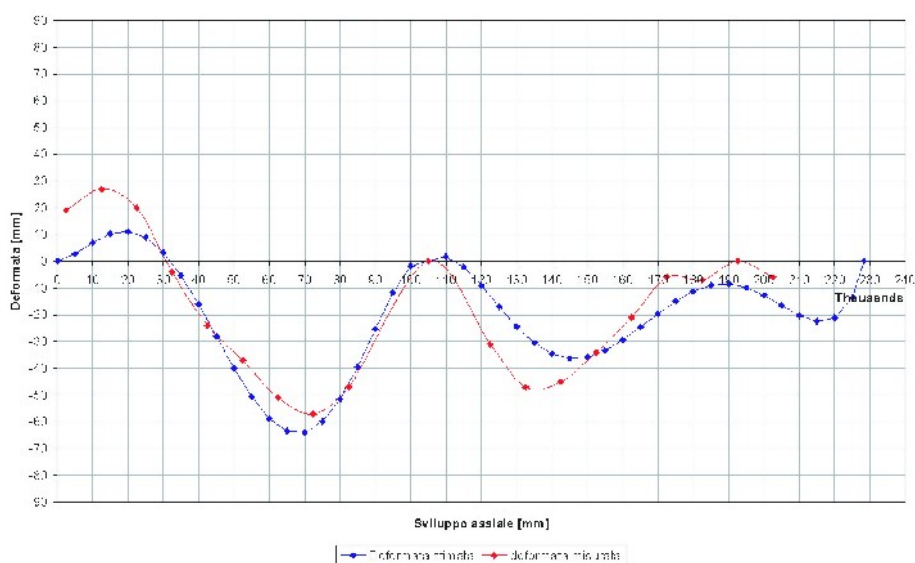


Figura 4 – Confronto tra la deformata dell'impalcato stimata dal sistema SOFO e quella misurata

Nella Figura 5 sono riportati i grafici relativi alle deformate dell'antenna relative ad ogni fase di tiro, in cui è evidente come l'antenna, a partire dalla data in cui è stato effettuato il tiro della coppia di stralli S6 dove raggiunge la deformazione massima di circa 34 mm, tende a ritornare alla posizione iniziale, grazie all'applicazione degli ultimi carichi che riportano la risultante dei tiri parallela all'asse dell'antenna, con una freccia residua in sommità di 0.81 mm.

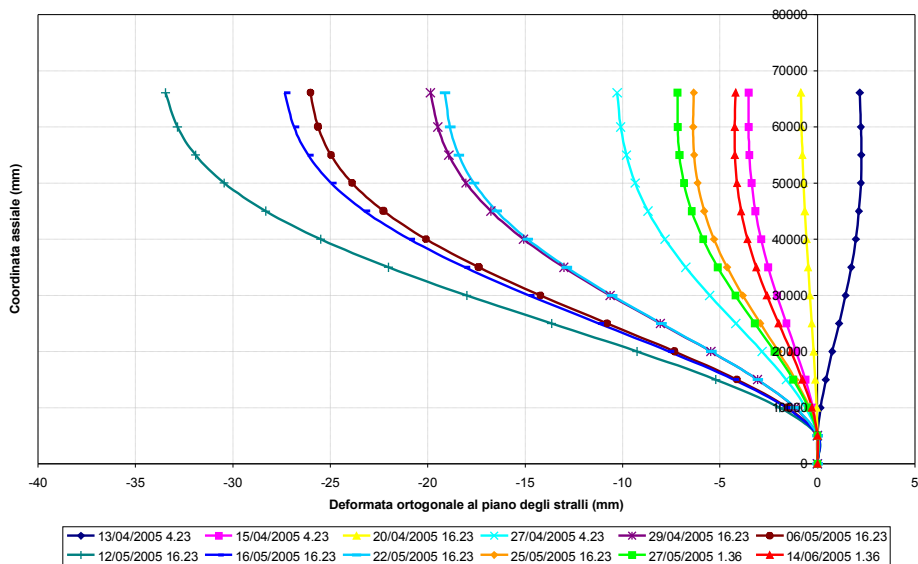


Figura 5 – Deformate dell'antenna durante la seconda fase di tiro degli stralli

### Interpretazione dati durante la fase di collaudo statico

Le prove di collaudo del ponte sono consistite in quattro prove di carico statiche realizzate mediante disposizione sull'impalcato di camion da 42 t a pieno carico, posizionati in modo da ottenere le massime sollecitazioni flessionali rispettivamente in corrispondenza dell'appoggio in corrispondenza dell'antenna, della campata strallata ovest e della campata strallata est; infine è stata effettuata un'ultima prova con disposizione dei camion in modo tale da ottenere la massima sollecitazione torsionale. L'interpretazione dei dati registrati durante le prove ha fornito deformate coerenti con le deformate teoriche attese e con le misure topografiche eseguite contestualmente. In Figura 6 sono riportati due esempi di deformate ricavate per l'impalcato.

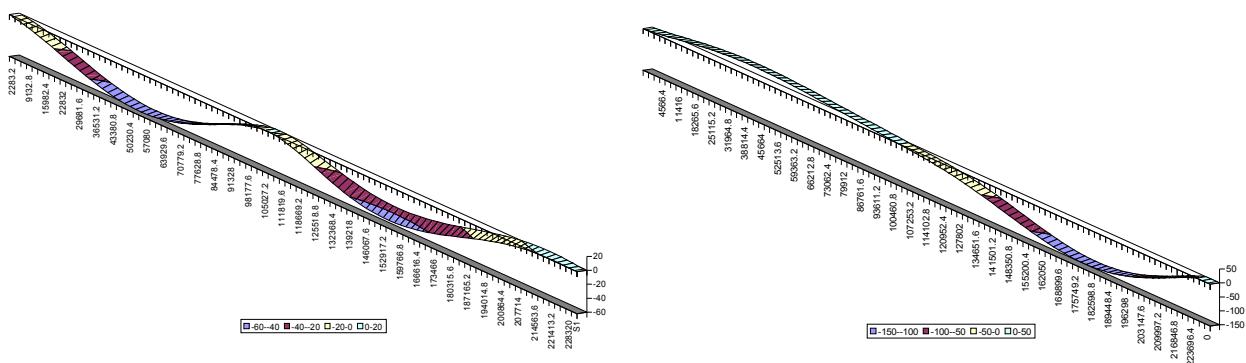


Figura 6 – Esempi di deformate dell'impalcato ricavate durante le prove di carico statiche di collaudo

## Interpretazione dati durante la fase di collaudo dinamico

Oltre alle prove statiche, è stata realizzata sulla struttura una campagna di indagini dinamiche, finalizzata alla caratterizzazione dei parametri dinamici propri della struttura. Per la scelta della tecnica di indagine, del sistema di acquisizione e della metodologia di interpretazione si è fatto riferimento alla norma UNI 10985 “Vibrazione su Ponti e Viadotti – Linee guida per l’Esecuzione di Prove e Rilievi Dinamici”, che fa riferimento alla tecnica classica di analisi di vibrazioni ambientali di tipo random. Questa si basa sulla valutazione e successiva interpretazione delle funzioni di densità autospettrali  $S_{x_r x_r}(f)$  e della funzioni di densità spettrale incrociata  $S_{x_r x_s}(f)$ , da ricavarsi attraverso la trasformata di Fourier discreta (DFT, Discrete Fourier Transform) delle funzioni di autocorrelazione e di cross-correlazione dei segnali acquisiti. La stima delle frequenze modali è basata sull’individuazione dei picchi degli autospettri e degli spettri incrociati, e sull’analisi della fase di quest’ultimi per distinguere fra le frequenze proprie della struttura e le frequenze dominanti dell’eccitazione. Il valore delle forme modali in corrispondenza della  $r$ -esima stazione di misura e dell’ $i$ -esima frequenza propria è determinato tramite la formula:

$$\Phi_{ri} = \sqrt{S_{x_r x_x}(f)}$$

Tale tecnica fornisce una stima ragionevole delle frequenze proprie e delle forme modali solo se i modi sono ben separati. In caso di modi ravvicinati (vale a dire modi con frequenze proprie simili) risulta difficile distinguere i due differenti modi, ed anche nel caso in cui si riesca a distinguere tali modi, la stima delle loro frequenze proprie si rivela pesantemente viziata. Inoltre, la stima delle frequenze fondamentali è limitata dalla frequenza di risoluzione delle densità spettrali, ed in ogni caso la definizione degli smorzamenti è incerta o impossibile.

Per superare tali limiti, e vista soprattutto la concreta possibilità della presenza di forme modali con frequenze proprie molto ravvicinate, si è deciso di fare ricorso ad una estensione di questa tecnica classica, definita Frequency Domain Decomposition (FDD). In questa tecnica, esattamente come per quella classica, si procede alla definizione della matrice spettrale, contenente gli auto-spettri e gli spettri incrociati. Tale matrice viene decomposta ad ogni frequenza tramite la Singular Value Decomposition (4). Tramite tale operazione matriciale la matrice spettrale è decomposta in una serie di funzioni di densità di potenza auto-spettrale, ognuna corrispondente ad un sistema ad un unico grado di libertà (SDOF). È stato dimostrato che i picchi di tali funzioni indicano la presenza di modi strutturali. I vettori singolari ricavati dalla SVD sono usati per la stima dei vettori delle forme modali, mentre le frequenze fondamentali sono calcolate riportando ogni funzione di densità auto-spettrale nuovamente nel dominio del tempo tramite l’anti-trasformata di Fourier. Le frequenze e lo smorzamento sono ricavati semplicemente dalle frequenze e dal decremento logaritmico delle corrispondenti funzioni di auto-correlazione dei sistemi SDOF. Il grande vantaggio della tecnica FDD è la possibilità di riuscire ad individuare con buona approssimazione anche modi molto ravvicinati e di stimare lo smorzamento associato ad ogni forma modale.

L’applicazione delle sollecitazioni è avvenuta mediante il passaggio di camion a velocità differenti, per simulare le normali condizioni di traffico previste, mentre l’acquisizione dei dati dinamici è stata realizzata utilizzando alcuni sensori dell’impalcato e degli stralli,



collegati ad una apposita centralina di acquisizione ad 8 canali: tale numero limitato di canali ha reso necessaria la realizzazione di tre diverse configurazioni di acquisizione, meglio descritte nel seguito, che sono state ricomposte in fase di elaborazione dei dati.

Al fine di poter cogliere sia le forme flessionali che le forme torsionali dell'impalcato si è proceduto a strumentare 3 sezioni per campata con 2 sensori posti alle estremità dell'impalcato. Per le ragioni precedentemente descritte è stato necessario realizzare 2 diverse configurazioni, usando come punti di riferimento le due coppie di sensori poste nelle sezioni centrali dell'impalcato. I restanti 4 canali sono stati utilizzati collegando un solo sensore in corrispondenza delle altre 4 sezioni. Nella prima configurazione sono stati collegati i sensori sulla parte esterna della curva, nella seconda quelli della parte interna. La caratterizzazione dinamica degli stralli è stata realizzata collegando alla centralina 2 sensori dell'impalcato (uno per campata) con funzione di punti di riferimento, e 6 sensori posizionati sugli stralli, come riportato in Figura 27. Si è scelto di monitorare 3 stralli per campata, preferendo gli stralli più lontani dall'antenna, in cui ci si aspetta che i modi flessionali dell'impalcato siano più evidenti.

L'elaborazione dei dati dinamici è stata realizzata utilizzando la tecnica descritta precedentemente, che fornisce un diagramma dal quale è possibile ricavare le frequenze principali, corrispondenti ai punti di picco del diagramma stesso, come mostrato in Figura 7. I picchi ottenuti sono stati poi sottoposti ad un'analisi di dettaglio, finalizzata alla separazione delle frequenze proprie degli stralli da quelle dell'impalcato, che ha portato alla suddivisione riportata nella Tabella 1.

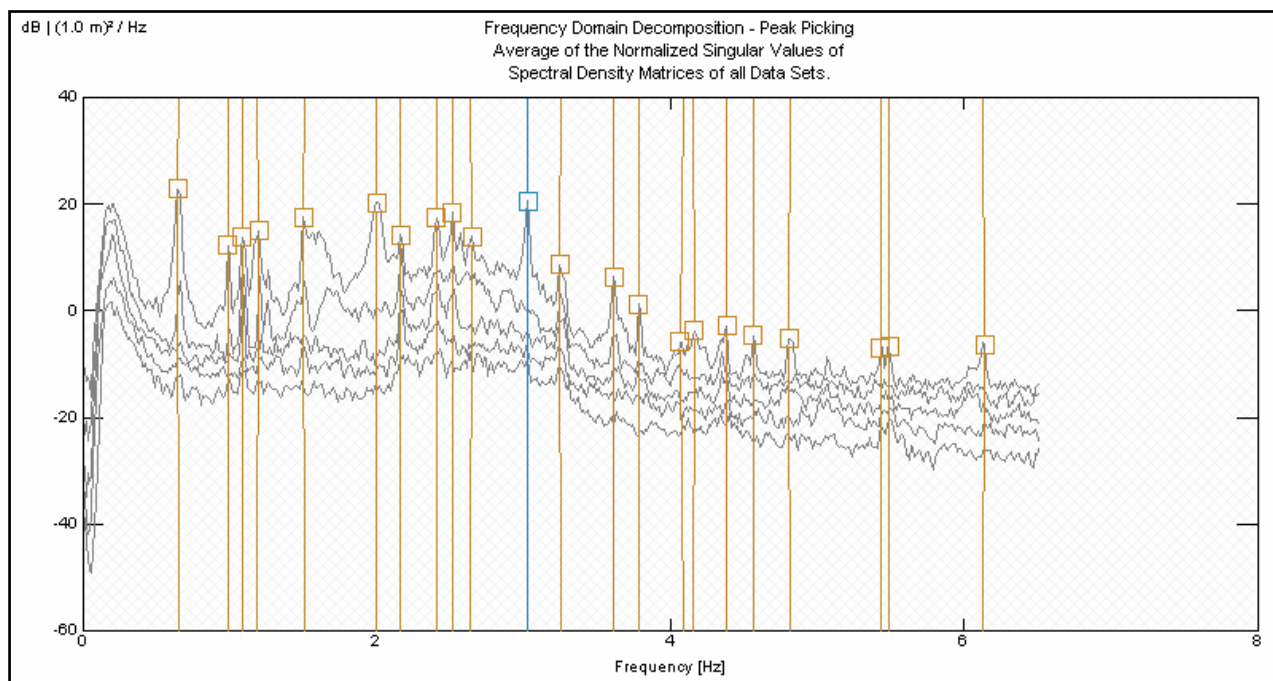


Figura 7 – Grafico relativo alla FDD con i picchi relativi alle frequenze proprie

Modo	F (Hz)	Elemento
1	0.64	Impalcato
2	1.09	Strallo S8-P4
3	1.10	Strallo S8-P2
4	1.19	Impalcato
5	1.21	Strallo S6-P4
6	1.27	Strallo S6-P2
7	1.44	Impalcato
8	1.51	Strallo S4-P4
9	1.56	Impalcato
10	2.00	Impalcato

Tabella 1 – Frequenze proprie ricavate

E' stato inoltre effettuato un confronto con una tecnica di acquisizione classica mediante accelerometri, che ha fornito una buona corrispondenza dei risultati ottenuti: rispetto a quest'ultima non sono state colte alcune frequenze proprie caratteristiche di modi di traslazione assiale e trasversale che il sistema non riesce a cogliere a causa della natura deformativa del dato misurato.

## Conclusioni

Il sistema di monitoraggio installato sul Canale Industriale Ovest del Porto Commerciale di Marghera ha permesso di interpretare il comportamento della struttura durante le principali fasi di costruzione e durante il collaudo dell'opera. Il confronto con misure classiche sia di carattere statico che dinamico ha mostrato una buona efficacia dell'algoritmo di interpretazione dati e ha permesso quindi di settare il sistema per essere utilizzato durante la fase di esercizio dell'opera. Tale sistema verrà configurato per effettuare un monitoraggio statico continuo dell'opera e parallelamente un monitoraggio dinamico non continuo.

## Bibliografia

1. D. Inaudi et al. - "Low-coherence Deformation Sensors for the Monitoring of Civil-engineering Structures", Sensors and Actuators A, N° 44, 1994, pp 125-130.
2. S. Lioret, P. K. Rastogi, L. Thévenaz, D. Inaudi 2003 – "Measurement of dynamic deformation using a path-unbalance Michelson-interferometer-based optical fiber sensing device", Optical Engineering, N°42 (3), 2003, pp 662-669.
3. D. Inaudi, S. Vurpillot - "Monitoring of concrete bridges with long-gage fiber optic sensors", Journal of Intelligent Material Systems and Structures, N° 10, 1999, pp 280-292
4. R. Brincker, L. Zhang, P. Andersen, , "Modal Identification from Ambient Responses using Frequency Domain Decomposition", 18<sup>th</sup> International Modal Analysis Conference, San Antonio, 2000.