

Confronto di due tecniche per l'identificazione e il monitoraggio dei cavi strutturali mediante prove sperimentali

Filippo Ubertini, Clemente Fuggini
Dipartimento di Meccanica Strutturale, Università di Pavia

SOMMARIO

I cavi metallici sono utilizzati in numerose applicazioni dell'Ingegneria Strutturale che vanno dalle linee di trasmissione della corrente elettrica ai ponti di grande luce. Il tema dell'identificazione e del monitoraggio di questi elementi riveste dunque un grande interesse, sia per l'individuazione in tempo reale di eventuali danneggiamenti, sia per l'applicazione di tecniche di controllo delle vibrazioni.

In questo lavoro vengono presentati i risultati di alcune indagini sperimentali svolte su un modello di laboratorio di cavo sospeso. In particolare vengono confrontate due tecniche per il monitoraggio del cavo, l'una basata sull'utilizzo di sensori laser optoelettrici senza contatto, l'altra basata sull'utilizzo di accelerometri crossbow.

Una campagna sperimentale è stata svolta allo scopo di analizzare le vibrazioni libere del cavo in regime di piccoli spostamenti, per identificare un modello numerico ad elementi finiti. Particolare attenzione è stata riservata alla determinazione degli smorzamenti modali, mediante tecniche consolidate basate sull'utilizzo della trasformata wavelet. Le due tecniche di monitoraggio proposte sono state inoltre confrontate sotto diversi punti di vista. In particolare sono stati presi in considerazione i seguenti aspetti: i) precisione e affidabilità delle misure, ii) ampiezza della banda di frequenze osservabili, iii) robustezza nei confronti di disturbi esterni.

Introduzione

I cavi metallici sono utilizzati in numerose applicazioni dell'Ingegneria Civile, che vanno dai ponti strallati e sospesi, ai cavi di trasmissione dell'energia elettrica [1]. Lo studio del comportamento dinamico non-lineare di tali elementi rappresenta pertanto un tema di grande interesse nella letteratura scientifica specialmente per quanto riguarda le applicazioni di controllo per la riduzione delle vibrazioni [2]. I cavi sono infatti esposti a vibrazioni eccessive per effetto della flessibilità e dei bassi coefficienti di smorzamento che li caratterizzano, con conseguente rischio di rotture a fatica [3].

La fase di identificazione sperimentale [4] è il primo passo per lo studio della dinamica del cavo. In questa fase è richiesta l'individuazione di 6-8 modi e soprattutto una stima accurata degli smorzamenti associati a ciascuno di questi modi. Sono pertanto necessari strumenti poco invasivi ed estremamente sensibili che misurino spostamenti, velocità o accelerazioni. Al contempo il monitoraggio in tempo reale delle vibrazioni risulta fondamentale nell'implementazione di una legge di controllo in retroazione (semi-attiva o passiva) e nella stima del danneggiamento a fatica. In questo caso è necessario misurare gli spostamenti (in-piano e fuori-piano) di almeno un punto significativo, privilegiando strumenti non invasivi e senza contatto.

1. Setup sperimentale

Il setup sperimentale realizzato è rappresentato in figura 1 e nelle successive figure 2 e 3. Si tratta di un modello in scala di cavo sospeso disponibile presso il laboratorio sperimentale interno al Dipartimento di Meccanica Strutturale dell'Università di Pavia. Il cavo è ancorato alle estremità mediante teste a snodo sferico tipo *Tescubal*, fissate su supporti rigidi posti alla stessa altezza. Gli ancoraggi sono realizzati mediante capicorda filettati innestati nelle teste a snodo. Ad una delle due estremità è collocata una cella di carico a rondella *FUTEK L2760* per la misura dinamica della componente orizzontale H del tiro all'appoggio. Due sensori optoelettrici *Wenglor* consentono la misura dello spostamento verticale v_0 (parallelo all'asse y) e fuori piano w_0 (parallelo all'asse z) di un punto posto circa ad un quarto della luce L . Un accelerometro triassiale, tipo *Crossbow* è fissato al cavo circa ai tre quarti della luce e consente la misura delle accelerazioni verticale \ddot{v}_1 e fuori piano \ddot{w}_1 .

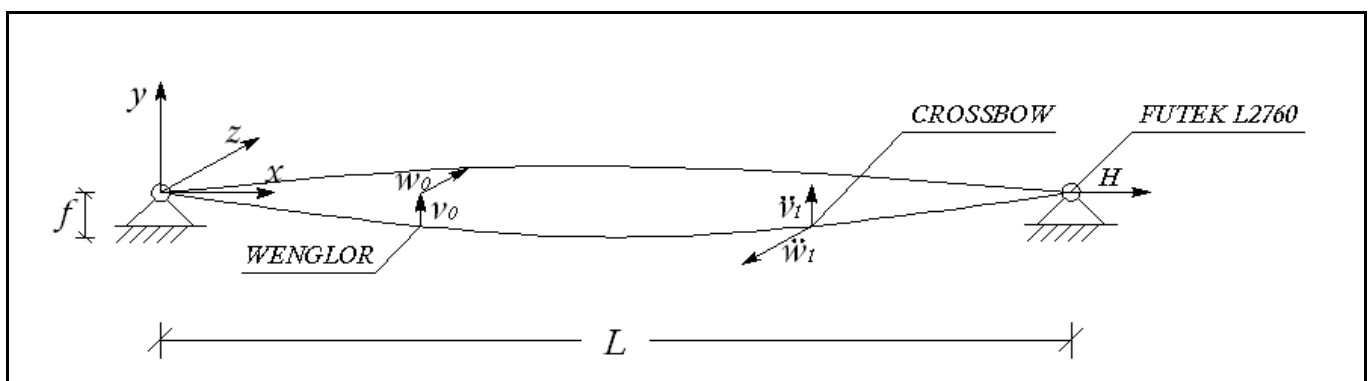


Figura 1 – Setup sperimentale



Figura 2 – Configurazione iniziale del cavo

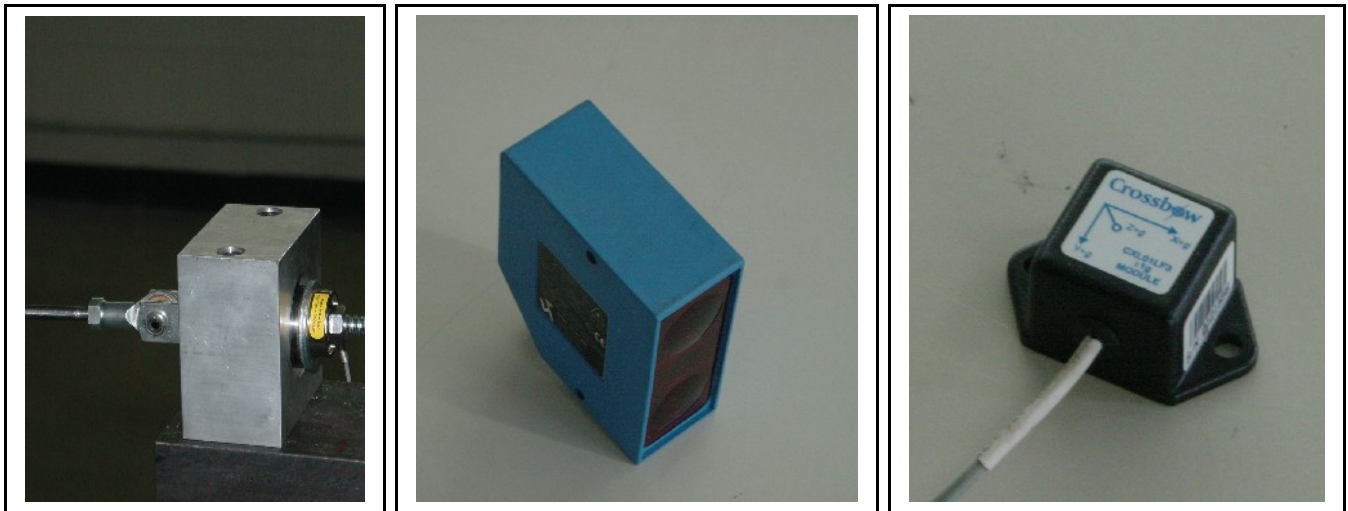


Figura 3 – Da destra a sinistra: cella di carico, sensore di spostamento, accelerometro

Il cavo, modello *Cronimo 1* prodotto dalla Teci divisione Redaelli, è realizzato in acciaio inox con le caratteristiche geometriche riassunte in tabella 1. Uno dei due ancoraggi è di tipo morto, mentre l'altro consente di variare il tiro nel cavo per mezzo di una vite senza fine, collegata al cavo attraverso un cuscinetto a sfere. Il peso del cavo libero è di $45.6g$, cui si aggiungono 6 masse sferiche equidistanti, del peso di $147g$ ciascuna. Ciò corrisponde, in prima approssimazione, ad un peso statico per unità di lunghezza $q = 3.856N/m$. La configurazione iniziale scelta per il cavo ha una freccia $f = 3.2cm$, corrispondente ad una fune molto tesa con un tiro statico agli appoggi $H \cong qL^2 / 8f = 84.89N$

$L(m)$	$f(m)$	$d(m)$
2.360	0.032	2

Tabella 1 – Caratteristiche geometriche cavo sospeso

1.1 Cella di carico

Come accennato in precedenza, la componente orizzontale del tiro ad un appoggio è misurata per mezzo di una cella di carico a rondella monodirezionale tipo *L2760*, prodotta dalla *FUTEK*, di diametro esterno pari a $24.9mm$ ed interno di $5.01mm$. La cella fornisce una tensione in uscita in V , direttamente proporzionale alla la forza applicata tra l'anello esterno e l'anello interno della cella. Il segnale trasmesso dalla cella di carico è acquisito tramite il software *LabView* prodotto dalla *National Instruments*, mediante un'architettura hardware costituita da *Chassis*, cavo seriale e scheda *DaQ* di interfaccia. In tabella 2 si riportano le principali caratteristiche tecniche della cella di carico, tra le quali si osserva un campo di lavoro ($0-225N$) all'interno del quale ricade il valore statico del tiro all'appoggio.

Campo di misura	0 - 225 N
Sensibilità nominale	2 mV/V
Errore di ripetibilità	+/- 0.5% RO
Errore per non linearità ed isteresi	+/- 0.5% RO
Errore di variazione termica dello zero	+/- 0.1% RO/°C
Sbilanciamento dello zero	+/- 1% RO
Sovraccarico sicuro	150% RO
Eccitazione massima (DC)	18 V
Resistenza nominale	700 Ω

Tabella 2 – Caratteristiche tecniche cella di carico FUTEK L2760

1.2 Trasduttori di spostamento

Per misurare gli spostamenti del cavo sono stati utilizzati sensori laser optoelettrici a tempo di volo per applicazioni di misura, del tipo *YT89GV80* prodotti dalla *Wenglor*. Si tratta di strumenti in grado di misurare, con precisione inferiore al millimetro, gli spostamenti di punti monitorati senza contatto diretto con l'oggetto indagato. Il principio di funzionamento sfrutta un raggio di luce (luce rossa visibile o infrarosso) emesso da una sorgente di luce (*LED*), rifratto dall'oggetto colpito e riacquisito da un rilevatore (*fototransistor*). La distanza dell'oggetto dal sensore viene ricavata tramite il tempo di volo che l'onda emessa impiega per coprire l'intero percorso sensore-oggetto-sensore. In tabella 3 si riportano le principali caratteristiche tecniche dei sensori, tra cui emerge una buona risoluzione e un ridotto tempo di risposta. Si sottolinea tuttavia una certa sensibilità alle variazioni termiche che può determinare perdite di precisione per applicazioni all'aperto. In figura 4 viene rappresentato graficamente il campo di lavoro dei sensori, in cui *a* indica la tensione analogica di uscita, *b* la distanza di misurazione, *c* il campo di regolazione della distanza da misurare (+/- 20 cm) e *d* il campo di misurazione. Da tale figura si osserva che il legame tra il voltaggio in uscita *a* e la distanza misurata *b* è lineare nell'intervallo 30-330 cm. Al di fuori di tale intervallo si ha la saturazione del dispositivo.

Dati ottici	Campo di lavoro	300 - 3700mm
	Distanza di misurazione	2000mm
	Campo di misurazione	3000mm
	Distanza di misurazione regolabile (+/-)	200mm
	Risoluzione	1mm
	Linearità	1.5%
	Isteresi di commutazione	15mm
	Lunghezza d'onda	660nm
Dati Elettrici	Tensione di alimentazione (DC)	18-30V
	Frequenza limite	60Hz
	Tempo di risposta	8ms
	Deriva termica	< 2mm/°C
	Fascia di temperatura	-10-60°C

Tabella 3 – Caratteristiche tecniche sensori *Wenglor YT89GV80*

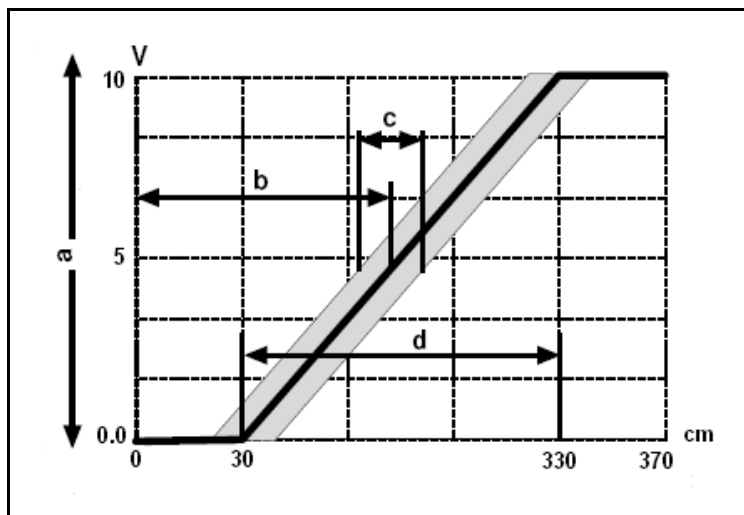


Figura 4 – Campo di funzionamento sensori *Wenglor YT89GV80*

1.3 Accelerometro

L'identificazione modale del cavo, descritta al paragrafo 3, ha richiesto anche l'utilizzo di un accelerometro capacitivo triassiale *CXL01LF3*, prodotto dalla *Crossbow*. Si tratta di un accelerometro di tipo *bulk* micromeccanico, strutturato su tre strati di silicio che formano un condensatore differenziale. Tale strumento è in grado di leggere accelerazioni fino ad $1g$ (con g pari all'accelerazione di gravità) e presenta modeste dimensioni e peso molto ridotto ($25gr$). Nelle prove effettuate il dispositivo è stato solidarizzato al cavo mediante incollaggio su un supporto leggero. Le caratteristiche tecniche principali dell'accelerometro sono riportate in tabella 4. Si osserva in particolare una sostanziale indipendenza dalla temperatura di funzionamento.

Intervallo di funzionamento	$\pm 1g$
Sensibilità	$2 V/g$
Sensibilità trasversale	$\pm 5\% (FS)$
Errore per non linearità	$\pm 3\% (FS)$
Rumore	$0.5 mg_{rms}$
Densità di rumore	$70 \mu g/Hz^{1/2}$
Temperatura di funzionamento	$-40-85^{\circ}C$
Tensione di alimentazione (DC)	$6-30 V$
Ampiezza di banda (DC)	$50 Hz$

Tabella 4 – Caratteristiche tecniche accelerometri triassiali *Crossbow CXL01LF3*

2. Identificazione modale

L'identificazione modale del cavo (componenti spettrali e smorzamenti modali) è stata effettuata mediante oscillazioni libere in regime di piccoli spostamenti, utilizzando sia i sensori optoelettrici che l'accelerometro. Trattandosi di un modello in scala di cavo sospeso, il disturbo dovuto alla presenza dell'accelerometro modifica leggermente le frequenze fondamentali del cavo. Sperimentalmente si è osservata una sensibilità di tali frequenze alla presenza dell'accelerometro compresa tra il 3 e il 6%. I risultati ottenuti

devono pertanto intendersi significativi del sistema combinato cavo-accelerometro. I valori ottenuti dalla campagna di prove sperimentali sono stati successivamente utilizzati per tarare un modello numerico ad elementi finiti, implementato nell'ambiente commerciale *ANSYS-CIVILFEM*.

2.1 Descrizione delle prove

Nell'effettuare le prove particolare attenzione è stata riposta nel garantire un corretto posizionamento degli strumenti di misura. I sensori di spostamento sono stati collocati in corrispondenza della massa di piombo posta circa ad un quarto della luce del cavo, in modo da acquisire gli spostamenti v_0 e w_0 . Entrambi i sensori, ciascuno per le rispettive direzioni di monitoraggio, si trovano ad una distanza dalla massa di piombo pari a circa 35cm. L'accelerometro triassiale è stato collocato circa ai tre quarti della luce in modo da leggere le accelerazioni \ddot{v}_1 e \ddot{w}_1 .

Per entrambi i dispositivi sono state effettuate due prove:

- La prima è consistita in oscillazioni libere prevalentemente nel piano. In questo caso si è avuta particolare cura che la deformata iniziale avesse una forma non simmetrica rispetto alla mezzeria del cavo in modo da eccitare anche i modi emisimmetrici.
- La seconda è consistita in oscillazioni libere spaziali. Il cavo è stato pertanto disposto secondo una configurazione iniziale (non simmetrica) fuori piano. L'accoppiamento modale tra vibrazioni fuori piano e vibrazioni nel piano ha determinato un moto spaziale.

I segnali ottenuti nelle due prove sono stati acquisiti con una frequenza di campionamento di 250 Hz e le frequenze fondamentali sono state identificate mediante la funzione di densità spettrale (PSD) delle storie temporali così ottenute. La determinazione del coefficiente di smorzamento è avvenuta tramite l'utilizzo della trasformata Wavelet [4] che consente di ottenere il valore dello smorzamento viscoso corrispondente ad una data frequenza di vibrazione. Tale trasformata è definita, per un dato segnale $x(t)$, dalla seguente espressione:

$$W_h(\bar{a}, \bar{b}) = \frac{1}{\sqrt{\bar{a}}} \int_{-\infty}^{\infty} x(t) h^* \left(\frac{t - \bar{b}}{\bar{a}} \right) dt \quad (1)$$

in cui h^* è la complessa coniugata della funzione Wavelet h , il parametro \bar{a} definisce la dilatazione della funzione e \bar{b} localizza la funzione nel dominio del tempo. La funzione Wavelet utilizzata nel presente lavoro è del tipo di Morlet:

$$h(t) = e^{i\omega_0 t} e^{-t^2/2} \quad (2)$$

in cui ω_0 è un parametro legato alle frequenze del sistema [4]. Il modulo $|W_h(\bar{a}, \bar{b})|$ della trasformata è una funzione reale aventi dei massimi (creste) in corrispondenza di valori discreti del parametro \bar{a} che corrispondono alle frequenze fondamentali del sistema. Detta \bar{a}_n la dilatazione corrispondente al modo n -esimo, il corrispondente smorzamento modale è dato da:

$$\xi_n = \frac{1}{\omega_n} \frac{d}{dt} k_n(t) = \frac{1}{\omega_n} \frac{d}{dt} \left[|W_h(\bar{a}_n, \bar{b})| e^{(a_n \theta(t) - \omega_0)^2} \right] \quad (3)$$

in cui ω_n rappresenta la pulsazione propria del modo considerato e $\theta(t) = \omega_n \sqrt{1 - \xi_n^2} t + \varphi_0$ è la fase della trasformata $W_h(\bar{a}_n, \bar{b})$.

2.2 Risultati sperimentali

Dalle osservazioni effettuate risulta che il cavo, in oscillazioni libere, presenta un comportamento identificabile sia per mezzo di sensori di spostamento, sia di accelerometri. In particolare emerge la possibilità di identificare almeno tre frequenze fondamentali del moto del cavo in oscillazioni libere sia in piano che fuori piano. I maggiori smorzamenti evidenziati nel piano giustificano le diverse durate delle osservazioni:

- In piano acquisizioni di dati ad una frequenza di campionamento di 250 Hz, per una durata complessiva di circa 12s
- Fuori piano acquisizioni di dati ad una frequenza di campionamento di 250 Hz, per una durata complessiva di circa 20s

Nelle figure 5, 6, 7 e 8 si riportano le storie temporali, delle oscillazioni libere nel piano e fuori piano, per i due strumenti utilizzati

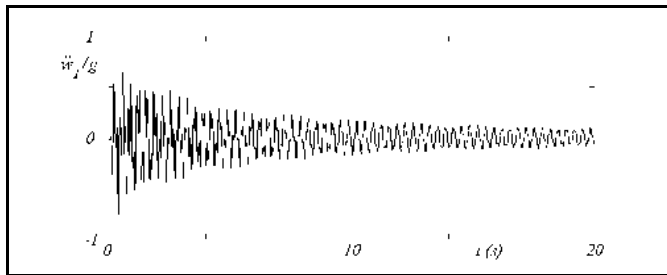


Figura 5 – Storia temporale accelerometro fuori piano

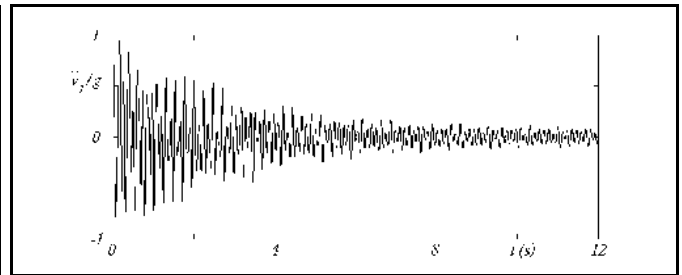


Figura 6 – Storia temporale accelerometro nel piano

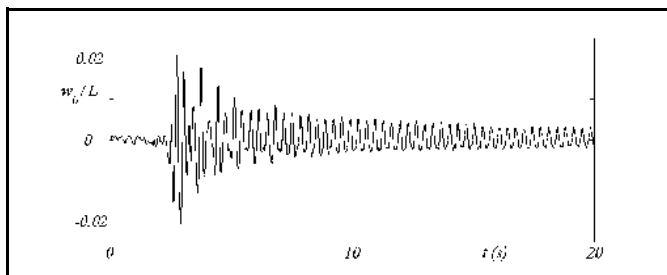


Figura 7 – Storia temporale sensore fuori piano

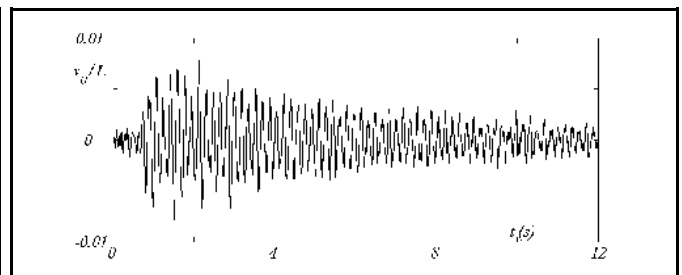


Figura 8 – Storia temporale sensore nel piano

Per i segnali acquisiti da entrambi gli strumenti, si è indagato il contenuto in frequenza tramite la trasformata di Fourier. Si sono ottenute le funzioni di densità spettrale (PSD), dalle quali è possibile identificare le frequenze naturali del cavo sia per moto nel piano che per oscillazioni fuori piano. Si riportano nelle figure 9, 10, 11 e 12 i diagrammi delle PSD, i cui picchi individuano i valori delle frequenze naturali individuate.

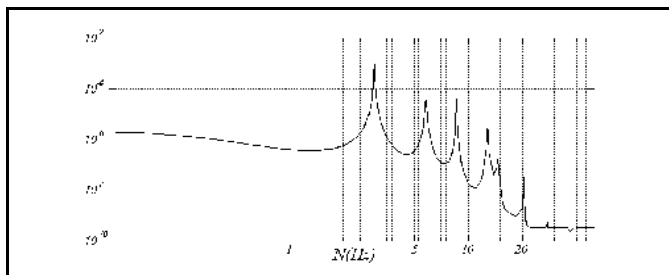


Figura 9 – Densità spettrale accelerometro fuori piano

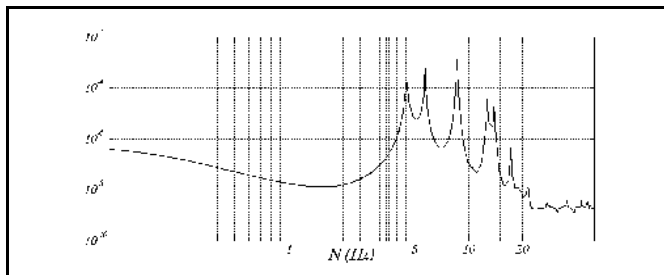


Figura 10 – Densità spettrale accelerometro nel piano

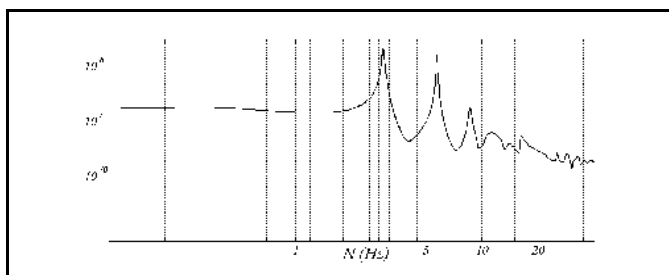


Figura 11 – Densità spettrale sensore fuori piano

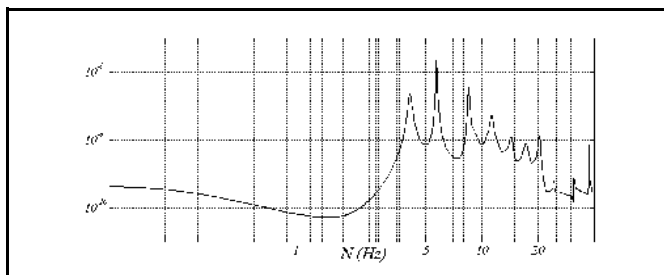


Figura 12 – Densità spettrale sensore nel piano

Come si può notare dai grafici riportati nelle figure 9,10,11,12, rappresentativi delle funzioni di densità spettrale del contenuto in frequenza dei segnali acquisiti, emerge, in particolare, una corrispondenza molto buona tra i valori ottenuti dai sensori optoelettrici e quelli degli accelerometri. Si nota tuttavia una leggera discrepanza relativa alla lettura della prima frequenza fondamentale nel piano. Tale circostanza è probabilmente imputabile ad una minore sensibilità dei sensori optoelettrici rispetto a quanto offerto dall'accelerometro.

La maggiore affidabilità dell'accelerometro è confermata anche dal modello numerico ad elementi finiti tarato sui risultati sperimentali. Tale modello è stato realizzato tramite il codice di calcolo ad elementi finiti *ANSYS-CIVILFEM*. Il valore del modulo elastico è stato ottimizzato in modo da ottenere il massimo accordo possibile con i risultati sperimentali, a parità di configurazione geometrica. Nella tabella 5 si riassumono i valori delle prime tre frequenze naturali del cavo per vibrazioni nel piano e fuori piano ottenute tramite sensori ed accelerometri e si indicano inoltre i valori delle frequenze ottenute dall'analisi numerica sul modello ad elementi finiti. In tabella 6 si confrontano, in termini di variazioni percentuali, i valori delle frequenze naturali del cavo, riportate in tabella 5. Come desumibile dall'analisi dei valori ottenuti, l'accordo tra il modello numerico e i risultati relativi all'accelerometro è notevole, mentre si osserva una leggera discrepanza rispetto a quanto ottenuto con i sensori optoelettrici in particolar modo relativamente alla prima frequenza nel piano.

<i>Modo di vibrare</i>	<i>Frequenze</i>	<i>Sensore laser</i>	<i>Accelerometro</i>	<i>FEM Ansys</i>
<i>In piano</i>	<i>N1 (Hz)</i>	4,278	4,467	4,506
	<i>N2 (Hz)</i>	5,737	5,737	5,758
	<i>N3 (Hz)</i>	8,667	8,667	8,774
<i>Fuori piano</i>	<i>N1 (Hz)</i>	2,979	2,991	2,996
	<i>N2 (Hz)</i>	5,776	5,767	5,761
	<i>N3 (Hz)</i>	8,707	8,606	8,722

Tabella 5 – Identificazione frequenze fondamentali

Modo di vibrare	Variazione % Frequenze	Sensore laser – FEM Ansys	Accelerometro- FEM Ansys
In piano	N1 %	5,06	0,87
	N2 %	0,36	0,36
	N3 %	1,22	1,22
Fuori piano	N1 %	0,57	0,17
	N2 %	0,26	0,10
	N3 %	0,17	1,33

Tabella 6 – Differenza percentuale tra le frequenze identificate

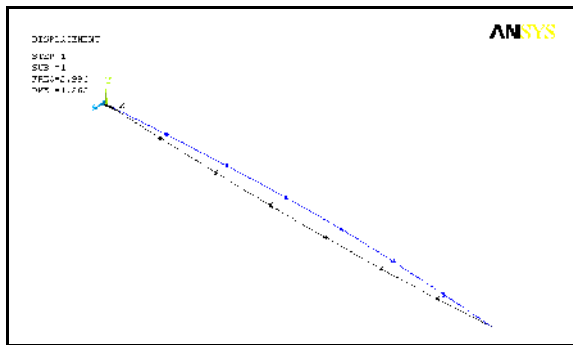


Figura 13 – I modo di vibrazione fuori piano

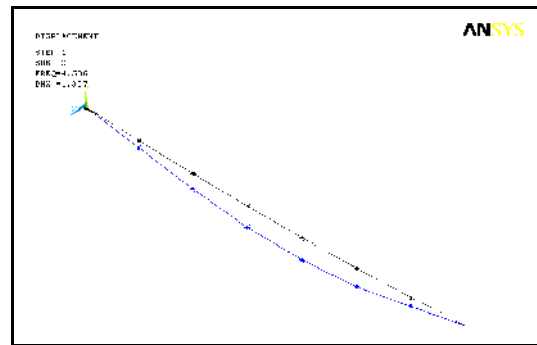


Figura 14 – I modo di vibrazione nel piano

I coefficienti modali di smorzamento viscoso costituiscono altri parametri significativi per l'identificazione del cavo. Sono stati ricavati tramite la trasformata Wavelet di Morlet, per oscillazioni del cavo nel piano e fuori piano misurate dai sensori e dall'accelerometro. Nelle figure 15 e 16 si riportano i grafici relativi all'andamento della funzione $k(t)$, calcolata come descritto dall'equazione (4), per il primo modo in piano e fuori piano utilizzando l'accelerometro. Nelle figure 17 e 18, gli stessi grafici sono riferiti alle misure con i sensori optoelettrici. I coefficienti di smorzamento sono legati alla pendenza della $k(t)$ in un piano semilogaritmico, nel tratto più marcatamente lineare (corrispondente al decremento esponenziale previsto in teoria per coefficienti di smorzamento costanti).

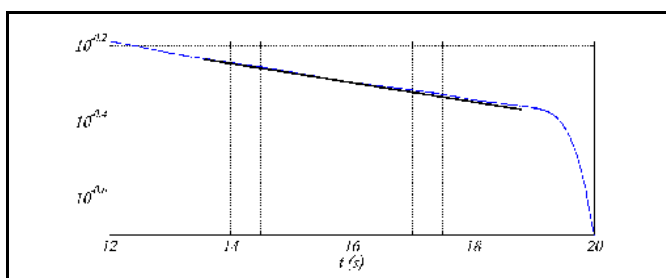


Figura 15 – Andamento nel tempo della funzione $k(t)$

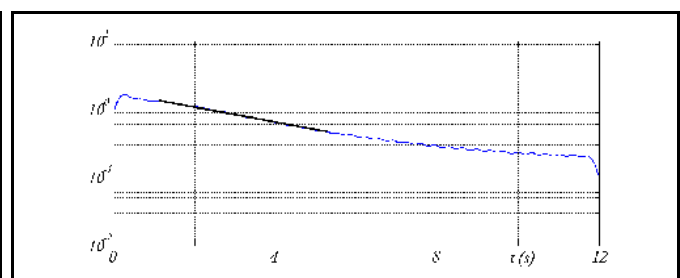


Figura 16 – Andamento nel tempo della funzione $k(t)$

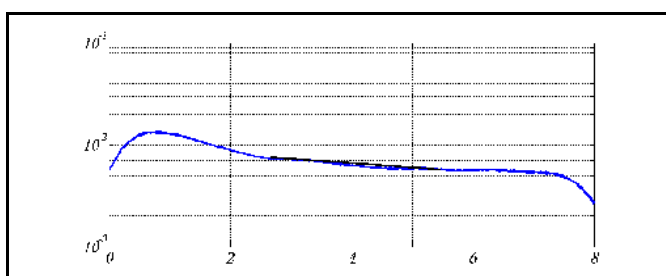


Figura 17 – Andamento nel tempo della funzione $k(t)$

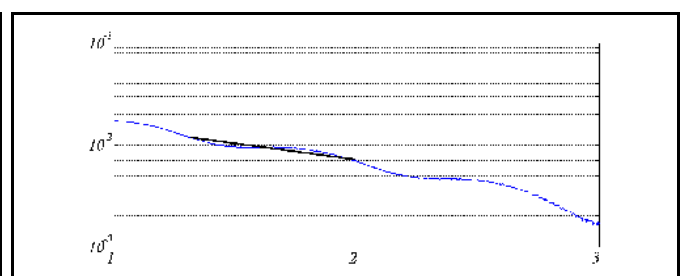


Figura 18 – Andamento nel tempo della funzione $k(t)$

Modo	di	Coefficiente di	Sensore	Accelerometr
------	----	-----------------	---------	--------------

<i>vibrare</i>	<i>smorzamento</i>	<i>laser</i>	<i>o</i>
<i>In piano</i>	$\zeta (N1)\%$	/	2.6
	$\zeta (N2)\%$	1.7	2.4
	$\zeta (N3) \%$	/	1.5
<i>Fuori piano</i>	$\zeta (N1) \%$	1.9	1.9
	$\zeta (N2) \%$	1.55	2.2
	$\zeta (N3) \%$	/	1.65

Tabella 7 – Coefficienti di smorzamento identificati

La tabella 7 riporta i coefficienti modali di smorzamento identificati con sensori e accelerometri. Si nota, in particolare, che l'accordo tra i valori ottenuti non è sempre ottimo. Con gli accelerometri inoltre si riescono ad individuare un maggior numero di coefficienti di smorzamento rispetto a quanto non avvenga per i sensori. Ciò, unitamente alla maggiore linearità dei grafici riportati nelle figure 15 e 16 rispetto a quelli delle figure 17 e 18, rende più affidabili i valori ottenuti con gli accelerometri.

Conclusione

Sono state confrontate due architetture sperimentali per l'identificazione e il monitoraggio di cavi strutturali. La prima è basata sull'utilizzo di un accelerometro triassiale, tipo "crossbow", mentre la seconda prevede l'utilizzo di sensori optoelettrici senza contatto. Le prove sono state svolte su un modello in scala di cavo sospeso in regime di oscillazioni libere. I valori delle frequenze sperimentali ottenute da entrambe le tecniche di misura sono risultate in ottimo accordo tra loro ed hanno consentito la "taratura" di un modello numerico ad elementi finiti. L'utilizzo dell'accelerometro triassiale ha permesso, in particolare, di individuare un numero maggiore di modi e di smorzamenti, rispetto ai sensori, risultando più idoneo nella fase di identificazione. In quella di monitoraggio, al contrario, i sensori optoelettrici sono risultati maggiormente adatti in quanto consentono la misura diretta degli spostamenti la cui conoscenza è fondamentale per applicazioni di controllo e per la stima del danno a fatica.

Ringraziamenti

Gli autori ringraziano la Tecni Redaelli S.p.A per l'assistenza fornita e l'Università di Pavia per la concessione del "Laboratorio Didattico Sperimentale", diretto dal Prof. F. Casciati.

Bibliografia

1. F. Cluni- "Studio del comportamento dinamico dei cavi strutturali, modelli numerici e prove sperimentali", Tesi di Dottorato di Ricerca, Università di Perugia, 2004.
2. F. Casciati, F. Ubertini- "Control of cables nonlinear vibrations under turbulent wind action", 5th Computational Stochastic Mechanics Conference, Rodos, 21-23 June, 2006.
3. F. Cluni, V. Gusella, F. Ubertini- "A parametric investigation of wind-induced cable fatigue", Engineering Structures (article in press), 2007.
4. T. Kijowski, A. Kareem- "Wavelet transforms for system identification in Civil Engineering", Computer-Aided Civil Infrastructure Engineering, N° 18, 2003.