

**Redazione**

Duilio Benedetti – Politecnico di Milano  
 Alberto Castellani – Politecnico di Milano  
 Paolo E. Pinto – Università di Roma

**Comitato scientifico**

Giuliano Augusti – Università di Roma  
 Franco Braga – Università di Potenza  
 Mario Como – II<sup>a</sup> Università di Roma  
 Alfredo Corsanego – Università di Genova  
 Angelo Di Tommaso – Università di Venezia  
 Ezio Faccioli – Politecnico di Milano  
 Carlo Gavarini – Università di Roma  
 Elio Giangreco – Università di Napoli  
 Giancarlo Gioda – Politecnico di Milano  
 Michele Jamiolkowski – Politecnico di Torino  
 Sergio Lagomarsino – Università di Genova  
 Giorgio Macchi – Università di Pavia  
 Guido Magenes – Università di Pavia  
 Giovanni Menditto – Università di Ancona  
 Vincenzo Petrini – Politecnico di Milano  
 Roberto Ramasco – Università di Napoli  
 Paolo Rugari – Castalia, Milano  
 Luca Sanpaolese – Università di Pisa  
 Carlo Viggiani – Università di Napoli

**Direttore responsabile**

Alberto Castellani

**Coordinatore editoriale**

Duilio Benedetti

**Redazione, amministrazione, abbonamenti e pubblicità**

Patron Editore  
 Via Badini 12  
 Quarto Inferiore 40050 Bologna  
 Tel. (051) 767003 - Fax (051) 768252  
 e-mail: info@patroneditore.com  
 Sito: www.patroneditore.com

**Stampa:**

Tipografia, Litografia MODERNA, Bologna

**Abbonamento:**

€ 53,00; (estero € 57,00).

**Fascicoli arretrati:**

€ 20,00; (estero € 23,00).

Versamento sul c.c.p. n. 16141400 intestato all'editore.

L'abbonamento decorre dal 1° gennaio con diritto al ricevimento dei fascicoli arretrati.

I fascicoli non pervenuti possono essere richiesti dall'abbonato non oltre 20 giorni dopo la ricezione del numero successivo.

Ingegneria Sismica  
 Registrazione Tribunale di Bologna n. 5139 del 20.2.84

# ingegneria sismica

Anno XXI - N. 3 - settembre-dicembre 2004 - Pagine 1-70

**Sommario**

Costruzioni in muratura: duttilità, norme ed esperienze <i>D. Benedetti</i>	Pag. 5
Valutazione sperimentale delle caratteristiche dinamiche delle torri-faro dell'aeroporto dello stretto <i>G. Buda, M. Buonsanti, A. Santini</i>	19
Modelli per la previsione della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera <i>E. Del Monte, G. Lavacchini, A. Vignoli</i>	30
Verifica e progetto allo stato limite ultimo di pilastri in c.a. a sezione rettangolare: un metodo semplificato <i>A. Ghersi, M. Muratore</i>	41
Analisi sperimentali e numeriche per la valutazione della resistenza a taglio delle murature <i>A. Borri, M. Corradi, L. Galano, A. Vignoli</i>	50
 <b>Invito al dibattito</b>	
Sull'aggiornamento delle norme antisismiche nazionali <i>C. Montuori</i>	69
 <b>Elenco degli inserzionisti</b>	
AMV Ronchi dei Legionari (GO)	p. II cop.
CONCRETE Padova	" 1
AeDES San Miniato (PI)	" III cop.
S.T.S. S. Agata Li Battiati (CT)	" IV cop.





# Valutazione sperimentale delle caratteristiche dinamiche delle torri-faro dell'aeroporto dello stretto

Giuseppe Buda\*, Michele Buonsanti\*\*, Adolfo Santini\*\*

**SOMMARIO** – Una campagna di prove sperimentali al vero è stata condotta su una delle torri-faro del piazzale di sosta degli aeromobili dell'Aeroporto di Reggio Calabria allo scopo di valutarne le proprietà dinamiche. Le prove sono state effettuate in condizioni di vibrazioni libere, rilasciando istantaneamente la struttura da una configurazione iniziale deformata. La risposta dinamica è stata rilevata mediante trasduttori di accelerazione di tipo capacitivo ed i parametri modali sono stati stimati sia nel dominio della frequenza che nel dominio del tempo. Tali parametri sono stati infine utilizzati per valutare la validità di un modello teorico agli elementi finiti. Questo lavoro descrive la concezione e lo svolgimento delle prove e la successiva elaborazione dei risultati.

**SUMMARY** – Some experimental dynamic tests have been conducted in order to estimate the dynamic characteristics of a monotubular steel light-tower at the aircraft parking area of Reggio Calabria Airport in Italy. Experimental tests have been performed in free vibration conditions, which have been initiated by a sudden release from a static deflection. The dynamic response has been measured by a set of accelerometers attached at several stations along the tower. The experimental modal analysis has been performed both in frequency and in time domain. The estimated modal parameters, natural frequencies, damping factors and modal shapes, have been used in order to validate a FE model, formulated considering the geometrical and mechanical design properties of the tower.

*Parole chiave:* identificazione strutturale, vibrazioni libere, validazione di un modello.

*Key words:* structural identification, free vibrations, model validation.

## 1. Introduzione

Il monitoraggio strutturale è attualmente oggetto di notevoli applicazioni e ricerche nel campo dell'ingegneria civile, sulla spinta della crescente età delle opere infrastrutturali che richiedono costosi interventi di manutenzione. Lo scopo è quello di ottenere informazioni quantitative dettagliate sulle proprietà geometriche e meccaniche di un sistema strutturale, in maniera da poter procedere alla valutazione dell'integrità strutturale ed all'identificazione della natura e della localizzazione di un eventuale danno.

Nell'ambito di queste problematiche è stata stipulata una convenzione tra l'Ente Nazionale per l'Aviazione Civile, Direzione Circostrutturale di Reggio Calabria, ed il Dipartimento di Meccanica e Materiali dell'Università degli Studi *Mediterranea* di Reggio Calabria, avente per oggetto la valutazione dell'integrità strutturale delle torri-faro monotubolari del piazzale di sosta degli aeromobili dell'Aeroporto di Reggio Calabria.

A tale scopo si è tenuto conto che la presenza di un eventuale danno strutturale altera in maniera significativa la risposta dinamica a causa delle modificazioni della rigidità e dei meccanismi di dissipazione di

energia. Pertanto la valutazione dell'integrità strutturale delle torri-faro è stata effettuata confrontando le frequenze ed i modi naturali di vibrazione nelle attuali condizioni di esercizio con le medesime quantità calcolate attraverso un modello teorico agli elementi finiti basato sul comportamento ideale del materiale e degli elementi strutturali. Le frequenze ed i modi naturali di vibrazione sono stati stimati attraverso i metodi dell'analisi modale sperimentale, utilizzando i risultati di una campagna di prove dinamiche al vero. Poiché le torri-faro sono identiche tra di loro sia per quanto riguarda le caratteristiche geometriche, sia per quanto riguarda lo stato di conservazione, le prove sono state effettuate solo per quella prospiciente l'edificio della torre di controllo, denominata torre-faro n. 1.

Inizialmente è stato eseguito un rilievo delle caratteristiche geometriche di tutti gli elementi strutturali. Successivamente è stato formulato un modello preliminare agli elementi finiti in grado di descrivere, da un punto di vista teorico, il comportamento strutturale delle torri-faro in campo statico e dinamico. Attraverso questo modello sono state calcolate le frequenze ed i modi naturali di vibrazione teorici del sistema, le cui forme hanno fornito utili indicazioni per l'organizzazione delle prove dinamiche ed in particolare per la scelta e la collocazione dei trasduttori di misura e per le modalità di elaborazione dei segnali registrati.

Nel seguito sono state effettuate le prove dinamiche in condizioni di vibrazioni libere, rilasciando istantaneamente la torre-faro dopo aver imposto uno spostamen-

\* Dipartimento di Ingegneria Civile ed Ambientale – Sezione di Ingegneria Strutturale – Università degli Studi di Catania.

\*\* Dipartimento di Meccanica e Materiali – Università degli Studi *Mediterranea* di Reggio Calabria.

to statico in sommità. Dai segnali registrati sono state stimate, sia nel dominio della frequenza che nel dominio del tempo, le caratteristiche dinamiche del sistema in termini di frequenze naturali di vibrazione, di modi naturali di vibrazione e di rapporti di smorzamento modale. Il confronto tra le caratteristiche dinamiche sperimentali e quelle teoriche ha permesso, infine, di valutare l'affidabilità del modello preliminare agli elementi finiti in relazione alla sua capacità di descrivere il comportamento dinamico delle torri-faro nell'attuale stato di conservazione.

Il buon grado di correlazione tra le caratteristiche dinamiche teoriche e quelle sperimentali ha consentito di stabilire che le torri-faro non presentano fenomeni evidenti di danneggiamento strutturale.

## 2. Descrizione delle torri-faro

Le torri-faro, identiche tra loro, hanno il fusto costituito da cinque tronchi di acciaio a sezione circolare cava, Fig. 1(a). La giunzione tra il secondo ed il terzo tronco è realizzata mediante una flangia bullonata, mentre tutte le altre sono effettuate mediante innesti a cannocchiale saldati, Fig. 1(b). Il tronco inferiore è incastrato rigidamente ad un plinto di fondazione realizzato in calcestruzzo armato, mentre il fusto porta in sommità i proiettori, montati su una piattaforma metallica munita di ringhiera. Una scala metallica, bullonata lungo lo sviluppo del fusto e dotata di un pianerottolo di riposo, consente l'accesso alla piattaforma superiore. Le lunghezze, i diametri e gli spessori dei tronchi, ot-

tenuti mediante misure effettuate *in situ*, sono indicati nella Tab. 1. Nella medesima tabella sono anche riportate le aree delle sezioni trasversali, i momenti d'inerzia, i moduli di resistenza ed i pesi dei singoli tronchi.

Gli schemi della vista laterale e della vista frontale della torre-faro, con e senza la scala metallica di accesso alla piattaforma superiore, sono riportati in Fig. 2. Nella medesima figura è anche riportato il sistema di riferimento XYZ considerato, la disposizione e la direzione dei trasduttori di accelerazione, numerati da 01 a 08, che sono stati utilizzati per la misura della risposta dinamica ed i nodi principali del modello agli elementi finiti, numerati da 01 a 10.

## 3. Il modello preliminare agli elementi finiti

Prima della progettazione e dell'esecuzione delle prove sperimentali è stata effettuata un'analisi modale preliminare della struttura mediante un modello teorico agli elementi finiti. Attraverso tale analisi è stata ottenuta una stima iniziale delle prime frequenze di vibrazione del sistema e delle corrispondenti forme modali. La stima dei valori delle frequenze significative del sistema ha consentito di fissare un valore adeguato della frequenza di campionamento dei segnali acquisiti, mentre la stima delle forme modali ha permesso di stabilire una disposizione ottimale dei trasduttori di accelerazione, che sono stati posti convenientemente lontani dai punti nodali.

Il modello agli elementi finiti è stato formulato utilizzando elementi monodimensionali con massa distri-

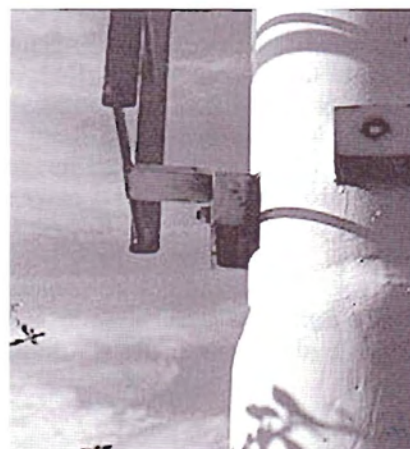
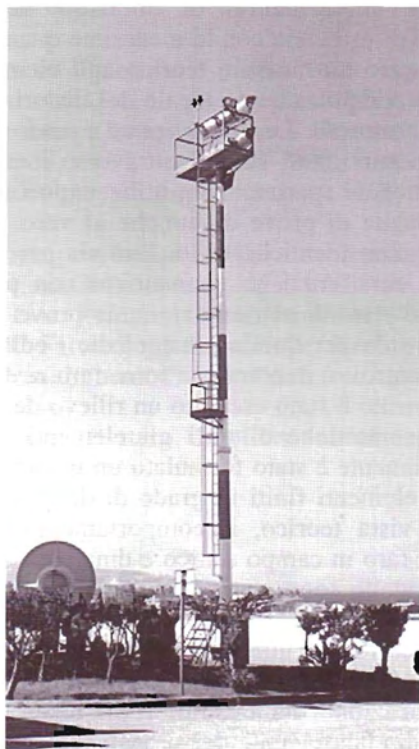


Fig. 1. (a) Vista d'insieme della torre-faro n. 1. (b) Dettagli della flangia bullonata e degli innesti a cannocchiale saldati.

Tabella 1. Caratteristiche geometriche della torre-faro.

Tronco	Quota [m]		Lunghezza [m]	Diametro esterno [cm]	Spessore [mm]	A [cm <sup>2</sup> ]	I [cm <sup>4</sup> ]	W [cm <sup>3</sup> ]	P [N/m]
	iniziale	finale							
5	14.20	15.00	0.80	16.83	4.5	23.2	777	92.4	181
4	10.60	14.20	3.60	21.91	5.0	33.6	1928	176	264
3	6.20	10.60	4.40	27.30	6.3	52.8	4696	344	416
2	2.40	6.20	3.80	32.39	7.1	70.7	8869	548	556
1	0.00	2.40	2.40	35.56	7.1	77.7	11806	664	612

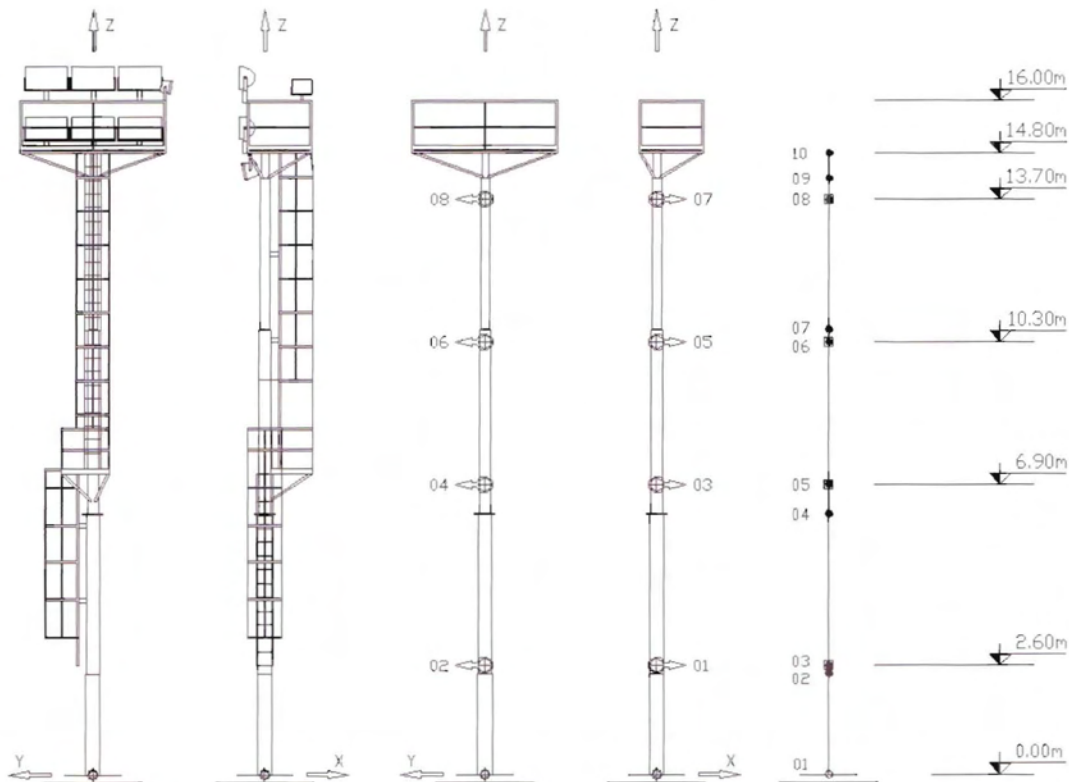


Fig. 2. Schema della torre faro con e senza la scala di accesso al piattaforma superiore, disposizione dei trasduttori di accelerazione e nodi principali del modello agli elementi finiti.

buita. È stato considerato un reticolo di 103 nodi, 37 in corrispondenza della piattaforma superiore e 66 lungo il fusto della torre-faro. In particolare i nodi principali del fusto sono stati posti in corrispondenza delle variazioni di sezione ed in corrispondenza dei trasduttori di accelerazione, come è indicato in Fig. 2. Il modulo di elasticità e la densità di massa del materiale sono stati assunti pari a  $2.10 \cdot 10^{11}$  N/m<sup>2</sup> ed a 7850 kg/m<sup>3</sup> rispettivamente. Gli otto proiettori sono stati considerati come masse concentrate vincolate rigidamente al nodo di estremità del fusto della torre, assumendo una massa di 30 kg per i sette fari frontali ed una massa di 25 kg per il faro laterale. La massa relativa alla scala ed ai cavi elettrici, valutata in 250 kg, è stata distribuita lungo la lunghezza del fusto. Complessivamente la massa totale del sistema è risultata pari a 1780 kg.

Le prime nove frequenze naturali di vibrazione non smorzate e le corrispondenti masse modali efficaci del modello, normalizzate rispetto alla massa totale, sono riportate nella Tab. 2. Tali masse sono state determinate mediante la relazione

$$M_{i(n)}^* = \frac{1}{m_{tot}} \frac{(\varphi_n^T \mathbf{M} \mathbf{r}_i)^2}{\varphi_n^T \mathbf{M} \varphi_n}$$

dove  $m_{tot}$  è la massa totale,  $\varphi_n$  è la generica forma modale di vibrazione,  $\mathbf{M}$  è la matrice di massa ed  $\mathbf{r}_i$  è un vettore che ha componenti unitarie in corrispondenza dei gradi di libertà traslazionali nella direzione dell'asse  $i$  ( $i = X, Y$  o  $Z$ ) e componenti nulle nella direzione degli altri assi. Valori relativamente grandi di  $M_{i(n)}^*$

Tabella 2. Caratteristiche modali calcolate con il modello preliminare agli elementi finiti.

Modo	Frequenza		Periodo [s]	Masse modali efficaci normalizzate [%]					
	[Hz]	[rad/s]		$M_X^*$	$M_Y^*$	$M_Z^*$	$\Sigma M_X^*$	$\Sigma M_Y^*$	$\Sigma M_Z^*$
1	0.795	4.995	1.258	0.20	53.74	0.00	0.20	53.74	0.00
2	0.806	5.064	1.241	54.96	0.20	0.01	55.16	53.95	0.01
3	3.617	22.726	0.276	0.08	19.42	0.02	55.24	73.36	0.03
4	3.945	24.787	0.253	19.52	0.08	0.12	74.76	73.45	0.16
5	7.178	45.101	0.139	0.03	0.01	0.00	74.79	73.46	0.16
6	8.984	56.448	0.111	0.07	8.65	0.02	74.85	82.11	0.18
7	9.771	61.393	0.102	7.69	0.06	0.20	82.55	82.17	0.38
8	19.171	120.455	0.052	0.03	4.39	0.01	82.57	86.56	0.39
9	19.834	124.621	0.050	4.19	0.02	0.11	86.77	86.58	0.50

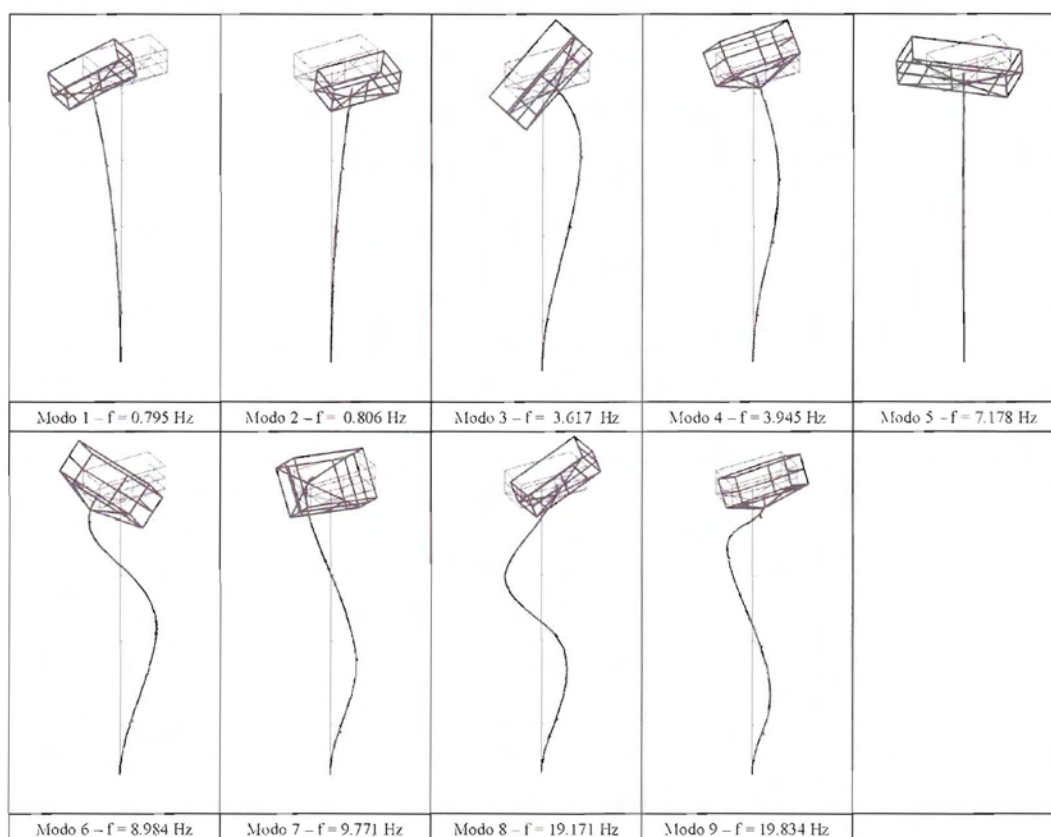


Fig. 3. Prime nove forme modali di vibrazione del modello agli elementi finiti.

assicurano che il moto associato alla forma modale  $\varphi_n$  si manifesta prevalentemente nella direzione dell'asse  $i$ .

I valori delle masse modali efficaci riportati nella Tab. 2 mostrano, pertanto, che il moto associato alla seconda, alla quarta, alla settima ed alla nona forma modale avviene prevalentemente in direzione  $X$ , mentre il moto associato alla prima, alla terza, alla sesta ed all'ottava forma modale avviene prevalentemente in direzione  $Y$ . Inoltre, il moto associato alla quinta forma modale, che risulta caratterizzato da valori prossimi a zero di tutte le masse modali efficaci, è di tipo essenzialmente torsionale. Si nota, infine, che nell'intervallo

di frequenze considerato non si hanno valori significativi di masse modali efficaci per moti in direzione verticale, mentre la massa partecipante per moti in direzione  $X$  e  $Y$  è pari rispettivamente all'86.77% ed all'86.58% della massa totale.

Le corrispondenti forme modali, riportate in Fig. 3, evidenziano ulteriormente che le prime due frequenze corrispondono alle frequenze fondamentali di vibrazione nelle direzioni  $Y$  e  $X$  rispettivamente, mentre la quinta forma modale è di tipo torsionale. Inoltre, la terza, la sesta e l'ottava forma modale corrispondono al secondo, al terzo ed al quarto modo flessionale in dire-

zione  $Y$ , mentre la quarta, la settima e la nona forma modale corrispondono al secondo, al terzo ed al quarto modo flessionale in direzione  $X$ .

#### 4. Descrizione della strumentazione utilizzata per le prove

La strumentazione utilizzata per le prove è costituita dai trasduttori di accelerazione, dal sistema di acquisizione e dal sistema di eccitazione.

##### 4.1. Trasduttori di accelerazione

La risposta dinamica della torre-faro è stata rilevata mediante quattro coppie di trasduttori di accelerazione di tipo capacitivo della SETRA, modello 141B, con un campo di utilizzo in ampiezza di  $\pm 2g$ , intervallo di risposta in frequenza da 0 a 200 Hz ed una sensibilità nominale di 0.5 V/g. Si nota che le caratteristiche di questi trasduttori sono adeguate per il tipo di prove effettuate. Come previsto dal modello preliminare agli elementi finiti, infatti, la struttura considerata è caratterizzata da frequenze naturali di vibrazione relativamente piccole, mentre l'ampiezza della deformata statica iniziale è stata scelta in modo da non indurre accelerazioni superiori a 2g.

Ogni trasduttore è stato fissato alla struttura mediante una basetta di alluminio incollata al fusto della torre. Le quattro coppie di trasduttori sono state poste rispettivamente alle quote di 2.60 m, 6.20 m, 10.30 m e 13.70 m, che risultano non coincidenti con i punti nodali delle prime forme modali del sistema. I trasduttori di ogni coppia sono stati orientati secondo gli assi  $X$  e  $Y$  del sistema di riferimento considerato, Fig. 4.

##### 4.2. Sistema di acquisizione

I segnali analogici sono stati convertiti in segnali digitali e registrati mediante un sistema di acquisizione costituito un convertitore Analogico/Digitale della National Instruments, modello DAQCard-AI-16E-4 a 12 bit su porta PCMCIA, collegato ad un personal computer portatile, Fig. 5. Il convertitore A/D ed i trasduttori utilizzati consentono di ottenere una risoluzione di  $10^{-4}$  g, che è risultata adeguata in relazione alle ampiezze delle accelerazioni registrate.

##### 4.3. Sistema di eccitazione

Le prove dinamiche sono state condotte rilasciando la struttura da una configurazione iniziale deformata contenuta nel piano  $XZ$  del sistema di riferimento considerato. Tale configurazione è stata ottenuta applicando in corrispondenza della sommità del fusto una forza trasversale mediante un cavo in fibra di carbonio ad allungamento limitato messo in tensione da un martinetto idraulico, Fig. 6.

Il martinetto, in grado di applicare un carico massi-

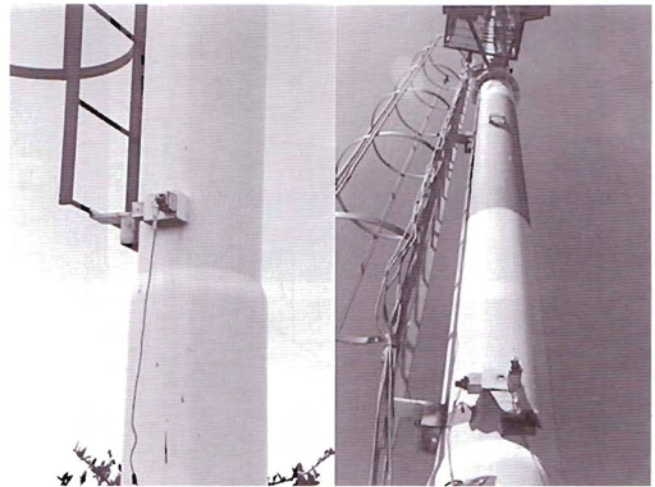


Fig. 4. Coppia di trasduttori di accelerazione a quota 2.60 m.



Fig. 5. Sistema di acquisizione.

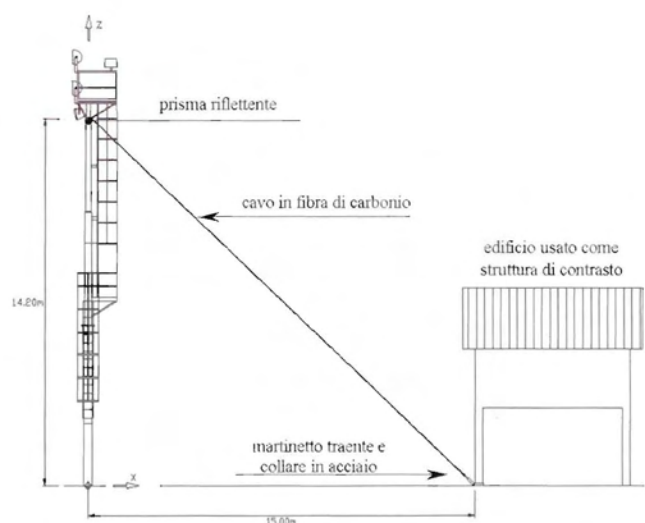


Fig. 6. Schema della prova in vibrazioni libere.

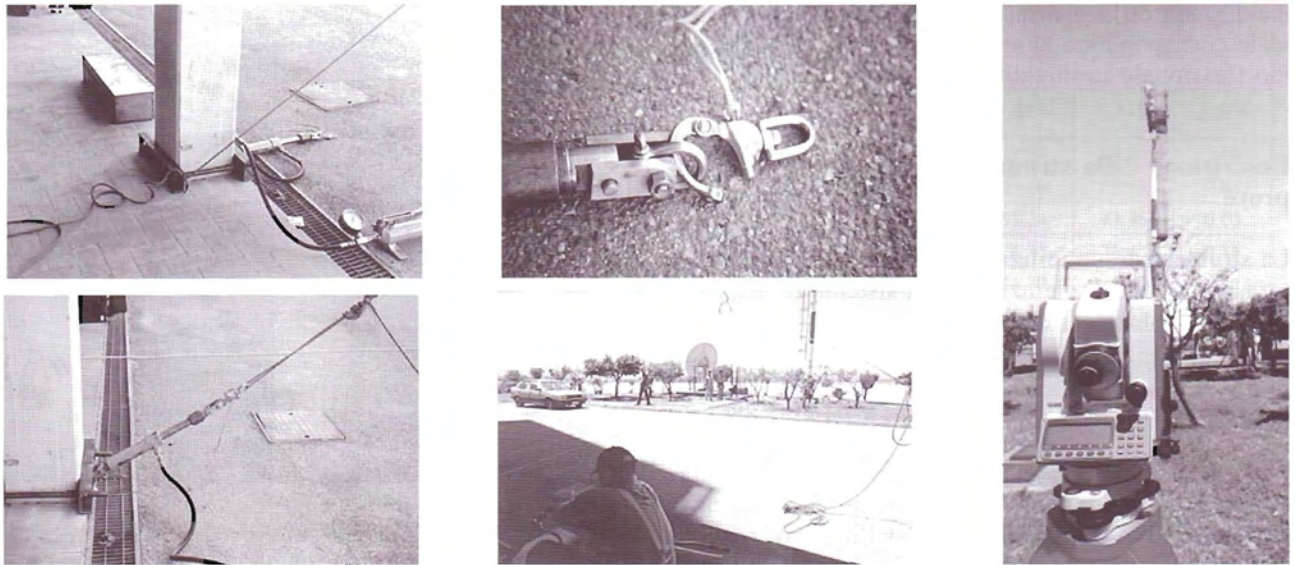


Fig. 7. (a) Collare di acciaio, martinetto traente e pompa idraulica in fase di montaggio. (b) Dispositivo di sgancio rapido. (c) Applicazione della tensione al cavo. (d) Rilascio del cavo. (e) Stazione di rilevamento topografico (teodolite Pentax PTX 505).

mo di 25 kN ed avente una corsa di 20 cm, è stato collegato alla base di un pilastro dell'edificio della torre di controllo prospiciente la torre-faro. Il collegamento è stato realizzato mediante un collare di acciaio costituito da due profilati a C e da due tiranti filettati di diametro pari a 24 mm, Fig. 7(a). Tra il cavo ed il martinetto è stato interposto un dispositivo di sgancio rapido, Fig. 7(b), che permettendo di rilasciare istantaneamente il cavo ha consentito alla torre di oscillare liberamente per effetto della deformata statica iniziale, Fig. 7(d).

Per la misurazione dello spostamento statico in sommità è stata utilizzata una stazione di rilevamento topografico costituita da un teodolite Pentax modello PTX 505 e da un prisma riflettente fissato in corrispondenza della sommità del fusto, Fig. 7(e).

## 5. Elaborazione dei dati sperimentali

Cinque delle numerose prove effettuate sono state considerate per le analisi successive, la cui scelta è stata dettata dalla qualità dei segnali acquisiti in relazione al livello di rumore presente. Per ogni prova, tutti i segnali sono stati registrati con una frequenza di campionamento di 100 Hz e per un intervallo di tempo di 80 secondi. Entrambi questi valori sono stati stabiliti con riferimento alle previsioni del modello preliminare agli elementi finiti. La frequenza di campionamento è stata fissata assumendo una frequenza di Nyquist pari a 50 Hz, mentre la durata di acquisizione dei segnali è stata scelta in maniera che l'ampiezza finale della risposta, calcolata con il modello preliminare agli elementi finiti assumendo per il modo fondamentale un rapporto di smorzamento del 1.50%, fosse inferiore al 2% di quella iniziale. Per ogni prova, inoltre, sono riportate nella Tab. 3 il valore della forza applicata in sommità, determinato attraverso la lettura al manometro

Tabella 3. Forze e spostamenti statici in sommità prima del rilascio del cavo.

Prova	Forza applicata in sommità [kN]	Spostamento alla quota di 14.26 m [cm]
1	4.80	3.57
2	4.40	3.29
3	4.40	3.29
4	4.70	3.52
5	4.60	3.42

del martinetto prima del rilascio del cavo, ed il corrispondente spostamento statico misurato alla quota di 14.26 m.

I segnali acquisiti sono stati inizialmente convertiti in unità di accelerazione considerando i valori delle sensibilità strumentali riportate nei certificati di calibrazione dei trasduttori utilizzati e successivamente ridotti a media nulla sottraendo la media dei valori campionati ad ognuno di essi. Ogni segnale, inoltre, è stato filtrato mediante un filtro digitale passa-basso con frequenza di *cut-off* pari a 35 Hz allo scopo di eliminare le componenti armoniche superiori. Secondo quanto stimato dal modello agli elementi finiti, infatti, entro tale limite sono contenute le frequenze di vibrazione del sistema che si assumono significative per la determinazione della risposta strutturale. A ciò si aggiunge che l'applicazione del filtro ha consentito anche di eliminare le componenti di rumore elettrico, legato alla frequenza di rete del sistema di alimentazione dei trasduttori, e di attenuare eventuali componenti di rumore ambientale.

I segnali così trattati sono stati successivamente trasformati nel dominio della frequenza mediante l'algoritmo della trasformata veloce di Fourier (FFT), ottenendo i corrispondenti spettri in frequenza. Prima dell'applicazione della FFT, l'andamento dei segnali regi-



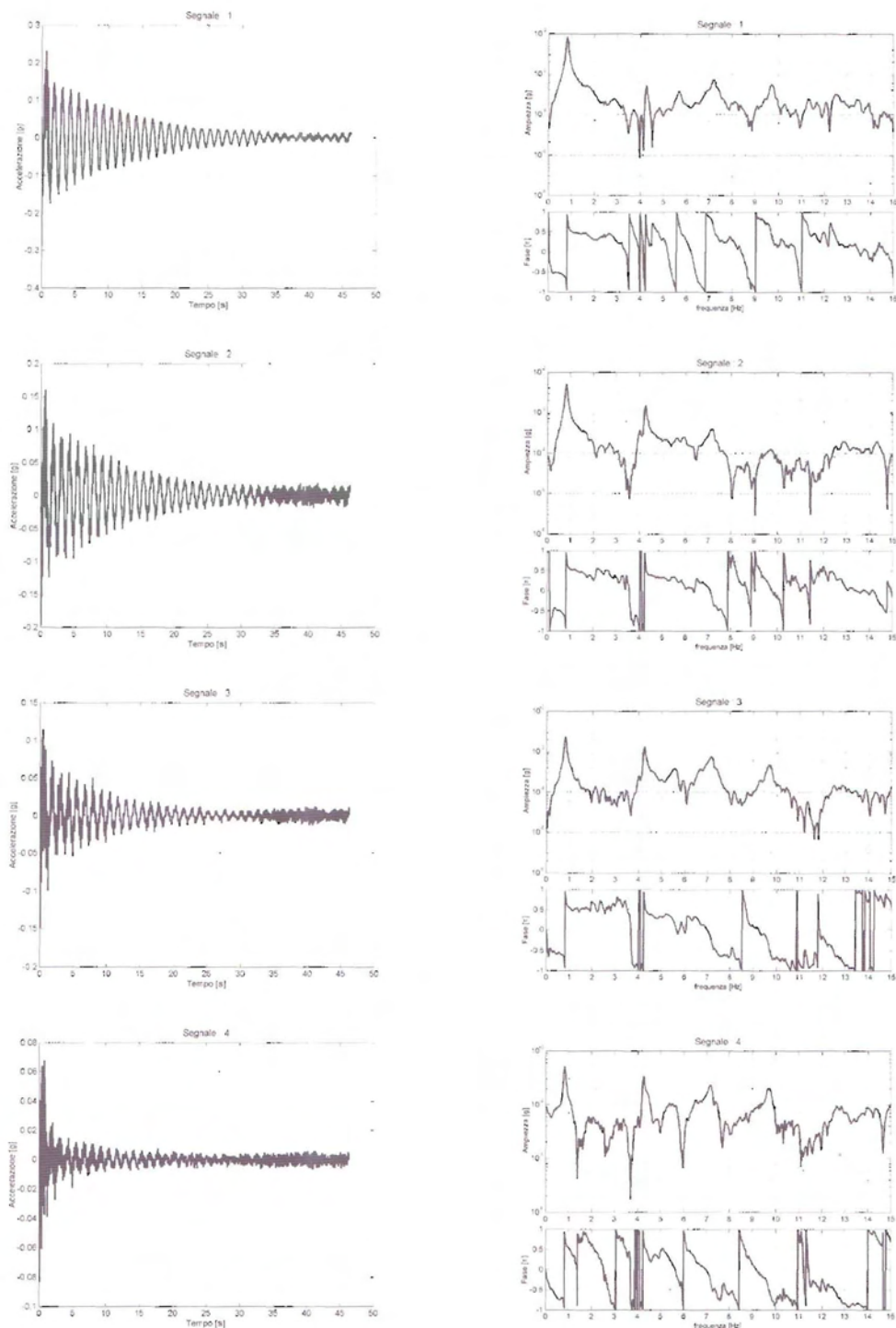


Fig. 8. Prova n. 1: segnali acquisiti dai trasduttori diretti secondo X e corrispondenti spettri in frequenza.

strati è stato modificato mediante l'utilizzo di una *finestra esponenziale* /1,10/, in maniera di forzare a zero l'ampiezza in prossimità della fine dell'intervallo di acquisizione ed eliminare, così, gli errori legati al fenomeno del *leakage* /1/. In seguito, i rapporti di smorzamento modale sono stati stimati tenendo conto dello smorzamento aggiuntivo introdotto dalla *finestra esponenziale* /10/.

A titolo di esempio sono riportati in Fig. 8 i segnali

acquisiti nella direzione X di eccitazione ed i relativi spettri in frequenza relativi alla prova n. 1.

## 6. Stima dei parametri modali

Una stima iniziale delle frequenze naturali di vibrazione e degli smorzamenti modali è stata effettuata nel dominio della frequenza utilizzando il metodo dell'am-

Tabella 4. Valori medi dei parametri modali identificati nel dominio della frequenza.

Modo	1	2	3	4	5	6	8
Frequenza [Hz]	0.7981	0.8117	4.0222	4.2694	5.6537	7.1786	9.7185
Frequenza [rad/s]	5.0143	5.0999	25.2715	26.8246	35.5222	45.1031	61.0613
Periodo [s]	1.2530	1.2320	0.2486	0.2342	0.1763	0.1393	0.1029
$\xi$ [%]	0.2615	1.5149	0.2398	0.3516	-	1.3254	0.8334

piezza del picco ed il metodo della mezza potenza /1/. Ai valori dei rapporti di smorzamento così ottenuti è stata poi applicata la correzione relativa all'applicazione della finestra esponenziale ai segnali registrati /10/. Nella Tab. 4 sono riportati i valori medi delle stime delle frequenze naturali e dei rapporti di smorzamento modali ottenuti a partire dagli spettri relativi ad ogni stazione di misura e ad ogni prova effettuata.

Successivamente le frequenze e gli smorzamenti modali sono stati nuovamente stimati nel dominio del tempo insieme alle forme modali di vibrazione mediante il metodo di Ibrahim /5, 6, 7, 8, 9/. Questa tecnica è stata scelta perché risulta particolarmente adatta al caso di prove dinamiche in vibrazioni libere in cui non è possibile registrare l'andamento dell'eccitazione. La sua principale caratteristica è quella di descrivere il rumore presente nei segnali attraverso componenti modali fittizie, caratterizzate da ulteriori valori di frequenza, di smorzamento e di forme di vibrazione. Durante il processo di identificazione, quindi, vengono stimati sia gli effettivi modi strutturali sia quelli legati al rumore ambientale, chiamati modi computazionali. Per distinguere i modi strutturali da quelli computazionali è stato utilizzato il *Fattore di coerenza e di confidenza modale (MSCCF)* /9/ definito dalla relazione

$$MSCCF_n = \frac{\{\phi\}_n^T \{\bar{\phi}\}_n^* e^{\lambda_n \Delta t_3}}{\{\bar{\phi}\}_n^T \{\phi\}_n^*} \quad (2)$$

in cui  $\{\phi\}_n$  è l' $n$ -sima forma modale,  $\lambda_n = -\sigma_n + i\omega_{dn}$  è l' $n$ -simo polo del sistema, gli apici  $T$  e  $*$  rappresentano i vettori trasposti e coniugati rispettivamente,  $\{\bar{\phi}\}_n = \{\phi\}_n e^{\lambda_n \Delta t_3}$  per i modi strutturali e  $\Delta t_3$  è un parametro temporale multiplo dell'intervallo di campionamento  $\Delta t$  /6, 7/. Per i modi strutturali il fattore di coerenza e di confidenza modale tende all'unità, ovvero

$$|MSCCF|_n = 1 \quad (3)$$

Tuttavia, per tenere conto delle incertezze del calcolo, un modulo maggiore di 0.90 ed una fase compresa tra  $\pm 10^\circ$  del fattore di coerenza e di confidenza modale sono stati assunti come caratterizzanti i modi strutturali. Tra i modi identificati, inoltre, sono stati scartati quelli con un rapporto di smorzamento maggiore del 10%, che risulta non verosimile in relazione alla tipologia della struttura considerata.

Infine, per tutti i modi strutturali identificati è stato anche verificato che sia prossimo al 100% il *fattore di confidenza modale complessivo, OAMCF* /5/, definito

come la percentuale delle componenti modali che presentano un fattore di confidenza modale

$$MCF_{in} = \frac{\phi_{(i+m)n}}{\phi_n e^{\lambda_n \Delta t_3}} \quad (4)$$

con un modulo maggiore di 0.90 ed una fase compresa tra  $\pm 10^\circ$ .

Da un punto di vista applicativo, il procedimento di identificazione secondo il metodo di Ibrahim è governato dal numero di gradi di libertà del modello,  $m$ , dal numero dei campioni dei segnali delle risposte,  $q$ , e dagli intervalli di tempo  $\Delta t_1$ ,  $\Delta t_2$  e  $\Delta t_3$ , che in generale vengono fissati come multipli dell'intervallo di campionamento  $\Delta t$  /6, 7/. Nel caso in esame il procedimento è stato applicato iterativamente al variare del numero dei gradi di libertà del modello  $m$ , assumendo per gli altri parametri i valori

$$q = 3500, \quad \Delta t_1 = 3\Delta t, \quad \Delta t_2 = 8\Delta t, \quad \Delta t_3 = 4\Delta t,$$

che hanno mostrato di condurre alla migliore stima possibile delle frequenze, dei rapporti di smorzamento e delle forme modali del sistema.

Inoltre, per ridurre ulteriormente l'effetto del rumore, il metodo è stato applicato alla media dei segnali registrati durante le cinque prove considerate. Tuttavia, a causa della non sincronia delle registrazioni, tale media è stata effettuata nel dominio della frequenza invece che nel dominio del tempo. A tale scopo gli spettri dei segnali registrati durante le cinque prove considerate sono stati normalizzati rispetto all'area sottesa dallo spettro in ampiezza relativo al trasduttore n° 07, posto alla quota di 13.70 m nella direzione X. Successivamente gli spettri normalizzati dei segnali registrati da ogni trasduttore sono stati mediati tra di loro. Applicando agli spettri mediati l'algoritmo della trasformata inversa veloce di Fourier (IFFT), sono state ottenute, infine, le medie dei segnali nel dominio del tempo.

L'applicazione iterativa del procedimento ha condotto ad un diagramma di stabilizzazione, Fig. 9, il cui sfondo è costituito dalla somma dei moduli di tutti gli spettri in frequenza dei segnali acquisiti. Tale somma evidenzia maggiormente i picchi degli spettri e costituisce, quindi, un riferimento efficace per la determinazione dei poli da identificare.

Nel diagramma di Fig. 9 sono riportati, al variare di  $m$ , i poli identificati che superano i criteri *MSCCF* e *OAMCF*, contrassegnati con il simbolo  $\circ$ . Gli incolonnamenti del simbolo  $\circ$  indicano i poli correttamente identificati. I parametri modali identificati con il metodo di Ibrahim sono riportati nella Tab. 5, mentre le

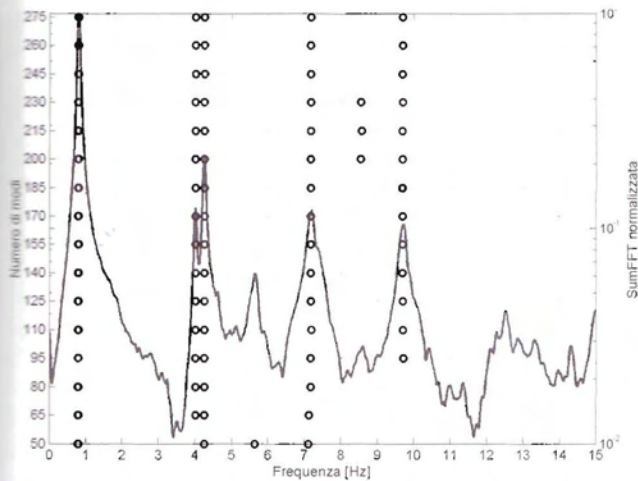


Fig. 9. Diagramma di stabilizzazione dei poli. Il simbolo o indica un polo che ha superato i criteri MSCCF e OAMCF.

rappresentazioni grafiche delle forme modali identificate sono mostrate in Fig. 10.

In primo luogo si nota che ogni forma modale identificata presenta componenti in entrambe le direzioni X e Y, caratterizzate da angoli di fase distinti ma pressoché costanti. Inoltre, con riferimento alle componenti di ampiezza maggiore, si può osservare che la prima e la seconda frequenza, pari rispettivamente a 0.7925 ed a 0.8174 Hz, sono associate al primo modo flessionale in direzione Y ed al primo modo flessionale in direzione X, mentre la terza e la quarta frequenza, pari a 4.0222 ed a 4.2691 Hz, sono associate al secondo modo flessionale in direzione Y ed al secondo modo flessionale in direzione X. È utile notare che, per effetto della massa concentrata all'estremità del fusto, queste ultime due forme modali non presentano alcun punto nodale, ma solo un cambio di curvatura alla quota di circa 10.30 m. La quinta frequenza identificata, pari a 7.1845

Hz, può essere associata al primo modo torsionale del sistema. La corrispondente forma modale, infatti, presenta un punto nodale ad una quota compresa tra 11.00 e 12.00 m, come accade nel caso del primo modo torsionale del modello preliminare agli elementi finiti. La sesta frequenza, pari a 9.7043 Hz, corrisponde, infine, al terzo modo flessionale in direzione X. È importante sottolineare che il diagramma di stabilizzazione mette anche in evidenza per alcuni valori di  $m$  un'ulteriore frequenza naturale pari a 8.063 Hz a cui, però, non è stato possibile associare una forma modale. In analogia con il modello preliminare agli elementi finiti, tale frequenza corrisponde al terzo modo flessionale in direzione Y, non sufficientemente attivato dal sistema di eccitazione utilizzato che induce vibrazioni libere prevalentemente in direzione X.

## 7. Confronto con il modello preliminare agli elementi finiti

I parametri modali del modello agli elementi finiti sono stati confrontati con quelli sperimentali al fine di stabilire il livello di correlazione tra il modello analitico e l'effettivo comportamento della struttura.

Il grado di correlazione tra le frequenze di vibrazione è stato calcolato mediante l'errore globale percentuale,  $EG$ , dato dalla relazione /3/

$$EG = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^6 (f_i^{FE} - f_i^{ID})^2}{\sum_{i=1}^6 (f_i^{ID})^2}} \times 100 \quad (5)$$

dove  $f_i^{FE}$  è la  $i$ -esima frequenza del modello analitico, mentre  $f_i^{ID}$  è la  $i$ -esima frequenza identificata. I risultati del confronto sono riportati nella Tab. 6. I valori degli errori relativi, relativamente piccoli, ed il valore

Tabella 5. Valori dei parametri modali identificati nel dominio del tempo.

Modo		1	2	3	4	5	6
Frequenza [Hz]		0.7925	0.8174	4.0222	4.2691	7.1845	9.7043
Frequenza [rad/s]		4.9794	5.1359	25.2722	26.8235	45.1415	60.9739
Periodo [s]		1.2619	1.2235	0.2486	0.2342	0.1392	0.1030
$\xi$ [%]		0.9232	1.5963	0.2364	0.2059	1.0078	0.3789
MSCCF (ampiezza)		0.9948	0.9986	0.9997	0.9888	0.9785	0.9867
MSCCF (fase °)		0.4392	-0.5631	-0.0509	-0.2438	-0.0160	-3.4759
OAMCF [%]		100.00	100.00	100.00	100.00	87.50	87.50
Quota [m] e direzione		Forma modale					
13.70	X	0.0603	-1.0000	0.0837	-0.3620	-0.8239	1.0000
	Y	1.0000	0.2595	0.3481	0.0724	-0.1642	0.5055
10.30	X	0.0350	-0.6103	-0.1695	-1.0000	0.5272	0.1361
	Y	0.6100	0.1427	1.0000	0.1593	0.1424	0.2464
6.90	X	0.0151	-0.2796	-0.1847	-0.8557	1.0000	-0.8979
	Y	0.2945	0.0491	0.7686	0.0493	0.0954	-0.4581
2.60	X	0.0028	-0.0596	0.0542	-0.2293	0.3143	-0.3823
	Y	0.0632	0.0161	0.1944	0.0356	0.0658	-0.2238
0.00	X	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000
	Y	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000	0.0000

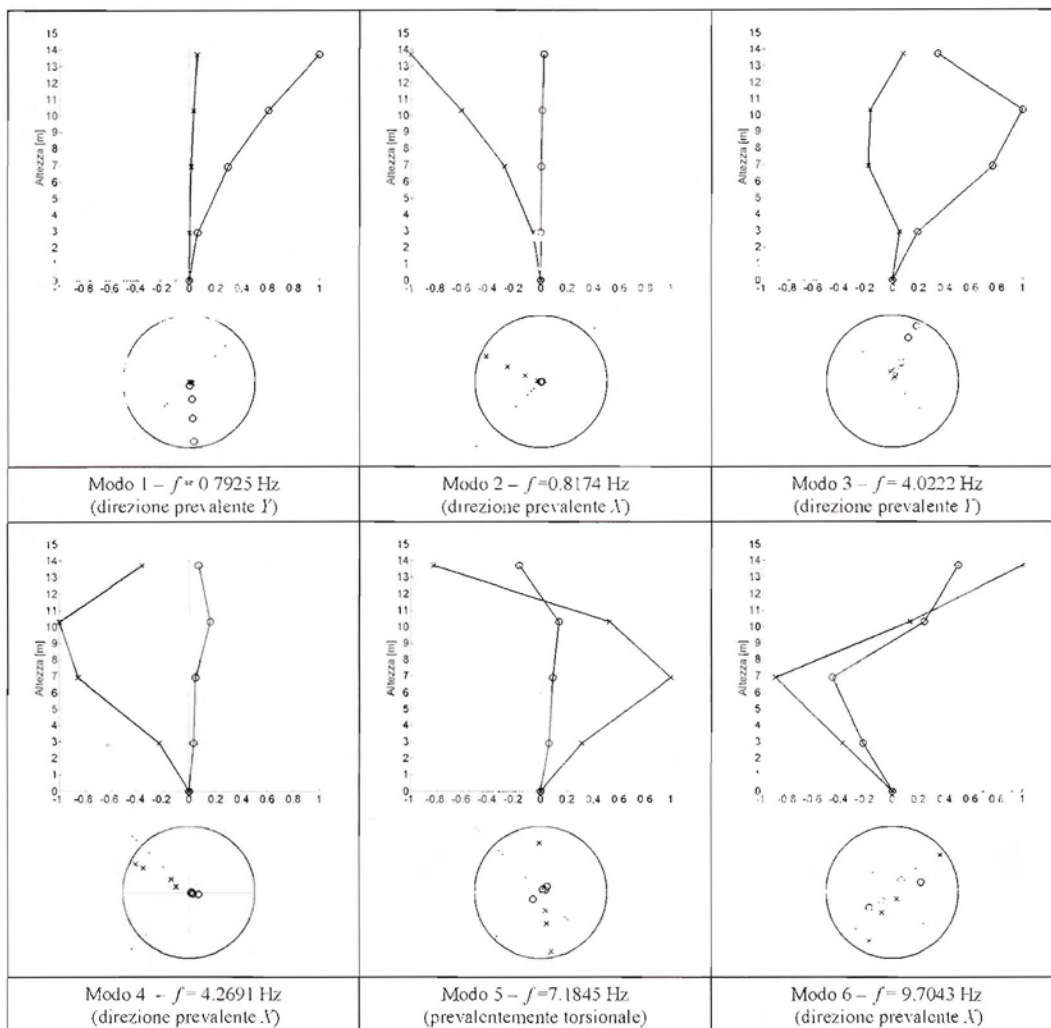


Fig. 10. Forme modali identificate: ampiezza e diagramma polare nel piano complesso.

Tabella 6. Correlazione tra le frequenze del modello analitico e quelle identificate.

Forma modali	Frequenze del modello analitico	Frequenze e rapporti di smorzamento identicati				Errore relativo	Errore Globale EG
		Dominio della frequenza		Dominio del tempo			
	$f$ [Hz]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	$f$ [Hz]	$\xi$ [%]	[%]	[%]
1° direzione Y	0.795	0.798	0.261	0.793	0.923	-0.27	3.88
1° direzione X	0.806	0.812	1.515	0.817	1.596	1.40	
2° direzione Y	3.617	4.022	0.240	4.022	0.236	11.20	
2° direzione X	3.945	4.269	0.206	4.269	0.206	8.22	
1° torsionale	7.178	7.179	1.325	7.184	1.008	0.09	
3° direzione X	8.984	-	-	-	-	-	
3° direzione Y	9.771	-	-	9.704	0.379	-0.68	

dell'errore globale assicurano una buona affidabilità del modello analitico.

La buona correlazione tra le prime sei frequenze analitiche e le prime sei frequenze sperimentali è evidenziata in Fig. 11, dove i cerchi rappresentativi di ogni coppia si collocano molto vicini ad una linea retta inclinata di 45°.

Per valutare il grado di correlazione tra le forme modali analitiche e sperimentali è stato utilizzato il

criterio di confidenza modale, MAC /1, 3/, definito attraverso la relazione

$$MAC(\varphi_{id}^{(i)}, \varphi_{FE}^{(j)}) = \frac{|\varphi_{id}^{(i)T} \varphi_{FE}^{(j)}|^2}{|\varphi_{id}^{(i)T} \varphi_{id}^{(i)}| |\varphi_{FE}^{(j)T} \varphi_{FE}^{(j)}|} \quad (6)$$

dove  $\varphi_{id}$  e  $\varphi_{FE}$  si riferiscono alle forme modali speri-

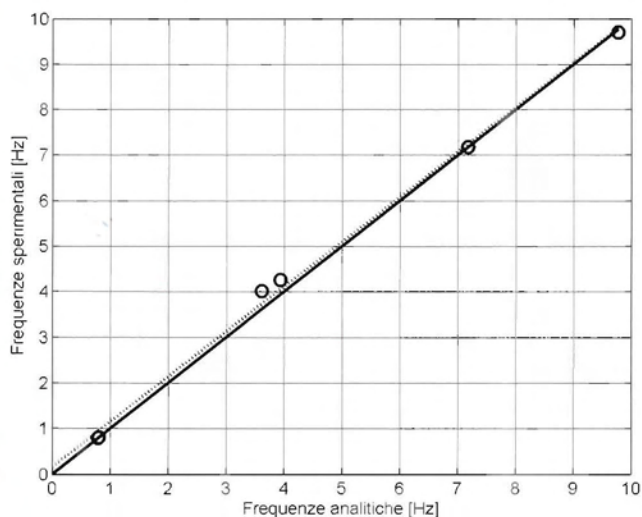


Fig. 11. Confronto tra le frequenze naturali identificate e quelle analitiche.

mentali e analitiche,  $T$  indica i vettori trasposti,  $i = 1, \dots, 6$  e  $j = 1, \dots, 6$ . Due forme modali si considerano ben correlate se il valore del coefficiente  $MAC$  è prossimo all'unità, mentre si considerano non correlate se è prossimo a zero.

La matrice dei coefficienti  $MAC$ , riportata nella Tab. 7. mostra che i primi cinque modi del modello analitico sono ben correlati con i primi cinque modi identificati. Il sesto modo sperimentale, identificato con minore precisione, risulta correlato al quinto e al sesto modo del modello analitico.

## 8. Conclusioni

In questo lavoro è stato presentato un procedimento sperimentale per la valutazione delle proprietà dinamiche delle torri-faro monotubolari del piazzale di sosta degli aeromobili dell'Aeroporto dello Stretto. L'applicazione del metodo di Ibrahim alle risposte in vibrazioni libere ha consentito di identificare con un sufficiente grado di affidabilità i primi sei modi naturali di vibrazione, insieme con le frequenze ed i rapporti di smorzamento corrispondenti. Il confronto tra le caratteristiche dinamiche teoriche e quelle sperimentali ha mostrato un buon grado di correlazione, indicando che il modello teorico agli elementi finiti non necessita di essere aggiornato e che le torri-faro non presentano fenomeni evidenti di degrado strutturale.

Tabella 7. Matrice dei coefficienti  $MAC$ .

Modi analitici	Modi sperimentali					
	1	2	3	4	5	6
1	<b>98</b>	1	68	1	0	0
2	1	<b>99</b>	1	63	7	13
3	48	0	<b>95</b>	1	2	1
4	2	48	4	<b>95</b>	21	10
5	0	3	0	24	<b>95</b>	<b>87</b>
6	6	22	1	0	62	82

## Bibliografia

- /1/ Ewins D.J., Modal Testing, theory, practice and application. Second edition. Research Studies Press Ltd, England (2000).
- /2/ Harris C.M. and Piersol A.G. editors, Shock and vibration handbook, Fifth edition, McGraw-Hill (2002).
- /3/ Heylen W., Lammens S., Sas P., Modal analysis theory and testing, Katholieke Universiteit Leuven, Belgium (1997).
- /4/ SAP2000. Integrated Finite Element Analysis and Design of Structures. Version 6.1, Computers and Structures Inc., USA (1997).
- /5/ Ibrahim, S. R., Modal confidence factor in vibration testing, Journal of Spacecraft and Rockets 15, 313-316 (1978).
- /6/ Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C., The experimental determination of vibration parameter from time response, The Shock and Vibration Bulletin 46, 187-196 (1976).
- /7/ Ibrahim, S. R. and Mikulcik, E. C., A method for direct identification of vibration parameters from the free response, The Shock and Vibration Bulletin 47, 183-198 (1977).
- /8/ Pappa, R. S. and Ibrahim S. R., A parametric study of Ibrahim Time Domain identification algorithm, The Shock and Vibration Bulletin 51, 43-72 (1981).
- /9/ Gao Y. and Randall R. B., The ITD mode-shape coherence and confidence factor and its application to separating eigenvalue positios in the Z-plane, Mechanical Systems and Signal Processing 14(2), 167-180 (2000).
- /10/ Fladung, W. and Rost R., Application and correction of the exponential window for frequency response functions, Mechanical Systems and Signal Processing 11(1), 23-26 (1997).