

# OTTIMIZZAZIONE DEI DISPOSITIVI DI CONTROLLO PASSIVO PER I PONTI SOSPESI DI GRANDE LUCE

**ETTORE CIPOLLA**  
*Ingegnere Strutturista*

**LUCA SGAMBI**  
*Dottorando in Ingegneria Strutturale*  
*Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*

**FRANCO BONTEMPI**  
*Professore*  
*Università degli Studi di Roma "La Sapienza"*

## SUMMARY

*This paper deals with the seismic analysis of long suspension bridge. The passive control devices of the bridge was optimized using a multiobjective criterion considering static and kinematics parameters. Many asynchronous analyses was developed in order to consider the uncertainties involved in the seismic input.*

## 1. INTRODUZIONE

L'azione sismica, il vento o, più in generale, qualsiasi fenomeno ambientale, naturale o artificiale che sia, agente su di una struttura esercita sulla stessa delle vibrazioni che, a seconda dell'intensità, possono pregiudicare il comfort degli utenti, la destinazione d'uso o, nei casi più gravi, la stabilità complessiva della costruzione. Per attenuare gli effetti causati da queste pericolose vibrazioni si cerca di esercitare sulla costruzione un controllo strutturale.

Con questa terminologia in ingegneria si intende l'insieme delle tecniche di intervento che si realizzano su di una struttura per modificarne la risposta quando, ad esempio, sia soggetta a sollecitazione sismica, in particolare per attenuare le vibrazioni indotte sulla struttura stessa. Questi sistemi ausiliari rappresentano il controllo strutturale attivo o ASC (Active Structural Control) se sono azionati da energia esterna, altrimenti costituiscono il controllo strutturale passivo o PSC (Passive Structural Control).

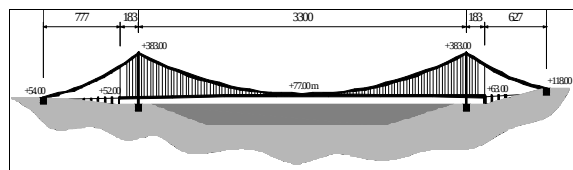
Argomento di questo lavoro è lo studio dell'ottimizzazione dei dispositivi di controllo passivo con applicazione a ponti sospesi di grandi

dimensioni. In particolare, per mezzo di un'ottimizzazione multi-obiettivo, è stata definita una soluzione di compromesso che consideri la variabilità di alcune delle grandezze della struttura, statiche e cinematiche, considerate tra le più significative.

Eseguita l'ottimizzazione, la struttura è stata sottoposta ad una serie di simulazioni sismiche artificiali con lo scopo di comprovare l'efficacia dei dispositivi. L'elevato numero di simulazioni sismiche è reso necessario per conferire significato statistico ai risultati in riferimento alle numerose incertezze coinvolte nella definizione dell'input sismico.

## 2. CARATTERIZZAZIONE MODALE DELLA STRUTTURA

La struttura in esame è un ponte sospeso di grande luce, avente campata centrale pari a 3300 metri e campate laterali rispettivamente 183 metri. Le torri possiedono un'altezza di 380 metri mentre lo sviluppo orizzontale del cavo principale supera i 5000 metri (Figura 1).



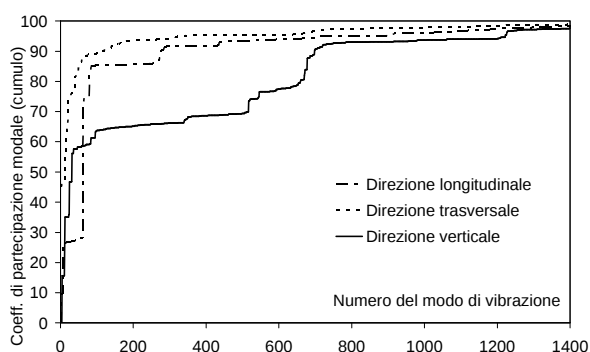
**Figura 1.** Schema geometrico della struttura in esame.

Il modello numerico utilizzato prevede l'uso di elementi di tipo beam in campo non lineare di geometria per tener conto degli effetti del secondo ordine, di notevole importanza in questa tipologia strutturale (Gimsing, 1983). Il modello numerico è stato sviluppato tenendo in conto la tridimensionalità dell'opera in modo da poter cogliere anche i comportamenti trasversali e torsionali. Il codice di calcolo utilizzato per lo studio riportato in questo lavoro è ADINA. La scelta di tale codice è stata eseguita tenendo in conto sia la possibilità di eseguire analisi in ambito non lineare sia di utilizzare il codice in modalità batch (Paragrafo 4) in modo da poter eseguire in automatico un grande numero di analisi.



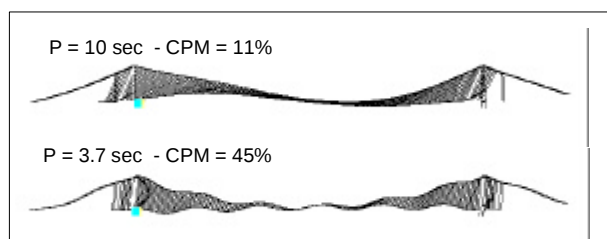
**Figura 2.** Modello numerico della struttura.

Benché le analisi dinamiche vengano successivamente eseguite con un metodo di integrazione diretta di Newmark per tenere in conto le varie non linearità, l'analisi modale della struttura è sempre utile per caratterizzarne il comportamento e definirne la sensibilità alle sollecitazioni dinamiche (Cook, 1995). In Figura 3 viene riportato l'andamento dei coefficienti di partecipazione modale (in percentuale rispetto alla massa totale) per le tre direzioni Cartesiane considerando i primi 1400 modi di vibrazione del modello numerico.

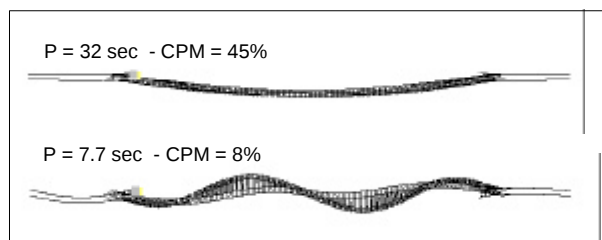


**Figura 3.** Cumulo dei coefficienti di partecipazione modale per i primi 1400 modi propri.

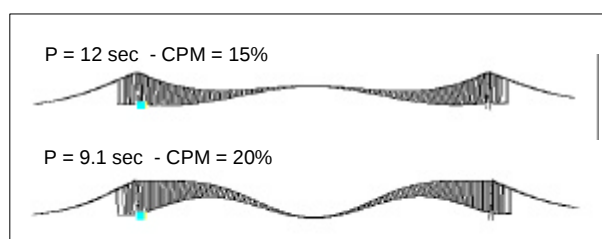
Come si evince dal grafico in questione, le curve rappresentative del cumulo dei coefficienti di partecipazione crescono molto lentamente, specialmente per quanto riguarda la direzione verticale. Un'analisi dinamica basata sulla sovrapposizione modale risulterebbe molto dispendiosa rispetto ai metodi di integrazione diretta, dato l'elevato numero di modi di vibrazione da dover considerare per rendere rappresentativa la risposta. Per ottenere un rapporto del 90% di massa eccitata si devono difatti considerare almeno i primi 800 modi di vibrazione.



**Figura 4.** Primi modi di vibrazione in direzione longitudinale ( $P$  = Periodo,  $CPM$  = Coefficiente di Partecipazione Modale).



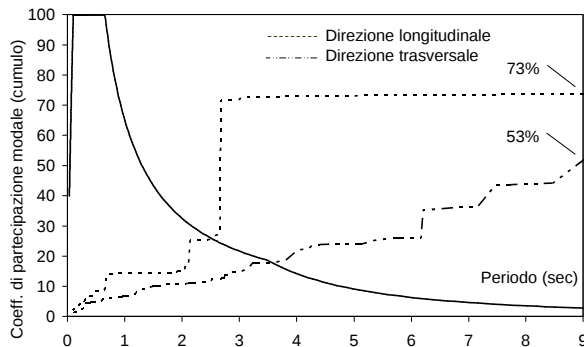
**Figura 5.** Primi modi di vibrazione in direzione trasversale ( $P$  = Periodo,  $CPM$  = Coefficiente di Partecipazione Modale).



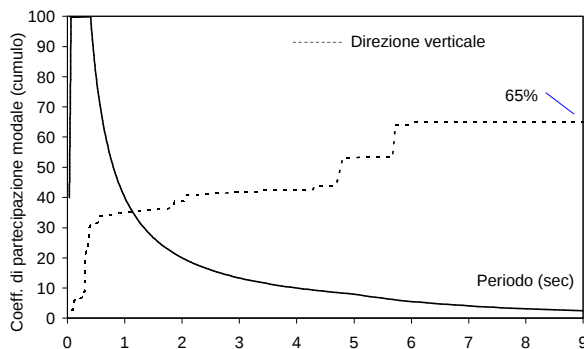
**Figura 6.** Primi modi di vibrazione in direzione verticale ( $P$  = Periodo,  $CPM$  = Coefficiente di Partecipazione Modale).

Le Figure 4, 5 e 6 riportano le deformate qualitative dei primi modi di vibrazione nelle tre direzioni Cartesiane. Il modo di vibrazione principale risulta quello trasversale, con un periodo di circa 32 secondi (Figura 5). Come già esposto, la Figura 3 mostra l'accumulo dei coefficienti di partecipazione modale in funzione dei modi propri di vibrazione considerati. Dato che ad ogni modo proprio corrisponde un periodo di vibrazione, è possibile riportare le curve di Figura 3 in funzione del periodo. Risulta interessante sovrapporre queste curve con la curva rappresentativa dello spettro di risposta della struttura. Le Figure 7 ed 8 rappresentano appunto questa sovrapposizione. Le curve sono diagrammate rappresentando sull'asse delle ascisse i periodi propri (secondi) mentre l'asse delle ordinate rappresenta un'opportuna variabile percentuale. Benché le curve cumulative dei coefficienti di partecipazione modale non sono nella stessa scala della curva rappresentativa dello spettro di risposta, dalle Figure 7 e 8 appare evidente che un sisma (considerato sincrono) non è in grado di eccitare efficacemente l'intera massa dei permanenti dell'opera. Lo spettro di risposta mostra difatti eccitazioni importanti per periodi compresi tra 0 e 4 secondi, ma in questo intervallo la massa eccitata risulta del 70% in direzione longitudinale, del 40% in direzione verticale e solo del 25% in direzione trasversale (dove è presente

il modo principale di vibrare dell'opera avente un CPM = 45% ma con un periodo di 32 secondi).



**Figura 7.** Sovrapposizione dello spettro di risposta con le curve di partecipazione modale per la direzione longitudinale e trasversale.



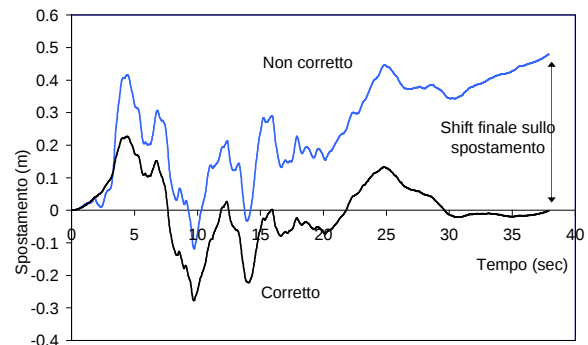
**Figura 8.** Sovrapposizione dello spettro di risposta con le curve di partecipazione modale per la direzione longitudinale e trasversale.

### 3. GENERAZIONE DELL'AZIONE SISMICA

Per una struttura di queste dimensioni risulta poco significativo l'uso di simulazioni sismiche sincrone. Le parti a contatto col terreno distano tra loro anche 5000 metri, per cui è evidente che l'azione sismica deve essere caratterizzata da tempi di arrivo, da intensità e da contenuto in frequenza differenti a seconda della posizione in cui la struttura viene in contatto col terreno.

L'azione sismica è stata quindi modellata in modo asincrono, ipotizzando una non correlazione tra i vari spostogrammi (o accelerogrammi) che vanno a definire una singola azione sismica. L'ipotesi di non correlazione è basata sulle notevoli incertezze presenti nella definizione del suolo, sia al di sotto della fondazione ma anche in tutta l'area interessata dalla propagazione

dell'onda sismica. Per dare robustezza alle analisi, si sono eseguite 200 simulazioni ed i risultati sono stati elaborati in campo statistico (Paragrafo 6). La necessità di dover eseguire un numero elevato di analisi ha reso necessario l'utilizzo di un codice di generazione artificiale di accelerogrammi spettro compatibili (SIMQKE). Gli accelerogrammi sono stati in seguito integrati per ricavare gli spostogrammi da utilizzare nelle simulazioni numeriche.

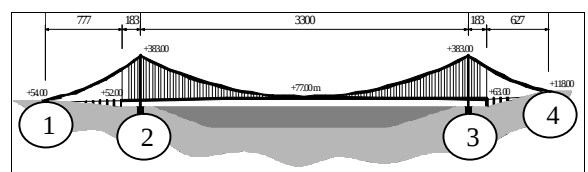


**Figura 9.** Confronto tra un spostogramma corretto ed uno non corretto affetto da shift finale rilevante.

L'integrazione è stata eseguita utilizzando il metodo di Borsoi per correggere lo shift finale sugli spostamenti (di nessuna giustificazione fisica) derivante da una normale doppia integrazione dell'accelerogramma (Borsoi, 1985).

### 4. ASINCRONISMO DELL'AZIONE SISMICA

L'azione asincrona viene simulata considerando le seguenti quattro zone in cui l'opera viene a contatto col terreno. Zona 1 e Zona 4: ancoraggi dei cavi. Zona 2 e Zona 3: fondazione della torre e tratto terminale dell'impalcato.

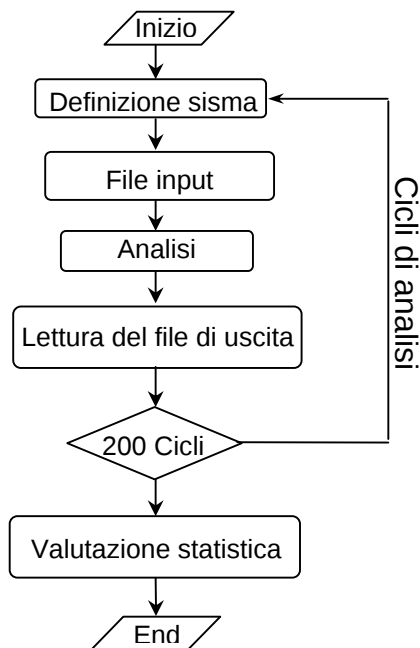


**Figura 10.** Le quattro zone di applicazione dell'azione sismica asincrona nel modello numerico.

In questi quattro punti le azioni sismiche possiedono differente tempo di arrivo, differente intensità (con una massima variazione del 30%) e differente forma dell'accelerogramma base (scelto casualmente tra 50 accelerogrammi spettro compatibili). Si sono inoltre assunti spostogrammi differenti lungo le direzioni Cartesiane, in modo da ottenere una direzione di massima eccitazione sismica variabile nel tempo.

Il lavoro di analisi ed ottimizzazione è stato svolto nei tre passi seguenti:

- Analisi della struttura con collegamenti di tipo elastico lineare in luogo dei dispositivi di controllo passivo. La struttura è stata sottoposta a 200 simulazioni sismiche e si è individuato il sisma artificiale più severo in relazione alle grandezze che rientreranno nella successiva ottimizzazione.
- Inserimento dei dispositivi di dissipazione nel modello numerico ed analisi parametrica della struttura sottoposta al sisma precedentemente individuato (Paragrafo 5). Tramite un'analisi di ottimizzazione multi-obiettivo vengono individuate le caratteristiche meccaniche del dispositivo di controllo.
- Rielaborazione delle 200 simulazioni sismiche sul modello strutturale con i dispositivi di dissipazione progettati e confronto statistico con le prime 200 simulazioni (Paragrafo 6).

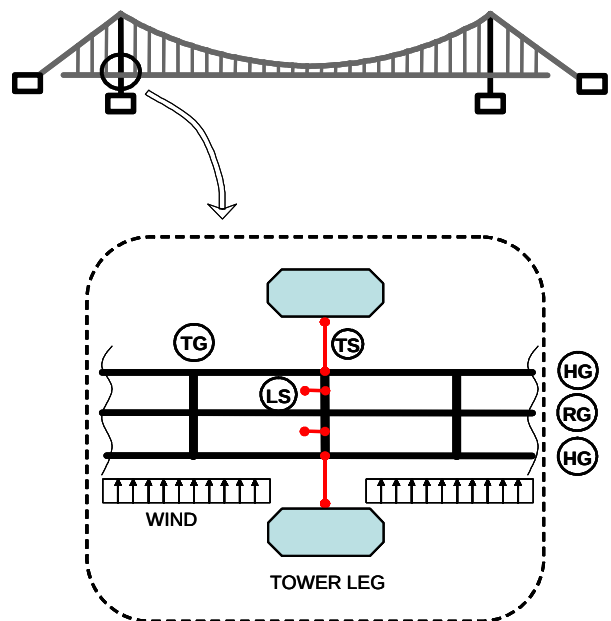


**Figura 11.** Diagramma di flusso del codice utilizzato per governare le analisi numeriche.

Un numero così elevato di simulazioni sismiche attraverso un codice commerciale è stato reso possibile dalla possibilità di utilizzare ADINA in modalità batch (senza operare all'interno della finestra grafica di comando). L'opportunità di poter essere avviato da riga di comando rende possibile l'utilizzo del codice di calcolo anche da parte di programmi scritti dall'utente. In questo caso è stato sviluppato un apposito codice in FORTRAN che governasse le varie analisi numeriche creando di volta in volta differenti azioni sismiche di input (Figura 11).

## 5. OTTIMIZZAZIONE DEI DISPOSITIVI DI CONTROLLO ELASTO-PLASTICI

I dispositivi di controllo vengono applicati nelle zone delle torri, in modo che congiungano le torri con l'impalcato sia in direzione longitudinale che trasversale. I dispositivi assunti sono di tipo elasto-plastico, in grado di lavorare lungo una sola direzione. La Figura 12 ne mostra il posizionamento in una delle due torri, per la torre rimanente il posizionamento viene assunto simmetrico.



**Figura 12.** Posizionamento dei dispositivi di controllo passivo in una delle due torri (HG = cassone stradale, RG = cassone ferroviario, TG = trasverso dell'impalcato, TS = dispositivo trasversale, TL = dispositivo longitudinale).

L'ottimizzazione è stata effettuata attraverso un'analisi di tipo parametrico assumendo come variabili di progetto le aree dei dissipatori trasversali e longitudinali. Per esplorare la risposta del modello al variare dei due parametri e costruire la funzione obiettivo necessaria per affrontare il problema di ottimizzazione, si sono eseguite differenti analisi considerando le aree dei dispositivi variabili tra i valori da 0.05 mq a 0.5 mq con passo costante di 0.05. Attraverso la costruzione di una matrice 10x10 sono state quindi individuate le 100 combinazioni che hanno permesso di esaminare 100 differenti modelli assoggettati alla stessa azione sismica.

In relazione alle prestazioni sismiche dell'opera, si sono definite come caratteristiche da ottimizzare le seguenti sei grandezze:

- Tensione cavi di ancoraggio;
- Momento verticale del cassone ferroviario in prossimità della torre;
- Momento orizzontale del cassone ferroviario in prossimità della torre;
- Reazione dell'impalcato all'appoggio;
- Spostamento verticale in mezzeria;
- Spostamento trasversale in mezzeria, qui di seguito graficamente riportate.

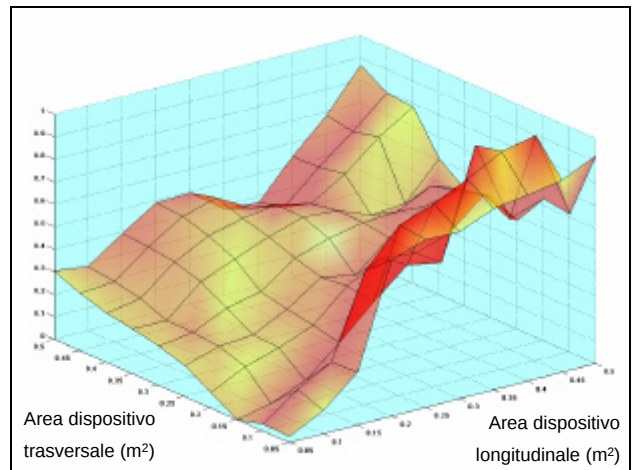
La variabilità di queste grandezze in relazione con le variabili di progetto assunte è rappresentata dalle superfici tridimensionali riportate dalla Figura 13 alla Figura 18. Dette superfici sono state adimensionalizzate rispetto al loro valore massimo.

Dai grafici precedenti notiamo come le funzioni analizzate, presentino dei minimi in corrispondenza di valori diversi delle sezioni dei dissipatori, nasce quindi la necessità di eseguire un'ottimizzazione di tipo multi-obiettivo.

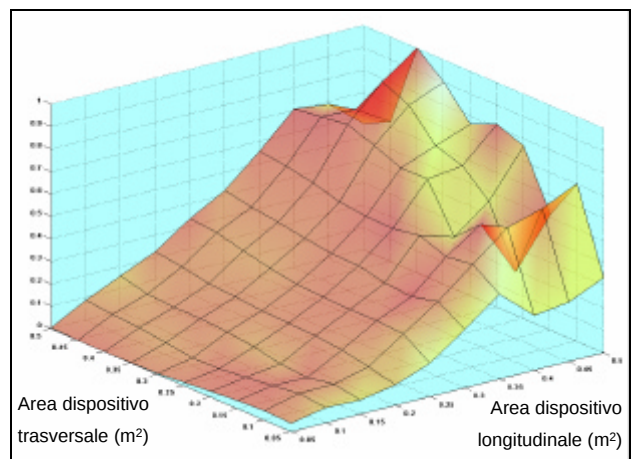
L'approccio più immediato per una ottimizzazione multi-obiettivo è il metodo della somma pesata. In questo metodo la funzione obiettivo da ottimizzare viene costruita come media pesata delle funzioni ricavate precedentemente. In generale si può scrivere:

$$u(x, y) = \sum_{i=1}^k w_i f_i(x, y) \quad (1)$$

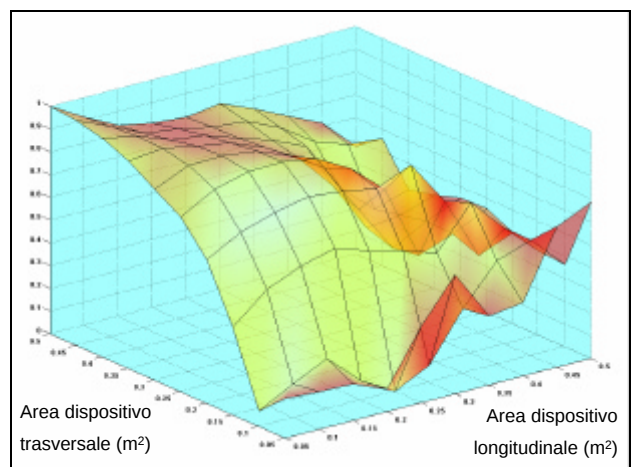
dove  $w_i$  rappresenta il vettore dei pesi, scelto in modo tale che  $\sum_{i=1}^k w_i = 1$  e che sia  $w_i > 0$ ,  $f_i(x, y)$  rappresenta la generica superficie ed  $u(x, y)$  è la funzione obiettivo risultante. Il valore relativo dei pesi in genere dipende dall'importanza della funzione a cui è legato.



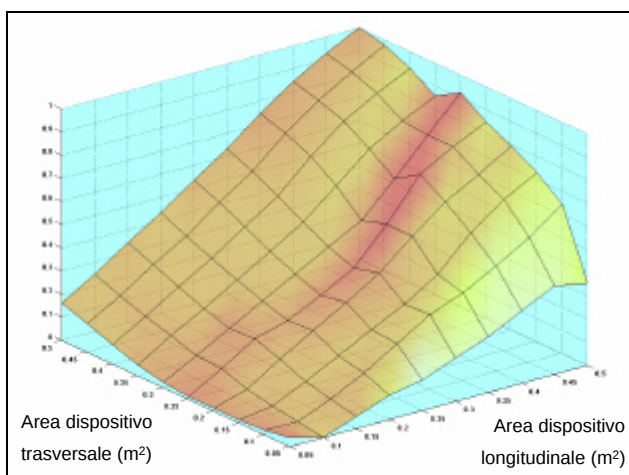
**Figura 13.** Momento orizzontale cassone ferroviario torre.



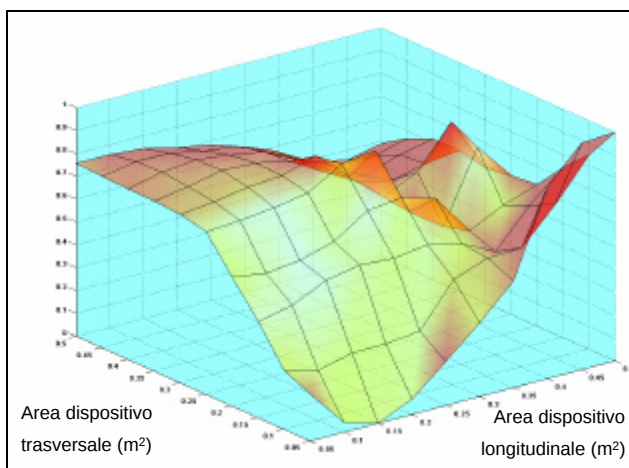
**Figura 14.** Momento verticale cassone ferroviario torre.



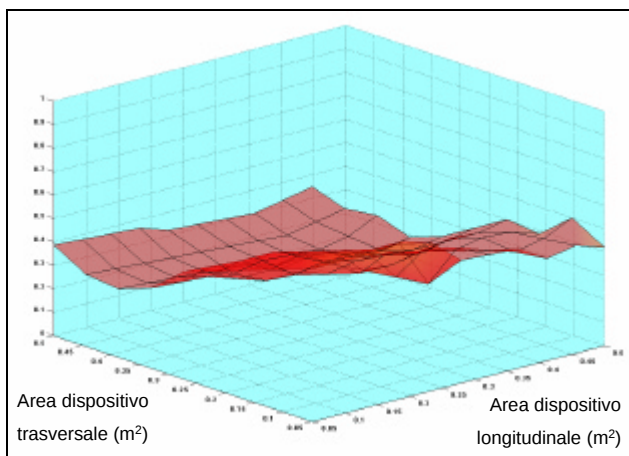
**Figura 15.** Spostamento trasversale dell'impalcato in mezzeria.



**Figura 16.** Spostamento verticale dell'impalcato in mezzeria.



**Figura 17.** Reazione dell'impalcato all'appoggio.



**Figura 18.** Tensione dei cavi principali all'ancoraggio.

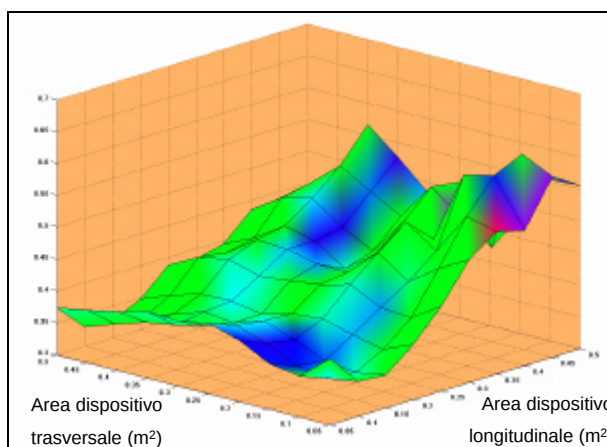
Nel caso in esame i pesi attribuiti alle grandezze considerate sono stati i seguenti:

| Grandezze da ottimizzare                                           | Peso |
|--------------------------------------------------------------------|------|
| Tensione dei cavi all'ancoraggio                                   | 0.30 |
| Momento verticale nel cassone ferroviario nella zona della torre   | 0.20 |
| Momento orizzontale nel cassone ferroviario nella zona della torre | 0.15 |
| Spostamento verticale in mezzeria all'impalcato                    | 0.10 |
| Spostamento trasversale in mezzeria all'impalcato                  | 0.10 |
| Reazione verticale all'appoggio dell'impalcato                     | 0.15 |

**Tabella 1.** Pesì di importanza assegnati alle varie grandezze da ottimizzare.

L'ottimizzazione viene svolta considerando delle sollecitazioni sismiche molto severe (PGA massima di quasi  $5 \text{ m/s}^2$ ), in questo caso la stabilità dell'opera deve essere considerata più importante del comfort degli utenti, per cui in Tabella 1 si sono assegnati pesi maggiori alle variabili statiche rispetto quelle cinematiche. In Figura 19 viene mostrata la funzione obiettivo ricavata tramite la media pesata delle 6 superfici esposte precedentemente. La funzione risulta molto irregolare ma è possibile individuare un minimo assoluto in corrispondenza dei seguenti valori delle variabili di progetto:

Area dei dissipatori longitudinali =  $0.5 \text{ m}^2$   
Area dei dissipatori trasversali =  $0.15 \text{ m}^2$

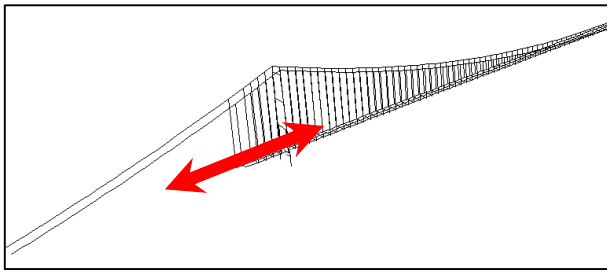


**Figura 19.** Funzione obiettivo.

## 5. ANALISI STATISTICA

Identificata la soluzione ottimale per il problema di progetto esaminato, si è proceduto con un confronto tra il comportamento sismico del ponte con dispositivi ottimizzati e quello del ponte con dispositivi non elasto-plastici. Scopo del confronto è la validazione del procedimento di progetto eseguito rispetto a sismi differenti da quello utilizzato nell'ottimizzazione multi-obiettivo svolta. Data la notevole incertezza sull'azione sismica di input risulta riduttivo eseguire un confronto numerico solamente su di una azione sismica, per cui anche il modello ottimizzato viene sottoposto alle stesse 200 simulazioni utilizzate per identificare il sisma più severo sul modello non ottimizzato. In questo modo è stato possibile utilizzare le informazioni risultanti dalle analisi per generalizzare il comportamento dell'opera a più sismi ricavando le distribuzioni di Gauss dei parametri più interessanti.

Consideriamo ad esempio lo spostamento longitudinale dell'impalcato al giunto (Figura 20).

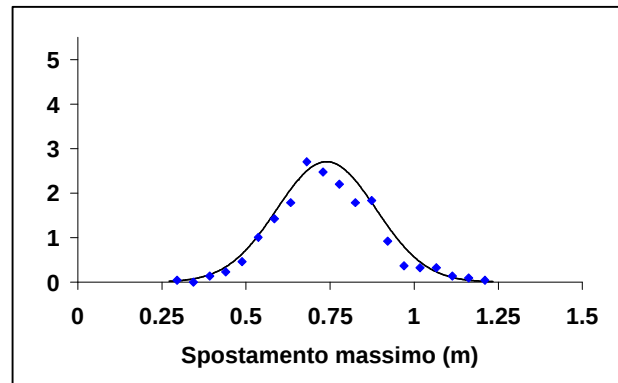


**Figura 20.** Spostamento longitudinale al giunto dell'impalcato.

Per ogni analisi è possibile ricavare il massimo spostamento che si verifica durante l'azione sismica, ottenendo in questo modo 200 valori di spostamento organizzabili in una distribuzione discreta (Figura 21). Da questi valori è possibile ricavare la media e la deviazione standard e generalizzare i risultati tramite la corrispondente distribuzione normale:

$$f_x(x) = \frac{1}{s_x \sqrt{2\pi}} \exp \left[ -\frac{1}{2} \left( \frac{x-a}{s_x} \right)^2 \right] \quad (2)$$

dove si è indicato con  $a$  il valore medio della distribuzione discreta e con  $s_x$  la relativa deviazione standard. In Figura 21 la distribuzione discreta è stata sovrapposta con la distribuzione normale (curva gaussiana) ed è possibile notare la buona corrispondenza tra le due rappresentazioni.



**Figura 21.** Distribuzione di Gauss ed istogramma numerico.

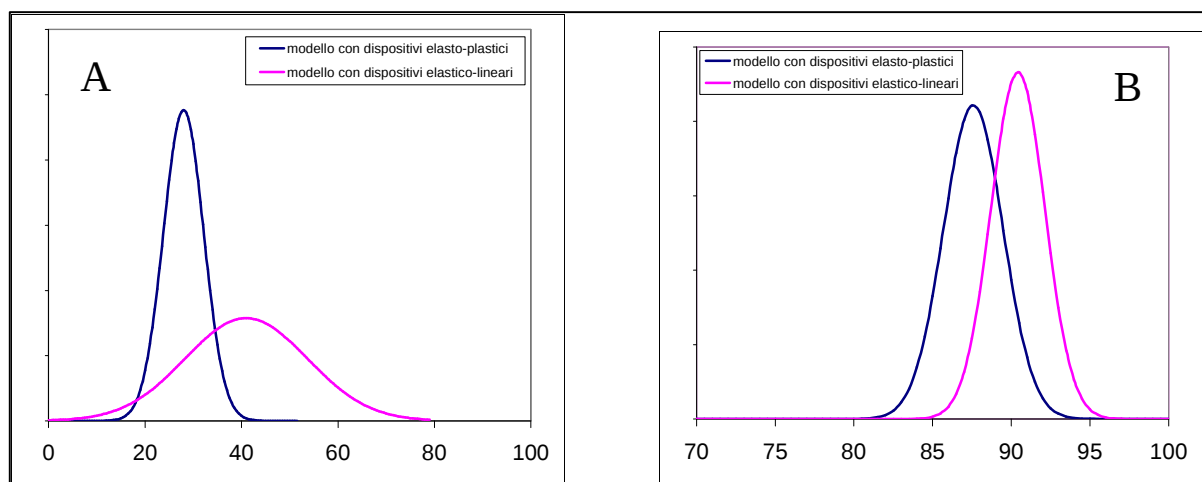
Tramite la costruzione delle curve gaussiane delle grandezze più rilevanti è possibile eseguire un confronto numerico sia sui valori medi delle distribuzioni ma anche sui frattili. Questo fornisce robustezza ai risultati poiché nel confronto numerico rientrano delle quantità dipendenti dall'insieme delle simulazioni svolte. Le grandezze prese in esame sono:

- Spostamento trasversale massimo dell'impalcato in corrispondenza della torre (1).
- Momento orizzontale nell'impalcato in corrispondenza della torre (2).
- Momento verticale nell'impalcato in corrispondenza della torre (3).
- Tensione dei cavi all'ancoraggio (4).

Per le grandezze statiche, data la grandezza dei valori in questione, si è eseguita una normalizzazione rispetto ai momenti di peso proprio, per i due momenti sull'impalcato, e alla tensione provocata da un vento di primo livello per la tensione all'ancoraggio. Per queste grandezze non viene quindi considerato il loro valore assoluto, ma la loro diminuzione o l'aumento in percentuale rispetto alle grandezze con cui si è eseguita la normalizzazione. Come si può notare dalla Tabella 2, non tutte le grandezze ottengono un miglioramento dalla progettazione eseguita. Ciò prova che la scelta progettuale non minimizza tutte le variabili considerate nell'ottimizzazione, ma è una scelta di compromesso.

| Grandezza | Valori medi |        | Frattile 95% |        |
|-----------|-------------|--------|--------------|--------|
|           | MEL         | MEP    | MEL          | MEP    |
| 1         | 0.60 m      | 0.93 m | 1.44 m       | 1.31 m |
| 2         | 90.4 %      | 87.6 % | 93.0 %       | 90.5 % |
| 3         | 41.0 %      | 28.0 % | 62.0 %       | 35.0 % |
| 4         | 13.3 %      | 15.7 % | 20.7 %       | 20.1 % |

**Tabella 2.** Confronti tra i due modelli analizzati.



**Figura 22.** Confronto sulle distribuzioni Gaussianhe della variazione normalizzata del momento verticale (A) ed orizzontale (B) massimo dell'impalcato in corrispondenza della torre.

## 6. CONCLUSIONI

Nel presente lavoro si è considerata l'analisi sismica e l'ottimizzazione dei dispositivi di controllo passivo di un ponte sospeso di grande luce. Data l'estensione dell'opera si sono considerate numerose simulazioni sismiche asincrone ed i risultati sono stati trattati in termini statistici ricavando le distribuzioni gaussiane delle grandezze più rilevanti.

Non essendo possibile considerare la soluzione ottimale per ognuna delle singole grandezze in gioco, l'ottimizzazione multi-obiettivo svolta, ha identificato una buona scelta progettuale di compromesso in relazione alle variabili prestazionali considerate.

## 7. RIGRAZIAMENTI

Il presente lavoro è stato reso possibile grazie al finanziamento COFIN2002 e ad altri fondi di ricerca dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza", di cui è responsabile scientifico il professore Franco Bontempi.

Un sentito ringraziamento al professore Fabio Biondini del Politecnico di Milano e al professore Marcello Ciampoli dell'Università degli Studi di Roma "La Sapienza" per il loro essenziale contributo nella definizione degli spostogrammi artificiali.

## 8. BIBLIOGRAFIA

- [01] **F. BONTEMPI** "Il ponte sullo Stretto di Messina. Impostazione concettuale del processo di progettazione ed analisi di

strutture complesse". Notiziario dell'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, n.° 445 – marzo/aprile 2003.

- [02] **L. BORSOI, A. RICARD** "A Simple Accelerogram Correction Methods to Prevent Unrealistic Displacement Shift", 8<sup>th</sup> SMIRT, Vol.K(a), Paper K2/7, Brussels, 1985.
- [03] **E. CIPOLLA** "Analisi ed ottimizzazione del controllo passivo dei ponti sospesi nei riguardi dell'azione sismica", Tesi di Laurea, Università degli Studi di Roma "La Sapienza", luglio 2004.
- [04] **R.D. COOK** "Finite element modeling for stress analysis", John Wiley & Sons, 1995.
- [05] **N.J. GIMSING** "Cable Supported Bridges, Concepts and Design", John Wiley & Sons, 1983.
- [06] **L. SGAMBI** "Valutazione ed accuratezza dei codici di calcolo per l'analisi strutturale", Giornata LUSAS, Roma, 16/01/2004.

**Contatti con gli autori:**

Ettore Cipolla: [ettorec@tiscali.it](mailto:ettorec@tiscali.it)

Luca Sgambi: [luca.sgambi@uniroma1.it](mailto:luca.sgambi@uniroma1.it)

Franco Bontempi: [franco.bontempi@uniroma1.it](mailto:franco.bontempi@uniroma1.it)