



# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea specialistica in Ingegneria delle Costruzioni edilizie

## Studi per la riduzione delle vibrazioni sul simulacro argenteo dell'Immacolata in processione

Tesi di Laurea di:  
Rosaria Arcoleo

Relatore:  
Ill.mo Prof. Antonina Pirrotta

Correlatori:  
Dott. Ing. Cristiano Bilello  
Dott. Ing. Giacomo Navarra



Anno Accademico: 2010/2011



# UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PALERMO

## FACOLTA' DI INGEGNERIA

Corso di Laurea specialistica in Ingegneria delle Costruzioni edilizie

### Studi per la riduzione delle vibrazioni sul simulacro argenteo dell'Immacolata in processione

Tesi di Laurea di:  
Rosaria Arcoleo

Relatore:  
Ill.mo Prof. Antonina Pirrotta

Correlatori:  
Dott. Ing. Cristiano Bilello  
Dott. Ing. Giacomo Navarra



Anno Accademico: 2010/2011

**La presente Tesi di Laurea è tutelata dalla Legge 22 Aprile 1941 n. 633  
"Protezione del diritto d'autore e di altri diritti connessi al suo esercizio"**

*“A quelle persone a me care che non sono più intorno a me, ma che sento ugualmente vicine; in particolare mia nonna, Sara, di cui sento tanto la mancanza e che ha sempre creduto in me e nelle mie capacità.”*

*Rosaria*



## ***Ringraziamenti***

Desidero innanzitutto ringraziare la mia relatrice, la Prof. Antonina Pirrotta, per avermi dato la possibilità di lavorare con lei per la stesura di questa tesi e per tutti gli insegnamenti da lei fornitimi in questi anni. Non dimenticherò mai le sue lezioni, sempre interessanti e mai noiose, con quel pizzico di umorismo che le rendeva ancora più piacevoli. Per lei nutro una stima immensa e averla avuta come insegnante è stato per me un grande privilegio.

Ringrazio l'Ing. Cristiano Bilello per avermi seguito costantemente, dedicandomi tempo e regalandomi saggi consigli e insegnamenti preziosi. Il suo aiuto non è stato solo professionale, ma anche emotivo, poiché grazie ai suoi consigli e al suo ottimismo, durante i momenti di difficoltà, non ho commesso l'errore di credere che non potessi farcela.

Ringrazio l'Ing. Giacomo Navarra per avermi fornito del materiale utile per lo svolgimento di questa tesi.

Un ringraziamento speciale va alla mia famiglia (mia madre, mio padre, mia sorella e mio cognato) che per tutti questi anni mi ha sostenuta sia emotivamente che economicamente e mi ha permesso di arrivare dove sono adesso. Il loro affetto e la loro fiducia mi hanno dato la determinazione giusta per affrontare questi anni.

Ringrazio, infine, il mio fidanzato, Gianluca, senza il quale i periodi di forte stress e tensione sarebbero diventati impossibili da superare; mi è stato vicino e ha percorso con me la strada che mi ha portato fino a qua.



# INDICE

<b>PREMESSA.....</b>	<b>9</b>
<b>CAPITOLO 1. CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI .....</b>	<b>13</b>
<b>1.1 Introduzione.....</b>	<b>13</b>
<b>1.2 Sistemi di controllo passivo .....</b>	<b>19</b>
1.2.1 Dissipatori viscoelastici.....	21
1.2.2 Sistemi di isolamento alla base .....	25
<b>1.3 Applicazioni ai beni artistici e monumentali .....</b>	<b>31</b>
1.3.1 Gabbia antivibrante per il trasporto.....	33
1.3.2 Base antisismica: Bronzi di Riace .....	37
1.3.3 Base antisismica: Satiro danzante .....	41
1.3.4 Base antisismica: Cratere, Efebo e Venere .....	42
<b>CAPITOLO 2. LA MADONNA DELL'IMMACOLATA .....</b>	<b>47</b>
<b>2.1 La basilica di San Francesco d'Assisi.....</b>	<b>47</b>

<b>2.2 Il simulacro dell'Immacolata .....</b>	<b>48</b>
2.2.1 Riferimenti storici .....	55
2.2.2 Deterioramenti e restauri.....	56
<b>2.3 Il rito e la tradizione.....</b>	<b>59</b>
<b>CAPITOLO 3. INDAGINE SPERIMENTALE.....</b>	<b>63</b>
<b>3.1 Introduzione .....</b>	<b>63</b>
<b>3.2 Indagini per la misura delle vibrazioni sul simulacro .....</b>	<b>64</b>
3.2.1 La prima fase di indagine: registrazione delle vibrazioni durante la processione.....	66
3.2.2 La seconda fase di indagine: le prove ad hoc.....	71
<b>3.3 Analisi risultati ottenuti.....</b>	<b>74</b>
3.3.1 Analisi delle accelerazioni verticali .....	74
3.3.2 Analisi delle accelerazioni alla base della statua .....	75
3.3.3 Analisi delle accelerazioni alla testa della statua .....	76
3.3.4 Analisi nel dominio delle frequenze .....	77
3.3.5 Analisi delle condizioni effettive di vincolo .....	79
<b>3.4 Strumentazione prove dinamiche .....</b>	<b>80</b>
3.4.1 Accelerometri.....	81
3.4.2 Amplificatori degli accelerometri .....	84
3.4.3 Scheda di acquisizione dati.....	86
3.4.4 Personal Computer.....	87
3.4.5 L'ambiente Labview .....	88

3.5 Conclusioni indagini sperimentali .....	89
<b>CAPITOLO 4. INDAGINE NUMERICA.....</b>	<b>91</b>
4.1 Introduzione.....	91
4.2 Metodo degli elementi finiti .....	92
4.3 Rilievo geometrico .....	94
4.4 Modello di calcolo.....	98
4.4.1 Caratteristiche materiali .....	102
4.4.2 Calibrazione dinamica del modello .....	103
4.4.3 Definizione caratteristiche di smorzamento .....	109
4.5 Confronto risultati numerici e sperimentali .....	110
4.6 Analisi della risposta sotto carichi impulsivi .....	115
4.7 Simulazione di un sistema per il controllo delle vibrazioni .....	120
4.7.1 Valutazione dell'efficacia del sistema sotto carichi impulsivi .....	124
<b>CONCLUSIONI.....</b>	<b>131</b>
<b>BIBLIOGRAFIA.....</b>	<b>135</b>



## **PREMESSA**

Il patrimonio artistico e culturale di un paese identifica la sua civiltà, la sua cultura nazionale e la sua memoria collettiva. Ne consegue che il dovere della comunità è quello di conservare e proteggere tale patrimonio per trasmetterlo alle generazioni future. La salvaguardia del patrimonio artistico è, dunque, di fondamentale importanza. Tuttavia, a questo problema è stata dedicata sinora un'attenzione molto minore di quella relativa ai contenitori, ovvero degli edifici in cui essi vengono conservati.

Invece, nell'allestimento e nel riordino di un Museo o di una Chiesa, deve sempre essere affrontato il problema dei rischi a cui sono esposti gli oggetti d'arte. La riduzione di tali rischi richiede accorgimenti e tecniche specifiche, relative al genere di pericolo a cui è sottoposto il bene.

Nella Chiesa di San Francesco D'Assisi, a Palermo, è conservato il simulacro argenteo dell'Immacolata, che l'8 Dicembre di ogni anno è la protagonista di una processione per le vie della città.

Nel corso degli anni si è constatato un mediocre stato di conservazione della statua a causa delle violente scosse subite durante le processioni, che con forti vibrazioni asincrone ne hanno compromesso l'integrità nel tempo. A tal fine è importante sottolineare che, mentre la "musealizzazione" di un'opera d'arte, ovvero la protezione all'interno di un museo di un'opera d'arte dai rischi ambientali, è un problema ormai abbastanza noto, meno usuale è il problema della prevenzione dei danni indotti, in questo caso dalle vibrazioni, durante la fruizione dell'opera d'arte stessa. Stabilire una metodologia per preservare le statue mitigando le suddette vibrazioni indotte, ha, inoltre, una valenza anche internazionale, basti pensare al numero delle processioni che esistono in tutto il mondo come in Italia, Spagna, Grecia, Sud America.

L'obiettivo della presente tesi è quello di studiare e indagare sull'entità delle vibrazioni indotte sul simulacro e di progettare un sistema per ridurre tali vibrazioni attraverso dei dispositivi di controllo.

Per il raggiungimento di tale scopo è stato esaminato il simulacro mediante uno studio agli elementi finiti che ha messo in luce il comportamento della statua sotto l'azione di carichi impulsivi alla base, in presenza e in assenza di *attenuatori di vibrazioni*, che ne hanno ridotto notevolmente le vibrazioni indotte.

La presente tesi è suddivisa in 4 capitoli.

Il Capitolo 1 ha carattere introduttivo, si propone di descrivere i sistemi di controllo delle vibrazioni, con maggior riguardo per i sistemi di controllo passivo. Un paragrafo è dedicato ad applicazioni di sistemi di controllo su beni artistici e monumentali, per la protezione da rischi derivanti dal trasporto, attraverso l'utilizzo di gabbie antivibranti, e da rischi sismici, attraverso basi antisismiche.

Nel Capitolo 2 vengono descritti la Chiesa di San Francesco D'Assisi a Palermo, e il simulacro dell'Immacolata, da come si presenta attualmente, alla sua storia, compresa la serie di deterioramenti e restauri che nel corso del tempo ha dovuto subire. Infine, viene fatta una descrizione delle operazioni rituali e quindi della processione, su come avveniva e come si svolge adesso.

Nel Capitolo 3 vengono presentati i risultati di una campagna sperimentale condotta da: Prof. M. Di Paola, il Prof. A. Pirrotta, il Dott. Ing G. Navarra e il Dott. Ing. F. Lo Iacono, afferenti al Dipartimento di Ingegneria strutturale aerospaziale e geotecnica dell'Università di Palermo. Tali prove sperimentali hanno avuto come obiettivo la misura delle vibrazioni indotte sul simulacro dell'Immacolata durante la processione per le vie cittadine.

Nel Capitolo 4 viene presentato lo studio svolto nell'ambito di questa tesi. In particolare sulla base degli studi descritti nei capitoli precedenti si è ritenuto opportuno sviluppare una simulazione numerica agli elementi finiti. A tal scopo è stato necessario espletare un rilievo geometrico ed un'indagine endoscopica.

I risultati di questo rilievo e di questa indagine endoscopica, quest'ultima grazie alla disponibilità del Prof. A. Pirrotta e del Dott. Ing. C. Bilello, hanno confermato alcune delle problematiche supposte nella precedente campagna.

Inoltre, considerando tutte le informazioni della precedente indagine sperimentale, nonché del rilievo svolto, è stato elaborato un modello di calcolo in grado di simulare il comportamento dinamico del simulacro. Una volta sottoposto il modello all'azione di carichi impulsivi alla base, si è confrontato il comportamento del simulacro, in assenza e in presenza di dispositivi di controllo.

Infine un'ultima sezione è dedicata alle conclusioni in cui vengono discussi criticamente i risultati cui si è pervenuti.



# **CAPITOLO 1.**

## **CONTROLLO DELLE VIBRAZIONI**

### **1.1 Introduzione**

Il controllo della risposta di strutture soggette ad eventi naturali o provocati dall'uomo di natura dinamica rappresenta una sfida impegnativa per l'ingegnere civile. L'approccio tradizionale alla mitigazione dei rischi connessi ai carichi dinamici ambientali, è quello di progettare strutture con una sufficiente resistenza e capaci di dissipare energia attraverso le riserve di duttilità della struttura.

In maniera alternativa, negli ultimi decenni si sono diffusi ed affermati concetti ed applicazioni relativi al cosiddetto controllo strutturale. Con tale accezione si vogliono denotare tutti i sistemi in cui, alla struttura portante, vengono affiancati dei dispositivi che, operando secondo diversi principi di funzionamento, riescono a ridurre la risposta dinamica, anche adeguando le proprie caratteristiche a quelle della forzante e del sistema strutturale. Tale

approccio risulta vantaggioso in quanto la dissipazione dell'energia sismica in ingresso alla struttura non viene dissipata per plasticizzazione e conseguente danneggiamento di parti strutturali, ma all'interno dei dispositivi di controllo, rendendo possibile il mantenimento della struttura in campo elastico.

Tra i sistemi di controllo possono distinguersi alcune grandi categorie: i sistemi di controllo passivi e attivi. Un compromesso tra sistemi di controllo attivo e passivo è stato recentemente sviluppato nella forma dei cosiddetti sistemi a controllo semi-attivo. Questi mantengono l'affidabilità dei sistemi di controllo passivo mentre sfruttano il vantaggio di avere parametri regolabili, caratteristica propria di un sistema di controllo attivo.

**Sistemi di controllo passivo:** Un sistema di controllo passivo può essere definito come un sistema che non richiede una fonte di potenza esterna per operare e utilizza il movimento stesso della struttura nella quale è inserito per sviluppare le forze di controllo. Tali forze sono, quindi, sviluppate in funzione della risposta della struttura nel punto di localizzazione del sistema di controllo passivo. Nella Figura 1.1 viene schematizzato un tale sistema.

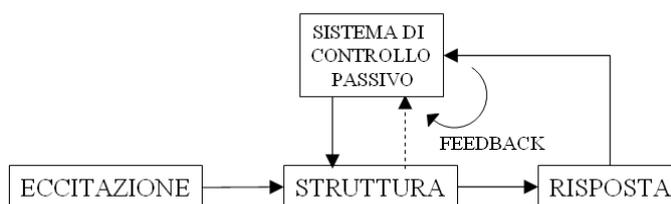


Figura 1.1 Schema di un sistema di controllo passivo.

I sistemi di isolamento alla base, che a rigore appartengono alla classe dei sistemi di controllo passivo, sono stati studiati da più tempo e il grado di maturità della ricerca in questo campo è senza dubbio superiore rispetto a quello relativo agli altri sistemi di controllo strutturale. Inoltre l'utilizzo di tali

dispositivi viene previsto anche da recenti normative europee ed italiane che ne fissano i criteri progettuali e prestazionali.

**Sistemi di controllo attivo:** Un sistema di controllo si dice attivo quando le forze necessarie per il controllo strutturale vengono, tipicamente, generate dal sistema attraverso l'uso di attuatori elettro-idraulici o elettro-meccanici basandosi su informazioni di retroazione (*feedback*) provenienti da misurazioni della risposta strutturale e/o da informazioni di anticipo (*feedforward*) in base all'eccitazione esterna.

Le misurazioni della risposta e/o dell'eccitazione vengono monitorate da un controllore (*controller*) che, basandosi su un algoritmo di controllo pre-determinato, definisce un segnale di comando appropriato che viene inviato agli attuatori. In Figura 1.2 viene mostrato lo schema di un sistema di controllo attivo.

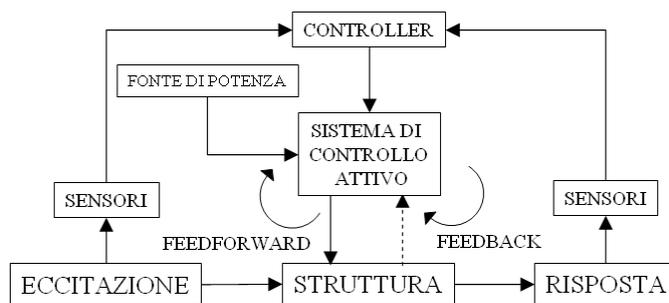


Figura 1.2 Schema di un sistema di controllo attivo.

I sistemi di controllo attivo possiedono degli indubbi vantaggi:

- a) rispetto ai sistemi passivi, i sistemi attivi sono molto più efficaci nel controllo della risposta, essendo il grado di efficacia limitato soltanto dalla capacità degli algoritmi di controllo;

- b) i sistemi attivi sono relativamente insensibili alle condizioni del sito e del moto del suolo;
- c) i sistemi attivi possono applicarsi alla mitigazione di diverse situazioni di rischio; lo stesso sistema attivo può essere utilizzato, per esempio, sia per controllare la risposta di una struttura soggetta a forti venti che a terremoti;
- d) è possibile operare una scelta degli obiettivi del controllo; ad esempio, per edifici molto alti, quando non sono presenti problemi di sollecitazione sismica o venti di forte intensità, è possibile controllare la risposta in modo da garantire il confort umano controllando comunque il moto della struttura così da incrementare la sicurezza strutturale durante azioni dinamiche eccezionali;

Le tecniche di controllo attivo in generale sono di frequente utilizzo nei campi dell'ingegneria elettrica, meccanica ed aerospaziale, mentre l'applicazione e l'implementazione sono molto più complesse quando applicate a sistemi dell'ingegneria civile.

Per una panoramica sui sistemi di controllo attivo per le strutture si ricordano i lavori di Soong et al. [5] [14] [15], Fujino et al. [16], ATC [7] e IASC [17].

**Sistemi di controllo semi-attivo e ibridi:** I sistemi di controllo semi-attivo sono stati oggetto di ricerca per applicazioni di controllo strutturale solo recentemente.

Un sistema di controllo semi-attivo in generale trae origine da un sistema di controllo passivo successivamente modificato in modo da consentire la regolazione di alcune proprietà meccaniche. Ad esempio, dispositivi che

dissipano energia, costringendo fluidi viscosi a passare per stretti orifizi o attraverso attrito per scivolamento, sono stati modificati per comportarsi in modo semi-attivo.

Le proprietà meccaniche di tali sistemi possono essere regolate in base ad informazioni di feedback provenienti dalla misurazione della risposta. Come in un sistema di controllo attivo, un controller monitora le misurazioni di feedback e genera un segnale di comando appropriato per i dispositivi semi-attivi.

D'altra parte, come in un sistema di controllo passivo, le forze di controllo vengono sviluppate come risultato del moto della struttura stessa attraverso appropriate regolazioni delle proprietà meccaniche del sistema di controllo semi-attivo basate su un algoritmo di controllo pre-determinato.

Inoltre, le forze di controllo in molti sistemi di controllo semi-attivo agiscono in primo luogo per opporsi al moto del sistema strutturale e quindi per assicurare la stabilità della struttura. I sistemi di controllo semiattivo richiedono in generale una piccola quantità di potenza esterna per operare, nell'ordine delle decine di watt.

Un altro vantaggio dei sistemi semi-attivi è quello che, nel caso di mancanza di potenza, le componenti passive del controllo continueranno ad offrire un certo grado di protezione, a differenza di un sistema di controllo totalmente attivo.

Un sistema di controllo semi-attivo può essere definito come un sistema di controllo che in genere richiede una piccola fonte di potenza esterna per funzionare (ad esempio una batteria) ed utilizza il moto della struttura per sviluppare le forze di controllo, l'entità delle quali può essere regolata attraverso diversi meccanismi che richiedono una fonte esterna di potenza.

Le forze di controllo possono essere regolate e modulate basandosi su informazioni provenienti da cosiddetti sensori di feedback che misurano l'eccitazione e/o la risposta della struttura. I punti in cui vengono misurate le grandezze necessarie per le operazioni di feedback possono anche essere lontani dalla posizione dei sistemi di controllo semi-attivi.

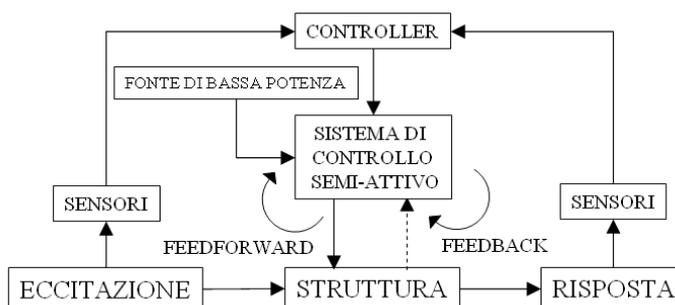


Figura 1.3 Schema di un sistema di controllo semi-attivo.

La Figura 1.3 riporta uno schema semplificato di sistema di controllo semi-attivo.

Bisogna notare che le tre classi principali dei sistemi di controllo appena descritte possono talvolta combinarsi tra loro per formare i cosiddetti sistemi di controllo ibridi. Siffatti sistemi di controllo, consistenti nella combinazione di dispositivi attivi e passivi o semi-attivi e passivi, sono stati descritti in letteratura (ad es. Nagarajaiah [2], Reinhorn e Riley [3], and Symans and Kelly [4]).

Il sistema di controllo e la struttura non si comportano come sistemi dinamici indipendenti ma interagiscono tra loro. Tale interazione struttura-sistema di controllo viene indicata negli schemi precedenti da una linea tratteggiata. Inoltre, esistono effetti di interazione anche tra l'eccitazione e la

struttura (es. interazione suolo-struttura) e tra i sensori e la struttura (di solito con effetti notevolmente minori).

## 1.2 Sistemi di controllo passivo

L'utilizzo dei sistemi di controllo passivo ha come scopo quello di incrementare la capacità di dissipare energia di una struttura attraverso dei dispositivi di dissipazione. Tali sistemi agiscono come dissipatori supplementari nel senso che, in aggiunta alla quota che la struttura dissipa per effetto dello smorzamento strutturale, vi è anche una quota di energia dissipata da essi, riducendo così la quota di energia che si trasforma in moto della struttura.

In letteratura sono presenti diversi lavori che offrono una completa panoramica dei sistemi di controllo passivo. Tra questi ricordiamo Soong and Constantinou [5], ATC [6] [7], EERI [8], Constantinou et al. [9] e Constantinou e Symans [10].

Un sistema di controllo passivo non richiede una fonte di energia esterna per operare, anzi è il moto stesso della struttura che viene utilizzato per produrre dei movimenti relativi all'interno dei dispositivi di controllo passivo in modo da dissipare energia.

I dispositivi di dissipazione supplementare di energia possono prendere diverse forme e dissipare energia attraverso una varietà di meccanismi, come la plasticizzazione di acciai dolci, attraverso azioni di tipo viscoelastico all'interno di materiali gommosi, inducendo deformazioni a taglio in fluidi viscosi, costringendo dei fluidi a passare per orifizi oppure attraverso l'attrito per scivolamento.

Nell'ambito dei sistemi di controllo passivo è possibile riconoscere tre famiglie di dispositivi:

1. Gli *assorbitori* a massa sincronizzata (o accordata), meglio noti come *tuned mass dampers (TMD)*, vengono realizzati introducendo nella struttura una o più oscillatori elementari in parallelo. Tali dispositivi sono adottati, soprattutto, per limitare le vibrazioni indotte dall'azione del vento sulle strutture snelle.
2. I *dissipatori*, dispositivi capaci di trasformare in calore l'energia meccanica ad essi fornita e di disperderlo, quindi, nell'ambiente. Essi possono essere ulteriormente classificati in base al meccanismo di dissipazione dell'energia in dissipatori viscoelastici, elastoplastici e ad attrito. Sono efficaci per limitare le vibrazioni delle strutture soggette a qualunque tipo di azione dinamica.
3. I *sistemi di isolamento alla base*, efficaci soprattutto per strutture realizzate in zona sismica, consistono nell'isolare la struttura dalla fondazione disponendo dei particolari dispositivi detti *isolatori*. A seguito dell'introduzione degli isolatori si modifica la frequenza fondamentale del complesso struttura-isolatore, che assume un valore molto più basso di quella della struttura originaria incastrata alla base. Ne segue che il primo modo di vibrare esalta gli spostamenti dell'isolatore, mentre la struttura rimane rigida. Gli isolatori, dunque, nella concezione originaria non dissipano energia, ma modificano le caratteristiche dinamiche della struttura. Per essere realmente efficaci gli isolatori devono essere in grado, per eventi sismici di elevata intensità, di deformarsi anche in modo considerevole mentre devono essere sufficientemente rigidi per azioni dinamiche di modesta entità, quali i sismi medio deboli e l'azione del vento. Gli isolatori possono

essere classificati in elastomerici (viscoelastici), elastoplastici e ad attrito. Questi ultimi, a differenza degli isolatori viscoelastici, posseggono elevate capacità dissipative ma anche l'inconveniente di dar luogo a elevati spostamenti residui al termine del sisma.

### 1.2.1 Dissipatori viscoelastici

I dissipatori viscoelastici sono da considerarsi tra le tipologie più semplici dei dispositivi di controllo passivo delle oscillazioni di strutture soggette ad azioni dinamiche. Essi sono installati, con successo in numerose strutture civili e possiedono la proprietà di ridurre le oscillazioni forzate trasformando in calore parte dell'energia meccanica trasmessa dalla forzante alla struttura.

Questi dispositivi, per essere efficaci, devono essere installati in particolari punti della struttura nei quali si hanno, durante il moto, degli spostamenti relativi significativi.

Tipicamente vengono installati nei controventi delle strutture in acciaio e sulle spalle delle strutture da ponte.

I dissipatori, dunque, incrementano le capacità dissipative delle strutture lasciando pressochè inalterate le frequenze naturali della stessa.

Per la presenza dei dissipatori, dunque, si modificano le equazioni del moto nella forma seguente:

$$\mathbf{M}\ddot{\mathbf{u}}(t)+[\mathbf{C}+\mathbf{C}_{\text{dis}}(\dot{\mathbf{u}}(t))]\dot{\mathbf{u}}(t)+\mathbf{K}\mathbf{u}(t)=\mathbf{f}(t) \quad (1.1)$$

Nella quale  $\mathbf{M}$  è la matrice delle masse,  $\mathbf{K}$  è la matrice delle rigidezze;  $\mathbf{C}_{\text{dis}}$  e  $\mathbf{C}$  sono rispettivamente la matrice di dissipazione conseguente all'installazione dei dissipatori viscoelastici e la matrice di dissipazione della struttura senza dissipatori;  $\dot{\mathbf{u}}(t)$  e  $\ddot{\mathbf{u}}(t)$  sono dei vettori i cui elementi descrivono le velocità e le accelerazioni dei gradi di libertà dinamicamente significativi della struttura;  $\mathbf{f}(t)$  è il vettore delle forze esterne.

Ne segue che il sistema strutturale controllato è, in generale, non classicamente smorzato anche se prima dell'installazione dei dissipatori fosse stato classicamente smorzato.

I materiali viscoelastici usati nelle applicazioni strutturali sono in genere polimeri o sostanze vetrose che dissipano energia attraverso deformazioni a taglio. In Figura 1.4 è mostrato un tipico esempio di smorzatore viscoelastico costituito da due strati di materiale viscoelastico racchiusi tra piastre in acciaio, mentre in Figura 1.5 è mostrato un dispositivo viscoelastico utilizzato nei ponti.

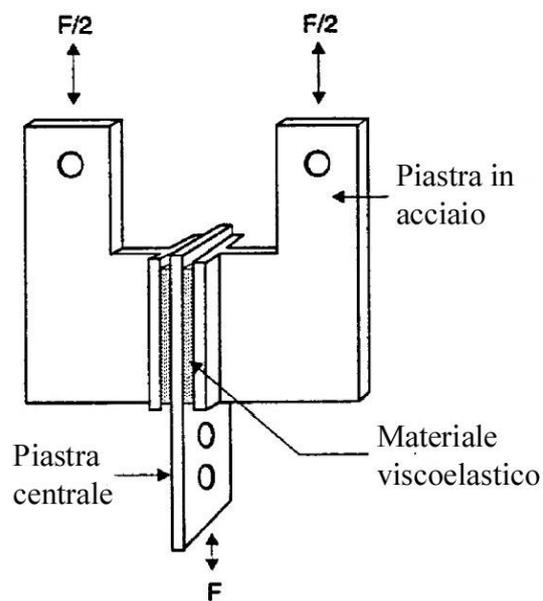


Figura 1.4. Tipico esempio di configurazione di smorzatore viscoelastico.

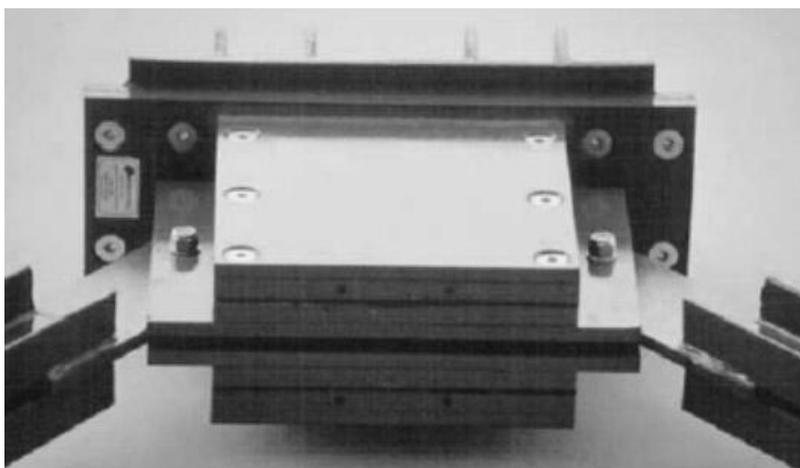


Figura 1.5. Dispositivo dissipatore viscoelastico utilizzato nei ponti.

Nel dispositivo mostrato la dissipazione di energia ha luogo quando la vibrazione strutturale induce un movimento relativo tra le piastre esterne in acciaio e quelle centrali, e quindi quando intervengono deformazioni a taglio.

Negli ultimi anni sono stati conseguiti significativi progressi nella ricerca e nello sviluppo di smorzatori viscoelastici mediante analisi e prove sperimentali (ad es. da [18] a [20]), in particolare per applicazioni sismiche.

Anche nell'ambito dell'ingegneria meccanica, i dissipatori viscoelastici stanno conseguendo notevoli progressi. In particolare le applicazioni riguardano le sospensioni di autoveicoli. La loro dinamica ha un comportamento simile al sistema di controllo che è stato studiato per il simulacro dell'Immacolata oggetto della tesi.

La sospensione deve garantire una buona tenuta di strada e un buon comfort, necessità fra loro contrastanti, per questo motivo la sospensione diventa un compromesso fra un sistema sospensivo morbido capace di assorbire le irregolarità stradali ed un sistema sospensivo rigido che garantisca risposte rapide dello sterzo e stabilità elevata.

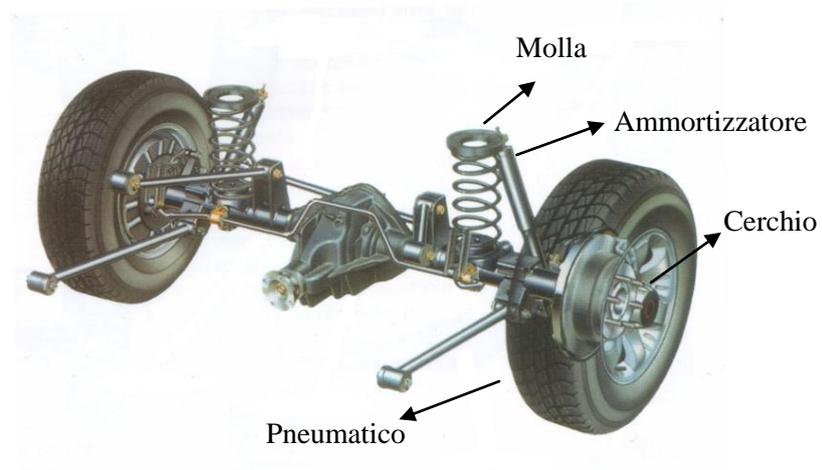


Figura 1.6. Esempio di sospensione.

Le caratteristiche fondamentali di una sospensione sono:

- *Corsa*, è l'ampiezza (in mm) dell'escursione verticale che la ruota può compiere rispetto alla scocca;
- *Flessibilità*, è il rapporto tra la corsa della molla (ovvero l'elemento elastico della sospensione) ed il carico necessario a realizzarla. Si esprime in [mm/N].
- *Smorzamento*, è l'azione di frenatura dell'oscillazione che viene esercitata dall'ammortizzatore. Si esprime in [Ns/m].
- *Masse sospese*, l'insieme di corpi rimane al di sopra degli elementi elastici (scocca, motore, trasmissione, carico, passeggeri).
- *Massa non sospesa*, tutto ciò che risulta sotto agli elementi elastici (cerchio, pneumatici, mozzo).

Esiste un rapporto fra masse sospese e masse non sospese, che avrà naturalmente diversi valori al variare del mezzo desiderato, in modo da

valutare la confortevolezza del veicolo, al quale corrisponde allo stesso tempo avrà una peggiore tenuta di strada, così come il viceversa.

Per lo studio di una sospensione si utilizza il modello in Figura 1.7.

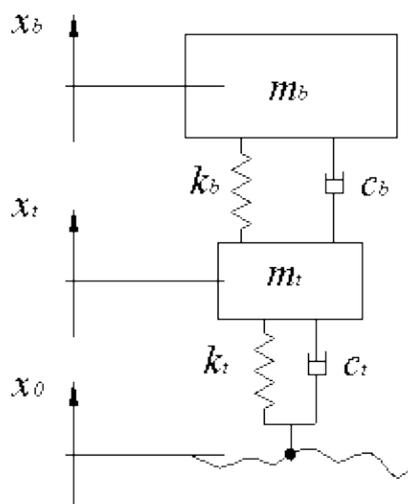


Figura 1.7. Modello di una sospensione.

Con riferimento alla Figura 1.7:  $m_b$  è la massa sospesa (cioè il corpo del veicolo),  $m_t$  è la massa non sospesa (che rappresenta la ruota, il pneumatico, il disco freno e parte della sospensione),  $k_b$  è la rigidezza della sospensione,  $c_b$  è lo smorzamento della sospensione,  $k_t$  è la rigidezza del pneumatico,  $c_t$  è lo smorzamento del pneumatico,  $x_0$  è lo spostamento del terreno (rappresenta l'input dato al sistema),  $x_t$  è lo spostamento della massa non sospesa,  $x_b$  è lo spostamento della massa sospesa.

### 1.2.2 Sistemi di isolamento alla base

I sistemi di isolamento sismico rappresentano, a rigore, una forma di controllo passivo. In questi sistemi tra la fondazione e la struttura in elevazione viene introdotto un elemento di isolamento avente una rigidezza

agli spostamenti laterali molto bassa e una buona capacità portante per carichi verticali. In questo modo si ottiene un disaccoppiamento del moto della struttura da quello del terreno ed un incremento del periodo naturale del sistema.

L'incremento della flessibilità solitamente porta come risultato l'abbattimento di gran parte dell'energia del sisma, riducendo così le accelerazioni nella sovrastruttura, ma incrementando gli spostamenti relativi tra fondazione e struttura in elevazione.

La letteratura è ricca di lavori analitici e sperimentali sull'argomento. In particolare i sistemi di isolamento sismico sono descritti ad esempio in Soong e Constantinou [5], ATC [7], Kelly[11], Skinner et al. [12] e EERI [13].

L'isolamento sismico di un edificio costituisce una valida alternativa alla dissipazione passiva dell'energia per perseguire la mitigazione del rischio sismico. I sistemi di isolamento cercano di ottenere una drastica riduzione delle forze sismiche agenti sulla struttura, affidandosi quindi ad una riduzione dell'energia meccanica in ingresso, piuttosto che all'aumento della resistenza della struttura o all'incremento dell'energia dissipata.

Più precisamente, l'isolamento sismico consiste nel disaccoppiare il movimento orizzontale dell'edificio da quello del terreno, mediante l'inserimento di appositi dispositivi detti isolatori.

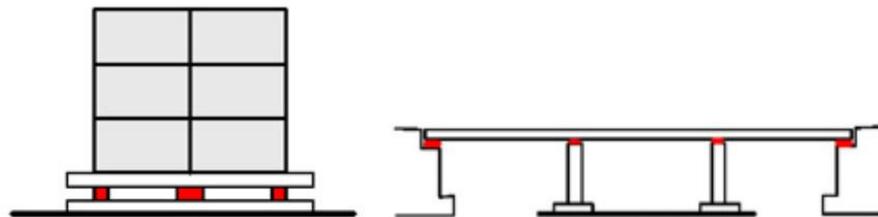


Figura 1.8. Schema di inserimento degli isolatori in edifici e nei ponti.

Tali dispositivi, come riportato in Figura 1.8, possono essere inseriti tra la fondazione e la struttura in elevazione, e in questo caso si parlerà di isolamento alla base (Figura 1.9), oppure in corrispondenza del piano terreno o dei piani in elevazione. Nel caso dei ponti è frequente l'utilizzo di isolatori posti tra le pile e le campate semplicemente appoggiate.

Dal punto di vista qualitativo, la Figura 1.10 mostra come la struttura posta al di sopra degli isolatori, se non risulta eccessivamente flessibile, si muove rigidamente in direzione orizzontale, esibendo bassi valori sia delle accelerazioni che degli spostamenti relativi di interpiano e, quindi, delle sollecitazioni sulle membrature.

Questo abbate il danneggiamento non solo delle parti strutturali, ma anche di quelle non strutturali, (tamponature, tramezzi, infissi, impianti) e dei beni contenuti all'interno degli edifici nel caso di musei, biblioteche, centri di calcolo, ecc.



Figura 1.9. Isolatore posto alla base di un pilastro e munito di dispositivi di bloccaggio temporanei.

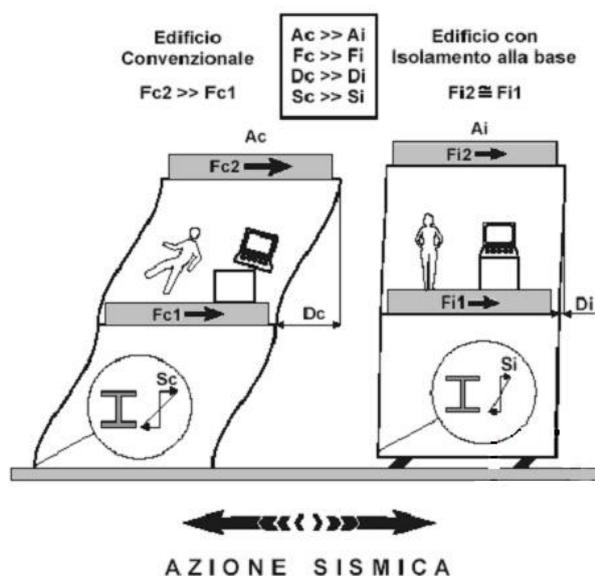


Figura 1.10. Rappresentazione schematica del diverso comportamento sismico di edifici tradizionali ed isolati.

L'utilizzo dei sistemi di isolamento consente, quindi, di minimizzare i danni causati alle strutture da un sisma, mantenendo inalterata, anche dopo il verificarsi di un forte evento tellurico, la funzionalità dell'edificio e consentendo di continuare le attività che in esse vengono svolte.

Il disaccoppiamento tra terreno di fondazione e struttura ha come risultato quello di incrementare il periodo proprio di vibrazione della sovrastruttura e, di conseguenza, di allontanarlo dalla zona dello spettro di risposta cui sono associate accelerazioni strutturali maggiori. La struttura, quindi, filtra il sisma risultando sensibile solamente alle componenti aventi periodi simili al periodo di vibrazione della struttura isolata.

Le forme degli spettri di risposta fornite dalle normative (vedi Figura 1.11) sono tali che agli alti periodi di vibrare sono associate accelerazioni sismiche

relativamente modeste ma grossi spostamenti, dell'ordine anche delle decine di centimetri, che la struttura deve riuscire a seguire liberamente e che il dispositivo isolatore deve essere in grado di sopportare senza danni, dissipando l'energia mediante ampi cicli di isteresi.

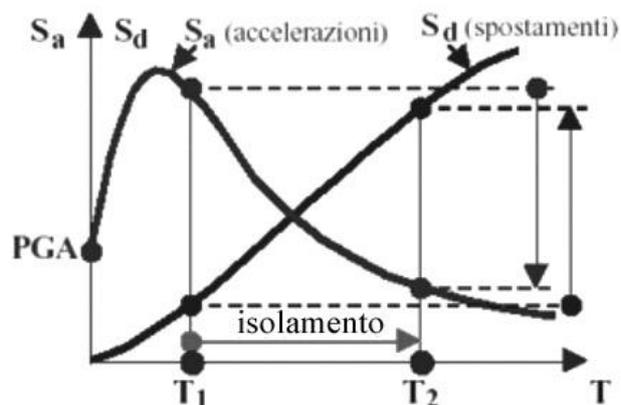


Figura 1.11. Conseguenze dell'isolamento alla base in termini di accelerazioni e spostamenti.

In Figura 1.12 viene mostrato un isolatore soggetto ad una prova di compressione e taglio in cui si evidenzia l'elevato valore delle deformazioni che il dispositivo riesce a sostenere.

Anche se apparentemente può sembrare un paradosso, le tecniche di isolamento alla base perseguono la protezione sismica delle strutture non tanto aumentandone la resistenza ma piuttosto mediante un "indebolimento" delle stesse. D'altra parte, mitigare gli effetti di un sisma sulla strutture significa essenzialmente limitare la quantità di energia meccanica che il suolo trasmette alla struttura durante un terremoto.



Figura 1.12. a) Isolatori elastomerici nella configurazione indeformata  
b) isolatori elastomerici soggetti ad una prova di compressione e taglio.

Un sistema d'isolamento adeguato deve, inoltre, possedere anche le seguenti caratteristiche:

- una buona capacità rientrante, cioè la capacità di riportare la struttura nella posizione iniziale una volta terminato il sisma;
- una rigidità elevata per azioni dinamiche di modesta entità, così da impedire che il sistema esibisca spostamenti laterali significativi per azione del vento;
- rigidità e smorzamento poco sensibili ad effetti quali le variazioni di temperatura, l'invecchiamento dei materiali, ecc.

Tali dispositivi hanno in genere pianta quadrata o circolare, così da presentare un comportamento il più possibile indipendente dalla direzione dell'azione orizzontale agente.

La tecnologia dell'isolamento sismico, collaudata con esiti positivi dai recenti terremoti giapponesi e americani, conferisce all'edificio la capacità di resistere a terremoti medio-forti limitando i danni sia alle strutture che alle finiture, con un conseguente abbattimento dei costi di riparazione a seguito di tali eventi e con probabilità di perdita di vite umane prossima allo zero.

Sul mercato sono da anni presenti diverse tipologie di isolatori sismici che si differenziano per i metodi costruttivi utilizzati e per le loro caratteristiche. Una classificazione riconosciuta in letteratura prevede la definizione di tre categorie: gli isolatori elastomerici, gli isolatori elasto-plastici e gli isolatori a scorrimento.

Il requisito necessario per installare un sistema di isolamento alla base è che l'edificio sia in grado di muoversi rispetto al terreno della stessa quantità dell'isolatore. E' necessario predisporre un piano di separazione sulla struttura per permettere questi movimenti. La posizione di tale piano dipende principalmente dalle scelte progettuali.

- Gli isolatori si possono montare sopra la fondazione e la struttura è costruita sopra di essi;
- Si possono posizionare gli isolatori anche all'interno del seminterrato.

### **1.3 Applicazioni ai beni artistici e monumentali**

Negli ultimi decenni è stata rivolta una considerevole attenzione allo studio del comportamento sismico delle costruzioni e dei complessi storici e monumentali e delle relative metodologie di restauro e rafforzamento: l'obiettivo è stabilire criteri e metodi per operare interventi che siano rispettosi dei valori culturali ed al tempo stesso razionali ed efficienti, in grado cioè di garantire che i danni prevedibili in caso di evento sismico risultino contenuti entro limiti ritenuti accettabili.

Dal punto di vista della salvaguardia del patrimonio artistico e culturale, è apparso di analogo interesse proteggere gli oggetti d'arte esibiti sia all'aperto, che all'interno delle costruzioni, ed in particolare dei Musei. Tuttavia, a questo

problema è stata dedicata sinora un'attenzione molto minore di quella che ha ricevuto la protezione dei loro contenitori.

Invece, nell'allestimento e nel riordino di un Museo deve essere sempre affrontato il problema del rischio sismico (come del resto dei rischi di tutti i generi) a cui sono esposti gli oggetti d'arte: la sua riduzione richiede infatti accorgimenti e tecniche specifiche, progettate in relazione alla tipologia degli oggetti ed alla sismicità della zona.

Il problema può essere risolto, in via di principio, adottando accorgimenti sofisticati ma generalmente costosi, quali l'adozione di basi isolanti per ciascuno degli oggetti interessati.

Soluzioni di questo tipo hanno trovato qualche valida ed efficiente applicazione ed hanno recentemente dato origine ad alcuni brevetti; non sono però generalizzabili, poiché il numero degli oggetti da proteggere è talmente elevato da renderle, e non solo per il loro costo, impraticabili.

A seconda della posizione in cui si trovano gli oggetti d'arte, cambiano i criteri di protezione. Per grandi linee consistono in:

- per gli oggetti esposti all'interno di vetrine: nell'impedire le oscillazioni e nel permettere un limitato scorrimento sul piano d'appoggio;
- per gli oggetti poggiati direttamente sul pavimento o su piedistalli: nella disposizione alla base degli stessi di apparecchi isolatori/dissipatori di diversa tipologia;
- per gli oggetti appesi ad una parete: nella possibilità di scivolamento senza urti sulla parete, eventualmente limitando lo scivolamento mediante l'interposizione di cuscinetti in gomma, che forniscono un attrito controllato ed incrementano la dissipazione d'energia;

- per gli oggetti sospesi al soffitto: nel controllo della resistenza degli ancoraggi e nella verifica della lunghezza della sospensione, in modo da garantire l'efficienza della connessione al soffitto e da limitare l'ampiezza degli spostamenti massimi.

### **1.3.1 Gabbia antivibrante per il trasporto**

Il trasporto di oggetti vulnerabili alle vibrazioni, quali opere d'arte, strumentazione scientifica di alta precisione e manufatti delicati in genere, viene normalmente effettuato mediante l'imballaggio dell'oggetto da trasportare in un apposito contenitore e l'invio del contenitore a destinazione. A sua volta il contenitore può essere posto su materiali o dispositivi smorzanti in gomma, *shock absorbers* a cavo o molle ad aria.

La scelta del tipo di smorzatore viene fatta volta per volta a seconda del carico da trasportare. Questo metodo di trasporto, con il baricentro della struttura posto in alto rispetto all'appoggio, si trova in condizioni più o meno critiche di instabilità dinamica. Inoltre l'azione protettiva si esplica solo dopo che l'oggetto da trasportare è stato posto entro l'imballaggio, e questo posizionato sopra gli smorzatori.

Per il trasporto di opere d'arte e di oggetti delicati, il problema viene normalmente affrontato predisponendo sistemi di imballaggio ad hoc, in genere non riutilizzabili, che possono essere particolarmente complicati e costosi, specie per piccoli spostamenti.

In ogni caso, le vibrazioni e gli urti nelle fasi di carico e scarico entro i contenitori non sono assorbite, ed è proprio in queste operazioni che la percentuale di incidenti dovuta all'errore umano è statisticamente significativa.

Un dispositivo utilizzato per il trasporto dei manufatti, è la “Gabbia antivibrante”.

Il dispositivo comprende una *Gabbia Antivibrante* ed un *container* predisposto per il suo alloggiamento ed il trasporto.

La *Gabbia Antivibrante* (Figura 1.13) è composta da una gabbia esterna fissa (1), denominata *cornice*, in cui è inserita una *gabbia interna oscillante* (2) che sostiene dall'alto l'oggetto da trasportare. Le due gabbie sono collegate ai quattro spigoli tramite 12 *molle ad aria* (3,4,5). L'abbattimento delle vibrazioni viene realizzato tramite i meccanismi combinati di taglio delle alte frequenze esercitato dalle molle ad aria, e di smorzamento esercitato da sistemi dissipativi di tipo passivo ed attivo. Lo smorzamento passivo è realizzato da 4 *smorzatori a cavi d'acciaio* (6) che svolgono anche una funzione di sicurezza in caso di rottura delle molle ad aria o di perdita di pressione nel circuito pneumatico.

Lo smorzamento attivo viene realizzato sia con 4 *ugelli ad aria compressa* (7) che entrano in azione quando le oscillazioni superano il valore di soglia prefissato, sia con il controllo attivo del taglio delle frequenze variando la rigidità delle molle ad aria tramite un sistema di variazione differenziata della pressione. Sulla cornice esterna sono saldate 4 *piastre* (8) con i fori per l'aggancio al carroponte o ad un qualunque sistema per la sospensione. Le piastre alloggiavano anche 4 *perni folli* (9) che si inseriscono nella guida posta nel container per il trasporto.

Lungo il bordo superiore della gabbia interna oscillante sono disposte le *tubazioni del circuito pneumatico delle molle ad aria* (10).

Vi sono 3 circuiti indipendenti per il gonfiaggio nelle direzioni verticale, laterale e longitudinale rispettivamente. In tal modo si ottiene un centraggio automatico del sistema nella fase di gonfiaggio. Ed è possibile regolare in maniera differenziata la pressione nelle tre direzioni principali qualora, come

spesso accade, il baricentro dell'oggetto da trasportare non sia posizionato sul suo asse di simmetria.

Il dispositivo smorza le vibrazioni in tutte le fasi della movimentazione e del trasporto del manufatto. La cornice esterna, sospesa ad un carropono o ad un qualunque tipo di gru, viene accostata dall'alto all'oggetto da trasportare, il quale viene imbracato e sospeso alla gabbia interna. L'azione smorzante si esplica immediatamente all'atto del sollevamento della Gabbia Antivibrante. Essa viene poi accostata al container appositamente attrezzato con un braccio telescopico che aggancia la cornice e la inserisce in due guide su cui viene ancorata per il trasporto. Il dispositivo ha carattere universale per quanto riguarda la tipologia degli oggetti da trasportare, ne compensa l'eventuale eccentricità del baricentro, ed è riutilizzabile dopo ogni operazione.

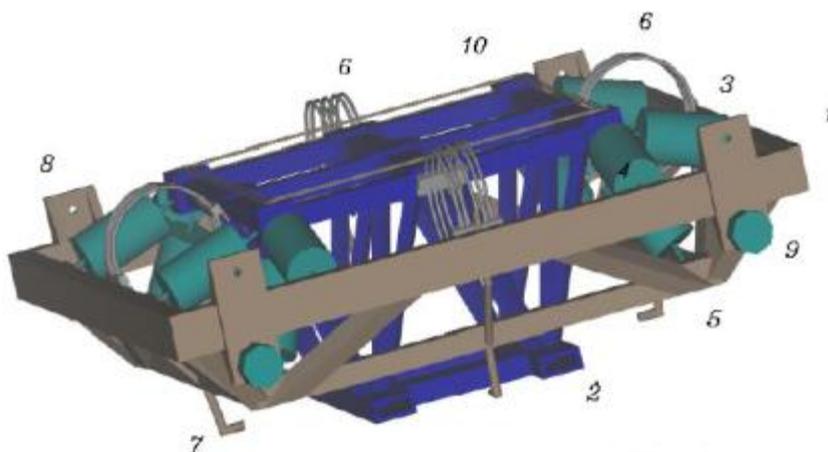


Figura 1.13. Gabbia antivibrante.

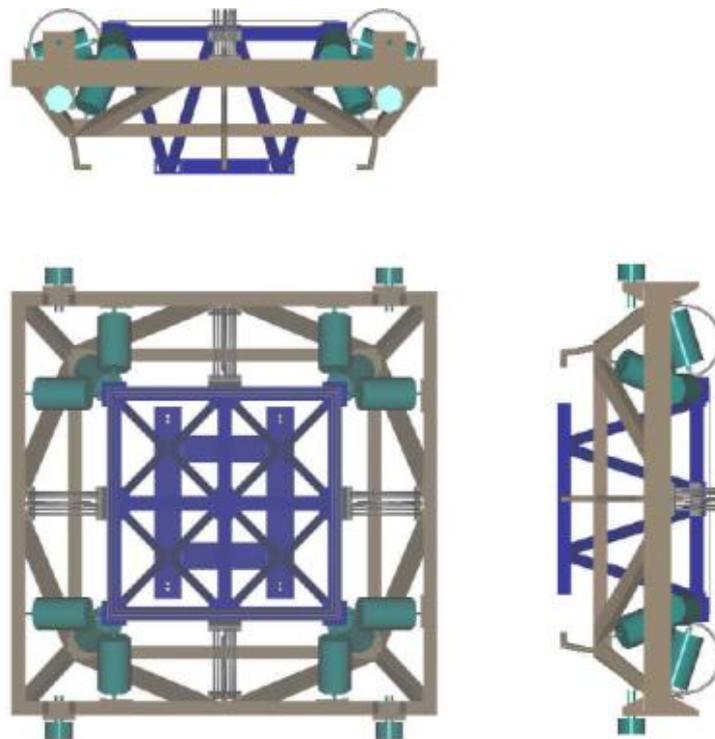


Figura 1.14. Viste in piante, prospetto e profilo della Gabbia antivibrante.

I principali aspetti innovativi del dispositivo con Gabbia Antivibrante sono:

- protezione dalle vibrazioni in tutte le fasi della movimentazione e del trasporto dell'opera d'arte, o del manufatto delicato in genere, dal momento del primo sollevamento per l'imballaggio fino alla destinazione finale. La Gabbia Antivibrante può essere usata anche per piccoli spostamenti dell'oggetto da trasportare;
- in tutte le fasi della movimentazione e del trasporto l'azione protettiva si esplica in condizioni di stabilità dinamica poiché l'oggetto è sospeso al sistema smorzante, con il baricentro al di sotto dei punti di

attacco, e con un'azione combinata di abbattimento delle vibrazioni tramite filtro delle alte frequenze, smorzamenti di tipo attivo e passivo;

- il filtro delle vibrazioni ad alta frequenza è esercitato dalle molle ad aria;
- lo smorzamento passivo delle oscillazioni alle basse frequenze è ottenuto tramite 4 smorzatori a cavo d'acciaio che svolgono anche una funzione di sicurezza in caso di rottura delle molle ad aria o di perdita di pressione nel circuito pneumatico;
- lo smorzamento attivo è realizzato tramite 4 ugelli per l'aria compressa, che entrano in funzione quando le oscillazioni superano il valore di soglia prefissato, oppure con un sistema di variazione differenziata della pressione nelle molle ad aria.
- il dispositivo ha carattere universale per quanto riguarda la tipologia degli oggetti da trasportare, ne compensa l'eventuale eccentricità del baricentro, ed è riutilizzabile dopo ogni operazione.

### **1.3.2 Base antisismica: Bronzi di Riace**

L'ENEA ha progettato e realizzato degli innovativi sistemi di isolamento sismico alla base per proteggere i Bronzi di Riace, la coppia di statue bronzee di provenienza greca o magnogreca o siceliota, databili al V secolo a.C. e pervenute in eccezionale stato di conservazione nel 1972 nei pressi di Riace, in provincia di Reggio Calabria.

I Bronzi, considerati tra i capolavori scultorei più significativi del ciclo ellenico si trovavano al Museo Nazionale della Magna Grecia di Reggio Calabria ma, a causa dei lavori di ristrutturazione dello stesso museo, sono temporaneamente ospitati presso Palazzo Campanella, sede del Consiglio Regionale della Calabria.



Figura 1.15. Bronzi di Riace

Le nuove basi antisismiche sono realizzate in marmo di Carrara, ed assicurano il massimo isolamento delle statue nei confronti delle sollecitazioni dei terremoti nelle direzioni orizzontali e verticale.

Per ciascuna statua è stata realizzata una base costituita da due blocchi di marmo sovrapposti; su entrambe le superfici interne dei due blocchi sono state scavate, in modo speculare, quattro calotte concave, nel mezzo delle quali sono collocate quattro sfere, anch'esse di marmo.

Le calotte concave e le sfere di marmo svolgono la funzione antisismica, e la loro dimensione viene definita in fase di progettazione in rapporto al grado di protezione sismica necessaria. Tra i due blocchi sono installati anche

elementi dissipativi in acciaio inox per l'isolamento sismico da oscillazioni nella direzione verticale.

La realizzazione delle basi in marmo si presta come la più compatibile con il bronzo delle statue, ed i dispositivi installati richiedono una manutenzione minima.

In presenza di un terremoto sarà la parte sottostante della base a subire l'azione sismica, e si potrà muovere con il terreno senza trasmettere alla parte superiore le sollecitazioni, in quanto completamente assorbite dal movimento delle sfere all'interno delle cavità ricavate nel marmo. Il movimento delle sfere rende il sistema di protezione poco rigido e con un attrito molto ridotto, caratteristiche che minimizzano o rendono quasi nulle le sollecitazioni.

Le nuove basi antisismiche, sulle quali sono state collocate delle copie in scala reale delle statue dei Bronzi di Riace, sono state sottoposte a verifica sperimentale sulle "tavole vibranti" presso i laboratori di "Qualificazione di Materiali e Componenti" del Centro Ricerche ENEA della Casaccia (vicino Roma). Le tavole vibranti sono impianti sperimentali complessi, di grandi dimensioni, in grado di riprodurre i terremoti reali nelle componenti orizzontali e verticale, e che per le prove di qualificazione delle basi hanno simulato terremoti anche superiori al livello massimo previsto per il sito del Museo a Reggio Calabria, senza che le copie delle statue abbiano subito alcuna sollecitazione.



Figura 1.16. Verifiche sperimentali delle nuove basi antisismiche, sulle “tavole vibranti” presso i laboratori di “Qualificazione di Materiali e Componenti” del Centro Ricerche ENEA della Casaccia (vicino Roma).

Per queste basi sono stati utilizzati gli isolatori sismici sviluppati dall'ENEA per la protezione di strumentazioni delicate, sistemi di comunicazione e di gestione dei dati rilevanti ai fini della sicurezza, sale operatorie, gasdotti, apparecchiature in centrali di produzione e/o trasformazione dell'energia elettrica, sistemi di sicurezza di impianti a rischio,

e per il patrimonio culturale. Tale sistema di isolamento sismico è particolarmente adatto per le statue sviluppate in verticale, come i Bronzi di Riace, o il David di Michelangelo, che hanno una base di appoggio molto ridotta e che quindi presentano nelle gambe il loro punto di maggiore vulnerabilità anche alle minime oscillazioni, che ne possono compromettere l'integrità strutturale e causare il ribaltamento.

### 1.3.3 Base antisismica: Satiro danzante

Un basamento antisismico è stato progettato anche per la protezione del Satiro danzante, la statua bronzea rappresentante la figura mitologica di un demone facente parte del corteo orgiastico che accompagnava il Dio del vino, Dioniso. La statua, datata tra la fine del IV e il III sec. a.C., (oppure una replica più tarda realizzata tra il II e la fine del I sec. a.C.) e ripescata nel Canale di Sicilia nella primavera del 1998, troverà la sua definitiva collocazione in un apposito Museo realizzato nella Chiesa di Sant'Egidio a Mazara del Vallo.



Figura 1.17. Satiro danzante.

Il Satiro danzante pesa, complessivamente, cento otto chili. Al suo interno è stata collocata una struttura di sostegno di acciaio poggiante sul basamento antisismico (l'altezza complessiva è poco meno di tre metri).

Il basamento è costituito dall'assemblaggio di isolatori HDLRB, raffigurati in Figura 1.18.

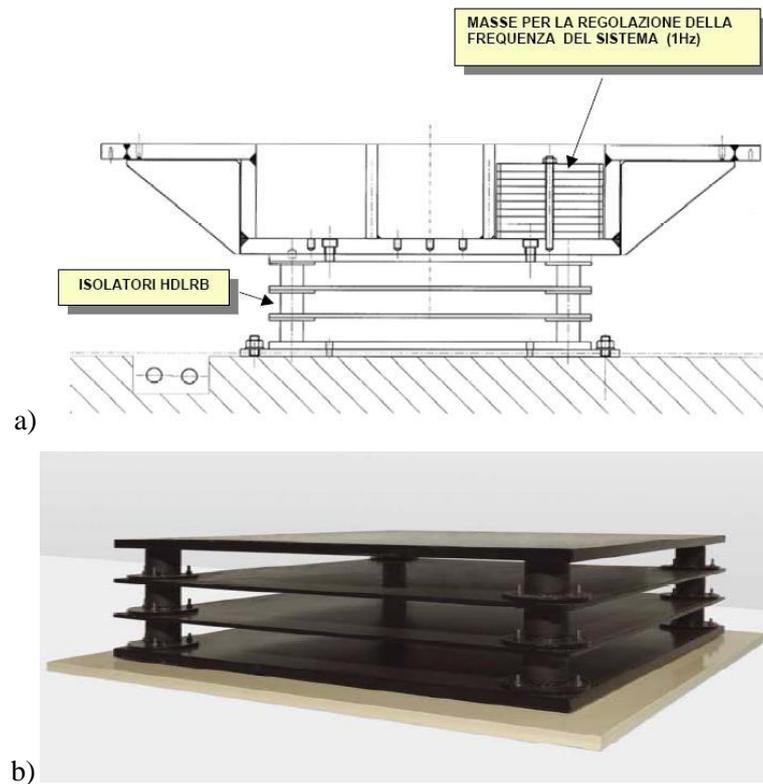


Figura 1.18. a) Vista in sezione del basamento antisismico; b) isolatori HDLRB assemblati.

### 1.3.4 Base antisismica: Cratere, Efebo e Venere

Negli ultimi anni sono stati effettuati dei prestiti internazionali in cambio di sofisticate tecnologie americane di ultima generazione per la salvaguardia dei

più importanti reperti archeologici. Il museo archeologico San Nicola di Agrigento, primo fra i musei italiani, grazie ad un progetto internazionale dell'archeologo Giuseppe Castellana, ha iniziato a dotarsi di costosi basamenti antisismici, in grado di assorbire anche le più forti scosse telluriche difendendo in questo modo l'integrità dei reperti che il più delle volte a causa dei terremoti subiscono, se non la completa rovina, importanti danneggiamenti.

I reperti archeologici ad essere stati dotati di questi basamenti antisismici sono stati: il cratere dei Niobidi o “grande cratere di Gela”, la statua in marmo del Giovinetto o Efebo di Agrigento e la Venere di Morgantina.



Figura 1.19. a) Cratere di Gela; b) Efebo; c) Venere di Morgantina.

Il primo reperto ad essere dotato di base antisismica è stato il grande Cratere di Gela. Il vaso, prodotto ad Atene tra il 475 e il 450 a. C. alto poco meno di un metro e decorato dal Pittore dei Niobidi con figure rosse rappresentanti una cruenta battaglia tra guerrieri greci e un gruppo di amazzoni, di ritorno da un'esposizione negli Usa al Getty Center, è arrivato al

museo di Agrigento accompagnato da una base antisismica del peso di oltre 700 chilogrammi.

Il secondo reperto ad essere dotato di base antisismica è stato l'Efebo di Selinunte, che si annovera tra i capolavori della statuaria greca in Sicilia. La scultura, datata al 480 a.C. circa e proveniente dal sito di Akragas, è stata dotata di una sofisticata base antisismica che, elegante nelle forme e appropriata nella cromia, senza alterare la concezione spaziale, garantisce stabilità alla statua proteggendola dal rischio sismico.



Figura 1.20. Efebo di Selinunte su base antisismica.

Infine il terzo reperto ad essere dotato di base antisismica è stato la Venere di Morgantina, datata alla fine del quinto secolo a.C. e scolpita probabilmente da un allievo del maestro greco Fidia. L'imponente statua, tranciata in tre parti, alta più di due metri, le cui parti del corpo visibili sono scolpite in pregiato marmo bianco e la cui veste finemente drappeggiata e mossa dal vento è di tufo calcareo, è stata dotata anch'essa di una base antisismica di forma circolare.



Figura 1.21. Venere di Morgantina su base antisismica.



## **CAPITOLO 2.**

### **LA MADONNA DELL'IMMACOLATA**

#### **2.1 La basilica di San Francesco d'Assisi**

In Piazza San Francesco d'Assisi a Palermo, sorge la Chiesa omonima la cui costruzione fu iniziata nel 1225 e terminata nel 1277 da parte dell'ordine francescano, che qui ha ancora un monastero. Si tratta di una Chiesa a tre navate, con arcate gotiche ed un tetto ligneo con capriate a vista. La chiesa ospita all'interno della Cappella dell'Immacolata, una statua che raffigura la Madonna dell'Immacolata. La proposta di onorare Maria Vergine con una festa a spese del Comune, nel suo giorno, nella chiesa di S. Francesco D'Assisi, fu fatta dal Pretore, dopo la peste che colpì Palermo nel 1624. Le proposte del Pretore furono accolte da tutto il Senato e dal popolo che si impegnò a celebrare la festa dell'Immacolata. L'impegno assunto dal Comune venne regolarmente mantenuto. L'Immacolata divenne inoltre Patrona della città di Palermo. Le grandiose feste celebrate in onore dell'Immacolata, come

Patrona della città, fino al 1630 attirarono l'attenzione dei fedeli verso l'antica chiesa di S. Francesco, anche perché il 15 luglio del 1625 il Senato elesse S. Francesco d'Assisi come Patrono secondario della città. Inoltre la basilica, già trasformata per i lavori del 1533-1549, per l'adozione della copertura a crociera, nel 1627 per opera del P. Guardiano P.M. Bonaventura Merenda subì una più profonda trasformazione. Infatti furono innalzati gli archi che separavano le navi dal santuario; l'organo fu trasferito dal terzo arco a sinistra entrando, al quarto; il coro fu trasferito dal santuario nell'abside ormai ridotta in un vano rettangolare (1583-1595) e fu iniziata la decorazione a stucchi toccati in oro di tutti i sottarchi e delle volte della chiesa. Contemporaneamente la basilica si arricchiva degli affreschi di Pietro Novelli (1627-1633) che fino al 1823 ornavano le volte dell'ampio ambiente basilicale.



Figura 2.1. Basilica di San Francesco d'Assisi (Palermo). a) veduta esterna; b) veduta interna.

## 2.2 Il simulacro dell'Immacolata

L'immagine, come si vede oggi, raffigura la Vergine, di altezza pari a 1,75 m, vestita da una tunica, che scende sul petto e riappare a larghe pieghe

spezzate ricadenti sui piedi fino a terra. Al di sopra della tunica un ampio manto avvolge tutta la persona, con le estremità ricadenti sul braccio destro.



Figura 2.2. a) Simulacro dell’Immacolata Concezione conservato nella chiesa di San Francesco d’Assisi in Palermo; b) il manto dell’Immacolata.

Questo manto è lavorato a cesello a grandi fiorami intrecciati e intercalati da foglie, fiori quadribolati, fiorellini sparsi ovunque, ed ha sofferto gravemente sia per l’età del manufatto, sia per le scosse, piuttosto violente, a cui è sottoposto durante le processioni. Nella parte superiore, all’altezza delle spalle, la decorazione originale è andata perduta e oggi è rimediata con rattoppi in argento di incerta datazione.

Ma è soprattutto il volto, che assieme alle mani e ai piedi è l’unica parte anatomica visibile, che attira l’attenzione di chi l’osserva. Libero dai preziosi

che l'adornano, il volto è di un astrattezza spirituale decisamente classica: gli occhi rivolti in basso, le labbra atteggiata ad un indefinibile sorriso materno, la fronte purissima avvolgono lo spettatore in un dialogo senza fine. I capelli spartiti a corona ricadente sulle spalle e sul collo, ne accrescono la bellezza formale, semplice e purissima, veramente "Immacolata", capace di fare intuire la bellezza interiore.

La corona imperiale di cui la statua è dotata, fu eseguita nel 1646-47. Probabilmente le volute superiori, dalle linee continuamente spezzate, potrebbero essere un inserto del sec. XVIII. Nel 1931 vi fu aggiunto un cerchio di base, ornato con grosse gemme. Nel 1954 l'antico stellario d'argento fu sostituito con uno d'oro con rubini sintetici, eseguito dall'orafo Antonio Siddiolo.



Figura 2.3. a) volto del simulacro dell'Immacolata; b) la corona dell'Immacolata.

Immensa è la distanza tra l'autore di questo volto e gli argentieri che hanno eseguito la base della statua. Questa in tutte le decorazioni, che si ripetono negli otto lati, non ricorda nemmeno quella purezza di linee, quel gioco di luce dolcissima che crea l'incanto del volto. Il disegno di queste decorazioni è trito, affastellato, lontanissimo da quella classicità presente nel volto.

Qualche affinità stilistica e formale farebbe supporre l'ipotesi che autori dell'opera possano essere gli argentieri che nel 1631 eseguirono la cassa – reliquiario di S. Rosalia.

Il gruppo era composto dai maestri Giuseppe Oliveri, Francesco Rivelo, Giancola Viviano e Matteo Lo Castro. A prescindere dalla testa che deriva direttamente dalla vecchia statua dell'Immacolata, già esistente e venerata nella basilica di S. Francesco, per le altre parti, cioè per la veste, il manto, il serpente e la base quadrata, l'autore potrebbe essere qualcuno dei detti argentieri.

Iconograficamente, l'autore della statua non si perde in descrittivismi affollati e dispersivi. L'unico elemento iconografico che allude all'Immacolata Concezione è la presenza del serpente, che si attorciglia alla base e sul quale la Vergine posa il piede con forza, schiacciandone la testa e costringendolo a stare a bocca aperta. E' la traduzione plastica del testo della Genesi.



Figura 2.4. Serpente alla base del simulacro dell'Immacolata.

Originariamente la statua poggiava direttamente sopra una base quadrata dagli angoli smussati, quasi un ottagono a lati disuguali. Oggi, tra questa antica base e la statua, dal 1844 è stato frapposto un globo, attraversato in senso zodiacale da una fascia, che porta scolpiti a rilievo e a cesello i segni delle dodici costellazioni, dovuto all'argentiere Giacomo D'Angelo.

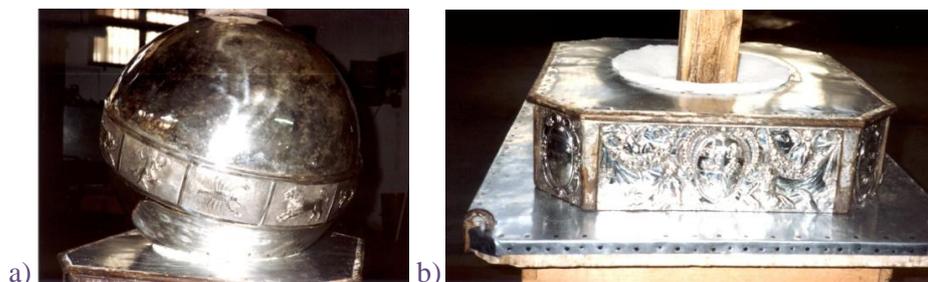


Figura 2.5. a) Globo interposto tra la base e il simulacro dell'Immacolata; b) base su cui poggia il simulacro dell'Immacolata.

L'antica base ha nei lati minori alcuni simboli dell'Immacolata. Entro ovali arricchiti da cornici mistilinee a sbalzo emergono quattro simboli: il sole raggianti con la scritta "*Sole clarior*", un falchetto di luna inscritto sopra il sole raggianti, con la scritta "*Luna pulchrior*", una torre massiccia con ampia porta, sormontata da tre torrette, con la scritta "*Coelesti munita presidio*", il sole nascente sul mare tranquillo, con la scritta "*In ortu foelix*".



Figura 2.6. I simboli raffigurati lungo i lati minori della base.

Nei quattro lati lunghi della base si hanno: nella parte anteriore, un’apparizione dell’Immacolata davanti a Imperatori, Re, ecc., con la scritta “*Per me Principes imperant*”; nella parte posteriore, vi è inciso uno stemma ovale inquartato, circondato da festoni, cavalcato da un putto e due geni sdraiati di spalle contro l’ovulo, senza iscrizione; nel lato destro di chi guarda, entro un clipeo panciuto e oblungo coi bordi arrotondati, vi è riprodotta la pianta di Venezia, da cui proveniva il De Leonardi, con la scritta: “*Omnia bona pariter cum illa*”; sul lato sinistro, entro il solito clipeo, vi è riprodotta la pianta di Palermo e sono ben visibili all’estremità superiore il Palazzo reale, la Cattedrale, la croce segnata dal Cassaro e dalla via Maqueda, Porta Felice, le mura esterne con i bastioni relativi, ecc., con la scritta: “*Tua sub umbra Panormus foelix*”.



Figura 2.7. I quattro lati lunghi della base.

L’attuale fercolo è del 1843. Il mobile ha una pianta quadrangolare con gli angoli smussati. Le cornici, i grandi candelabri rilevati che affiancano i quattro simboli mariani, la teoria dei grossi ovuli sotto la perfetta cornice, che gira per tutto il quadrato, i festoni legati mollemente con un cerchio, che impreziosiscono il quadrato superiore, legato a sua volta con quattro volute

all'inferiore, sono un prodotto tipico di stile impero, che diffondono un senso di grazia classica rigorosa.

Nel 1845 il pittore Giuseppe Carta veniva chiamato a completare l'opera con gli inappuntabili quattro simboli mariani disegnati col bulino al monocromo. Probabilmente dietro suggerimento dei Religiosi, il pittore volle rappresentare quattro scene bibliche:

- 1) Dio che parla con Mosè dal roveto ardente del Sinai;
- 2) l'arca di Noè, l'Arcobaleno e l'Arca dell'Alleanza;
- 3) la torre di David, presidiata da un soldato;
- 4) una fontana in cui si bagna le mani un Sacerdote e un grande specchio con due lucerne e due uomini che guardano.

Sono, come è evidente simboli mariani: il roveto che arde e non si consuma, la torre di David, le due arche dell'alleanza, la fonte d'acqua e lo specchio senza macchia, richiamano alla mente la incorruttibilità di Maria, la sua forza, il suo ufficio di Madre del Salvatore, la sua funzione di Madre della grazia e la sua funzione di esempio, sul quale tutti possono specchiarsi.



Figura 2.8. Il fercolo.

I due angeli che sorreggono un reliquiario posto davanti al globo, corposi e animati da una vitalità serpottiana, furono eseguiti nel 1758 dall’argentiere Vincenzo Barrile.

Come è noto l’immagine tanto venerata e amata durante i secoli di vita ha ricevuto diversi doni, come segno di gratitudine verso la Vergine Immacolata per tutte le grazie ottenute. Vengono ricordati tra gli altri: l’anello di brillanti regalato da D. Isabella Ferreri, Marchesa dell’Anguilla; lo Stellario d’argento donato dal Sig. D. Vincenzo Morana; una ghirlanda d’argento a foglie, con stemma della famiglia Porcari, donata nel 1884 dalla Baronessa Porcari. Alla stessa Baronessa e a suo marito si deve anche il tabernacolo in argento che viene usato durante la novena dell’Immacolata. Altri doni, innumerevoli, sono stati ricordati, altri sono anonimi, ma tutti sono un segno tangibile di gratitudine.

### 2.2.1 Riferimenti storici

Mani e i piedi dell’attuale statua di argento provengono da una più antica statua; la testa di questa venne fusa, perché non era proporzionata all’altezza dell’attuale, e col materiale risultante venne eseguita l’attuale.



Figura 2.9. Mani e piedi del simulacro dell’Immacolata.

Nell'osservare la vecchia statua, che aveva in argento solo la testa, i piedi e le mani, probabilmente la ricca famiglia di Giovanni Battista De Leonardi concepì il desiderio e il voto di fare eseguire una statua dell'Immacolata tutta in argento.

Presi gli accordi necessari sia con il Convento di S. Francesco, che doveva fornirgli le parti in argento dell'antica statua, e col P. Francesco Scichili, suo cognato, che doveva fornire la maggior parte del capitale necessario, il Sig. De Leonardi il 26 ottobre del 1646 da argentieri sconosciuti fece iniziare i lavori per l'esecuzione della statua.

L'esecuzione durò circa un anno. L'8 dicembre del 1647 fu condotta in processione. Il 30 successivo, Giovanni Battista De Leonardi dona al Convento di S. Francesco la statua dell'Immacolata in argento, con corona imperiale, con una gemma in fronte della corona imperiale, con suo piedistallo d'argento e sgabello, o "vara" (fercolo) di legno indorata e intagliata.

Quando la chiesa fu concessa dal Demanio al Comune, questi assunse anche la tutela di tutti gli oggetti d'arte e di culto ivi conservati.

La statua di argento dell'Immacolata in forza di tale atto ricadeva sotto la tutela del Comune.

Dal 1874 in poi, ormai il Comune, non solo per il voto del 1624, ma anche per forza del nuovo stato giuridico, è presente ogni volta che il simulacro deve essere esposto al pubblico.

Così avviene ogni anno e in tutte le occasioni straordinarie nelle quali si ritiene opportuno esporla alla venerazione dei fedeli.

### **2.2.2 Deterioramenti e restauri**

Durante la sua vita ormai secolare la statua ha subito diversi deterioramenti e restauri relativi. Nel 1696, per le innumerevoli candele che venivano accese,

la statua era mal ridotta. L’ossido di carbonio aveva offuscato la limpidezza delle linee dell’immagine e si pensò bene di ripulirla interamente.

Le sorti e le vicende della statua dell’Immacolata logicamente seguono quelle della Basilica. Così è avvenuto per il terremoto del 5 marzo 1823, quando sia il fercolo, come la statua direttamente, sembra abbiano subito dei danni. Sta di fatto che i religiosi dopo aver con immensi sacrifici restaurato e trasformato la basilica duecentesca in edificio neoclassico, nel 1843 pensarono di restaurare anche ciò che ormai da due secoli costituiva il centro di interesse religioso di tutta Palermo: la statua dell’Immacolata.

Il 18 dicembre del 1843 il maestro falegname Onofrio Ventimiglia realizza il nuovo fercolo progettato dall’architetto Don Gaetano Ragonesi.

Contemporaneamente, avendo constatato che la statua era mal ridotta per l’usura del tempo e per le lesioni operate dalle violente scosse subite durante le processioni, causate dalla mancata sincronizzazione dei movimenti, i Religiosi pensarono di affidare il lavoro di restauro e di consolidamento al maestro argentiere Giacomo D’Angelo. A tal fine il 20 gennaio 1844, dopo averla smontata, pezzo per pezzo, fecero la consegna di tutto l’argento.

Il D’Angelo oltre al restauro facilmente individuabile degli strappi riscontrati all’altezza delle spalle e vari altri espedienti per rinforzarne la stabilità (adozione di regette), eseguì gli otto vasi porta-candele di ispirazione neoclassica, e il globo attraversato dalla fascia zodiacale con i simboli delle costellazioni. L’opera del D’Angelo ebbe un suo valore. Il globo posto sotto i piedi della statua, ne alzò il punto di vista e diede più slancio a tutto il complesso, mentre i vasi porta-candela si allineavano con la decorazione stile impero del fercolo.

I rinforzi adottati rimediarono solo per poco agli inconvenienti e purtroppo non impedirono un accartocciamento ai fianchi della veste e dopo un secolo anche la necessità di operare un nuovo restauro.

Ma i secoli di vita (1647-2011), le vibrazioni e le conseguenti sollecitazioni alle giunture, produssero nella statua effetti che si annunziavano gravi per la sua durata e per la sua stabilità. Di anno in anno si osservavano certe fenditure nell'argento che davano estrema preoccupazione. La testa in particolare per la pesantezza della corona, si era schiacciata in alcuni punti e recava segni pericolosi di cedimento. Ugualmente la veste e il manto, che costituiscono l'elemento portante di tutta la statua, in alcune parti recavano i segni di ripiegamento e di accartocciamento della lamina d'argento su se stessa, mentre i rattoppi, opera di restauri precedenti, non davano affidamento.

Data la situazione della statua, che di anno in anno manifestava un degrado evidente, coraggiosamente si pensò ad un restauro che ne sanasse le ferite e la rinsaldasse nelle sue strutture.

L'organizzazione di una grande sfilata delle insegne delle Confraternite delle Diocesi di Italia, tenuta a Palermo nei giorni 15-16 maggio 1993, fu l'occasione propizia per eseguire tale restauro globale in modo razionale.

Il restauro fu affidato alla Ditta "Industria argentera Di Cristofalo SpA77Pa", diretta dal Com. Salvatore Di Cristofalo, e dei cesellatori Giuseppe Scafidi ed Emilio Marchesini. I lavori iniziarono il 5 aprile del 1993, quando si precedette allo smontaggio della statua e al suo trasporto in officina. L'indomani, 6 aprile, si mise mano alla pulitura di tutte le parti che la componevano e alla saldatura delle lesioni e al rafforzamento delle parti di sostegno.

Una particolare attenzione è stata rivolta alla testa, ottenuta per fusione. L'età rispettabile raggiunta e il conseguente indurimento dell'argento e la

cristallizzazione delle molecole, indussero il progettista del restauro a sottoporla ad un intenso riscaldamento per ottenere “la rigenerazione molecolare della tensione del metallo”. A tale scopo fu posta entro un forno elettrico e sottoposta ad una temperatura di 680° c. e quindi lasciata raffreddare entro lo stesso forno.

Il risultato è stato ottimo. Il volto della Vergine tornò a risplendere come nuovo nel suo fascino primitivo, quasi ringiovanito.

I lavori, tutti a carico della ditta, si conclusero il 12 maggio successivo e il 13 si procedette al montaggio definitivo, eseguito dentro la basilica di S. Francesco.

Profittando dell’occasione si procedette anche al restauro del fero, ridotto in cattive condizioni dalle colature di cera e dal degrado conseguente all’uso e all’età.

I lavori per iniziativa del Superiore Raffaele Fazzina furono a carico della Congregazione del “Porto e Riporto” e furono eseguiti dal restauratore Gaetano Correnti. Il restauro interessò le cornici, le decorazioni, le pitture e anche l’ossatura del fero. L’operazione ridiede gioventù e nuova bellezza alla statua e al fero.

### **2.3 Il rito e la tradizione**

La devozione all’Immacolata a Palermo si condensò nella venerazione della statua dell’Immacolata, che nel pensiero della Chiesa doveva evocare e la persona e la grazia concessa alla Vergine Madre di Dio. L’esistenza di una statua dell’Immacolata nella basilica di S. Francesco è documentata dal notaio Baldassarre Zamparrone, che descrisse la processione compiuta l’8 dicembre del 1624. La processione era aperta da 200 confrati della Compagnia

dell'Immacolata, dai Canonici della Cattedrale, dalla nobiltà, tutti con candele accese.

Si ricordano tra le occasioni straordinarie nelle quali la statua fu esposta alla venerazione dei fedeli, quella del 1931, quando a conclusione del "Congresso Mariano", tenuto nella basilica di S. Francesco dal 28 al 31 maggio, in occasione del XV centenario del Concilio di Efeso, la statua dell'Immacolata, dopo essere stata esposta per tutto il mese, il 31 maggio 1931 venne incoronata, per decreto del Capitolo Vaticano.

In questa occasione non venne confezionata una nuova corona, ma all'antica si aggiunse un cerchio di base, ornato con grosse gemme.

Il 17 ottobre del 1954, al ritorno della statua nella basilica, dopo essere stata trasferita in un rifugio nel Palazzo Reale della città a causa della guerra, attorno al simulacro argenteo dell'Immacolata si riunirono tutte le Autorità religiose, civili e militari dell'isola.

Preceduto da un discorso radiotrasmesso del Sommo Pontefice Pio XII, che ricordò le glorie mariane dell'isola, i suoi santuari e l'antica fede, a conclusione e a ricordo la statua venne arricchita di un nuovo stellario in oro con rubini sintetici, opera dell'argentiere Antonio Siddiolo, che fu posto sul capo della Vergine.

La statua dell'Immacolata è condotta in processione tutti gli anni da una Congregazione, "la Congregazione del Porto e Riporto". Tale Congregazione ha origini risalenti al XVIII secolo, quando, dopo la donazione della statua alla basilica, si impose la necessità per poterla condurre in processione, che ci fossero delle persone adatte che si assumessero l'onere di trasportarla sulle loro spalle. Già nell'atto di donazione della statua, il De Leonardi aveva previsto tale necessità e aveva donato dieci divise di panno che dovevano indossare i portatori del fercolo.

A Palermo il gruppo di uomini che ogni anno portavano il fercolo nella processione erano chiamati “*bastasi della vara di Maria Immacolata*” e più tardi in una forma più italiana: “*schiaivi della bara dell’Immacolata*”; attualmente: “*Confrati del Porto e Riporto*”.

La *Confraternita* utilizza per il trasporto del fercolo squadre di 36 persone che, mediante una collaudata tecnica, riescono a sollevare il fercolo sulle spalle evitandone lo squilibrio.



Figura 2.10. Il trasporto della statua dell’Immacolata durante la processione.



## **CAPITOLO 3.**

### **INDAGINE SPERIMENTALE**

#### **3.1 Introduzione**

Nel corso degli anni si è constatato un mediocre stato di conservazione della statua a causa delle violente scosse subite durante le processioni, che con forti vibrazioni asincrone ne hanno compromesso l'integrità nel tempo.

Ne è conseguita l'esigenza di uno studio per indagare sull'entità delle vibrazioni indotte sul simulacro dalle scosse durante il trasporto in processione e quelle dovute alla non perfetta sincronizzazione nell'innalzamento ed abbassamento del fercolo. Tale studio, svolto da: Prof. M. Di Paola, il Prof. A. Pirrotta, il Dott. Ing G. Navarra e il Dott. Ing. F. Lo Iacono, afferenti al Dipartimento di Ingegneria strutturale aerospaziale e geotecnica dell'Università di Palermo, nell'ambito della conservazione del simulacro stesso, ha avuto come scopo quello di guidare il progetto di eventuali dispositivi di controllo delle vibrazioni che consentiranno ai cittadini

palermitani di potere continuare ad esprimere la loro devozione con i propri rituali nella serenità di non indurre azioni compromettenti l'integrità del simulacro.

A tal fine è importante sottolineare che, mentre la “musealizzazione” di un'opera d'arte, ovvero la protezione all'interno di un museo di un'opera d'arte dai rischi ambientali, è un problema ormai abbastanza noto, meno usuale è il problema della prevenzione dei danni indotti, in questo caso dalle vibrazioni, durante la fruizione dell'opera d'arte stessa.

Stabilire una metodologia per preservare le statue mitigando le suddette vibrazioni indotte, ha, inoltre, una valenza anche internazionale, basti pensare al numero delle processioni che esistono in tutto il mondo come in Italia, Spagna, Grecia, Sud America.

Lo scopo di tale lavoro è stato pertanto lo studio e la misura delle vibrazioni che realmente si trasmettono alla statua quando viene trasportata per le vie della città e durante le fasi di sollevamento e deposito del simulacro stesso.

### **3.2 Indagini per la misura delle vibrazioni sul simulacro**

Al fine di conoscere l'entità delle vibrazioni indotte durante il trasporto, nel pieno rispetto della conservazione del manufatto artistico oggetto delle prove, sono stati utilizzati metodi non invasivi di registrazione delle vibrazioni.

In generale una registrazione di vibrazioni si effettua attraverso strumenti di analisi dinamica sperimentale. Innanzi tutto occorre una fonte di eccitazione, artificiale o naturale, per mettere in vibrazione il sistema da analizzare. Nel primo caso possono utilizzarsi apposite macchine come gli

*shakers* in caso di prove di vibrazioni forzate, ovvero martelli strumentati con celle di carico per prove di tipo impulsivo. Nel caso delle fonti di eccitazione naturale possono citarsi, ad esempio, il vento o il traffico veicolare che inducono delle vibrazioni misurabili su strutture alte o flessibili. Una volta sollecitato il sistema, le vibrazioni indotte vengono registrate mediante l'uso di opportuni sensori idonei a misurare delle grandezze caratteristiche del moto come ad esempio accelerazioni, spostamenti o deformazioni. Nella grande maggioranza dei casi si preferisce misurare accelerazioni utilizzando appositi sensori detti accelerometri. Esistono diversi tipi di accelerometri che possono essere scelti in funzione della specifica applicazione. Essi differiscono sia per il principio di funzionamento (induttivi, piezoresistivi, capacitivi, piezoelettrici, laser, etc.), che per la loro sensibilità. Registrato un segnale di accelerazione mediante l'uso di un sensore, tale segnale viene trasformato da analogico in digitale attraverso opportune schede di conversione. Il segnale digitalizzato può essere memorizzato ed elaborato all'interno di un Personal Computer.

In particolare, la campagna di indagine per la misurazione delle vibrazioni sul simulacro argenteo dell'Immacolata è stata condotta in due fasi distinte.

In una prima fase, attraverso strumenti per prove in situ, sono state registrate le accelerazioni durante tutta la processione per le vie cittadine svolta in concomitanza con la festività dell'Immacolata Concezione, lo scorso 8 dicembre 2009. A causa delle limitazioni di spazio e di approvvigionamento di energia elettrica incontrate, si è fatto uso delle seguente strumentazioni:

- Accelerometri piezoelettrici Bruel & Kjaer – Type 4382;
- Accelerometri piezoelettrici Bruel & Kjaer – Type 4507-002;
- Amplificatore Nexus Range Of Conditioning Amplifier – Type 2692A014 Bruel & Kjaer;

- Amplificatore Nexus Range Of Conditioning Amplifier – Type 2693A014 Bruel & Kjaer;
- Scheda di acquisizione NI-PCI-4472;
- Personal computer;
- Ambiente di lavoro Labview.

Una seconda fase dell'indagine è stata svolta nei giorni successivi all'interno della chiesa di San Francesco effettuando delle apposite simulazioni di movimentazione del simulacro. Non sussistendo più le limitazioni incontrate durante la prima fase, si è fatto uso di una strumentazione più precisa:

- Accelerometri piezoelettrici Bruel & Kjaer – Type 4507-002;
- Accelerometri piezoelettrici PCB 393B04;
- Amplificatore Nexus Range Of Conditioning Amplifier – Type 2693A014 Bruel & Kjaer;
- Amplificatore PCB Piezotronics;
- Scheda di acquisizione NI-PCI-4472;
- Personal computer;
- Ambiente di lavoro Labview.

### **3.2.1 La prima fase di indagine: registrazione delle vibrazioni durante la processione**

Nel caso specifico dell'analisi delle vibrazioni del simulacro argenteo dell'Immacolata, la forzante considerata è quella indotta dal trasporto in processione dello stesso simulacro.

Il giorno dell'Immacolata il fercolo con il simulacro viene portato in processione dai fedeli lungo le vie del Centro Storico di Palermo, fino a giungere alla Cattedrale, passando per Piazza San Domenico, e poi di nuovo indietro fino alla Chiesa di San Francesco. Il simulacro viene portato a spalla

dai componenti della “*Venerabile Confraternita del Porto e Riporto*” per piccoli tratti di circa 30 metri utilizzando delle pertiche di legno che vengono fissate al fercolo ad un’estremità e issate sulle spalle dei portatori stessi, come mostrato nelle immagini riportate nella Figura 3.1.



Figura 3.1. Trasporto del simulacro.

Ogni tratto è, quindi, caratterizzato da una fase iniziale in cui il simulacro unitamente al fercolo viene alzato e poggiato sulle spalle dei portatori,

successivamente, durante la seconda fase del tratto, il simulacro con il fercolo viene fatto avanzare e, nella terza fase, viene posato al suolo.

Durante la prima fase della campagna sperimentale il fercolo su cui è posto il simulacro e il simulacro stesso sono stati strumentati con sei accelerometri, posti in modo da formare due terne di cui una posta sul fercolo in corrispondenza della base della statua e l'altra sulla testa della statua, così come mostrato nella Figura 3.2.

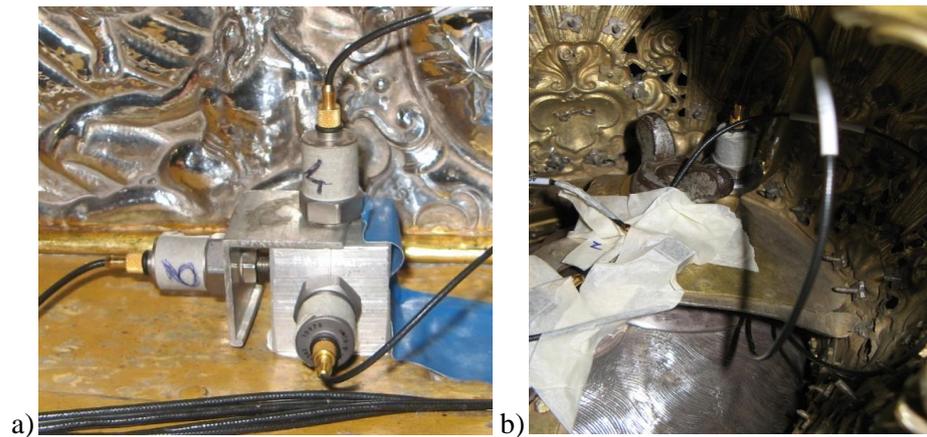


Figura 3.2. Posizionamento degli accelerometri. a) Terna di acquisizione sul fercolo; b) terna di acquisizione sulla testa.

Per ogni terna si sono misurate le accelerazioni nella direzione del moto del fercolo, nella direzione trasversale e in quella verticale. Inoltre, all'interno del fercolo è stato organizzato un piccolo laboratorio di dinamica sperimentale con attrezzature per prove "in situ" con una scheda di acquisizione di tutti i segnali provenienti dai sensori ed un computer portatile per memorizzare questi segnali. La strumentazione utilizzata all'interno del fercolo è mostrata in Figura 3.3.

La difficoltà maggiore riscontrata durante questa prima fase di indagine è stata quella di dovere contenere la strumentazione all'interno di un vano posto nel fercolo al di sotto della statua e, soprattutto, quella di fare a meno di una sorgente di energia elettrica cui connettere la strumentazione. Queste limitazioni sono state superate facendo ricorso ad una strumentazione “portatile” alimentata da una batteria a 12V da 100Ah collegata ad un *inverter* in grado di fornire corrente alternata fino a 600W alla tensione di 220V.

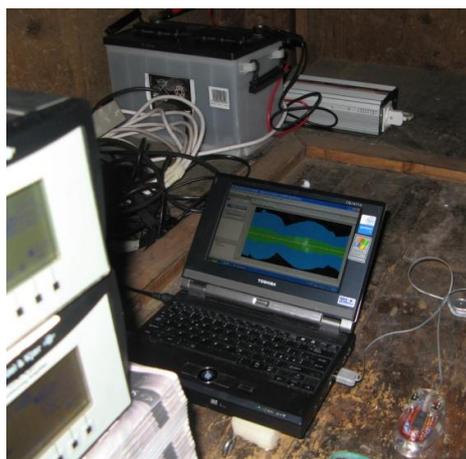


Figura 3.3. Strumentazione di acquisizione dei dati, utilizzata all'interno del fercolo.

La strumentazione di acquisizione è costituita da due amplificatori e condizionatori di segnale cui vengono collegati i cavi provenienti dai sensori. Gli amplificatori sono collegati ad una scheda di acquisizione connessa ad un PC portatile in cui vengono memorizzati i dati in forma digitale. Lo schema della catena di misura predisposta è mostrato nella Figura 3.4.

Durante la processione dello scorso 8 Dicembre 2009, oltre ad una videoregistrazione, sono state, quindi, acquisite tre ore di storie temporali di accelerazione.

Dalle analisi di queste registrazioni e dalla visione delle videoriprese, si è potuto osservare che durante la fase, dell'avanzamento, il simulacro non è soggetto a significative accelerazioni, mentre durante la fase di sollevamento e di abbassamento si registrano i picchi più elevati delle accelerazioni, soprattutto quando la sincronizzazione, nell'innalzamento ed abbassamento del fercolo, era carente.

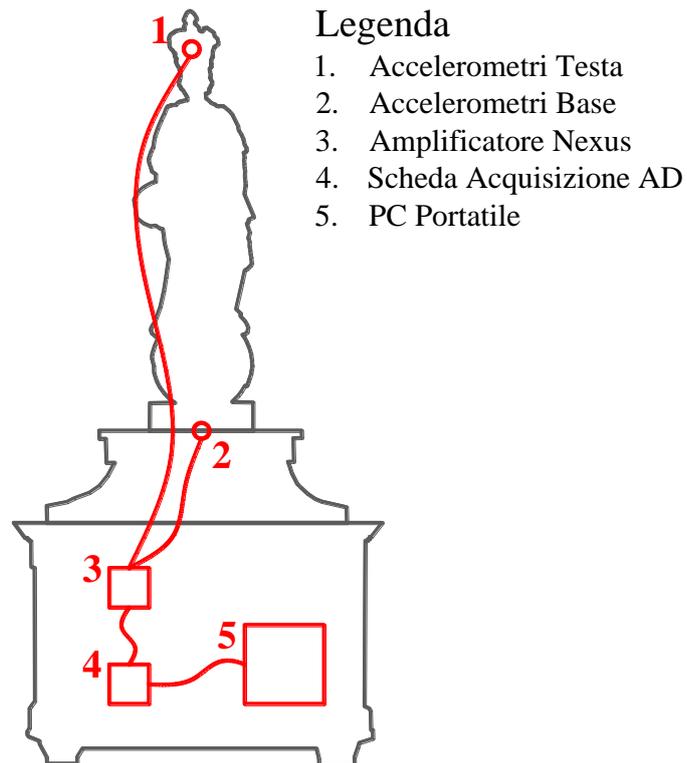


Figura 3.4. Catena di acquisizione utilizzata durante la processione.

Questa è stata la ragione per cui si è ritenuto opportuno eseguire all'interno della Chiesa delle prove *ad hoc*, per registrare le accelerazioni indotte dal sollevamento e dall'abbassamento della statua.

### **3.2.2 La seconda fase di indagine: le prove ad hoc**

In virtù del fatto che le vibrazioni significative della statua accadevano in corrispondenza delle operazioni di sollevamento e di abbassamento del simulacro si è deciso di condurre delle prove *ad hoc* all'interno della chiesa di San Francesco, che per l'occasione è stata trasformata in una sorta di Laboratorio di Dinamica Sperimentale.

Durante questa seconda fase, infatti, non sussistendo più le limitazioni di spazio e di approvvigionamento di energia elettrica precedentemente descritte, si è potuto utilizzare una strumentazione più precisa e fare ricorso ad un numero maggiore di sensori.

Nello specifico si è deciso di strumentare la statua ed il fercolo utilizzando due tipi di accelerometri: degli accelerometri sismici *PCB 393B04* dotati di un'elevata precisione e di massa maggiore ma che necessitano di una superficie piana per essere installati, e degli accelerometri miniaturizzati *Bruel & Kjaer 4507-B-002* che hanno il pregio di avere dimensioni e pesi molto contenuti oltre ad una maggiore facilità di installazione.

Sono stati collocati in tutto 11 sensori per registrare accelerazioni, di cui: 6 per registrare l'accelerazione in direzione verticale (z), 2 lungo la direzione di movimento (x) e 3 perpendicolari a quest'ultima (y).

Tali sensori, così come si evince dalla Figura 3.5 e dalla Figura 3.6, sono posti su tre livelli: estradosso del fercolo, base della statua, testa della statua. Al livello dell'estradosso del fercolo (Figura 3.5-b) vengono posizionati cinque sensori di cui quattro in direzione verticale (sensori 4z, 6z, 7z e 8z) in corrispondenza degli spigoli del fercolo e uno in direzione trasversale al moto

(sensore 5y). Alla base della statua (Figura 3.5-c) sono, invece, disposti tre accelerometri disposti in direzione verticale (2z), in direzione del moto (1x) e in direzione trasversale al moto stesso (3y).

Gli accelerometri posti sul fercolo ed alla base della statua sono del tipo *PCB 393B04*. Alla testa della statua (Figura 3.5-d) è stata posta un'altra terna di sensori nelle stesse direzioni di quelli disposti alla base (sensori 9z, 10x e 11y), ma del tipo B&K 4507-B-002. In virtù delle ridotte dimensioni di questi ultimi, è stato possibile collocarli direttamente sulla testa della statua, all'interno dello spazio delimitato dalla corona.

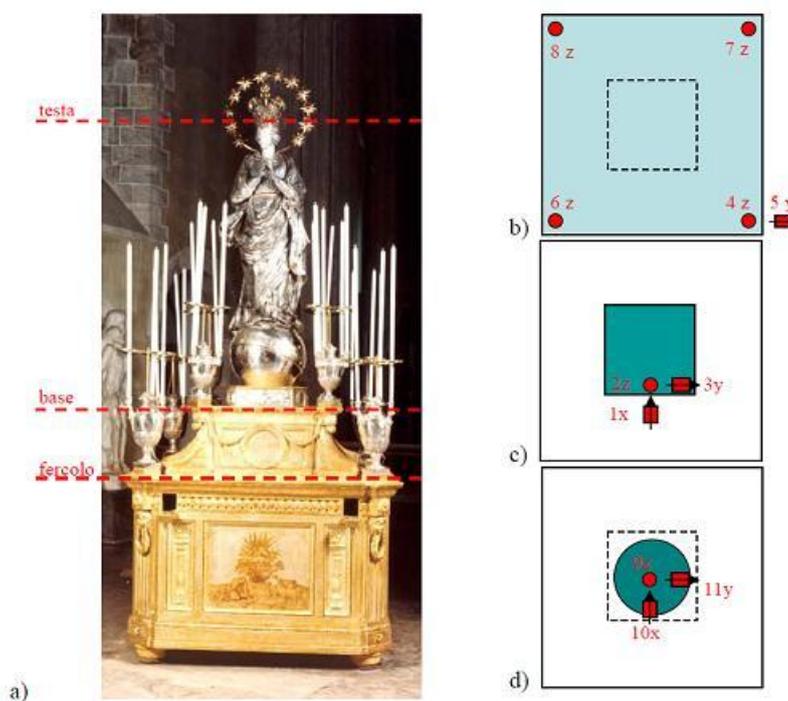


Figura 3.5. Collocazione dei sensori; a) definizione dei livelli di posizionamento dei sensori; b) sensori al livello del fercolo; c) sensori al livello della base; d) sensori al livello della testa.

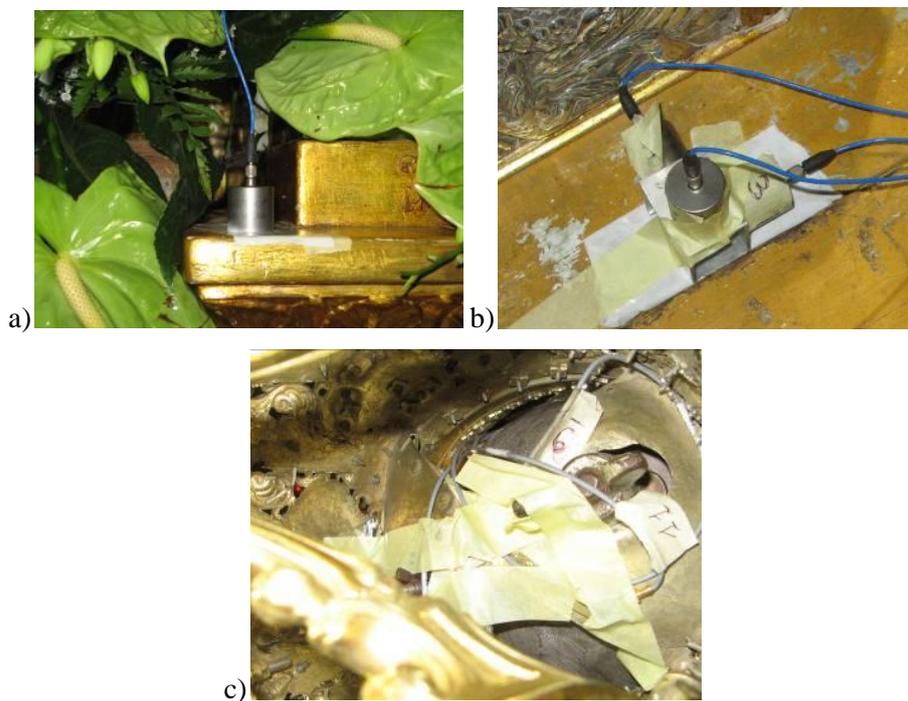


Figura 3.6. a) Sensore posto sul fercolo; b) terna di sensori sismici sulla base; c) terna di sensori miniaturizzati sulla testa.

Per registrare le accelerazioni indotte dal sollevamento e dall'abbassamento della statua, sono state effettuate otto prove durante le quali i confratelli hanno sollevato la statua con il fercolo, trasportandola per brevi tragitti della lunghezza di 15 metri circa all'interno del transetto della chiesa, ed infine abbassato fercolo e statua poggiandolo sul pavimento. Per ogni prova sono state effettuate delle registrazioni video e delle acquisizioni dei dati attraverso dei sensori accelerometrici. Dal raffronto delle due fonti di informazioni è stato possibile trarre delle utili informazioni che vengono riportate nel paragrafo seguente.

### 3.3 Analisi risultati ottenuti

Vengono riportati i risultati ottenuti dall'elaborazione delle storie di accelerazione registrate dai sensori durante le prove ad hoc sia nel dominio del tempo che nel dominio delle frequenze.

#### 3.3.1 Analisi delle accelerazioni verticali

In Figura 3.7 vengono riportate le accelerazioni verticali, quindi in direzione z, misurate dai sensori posti sul fercolo (4z), sulla base (2z) e sulla testa della statua (9z) durante una delle fasi di sollevamento del fercolo.

L'analisi di questi segnali mostra che le accelerazioni in direzione z a livelli diversi sono pressoché identiche. Ciò comporta che i gradi di libertà dinamicamente significativi, oltre ai sei gradi di libertà di corpo rigido posseduti dal fercolo, sono da individuare negli spostamenti orizzontali (direzione x,y) della testa del simulacro.

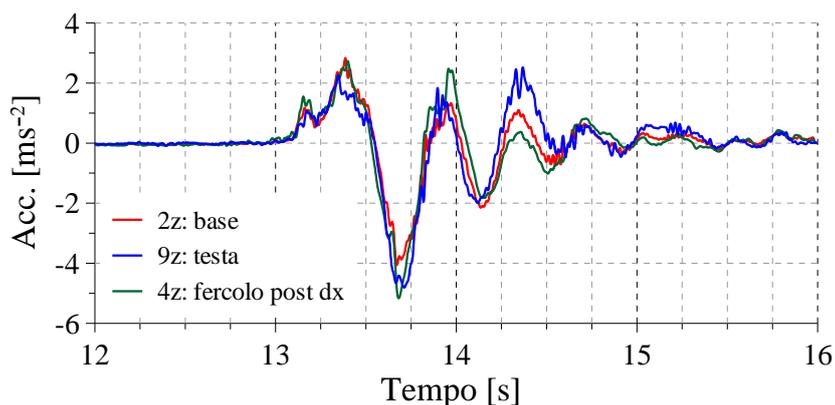


Figura 3.7. Storia temporale delle accelerazioni verticali (z) durante la fase di sollevamento.

### 3.3.2 Analisi delle accelerazioni alla base della statua

Nella Figura 3.8 vengono, invece, riportate le storie temporali di accelerazione registrate alla base della statua in direzione del moto (1x in rosso) e nella direzione trasversale (3y in verde) durante le fasi di sollevamento e di abbassamento del fercolo. Durante la fase di sollevamento (vedi Figura 3.8-a) sono state riscontrate accelerazioni di entità piuttosto moderata e confrontabili tra loro, nonostante le accelerazioni in direzione trasversale fossero maggiori di quelle longitudinali.

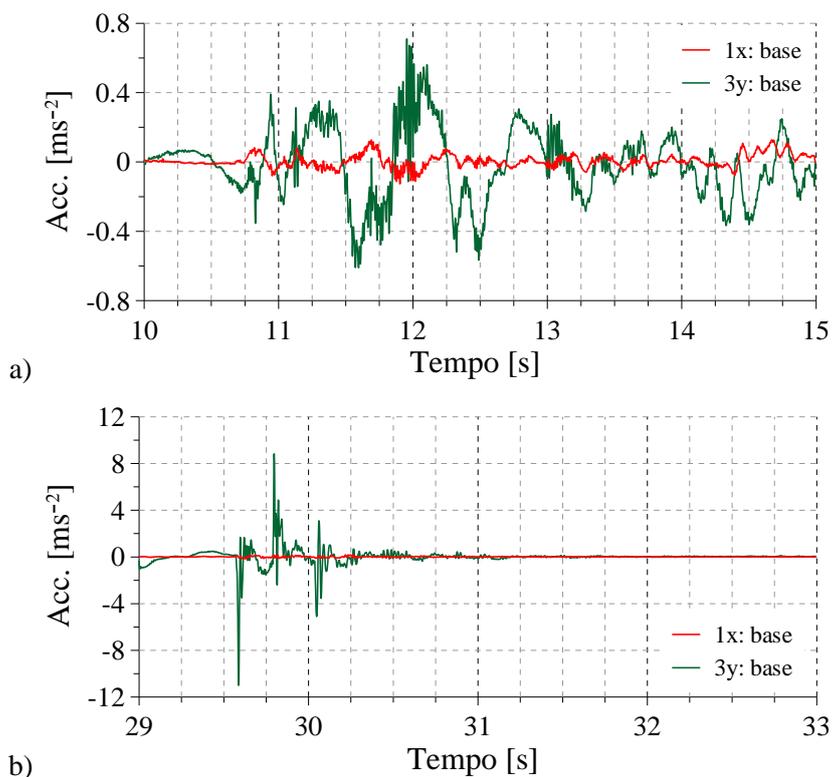


Figura 3.8. Storie temporali delle accelerazioni alla base della statua in direzione longitudinale (x) e trasversale (y). a) fase di sollevamento; b) fase di abbassamento.

Viceversa, durante la fase di abbassamento (Figura 3.8-a) vi è una sostanziale differenza tra le accelerazioni registrate in direzione longitudinale al moto e quelle trasversali. Queste ultime risentono notevolmente dei picchi trasmessi dal contatto dei piedi del fercolo con il suolo e risultano essere notevolmente amplificate rispetto a quelle longitudinali.

Questa macroscopica differenza è ascrivibile ad una diversa condizione di vincolo in direzione trasversale rispetto a quella longitudinale, verificata attraverso delle indagini endoscopiche effettuate in situ. In particolare il vincolo in direzione trasversale (y) sarebbe meno efficace di quello longitudinale (x).

### **3.3.3 Analisi delle accelerazioni alla testa della statua**

Nella Figura 3.9 vengono riportate le storie temporali di accelerazione registrate alla testa della statua in corrispondenza di una delle fasi di abbassamento del simulacro in entrambe le direzioni longitudinale (10x) e trasversale (11y).

Un esame dei risultati delle registrazioni evidenzia che i livelli di accelerazione sono piuttosto elevati dal momento che i valori di picco registrati sono stati circa il doppio dell'accelerazione di gravità.

Inoltre, le accelerazioni registrate dal sensore posto in direzione trasversale (11y) mostrano che il moto della testa della statua in tale direzione è caratterizzato da un'armonica a bassa frequenza ad ampiezza decrescente in modo pressoché logaritmico su cui si modulano componenti a frequenze maggiori. Questo è il comportamento tipico di un oscillatore elementare soggetto ad una forzante di natura impulsiva.

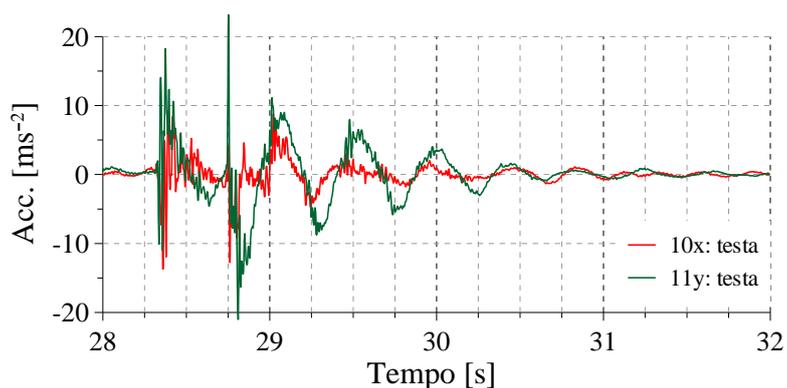


Figura 3.9. Storie temporali delle accelerazioni alla testa della statua in direzione longitudinale (x) e trasversale (y) durante la fase di abbassamento.

Le storie temporali ottenute dal sensore posto sulla testa della statua, ma in direzione del moto (10x) presentano intensità notevolmente inferiori, assenza del comportamento di “oscillazione libera” descritto per la direzione trasversale e presenza di componenti a frequenza più elevata, indice di un migliore grado di connessione.

### 3.3.4 Analisi nel dominio delle frequenze

Nella seguente Figura 3.10 vengono, invece, mostrati i risultati ottenuti da una analisi dei segnali nel dominio delle frequenze ottenuta computando uno spettro di Fourier dei segnali. In ascissa sono indicate le frequenze in Hertz, mentre in ordinata vengono riportati i corrispondenti valori degli spettri di potenza per i segnali ottenuti dall’accelerometro posto in direzione longitudinale (10x, in rosso) e in direzione trasversale (11y, in verde).

Nella Figura 3.10-a viene mostrato il risultato delle analisi nel dominio delle frequenze con riferimento alle accelerazioni registrate durante la fase di abbassamento del fercolo descritta dalla Figura 3.9, mentre nella Figura 3.10-b vengono riportati analoghi risultati in relazione ad una fase di trasporto.

Nella fase di abbassamento, è possibile osservare che le componenti longitudinali e trasversali hanno potenza notevolmente diversa e, soprattutto, agiscono su differenti livelli di frequenza. In particolare, le oscillazioni in direzione trasversale al moto (11y) hanno intensità pressoché doppia delle oscillazioni in direzione longitudinale (10x), e frequenza molto più bassa (circa 2.30 Hz per la direzione trasversale contro i circa 3.10 Hz per la direzione longitudinale).

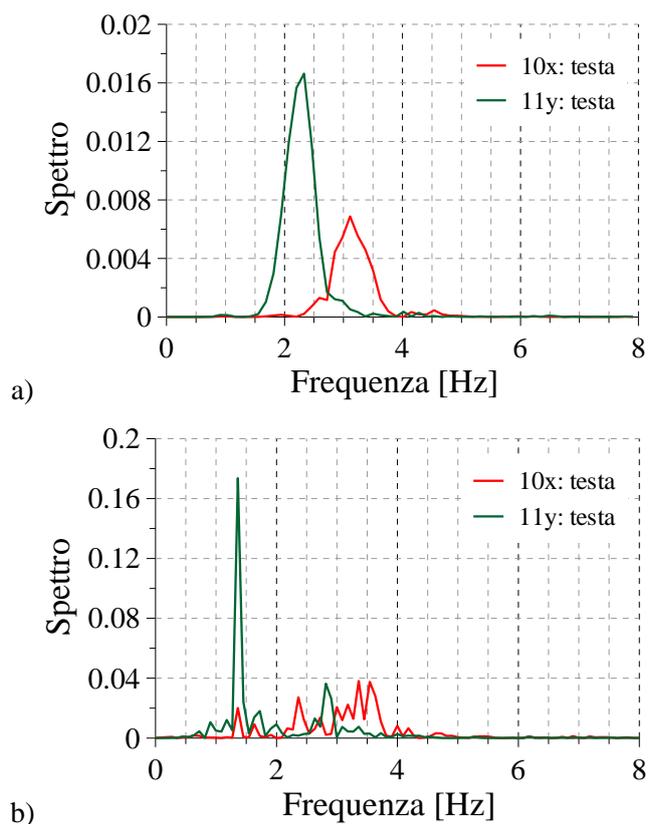


Figura 3.10. Analisi in frequenza delle accelerazioni registrate sulla testa della statua. a) fase di abbassamento; b) fase di trasporto.

Questo dato, unitamente alle caratteristiche dei segnali descritte in precedenza, porta a rafforzare l'ipotesi che il diverso comportamento della testa della statua nelle due direzioni sia dovuto ad una differente condizione di vincolo.

D'altra parte, l'analisi in frequenza dei segnali registrati durante la fase di trasporto mostra che le oscillazioni in direzione trasversale si concentrano su una frequenza ancora più bassa di 1.30 Hz, mentre in direzione longitudinale non può individuarsi una chiara frequenza dominante. In ogni caso, le frequenze rilevate nella fase di trasporto sono ben diverse da quelle osservate nella fase di abbassamento. Questo comportamento può essere interpretato come effetto di un comportamento non lineare del sistema fercolo-statua.

### **3.3.5 Analisi delle condizioni effettive di vincolo**

In sintesi, l'analisi delle storie temporali di accelerazione registrate, unitamente all'esame dei risultati nel dominio delle frequenze, hanno rilevato che una possibile causa del comportamento oscillatorio della testa della statua può essere identificata nelle effettive condizioni di vincolo della base della statua. Si è, pertanto, deciso di approfondire l'analisi di questo particolare aspetto.

La base su cui è collocata la statua è assemblata al fercolo mediante delle barre filettate che attraversano la struttura superiore del fercolo stesso e vengono ammorsate ad esso per il tramite di appositi dadi a farfalla. La estremità inferiore di detto sistema di collegamento è visibile entrando nello spazio all'interno del fercolo attraverso lo sportello posto sul lato posteriore del fercolo stesso.

La Figura 3.11 mostra proprio i dettagli di tale sistema di connessione, in Figura 3.11-a è visibile la base della statua, solidalmente connessa con una piastra in ferro che va ad appoggiarsi su un incavo della struttura perimetrale

in legno del fercolo. Nella foto è anche visibile la testa di una delle quattro barre filettate, poste in mezzeria dei lati del fercolo, mediante le quali viene effettuata la connessione.

La Figura 3.11-b mostra il sistema di connessione dall'interno del fercolo. Sono visibili le quattro piastre in ferro munite dei fori per l'ammorsamento delle barre filettate, ma solo su due lati, disposti lungo la direzione longitudinale del fercolo (x), sono presenti le due barre filettate con i relativi dadi a farfalla, mentre in direzione trasversale (y) tale sistema di vincolo è totalmente mancante. Sembra, quindi, che sia proprio tale mancanza a causare la differenza di comportamento della statua nelle due direzioni longitudinale e trasversale, inducendo notevoli oscillazioni della testa del simulacro.

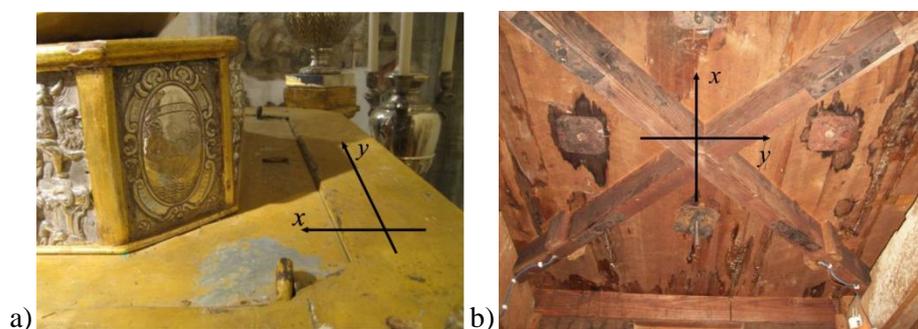


Figura 3.11. Sistema di connessione tra la base della statua ed il fercolo.  
a) vista superiore esterna; b) vista dall'interno del fercolo.

### 3.4 Strumentazione prove dinamiche

In questo paragrafo verranno descritte nel dettaglio le caratteristiche e le modalità di funzionamento della strumentazione utilizzata ai fini della campagna sperimentale delle prove dinamiche.

### 3.4.1 Accelerometri

#### Accelerometri piezoelettrici Bruel & Kjaer – Type 4382

Questo tipo di accelerometri sono dotati di elevata sensibilità, largo capo di frequenze, piccole dimensioni, peso minimo, elevata curabilità e facile montaggio.



Figura 3.12. Accelerometro Bruel & Kjaer – Type 4382.

L'elemento piezoelettrico all'interno dell'accelerometro è forgiato in maniera tale che quando il sistema su cui è montato subisce un'accelerazione, sull'elemento piezoelettrico si desta una carica direttamente proporzionale alla accelerazione. La sua sensibilità è espressa in termini di carica per accelerazione unitaria (pC/G). L'uso di tre cristalli piezoelettrici (PZ33 al piombozircono-titanio) con tre masse disposte in configurazione triangolare assicura un alto grado di linearità. L'involucro esterno è costituito da titanio. Il segnale elettrico in termini di carica generato dall'accelerometro viene amplificato e convertito in segnale in tensione prima di essere convertito in segnale digitale ad acquisito.

Materiale involucro	titanio ASTM Grade 2
Peso	17 g
Sensibilità (@ 59.2 Hz)	31 pC/g
Frequenza di risonanza propria	28 kHz
Risposta in Ampiezza $\pm 10\%$	da 0.1 Hz a 8400 Hz
Sensibilità trasversale	< 4%
Frequenza di risonanza trasversale	10 kHz
Temperatura Operativa	-74 a +250°C
Accelerazione massima di picco	(sinusoidale) 2000g; (shock) 5000 g

Tabella 3.1. Caratteristiche tecniche accelerometro Bruel & Kjaer – Type 4382.

#### Accelerometri piezoelettrici Bruel & Kjaer – Type 4507-002

Questo tipo di accelerometri sono dotati di elevata sensibilità, largo campo di frequenze, ridotte dimensioni, peso minimo, elevata curabilità e facile montaggio.



Figura 3.13. Accelerometro Bruel & Kjaer – Type 4507-002.

L'elemento piezoelettrico all'interno dell'accelerometro è identico a quello usato nel tipo precedente ma questo tipo di sensori contengono un amplificatore del segnale integrato in un microcircuito cosicché il segnale elettrico generato dall'accelerometro è un segnale in tensione. Questi accelerometri vengono direttamente alimentati secondo il sistema DeltaTron compatibile con le specifiche ICP e consentono l'uso di cavi poco costosi.

Inoltre la bassa impedenza dell'output consente l'uso di cavi anche molto lunghi. Il preamplificatore integrato garantisce anche un raddrizzamento del segnale e una migliore qualità dello stesso.

Materiale involucro	titanio ASTM Grade 2
Peso	4.8 g
Sensitività (@ 59.2 Hz)	100 Mv/ms <sup>-2</sup>
Frequenza di risonanza propria	18 kHz
Risposta in Ampiezza ± 10 %	da 0.4 Hz a 8400 Hz
Sensitività trasversale	>10%
Frequenza di risonanza trasversale	10 kHz
Temperatura Operativa	-54 a +100°C
Accelerazione massima di picco	5000 g

Tabella 3.2. Caratteristiche tecniche accelerometro Bruel & Kjaer – Type 4507.

#### Accelerometri piezoelettrici PCB 393B04

Questo tipo di accelerometri sismici sono dotati di un'elevata precisione e di massa maggiore di quelli precedenti e necessitano di una superficie piana per essere installati.



Figura 3.14. Accelerometro PCB 393B04.

Materiale involucro	titanio ASTM Grade 2
Peso	50 g
Sensibilità ( $\pm 10\%$ )	102 Mv/ms <sup>2</sup>
Frequenza di risonanza propria	$\geq 2.5$ kHz
Risposta in Ampiezza $\pm 10\%$	da 0.05 Hz a 750 Hz
Sensibilità trasversale	$\leq 5\%$
Temperatura Operativa	-18 a +80°C

Tabella 3.3. Caratteristiche tecniche accelerometro PCB 393B04.

### 3.4.2 Amplificatori degli accelerometri

Gli amplificatori degli accelerometri sono del tipo Nexus Range Of Conditioning Amplifier – Type 2692A014 e Type 2693A014 della Bruel & Kjaer e PCB Piezotronics.

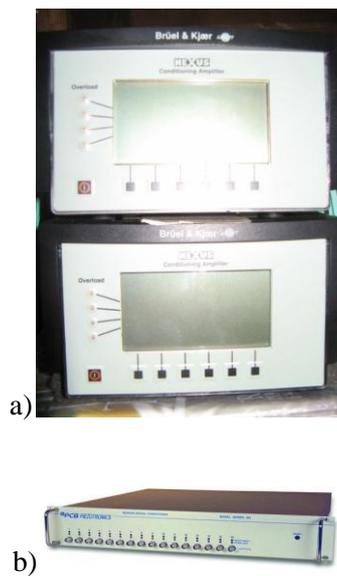


Figura 3.15. a) Amplificatori Nexus Range - Type 2692A014 e Type 2693A014 Bruel & Kjaer; b) amplificatore PCB Piezotronics.

L'amplificatore di tipo 2692 provvede a convertire i segnali elettrici in termini di carica provenienti dagli accelerometri tipo 4382 in segnali in tensione. Questi segnali vengono, inoltre, amplificati e condizionati. L'amplificatore tipo 2693, invece amplifica e condiziona i segnali in tensione provenienti dagli accelerometri 4507-002. L'amplificatore PCB Piezotronics amplifica e condiziona i segnali in tensione provenienti dagli accelerometri PCB 393B04. Tutti e tre i tipo di amplificatore sono, inoltre, in grado di applicare filtri passa-alto o passa-basso a diversi range di frequenze e di eseguire integrazioni semplici o doppie sui segnali, restituendo così segnali in accelerazione, velocità o spostamento.

L'amplificatore di tipo 2692 e quello di tipo 2693 sono dotati di 4 canali, mentre l'amplificatore PCB è dotato di 16 canali. Per ognuno di questi canali è possibile regolare indipendentemente la sensibilità, i parametri di filtraggio e le eventuali integrazioni.

Dimensioni	altezza 90 mm, larghezza 144 mm, profondità 230 mm
Peso	3 Kg incluso la batteria
Conessione	TNC
Batteria interna	Nickel, con autonomia di 15 ore (1 ch) e 4 ore (4 ch)
Temperatura Operativa	+10 a +55°C
Intervallo dinamico	+30 a +10 dBV (picco)
Risoluzione	1 dB
Intervallo di frequenza (+10%)	0.1 Hz a 100 kHz
Filtro Passa-basso (+10%)	0.1, 1, 3, 10, 22.4, 30 o 100 kHz
Filtro Passa-alto (+10%)	0.1, 1.0 o Hz

Tabella 3.4. Caratteristiche tecniche accelerometro Bruel & Kjaer – Type 4507.

### 3.4.3 Scheda di acquisizione dati

La scheda analogico-digitale utilizzata per l'acquisizione dei dati è la NI-PCI-4472 prodotta dalla National Instruments.



Figura 3.16. Scheda di acquisizione National Instruments NI-PCI-4472.

La scheda è dotata di 8 canali di input analogici per segnali dinamici che digitalizzano simultaneamente i segnali di input con una risoluzione di 24 bit, appropriata per le applicazioni di natura vibrazionale.

Dimensioni	17.5 per 10.7 cm
Connettori	5 MB maschio
Canali	8 con campionatura simultanea
Risoluzione	24 bit
Frequenza di campionamento	da 1.0 a 102.4 kS/s
Range del segnale di input	$\pm 10$ V (picco)
Larghezza di banda senza aliasing	da 0 a 0.5465 %
Separazione dei canali	(adiacenti) +90 dB; (altri) +100 dB
Voltaggio massimo di lavoro	$\pm 10$ V
Temperatura di lavoro	da 0°C a 50 °C
Umidità relativa	da 10% al 90 %

Tabella 3.5. Caratteristiche tecniche scheda National Instruments NI-PCI-4472.

### 3.4.4 Personal Computer

Il Personal Computer utilizzata per l'acquisizione dei dati e l'elaborazione degli stessi e la registrazione su periferiche di memoria di massa, non presenta particolari caratteristiche, ma, in funzione dei flussi di dati che si hanno durante le prove, è consigliato avere un PC di buone prestazioni.

Durante la campagna di prove sperimentali condotta si è utilizzato un PC con CPU Core2Quad 2.5 con frequenza di 2.5 GHz e 4 GB di RAM.



Figura 3.17. Personal Computer.

### 3.4.5 L'ambiente Labview

La generazione dei segnali, l'interfaccia con la scheda di acquisizione dei segnali e l'elaborazione in tempo reale dei risultati ottenuti viene condotta all'interno dell'ambiente di programmazione del Labview 8.2 prodotto dalla National Instruments.

Questo programma mette a disposizione dell'utente una vasta libreria di moduli precompilati che possono essere assemblati in maniera semplice ed intuitiva, attraverso una interfaccia simbolica ad icone, per costruire strumenti di elaborazione di grande versatilità, affidabilità e potenza di calcolo. L'uso di tale ambiente di programmazione permette l'indubbio vantaggio di conoscere i risultati delle elaborazioni sulle acquisizioni in tempo reale, massimizzando così la produttività della sperimentazione ed evitando inutili sprechi di tempo per l'elaborazione di dati provenienti da prove condotte in maniera errata.

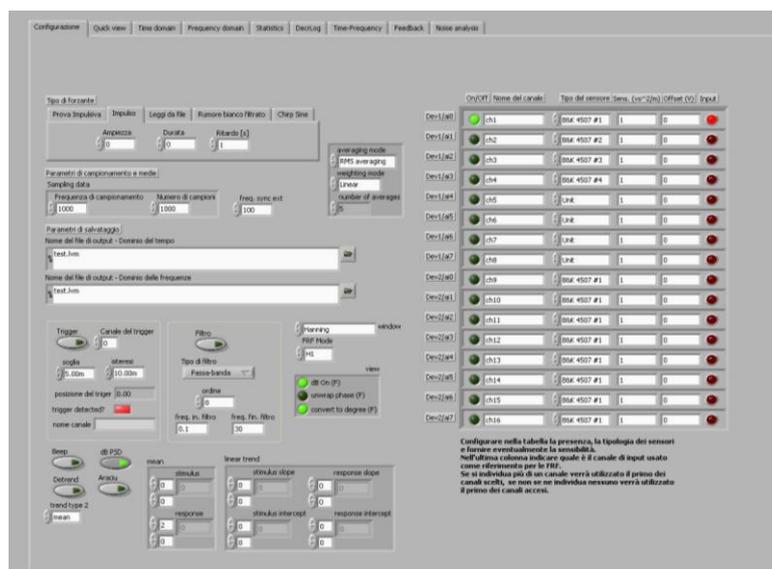


Figura 3.18. Labview Virtual Instruments.

### **3.5 Conclusioni indagini sperimentali**

Tali indagini hanno avuto come scopo quello di misurare le vibrazioni e caratterizzare il comportamento dinamico del simulacro argenteo dell'Immacolata durante il trasporto per le vie della città in processione. A tal fine è stata espletata una campagna di indagine per la misurazione delle vibrazioni sul simulacro in due fasi distinte. Durante la prima fase, attraverso strumentazione per prove *in situ*, sono state registrate le accelerazioni per tutta la processione per le vie cittadine svolta in concomitanza con la festività dell'Immacolata Concezione, lo scorso 8 dicembre 2009; mentre la seconda fase dell'indagine è stata svolta all'interno della chiesa di San Francesco effettuando delle apposite simulazioni di movimentazione del simulacro. Tale studio, volto alla conoscenza delle entità di sollecitazioni indotte sul simulacro durante il trasporto in processione, ha messo in evidenza l'utilità delle prove dinamiche per caratterizzare il comportamento strutturale ed eventualmente individuare anomalie nel sistema di vincolo. Infatti i risultati delle analisi dei segnali registrati hanno permesso di evidenziare l'assenza di un adeguato sistema di connessione in direzione trasversale tra il fercolo e la statua.



## **CAPITOLO 4.**

### **INDAGINE NUMERICA**

#### **4.1 Introduzione**

La presente indagine è finalizzata alla definizione di un modello numerico del simulacro dell'Immacolata per l'analisi ed il controllo delle vibrazioni indotte durante le processioni liturgiche.

Nello specifico, attraverso un modello agli elementi finiti, opportunamente tarato sulla base dei risultati delle indagini sperimentali, sono state condotte simulazioni numeriche di urti elastici, valutando il diverso comportamento strutturale in assenza ed in presenza di un dispositivo di attenuazione delle vibrazioni.

## 4.2 Metodo degli elementi finiti

Il metodo degli elementi finiti, il cui acronimo F.E.M. deriva dall'inglese *Finite Element Method*, è una tecnica numerica atta a ricercare soluzioni approssimate di problemi descritti da equazioni differenziali alle derivate parziali riducendo queste ultime ad un sistema di equazioni algebriche.

In generale, il metodo agli elementi finiti si presta molto bene a risolvere equazioni alle derivate parziali quando il dominio ha forma complessa, quando l'accuratezza richiesta alla soluzione non è omogenea sul dominio e quando la soluzione cercata manca di regolarità.

Il Metodo F.E.M. si applica a corpi fisici suddivisibili in un certo numero, anche molto grande, di elementi di forma definita e dimensioni contenute, ovvero i singoli elementi finiti, considerati campi di integrazione numerica di caratteristiche omogenee.

La caratteristica principale del metodo degli elementi finiti è per l'appunto, la discretizzazione attraverso la creazione di una griglia (*mesh*) composta da primitive (*elementi finiti*) di forma codificata (triangoli e quadrilateri per domini 2D, esaedri e tetraedri per domini 3D). Su ciascun elemento caratterizzato da questa forma elementare, la soluzione del problema è espressa dalla combinazione lineare di funzioni dette *funzioni di base* o *funzioni di forma* (*shape functions*). La funzione obiettivo è in genere approssimata, ed i valori della funzione calcolati nei nodi degli elementi.

La costruzione del modello agli elementi finiti si articola attraverso fasi successive, ognuna delle quali comporta approssimazioni nella soluzione finale.

### Modellazione

Si passa dal sistema fisico ad un modello matematico, che astrae alcuni aspetti di interesse del sistema fisico, focalizzando l'attenzione su poche

variabili aggregate di maggiore rilevanza e "filtrando" le rimanenti. Il sistema fisico se complesso viene suddiviso in sottosistemi. Il sottosistema verrà poi suddiviso in elementi finiti ai quali verrà applicato un modello matematico. A differenza delle trattazioni analitiche è sufficiente che il modello matematico scelto sia adeguato alle geometrie semplici degli elementi finiti.

### **Discretizzazione**

Uno dei passi più importanti dell'analisi strutturale è l'idealizzazione della struttura che permette di passare dal modello fisico a quello numerico. Tale passaggio comporta la riduzione del numero di gradi di libertà. Si passa da un numero infinito di gradi di libertà (condizione propria del "continuum") ad un numero finito (situazione propria della mesh). La discretizzazione, nello spazio o nel tempo, ha lo scopo di ottenere un modello discreto caratterizzato da un numero finito di gradi di libertà. Si parla allora di discretizzazione della struttura come quell'operazione che permette di passare dalla struttura reale e quella idealizzata per la quale è possibile applicare il metodo degli elementi finiti al fine di ottenere una soluzione ingegneristica del problema.

### **Elementi finiti**

Ogni elemento è caratterizzato da:

- dimensione (1D, 2D, 3D);
- nodi (punti precisi dell'elemento che ne individuano la geometria);
- forze sui nodi (forze esterne applicate sui nodi o l'effetto delle reazioni vincolari).

Tutti i programmi che impiegano il metodo degli elementi finiti per l'analisi strutturale sono dotati di una *libreria* di elementi finiti (monodimensionali, bidimensionali e tridimensionali) per facilitare la modellazione di una struttura reale.

Di seguito sono elencati e descritti gli elementi utilizzati per la realizzazione del modello di calcolo del simulacro.

#### Elementi finiti monodimensionali

*Trave o beam*: elemento rettilineo a 2 nodi capace di trasferire ai nodi a cui è connesso rigidezze per tutti e 6 i gradi di libertà e pertanto atto a trasmettere tutte le tipologie di sollecitazioni (forze assiali e taglienti e momenti flettenti e torcenti).

*Molla o boundary o spring*: elemento rettilineo a due nodi dotato di rigidezza assiale e/o rotazionale utilizzato per modellare vari tipi di vincolo elastico quali ad esempio gli spostamenti imposti.

*Rigido o rigel*: elemento rettilineo a 2 nodi infinitamente rigido usato per modellare un legame infinitamente rigido tra due elementi finiti.

#### Elementi finiti bidimensionali

*Lastra-piastra o guscio o shell*: elemento piano a 3 o 4 nodi costituito dalla sovrapposizione dell'elemento piastra e dell'elemento lastra e che pertanto è dotato sia di rigidezza flessionale che membranale.

### **4.3 Rilievo geometrico**

Ai fini della successiva indagine numerica, che avrebbe previsto la rappresentazione di un modello di calcolo del simulacro, è stato effettuato un rilievo geometrico. Gli strumenti di misura utilizzati per il rilievo, sono stati:

- metro rigido;
- metro pieghevole.

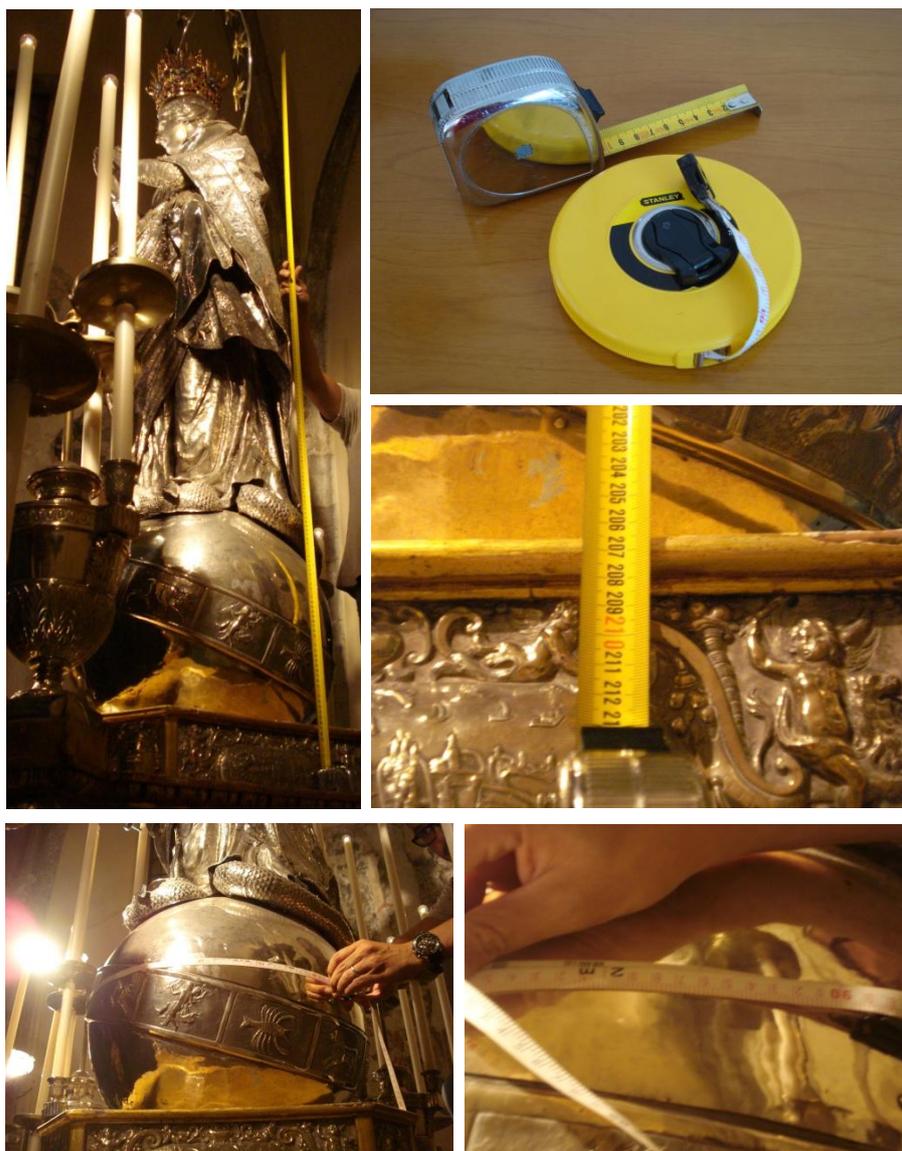


Figura 4.1. Rilievo geometrico.

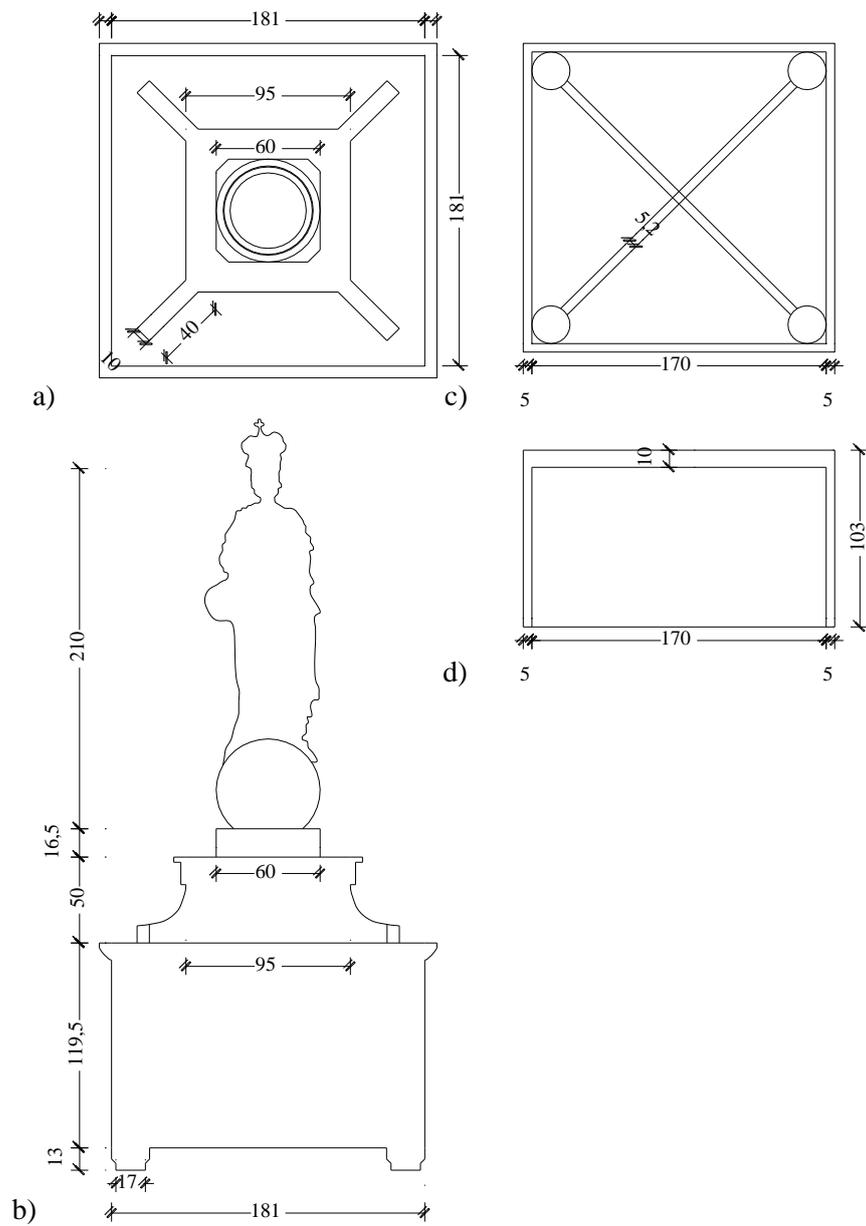


Figura 4.2. a) Pianta; b) profilo; c) sezione longitudinale fercolo; d) sezione trasversale fercolo.

E' stata inoltre effettuata una prova endoscopica per l'ispezione di un foro all'interno del fercolo, mediante una sonda che ha consentito di acquisire dati sulla effettiva geometria del simulacro, sullo stato di conservazione di parti non ispezionabili direttamente e sull'effettiva condizione di vincolo.



Figura 4.3. Prova endoscopica.

#### **4.4 Modello di calcolo**

L'analisi per la determinazione dello stato di deformazione e di sollecitazione del simulacro dell'Immacolata, è stata condotta con il programma Nòlian prodotto dalla Softing S.r.l. di Roma.

Nel modello di calcolo agli elementi finiti sono rappresentati tutti gli elementi principali: supporti, fercolo, base statua, globo e statua.



Figura 4.4. Sovrapposizione immagine reale del simulacro e modello di calcolo.

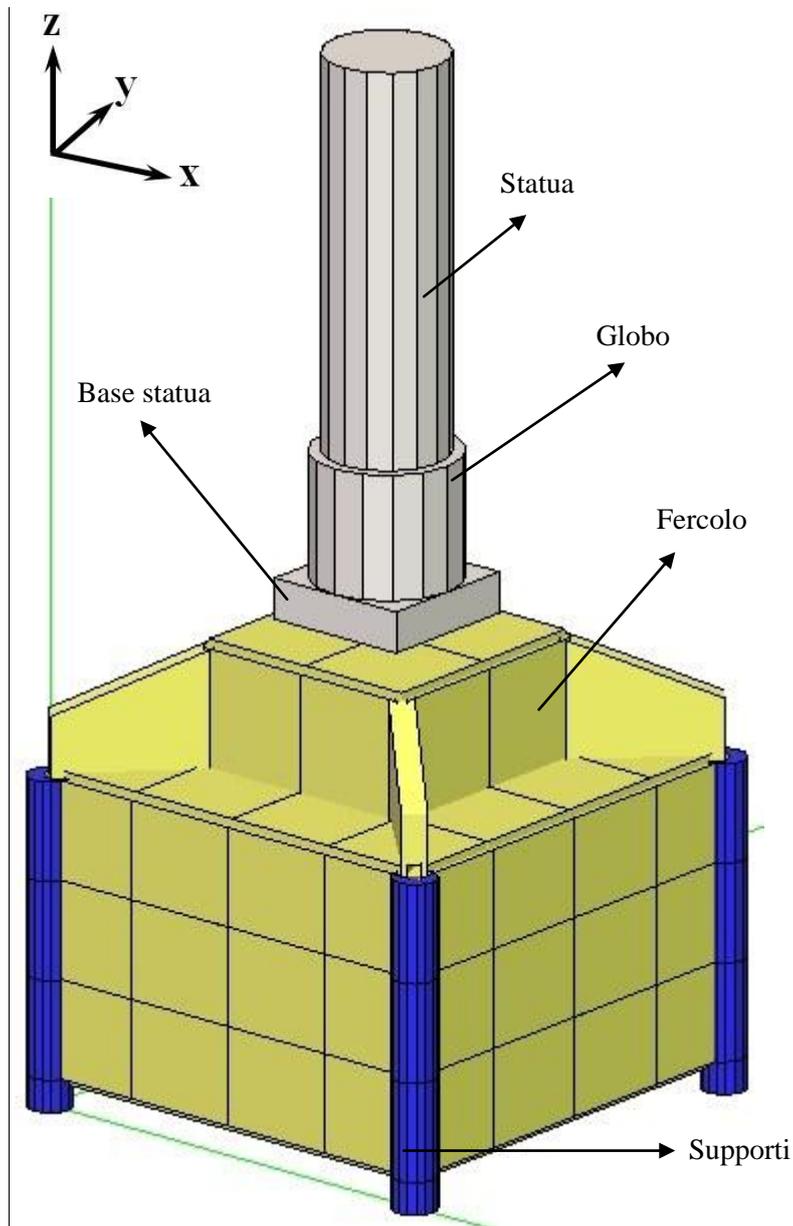


Figura 4.5. Modello di calcolo.

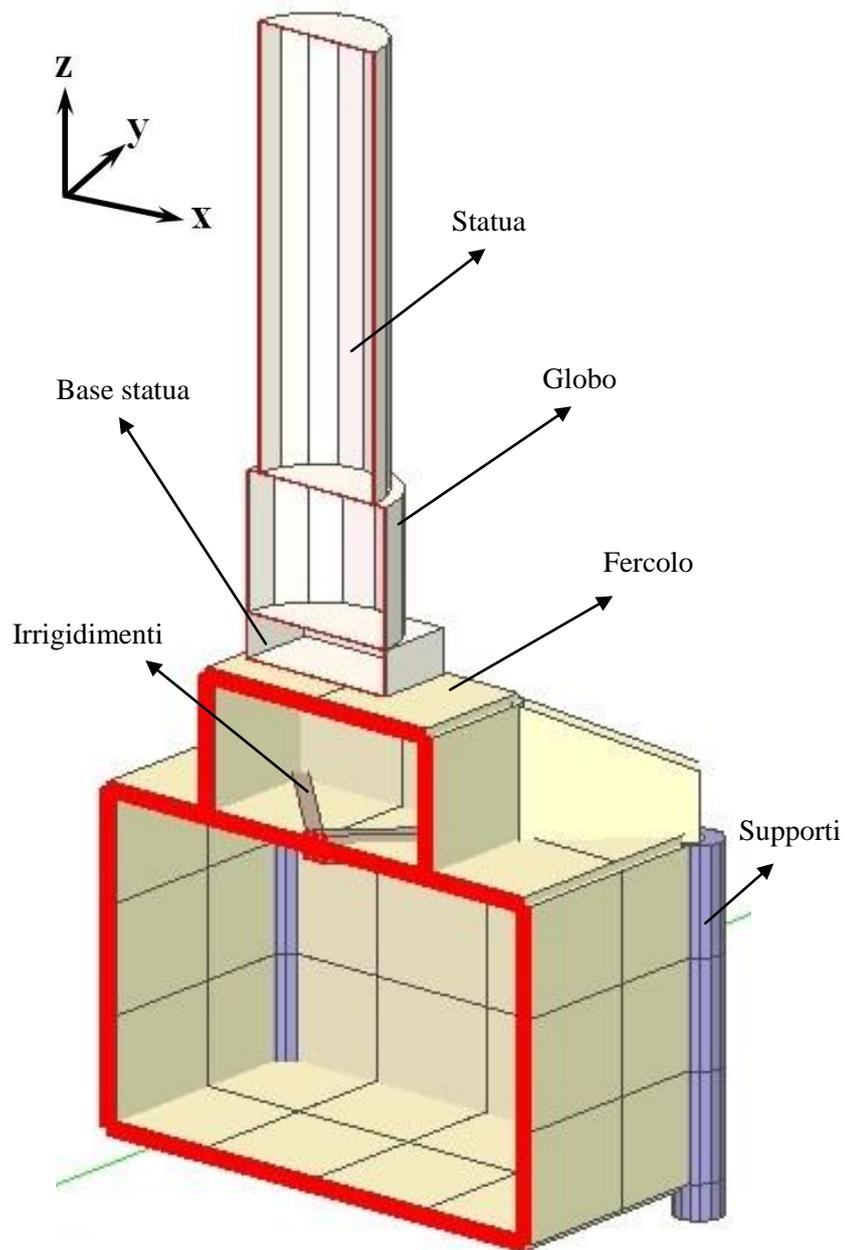


Figura 4.6. Modello di calcolo sezionato.

Il modello discretizzato è composto da 107 nodi e 127 elementi, di cui:

- 18 elementi “*trave poligonale*” che modellano statua, globo e supporti;
- 92 elementi “*guscio*” che modellano il fercolo;
- 9 elementi “*trave rettangolare*” che modellano gli irrigidimenti;
- 4 elementi “*boundary*” che modellano il collegamento tra la base della statua e il fercolo;
- 4 elementi “*rigel*” che modellano la base della statua.

Le condizioni di vincolo assegnate sono tali da riprodurre un appoggio semplice alla base del fercolo.

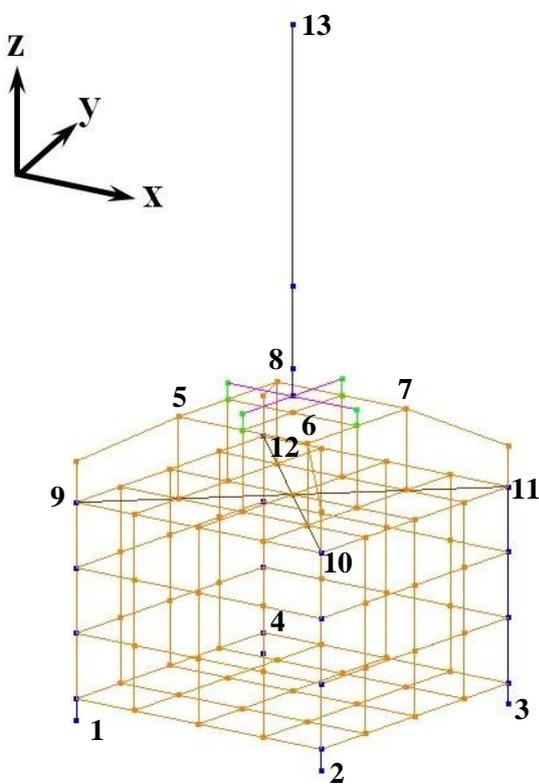


Figura 4.7. Modello di calcolo con numerazione nodi principali.

#### 4.4.1 Caratteristiche materiali

Per il legno, di cui sono costituiti tutti gli elementi del fercolo (ivi compresi irrigidimenti e supporti) e della statua, sono state utilizzate le caratteristiche riportate in Tabella 4.1.

Caratteristiche Legno		
Modulo elastico	120000	daN/cm <sup>2</sup>
Modulo tangenziale	7200	daN/cm <sup>2</sup>
Peso specifico	0.0006	daN/cm <sup>3</sup>
Coeff. dilatazione termica	0.00001	°C <sup>-1</sup>

Tabella 4.1. Caratteristiche del legno.



Figura 4.8. Interno in legno del fercolo.

Per quanto riguarda la statua, sperimentalmente si è determinato un peso pari a 170 daN, di cui 100 daN distribuiti lungo la base della statua e il globo e i rimanenti 70 daN distribuiti lungo l'altezza della statua.

Il peso complessivo del simulacro è di 911.48 daN.

#### 4.4.2 Calibrazione dinamica del modello

Le rigidzze degli elementi boundary posti tra la base della statua ed il fercolo, governano i primi due modi di vibrare della struttura.

Al fine di calibrare dinamicamente il modello di calcolo del simulacro, sono state tarate le rigidzze sino a far coincidere i periodi calcolati con quelli teorici.

In particolare si è tenuto conto dei risultati ottenuti dall'analisi dei segnali nel dominio delle frequenze con riferimento alle accelerazioni registrate dall'accelerometro in testa, posto in direzione longitudinale e in direzione trasversale, durante la fase di abbassamento del fercolo (Figura 4.9).

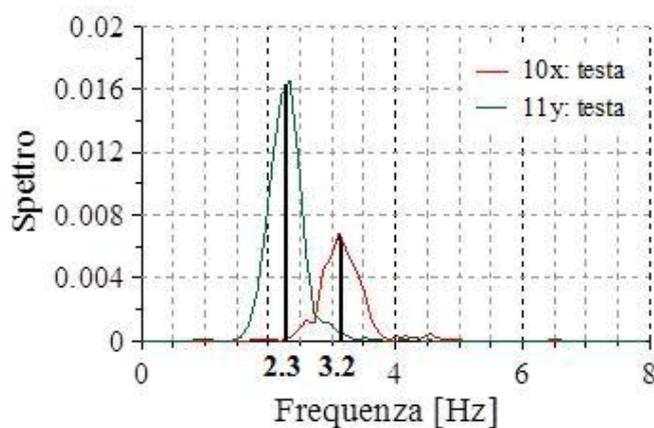


Figura 4.9. Analisi in frequenza delle accelerazioni registrate sulla testa della statua durante la fase di abbassamento.

Dalle frequenze di picco registrate, si ricavano i periodi:

$$\begin{aligned}
 f_x = 2.3\text{Hz} &\rightarrow T_{x,\text{gol}} = \frac{1}{f_x} = \frac{1}{2.3} = 0.4347 \text{ s} \\
 f_y = 3.2\text{Hz} &\rightarrow T_{y,\text{gol}} = \frac{1}{f_y} = \frac{1}{3.2} = 0.3125 \text{ s}
 \end{aligned}
 \tag{4.1}$$

Dove:

- $f_x$  e  $f_y$  sono le frequenze rispettivamente in direzione longitudinale e in direzione trasversale;
- $T_{x,gol}$  e  $T_{y,gol}$  sono i periodi rispettivamente in direzione longitudinale e in direzione trasversale.

Si indicano con  $T_1$  e  $T_2$  i periodi corrispondenti al primo e al secondo modo di vibrare del modello di calcolo non calibrato.

Affinchè il modello di calcolo sia calibrato sulla base dei dati sperimentali registrati, deve risultare:

$$\begin{aligned} T_1 &= T_{x,gol} = 0.4347 \text{ s} \\ T_2 &= T_{y,gol} = 0.3125 \text{ s} \end{aligned} \quad (4.2)$$

Si scrive la proporzione:

$$\begin{aligned} T_{x,gol} : 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_{x,gol}}} &= T_1 : 2\pi \sqrt{\frac{M}{K_1}} \\ \Rightarrow K_{x,gol} &= K_1 \left( \frac{T_1}{T_{x,gol}} \right)^2 \end{aligned} \quad (4.3)$$

in cui  $K_{x,gol}$  e  $K_1$  sono le rigidezze associate rispettivamente ai periodi  $T_{x,gol}$  e  $T_1$ .

Per la determinazione di  $K_1$  si ricorre allo schema in Figura 4.10:

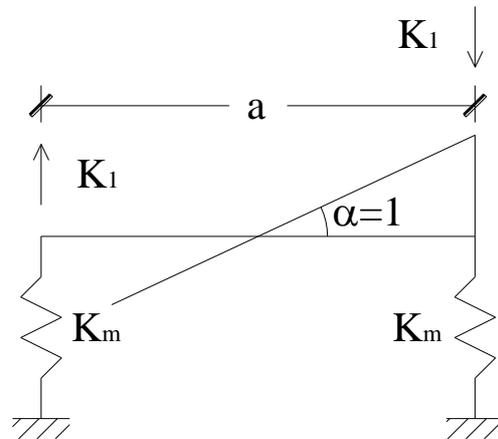


Figura 4.10. Schema di calcolo.

in cui  $K_m$  è la rigidità teorica assegnata agli elementi boundary ed è pari a 10000 daN/cm e  $K_1$  è uguale a:

$$K_1 = 2K_m a^2 \alpha = 2 \times 10000 \times 475^2 \times 1 = 41405000 \text{ daN/cm} \quad (4.4)$$

Sostituendo nella 4.3 si ottiene  $K_{x,gol}$ :

$$K_{x,gol} = K_1 \left( \frac{T_1}{T_{x,gol}} \right)^2 = 41405000 \left( \frac{0.04625228}{0.4347} \right)^2 = 468748.4 \text{ daN/cm} \quad (4.5)$$

Con riferimento allo schema di calcolo in Figura 4.11, in cui questa volta  $K_m = K_{mx,gol}$ , si determina il valore di  $K_{mx,gol}$ :

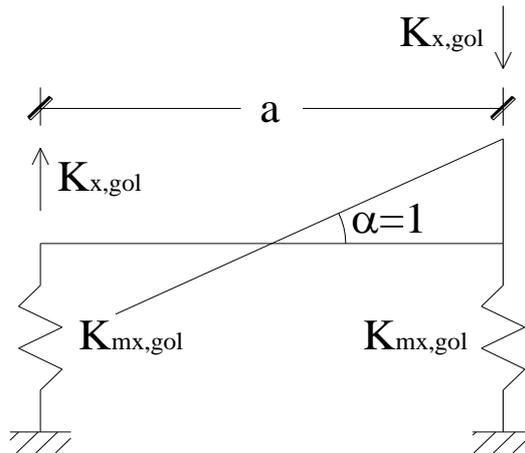


Figura 4.11. Schema di calcolo.

$$K_{mx,gol} = \frac{K_{x,gol}}{2a^2} = 103.88 \text{ daN/cm} \approx 101.3 \text{ daN/cm} \quad (4.6)$$

Analogamente per  $K_{my,gol}$  si ottiene:

$$K_{my,gol} = 196 \text{ daN/cm} \quad (4.7)$$

Procedendo in questo modo si è calibrato il sistema.  $K_{mx,gol}$  e  $K_{my,gol}$  sono rispettivamente le rigidezze da assegnare agli elementi boundary.

Si riportano di seguito le prime due forme modali a cui sono associati i periodi:

$$T_1 = 0.4347 \text{ s}$$

$$T_2 = 0.3127 \text{ s}$$

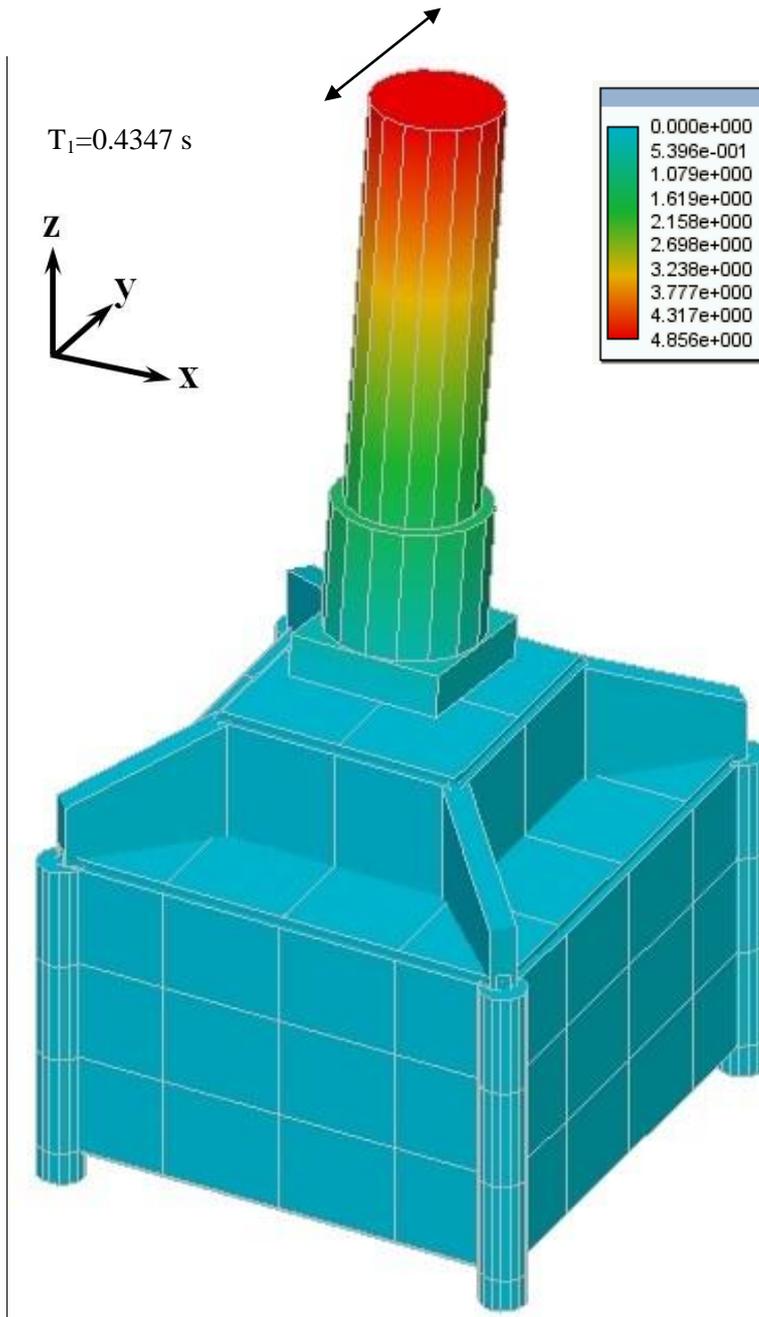


Figura 4.12. Prima forma modale.

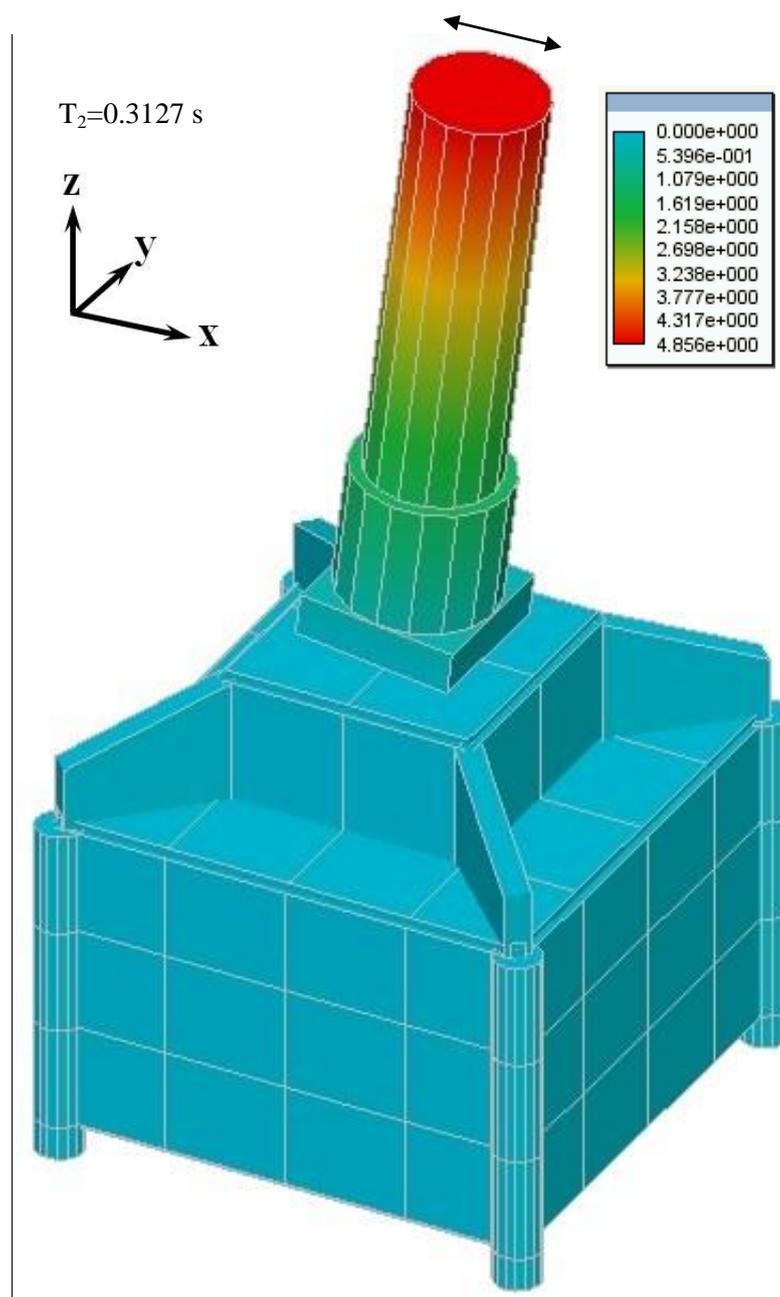


Figura 4.13. Seconda forma modale.

### 4.4.3 Definizione caratteristiche di smorzamento

Il modello utilizzato per lo smorzamento strutturale è di tipo proporzionale o di Rayleigh, secondo il quale la matrice di smorzamento  $\mathbf{C}$  è definita come combinazione lineare della matrice di rigidità  $\mathbf{K}$  e della matrice di massa  $\mathbf{M}$ :

$$\mathbf{C} = \alpha\mathbf{M} + \beta\mathbf{K} \quad (4.8)$$

con  $\alpha$  e  $\beta$  costanti di smorzamento di Rayleigh. La matrice di smorzamento  $\mathbf{C}$  così ottenuta è ortogonale rispetto agli auto valori del sistema e conduce ad un disaccoppiamento delle equazioni del moto nello spazio modale.

La relazione tra  $\alpha$ ,  $\beta$  e il coefficiente di smorzamento  $\xi_i$  è:

$$\xi_i = \frac{1}{2} \left( \frac{\alpha}{\omega_i} + \beta\omega_i \right) \quad (4.9)$$

I coefficienti di smorzamento,  $\xi_1$  e  $\xi_2$ , sono stati definiti nel paragrafo 4.5, attraverso un'indagine numerica di calibrazione dei dati sperimentali.

Infine, attraverso la risoluzione di un sistema a due equazioni e due incognite (4.10), è stato possibile determinare i valori delle due costanti di smorzamento  $\alpha$  e  $\beta$ :

$$\begin{aligned} 2\xi_1 \omega_1 &= \alpha + \beta\omega_1^2 \\ 2\xi_2 \omega_2 &= \alpha + \beta\omega_2^2 \end{aligned} \quad (4.10)$$

$\omega_1$  e  $\omega_2$ , le frequenze di vibrazione si esprimono come:

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{2\pi}{T_1} \\ \omega_2 &= \frac{2\pi}{T_2} \end{aligned} \quad (4.11)$$

## 4.5 Confronto risultati numerici e sperimentali

Al fine di calibrare dinamicamente il modello di calcolo del simulacro, è stato effettuato un confronto delle accelerazioni sperimentali e numeriche registrate alla testa della statua.

In particolare è stata assegnata a ciascuno dei quattro supporti alla base del fercolo, una storia temporale di accelerazione (vedi Figura 4.15) registrata durante la campagna di indagine sperimentale.

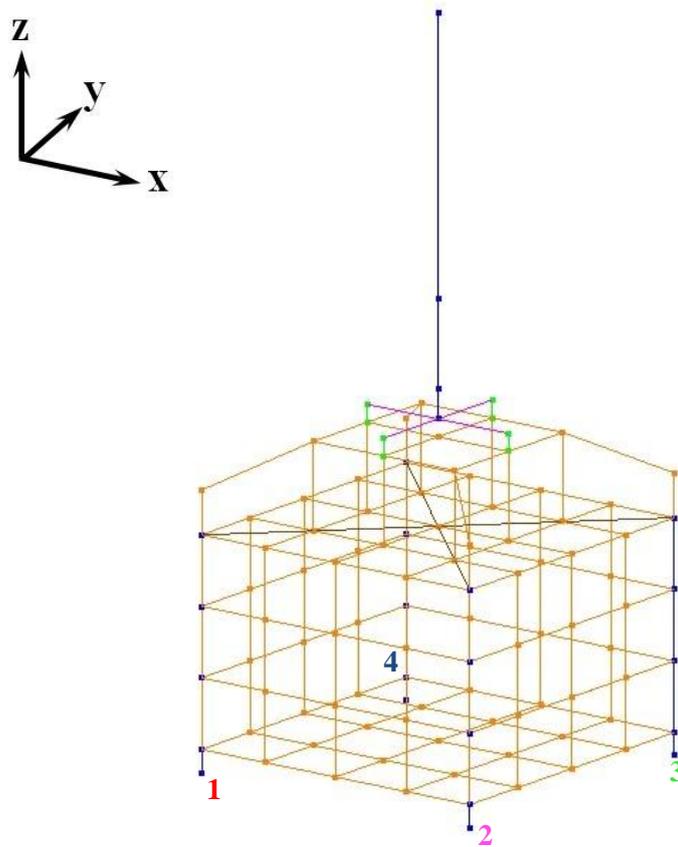
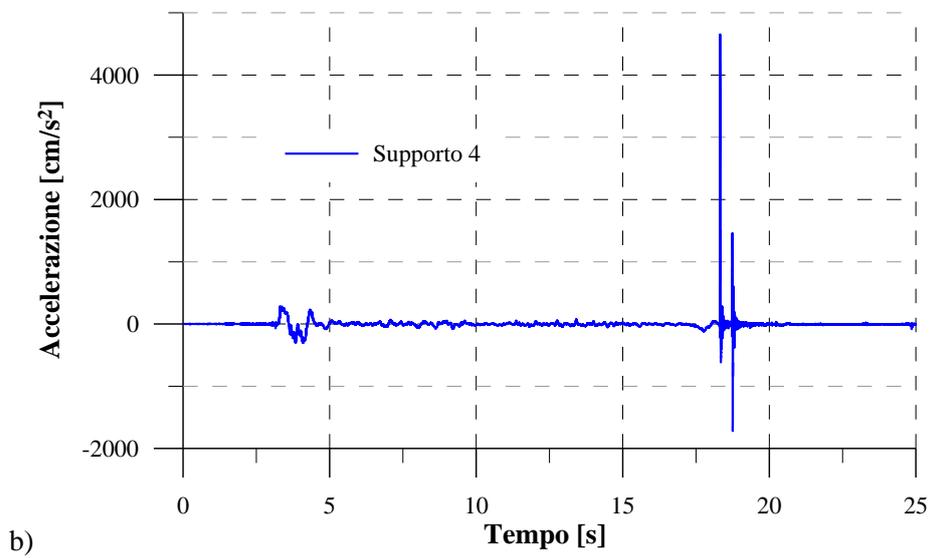
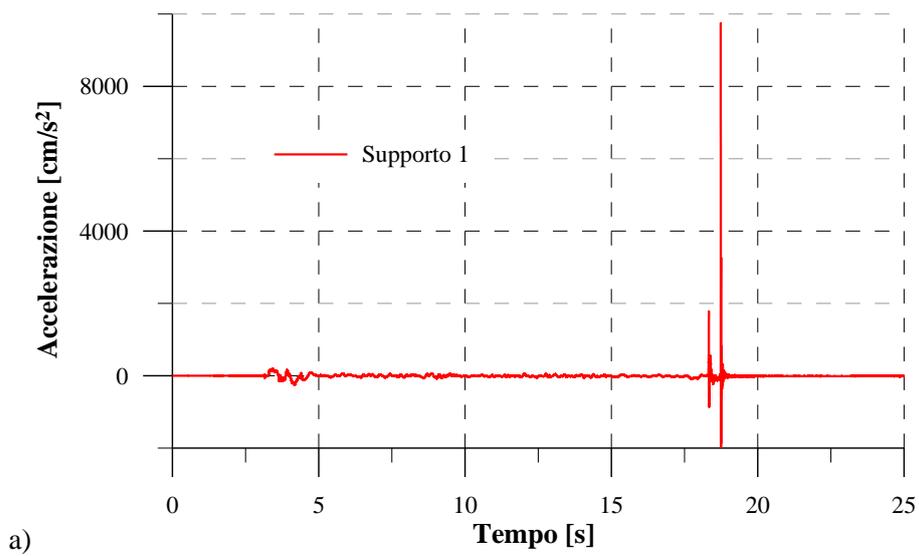


Figura 4.14. Modello di calcolo con denominazione nodi alla base del fercolo.



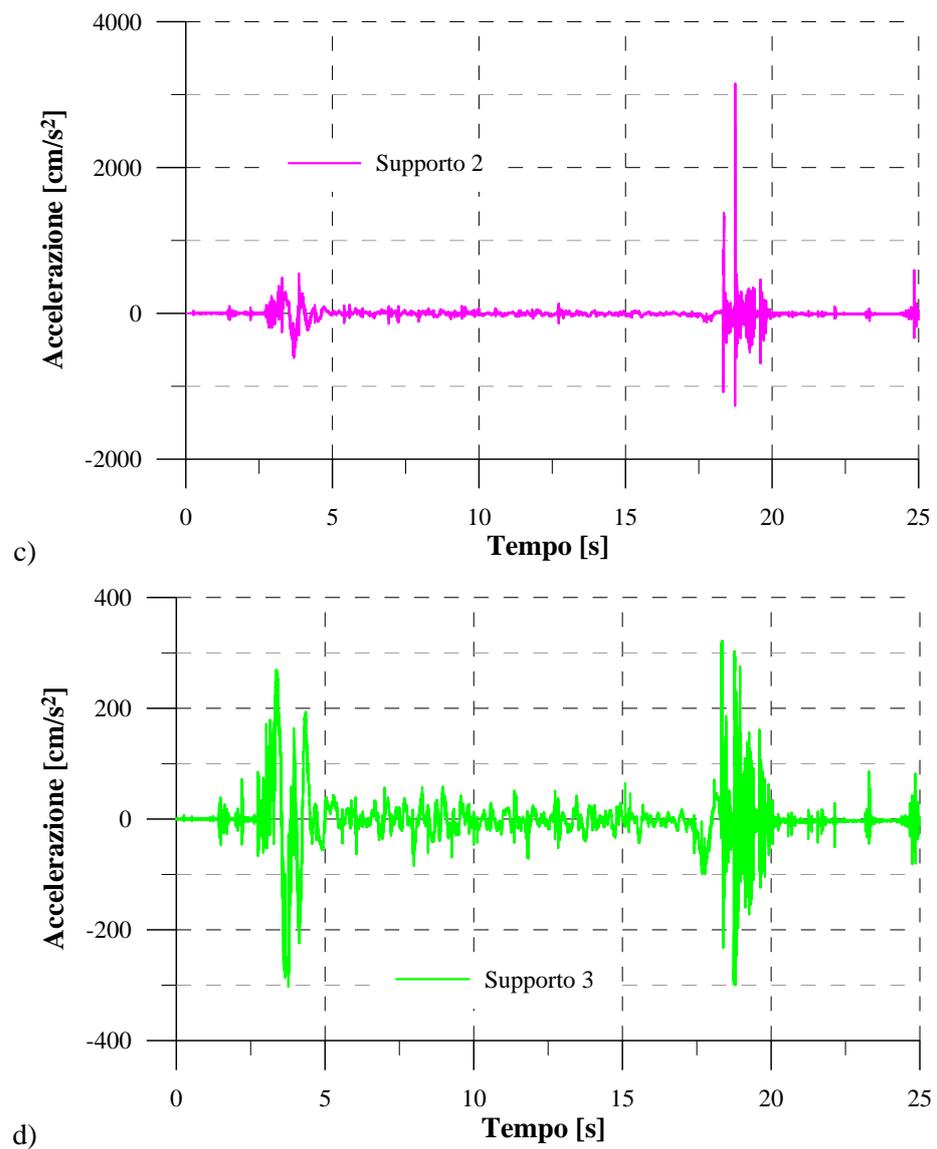


Figura 4.15. a) Storia temporale di accelerazione applicata al nodo 1; b) storia temporale di accelerazione applicata al nodo 4; c) storia temporale di accelerazione applicata al nodo 2; d) storia temporale di accelerazione applicata al nodo 3.

Inizialmente sono state confrontate le storie temporali di accelerazione alla testa della statua, utilizzando dei coefficienti di smorzamento,  $\xi_1$  e  $\xi_2$ , pari a 0.05. Si è visto che le accelerazioni registrate sperimentalmente, si attenuavano con legge diversa rispetto a quelle numeriche (vedi Figura 4.16).

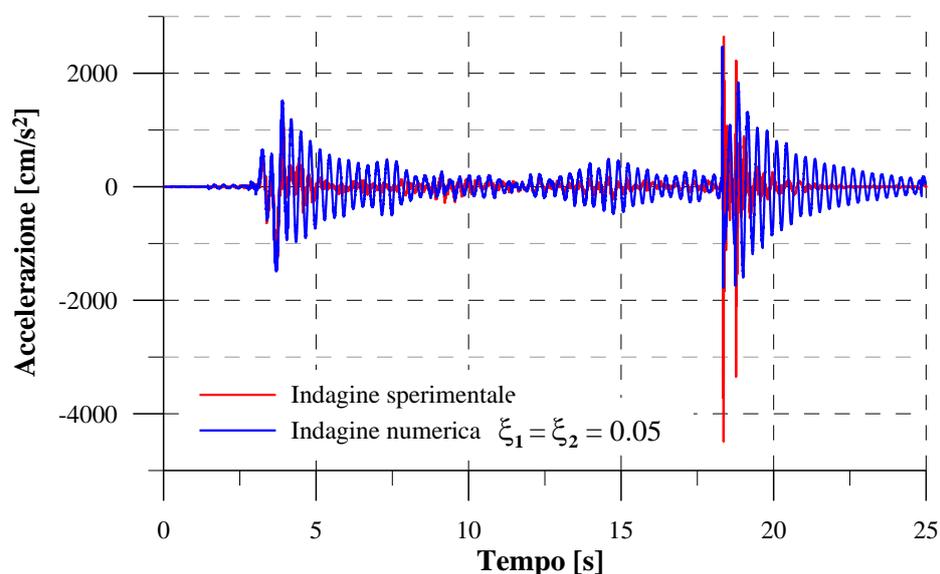


Figura 4.16. Storie temporali di accelerazione alla testa della statua in direzione longitudinale, registrate sperimentalmente e numericamente.

Si è deciso, dunque, di aumentare i coefficienti di smorzamento fino a un valore di 0.1.

In Figura 4.17 sono riportate le storie temporali di accelerazione alla testa della statua in direzione longitudinale (Figura 4.17-a) e in direzione trasversale (Figura 4.17-b) registrate sperimentalmente e numericamente.

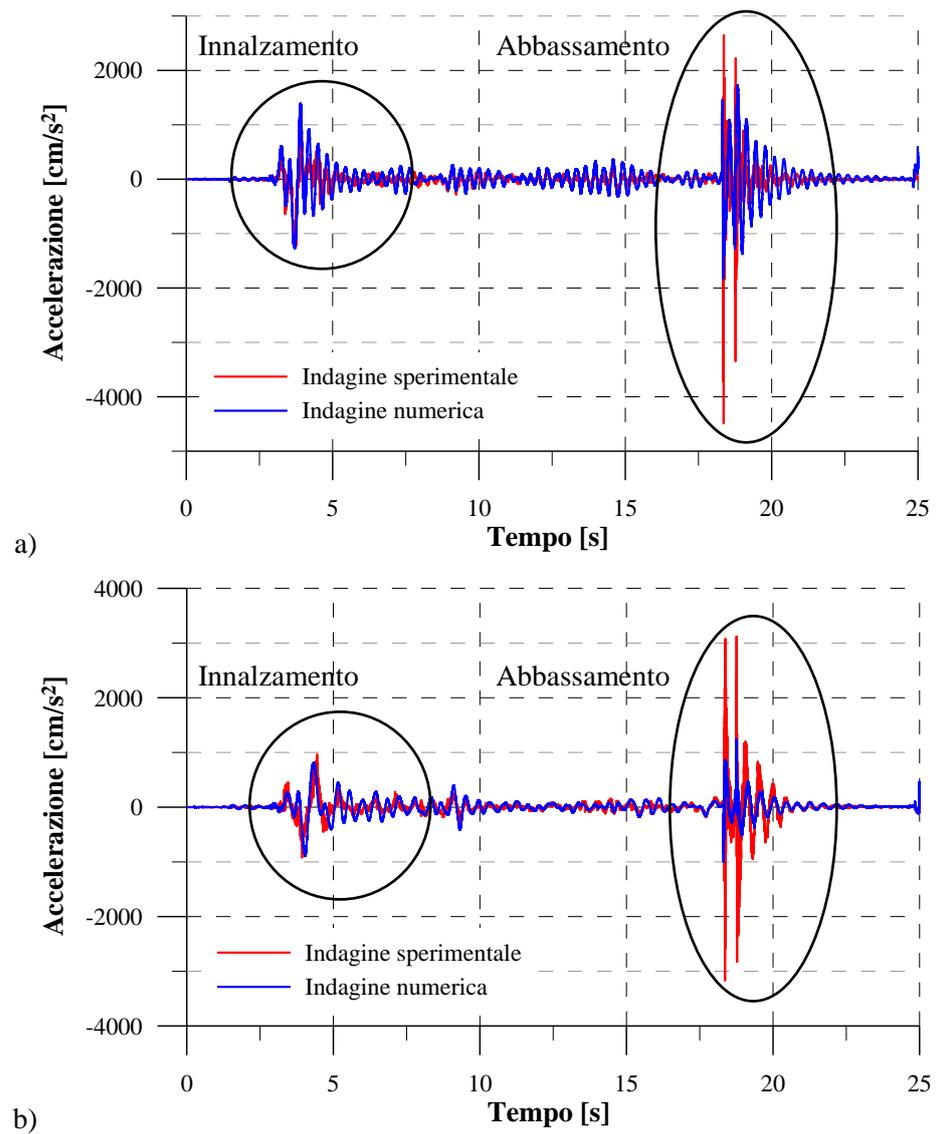


Figura 4.17. Storie temporali di accelerazione alla testa della statua registrate sperimentalmente e numericamente. a) In direzione longitudinale; b) in direzione trasversale.

Una volta definiti i coefficienti di smorzamento,  $\xi_1$  e  $\xi_2$ , pari a 0.1, sono stati determinati i valori di  $\alpha$  e  $\beta$ :

$$\alpha = 1.681346; \beta = 0.005789.$$

#### 4.6 Analisi della risposta sotto carichi impulsivi

Al fine di verificare il comportamento del simulacro sotto l'azione di carichi impulsivi, è stata assegnata a ciascuno dei quattro supporti alla base del fercolo, una storia temporale di spostamento (vedi Figura 4.19), in modo da simulare l'innalzamento sincrono a velocità costante ( $V = 1$  cm/s) e l'abbassamento asincrono (con un ritardo di 0.1 s) della statua. In tal modo si sono ottenuti due urti asincroni di intensità pari a  $m\Delta V$ , dove  $m$  è la massa afferente a ciascun supporto e  $\Delta V$  è la differenza tra la velocità iniziale e la velocità finale ( $\Delta V = V_i - V_f = 1 - 0 = 1$  cm/s).

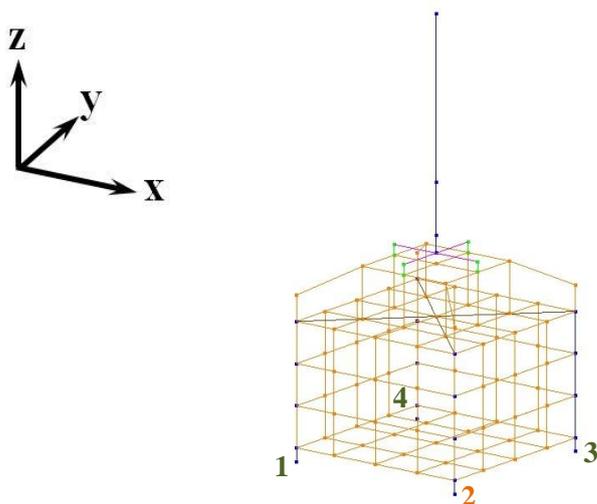


Figura 4.18. Modello di calcolo con denominazione nodi alla base del fercolo.

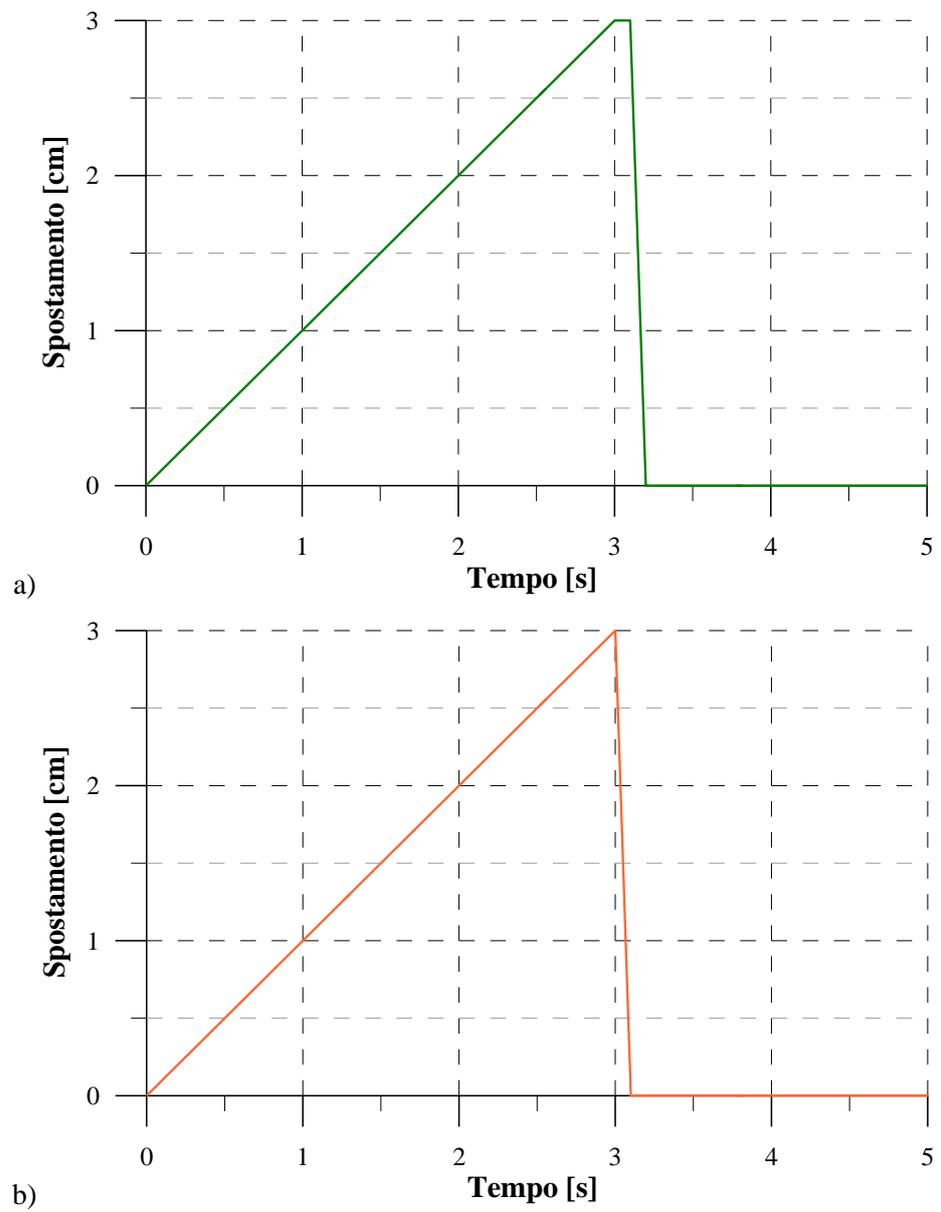


Figura 4.19. a) Storia temporale di spostamento applicata ai nodi 1, 4 e 3; b) storia temporale di spostamento applicata al nodo 2.

Il moto che deriva da queste storie temporali di spostamento, è caratterizzato da un'oscillazione principale della statua con componenti di rotazione intorno a due assi paralleli agli assi globali x e y.

La risposta strutturale è stata ottenuta mediante integrazione diretta delle equazioni del moto con il metodo di Newmark [32].

Il passo temporale è  $dt = 0.001$  s con una finestra di osservazione di 5 s (5000 passi).

In Figura 4.20 vengono riportate le storie temporali di accelerazione registrate alla testa della statua in direzione del moto e nella direzione trasversale.

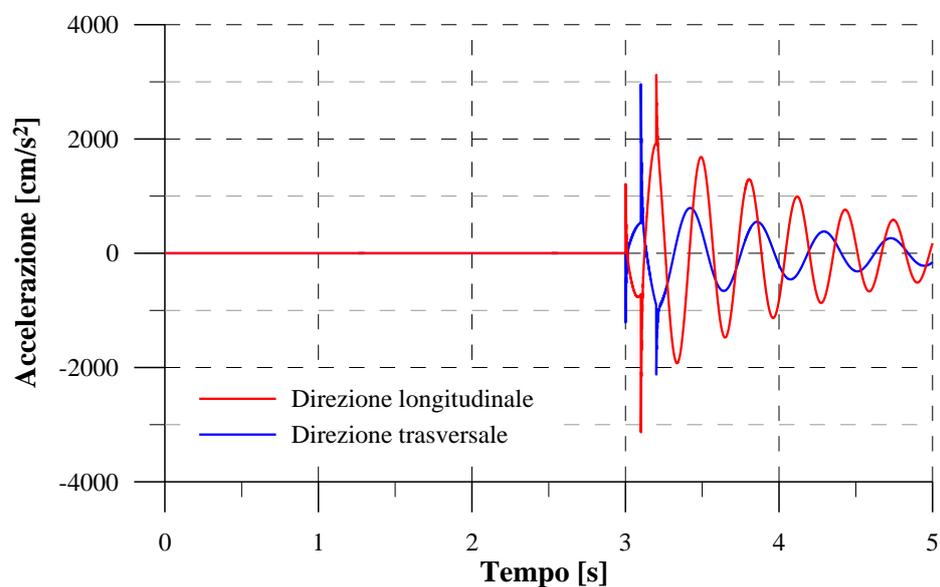


Figura 4.20. Storie temporali di accelerazioni alla testa della statua, in direzione trasversale e in direzione longitudinale.

Sono evidenti gli effetti delle due storie temporali di spostamento (vedi Figura 4.21): inizialmente avviene l'innalzamento, il supporto 2 inizia la

discesa (3 s), il supporto 2 scende al suolo e avviene il primo urto (3.1 s), i supporti 1,4 e 2 scendono al suolo e avviene il secondo urto (3.2 s), segue l'oscillazione libera della testa della statua.

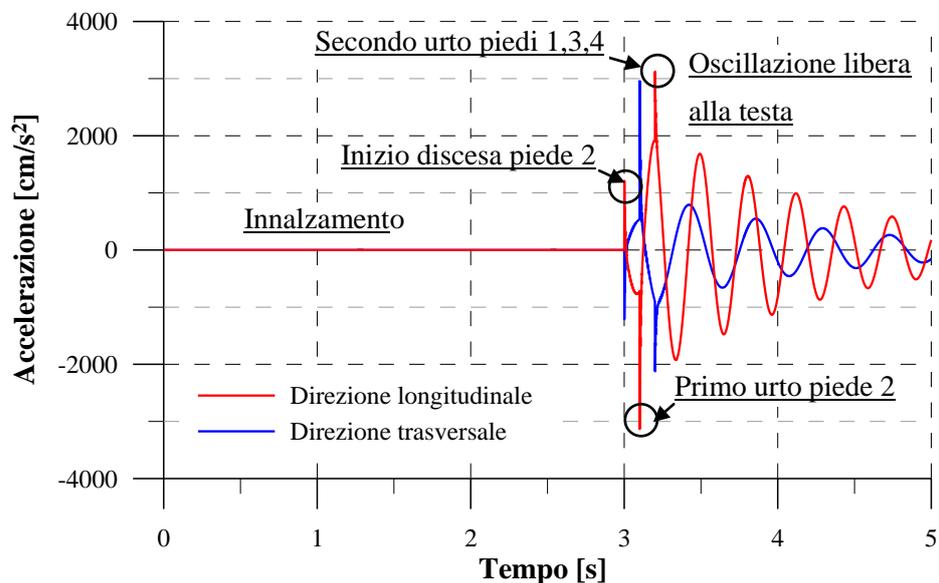


Figura 4.21. Storie temporali di accelerazioni alla testa della statua, in direzione trasversale e in direzione longitudinale con descrizione delle fasi di innalzamento e abbassamento del simulacro.

Come è già stato verificato durante le indagini sperimentali, vi è una sostanziale differenza tra le accelerazioni registrate in direzione longitudinale al moto e quelle trasversali a causa della diversa condizione di vincolo tra la base della statua e il fercolo. Vi è infatti una differenza di rigidità lungo le due direzioni. Le accelerazioni registrate alla testa della statua, in entrambe le direzioni, risentono notevolmente dell'azione dei carichi impulsivi a cui è sottoposta la base del fercolo.

In figura 4.22 sono riportate le storie temporali di momento che nascono alla base della statua, in direzione trasversale e in direzione longitudinale.

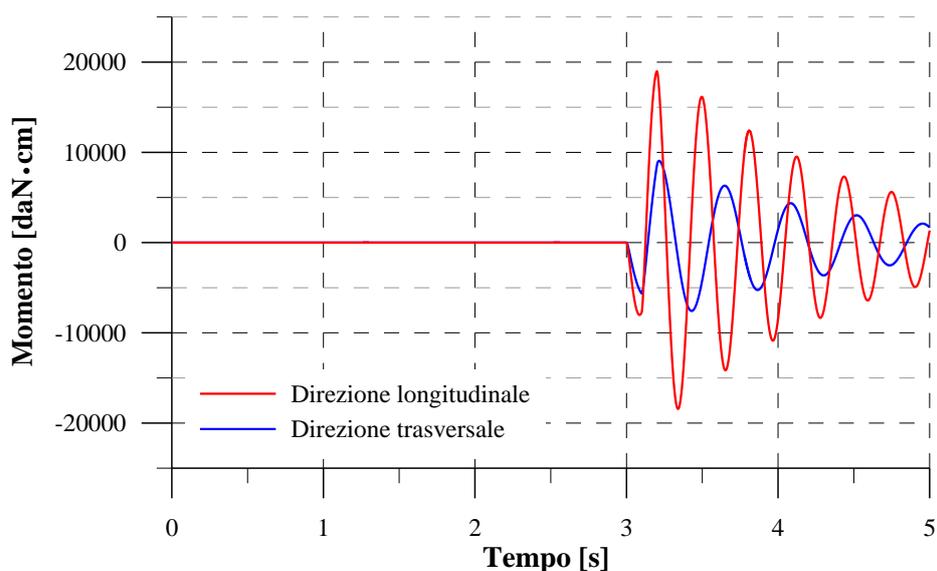


Figura 4.22. Storie temporali di momento alla base della statua, in direzione trasversale e in direzione longitudinale.

I momenti registrati alla base della statua in direzione longitudinale sono di maggiore entità rispetto a quelli registrati in direzione trasversale. Inoltre, entrambi i momenti risentono notevolmente dell'azione dei carichi impulsivi a cui è sottoposta la base del fero.

In figura 4.23 sono riportate le storie temporali di spostamento alla testa della statua rispetto alla base, in direzione trasversale e in direzione longitudinale.

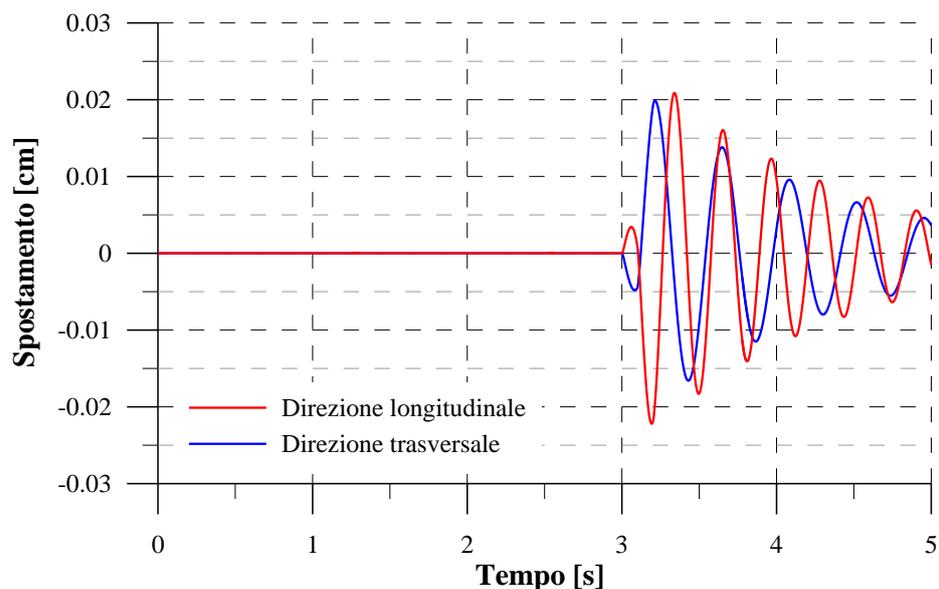


Figura 4.23. Storie temporali di spostamento alla testa della statua, in direzione trasversale e in direzione longitudinale.

Gli spostamenti registrati alla testa della statua sono di bassa entità. Le registrazioni in direzione longitudinale sono maggiori di quelle in direzione trasversale.

#### 4.7 Simulazione di un sistema per il controllo delle vibrazioni

Al fine di ridurre le vibrazioni indotte al simulacro dagli urti durante la fase di abbassamento, si è valutata la possibilità di inserire alla base del fercolo un attenuatore di vibrazioni, *shock absorber*, in grado di assorbire l'impulso energetico dell'urto.

Sistemi di questo tipo sono solitamente impiegati in campo meccanico per il controllo delle vibrazioni dei veicoli e dei macchinari.

In particolare sono disponibili in commercio sistemi antivibranti come quello riportato in Figura 4.24, le cui caratteristiche meccaniche (curve F- $\delta$ ) sono riportate in Figura 4.25.

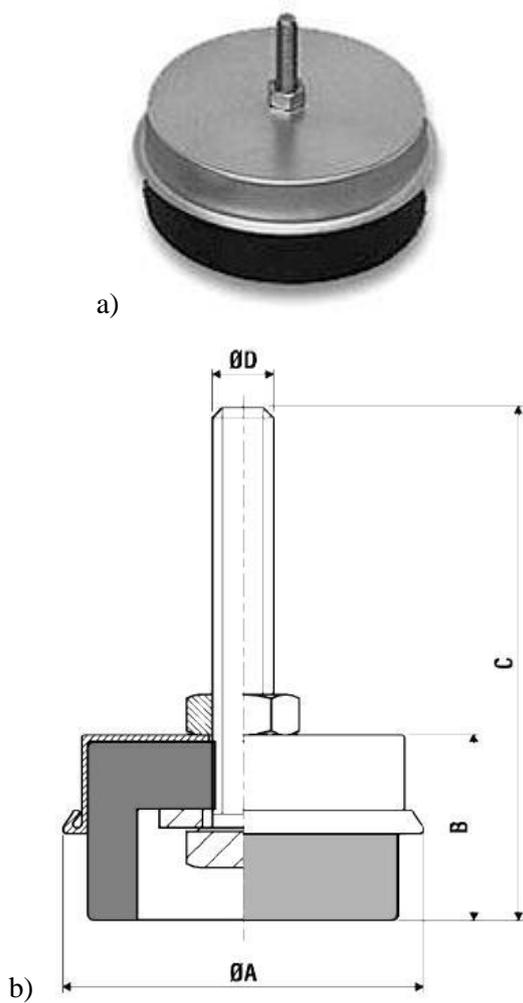


Figura 4.24. a) Sistema antivibrante; b) sezione costruttiva.

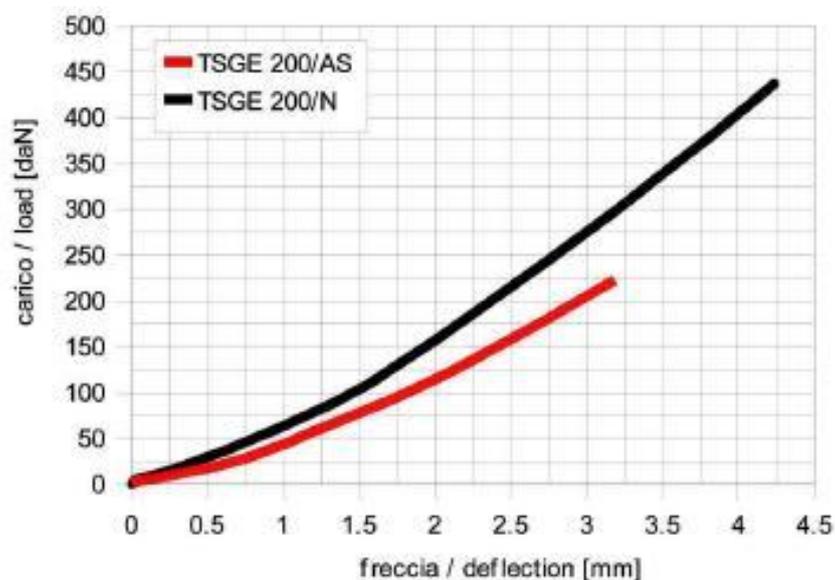


Figura 4.25. Diagramma sforzo-deformazione relativo all'attenuatore di vibrazioni Vibrostop TSGE 200 N.

Il sistema Vibrostop TSGE 200N è stato modellato con un elemento tipo boundary, a comportamento viscoelastico lineare posto al di sotto di ciascun supporto del fecolo. La rigidità equivalente corrisponde alla rigidità secante ottenuta dalle curve  $F-\delta$  tipica del dispositivo, mentre lo smorzamento equivalente è assunto pari a  $\xi_{eq} = 0.2$ . In Tabella 4.2 sono sintetizzate le caratteristiche meccaniche e geometriche del dispositivo.

CARATT. FISICHE		DIMENSIONI			
<b>K</b> Rigidità [daN/cm]	$\xi_{eq}$ Smorzamento	$\Phi A$ [mm]	<b>B</b> [mm]	<b>C</b> [mm]	$\Phi D$ [mm]
840	0.2	104	45	105	M12

Tabella 4.2. Caratteristiche attenuatore di vibrazioni.

In Figura 4.26 è riportato il modello di calcolo con i quattro attenuatori di vibrazioni alla base del fercolo, schematizzati come una molla in parallelo con un dissipatore.

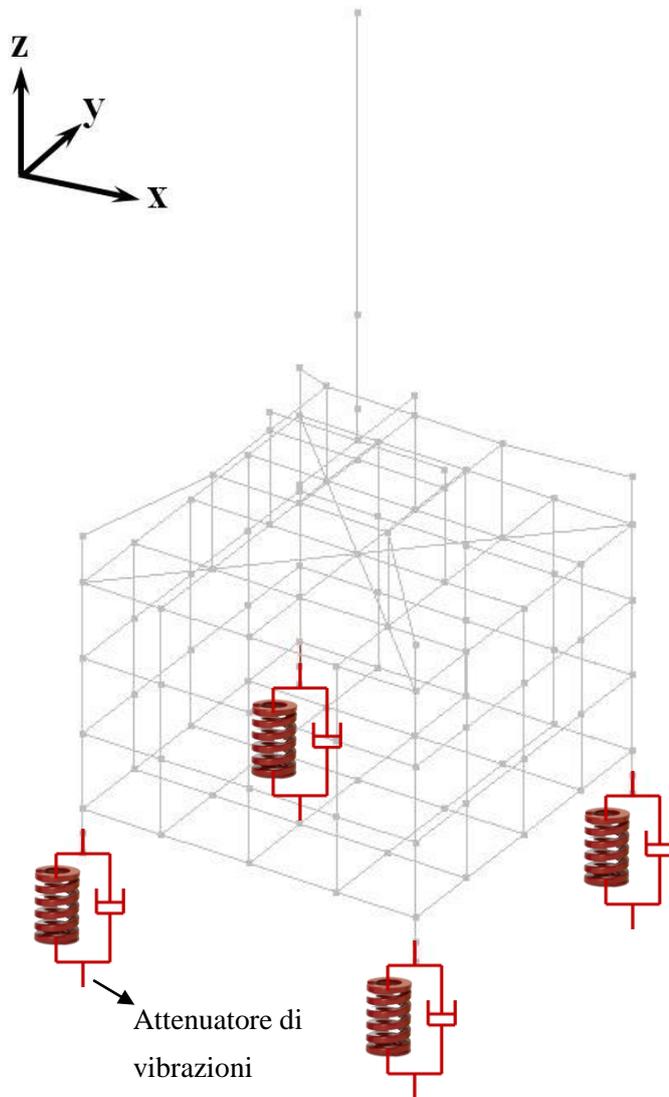


Figura 4.26. Modello di calcolo con attenuatori di vibrazioni.

#### 4.7.1 Valutazione dell'efficacia del sistema sotto carichi impulsivi

In Figura 4.27 viene riportato il diagramma sforzo - deformazione relativo all'attenuatore di vibrazioni soggetto all'azione dei carichi impulsivi.

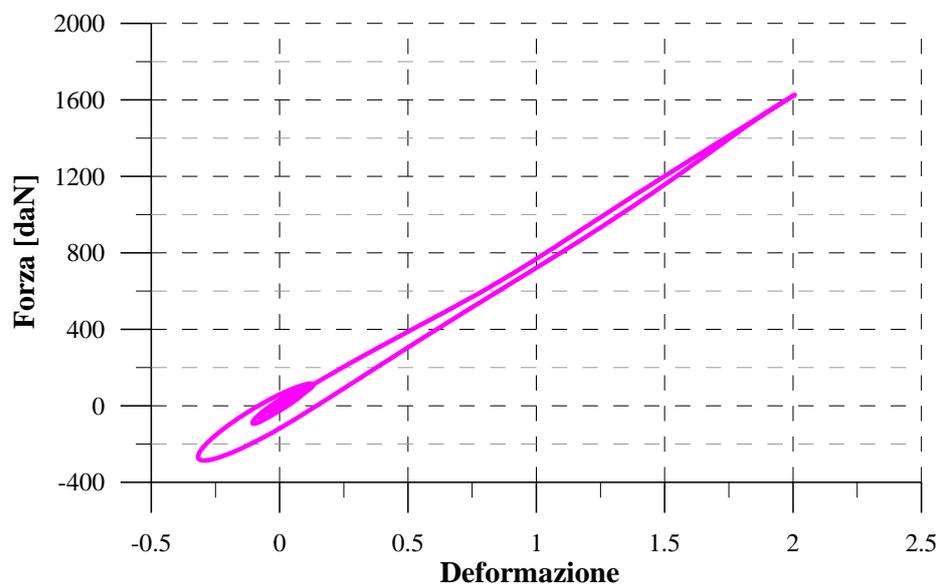


Figura 4.27. Diagramma sforzo – deformazione relativo all'attenuatore di vibrazione.

In Figura 4.28 viene riportato l'andamento dello sforzo normale sull'attenuatore di vibrazioni soggetto all'azione dei carichi impulsivi, al variare del tempo. Nei primi 3 secondi in cui avviene l'innalzamento del simulacro a velocità costante, non si attivano forze inerziali.

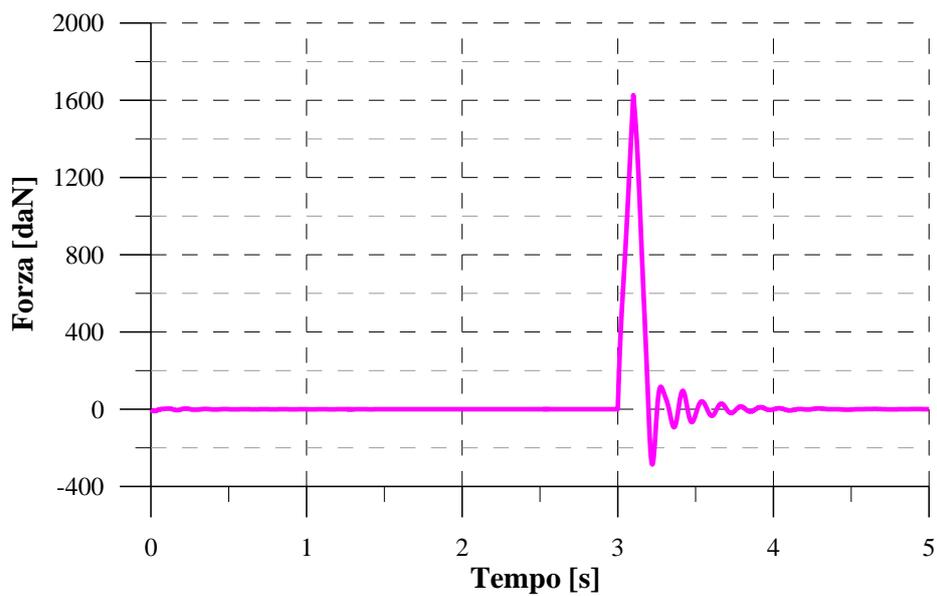


Figura 4.28. Andamento dello sforzo normale sull'attenuatore di vibrazioni, al variare del tempo.

In Figura 4.29 vengono riportate le storie temporali di accelerazione registrate alla testa della statua in direzione longitudinale (a) e in direzione trasversale (b), in assenza e in presenza degli attenuatori di vibrazioni.

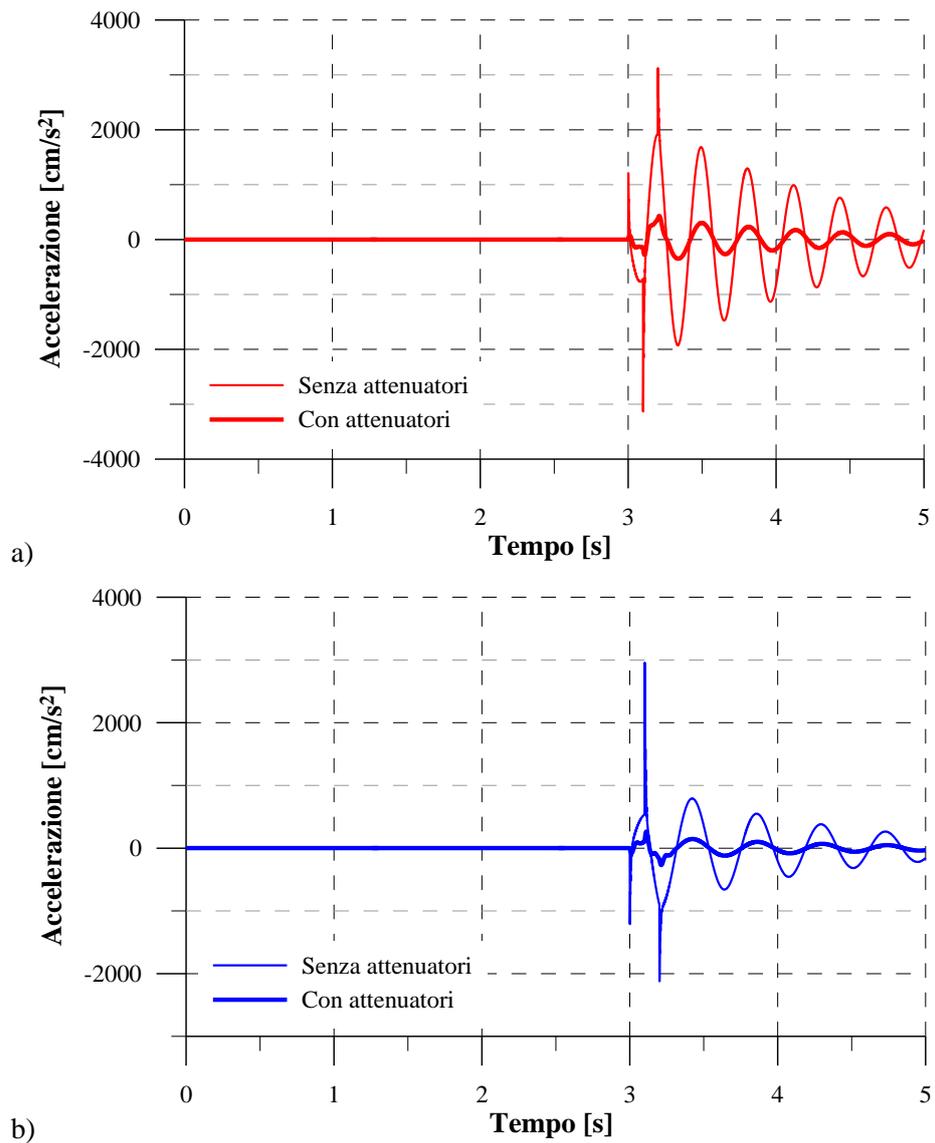
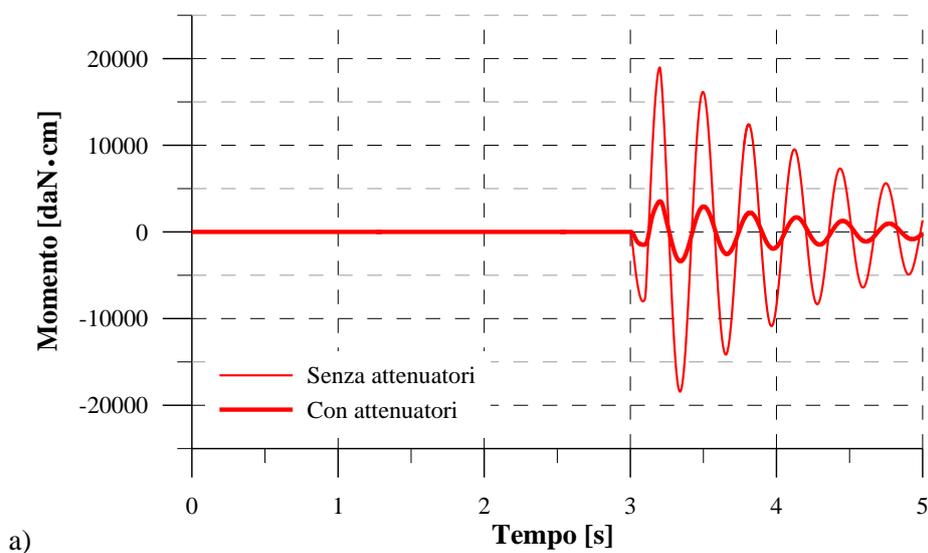


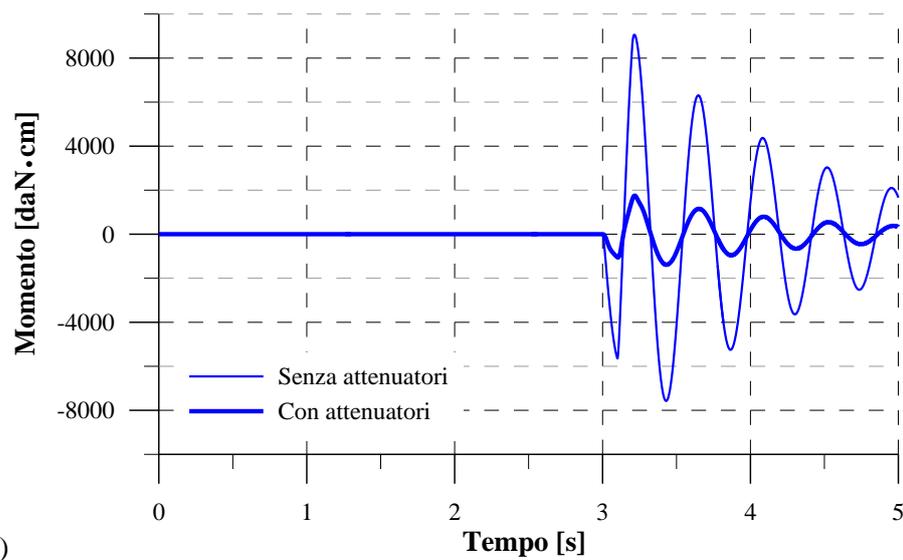
Figura 4.29. Storie temporali di accelerazioni alla testa della statua in presenza e in assenza di attenuatori di vibrazioni. a) In direzione longitudinale; b) in direzione trasversale.

Le storie temporali di accelerazione, sia in direzione trasversale che in direzione longitudinale, in presenza di attenuatori di vibrazioni, presentano intensità notevolmente inferiori.

In particolare i valori di picco delle accelerazioni in direzione trasversale, sono state ridotte del 88%; i valori di picco delle accelerazioni in direzione longitudinale sono stati ridotti del 96%.

In Figura 4.30 vengono riportate le storie temporali di momento registrate alla base della statua in direzione longitudinale (a) e in direzione trasversale (b), in assenza e in presenza degli attenuatori di vibrazioni.





b)

Figura 4.30. Storie temporali di momento alla base della statua in presenza e in assenza di attenuatori di vibrazioni. a) In direzione longitudinale; b) in direzione trasversale.

Le storie temporali di momento, sia in direzione trasversale che in direzione longitudinale, in presenza di attenuatori di vibrazioni, presentano intensità notevolmente inferiori.

In particolare i valori di picco dei momenti in direzione trasversale, sono state ridotte dell'81%; i valori di picco dei momenti in direzione longitudinale sono stati ridotti dell'81%.

In Figura 4.31 vengono riportate le storie temporali di spostamento registrate alla testa della statua rispetto alla base, in direzione longitudinale (a) e in direzione trasversale (b), in assenza e in presenza degli attenuatori di vibrazioni.

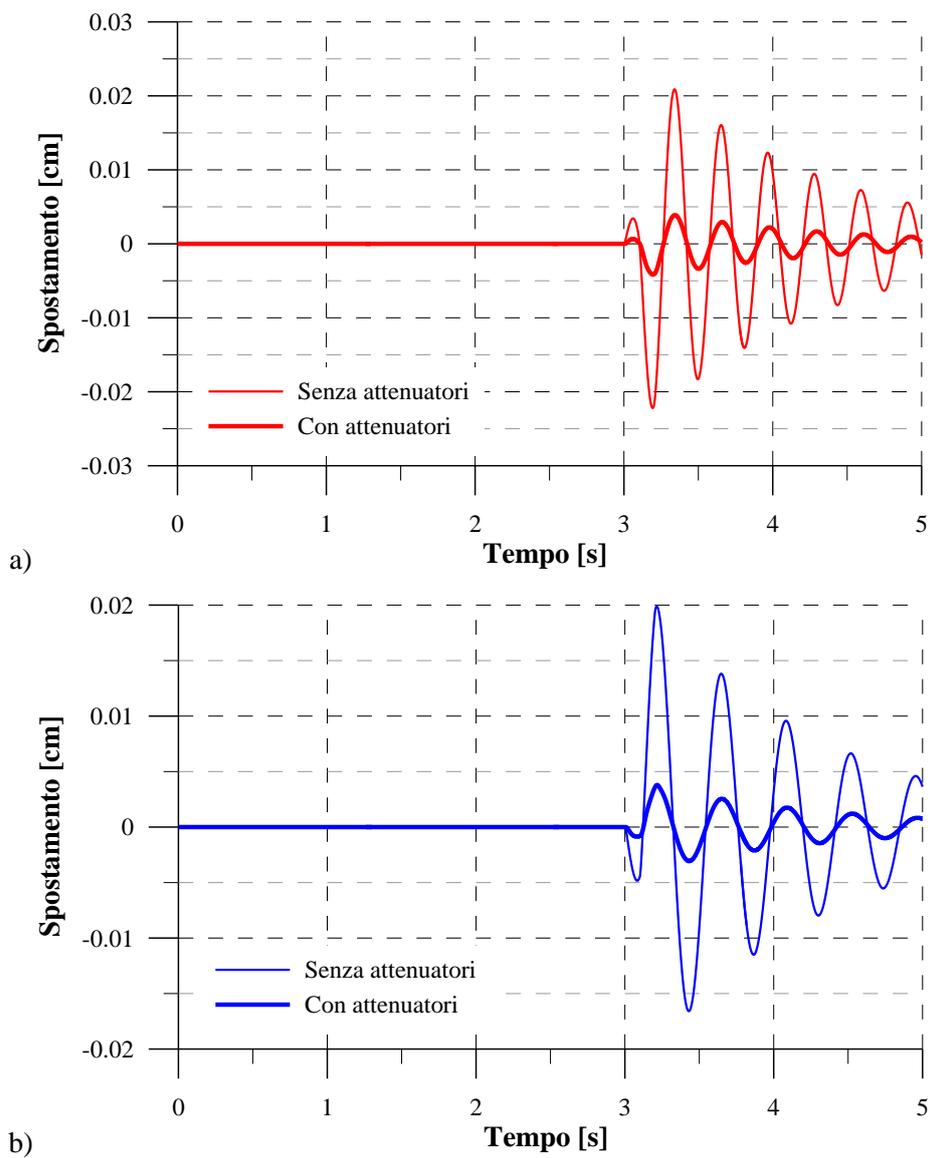


Figura 4.31. Storie temporali di spostamento alla base della statua in presenza e in assenza di attenuatori di vibrazioni. a) In direzione longitudinale; b) in direzione trasversale.

Le storie temporali di spostamento, sia in direzione trasversale che in direzione longitudinale, in presenza di attenuatori di vibrazioni, presentano intensità notevolmente inferiori.

In particolare i valori di picco degli spostamenti in direzione trasversale, sono state ridotte dell'81%; i valori di picco dei momenti in direzione longitudinale sono stati ridotti dell'82%.

La presenza dell'attenuatore di vibrazioni ha apportato delle modifiche considerevoli sul comportamento dinamico del simulacro sotto l'azione di carichi impulsivi. Si nota un drastico abbattimento delle risposte strutturali, sia in termini di accelerazioni e spostamenti alla testa, che in termini di momento alla base della statua. In particolare i valori di picco delle accelerazioni alla testa della statua in direzione trasversale e in direzione longitudinale, sono state ridotte rispettivamente del 88% e del 96%; i valori di picco dei momenti alla base della statua in direzione trasversale e in direzione longitudinale, sono stati ridotti dell'81%; i valori di picco degli spostamenti alla testa della statua in direzione trasversale e in direzione longitudinale, sono stati ridotti rispettivamente dell'81% e dell'82%.

## CONCLUSIONI

Nella presente tesi, sulla base dei risultati di indagini sperimentali svolte da Prof. M. Di Paola, il Prof. A. Pirrotta, il Dott. Ing G. Navarra e il Dott. Ing. F. Lo Iacono, afferenti al Dipartimento di Ingegneria strutturale aerospaziale e geotecnica dell'Università di Palermo, sulla misura delle vibrazioni indotte sul simulacro dell'Immacolata durante la processione per le vie cittadine, si è svolto uno studio preliminare per indagare la validità di introdurre dei dispositivi idonei a mitigare le vibrazioni indotte sul simulacro dalle scosse non sismiche ma dovute alla non perfetta sincronizzazione nell'innalzamento ed abbassamento del fercolo, nel pieno rispetto della conservazione dell'opera d'arte di notevole pregio.

Dalle analisi delle registrazioni si è potuto osservare che durante la fase dell'avanzamento, il simulacro non è soggetto a significative accelerazioni, mentre durante la fase di sollevamento e di abbassamento si registrano i picchi più elevati delle accelerazioni. L'analisi dei segnali mostra che le accelerazioni in direzione verticale a livelli diversi sono pressoché identiche.

Ciò comporta che i gradi di libertà dinamicamente significativi, oltre ai sei gradi di libertà di corpo rigido posseduti dal fercolo, sono da individuare negli spostamenti orizzontali. Durante la fase di sollevamento sono state riscontrate accelerazioni alla base della statua, di entità piuttosto moderata e confrontabili tra loro, nonostante le accelerazioni in direzione trasversale fossero maggiori di quelle longitudinali. Viceversa, durante la fase di abbassamento, sia alla base che alla testa della statua, vi è una sostanziale differenza tra le accelerazioni registrate in direzione longitudinale al moto, che presentano intensità notevolmente inferiori, e quelle trasversali. Queste ultime risentono notevolmente dei picchi trasmessi dal contatto dei piedi del fercolo con il suolo, e alla testa presentano dei valori di picco che sono stati circa il doppio dell'accelerazione di gravità. In sintesi, tale indagine sperimentale, volta alla conoscenza delle entità di sollecitazioni indotte sul simulacro durante il trasporto in processione, ha messo in evidenza l'utilità delle prove dinamiche per caratterizzare il comportamento strutturale ed eventualmente individuare anomalie nel sistema di vincolo. Infatti i risultati delle analisi dei segnali registrati hanno permesso di evidenziare l'assenza di un adeguato sistema di connessione in direzione trasversale tra il fercolo e la statua.

Inoltre, sulla base dei risultati sperimentali è stato possibile identificare le caratteristiche dinamiche del sistema strutturale: fercolo-statua. Tali caratteristiche sono state considerate come dati per la simulazione numerica del comportamento dinamico attraverso un programma ad elementi finiti denominato: Nolian, prodotto dalla Softing S.r.l. di Roma.

L'obiettivo di questa simulazione numerica è quello di predire il comportamento dinamico del sistema strutturale dotato di dispositivi denominati attenuatori di vibrazioni e quindi di confrontarlo con quello originario in assenza di questi dispositivi.

## *Conclusioni*

Dal confronto dei risultati tra sistema strutturale originario e sistema strutturale dotato di attenuatori di vibrazioni, si palesa che la presenza dell'attenuatore di vibrazioni ha apportato delle modifiche considerevoli sul comportamento dinamico del simulacro sotto l'azione di carichi impulsivi. Si nota un drastico abbattimento delle risposte strutturali, sia in termini di accelerazioni e spostamenti alla testa, che in termini di momento alla base della statua. In particolare i valori di picco delle accelerazioni alla testa della statua in direzione trasversale e in direzione longitudinale, sono state ridotte rispettivamente del 88% e del 96%; i valori di picco dei momenti alla base della statua in direzione trasversale e in direzione longitudinale, sono stati ridotti dell'81%; i valori di picco degli spostamenti alla testa della statua in direzione trasversale e in direzione longitudinale, sono stati ridotti rispettivamente dell'81% e dell'82%.

Sulla base degli studi effettuati nella presente tesi, al fine di preservare il simulacro argenteo dell'Immacolata nel tempo, sarebbe opportuno inserire i dispositivi di controllo esaminati e cambiare la condizione di vincolo alla base della statua inserendo aste filettate e appositi dadi a farfalla lungo la direzione trasversale alla direzione del moto, dove questi sono mancanti.



## BIBLIOGRAFIA

- [1] Suhardjo J. , Spencer B. F. e Sain M. K., (1990), “Feedback–feedforward control of structures under seismic excitation” *Struct Safety*, 8, 69–89.
- [2] Nagarajaiah S., (1994), “Fuzzy controller for structures with hybrid isolation system” *Proceedings of First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, TA2-67–TA2-76.
- [3] Reinhorn A. M., Riley M. A., (1994), “Control of bridge vibrations with hybrid devices”. *Proceedings of First World Conference on Structural Control*, Los Angeles, CA, TA2-50–TA2-59.
- [4] Symans M. D., Kelly S. W., (1997), “Fuzzy logic control of structures with hybrid seismic isolation systems” *Proceedings of Eleventh VPI and SU Symposium on Structural Dynamics and Control*, Virginia Polytechnic and State University, Blacksburg, VA, 21–30.
- [5] Soong T. T. e Constantinou M. C., (1994), “*Passive and Active Structural Vibration Control in Civil Engineering*”, Springer, New York.

- [6] ATC, (1994), "Guidelines and commentary for the seismic rehabilitation of buildings. Report No. 33-02", *Applied Technology Council*, Redwood City, CA.
- [7] ATC, (1993), "Proceedings of seminar on seismic isolation, passive energy dissipation, and active control. Report No. ATC-17-1", *Applied Technology Council*, San Francisco, CA.
- [8] EERI, (1993), "Theme Issue: Passive energy dissipation" *Earthquake Spectra*, 9(3).
- [9] Constantinou M. C., Soong T. T., Dargush G. F., (1996), "*Passive energy dissipation systems for structural design and retrofit. NCEER Monograph*" National Center for Earthquake Engineering Research, Buffalo, NY.
- [10] Constantinou M. C., Symans M. D., (1993), "Seismic response of buildings with supplemental damping" *Journal of Structural Design of Tall Buildings*, 77-92.
- [11] Kelly J. M., (1993), "*Earthquake-Resistant Design with Rubber*" Springer, London.
- [12] Skinner R. I., Robinson W. H., e McVerry G. H., (1993), "*An Introduction to Seismic Isolation*". Wiley, Chichester.
- [13] EERI, (1990), "Theme Issue: Seismic isolation" *Earthquake Spectra*, 6(2).
- [14] Soong T. T., (1990), "*Active Structural Control: Theory and Practice*". Longman, New York.
- [15] Soong T. T., Masri S. F. e Housner G. W., (1991), "An overview of active structural control under seismic loads" *Earthquake Spectra*, 7(3), 483-505.
- [16] Fujino Y., Soong T. T., Spencer B. F. Jr, (1996), "Structural control: basic concepts and applications" *Proceedings of Structures Congress XIV*, Chicago, IL, 1277-87.

- [17] IASC (International Association for Structural Control), *“Proceedings of First World Conference on Structural Control”*, Los Angeles, CA.
- [18] Chang K. C., Shen K. L., Soong T. T. e Lai ML, (1994), *“Seismic retrofit of a concrete frame with added viscoelastic dampers”*. 5th Nat. Conf. on Earthquake Engng, Chicago, IL, 1994.
- [19] Shen K. L., Soong T. T., Chang K. C., Lai M. L., (1995), *“Seismic behavior of reinforced concrete frame with added viscoelastic dampers”*. Engng Struct, 17(5), 372–80.
- [20] Lai M. L., Chang K. C., Soong T. T., Hao D. S. e Yeh Y. C., (1995), *“Full-scale viscoelastically damped steel frame”* ASCE J Struct Engng, 121(1), 1443–7.
- [21] Prof. M. Di Paola, Prof. A. Pirrotta, Dott. Ing G. Navarra, Dott. Ing. F. Lo Iacono, (2010), *“Misura delle vibrazioni sul simulacro argenteo dell’Immacolata in processione”*, DISAG, Palermo.
- [22] G. Muscolino, (2002), *“Dinamica delle Strutture”*, McGraw-Hill Italia, Milano.
- [23] Giacomo Navarra, (2005), *“Analisi di strutture in zona sismica in presenza di dissipatori viscosi”*, Palermo.
- [24] V. Valentini, (2009), *“Isolamento sismico orizzontale alla base e sismicità verticale”*.
- [25] ENEA – MURST, (2001), *“Catastrofi naturali e loro conseguenze sul patrimonio culturale ed ambientale italiano – Mitigazione e previsione di alcune tipologie di eventi”*, Roma.
- [26] ENEA – MURST (Ente per le Nuove tecnologie l’Energia e l’Ambiente), *“Dispositivo a Gabbia Antivibrante per la movimentazione e il trasporto di oggetti vulnerabili quali strumentazione scientifica ed opere d’arte”*, G. De Canio.

- [27] P. F. Rotolo OFMConv., (1998), *“La Cappella dell’Immacolata nella Basilica di S. Francesco a Palermo”* – Edizioni Basilica S. Francesco d’Assisi, Palermo.
- [28] F. Puleo, (2001), *“Sotto l’ombra. La venerabile confraternita del Porto e Riporto di Maria SS.ma Immacolata nel 275° anno di fondazione”*, Palermo.
- [29] D. J. Ewins, (1984), *“Modal Testing: Theory and Practice”*, Research Studies Press LTD, UK.
- [30] N.M.M. Maia e J.M.M. Silva, (1997), *“Theoretical and Experimental Modal Analysis”*, Research Studies Press LTD, UK.
- [31] J. S. Bendat e A. G. Piersol, (1971), *“Random Data: Analysis and measurement procedures”*, John Wiley & Sons, New York, USA.
- [32] Newmark, N.M., (1959), *“A Method of Computation for Structural Dynamics”*, Journal of the Engineering Mechanics Division, ASCE.