

INDAGINI NON DISTRUTTIVE SU STRUTTURE  
**Applicazioni a ponti ferroviari in muratura**

A.I.C.E. Srl

Dott. Ing. Silvio Levrero

Dott. Ing. Renato Rabaioli

Dott. Ing. Vittorio Mignacco

Vengono di seguito descritte le metodologie di indagine utilizzate per il controllo e la verifica strutturale di un viadotto ferroviario realizzato in muratura di pietra e di mattoni alla fine del secolo scorso.

Tale indagini, condotte ai sensi della Circolare del Ministero dei Trasporti D.C. V del 5 maggio 1988 prot. 643(54)06, si sono basate sull'esecuzione di prove non distruttive (P.n.D.) aventi il duplice scopo di caratterizzare da un punto di vista meccanico i materiali impiegati ed analizzare da un punto di vista dinamico il comportamento globale della struttura; il tutto finalizzato alla costituzione di un modello matematico agli elementi finiti in grado di simulare il reale comportamento dell'opera per carichi diversi da quelli di progetto e di esercizio.

In particolare le indagini sui materiali hanno permesso di stimare i valori di modulo elastico da inserire in prima ipotesi nel modello numerico e quelle dinamiche hanno consentito di effettuare tarature successive del modello.

L'analisi statica condotta sul modello così tarato e la relativa verifica delle sezioni più sollecitate per le combinazioni di carico previste dalla normativa, hanno permesso la riclassificazione del manufatto per la categoria RIV C2.

Tutte le prestazioni di controllo ed analisi descritte in dettaglio sono state effettuate senza recare disturbo alla circolazione dei convogli.

## 1. DESCRIZIONE DEL MANUFATTO

Il viadotto in oggetto, ad andamento rettilineo, si sviluppa su di una lunghezza di circa 134 metri ed è costituito da sette campate realizzate in muratura di mattoni con tipologia ad arco a direttrice circolare: ciascun arco ha una luce netta pari a metri 12, freccia di metri 6 e spessore costante di cm.60 (vedi fig. 1).

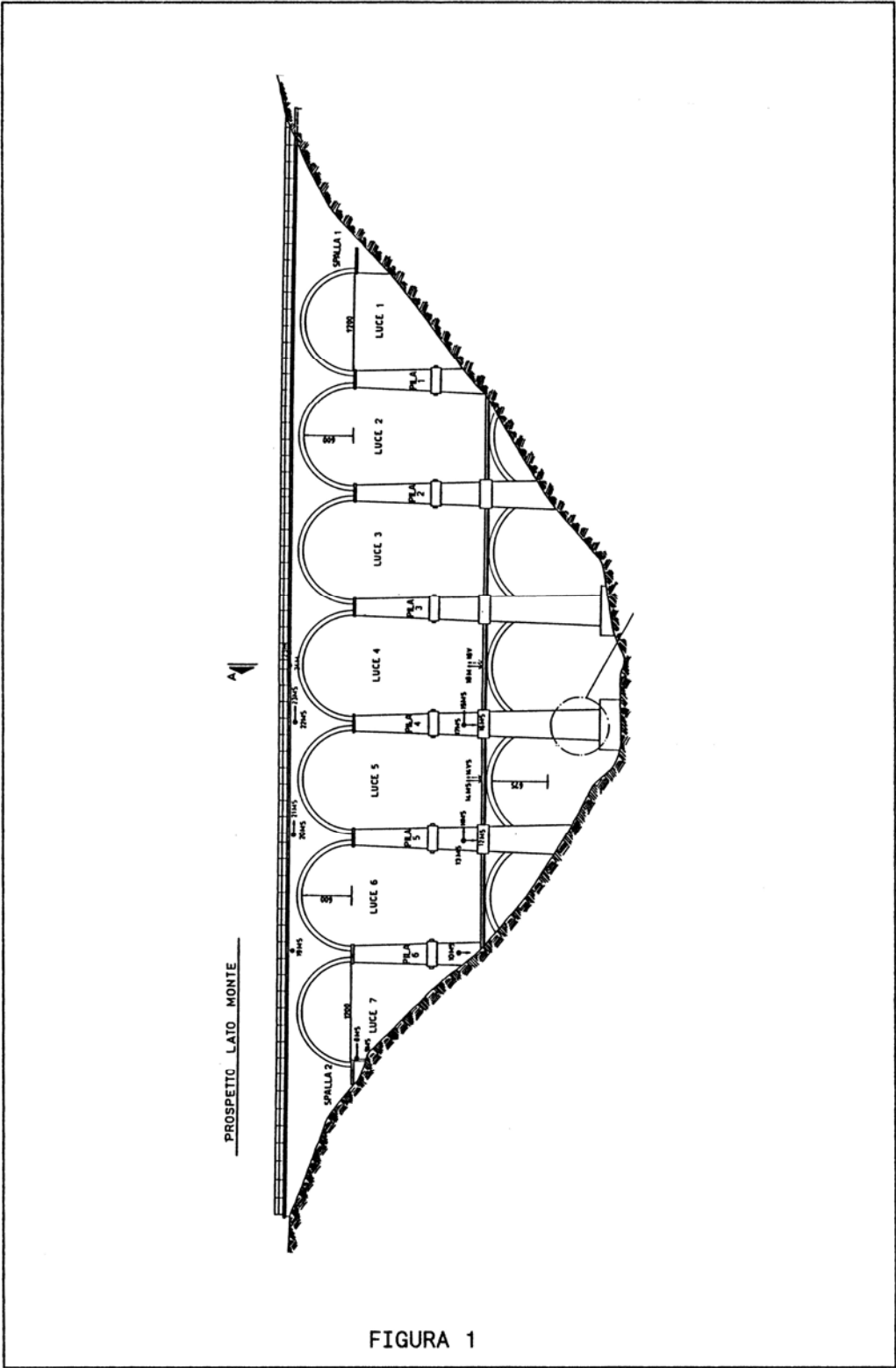
Le campate intermedie sono impostate su pile massicce a sezione rettangolare realizzate in muratura di pietrame, di dimensioni variabili con l'altezza. Le arcate terminali si innestano su spalle in pietra.

La sezione trasversale dell'impalcato misura, fra i parapetti, m.4.10; l'altezza libera delle pile (le più alte misurano oltre 32 metri) risulta ridotta da una successione di archi circolari ribassati che realizzano una vera e propria controventatura in direzione longitudinale ed identificano a questo livello un secondo impalcato pedonale la cui continuità è garantita da aperture realizzate nelle pile stesse.

Le fondazioni originali erano tutte di tipo diretto.

Una serie di interventi di risanamento compiuti negli anni 1985 e 1986 hanno riguardato arcate, pile e fondazioni: in particolare, gli archi in muratura sono stati rinforzati tramite applicazione all'intradosso di un secondo arco in cemento armato (spritz beton e rete elettrosaldata) dello spessore di cm.18, i muri tamponi sono stati rivestiti con opportune paretine, le fondazioni delle pile centrali sono state rinforzate con l'impiego di micropali; inoltre, a livello del camminamento intermedio, è stata realizzata in corrispondenza delle aperture nelle pile una diaframmatura orizzontale.

Una dettagliata ispezione visiva non ha rilevato presenza di degradi dovuti alle sollecitazioni indotte dai carichi permanenti o da quelli transitanti, ma solo tracce di umidità diffusa all'intradosso degli archi.



## 2. CARATTERIZZAZIONE MECCANICA DEI MATERIALI

Al fine di poter qualificare dal punto di vista meccanico le murature costituenti il manufatto, si è proceduto alla determinazione sperimentale della velocità di propagazione delle onde elastiche nei mezzi indagati.

Facendo riferimento alle UNI 9524, i rilievi microsismici sono stati condotti utilizzando impulsi sia di tipo sonico che ultrasonico. I valori di velocità così ottenuti hanno permesso di determinare i moduli elastici con la formula sperimentale:

$$E = \frac{(1 + \mu) \cdot (1 - 2\mu)}{(1 - \mu)} \cdot \frac{J}{g} \cdot v^2$$

(dove  $J$  è il peso specifico del mezzo,  $g$  l'accelerazione di gravità e  $\mu$  il modulo di Poisson) e stimare il valore della resistenza a compressione.

Le misurazioni effettuate hanno fornito risultati omogenei fra loro, tenuto conto delle differenze esistenti fra le due metodologie d'indagine.

Infatti le prove ultrasoniche permettono di indagare "puntualmente" la struttura, concentrando l'attenzione su zone di dimensioni relativamente piccole, mentre le prove con onde soniche permettono di analizzare il comportamento complessivo di zone molto più estese e forniscono dei valori medi comprensivi di eventuali irregolarità, come la presenza di piccole cavità, discontinuità di materiale nei corsi di malta e così via.

Tenuto conto di questi fattori, si è immesso in input nel modello un valore di modulo elastico (coincidente con quello ottenuto tramite prove O.S.) pari a 6900 MPa per gli archi in mattoni, e di 11600 MPa per la muratura in pietrame. In relazione a quest'ultima, si ricorda che l'indagine ultrasonica è stata condotta al centro di alcuni conci ed i risultati ottenuti possono essere impiegati per qualificare il materiale lapideo di cui ogni singolo blocco è costituito, ma non la muratura nel suo complesso.

### 3. CARATTERIZZAZIONE DINAMICA SPERIMENTALE

Ogni struttura reale risponde alle sollecitazioni esterne, siano esse di tipo dinamico che quasi statico, ricercando la propria configurazione di equilibrio ed oscillando intorno ad essa.

Come noto dalla dinamica delle strutture, le oscillazioni dipendono dalla geometria, dalle condizioni vincolari, dai materiali e dalle masse in gioco di ogni manufatto.

Studiare queste vibrazioni, ed in particolare determinare le frequenze proprie, le configurazioni modali relative e tutti i parametri dinamici in gioco, consente di disporre di informazioni importanti da un punto di vista ingegneristico circa il comportamento globale della struttura.

L'analisi delle vibrazioni può essere condotta sia nel dominio del tempo che in quello della frequenza: in termini elementari, qualunque moto periodico di natura oscillatoria può essere scomposto in una serie di moti armonici semplici, ciascuno dei quali è caratterizzato da un periodo (e quindi pulsazione e frequenza) proprio, una fase, un'ampiezza. Una volta identificate le armoniche componenti, può essere facilmente costruito, nel dominio delle frequenze, lo spettro di risposta (vedi figura 2).

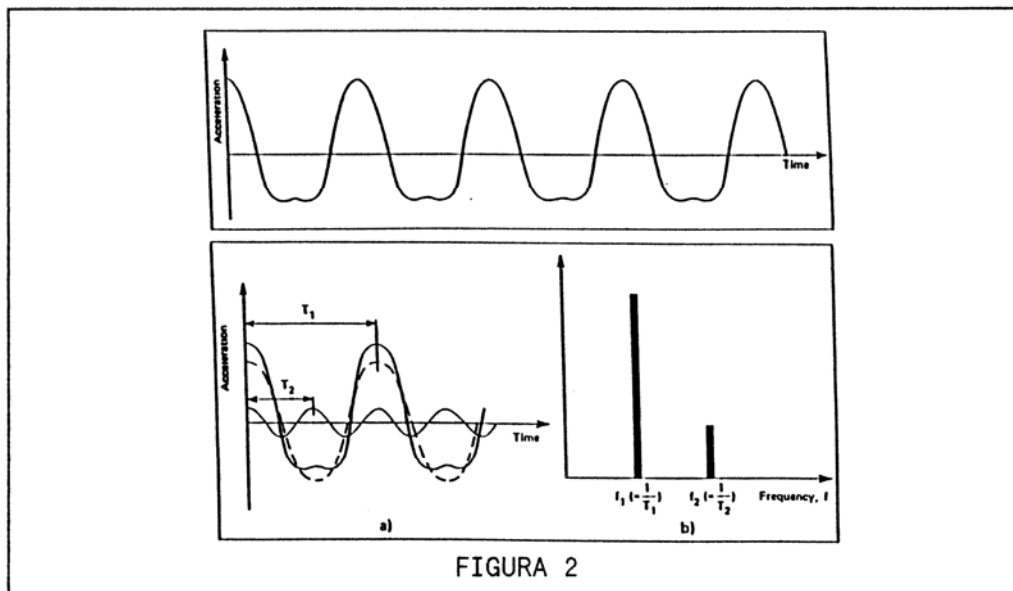


FIGURA 2

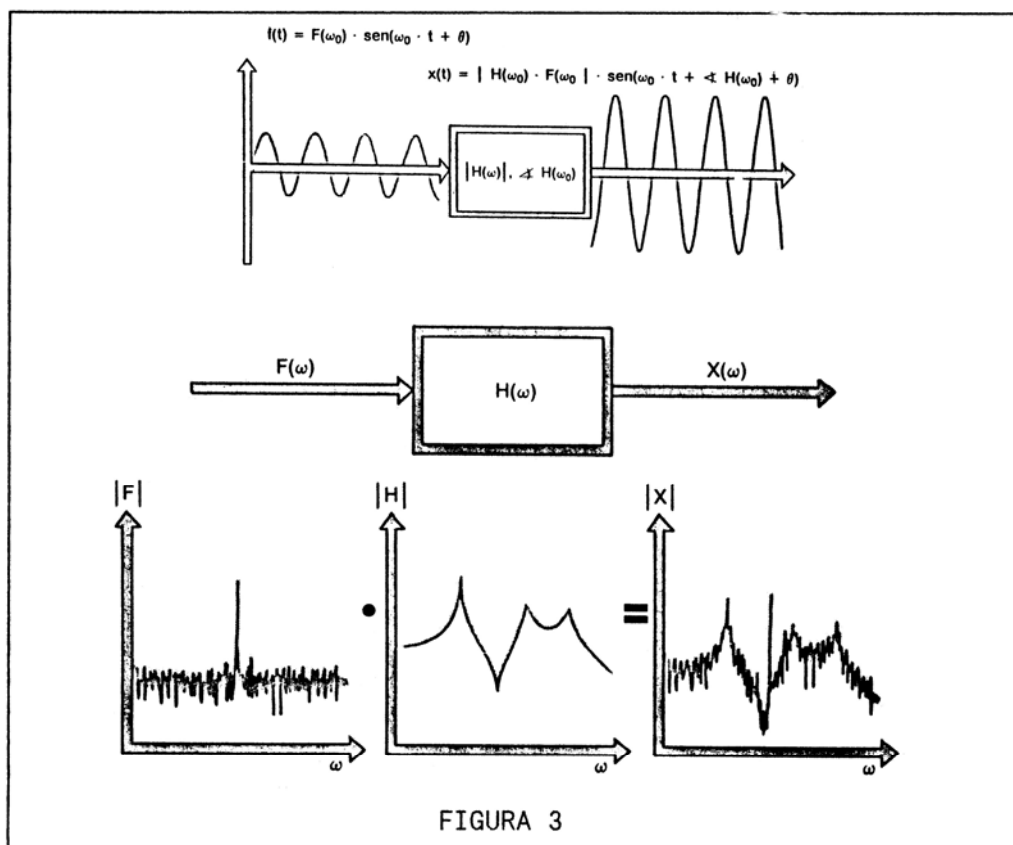
Ogni sistema strutturale è caratterizzato da un descrittore  $H$  chiamato Funzione Risposta in Frequenza definito come:

$$H(\omega) = X(\omega) / F(\omega)$$

dove  $\omega$  è la frequenza,  $X$  lo spettro in uscita ed  $F$  lo spettro in ingresso.

Da un punto di vista operativo, uno o più sensori di acquisizione sono posti in punti prescelti della struttura: le oscillazioni captate vengono amplificate ed inviate ad un analizzatore di spettro in grado di fornire, in tempo reale, lo spettro in uscita  $X(\omega)$ . Da questo spettro è possibile conoscere la forma della FRF, agendo in due modi differenti:

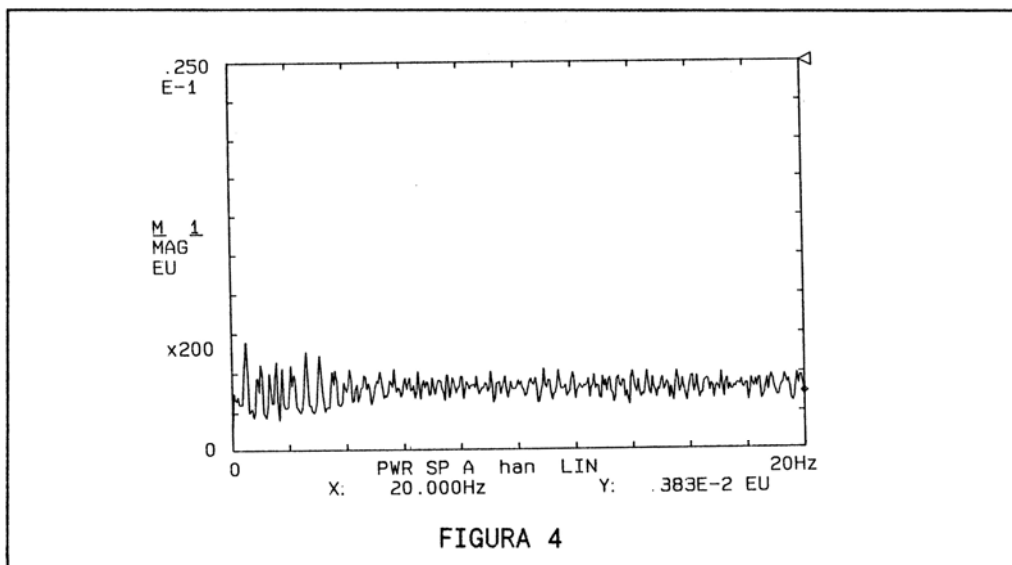
- a) utilizzando uno spettro  $F$  a banda estesa (vedi figura 3);
- b) imponendo le forzanti in ingresso.



Il metodo b, realizzabile tramite impiego di vibrodine, risulta oneroso ed in molti casi di difficile attuazione a causa di ripercussioni negative sul traffico. Inoltre è concettualmente identico al metodo a, in quanto permette di costruire, pezzo per pezzo, uno spettro a banda estesa.

Nell'analisi della struttura in oggetto si è scelto di utilizzare il primo metodo, sfruttando due differenti tipi di forzanti: quella costituita dalle eccitazioni naturali cui la struttura è ordinariamente soggetta, come vento, moti convettivi, microsismi, ed altri agenti casuali, e quella ottenibile dall'impiego di massa battente strumentata. In particolare il metodo della massa battente è utile per cogliere i modi superiori di vibrare della struttura, quelli a rilevante componente verticale.

In figura 4 è mostrato un tipico spettro in entrata F fornito dalla strumentazione utilizzata nel corso delle prove.



Per completezza ed a supporto di tale indagine, sono state effettuate acquisizioni in regime forzato al passaggio di convogli di linea di velocità e peso noti.

Come conseguenza diretta, si sono potute ottenere, per via

sperimentale, le frequenze proprie di vibrazione della struttura.

Studiando le differenze di fase esistenti fra i segnali acquisiti in punti diversi per le medesime frequenze in condizioni di oscillazioni libere, è stato possibile costruire per punti l'andamento delle relative deformate modali, il tutto finalizzato ad ottenere una buona taratura del modello matematico (vedi paragrafo seguente).

In particolare, si sono ottenuti i valori di frequenza di seguito riportati; i primi quattro modi risultano essenzialmente orizzontali e trasversali all'asse del ponte, il quinto, sesto e settimo evidenziano una rilevante componente verticale:

MODO	FREQUENZA	MODO	FREQUENZA
1	2.00 Hz	5	7.56 Hz
2	3.95 Hz	6	7.69 Hz
3	4.90 Hz	7	8.69 Hz
4	6.56 Hz		

In figura 5 sono riportati, a titolo di esempio, alcuni spettri di risposta ricavati durante le acquisizioni.

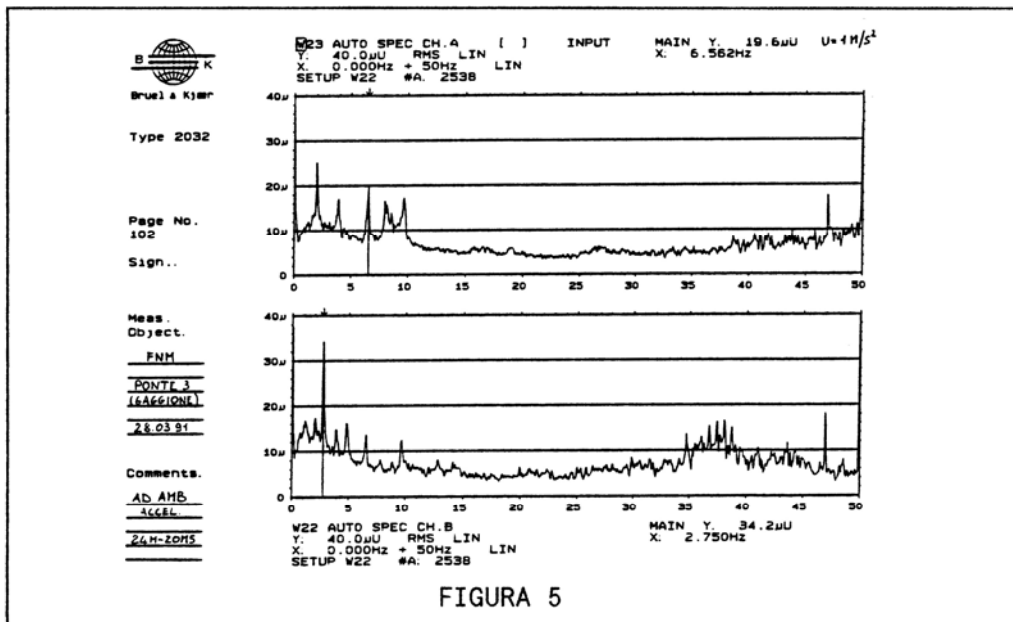


FIGURA 5

#### 4. MODELLO MATEMATICO

Al fine di tenere nella dovuta considerazione la geometria "massiva" del ponte in oggetto, esso è stato simulato con elementi tridimensionali impiegando il codice di calcolo agli Elementi Finiti denominato SAP90. In particolare la struttura è stata discretizzata con l'impiego di 1665 elementi SOLID definiti da 2630 nodi attivi più 148 di servizio.

I differenti materiali costituenti il manufatto sono stati caratterizzati mediante i valori di modulo elastico acquisiti sperimentalmente. Le condizioni di vincolo della struttura sono state, in prima battuta, ipotizzate in modo tale da tenere in considerazione gli interventi di rinforzo recentemente eseguiti.

Si è proceduto quindi alla taratura del modello matematico, per renderlo il più aderente possibile al modello fisico ricavato sperimentalmente, agendo precipuamente sulla esatta definizione delle rigidezze e sul grado di vincolo delle sconnessioni.

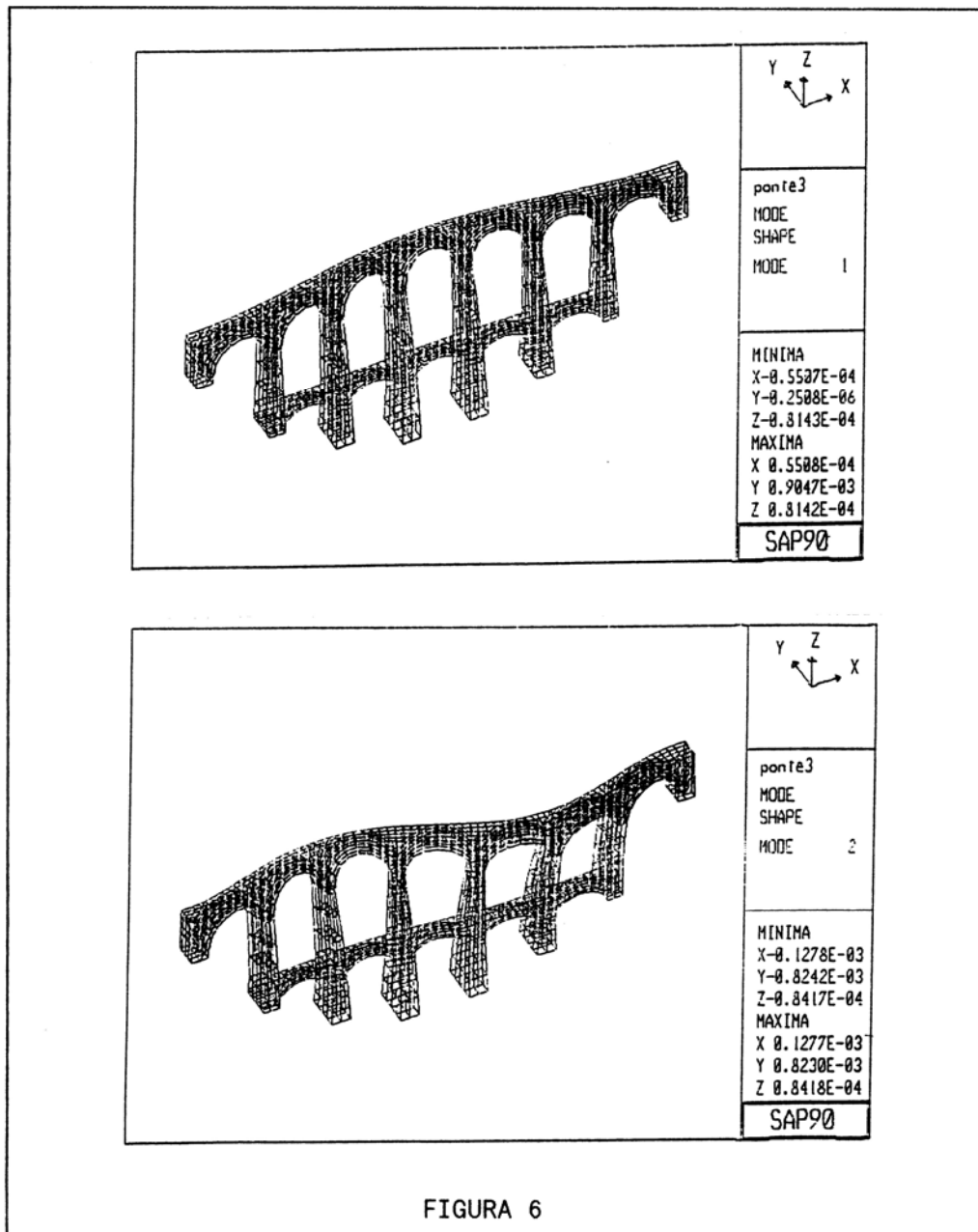
In particolare è stato messo a punto un modello ad "assetto variabile", considerando il peso proprio come agente sui soli archi in muratura ed i sovraccarichi accidentali (utilizzati nelle verifiche statiche) agenti anche sui rinforzi in cemento armato.

I risultati definitivi hanno fornito valori in buon accordo con quanto rilevato in situ; per i primi sette modi si sono ottenute le seguenti frequenze (per rendere più semplice il confronto coi dati sperimentali, si riportano i valori misurati):

MODELLO MATEMATICO		DATI SPERIMENTALI	
MODO	FREQUENZA	MODO	FREQUENZA
1	2.03 Hz	1	2.00 Hz
2	3.36 Hz	2	3.95 Hz
3	5.25 Hz	3	4.90 Hz
4	7.16 Hz	4	6.56 Hz
5	7.28 Hz	5	7.56 Hz
6	7.68 Hz	6	7.69 Hz
7	8.69 Hz	7	8.69 Hz.

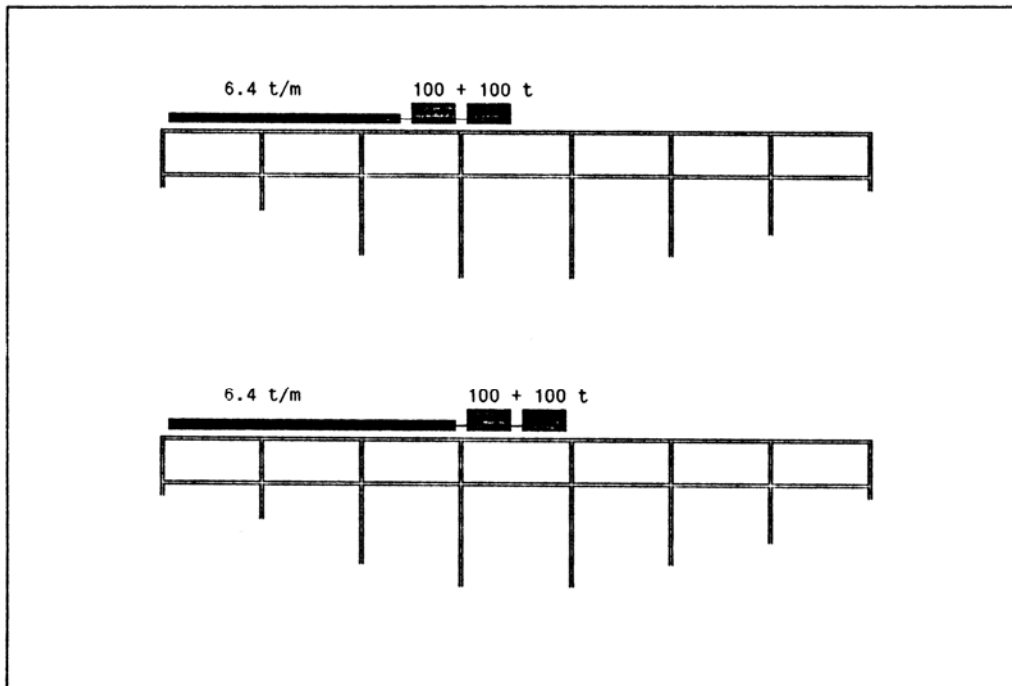
Dal confronto dei valori riportati, si evince che il modello numerico simula con buona approssimazione la struttura reale del manufatto in esame.

Si riportano a titolo di esempio alcune configurazioni modali particolarmente significative (vedi figura 6).



Sul modello così tarato è stata quindi eseguita una analisi statica, prendendo in considerazione un carico costituito da due locomotori per treni di categoria B (secondo le norme F.S. del 15/07/45 Circolare n°54) più un numero illimitato di carri con 4 assi da 20t.

Si sono utilizzati i seguenti schemi di carico:



Le sezioni più sollecitate sono risultate essere quelle poste in chiave di quarta campata ed in corrispondenza delle reni dell'arco in terza campata. I valori massimi di tensione sono risultati essere inferiori a quelli ammissibili sia per quanto riguarda le strutture murarie che i rinforzi in calcestruzzo armato. Di conseguenza i risultati ottenuti hanno permesso di classificare il ponte come appartenente alla classe RIV C2.

Milano, Giugno 1991

A.I.C.E. Srl