

## Seismic behaviour of stone arch bridges in Sicily

Nunzio Scibilia<sup>a</sup>, Angelo Savio Calabrese<sup>b</sup>

<sup>a</sup> *Dipartimento DICAM, Professore associato di Tecnica delle Costruzioni, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo.*

<sup>b</sup> *Dottorando di ricerca presso il Politecnico di Milano.*

*Keywords: masonry arch bridges, limit analysis, seismic behavior*

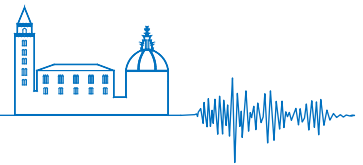
### ABSTRACT

The present paper concerns the seismic analysis of stone arch bridges, constituted of spans and piers in stone brick built in the Sicily in the XVIII and XIX centuries.

The *Ponte di Mare* is located in Palermo over the Oreto river. It collapsed in 1772 due to river overflow, and was rebuilt in 1792. The bridge has three low arches: the central span is 12.15 m length and the keystone rise is about 4.00 m, while the lateral spans have both length of 10.40 m and keystone rise around 3.15 m.

The *Cinque Archi* bridge overpass the Salso river linking the towns of Villarosa and Santa Caterina, respectively in the Enna and Caltanissetta provinces. It was built between 1857 and 1870. Each of the five arches has span length of 11.56 m and keystone rise of 3.72 m.

The limit analysis are performed, based on the Heyman theory, assuming that the masonry is incompressible with no tensile strength and that sliding between units cannot occur. The results are compared with the Italian rules in order to evaluate the seismic safety.



## Comportamento Sismico Di Ponti In Muratura In Sicilia

Nunzio Scibilia<sup>a</sup>, Angelo Savio Calabrese<sup>b</sup>

<sup>a</sup> Dipartimento DICAM, Professore associato di Tecnica delle Costruzioni, Università degli Studi di Palermo, Viale delle Scienze, 90128 Palermo

<sup>b</sup> Dottorando di Ricerca presso il Politecnico di Milano

*Keywords: ponti ad arco in muratura, analisi limite, comportamento sismico*

### SOMMARIO

La seguente memoria riguarda l'analisi sismica di ponti ad arco in muratura, caratterizzati da spalle e pile in muratura di pietra, costruiti in Sicilia nel XVIII e nel XIX secolo.

Il *Ponte di Mare* si trova a Palermo sul fiume Oreto. Crollò nel 1772 in seguito ad uno straripamento, e venne ricostruito nel 1792. Il ponte è caratterizzato da tre archi a sesto ribassato: il centrale ha una luce di 12.15 m ed una freccia di circa 4 m, mentre i due laterali hanno entrambi luce di 10.40 m e freccia di circa 3.15 m.

Il *Ponte Cinque Archi* attraversa il fiume Salso collegando le città di Villarosa e Santa Caterina, rispettivamente nella provincia di Enna e di Caltanissetta. Fu costruito tra il 1857 ed il 1870. Ciascuno dei cinque archi che lo compongono ha luce di 11.56 m e freccia di 3.72 m.

Sono state eseguite analisi limite, basate sulla teoria di Heyman, considerando la muratura incomprimibile, trascurando gli sforzi di trazione e gli scorrimenti tra i conci. I risultati sono stati comparati con le norme vigenti in Italia al fine di valutarne la sicurezza sismica delle strutture.

### 1 INTRODUZIONE

Per i numerosi corsi d'acqua e per il territorio ricco di monti e colline, fino al 1700 in Sicilia la viabilità fu carente di strade rotabili; le vie principali erano regie trazzere percorribili in sella o su carri e molte erano le mulattiere. Per la mancanza di ponti, spesso i fiumi venivano guadati a piedi o in braccio a forzuti, *marangoni*, altre volte le stradelle si facevano lunghe e tortuose fino all'aggiramento dell'ostacolo naturale (Armetta 2014).

Secondo il Perez (Tesoriere 1994, 1995) lo sviluppo della rete stradale Borbonica negli anni 50 dell'800, raggiungeva circa 2220 km, con un limitato numero di ponti aventi problemi di stabilità, dovuti alle sfavorevoli caratteristiche geotecniche dei terreni attraversati. Uno dei primi provvedimenti post unitari del Ministro dei lavori pubblici dell'epoca, Sen. Stefano Jacini, fu di incaricare l'ispettore del Genio Civile, ing. Carlo Possenti, di condurre un accertamento straordinario nelle province siciliane con la finalità di evidenziare *sul luogo, il vero stato dei lavori in conto nazionale ed i progetti in corso,*

*tanto per ponti e strade, quanto per porti e spiagge e fornendo speciale attenzione a tutto ciò che concerne il mantenimento delle strade.*

Il Possenti stese un elenco minuzioso delle strade siciliane, distinguendole per singoli tratti, ed ottenendo una lunghezza totale pari 2159 km, mentre ne riteneva necessarie km 7400. Inoltre fornì indicazioni sui criteri di dimensionamento dei ponti e sulle innovazioni costruttive del tempo (Possenti 1865).

La presente memoria esamina due ponti ad arco in muratura: il primo *Ponte di Mare* realizzato a Palermo sul Fiume Oreto a partire dal 1772 ed il secondo *Ponte Cinque Archi* sul fiume Salso (Imera meridionale) costruito tra il 1857 ed il 1870.

Sono descritte le principali caratteristiche geometriche e costruttive, confrontandole con le regole dell'arte, con particolare riferimento al Ponte Cinque Archi, per il quale sono state eseguite indagini sui materiali costituenti e sul terreno di fondazione ed è sviluppata l'analisi limite per la valutazione della resistenza al sisma in assenza di traffico.

## 2 LA FORMAZIONE DEGLI INGEGNERI IN SICILIA NEL XVIII E XIX SEC.

Un notevole progresso nella costruzione dei ponti in muratura ebbe inizio in Francia all'epoca dell'organizzazione del Corpo Reale di Ponti e Strade nel 1716. Qui sorse l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées fondata da Jean-Rodolphe Perronet che iniziava, per la prima volta, gli ingegneri allo studio teorico e sperimentale della resistenza delle volte. Gli ingegneri procedevano così più sicuri nell'esecuzione di nuovi tipi, abbandonando le soluzioni basate sulla geometria degli archi e passando allo studio razionale delle strutture, progettando i primi ponti con dimensioni ricavate da calcoli: all'arte del costruire si univa la scienza delle costruzioni.

In Sicilia, un forte impulso alla costruzione di nuovi ponti si ebbe a partire dal 1824 quando viene istituita nel Regno di Sicilia la Soprintendenza delle Strade e dei Ponti per derivazione da quella napoletana, fondata nel 1808 da Gioacchino Murat sul modello del settecentesco Corp des Ponts et Chaussées francese. La migliore formazione agli ingegneri pontisti di allora veniva data a Napoli dalla "Scuola d'Applicazione per ingegneri" fondata nel 1811 a supporto del Corpo Reale di Ponti e Strade. La Scuola provvedeva a formare i tecnici ai quali si richiedeva un grado di specializzazione in campo strutturale, funzionale e tipologico tale da permettere loro di affrontare la progettazione dei ponti del Regno. Il corso di studi aveva la durata di un triennio e vi si accedeva attraverso un rigido concorso che selezionava gli allievi più meritevoli. Le materie d'insegnamento erano: fisica, chimica, costruzioni, scienze d'applicazione al mestiere, geometria descrittiva e stereotomia, meccanica applicata, architettura civile e disegno.

Con l'Unità d'Italia il Corpo Reale di Ponti e Strade napoletano e quelli esistenti nel resto d'Italia venivano riorganizzati sul modello istituzionale sabauda, confluyendo nell'unico Corpo Reale del Genio Civile, con sedi provinciali e distrettuali. La Scuola di Applicazione, continuava la sua attività ma cambiava il nome in Scuola d'Applicazione degli Ingegneri del Genio Civile e, successivamente, dopo le riforme dell'istruzione superiore (De Sanctis nel 1860 e Imbriani nel 1861) passava, nel 1863, alle dipendenze del Ministero della Pubblica Istruzione.

## 3 CRITERI DI DIMENSIONAMENTO DEI PONTI STRADALI FINO AL XIX SEC.

Il collasso dei ponti stradali ad arco in muratura non è generalmente imputabile ai carichi mobili e alle azioni sismiche, ma più frequentemente alle azioni idrodinamiche, le quali provocano lo scalzamento delle fondazioni.

Tale situazione si è riscontrata per un ponte sul Torrente Torcicoda, travolto dalla piena del  
e ricostruito

Anche il Ponte Cinque Archi presentava tale situazione di pericolo che ha indotto l'ANAS a programmare interventi di recentemente ultimati.

La notevole resistenza dei ponti ad arco ai carichi mobili stradali deriva dal carattere massivo e dalle proporzioni generose di queste strutture. Tale condizione si deve alle tecniche costruttive, ad esigenze estetiche-architettoniche e alle caratteristiche meccaniche dei materiali.

La regola d'arte degli antichi costruttori rappresenta infatti un insostituibile patrimonio culturale, la cui efficacia è comprovata dalla stabilità e dalla resistenza che la gran parte dei manufatti hanno dimostrato al trascorrere del tempo.

Con riferimento a quanto suggerito nelle "Istruzioni per la Valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti Stradali in Muratura" fornite dal Consiglio Nazionale delle Ricerche, sono riportate le formule empiriche per la determinazione delle proporzioni di ognuno degli elementi strutturali, basate sulla sapienza e sull'esperienza di coloro che hanno realizzato tali opere.

Con riferimento alla singola arcata si indicano con:

- s lo spessore in chiave;
- f la freccia;
- L la luce libera;
- R il raggio di intradosso che per arcate non circolari rappresenta il raggio del cerchio passante per le imposte e per la chiave di intradosso.

Secondo la formula di Perronet si ha:

$$s = 0.325 + 0.07R \quad (1)$$

Secondo la formula di Kaven, invece:

$$s = 0.25 + L \times (0.025 + 0.00333 \times L/f) \quad (2)$$

La formula di L'Eveillé, veniva generalmente usata per ponti molto caricati, con arcate di luce inferiore a 20 metri:

$$s = (1 + 0.1 \times L)/3 \quad (3)$$

Frequentemente, quando lo spessore cresce verso l'imposta. Il valore  $s_i$  all'imposta consigliato dal Sèjournè è dato dalla relazione

$$s_i = s \times (L + 2 f/L) \quad (4)$$

in generale:

$$s_i = \alpha \times s \quad \text{con } \alpha = 1.5 \div 2 \quad (5)$$

Importanti applicazioni consistono nel munire le arcate di tre articolazioni, o cerniere, una per ciascuna imposta e la terza al vertice, raggiungendo così i vantaggi di rendere staticamente determinata la curva delle pressioni, ed annullare gli sforzi provenienti da una variazione di temperatura o da un cedimento delle imposte o ancora di eliminare gli inconvenienti che provengono dai cedimenti delle centine durante la costruzione. Queste articolazioni venivano effettuate con tasselli in piombo o con apparecchi in acciaio, o anche in pietra (cerniere kopcke, introdotte fin dal 1880).

Talvolta si limitava l'azione delle tre cerniere soltanto al periodo della costruzione, dopodiché i conci adiacenti venivano solidarizzati, in tal modo la volta si comportava per il peso proprio come un arco a tre cerniere, e poi per carico accidentale e per variazioni di temperatura come un arco incastrato, incrementando il monolitismo della costruzione.

Per quanto riguarda lo spessore  $S$  delle pile, va osservato che la costruzione ottocentesca tendeva a maggiore il dimensionamento delle pile di ponti a molte arcate, seguendo il criterio di evitare che il crollo di una singola arcata, facendo venire meno il mutuo contrasto tra arcate adiacenti, trascinasse con se tutto il ponte. Il risultato era di ottenere delle vere e proprie pile-spalle, in grado di reggere da sole, sia pure in modo temporaneo e precario, il gioco delle spinte che si liberano al venire meno di una delle arcate.

La correlazione più accreditata è quella che esprime lo spessore della pila in funzione dello spessore in chiave dell'arcata:

$$S = 0.29 + 2s \quad (6)$$

Oppure:

$$S = 2.5s \quad (7)$$

Per il dimensionamento dello spessore  $S_s$  delle spalle, la formula del Genio Civile Italiano, per archi ribassati prevedeva che:

$$S_s = 0,05h_1 + 0.2L + [(10 + 0,5L)/100] L/f \quad (8)$$

essendo  $h_1$  l'altezza della spalla, fino all'imposta.

La formula di Lesguillier per archi ellittici ed ovali prevedeva:

$$S_s = \left[ 0.60 + 0.05 \left( \frac{L}{f} - 2 \right) + 0.04h_1 \right] \times \sqrt{L} \quad (9)$$

Queste regole non consideravano l'effetto della resistenza del terreno; tuttavia, essendo state utilizzate nel progetto di ponti ad arco in muratura, assumono una valenza di verifica a posteriori. Ad esse si aggiungono le indicazioni contenute nella Relazione Possenti sulla viabilità in Sicilia. In essa, per la nuova viabilità, si raccomandava l'adozione di ponti ad arco con luce compresa tra 9 e 12 m, aventi rapporto freccia/luce non inferiore a un quarto. Inoltre, veniva indicato un valore della dimensione trasversale delle pile compreso tra 1/4 ed 1/5 della corda. Si raccomandava inoltre di *difendere le fondazioni delle spalle e delle pile con una briglia o catena a valle, in tutta la lunghezza del ponte, isolata ma quasi a contatto dei rostri ed alquanto più profonda delle fondazioni medesime, in luogo da spingere queste a tale profondità da assicurarne per sé sola la stabilità ed in luogo eziandio di una platea generale*. Le strutture analizzate rispettano i criteri sopra indicati: il Ponte di Mare è una struttura a tre campate: due archi laterali minori ed uno centrale più grande di luci, rispettivamente, 10.40 m e 12.15 m. Gli archi ribassati hanno freccia pari a 3.15 e 4 m, realizzando rapporti freccia/luce di circa un terzo (Benfratello et al. 1999). Il Ponte Cinque Archi ha campate di luce netta pari a m 11.70, l'altezza delle pile è di circa m 5.00 e la loro larghezza è di m 2.90, compresa tra 1/4 ed 1/5 della luce. Gli archi presentano un profilo ribassato, caratterizzato da un rapporto freccia/luce di circa un terzo ( $0.325 = 3.80/11.70$ ).

L'aderenza alle regole sopra citate è evidenziata nella Tab.1 nella quale sono indicati due valori di  $S$  considerando lo spessore dell'arco.

Tabella 1. Dimensioni effettive (eff) in metri, a confronto con le dimensioni ricavate dalle formule empiriche.

Ponte	f/L	s eff	s (2)	s (3)	S eff	S (7)
Ponte di Mare (campata centrale)	$\frac{1}{3}$	0.77	0.67	0.74	3.25 1.71	1.92
Ponte Cinque Archi	$\frac{1}{3}$	1.15	0.66	0.73	2.90	2.87

#### 4 IL PONTE DI MARE SUL FIUME ORETO A PALEMRO

Il Ponte di Mare sito al km 252+570 della S.S. 113 Settentrionale Sicula è un ponte stradale a tre campate che interseca il tratto finale del fiume Oreto in corrispondenza della foce e costituisce uno degli ingressi da Sud alla città di Palermo. La struttura è costituita da tre archi ellittici a sesto ribassato in conci di calcarenite, spessi circa 77 cm che poggiano direttamente sulla fondazione al livello del piano d'imposta. L'arco centrale ha luce e freccia maggiore dei laterali ed in regime di portata ordinario è l'unico ad insistere sul corso d'acqua.

Fu costruito nel 1584 per decisione del Senato di Palermo, originariamente in una posizione più prossima allo sbocco, e ricostruito nel sito attuale alla fine del XVIII secolo a seguito dei danneggiamenti causati dal terremoto del 1751 e dall'inondazione del 1772.

E' stata eseguita un'analisi dinamica per valutare l'effetto combinato del sisma e dei carichi mobili (Benfratello et al. 199), modellando le azioni sismiche attraverso un fenomeno Gaussiano e stazionario con densità spettrale di potenza spetto compatibile (D.M. 16/01/1996)

Il ponte è stato modellato con elementi finiti tridimensionali iso parametrici a 20 nodi, adottando un legame costitutivo non lineare con



Figura 2. Il Ponte di Mare sul fiume Oreto a Palermo.

limitata resistenza a trazione. Lo studio ha messo in evidenza come, per il ponte in esame, gli effetti dovuti al transito di un veicolo viaggiante a velocità costante e quelli dovuti ad un veicolo in frenata siano dello stesso ordine di grandezza di quelli più gravosi dovuti al sisma.

Si riportano di seguito le rappresentazioni grafiche dei profili laterali del Ponte di Mare.

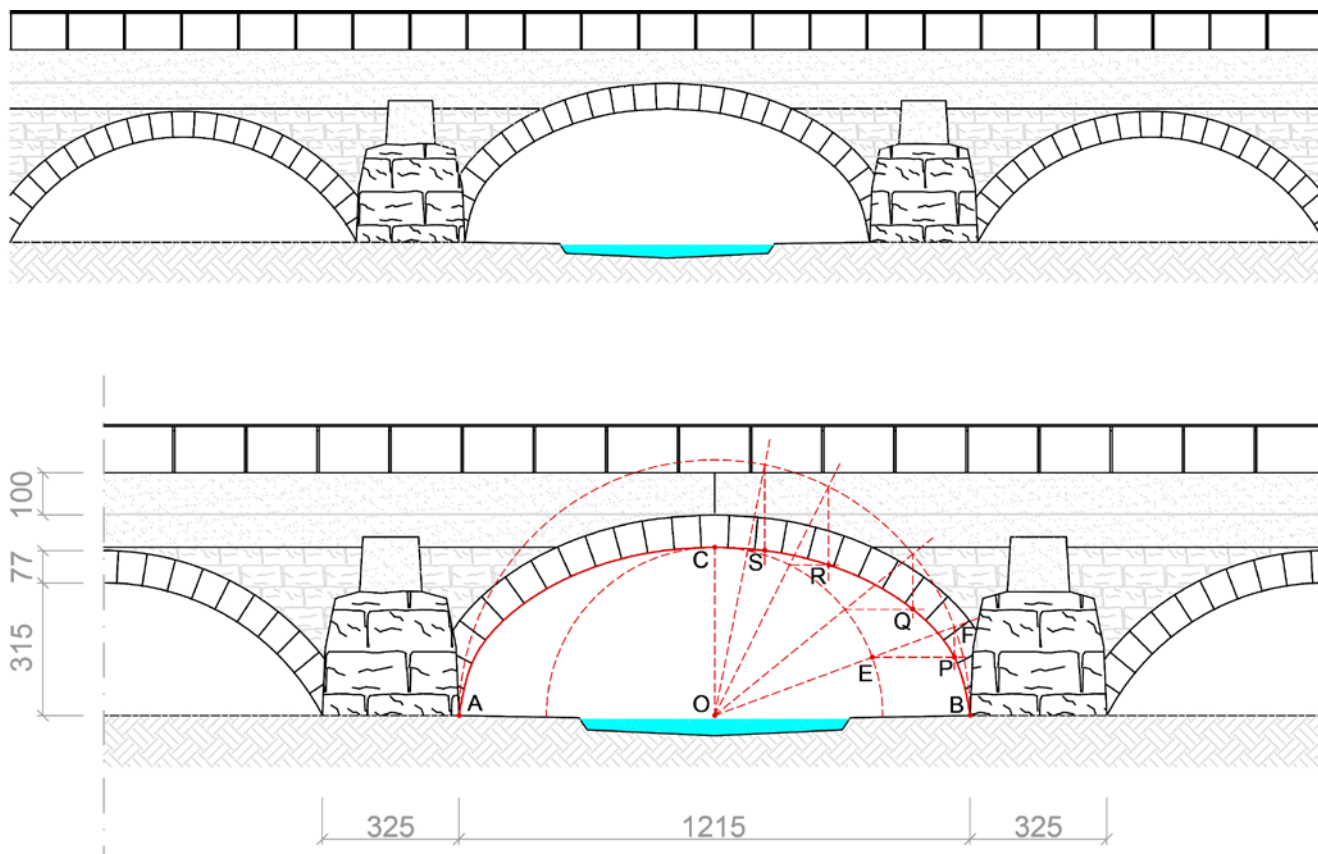


Figura 3. Caratteristiche geometriche in centimetri del Ponte di Mare

## 5 IL PONTE CINQUE ARCHI SUL FIUME SALSO A CALTANISSETTA

Il Ponte Cinque Archi, sito al km 125+000 della S.S. 121 Catanese attraversa il fiume Salso (Imera meridionale) con una struttura costituita da cinque archi policentrici in mattoni pieni che poggiano su quattro pile intermedie in muratura a pianta lentiforme, costituite da conci squadrate di calcarenite, e su due spalle rispettivamente lato Santa Caterina Villarmosa (CL) e lato Villarosa (EN).

Il ponte ha una lunghezza di 75 m ed una larghezza di 6,55 m, con pendenza longitudinale riferita all'asse stradale non particolarmente apprezzabile.

Venne progettato dall'ingegnere Nicolò Biamonte, ispettore di Ponti e Strade del Regno delle due Sicilie negli anni 50 del XIX sec. La pubblicazione del bando di gara di appalto avvenne il 22/04/1856 ed i lavori furono affidati

all'Impresa Giovanni Nocillo con contratto in data 01/05/1857 e collaudati il 12/12/1872.

Le fondazioni delle pile sono dirette, i rin fianchi degli archi sono costituiti da ciottoli con ghiaia e sabbia di varia natura e dimensione, sostenuti da due paramenti laterali in muratura di conci squadrate in pietra calcarea. Il piano stradale è in conglomerato bituminoso e presenta larghezza di m 5,50.

Successivamente vennero eseguiti interventi di consolidamento consistenti nell'applicazione di tiranti in ferro disposti trasversalmente all'asse longitudinale del ponte

Negli anni 70 del XX sec. al di sopra di detto attraversamento sono stati realizzati i ponti dell'autostrada Palermo – Catania.

In seguito alla realizzazione delle fondazioni di detti ponti autostradali, realizzati su pali trivellati in cemento armato, l'alveo fluviale ha subito notevoli variazioni, a causa delle quali le fondazioni del Ponte Cinque Archi sono state

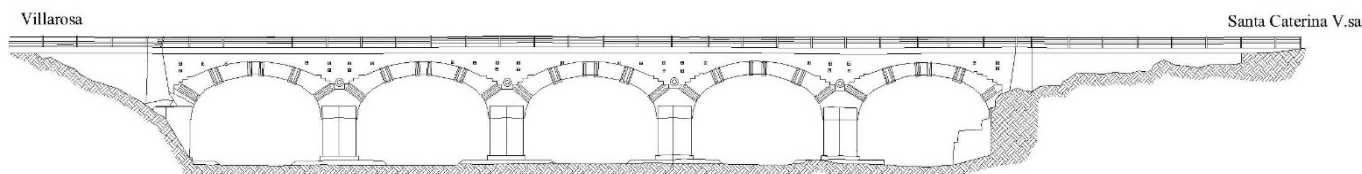


Figura 4. Profilo longitudinale del Ponte Cinque Archi



Figura 5. Particolare degli archi.



Figura 6. Particolare dei tiranti trasversali e delle opere di regimentazione idraulica.



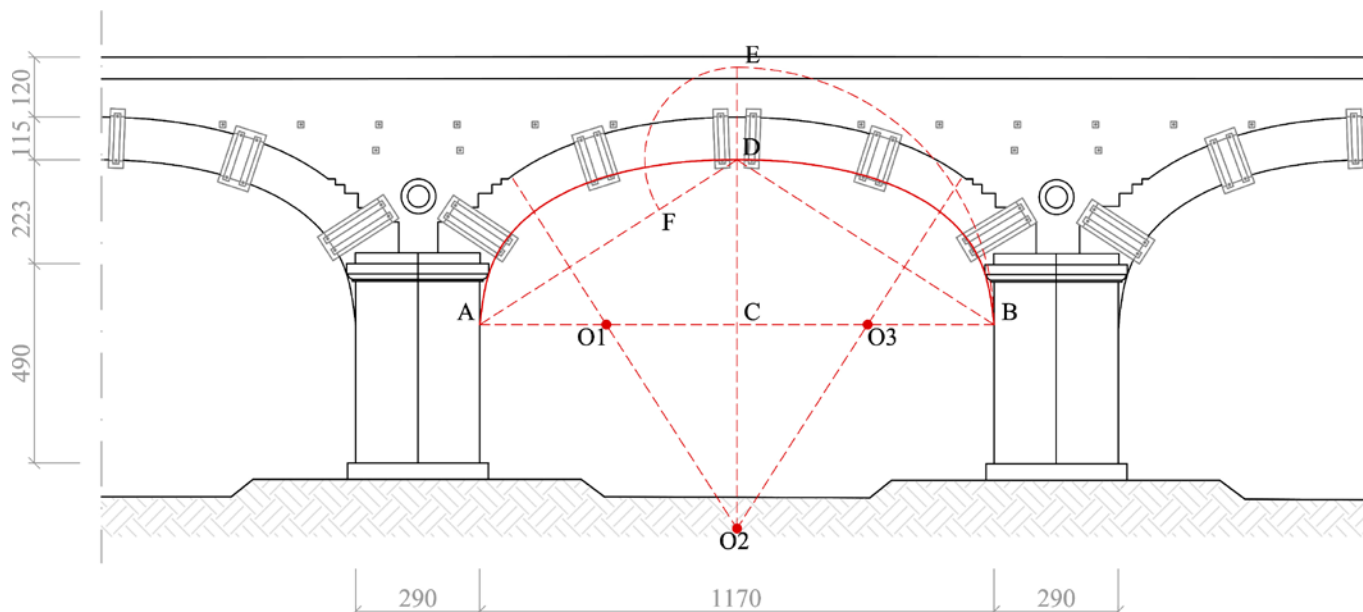


Figura 7. Caratteristiche geometriche in centimetri del Ponte Cinque Archi. L'arco a tre centri.

interessate da fenomeni di scalzamento al piede, riguardanti anche le fondazioni del ponte autostradale. Quanto sopra ha indotto l'ANAS ad eseguire lavori di consolidamento delle fondazioni di entrambi i ponti e di sistemazioni idraulica del fiume Salso, estesi alle sponde<sup>1</sup>,

Il completamento di lavori relativi alle fondazioni del Ponte Cinque Archi ne assicura la stabilità e ne ha reso possibile la riapertura al traffico, con opportune limitazioni sulla velocità di percorrenza, dipendenti essenzialmente da ammaloramenti dei cordoli laterali in c.a. a sostegno dei sicurvia, che saranno adeguati con successivi interventi, i quali saranno estesi al restauro dei paramenti murari delle volte, dei rinfianchi e delle pile.

L'esecuzione di tali opere, unitamente al monitoraggio del ponte, di cui si è riferito in una precedente nota, consentiranno di conferire all'infrastruttura la piena operatività.

Nel corso del dicembre 2016 uno degli autori (Scibilia et al. 2016) ha progettato le prove di carico, propedeutiche alla riapertura, eseguite utilizzando autocarri a 4 assi aventi le seguenti caratteristiche:

- Dumper 1: Peso assi anteriori 154 kN - peso assi posteriori 308 kN;
- Dumper 2: - Peso assi anteriori 159 kN - peso assi posteriori 306 kN.

Sono riportate a pag. 9 alcuni degli schemi di carico a cui è stato sottoposto il ponte, con foto.

<sup>1</sup>Il progetto è stato redatto dalla Sering Ingegneria (ingg. Vincenzo Canzoneri e Sergio Di Maio) e i lavori sono stati eseguiti dalle Imprese Cubo Costruzioni S.C.ar.l. e RTI tra Italcompany S.r.l. e CO.GE.O. S.r.l. e diretti dall'ing. Sergio Cicero dell'ANAS.

## 6 RESISTENZA ALLE AZIONI SISMICHE

Si considerano le azioni sismiche orizzontali, agenti in direzione longitudinale e trasversale, in assenza di carichi mobili. L'azione sismica sussultoria viene trascurata in quanto determina incrementi di tensioni normali che le murature sono generalmente in grado di fronteggiare.

Dal momento che le tensioni non assumono un ruolo determinante la crisi può essere imputata alla formazione di cinematismi.

In conformità al D.M. 2008 ed alla relativa Circolare si eseguono le verifiche di sicurezza attraverso analisi cinematiche lineari e non lineari. In particolare si sviluppano le analisi con riferimento al Ponte Cinque Archi.

Per le azioni sismiche longitudinali dei ponti multi campata ha notevole influenza la snellezza delle pile, caratterizzata dal rapporto H/B altezza/larghezza, che nel caso in esame è pari circa a 1.7 ( $H/B = 4.90/2.90$ ). Quanto più cresce tale rapporto tanto più il meccanismo di collasso della struttura diventa globale coinvolgendo, oltre all'arco, anche le pile, che tendono a ribaltarsi per la formazione di cerniere plastiche alla base. Per pile tozze il cinematismo è limitato agli archi.

Spesso i timpani sono collegati da tiranti in ferro che si oppongono al ribaltamento. Un ulteriore vincolo può essere offerto da una piastra in cemento armato sottostante la pavimentazione, efficacemente collegata alle murature.

Per il sito si riportano in ordine decrescente gli spettri di progetto di accelerazione a/g per un fattore di struttura  $q=2$  e di spostamento calcolati per una vita di riferimento  $V_R$  di 200 anni ( $V_N=100$ ;  $C_U=2$ ), 100 anni ( $V_N=50$ ;  $C_U=2$ ) e 50 anni ( $V_N=50$ ;  $C_U=1$ ) nonché il diagramma ADRS.

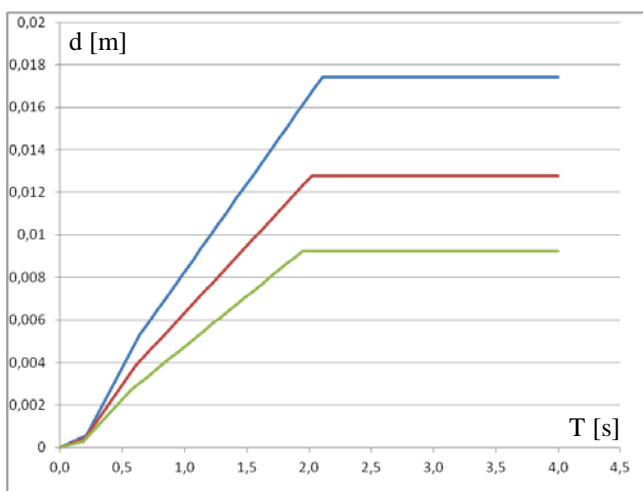
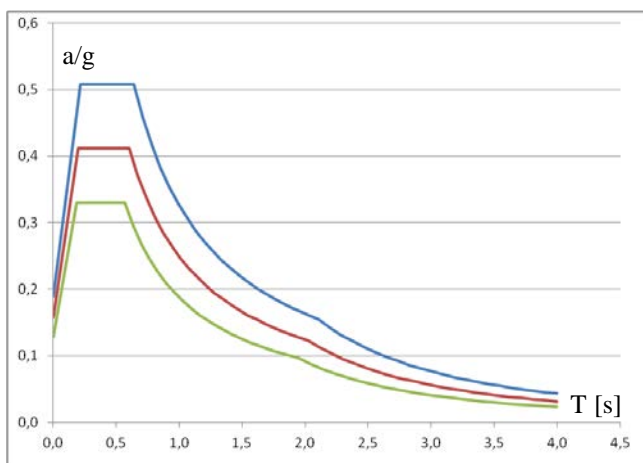
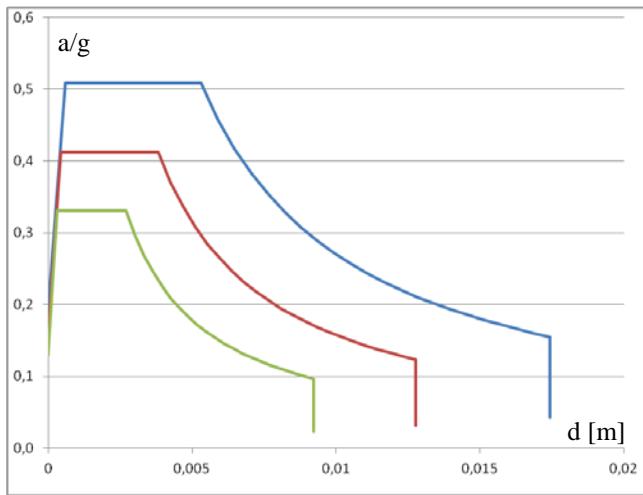


Figura 8. *in alto*: Spettro ADSR; *al centro*: Spettro di progetto di accelerazione  $a/g$  per  $q=1.5$ ; *in basso*: Spettro di spostamento di progetto (m).

Curva superiore  $V_R=200$  anni, curva intermedia  $V_R=100$  anni, curva inferiore  $V_R=50$  anni.

L'individuazione del meccanismo per sisma longitudinale, nel caso in esame, richiede la determinazione delle posizioni delle cerniere plastiche, che innescano il cinematiso, in seguito all'azione sismica orizzontale (Bosso 2012).

Nel presente studio si è adottato l'approccio descritto in "Introduction to dynamics of stone arches" (Clemente, 1998), secondo il quale ci si può avvalere dell'analisi statica per trovare il meccanismo di collasso di un arco in muratura ed il corrispondente fattore di accelerazione orizzontale.

In particolare, essendo le pile snelle, le cerniere sulle spalle e ai piedi delle pile si considerano fisse, mentre le posizioni delle due cerniere intermedie per ogni campata si determinano interpolando i valori graficizzati per rapporto  $H/B$  fra le dimensioni delle pile pari a 1.7 e rapporto  $s/R$  pari a 0.16, essendo  $s$  lo spessore medio dell'arco, considerato costante lungo tutto lo sviluppo, ed  $R$  il raggio della circonferenza passante per le imposte ed il colmo dell'arco.

I valori ottenuti sono indicati come rapporti  $\beta_i/\beta$ , dove con  $\beta$  si indica l'angolo di apertura al centro dell'arco, e con  $\beta_i$  l'angolo che individua la posizione della  $i$ -esima cerniera, misurato rispetto al raggio passante per l'imposta di sinistra.

Per il ponte in esame si ha:

$\beta_B/\beta = 0.385$	da cui $\beta_B=50.4^\circ$
$\beta_C/\beta = 0.62$	da cui $\beta_C=81.2^\circ$
$\beta_E/\beta = 0.375$	da cui $\beta_D=49.1^\circ$
$\beta_F/\beta = 0.625$	da cui $\beta_E=81.9^\circ$
$\beta_H/\beta = 0.36$	da cui $\beta_F=47.2^\circ$
$\beta_I/\beta = 0.63$	da cui $\beta_G=82.5^\circ$
$\beta_M/\beta = 0.352$	da cui $\beta_H=46.1^\circ$
$\beta_N/\beta = 0.645$	da cui $\beta_I=84.5^\circ$
$\beta_P/\beta = 0.34$	da cui $\beta_L=44.5^\circ$
$\beta_Q/\beta = 0.59$	da cui $\beta_M=77.3^\circ$

Al cinematiso così individuato competono forze orizzontali di collasso ottenute attraverso un valore del moltiplicatore  $\alpha_0$  dei carichi verticali, che si determina applicando il principio dei lavori virtuali in termini di spostamento, adottando la seguente relazione:

$$\alpha_0 \left( \sum_{i=1}^n P_i \delta_{x,i} + \sum_{j=n+1}^{n+m} P_j \delta_{x,j} \right) - \sum_{i=1}^n P_i \delta_{y,i} = 0 \quad (10)$$

essendo:

- $P_i$  la forza peso del blocco  $i$ -esimo, applicata nel suo baricentro;
- $P_j$  la forza peso non direttamente applicata sui blocchi;
- $\delta_x$  e  $\delta_y$  gli spostamenti virtuali dei punti di applicazione delle forze.

Assegnata una rotazione virtuale  $\theta$  al generico blocco, è possibile determinare  $\alpha_0$  in funzione della geometria degli spostamenti delle diverse forze applicate nella rispettiva direzione.

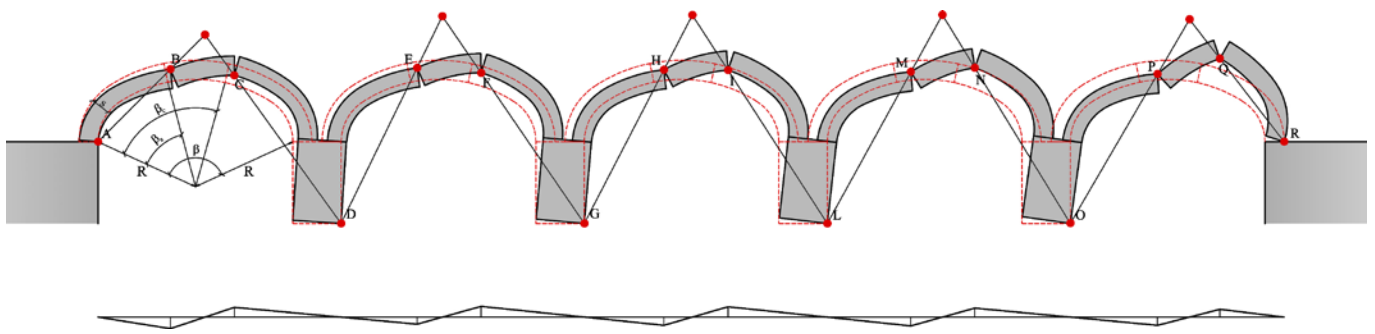


Figura 9. Cinematismo per sisma longitudinale

Al fine di eseguire la verifica sismica con spettro di risposta è necessario trasformare la struttura in un sistema equivalente ad un grado di libertà. La massa partecipante al cinematismo  $M^*$  è valutata attraverso la seguente relazione regolamentare:

$$M^* = \frac{\left( \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i} \right)^2}{g \cdot \sum_{i=1}^{n+m} P_i \delta_{x,i}^2} \quad (11)$$

L'accelerazione sismica spettrale  $a^*$ , vale:

$$a^* = \frac{\alpha \sum_{i=1}^{n+m} P_i}{M^* \cdot FC} = \frac{\alpha g}{e^* \cdot 1.3} \quad (12)$$

avendo indicato con  $e^*$  la frazione di massa partecipante, espressa dalla seguente relazione:

$$e^* = \frac{g \cdot M^*}{\sum_{i=1}^{n+m} P_i} \quad (13)$$

ed essendo 1.3 il fattore di confidenza.

Risolvendo l'equazione (10) rispetto a  $\delta_x$ , assumendo  $\alpha=0$ , si ricava il valore dello spostamento  $d_0$

La verifica si ritiene soddisfatta se è verificata la diseuguaglianza

$$q a^* = 2 a^* \geq PGA \quad (14)$$

e l'indicatore di rischio  $I_R$  vale:

$$I_R = \frac{2 a^*}{PGA} \quad (15)$$

### 6.1 Sisma longitudinale

Nel caso del Ponte Cinque Archi, con riferimento al cinematismo di figura 9, si ha:

$$\alpha_0 = 0.088 \quad q a^* = 1.56 \text{ ms}^{-2}$$

e  $PGA = 1.55 \text{ ms}^{-2}$  per  $V_R = 100$  anni.

### 6.2 Sisma trasversale

Anche il comportamento sotto le azioni sismiche trasversali di un ponte multi campata è influenzato dalla snellezza delle pile e dalla larghezza del ponte. Per ponti con pile tozze

l'elemento più vulnerabile all'azione sismica trasversale è costituito dal timpano. In presenza di pile snelle o di timpani ben collegati tra loro, si possono attivare meccanismi di collasso che coinvolgono le pile, dove si formerà una cerniera al piede. Il timpano nella maggior parte dei casi rappresenta l'elemento più vulnerabile all'azione sismica trasversale. La limitata inerzia fuori dal piano della muratura non è generalmente in grado di contrastare l'azione trasversale di terremoti di entità anche non rilevanti. Il collasso del timpano non compromette la sicurezza globale della struttura, ma ne impedisce l'utilizzo.

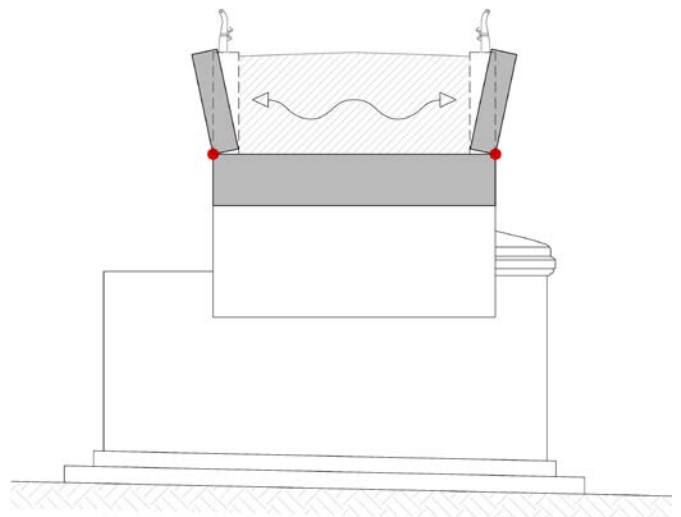


Figura 10. Cinematismo per sisma trasversale

## 7 CONSIDERAZIONI CONCLUSIVE

La presente memoria riporta alcune considerazioni sul progetto dei ponti stradali, ad arco in muratura, prendendo in considerazione due esempi significativi presenti in Sicilia.

La valutazione della sicurezza è attuata, per il Ponte Cinque Archi, soggetto ad azione sismica longitudinale, adottando l'analisi cinematica, basata sulla individuazione di meccanismi di collasso globali coinvolgenti anche le pile.

Il sisma trasversale si considera poco influente per la presenza di tiranti trasversali che collegano i paramenti murari, contrastandone il ribaltamento.

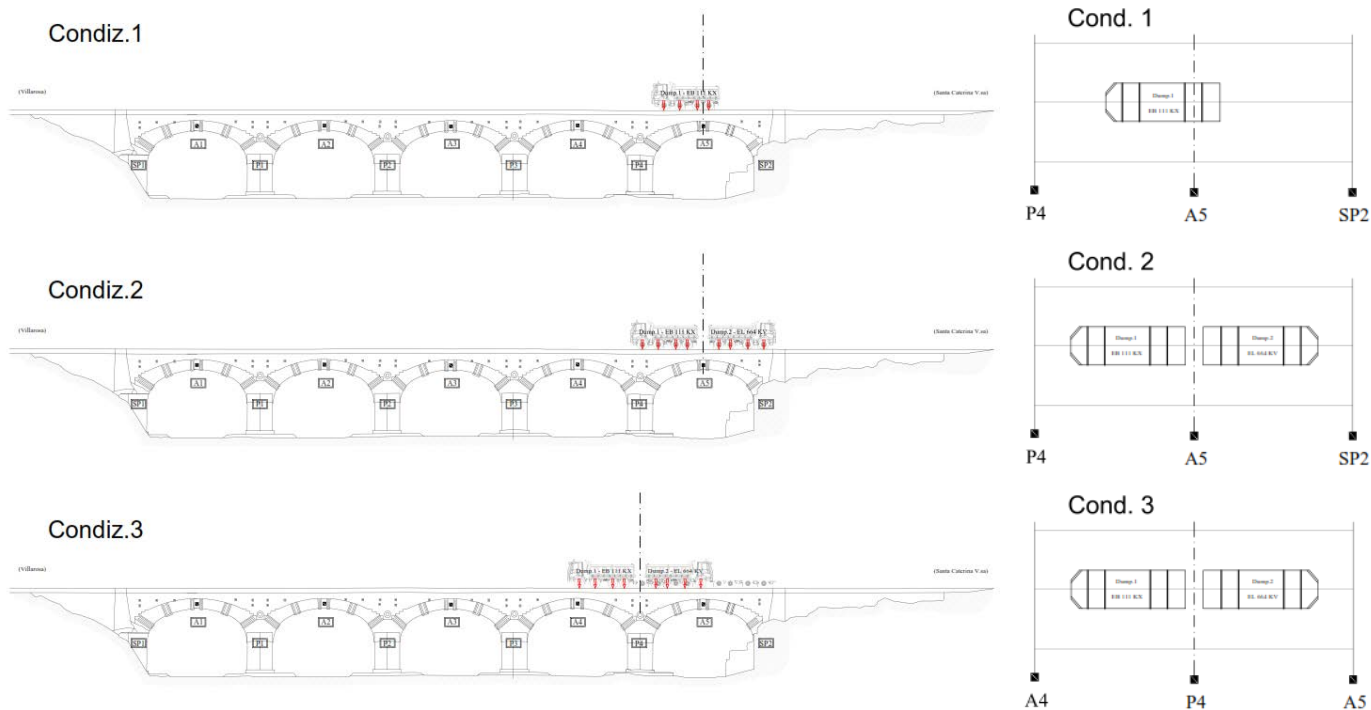


Figura 11. Tre delle otto condizioni di carico sul Ponte Cinque Archi



Figura 12. Livello Leika DNA 03



Figura 13. Condizione di carico N°2 – in asse al 5°arco

## BIBLIOGRAFIA

- Albenga, G., 1953, I Ponti, UTET Torino.
- Armetta, A., 2014, I Ponti in Sicilia (XVIII – XIX Secolo) fra tradizione e innovazione, Edizioni Caracol Palermo.
- Benfratello, S., Di Paola, M., Fossetti, M., 1999, *Analisi dinamica di ponti ad arco in muratura soggetti a a sisma e ad azioni mobili*, Convegno ANIDIS, Torino.
- Benvenuto, E., 1981, La Scienza delle Costruzioni e il suo sviluppo storico, Edizioni Sansoni, Firenze.
- Bosso, M., 2012, *Valutazione sismica di ponti ad arco in muratura tramite metodo cinematico*, Tesi di laurea, Università degli Studi di Padova.
- Brighenti, G., 2010, *Modellazione ed analisi di ponti ad arco in muratura: il ponte ferroviario sul fiume Reno*, Tesi di laurea, Università di Bologna.
- Bruno, D., Bruno, M., Lonetti, P., 2013, Uno studio sui ponti ad arco in muratura, Aracne Editrice Srl Roma
- Canzoneri, V., Di Maio, S., 2015, *Progetto dei lavori di consolidamento del Ponte Cinque Archi al Km 125+000 della SS 121 e sistemazione idraulica del fiume Salso*.
- Cavicchi, A., Gambarotta, L., 2005, *Collapse analysis of masonry bridges taking into account arch-fill interaction*, Engineering Structures.
- Clemente, P., Occhiuzzi, A., Raithel, A., 1995, *Limit behaviour of stone arch bridges*, Journal of Structures Engineering, ASCE.
- Clemente, P., 1998, *Introduction to dynamics of stone arches*, Earthquake Engineering and Structural Dynamics, N° 27.
- Da Porto, F., Franchetti, P., Grendene, M., Ranzato, L., Valluzzi, M., Modena, C., 2007, Structural capacity of masonry arch bridges to horizontal loads.
- Da Porto, F., 2013, *Vulnerabilità sismica dei ponti ferroviari in muratura*, Convegno CIFI, Padova.
- De Luca, A., Giordano, A., Mele, E., 2004, *A simplified procedure for assessing the seismic capacity of masonry arches*, Engineering Structures, 26.
- Duncan, J., Mookwa, R., 2001, *Passive Earth Pressures: Theories and Tests*, Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering.
- Gilbert, M., 2007, *Limit analysis applied to masonry arch bridge: state of the art and recent development*, Proc. of 5th International Conference on Arch Bridges.
- Guidi, C., 1916, *Lezioni sulla Scienza delle Costruzioni. Parte IV Teoria dei Ponti*, Edizioni Vincenzo Bona, Torino.
- Heyman, J., 1982, The Masonry Arch, Hellis Horwood Ltd.
- Laterza, M., D'amato, M., Casamassima, V., 2015, *Seismic assessment of old existing masonry arch bridges: an application to a case study*, Convegno ANIDIS, L'Aquila.
- Palladio, A., 1990, I Quattro Libri dell'Architettura, Hoepli edizioni.
- Pietrangeli, M.P., 1996, *Progettazione e costruzione di ponti*, Casa Editrice Ambrosiana.
- Possenti, C., 1865, *Relazione al Signor Ministro dei Lavori Pubblici di visita delle opere di ponti e strade e di porti, spiagge e fari nelle province siciliane*.
- Raithel, A., 1970, *Costruzioni di ponti*, Liguori editore, Napoli.
- Rinaldi, G., 1974, *La Costruzione dei Ponti*, Edizioni Eredi Veschi.
- Scibilia, N., Gerbino, E., Cammarata, M., 2015, *Monitoraggio del Ponte 5 Archi sulla s.s. 121 Catanese*, Convegno ANIDIS, L'Aquila.
- Serao, V., 1960, *Ponti e Viadotti in Muratura*, Manuale dell'Ingegnere Civile, Edizioni Cremonese Roma.
- Siviero, E., 1996, *Ponti delle Venezie: un percorso storico*, Edizioni libreria Cortina, Padova.
- Tecchio, G., Da porto, F., Thiella, C., Donà, M., Modena, C., 2015, *Seismic vulnerability assessment of single span masonry srch bridges*, Convegno ANIDIS, L'Aquila.
- Tesoriere, G., 1994, *Viabilità antica in Sicilia, dalla colonizzazione greca all'unificazione*, Edizioni Zedi Italia.
- Tesoriere, G., 1995, *Le strade e le ferrovie in Sicilia. Le tappe del loro sviluppo dopo l'unificazione*, Edizioni Zedi Italia.
- Troyano, F., L., a cura di Arici M, 2006, *Terra sull'acqua: atlante storico universale dei ponti*, Dario Flaccovio Editore, Palermo.
- C.N.R. - DT 213/2015 *Istruzioni per la Valutazione della Sicurezza Strutturale di Ponti stradali in Muratura*.
- D.M. 14/01/2008, *Norme Tecniche per le Costruzioni*.
- CIRC. Min. Infrastrutture e Trasporti N: 617/2009 *Applicazione delle N.T.C.*
- EUROCODICE 6 1996-1-1 *Progettazione delle strutture di muratura armata e non*.