



# Il ponte sospeso di Kamoro in Madagascar

SOLUZIONI TECNICHE E STRUTTURALI PER PONTI SOSPESI DI LUCE MEDIO-PICCOLA



Una vista del ponte da un'antenna

Marco Petrangeli\*  
Camillo Andreocci\*\*

Paolo Tortolini\*\*\*  
Cristiana Magnani\*\*\*\*

Gianclaudio Oliva\*\*\*\*\*

L'agenzia delle Strade del Madagascar (ARM) dispone di un finanziamento Banca Mondiale (WB) per la riabilitazione di alcuni ponti strategici lungo la Strada Statale 4 (RN4). La RN4 collega la provincia e la città di Mahajanga nel Nord-Ovest del Paese con la Capitale Antananarivo come illustrato in Figura 1.

Procedendo in direzione di Antananarivo, pochi chilometri dopo aver ricevuto il traffico proveniente dalla RN6, che scende da Nord, vi sono due grandi opere.

Dopo circa 5 km, si trova il ponte sospeso di Kamoro (Figura 2) quindi, dopo altri 65 km, vi è il grande viadotto a travi reticolari a via inferiore che attraversa le rapide rocciose del fiume di Betsiboka, in un paesaggio spettacolare (Figura 3). Entrambe le strutture hanno la maggioranza dei pannelli della lastra Arnodin gravemente danneggiati (Figura 4).

Oggi su questi ponti transitano convogli di peso superiore alle 50 t, incluse le grandi cisterne che riforniscono la capitale, ma anche molti altri mezzi pesanti le cui ruote hanno letteralmente sfondato la lastra con rotture progressive a fatica delle saldature del coppo centrale, seguite dal collasso a flessione ed il successivo sfondamento del piatto superiore di soli 4-5 mm.



1. L'ubicazione del ponte di Kamoro



2. Una vista del ponte dal fiume

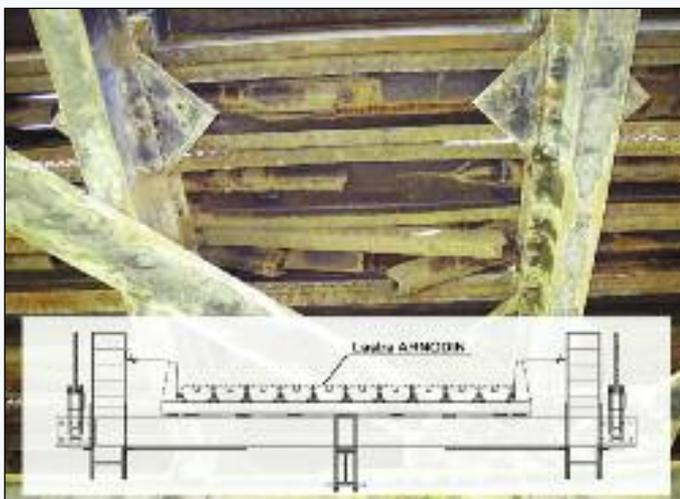
Il ponte sospeso di Kamoro è stato realizzato nel 1930 dai Francesi secondo uno schema a quel tempo molto utilizzato su luci che oggi consideriamo medio-piccole, ovvero tra i 100 e i 250 m circa [1].



3. Il ponte sul fiume Betsiboka



5. Il ponte di Sidi M' Cid a Costantine, in Algeria



4. La lastra Arnodin



6. Il ponte di Chiani presso Tarf, in Algeria

Il ponte di Kamoro è uno dei più grandi e strutturalmente avanzato con i suoi 207 m di luce centrale ed una campata laterale, anch'essa sospesa, di 60 m.

Gli Autori Scriventi hanno avuto modo di eseguire la riabilitazione di due ponti simili, realizzati sempre dai Francesi in Algeria all'inizio del secolo scorso, il ponte di Sidi M' Cid [2] a Costantine nel 1997 (Figura 5) e quello di Chiani [3] nella cittadina di Tarf nel 2005 (Figura 6). Questi ponti hanno tutti un impalcato con due travi parapetto supportate ogni 1-1,5 m da un pendino e un trasverso. La larghezza dell'impalcato è tipicamente di 4 m circa e, comunque, mai superiore ai 5 m, quindi, anche se ormai carrabili, non permettono il doppio

senso di marcia ed anche in senso unico alternato si hanno problemi di manovra in caso di mezzo in avaria.



7. Un dettaglio del sistema di sospensione



8. La carpenteria metallica dell'impalcato del ponte



9. Le torri in acciaio del ponte

La struttura del ponte di Kamoro, a meno della lastra Arnodin, versa in uno stato di conservazione piuttosto buono considerato che l'opera ha ormai 85 anni. Tutta la carpenteria metallica dell'impalcato, le travi reticolari parapetto (Figura 8) e i trasversi, necessitano solo di pulizia, eliminazione di qualche punto di ruggine e riverniciatura. Lo stesso vale per le bellissime torri (Figura 9) articolate con cerniera alla base. Meno buona è la situazione dei cavi (Figura 7), soprattutto in mezzzeria della campata centrale dove l'acqua che percola lungo i cavi ristagna con ossidi e altri detriti [4].

Considerato però che il sistema di sospensione è fortemente sovradimensionato, è possibile mantenerlo in opera intervenendo per arrestare o comunque rallentare la corrosione in atto. Le ispezioni condotte dagli Scriventi hanno mostrato che tutti e 12 i cavi di ciascuna fune non hanno fili spezzati in superficie e quindi è ragionevole pensare che, nonostante una riduzione di sezione resistente dovuta alla corrosione, dispongano ancora di almeno il 60% della resistenza originale. Tale resistenza è stata appurata prelevando alcuni campioni da un filo spezzato per urto o sabotaggio in prossimità degli ancoraggi. Il filo presentava un'ossidazione praticamente inesistente: d'altronde, questi acciai alto-legati tendono ad avere un ossido molto compatto, e una resistenza ultima di ben 1.300 MPa, come verificato nelle prove di trazione in laboratorio. A conti fatti il sistema di sospensione attuale dispone di un fattore di sicurezza a rottura superiore a 2,5, più che sufficiente considerato che, in conseguenza della lunghezza del ponte, la variazione tensionale nelle funi dovuta al passaggio di mezzi anche superiori alle 50 t è modesta. Anche i pendini si trovano in uno stato di conservazione accettabile, con qualche elemento più ammalorato. Le stesse considerazioni dei cavi principali

possono essere ripetute per questi elementi: sono strutture che in esercizio portano al massimo 5 t, ma che hanno una resistenza ultima pari ad almeno 30 t. Gli Scriventi ne hanno provato uno fino a 15 t ottenendo una risposta elastica lineare.

### Il progetto degli interventi di potenziamento dell'attraversamento

Sulla base del Progetto Preliminare (APS) presentato dagli Scriventi nel Luglio 2014 il Cliente ha deciso di sviluppare due soluzioni. La prima prevede la costruzione di un nuovo ponte sospeso in adiacenza all'esistente e la riabilitazione di quest'ultimo per adibirlo ad un traffico pedonale/leggero.

Come alternativa, nel caso il budget si rivelasse insufficiente, il Cliente ha voluto sviluppare una soluzione di riabilitazione integrale dell'esistente che preveda anche la sostituzione del sistema di sospensione che, ricordiamo, ancor oggi dispone di una resistenza sufficiente.

Questa prospettiva è chiaramente resa appetibile dall'opportunità costituita dall'apertura di un cantiere in questo luogo molto mal collegato e dove manca totalmente un mercato delle costruzioni. La sostituzione del sistema di sospensione, che presenta, in effetti, alcuni tratti soggetti a corrosione diffusa, permette di non dover intervenire nuovamente sul ponte per i prossimi 50 anni, salvo assicurare la necessaria manutenzione sulla carpenteria metallica. Il problema di questa soluzione è che, nonostante sia definitiva per il ponte esistente, non lo è per la viabilità malgascia e della RN4 in particolare, il cui traffico renderà l'attuale sezione del ponte rapidamente insufficiente. Un ponte lungo 300 m sul quale sia necessario transitare a senso unico alternato senza possibilità di manovra nel caso di avaria, ha una capacità di deflusso bassissima.



La RN4 ha invece una sezione di larghezza pari a circa 7 m e, sebbene oggi sottoutilizzata, serve insieme alla RN6 da asse principale Nord-Sud una nazione grande due volte l'Italia con una popolazione di 21 milioni circa di abitanti, di cui il 50% ha meno di 18 anni. Se si aggiunge inoltre che sono stati trovati importanti giacimenti d'idrocarburi nel canale del Mozambico, che probabilmente agiranno da volano e da acceleratore per tutto il sistema economico dell'isola, si capisce la drammaticità di una situazione che da un lato necessita di importanti interventi di potenziamento infrastrutturale e dall'altro manca di risorse adeguate. Tali interventi, per altro, non riguardano solo la viabilità di lungo raggio, ma ancor più quella dei principali centri abitati dove si è già in condizione di congestione perenne.

### Ponti sospesi a basso costo

Gli Scriventi, nel proporre un nuovo attraversamento, che è opportuno realizzare in adiacenza all'esistente, hanno ritenuto un ponte sospeso la scelta migliore, scartando altri schemi statici sulla base delle considerazioni discusse anche con i rappresentanti WB nel corso della riunione di presentazione del APS e di seguito brevemente riassunte.

Scartare una soluzione a travata, di qualunque tipo essa fosse, è sembrato quasi obbligato. Considerato che il ponte di Kamoro è l'opera di ingegneria ed architettura più importante del Paese, è evidente l'inappropriatezza di metterlo in ombra ad una travata con luci medio-piccole, controindicata anche per la presenza di fondazioni in alveo.

La possibilità di realizzare una trave di grande luce è anch'essa da escludere in quanto non ci sono le condizioni economiche per portare in loco l'attrezzatura necessaria al suo varo e comunque una travata si fatta striderebbe accanto ad un impalcato alto circa 2 m, incluse barriere e parapetto.

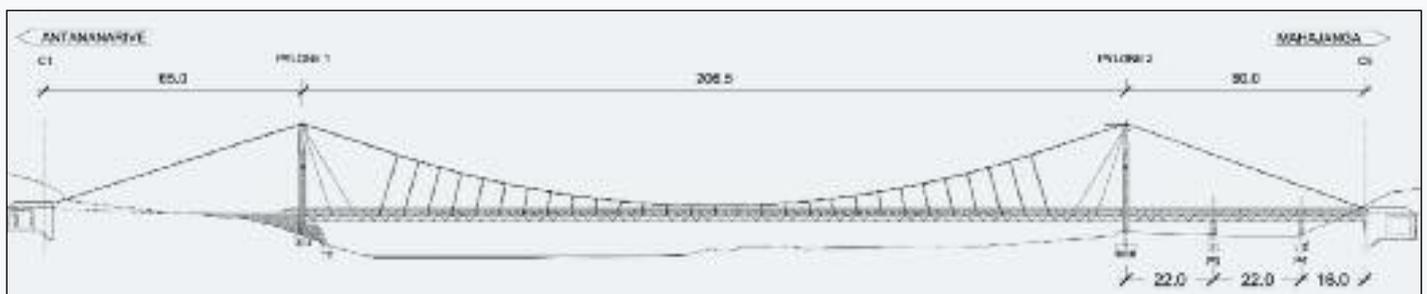
Per quanto riguarda l'alternativa strallata c'è da dire che anch'essa richiede dei mezzi di cantiere importanti per poter realizzare l'impalcato, sia esso in acciaio o in calcestruzzo. qualora questi mezzi possano essere portati in sito, perché disponibili o economicamente giustificati dalle dimensioni del progetto, allora lo schema strallato potrebbe essere preferibile, in quanto presenta alcune semplificazioni vantaggiose rispetto al sospeso. Diversamente, la sola soluzione percorribile è quella del ponte sospeso che può effettivamente essere messo in opera con mezzi molto ridotti [5], anche considerando che il Kamoro durante la stagione secca si guada a piedi, a differenza di quella delle piogge in cui il livello sale abbondantemente ed il fiume arriva a superare i 200 m di larghezza.

Le scelte qualificanti per poter realizzare un ponte sospeso di piccola luce con costo contenuto sono a nostro avviso le seguenti:

1. le torri devono essere realizzate in calcestruzzo con sezione circolare allungata piena. Ipotizzando per i cavi di sospensione un rapporto luce/freccia di circa dieci si ottengono torri alte meno di 25 m sopra il piano impalcato con un rapporto resistenza-rigidezza appropriato. Due trasversi possono bastare, l'ultimo a quota selle, e possono essere realizzati anche in acciaio;
2. è necessario e possibile evitare l'uso di selle metalliche. Possono bastare dei coppi metallici annegati nel calcestruzzo delle torri stesse. In altre parole, le selle devono essere ricavate con un capitello sommitale in calcestruzzo in testa alle antenne. In base al raggio che si utilizza per la deviazione dei cavi di sospensione, il capitello sarà poco più grande della dimensione longitudinale (allungata) del fusto;
3. è opportuno che le funi di sospensione siano realizzate da più cavi piccoli disposti parallelamente, in modo che ciascun cavo possa essere sostituito individualmente e che l'insieme formi una passerella d'ispezione durante la costruzione e manutenzione dell'opera. Gli Scriventi hanno utilizzato già cavi costituiti da trefoli viplati singolarmente nella riabilitazione integrale del ponte di Chiani [3];
4. l'impalcato deve avere una soletta in calcestruzzo armato, più economica e di più facile manutenzione rispetto ad una piastra ortotropa. Il peso aggiuntivo irrigidisce il sistema senza costituire particolare aggravio economico in quanto, su queste luci, il costo unitario d'approvvigionamento per i cavi di sospensione ha poca incidenza sul costo totale dell'opera;
5. l'impalcato deve essere realizzato con travatura metallica reticolare modulare, facilmente trasportabile e assemblabile.

Per quanto riguarda infine gli ancoraggi, ovviamente tutto dipende dalle condizioni geotecniche. Nel caso del Kamoro, le arenarie compatte relativamente superficiali rendono possibile la realizzazione di strutture che resistono a gravità e attrito con un costo accettabile. Il prospetto del nuovo ponte, che recepisce le considerazioni elencate ai punti precedenti, è rappresentato in Figura 10.

Di particolare importanza è il punto 3, ovvero tecnologia e disposizione dei cavi di sospensione. Gli Scriventi hanno sostituito i cavi per entrambi i ponti sospesi Algerini sopra richiamati. In un caso, il ponte di Sidi M' Cid, l'operazione è stata particolarmente facile in quanto i sei cavi spiroidali che costituiscono ciascuna fune sono disposti su di un piano orizzontale e sono singolarmente connessi alle clampe a cui sono collegati i pendini (Figura 11).



10. Il prospetto del nuovo ponte sospeso di Kamoro



## Ponti sospesi

La rimozione di un cavo può pertanto essere effettuata senza interferire con gli altri e quindi con il ponte in esercizio.

Per il ponte di Chiani, la sostituzione del sistema di sospensione è stata effettuata trasferendo tutto il carico dell'impalcato ad un nuovo sistema messo in parallelo. Questa operazione, abbastanza complessa, è molto facilitata dal mettere il nuovo sistema di cavi sempre in asse alle torri ma su di un piano differente rispetto a quello originale. Questa soluzione richiede, però, l'allargamento dell'impalcato che può essere sfruttato per portare all'esterno i marciapiedi, come nel caso del ponte di Chiani (Figura 12).

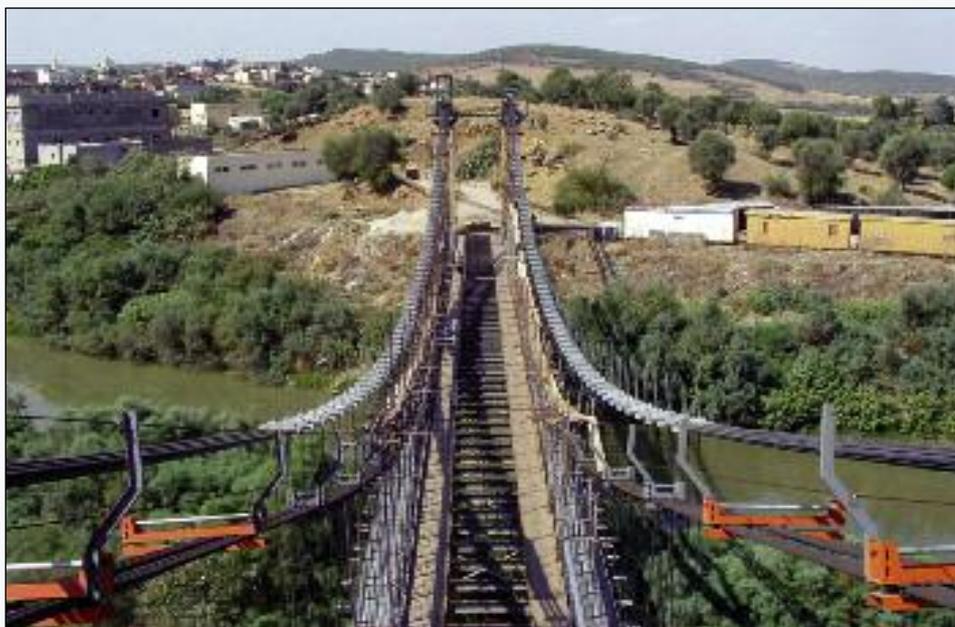
Nel caso di Kamoro la sostituzione individuale dei cavi non è possibile in quanto sono messi su tre piani sovrapposti e non possono essere liberati dalle clampe senza rilasciare tutte le altre ed il relativo pendino.



11. Le clampe sul ponte sospeso di Sidi M' Cid



13. Un dettaglio delle clampe e dei cavi del ponte di Chiani



12. Un esempio di disposizione dei nuovi cavi lateralmente ai preesistenti: il ponte di Chiani

Considerato che il fiume è per lunghi mesi in secca, si prevede allora di poggiare l'impalcato su torri provvisorie rilasciando tutto il sistema di sospensione e quindi sostituirlo con funi identiche che utilizzano gli stessi ancoraggi e le stesse clampe. Questa soluzione si configura peraltro come un auspicabile restauro conservativo di un'opera che è parte irrinunciabile del patrimonio storico-monumentale malgascio.

Sempre a proposito dei cavi, l'adozione della tecnologia a trefoli utilizzata nel precompresso e per gli stralli può portare a risparmi significativi rispetto alla soluzione a funi e anche a un'ottima durabilità senza l'onere di compattare e rivestire le funi come ancora si fa per i ponti sospesi di grande luce. L'unica controindicazione legata all'utilizzo di trefoli singolarmente viplati è quella di non poter trasferire forze tangenziali elevate ai cavi (Figura 13), come ad esempio avviene per i

primi pendini accanto alle torri. Per il progetto di Chiani furono condotte delle prove di laboratorio di breve e lunga durata su cavi composti da 13 trefoli - del tipo protetto in resina e vipla - ed i risultati mostrarono che è comunque possibile trasferire forze tangenziali piuttosto elevate.

Ciò non toglie che per i tratti più inclinati dei cavi è necessario trovare una soluzione alternativa se non si vogliono realizzare delle clampe particolarmente onerose che siano in grado di trasferire le forze tangenziali ai trefoli viplati. Per la costruzione di un ponte sospeso economico è infatti necessario ridurre al massimo o eliminare del tutto le fusioni che interessano non solo le clampe ma anche selle, deviatori e capocorda. ■

\* Professore della Facoltà di Ingegneria dell'Università "G.D'Annunzio" di Pescara

\*\* Direttore Tecnico di Integra Srl

\*\*\* Ingegnere Dipartimento Strutture di Integra Srl

\*\*\*\* Project Manager di Spea Ingegneria Europea SpA

\*\*\*\*\* Area Manager di Spea Ingegneria Europea SpA

### BIBLIOGRAFIA

- [1]. LCPC, SETRA (1989). "Les Ponts suspendus en France".
- [2]. M. Petrangeli, M. Petrangeli - "Rehabilitation of the Sidi M' Cid Suspension Bridge", SEI, 4/2000, pp. 254-258, 2000.
- [3]. M. Petrangeli, M. Petrangeli - "The Chiani Suspension Bridge: A Complete Overhaul", SEI, 3/2009, pp. 262-270, 2009.
- [4]. FHWA (2012) - "Primer for the Inspection and Strength Evaluation of Suspension Bridge Cables", Publication No. FHWA-IF-11-045.
- [5]. [www.bridgestoprosperty.org](http://www.bridgestoprosperty.org).