

“PONTE SOSPESO DI KAMORO”

Petrangeli M., Andreocci C., Magnani C., Bolognesi F. (2017)

“Questo articolo è stato pubblicato per la prima volta sulla rivista *Strade & Autostrade*, casa editrice EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

“This article was first published in *Strade & Autostrade*, publisher: EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

“Cet article a été publié pour la première fois sur *Strade & Autostrade*, éditions : EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

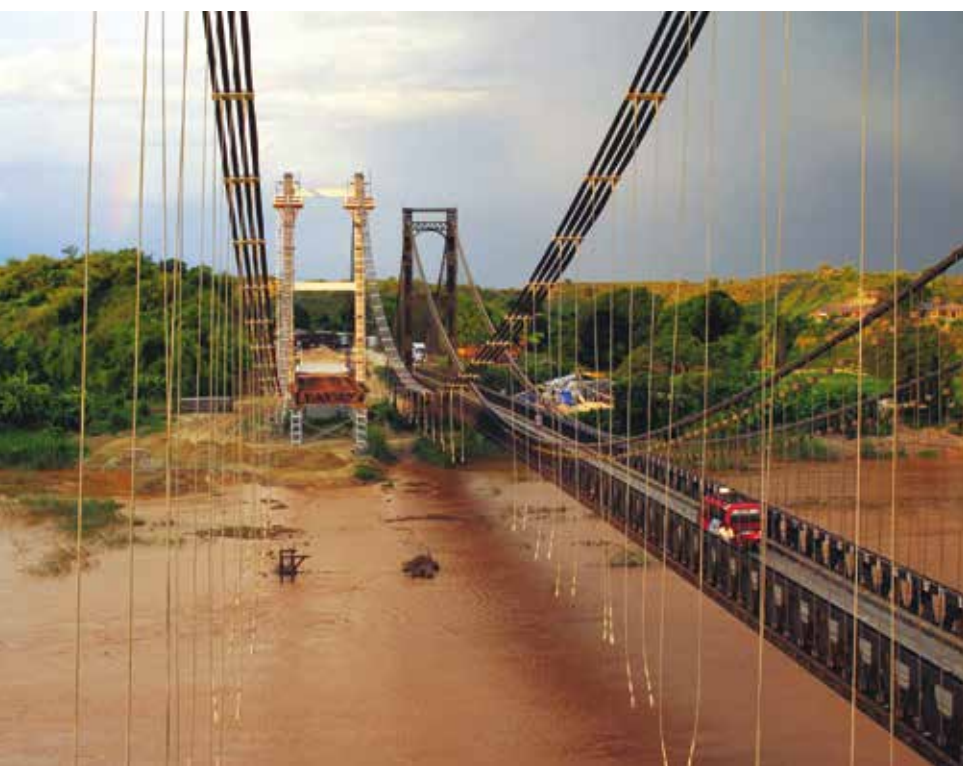
“Este artículo se publicó por primera vez en la revista *Strade & Autostrade*, casa editorial : EDI-CEM, <http://www.stradeeautostrade.it/>”

PONTE SOSPESO DI KAMORO

UNA COSTRUZIONE ECONOMICA ED EFFICACE

**UN'OPERA FORSE TRA LE PIÙ BELLE TRA I PONTI SOSPESI DI LUCE MEDIO-PICCOLA,
 SCHEMA GIÀ UTILIZZATO DIFFUSAMENTE PER GLI ATTRAVERSAMENTI FLUVIALI
 IN EUROPA E IN AFRICA NEI PRIMI ANNI DEL SECOLO SCORSO**

Il nuovo ponte di Kamoro in fase di ultimazione



1. I due ponti sospesi sul Kamoro in Madagascar

Nel 2014 la Spea Engineering SpA è risultata aggiudicataria della progettazione e della direzione lavori degli interventi di riabilitazione del ponte sospeso di Kamoro (si veda "S&A" n° 109). Il ponte, realizzato nel 1932 dai Francesi, è posto lungo la RN4, una delle arterie principali del Paese, che dalla capitale Antananarivo conduce alle principali città del nord ovest, Mahajanga e Diego Suarez (Antsiranana).

Con i suoi 207 m di luce centrale, il Kamoro è forse il più bello tra questi ponti sospesi di luce medio-piccola, utilizzati diffusamente in molti attraversamenti fluviali in Europa e in Africa nei primi anni del secolo scorso [1, 2 e 3]. Sin dalle prime ispezioni era parso evidente come il ponte non avesse bisogno di interventi significativi di restauro a meno della lastra ortotropa di impalcato, ormai rotta a fatica dal forte aumento del traffico pesante e dal carico unitario degli pneumatici dei moderni camion che vi transitano per trasportare merci dai porti del Nord verso la Capitale.

Si decise quindi da subito di integrare i fondi stanziati con delle ulteriori somme disponibili presso il donatore (Banca Mondiale) per realizzare un nuovo attraversamento a due vie dato che l'esistente ha una piattaforma di soli 4 m su cui è necessario transitare a senso unico alternato. Tutto questo processo decisionale e il relativo iter progettuale è stato riportato dagli Scriventi in un articolo pubblicato sul fascicolo n° 109 Gennaio/Febbraio 2015 [4].

LE FASI SUCCESSIVE DEL PROGETTO

Nel presente lavoro vengono ora descritte le fasi successive del progetto che hanno riguardato la stesura dei disegni esecutivi di dettaglio e, a seguire, i lavori di costruzione realizzati dall'Impresa Eiffage e terminati in queste settimane con grande soddisfazione di tutti gli attori coinvolti.

Si deve infatti ricordare che il nuovo ponte di Kamoro è la più grande opera realizzata in Madagascar dal Dopoguerra e marca sicuramente una significativa svolta del Paese verso la normalizzazione dopo l'instabilità politica degli ultimi anni.

Considerato poi che il ponte sorge in un'area di una bellezza naturale struggente ma ancora totalmente priva di qualunque forma di industrializzazione, il progetto ha avuto tutto il fascino di quelle imprese pionieristiche che devono continuamente confrontarsi con la necessità di trovare soluzioni semplici e ragionevoli a fronte di una grande scarsità di mezzi d'opera e tecnologie anche basilari dell'attuale mercato delle costruzioni malgascio. Un esempio su tutti basterà a chiarire: si è realizzata una luce di oltre 200 m con una delle gru più grandi disponibili nel Paese, una piccola 60 t gommata.

Il progetto esecutivo ricalca fedelmente l'impostazione di quello a base gara, sviluppato in tutta fretta nei mesi di Agosto e Settembre 2014 quando il Cliente convenne di optare per la soluzione "ponte nuovo in affiancamento" rivoluzionando, di fatto, l'oggetto della commessa che doveva essere la semplice riabilitazione dell'esistente.

Il nuovo ponte, già descritto nel richiamato n° 109/2015, è realizzato una quindicina di metri a valle in affiancamento all'esistente. Le luci dei due ponti sono identiche, ma la campata di riva lato Mahajanga - che ricade in zona golenale - nel nuovo ponte è realizzata con una trave continua su tre luci di 20 m circa, anziché essere sospesa come nell'esistente.

Pile e piloni sono in calcestruzzo, l'impalcato è una trave reticolare in acciaio con soletta collaborante in calcestruzzo.

Le uniche differenze degne di nota tra il progetto posto a base di gara e quanto effettivamente costruito si riscontrano al level-

lo fondazionale dove i sondaggi eseguiti in fase successiva alla progettazione del 2014 hanno verificato che le arenarie affioranti in prossimità del ponte avevano una estensione e compattezza inferiore a quanto ipotizzato. È quindi stato possibile sostituire i micropali previsti nel progetto a base di gara per le fondazioni di pile e torri con pali del diametro di 1.000 mm di lunghezza pari a 20 m circa.

Per motivi analoghi, e con lo scopo di accelerare i tempi di costruzione, si è deciso di realizzare i due ancoraggi con soluzioni differenti. L'ancoraggio M0, lato Antananarivo, è costituito da un solettone nervato incassato nelle arenarie.

La realizzazione di questa struttura aperta è stata rapida per la sua carpenteria semplice ed altrettanto facile il suo riempimento e compattazione.

Per l'ancoraggio C5, lato Mahajanga, il massivo è stato invece ancorato agli strati più consistente di arenaria posta a circa 10 m sotto il piano di scavo mediante un centinaio di micropali perforati in obliquo.

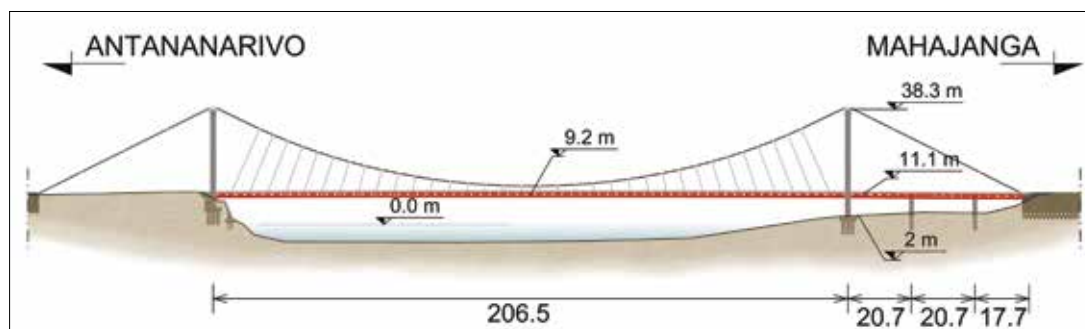


3. L'ancoraggio M0

Questa soluzione ha permesso di contenere le dimensioni dell'ancoraggio, ma ha richiesto un tempo di costruzione molto superiore all'altro in quanto le sonde disponibili non erano esattamente lo stato dell'arte a cui siamo abituati in Europa.

Per le torri che sostengono i cavi di sospensione e per le pile delle campate di accesso è stata confermata la soluzione

in calcestruzzo armato a sezione piena ellittica di dimensioni pari a 160x120 cm, che diventano 120x120 cm per le seconde. Questa sezione, oltre ad essere la più efficiente, è anche semplice da realizzare ed esteticamente molto gradevole. Per i due trasversi che collegano i fusti delle torri è stata confermata



2A e 2B. Il prospetto del nuovo ponte sospeso di Kamoro



4. L'ancoraggio C5

la soluzione scatolare in acciaio che non richiedeva di cassare in quota questi elementi, ma solo una buona precisione nel posizionamento delle contropiastre annegate nel getto dei fusti. Considerato infatti che tutta la carpenteria metallica è stata fabbricata in Europa, i trasversi sono stati consegnati in cantiere insieme all'impalcato quando le torri erano completate da mesi e si era già in fase di posa in opera dei cavi.

Durante la posa in opera dei cavi, queste torri dovevano essere arretrate di circa 35 cm per bilanciare il successivo spostamento in avanti quando i cavi sarebbero andati in tiro con la messa in opera dell'impalcato. Il progetto a base di gara non prevedeva di utilizzare delle selle scorrevoli, ma della semplice carpenteria metallica annegata nei getti delle torri e quindi richiedeva di tirare indietro le torri con delle funi, sistema semplice ed economico diffusamente utilizzato fino ad pochi decenni orsono anche su ponti di grande luce. L'Impresa, nonostante il prezzo a corpo della soprastruttura, ha preferito utilizzare delle selle scorrevoli in acciaio, selle del tutto simili a quelle già progettate e utilizzate dagli scriventi per il ponte sospeso di Chiani in Algeria [3], con torri in muratura che non potevano ovviamente essere tirate indietro.

Il problema di queste selle scorrevoli è che vanno ricentrate con un buon tempismo ed un sistema efficace. Il tempismo è impor-



5. Le torri in calcestruzzo

tante perché se lo si fa troppo presto c'è il rischio di far scorrere i cavi sulle stesse vanificando l'operazione di "tie back", mentre se lo si prova a fare troppo tardi, con i cavi già in tiro (impalcato appeso), si potrebbero incontrare degli attriti eccessivi. Anche il sistema di tiro è importante: le selle arrivate in cantiere non ne prevedevano uno, ma con l'Impresa si è rimediato elaborandone uno a barre estremamente efficace.

Dopo alcuni tentativi falliti con altri sistemi, finalmente sono state installate queste barre e si è iniziato a tirare. Molto divertente il momento in cui si è vinto l'attrito statico e i piloni sono partiti all'indietro rilasciando parte dell'energia elastica accumulata. Un po' come ad inizio spinta nei vari di punta, solo che qui si stava in quota a 30 m circa e i fusti hanno iniziato a camminare da soli tra lo stupore di molti dei presenti. Sono seguite alcune tolemaiche quanto comiche discussioni per convincere la gran parte degli astanti che erano andati indietro i piloni e non avanti le selle, discussioni a cui si è potuto porre la parola fine solo dopo misure topografiche decimetriche (!).



6. Le selle scorrevoli in acciaio

Per i cavi di sospensione si è adottato il sistema già utilizzato dalla Integra insieme a Tensa per il ponte sospeso di Chiani in Algeria. In pratica, si utilizza la tecnologia degli stralli, ovvero trefoli arrangiati in cavi ed ancoraggi standard con piastre e cunei. Per il nuovo ponte di Kamoro sono stati adottati 4 più 4 cavi da 29 trefoli 06" super in modo da ottenere una sezione esagonale compatta (5+6+7+6+5 trefoli).

Essendo i singoli cavi non contenuti in un tubo in PHDE come si fa con gli stralli, in quanto complicherebbe enormemente la posa in opera dei collari per l'attacco dei pendini e sarebbe comunque altamente improbabile ottenere la tenuta stagna del sistema, sono stati utilizzati trefoli protetti con resina e vipla. Il rivestimento in resina è senz'altro utile in quanto pensare di mettere in opera i trefoli, soprattutto in Africa, senza danneggiare la vipla è quanto meno velleitario; la resina è invece molto più tenace e più difficile da scalfire.

Anche per i collari è stata riproposta la soluzione già collaudata con il ponte di Chiani, cioè quella di realizzarli lavorando a macchina delle piastre di grande spessore. La soluzione è pratica ma conduce ad elementi molto pesanti e strutturalmente inefficienti. Per questi elementi deve essere possibile utilizzare una soluzione pressopiegata che permetta di renderli molto più leggeri. La loro



7. Un dettaglio di cavi e collari

installazione è infatti terribilmente semplificata se si riesce a tenerli entro un peso manovrabile a mano. Da notare come questi collari permettano la rimozione di un cavo alla volta, caratteristica irrinunciabile in quanto consente la sostituzione del sistema di sospensione un cavo alla volta, senza necessità di prevedere un sistema ausiliario di sostentamento dell'impalcato.

Un aspetto che sicuramente non passa inosservato del nuovo ponte sono i pendini non verticali, ma bensì perpendicolari ai cavi di sospensione e quindi radiali. Questa configurazione si è resa necessaria per non trasmettere eccessive forze tangenziali tra pendini e cavi di sospensione; diversamente si potrebbe avere scorrimento, a lungo termine, dei collari sui cavi.

In effetti, le prove condotte in laboratorio per verificare la capacità a breve e lungo termine di trasferire forze tangenziali ai cavi realizzati con trefoli viplati hanno mostrato che essa è più che discreta, ma certo non è paragonabile a quella dei sistemi in cui i collari sono a diretto contatto con l'acciaio delle funi.

Nel caso del ponte di Chiani [3], in cui i collari erano molto ravvicinati e la componente tangenziale modesta, si mantennero i pendini verticali anche perché si attaccavano all'impalcato originale che - come nel caso del vecchio Kamoro - ha la necessità di essere sostenuto su ciascun trasverso ad interasse di poco superiore al metro. Per il nuovo ponte di Kamoro, l'interasse pendini è invece pari a 6 m circa e quindi le forze tangenziali sono ben maggiori, anche per il peso molto superiore dell'impalcato. Non conoscendo quindi l'esatto comportamento meccanico (viscoso) a lungo termine della vipla, si è preferito disporre i pendini perpendicolarmente ai cavi di sospensione anziché all'impalcato. Peraltro, i test numerici condotti hanno mostrato che inclinando i pendini non si ha una apprezzabile perdita di efficienza del sistema [5] né tale configurazione presenta particolari controindicazioni costruttive.

L'IMPALCATO

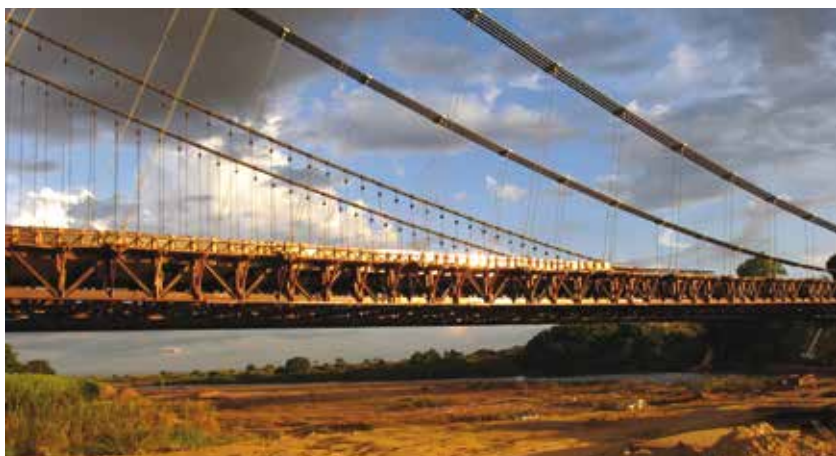
L'impalcato del nuovo ponte di Kamoro è realizzato con una semplicissima trave reticolare in acciaio Corten e soletta collaborante. La diffusione dell'acciaio autopatinante sta dando in effetti una grande spinta all'utilizzo di strutture reticolari che in precedenza soffrivano di problemi di corrosione per via della frammentarietà delle superfici e dei recessi, difficili da proteggere efficacemente e ancor più difficili da mantenere. Il Kamoro è la prima opera in acciaio auto patinante del Madagascar: per la sua introduzione è stata necessaria una adeguata campagna di informazione presso il pubblico specializzato e la stampa.

La posa in opera della carpenteria metallica è stata eseguita in appena due settimane con un metodo proposto dagli scriventi, rapido e ardito. Approfittando delle campate di accesso lato Mahajanga già montate, si è avanzato con il varo a sbalzo in maniera asimmetrica. Dato che in questa fase le funi non avevano alcuna rigidità in quanto scariche, soprattutto per carichi totalmente fuori funicolare in quanto asimmetrici, si è puntellato l'impalcato da sotto con tre appoggi provvisori posti a circa 20 m di interasse. I conci venivano quindi imbullonati a sbalzo alla parte già montata e poi appesi ai pendini, i quali però erano in grado di dare un contributo modestissimo al sostegno dell'impalcato che era portato a mensola con il contributo degli appoggi provvisori. Avanzando con il montaggio dell'impalcato, il tiro nel sistema di sospensione è andato aumentando e la simmetrizzazione del carico ha spostato la funicolare dei cavi fintanto che l'impalcato non è "decollato" staccando dagli appoggi provvisori.

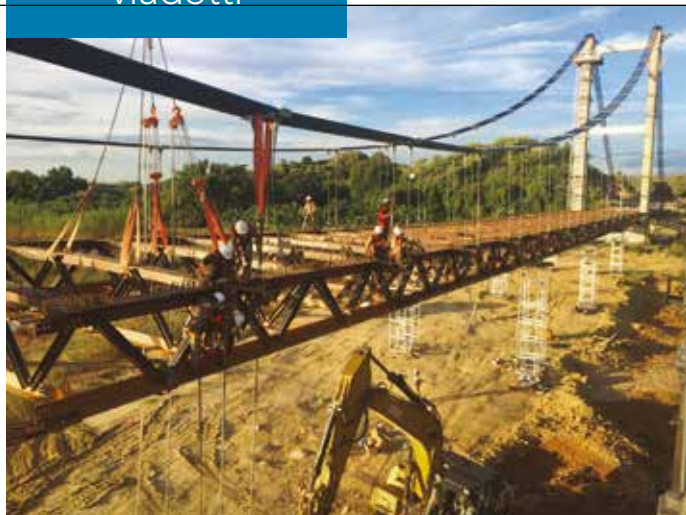
Questo metodo costruttivo è stato particolarmente efficace e veloce; tutto l'impalcato è stato montato in due settimane in quanto ciascun cono veniva imbullonato a sbalzo sul precedente senza alcun problema di tolleranza. I metodi di montaggio simmetrici più correntemente utilizzati richiedono invece, in una o più fasi, di montare dei conci di chiave. Il montaggio di questi conci pone sempre dei problemi di tolleranza, problemi comunque risolvibili, a patto di disporre di tempo e di attrezzature adeguate.

Gli scriventi non hanno ancora fatto analisi estensive per verificare se si sia trattato di un colpo di fortuna legato alla specifica lunghezza della campata ovvero se tale metodo di montaggio sia applicabile su di un range significativo di luci/rigidità di impalcato: certo è che vedere l'impalcato procedere a sbalzo su di un ponte sospeso a quella velocità ha fatto sembrare quasi ottocenteschi i metodi tradizionali simmetrici.

Terminato lo smontaggio degli appoggi provvisori si è proceduto a posare in opera la soletta prefabbricata. Questa pesa circa quattro volte la carpenteria metallica dell'impalcato e quindi la sua posa in opera ha portato un forte impegno flessionale dell'impalcato che si deformava sotto il peso non uniforme delle solette man mano che le stesse venivano poggiate sulla carpenteria. In questo caso si è dovuto quindi procedere in maniera quasi simmetrica man mano che l'impalcato passava da un peso di 1 t/m di carpenteria a 5 t/m con la posa degli elementi di soletta.



8. La configurazione radiale dei pendini



9. Il momento in cui l'impalcato stacca dagli appoggi provvisori

CONCLUSIONI

L'esperienza del nuovo ponte di Kamoro ha dimostrato in maniera inequivocabile che i ponti sospesi sono una soluzione tecnicamente ed economicamente molto concorrenziale anche su luci medio piccole. La loro competitività è legata alla estrema facilità di fabbricazione e montaggio. Se nel caso dei ponti pedonali questo è oggi assodato grazie al fenomeno "Bridge to Prosperity" (<http://bridgestoprosperty.org>), che da sogno di un visionario svizzero è divenuto il salotto buono e politically correct dell'ingegneria mondiale, altrettanto non si può dire per i ponti stradali, dove per anni si è sentito dire che le soluzioni strallate sono più efficaci.

In effetti, non sembrerebbero esserci controindicazioni significative all'utilizzo di ponti sospesi su luci medio-piccole se non quelle legate all'onere degli ancoraggi dove i terreni siano molto

scadenti. Ma non appena si disponga di terreni di buona qualità dove ancorare i cavi, la soluzione sospesa semplifica molto la costruzione dell'opera in quanto riduce le interazioni tra le diverse componenti permettendo di disaccoppiare le diverse attività e realizzarle quindi in serie con ogni componente che beneficia di quelle precedenti già in opera.

Realizzati torri e ancoraggi, si possono mettere in opera i cavi con estrema facilità in quanto scarichi; una volta in opera i cavi ci si appende l'impalcato.

Chiunque abbia un po' di familiarità con la costruzione di un ponte strallato di pari luce [6] sa bene che la fase di messa in opera dell'impalcato, tiro e ritiro degli stralli è molto più complessa e quindi potenzialmente meno adatta alla realizzazione di nuove infrastrutture nei Paesi in via di sviluppo dove non si dispone di macchinari e manodopera specializzata. Ancor meno indicati su tali luci sono i sistemi a travata che, per definizione, necessitano di mezzi d'opera molto grandi e onerosi, quindi difficilmente convenienti da importare per una singola opera, sempre ammesso che si riesca a farli arrivare in sito. ■

⁽¹⁾ Professore, Presidente di Integra Srl

⁽²⁾ Ingegnere, Direttore Tecnico di Integra Srl

⁽³⁾ Ingegnere, Project Manager di Spea Engineering SpA

⁽⁴⁾ Ingegnere di Spea Engineering SpA

Bibliografia

- [1]. LCPC, SETRA - "Les Ponts suspendus en France", 1989.
- [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]. M. Petrangeli, C. Andreocci, P. Tortolini, C. Magnani, G. Oliva - "Il ponte sospeso di Kamoro in Madagascar", "Strade & Autostrade", n° 109 Gennaio/Febrero 2015, pp. 58-62, 2015.
- [5]. F. Del Drago, P. Tortolini, M. Petrangeli - "The new Kamoro suspension bridge in Madagascar", Global Engineering Challenges, IABSE Conference Geneva, 2015.
- [6]. M. Petrangeli, G. Usai, M. Pietrantoni - "Lo strallato di Ostellato", "Strade & Autostrade", n° 106 Luglio/Agosto 2014, pp. 56-59, 2014.



10. La fase di posa in opera della soletta prefabbricata

DATI TECNICI

Stazione Appaltante: Autorité Routière de Madagascar (A.R.M.)

Finanziamento: Banque Mondiale (World Bank)

Progetto d'appalto: Spea Engineering SpA e Luxconsult S.A.

Direzione Lavori: Spea Engineering SpA e Luxconsult S.A.

Progetto costruttivo: BIEP - Bureau d'Étude Interne du Groupe d'Eiffage

Progettazione del ponte sospeso: Integra Srl

Progettista e Direttore dei Lavori: Prof. Marco Petrangeli

Impresa esecutrice: Eiffage Travaux Publics SpA

Importo dei lavori: 15.445.086 Euro

Data di consegna: Giugno 2015

Data di ultimazione: Giugno 2017