

Saida - Moulay Slissen Railway:

Continuous Incremental-Launch Cellular-Caisson Deck

Ferrovia Saida – Moulay Slissen:

Impalcato a cassoni cellulari per viadotti continui a spinta

A. Ghezzi¹, E. Campa², M. Mancini³

¹ *Direttore Tecnico di Astaldi Algeria*

² *Responsabile Know-how, Comunicazione e Innovazione di Astaldi Corporate*

³ *Responsabile Comunicazione Tecnica di Progetto di Astaldi Spa*

ABSTRACT: The railway Saida - Moulay Slissen, of a length of 133 km, under construction by Astaldi in Algeria, includes a series of viaducts consisting of continuous prestressed reinforced concrete single-cell box-shaped caisson decks, erected by incremental launch technique and by solidarizing prefabricated elements *in situ*. These are 7 viaducts of a length ranging from 117 m to 342 m, for a total of 1,359 m.

Type of structure, construction method and design approach are, for these railway works, an important reference for work owners, companies and designers.

The Company adopted the continuous beam pattern with 45-m-span central sections and 36 m-span end sections.

The main viaduct consists of 8 spans, six of which are 45 m long and two of which are 36-m-long, for a total length of 342 meters, the height of the piers reaching 36 meters, the viaduct extending, on a plan view, along a curve of a radius of 3,200 meters and with a longitudinal gradient of 1.6%.

The choice of this type of viaduct involves greater complexity of execution, compared to the use of the common iso-static beams, but gives performance and management advantages, in terms of maintenance as well as travelling comfort for users.

This article will outline design approach and construction method, highlighting all the unique aspects characterizing these important works, such as, by way of example, the structural analysis during the execution of the works and after construction, the rail-structure interaction, the analysis of seismic behavior, the geometrical characteristics of the layout and how these interact with the incremental launch techniques and final testing activities presently in progress.

KEYWORDS: prestressed concrete; railway line; incremental-launch

ABSTRACT – Nella tratta ferroviaria Saida - Moulay Slissen lunga 133 km, in costruzione da parte di Astaldi in Algeria, sono stati realizzati una serie di viadotti con impalcato continuo a cassone monocellulare in c.a.p., realizzati mediante spinta e solidarizzazione di elementi prefabbricati in opera.

Tipologia strutturale, metodologia realizzativa ed approccio progettuale di queste opere costituiscono, in campo ferroviario, un'importante riferimento per amministrazioni, imprese e progettisti.

Si è adottato lo schema a trave continua con luci centrali da 45 metri e luci laterali da 36 metri.

Il più importante dei viadotti realizzati è composto da 8 campate, 6 da 45 metri e due da da 36 metri, per complessivi 342 metri, l'altezza delle pile raggiunge i 36 metri, in planimetria il viadotto si sviluppa in curva circolare di 3.200 metri di raggio ed ha pendenza longitudinale dell'1,6 %.

La scelta di questa tipologia comporta maggiore complessità esecutiva, rispetto all'impiego delle consuete travate iso-statiche, ma consente benefici nell'esercizio e gestione della linea, sia in termini di manutenzione che di confort di marcia.

Il successivo articolo illustrerà l'approccio progettuale e la metodologia realizzativa, mettendo tutti gli aspetti singolari che caratterizzano queste importanti opere, quali ad esempio l'analisi strutturale nelle fasi definitive e temporanee, l'interazione binario-struttura, lo studio del loro comportamento sismico, le caratteristiche geometriche del tracciato e di come queste interagiscano con le tecniche di spinta.

KEYWORDS: calcestruzzo precompresso; linea ferroviaria; ponte a spinta incrementale

1 INQUADRAMENTO DEL PROGETTO

Il progetto della linea ferroviaria Saida–Moulay Slissen (SMS) acquisito da Astaldi S.p.A., è la continuazione del precedente lotto Saida–Tiaret di 150km e si sviluppa per una lunghezza di circa 133km di binario in direzione prevalentemente est-ovest nella zona degli “Hauts Plateaux” algerini, zona collinare pre-desertica caratterizzata da oscillazioni di quota comprese tra 660m e 1010m sul livello del mare. La linea è a singolo binario, predisposta per accogliere in futuro un secondo binario, a percorrenza mista per trasporto passeggeri con 4 treni/giorno con velocità massima di 160km/h e trasporto merci con 2 treni/giorno e velocità massima di 80km/h. L’orografia particolarmente accidentata ha comportato la necessità di eseguire parte del tracciato in viadotto per una lunghezza complessiva di 1.9km.



Foto 1 – Il viadotto n. 12 della SMS

Picture 1 - Viaduct No. 12 of SMS



Fig. 1 – Mappa dei due lotti Astaldi

Picture 2 - Map showing the two lots awarded to Astaldi

2 INTRODUZIONE

Per realizzare questa tratta ferroviaria sono stati progettati una serie di viadotti con impalcato a cassone monocellulare in c.a.p. con schema di vincolo iperstatico e tra questi il principale, tenendo conto della lunghezza dell’impalcato e della sua altezza di varo, è il Viadotto identificato come n°12. La realizzazione di queste opere, con impalcato a trave continua, acquisisce ancor più rilievo in ragione del fatto che il sistema è utilizzato per la prima volta in Algeria per lavori ferroviari, dove si preferisce normalmente l’utilizzo di sistemi isostatici. La scelta di questa tipologia di viadotti in calcestruzzo ha comportato sicuramente una maggiore complessità esecutiva che però ha il grande vantaggio di richiedere minimi interventi di manutenzione in esercizio e di affrontare senza particolari difficoltà le estreme escursioni termiche tipiche di questa zona dell’Algeria.

Il modello di calcolo scelto per l’analisi strutturale è un modello tridimensionale completo, costituito dall’impalcato, dalle spalle, dalle pile, dalle fondazioni e dal terreno di fondazione schematizzato con elementi elastici di opportuna rigidità dedotta dai parametri geotecnici del terreno in sito, valutando gli effetti delle varie condizioni di carico previste dagli Eurocodici, e quelli delle azioni sismiche secondo le “Règles Parasismiques Algériennes RPA99-Version 2003”, tenendo conto, in tale modo, delle effettive geometrie delle strutture (impalcato, spalle, pile) e caratteristiche del terreno di fondazione.

Nell’ambito delle previste verifiche agli SLS e SLU sono stati anche considerati gli effetti prodotti dagli abbassamenti differenziali di spalle e pile dedotti dalle caratteristiche del terreno in sito relativamente all’entità dei carichi verticali trasmessi in fondazione.

Il modello di calcolo scelto per l’analisi strutturale è un modello tridimensionale completo, costituito dall’impalcato, dalle spalle, dalle pile, dalle fondazioni e dal terreno di fondazione schematizzato con elementi elastici di opportuna rigidità dedotta dai parametri geotecnici del terreno in sito, valutando gli effetti delle varie condizioni di carico previste dagli Eurocodici, e quelli delle azioni sismiche secondo le “Règles Parasismiques Algériennes RPA99-Version 2003”, tenendo conto, in tale modo, delle effettive geometrie delle strutture (impalcato, spalle, pile) e caratteristiche del terreno di fondazione.

Nell’ambito delle previste verifiche agli SLS e SLU sono stati anche considerati gli effetti prodotti dagli abbassamenti differenziali di spalle e pile dedotti dalle caratteristiche del terreno in sito relativamente all’entità dei carichi verticali trasmessi in fondazione.



Foto 2 – Viadotto in avanzamento
Picture 2 - Viaduct works in progress

3 CARATTERISTICHE PRINCIPALI

Tale viadotto è complessivamente lungo 342 metri, tra la progressiva chilometrica 51+799 della spalla A e quella 52+141 della spalla B ed è composto di 8 luci (2x36m+6x45m) con un'altezza massima di varo di circa 37m, con tracciato in pianta a curvatura costante di 3200m di raggio e pendenza longitudinale dell'1,5% (la quota diminuisce dalla spalla B verso la spalla A e questo risulta essere il verso di spinta).

La sezione trasversale del viadotto, prevista per accogliere due binari con intervalla pari a 4,20m, ha le seguenti caratteristiche:

- larghezza totale impalcato 12,70 metri
- altezza totale impalcato 3,45 metri

Il viadotto nella sua interezza (sottostruttura + impalcato) è stato realizzato utilizzando:

- 14.860 m³ di calcestruzzo
- 1.298 ton di armatura passiva
- 274 ton di armatura attiva

L'impalcato, a trave continua, poggia su 7 pile e due spalle che lo suddividono in 8 parti, di cui:

- 2 campate di riva alle estremità di lunghezza 36 metri - 393 m³ di calcestruzzo, 68 ton di armatura passiva, 29 attiva con peso di circa 1.000 ton
- 6 campate intermedie di lunghezza 45 metri - 490 m³ calcestruzzo, 84 ton armatura passiva, 36 attiva - peso di circa 1.350 ton

L'impalcato è sostenuto da apparecchi di appoggio in acciaio a disco elastomerico confinato; in particolare su ciascuna delle due spalle e su ciascuna pila sono disposti un appoggio unidirezionale longitudinale (per le azioni orizzontali trasversali) e un appoggio multidirezionale. Le azioni orizzontali longitudinali sono affidate a dei dispositivi meccanici

(trasmettitori di impatto) che connettono la spalla A all'impalcato.

La sottostruttura dell'impalcato è costituita dalle due spalle e dalle 7 pile in calcestruzzo armato con una sezione rettangolare cava (3x6,5m con lati raccordati da curva a doppio raggio di curvatura), con altezze che variano tra i 17,5 e i 37 metri.

Le fondazioni delle spalle e delle pile sono tutte di tipo diretto; per le pile la dimensione massima della fondazione arriva a 1.020 m³ (20x17x3).

4 IL METODO E LE FASI

Per la realizzazione dell'impalcato a cassone l'area scelta per la prefabbricazione è posta nella parte posteriore della spalla B, il successivo varo è effettuato con una doppia coppia di martinetti idraulici (2 per il sollevamento da 600 tonnellate, 2 per la spinta da 600 tonnellate).

L'effettiva realizzazione dell'impalcato è avvenuta attraverso il getto e successiva spinta di 8 conci di calcestruzzo, aventi lunghezza il primo di 25m, quelli intermedi di 45m e l'ultimo di 47m.

Lo studio dell'opera e la relativa metodologia di varo sono stati concepiti e messa a punto da Astaldi e verificata dalla Società di Ingegneria IN.PR.A. Ingegneria srl, diretta dall'ing. Enrico Casalotti, che si è coordinato con la Società subappaltatrice (Spic Internazionale), il tutto sotto la supervisione e il coordinamento di Astaldi Spa.

Nell'area di prefabbricazione e spinta, larga 25 metri e lunga 200 metri, si sono realizzati tutti i conci e si è provveduto alla successiva spinta.

Il cassero per la realizzazione del concio ha le caratteristiche geometriche (curvatura e pendenza) necessarie per rispettare le caratteristiche progettuali.

La gabbia di armatura, realizzata in un'apposita dima retrostante il cassero, è inserita tramite le due gru a portale di servizio.

Per le varie attività di cassetatura, la movimentazione dei materiali è assicurata dalla gru a torre.

Il getto dell'impalcato a cassone monocellulare è realizzato in tre fasi:

- Soletta di base
- Anime laterali
- Soletta superiore

Una volta completato il getto di un concio e raggiunte le resistenze meccaniche richieste si compie una prima messa in tensione di cavi rettilinei da 22 trefoli ϕ 0,6" S, con risultante nel baricentro della sezione a cassone, necessari per la fase di varo a spinta, dove le sezioni sono ciclicamente sottoposte a momenti flettenti positivi e negativi.



Foto 3 – Campo di prefabbricazione e spinta
Picture 3 - Prefabrication and launch yard

5 TEMPISTICA DI VARO E ATTREZZATURE

Le attività riguardanti il getto e la spinta hanno avuto una cadenza, considerando il concio di 45 metri, di circa 18 giorni.

Dall'inserimento della gabbia di armatura si contano i seguenti tempi intermedi:

- 3 giorni per cassetta e getto della soletta di base;
- 4 giorni per cassetta e getto delle anime laterali;
- 6 giorni per cassetta e getto della soletta superiore;
- 3 giorni per ottenere le resistenze meccaniche necessarie per la prima messa in tensione dei cavi rettilinei;
- 1 giorno per la messa in tensione;
- 1 giorno per la fase di spinta.

Le condizioni climatiche particolari hanno fatto sì che nel periodo invernale, vista la maturazione tradizionale del calcestruzzo, i giorni necessari per ottenere la resistenza meccanica necessaria per la prima messa in tensione sono aumentati fino a un massimo di 7, mentre nel periodo estivo, in ragione delle alte temperature raggiunte, i getti sono avvenuti solo nelle ore serali e notturne.

Il varo è stato realizzato per slittamento dei conci successivi, attraverso delle spinte realizzate tramite i martinetti idraulici, che provvedono a liberare il casero dalla parte di concio già realizzata.

Le spinte totali realizzate sono 8 di cui l'ultima, di completamento, considerando la lunghezza del concio n. 8 pari 47m, arriva a una lunghezza totale di circa 95 metri.

La quota di varo è definita in funzione della successiva posa degli appoggi definitivi; nel corso delle spinte sono posizionati sulle pile degli appoggi provvisori (slitte), realizzate in materiale metallico e

riempite di calcestruzzo, sormontate da una piastra in acciaio inox e pattino composito in teflon e neoprene armato che hanno anche il compito di facilitare lo slittamento della struttura sulle stesse e a distribuire in maniera adeguata le sollecitazioni che si creano nelle fasi di varo.

Nella parte anteriore del primo concio è posto un avambecco metallico che, collegato all'impalcato tramite apposite barre, serve a ridurre lo sbalzo dell'impalcato tra le differenti pile, appoggiandosi su quella in avanzamento, in maniera da ridurre le sollecitazioni transitorie sull'impalcato stesso ed ha lo scopo di aiutare l'imbocco dell'impalcato ai pattini di scorrimento delle slitte poste sulle spalle.



Foto 4 – Montaggio della gabbia di armature
Picture 4 - Assembly of reinforcement cage

È costituito da due travate metalliche ad anima piena controventate e collegate mediante barre filettate annegate nel getto del primo concio gettato. Le due travi sono poste in asse alle anime verticali del concio e seguono la curvatura dell'intera opera. Ciascuna trave reca all'estremità libera un martinetto idraulico munito di piede d'appoggio necessario a recuperare la contro-freccia dovuta allo sbalzo e per mettere il corretto imbocco alle slitte di scorrimento. All'interno dell'avambecco è posta una passerella pedonale necessaria all'arrivo del personale alla pila da imboccare e su cui è posizionata la centralina idraulica di comando dei cilindri idraulici di recupero della contro-freccia. Le varie slitte (di scorrimento, su pila e su spalla) hanno funzioni diverse secondo il loro collocamento:

- quelle di scorrimento sono posizionate sulle singole pile e supportano e guidano l'impalcato durante la fase di spinta;
- per quelle di scorrimento su spalla la funzione è di frenare l'impalcato durante la

fase di rientro dei cilindri di spinta, ed entrambe queste slitte su pile e su spalle hanno un sistema di guida laterale regolabile e se necessario può inserirsi un martinetto idraulico ad azionamento manuale per eventuali correzioni;

- per quelle fisse su pila sono sostanzialmente delle carpenterie metalliche ancorate al testa pila e munite sulla parte superiore in asse alle anime verticali del viadotto di un pattino in acciaio inox su cui è fatto scorrere l'impalcato. Per ridurre l'attrito durante le fasi di spinta tra l'impalcato e la slitta sono inseriti dei piatti in teflon e neoprene armato;
- per le slitte fisse sulle spalle come per le precedenti hanno al posto del pattino di scorrimento in neoprene un pattino di acciaio zigrinato in modo da aumentare l'attrito e non permettere lo scorrimento dell'impalcato.

delle perdite di carico (per viscosità e ritiro calcestruzzo e per rilassamento acciaio) della prima precompressione sviluppatasi durante le operazioni di varo.



Foto 6 – Centralina elettroidraulica per gestione spinta
Picture 6 - Electro-hydraulic control panel for operating jacks

All'atto della seconda precompressione sono state valutate le perdite di carico per accorciamento elastico dell'impalcato nei cavi di prima precompressione e le perdite finali (analogamente per viscosità e ritiro calcestruzzo e per rilassamento acciaio) in entrambi i gruppi di cavi della prima e della seconda fase.



Foto 5 – Avambecco su pila
Picture 5 - Projection on pier

6 PRECOMPRESSIONE

La precompressione (post-tensione) del cassone monocellulare è stata prevista in due fasi principali; una prima fase di precompressione a cavi rettilinei con risultante baricentrica durante il varo a spinta e una seconda fase di precompressione a cavi con andamento parabolico ad ultimazione del varo del viadotto.

Nelle fasi di varo a spinta sono state verificate le sezioni dell'impalcato soggette ciclicamente ai massimi momenti flettenti positivi e negativi tenendo conto, secondo la tempistica realizzativa degli 8 conci,

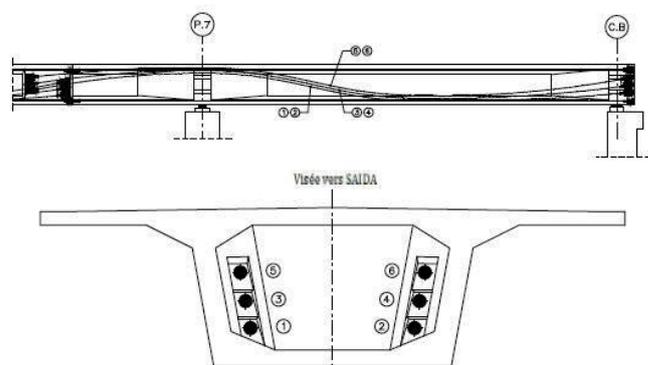


Fig. 2 – Identification câbles de précontrainte de II phase – voussoirs n° 2-3-4-5-6-7

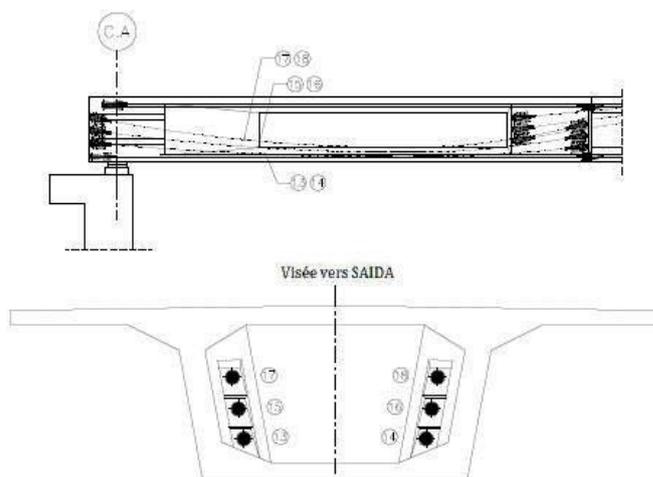


Fig. 2 – Identification câbles de précontrainte de II phase – voussoir n° 1



Foto 7 – Martinetto di spinta
Picture 7 - Hydraulic jack

7 CONCLUSIONI

A regime, dopo aver istruito il personale tecnico e le maestranze impegnate nell'opera, mediamente si è riusciti a realizzare un concio ogni 18 giorni (per concio si intende porzione di impalcato di 45 metri), considerando l'attività realizzata con turni giornalieri di 10 ore.

Per le fasi di inserimento della gabbia di armatura si sono registrati i seguenti tempi intermedi:

- 3 giorni per cassetta e getto della soletta di base;
- 4 giorni per cassetta e getto delle anime laterali;
- 6 giorni per cassetta e getto della soletta superiore;
- 3 giorni per ottenere le resistenze meccaniche necessarie per la prima messa in tensione dei cavi rettilinei;
- 1 giorno per la messa in tensione;
- 1 giorno per la fase di spinta.

I maggiori vantaggi avuti dal sistema scelto per la costruzione d'impalcato di tale lunghezza sono stati la semplicità delle attrezzature e della metodologia di varo abbinate alla sicurezza del personale impegnato nel processo realizzativo.

L'opera si è felicemente completata senza problematiche di rilievo e il coordinamento tra i vari soggetti interessati è stato brillantemente portato avanti con spirito di collaborazione e nell'interesse comune per questa importante serie di viadotti unici nel loro genere per questo paese.

Date di costruzione:

- Inizio lavori: settembre 2010;
- Fine lavori: aprile 2013.



Foto 8 – Particolare della sezione del viadotto
Picture 8 - Detail of deck's cross-section

Table 1. Attrezzatura usata per il viadotto

Gru a Torre su binari - Portata in punta 6 tonnellate
2 carrozzone da 35 tonnellate
Dima per realizzazione gabbia armatura
Cassero misto metallo/legno per getto
Gruppo di spinta
(centrale elettro/idraulica - martinetti idraulici - accessori)
Appoggi provvisori
Avambecco
Guide laterali
Ballatoi
Martinetti per messa in tensione

Table 2. Personale impegnato

5 espatriati di cui:
1 ingegnere responsabile del ciclo (realizzazione impalcato + varo)
1 responsabile lavorazione ferro
1 responsabile cassero
1 responsabile spinta e precompressione
1 responsabile montaggio appoggi e attività di finitura
45 locali:
10 montaggio ferro
20 addetti al cassero
15 attività varo/precompressione



Foto 9 – Vista completa del viadotto ultimato
Picture 9 - Overall view of viaduct after completion

Table 3. Normativa di riferimento:

- Règles Parasismiques Algériennes RPA99-version 2003
- EN 1991-1-1.Mars 2005 Eurocode 1
- EN 1991-1-4. Juillet 2005 Eurocode 1

- EN 1991-1-5.Octobre 2004 Eurocode 1
- EN 1991-2 Mars 2005 Eurocode 1
- EN 1992-1-1 Novembre 2005 Eurocode 2
- ENV 1992-2. Janvier 2006 Eurocode 2
- EN 1990
- EN 1993-1-1
- EN 1993-1-8

Table 4. Le parti coinvolte nel progetto:

- Cliente: **Ministère des Transports de l'Algérie – A.N.E.S.R.I.F.**
(Agence Nationale d'Etudes et de Suivi de Réalisation des Investissements Ferroviaires)
- Impresa esecutrice : **ASTALDI SpA**
- Subappaltatore : **Groupement Bombardier-Site**
(per il solo segnalamento)
- Direzione Lavori : **Groupement Dessau International – Obermeyer-Bernard – Dessau Maghreb**
- Importo appalto : **euro 805 mln**
- Calcoli e verifiche : **IN.PR.A. Ingegneria srl**
- Subappalto struttura e varo: **SPIC Internazionale.**



Foto 10 – Vista con la curvatura del viadotto
Picture 10 - Viaduct's curvature

RINGRAZIAMENTI

I ringraziamenti degli Autori vanno all'Ente Appaltante (**Ministère des Transports de l'Algérie – A.N.E.S.R.I.F.**) e alla Direzione Lavori (**Groupement Dessau International – Obermeyer-Bernard – Dessau Maghreb**) in primo luogo, oltre che alla Società **IN.PR.A. Ingegneria srl**, diretta dall'ing. **Enrico Casalotti** e all'impresa subappaltatrice (**Spic Internazionale**). Una menzione particolare per la **Direzione del Cantiere** e la fattiva collaborazione dell'Ing. **Michele Deviato** dell'Ufficio Tecnico di Cantiere.

* * *

7 CONCLUSIONS

At a regular fabrication pace, and after training the technicians and workers involved in construction activities, one deck segment could be prefabricated, in the average, every 18 days (segment stands for a 45-m-long section of deck), considering that the activities were carried out according to 10-hour daily work shifts.

The following intermediate time periods were recorded for installation of the reinforcement cage:

- 3 days for formwork preparation and casting of base slab;
- 4 days for formwork preparation and casting of side walls;
- 6 days for formwork preparation and casting of top slab;
- 3 days for obtaining the mechanical strength values required to initially tension the straight-line cables;
- 1 day for tensioning;
- 1 day for pushing (launching).

The most important advantages obtained from the method selected for the construction of decks of such length were the simplicity of operation of equipment and of the launching method, together with the safe working conditions of the personnel involved in the construction process.

The project was successfully completed without any remarkable issue and the coordination of the various parties involved was successfully carried out in a spirit of collaboration and of common interest in this important series of viaducts which are unique in their kind in Algeria.



Foto 11 – Il viadotto ferroviario ultimato
Picture 11 - Viaduct after completion

* * *