

# sintesi di tesi di laurea

Università degli Studi di Firenze - Facoltà di Ingegneria - Corso di Laurea Specialistica in Ingegneria Civile - Indirizzo Strutture

**PONTI A CASSONE IN C.A.P.: PROGETTO DELL'ATTRAVERSAMENTO AUTOSTRADALE DEL TORRENTE SAULTESNON (MANCHE, BASSE-NORMANDIE, F)**

Autore: Carlo GUASTINI

Relatori: Proff. Ing. Paolo SPINELLI, Salvatore Giacomo MORANO, Vincenzo DI NASO

Correlatore: Dott. Ing. Daniel DE MATTEIS (S.é.t.r.a.)

Discussione della tesi: Ottobre 2009

*Nella tesi la progettazione di un viadotto in c.a.p. costruito per conci costituisce il risultato di un percorso di ricerca organico e dettagliato che si è articolato in due fasi principali: quella di indagine e quella progettuale. Infatti, prima di procedere allo sviluppo del progetto, è stato condotto uno studio approfondito sulla tipologia degli impalcati a cassone in c.a.p. e sulle loro tecniche costruttive. Ciò ha consentito di avere un quadro tecnico completo e chiaro, anche in considerazione del grande rilievo che ha per questa tipologia il sistema di costruzione. Inoltre il lavoro è risultato arricchito dal confronto con la storica scuola francese del béton précontraint.*

S.G. MORANO

## 1. PREMESSA

Nella prima parte della tesi è stato sviluppato uno studio generale dei ponti a cassone in c.a.p., investigandone le origini, la storia, l'evoluzione, così come le tecnologie e le prospettive. Inoltre, si sono analizzate, in maniera specifica, le tecniche costruttive, riferendosi a centinaia di opere significative ed ai progettisti più importanti, basandosi sulla letteratura tecnica e scientifica internazionale.

La seconda parte, elaborata in collaborazione con l'E.N.P.C. (Ecole Nationale des Ponts et Chaussées), ha affrontato lo sviluppo del progetto di una "opera d'arte" sulla "Autoroute des Estuaires" (A84 Rennes - Caen) per l'attraversamento della valle del torrente Saultbesnon, in Bassa Normandia, più precisamente nel Dipartimento della

Manche (circa 300 km a ONO di Parigi). La progettazione è stata eseguita in conformità agli Eurocodici (NF EN 1990, NF EN 1991, NF EN 1992), trascurando l'azione sismica (NF EN 1998) (ndr. comunque l'opera ricade in zona 4).

La presente sintesi si occupa esclusivamente di questa seconda parte.

## 2. PROGETTAZIONE PRELIMINARE

Dall'analisi della documentazione base fornita (rilievo topografico, tracciato planimetrico e profilo longitudinale dell'asse stradale, caratterizzazione geotecnica del terreno, vincoli) è stato ricavato un quadro generale dall'opera da realizzare che avrebbe dovuto svilupparsi su di un tratto caratterizzato da pendenza (5 %) e

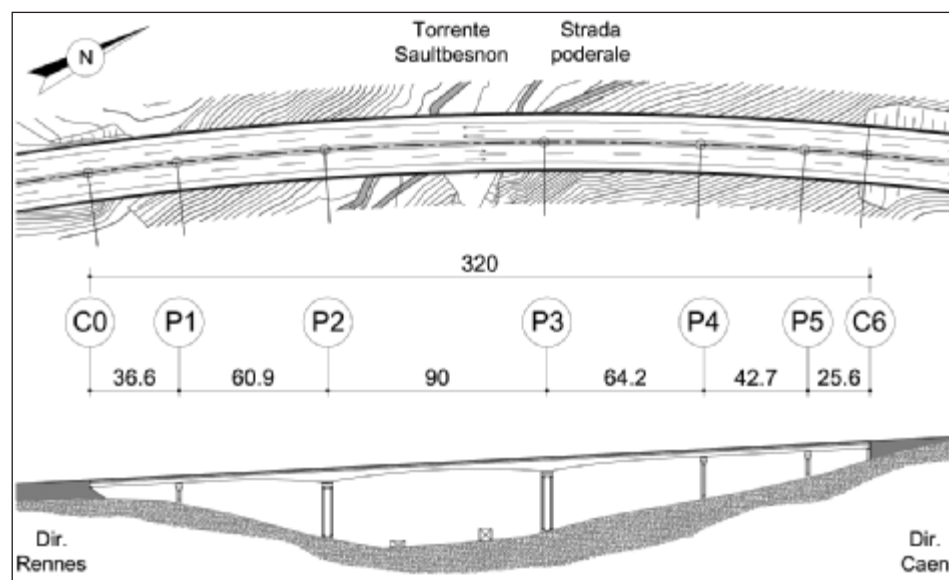


Fig. 1 - Planimetria e profilo dello stato di progetto post-operam.

raggio di curvatura (1500 m) costanti, di lunghezza ottimale pari a 320.0 m, con una sezione viaria a doppia carreggiata, ciascuna organizzata con due corsie (2 x 3.5 m) e corsia d'emergenza (3.0 m), per una larghezza utile totale di 22.5 m.

Il progetto preliminare realizzato contiene lo sviluppo di 8 varianti, con impalcati diversificati per materiale (*c.a.p.*, *misti*), tipologia (*graticcio*, *mono- e bi-cassone*), tecnica costruttiva (*avanzamento bilanciato*, *varo incrementale*, *avanzamento progressivo*), schema statico (*trave continua*, *portale*) e caratteristiche tecnologiche. Ogni variante è stata dimensionata (*sviluppo longitudinale*, *geometria sezione*, *pile e fondazioni*) utilizzando relazioni empiriche e progettuali reperibili in letteratura tecnica, ed oltre a produrre gli elaborati grafici illustrativi, è stata effettuata anche una stima di massima dei costi. Tale strumento è risultato assai proficuo per l'esecuzione di un'analisi comparativa delle varianti (*impatto ambientale*, *rispetto dei vincoli*, *funzionalità*, *costo*, *design*) atta ad individuare la soluzione di progetto ottimale.

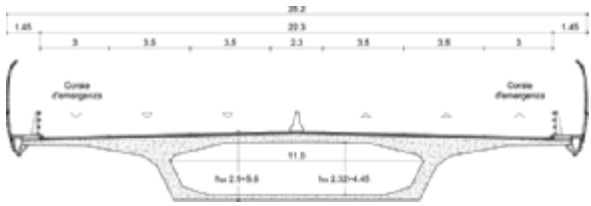


Fig. 2 - Sezione trasversale tipo ed organizzazione della sede stradale.

### 3. SOLUZIONE DI PROGETTO

La soluzione adottata consiste in un impalcato a cassone in c.a.p., costruito ad avanzamento bilanciato per conci successivi gettati in opera, dotato di un sistema di precompressione mista a cavi post-tesi. Dal punto di vista geometrico, l'opera si sviluppa per 320.0 m complessivi, articolati in sei campate di lunghezza diversa, con una campata principale di 90.0 m. Il profilo d'intradosso dell'impalcato è:

- parabolico nella campata principale (III), dove la sezione varia da 5.6 m in asse pila a 2.9 m in chiave;
- semi-parabolico nelle campate adiacenti (II-IV) per il raccordo geometrico;
- costante nelle restanti (I-V-VI).

La sezione tipo dell'impalcato, a cassone monocellulare, simmetrica ed inscritta in un rettangolo di dimensioni 23.8 m x 2.9 m, è caratterizzata da sbalzi laterali a geometria variabile, soletta e pareti d'anima inclinate di spessore costante e controsoletta di spessore variabile.

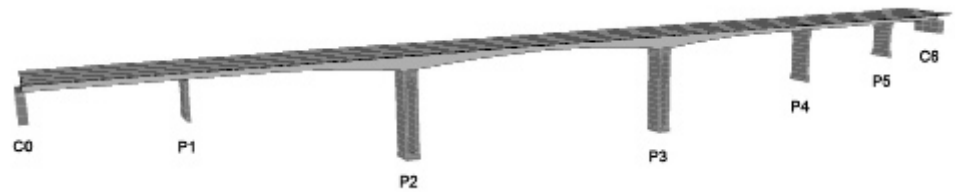


Fig. 3 - Vista globale del modello SAP.

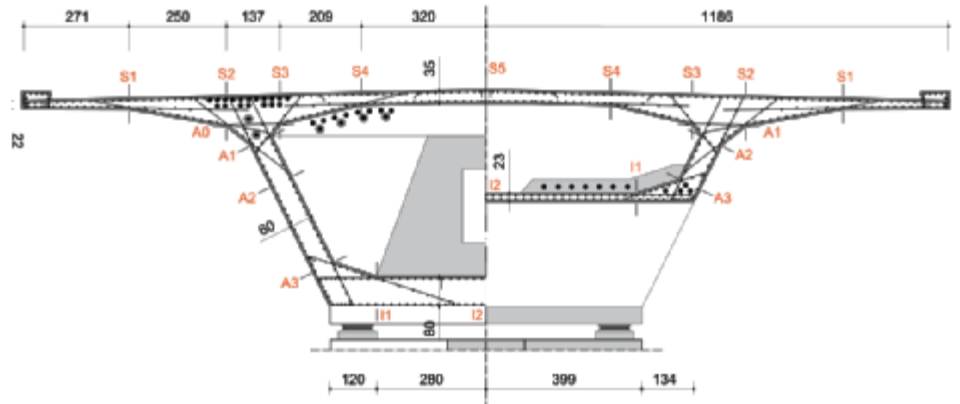


Fig. 4 - Casseratura e armatura del concio su pila e di quello in chiave.

I materiali utilizzati per la costruzione sono:

- calcestruzzo C45/55, cemento CEM I 42.5 R;
- armatura passiva 500/550;
- armatura attiva 1640/1860

L'impalcato è stato progettato con schema statico definitivo di trave continua. Ogni testa pila è equipaggiata con una coppia di dispositivi di appoggio bidirezionali, a guisa di ritegno torsionale, di cui uno bloccato in direzione trasversale, mentre, in testa alla pila P2, gli stessi dispositivi risultano bloccati anche in direzione longitudinale.

### 4. PROGETTO DELL'IMPALCATO

Uno degli aspetti maggiormente significativi per la tipologia di ponte in esame, che ne condiziona le stesse fasi progettuali, è costituito dalla definizione della cinematica di costruzione, intesa soprattutto come progressione sequenziale di configurazioni strutturali variate. Pertanto sono state esaminate, in maniera approfondita, le problematiche strutturali relative alle azioni durante le fasi di costruzione ed a quelle dovute alle azioni termiche ed al traffico (*Classe II*) in fase definitiva.

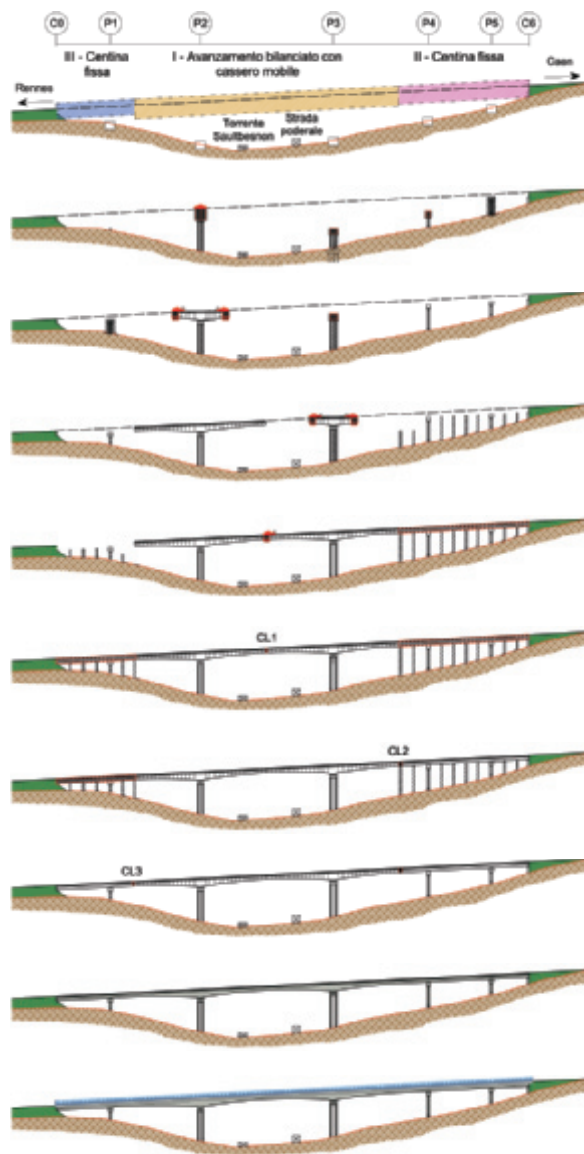


Fig. 5 - Successione delle fasi ipotizzate per la cinematica di costruzione.

La prima fase progettuale ha riguardato lo studio della flessione trasversale per dimensionare e verificare le armature trasversali dei conci su pila e di quelli correnti.

Quindi si è proceduto all'analisi ed al progetto della **stampella**, ossia l'insieme formato dalla pila e dalla rispettiva parte d'impalcato competente, che, durante le fasi costruttive di quest'ultima, assumono una particolare configurazione geometrica a "T".

L'impalcato è formato, nella sua parte centrale, da due stampelle di lunghezza 44.5 m, ognuna composta da 2 x 14 conci da 2.9 m e da un concio su pila di 3.8 m.

La costruzione della stampella comincia dalla realizzazione del concio su pila e si sviluppa procedendo al getto dei conci sulle due estremità tramite casseri mobili a sbalzo<sup>1</sup> fissati sui conci precedentemente terminati.

<sup>1</sup> Per la costruzione delle stampelle è stato ipotizzato l'impiego di una coppia di casseri mobili a via superiore, caratterizzati da una struttura portante a traliccio reticolare fissata all'estradosso dell'impalcato.

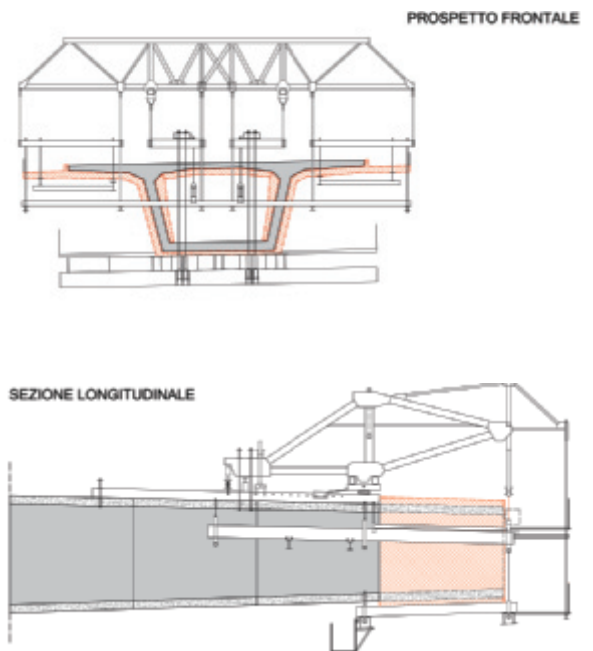


Fig. 6 - Cassero mobile a via superiore dove la trave di sostegno viene fissata sulla soletta.

Le suddette fasi costruttive comportano lo studio di due aspetti principali:

1) Sistema di precompressione interna longitudinale, realizzato con coppie di cavi a cappello ( $2 \times 18 \text{ 19T15S}$ ) disposti in soletta durante l'avanzamento della costruzione. Tali cavi, dimensionati in funzione del peso proprio della stampella e dei carichi transitori in fase di costruzione, risultano strettamente correlati alla geometria ed alla divisione in conci della stampella stessa (*14 per parte oltre il concio su pila*).

2) Stabilità della stampella. Nel caso specifico, trattandosi di uno schema statico definitivo di trave continua, la stampella avrebbe costituito un sistema labile, dunque si è reso necessario organizzare il testa-pila in modo tale da poter realizzare un incastro temporaneo. Questo obiettivo è stato perseguito tramite la disposizione di due coppie di appoggi temporanei e due coppie di gruppi di cavi di bloccaggio passanti ( $2 \times 4 \text{ 12T15S}$ ), ancorati nel fusto della pila ed all'estradosso dell'impalcato. Nel caso specifico però, l'impalcato presentava l'ulteriore complicazione di una pendenza longitudinale del 5%.

Questa problematica è stata risolta utilizzando la tecnica del "ribaltamento", delicata ma comprovata (*Viadotti di Arrêt Darré, Bellegarde e molti altri*), che, con l'ausilio di martinetti idraulici, permette di realizzare la stampella in configurazione orizzontale e quindi, una volta completata, ruotarla nella configurazione finale.

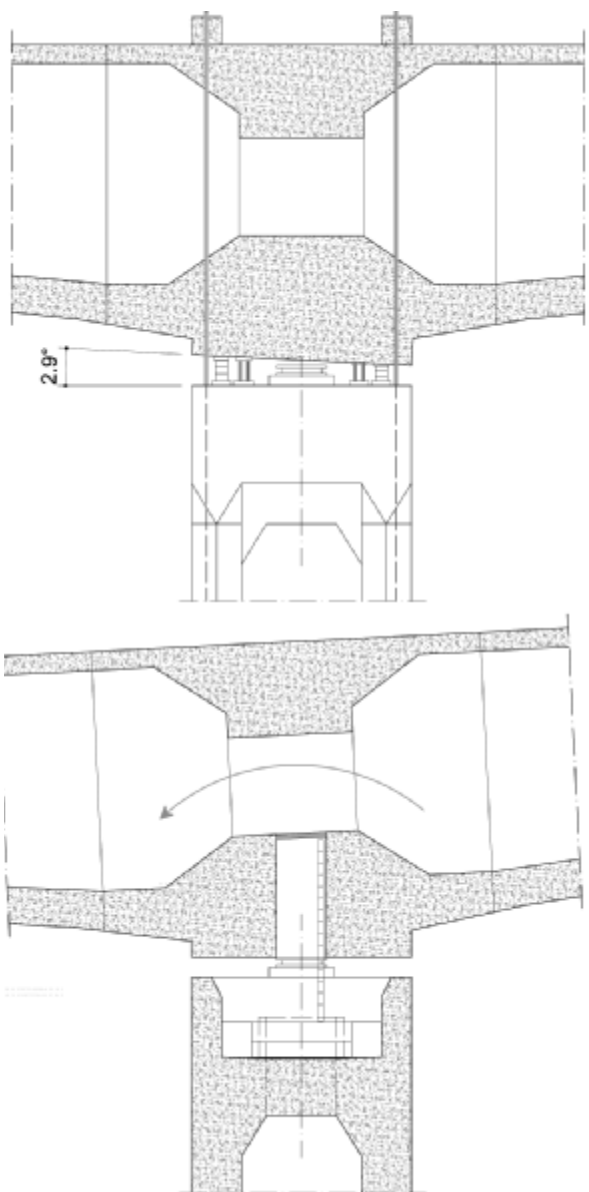


Fig. 7 - Configurazione temporanea allineata orizzontalmente durante la fase di costruzione e configurazione finale post-ribaltamento.

Sulla base della cinematica di costruzione stabilita, le due stampelle sono state inizialmente progettate come entità strutturali isolate, così come i tronconi laterali, da realizzarsi su centina fissa e dotati di specifico sistema di precompressione interna. Si è quindi proceduto al calcolo delle sollecitazioni che insorgono quando le diverse parti vengono solidarizzate con i getti di chiusura e al dimensionamento dei cavi di chiusura, da disporre in controsoletta, per limitare gli sforzi di trazione all'intradosso delle stesse sezioni. La successione di chiusura delle parti strutturali è stata scelta sulla base di semplici considerazioni costruttive: dopo aver collegato le stampelle in campata III (CL1 - 2 x 4 12T15S), viene effettuata la chiusura in campata IV (CL2 - 2 x 2 12T15S) lasciando per ultima la solidarizzazione tra la parte d'impalcato completato ed il troncone in direzione Rennes, con schema statico temporaneo isostatico e dunque più facilmente gestibile (CL3 - 2 x 2 12T15S).

Quando lo schema statico di trave continua viene raggiunto, l'impalcato è ancora privo delle opere di finitura e non è dotato di alcuna armatura di continuità in direzione longitudinale. Per far fronte alle sollecitazioni indotte dagli ulteriori carichi permanenti, dai fenomeni differiti nel tempo e dalle azioni accidentali, dovute soprattutto al traffico stradale e alle variazioni termiche, è stato dimensionato un sistema di precompressione esterna. Tali cavi (19T15S, per un totale di 10 nella campata principale), disposti longitudinalmente all'interno del cassone con traiettoria poligonale, affiancano i cavi di precompressione interna a realizzare il sistema cosiddetto "misto", contrastando efficacemente i momenti sollecitanti.

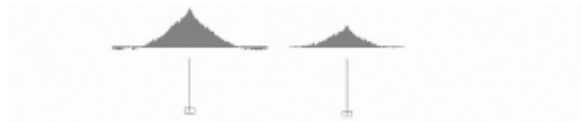
Sfruttando metodi di calcolo più o meno semplificati e modelli FEM, parziali e definitivi, per analisi locali e globali, l'impalcato è stato interamente dimensionato e verificato. Tuttavia, data la tipologia di ponte in esame, sarebbe stato pericoloso affidarsi ad un'analisi lineare che non tenesse conto dei fenomeni differiti nel tempo propri del c.a.p., soprattutto in relazione alla modalità di costruzione per fasi, che ne aumenta e ne modifica, in maniera significativa, entità ed influenza. Utilizzando il potente modulo BrIM (Bridge Information Modeler) di Sap 2000 r.12, che offre efficienti interfacce per la modellazione di impalcato (geometria e sezione), conci, cavi di post-compressione, diaframmi, testa-pila e di quanto altro utile alla progettazione di strutture da ponte, è stato così realizzato un modello FEM, ad elementi frame, dell'intera struttura. Il software, oltre a permettere l'impiego del Model Code 1990 (CEB-fib) per la non linearità meccanica, offre la possibilità (Construction scheduler) di implementare la costruzione per fasi, gestendo carichi, durata di applicazione e tempi di maturazione del calcestruzzo.

L'analisi non lineare effettuata ha confermato il buon grado di approssimazione dei calcoli eseguiti preliminarmente, evidenziando al tempo stesso la marcata distanza dei risultati ottenibili con analisi lineare. Infatti, oltre alla differenza esistente nelle modalità di applicazione dei carichi e di evoluzione delle sollecitazioni sulle configurazioni strutturali intermedie, la redistribuzione delle tensioni sulla struttura completa, dovuta ai fenomeni lenti dei materiali (fluage, ritiro, stagionatura, rilassamento), risulta estremamente importante per questo tipo di impalcato, soprattutto in campata, dove l'incremento del momento flettente positivo raggiunge anche il 35%.

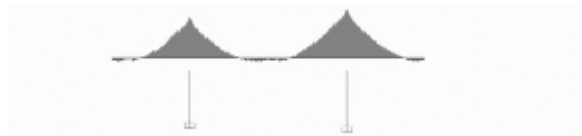
Le sottostrutture in c.a., che comprendono: spalla polifusto reinterrata in direzione Rennes (C0), pile monofusto (P1, P4, P5) e pile a doppio fusto con setti paralleli (P2, P3), e spalla con muro di sostegno a retta in direzione Caen (C6), tutte fondate su pali, sono state solo predimensionate. Infatti, la progettazione è stata



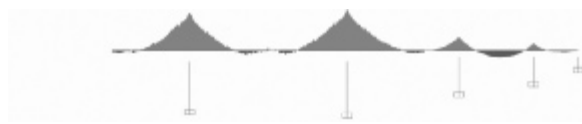
Fase intermedia della costruzione della stampella P2.



Fase intermedia della costruzione della stampella P3.



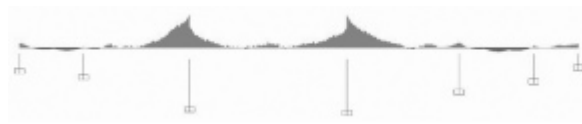
Esecuzione del getto di chiusura CL1. Risulta evidente la diminuzione del momento flettente in asse pila P2 dovuta ai fenomeni lenti. La presa del getto di chiusura comporta la variazione dello schema statico che da stampelle isolate diviene a portale.



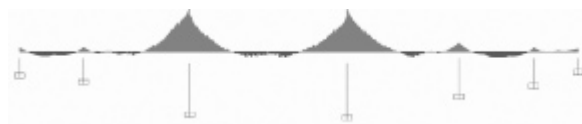
Esecuzione del getto di chiusura CL2 con il troncone lato Caen. Si noti la diminuzione del momento flettente in asse pila P3. La presa del getto di chiusura comporta la variazione dello schema statico che diviene una trave continua su 5 appoggi.



Esecuzione del getto di chiusura CL3 con il troncone isostatico lato Rennes. La presa del getto di chiusura comporta la variazione dello schema statico che raggiunge lo schema definitivo di trave continua.



Fase di tesatura dei cavi del sistema di precompressione esterna con conseguente abbattimento dei momenti positivi in campata.



Sollecitazioni flessionali dovute ai carichi permanenti a 6 anni dalla costruzione, dove la deformazione massima è inferiore a 0.06 m.

Fig. 8 - Evoluzione del momento flettente nelle principali fasi di costruzione.

<sup>2</sup> Materiale composito rigido e leggero formato da un'anima plastica o minerale rivestita su entrambi i lati da lamine di una lega di alluminio. Gli spessori degli strati variano da 0.5 a 1.5 mm per il rivestimento e da 2 a 6 mm per l'anima.

indirizzata sull'approfondimento delle tematiche strettamente inerenti l'impalcato. In tal senso, oltre a caratterizzare e definire la pavimentazione stradale ed i sistemi di drenaggio e smaltimento delle acque meteoriche, è stata sviluppata un'applicazione quanto mai attuale.

Al fine di preservare l'ambiente naturale circostante dall'inquinamento acustico, è stata ideata e progettata un'appendice laterale, caratterizzata da una struttura portante modulare ( $2 \times 1.25 \text{ m}$ ) in acciaio sulla quale sono fissati meccanicamente pannelli prefabbricati rivestiti in alucobond<sup>2</sup> sagomato, nella parte inferiore, e lastre in policarbonato metacrilato trasparente, nella parte superiore.

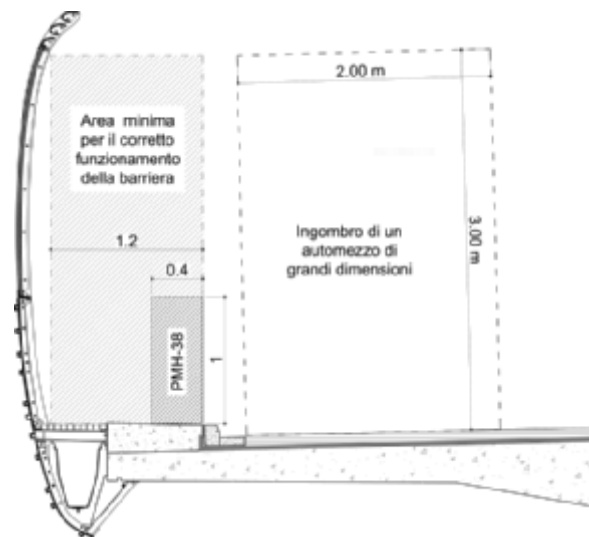
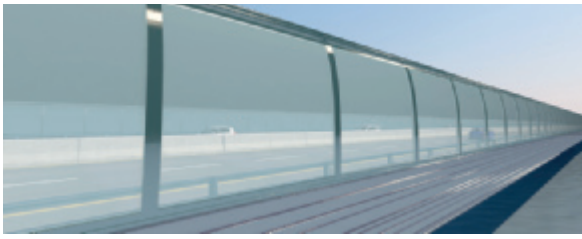


Fig. 9 - Studio della forma dell'appendice laterale nel rispetto dell'ingombro per il corretto funzionamento della barriera di sicurezza.

Dal punto di vista progettuale, oltre a logiche considerazioni strutturali e meccaniche, sia di realizzazione che di montaggio, ogni elemento costruttivo è stato studiato con l'obiettivo di conseguire la massima funzionalità (*assorbimento acustico*) con un design architettonico gradevole e senza dimenticare la sicurezza degli utenti. Infatti, la geometria di tali appendici è stata ricavata dallo studio di compatibilità con le barriere di sicurezza bordo-ponte (*H4b - 38 t*), garantendo l'ingombro necessario al corretto funzionamento delle barriere stesse ( $W4 < 1.2 \text{ m}$ ).

A conclusione delle fasi di progettazione, dopo una breve rassegna sulla materia degli appalti pubblici a livello internazionale e comunitario, in particolare francese (*CMP 2006*) ed italiano (*d.lgs. 12/04/2006 n 163 e s.m. correttive*), è stato elaborato il Capitolato Speciale d'Appalto, documento di fondamentale importanza, nel caso specifico deve contenere particolari specifiche aggiuntive inerenti le modalità e le tecnologie costruttive.



Vista esterna



Vista interna

Fig. 10 - Rendering delle appendici laterali.

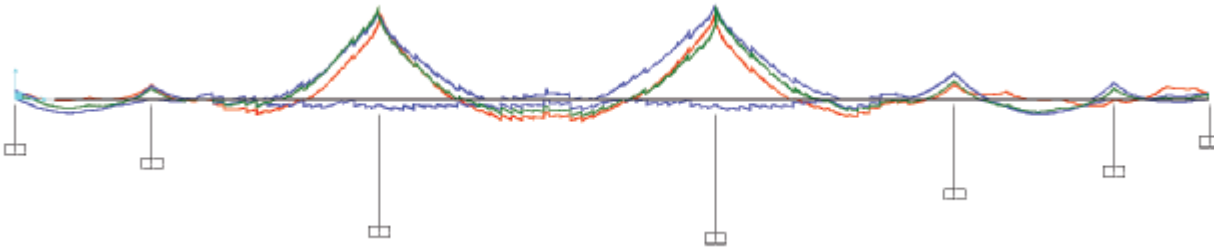


Fig. 11 - Confronto del momento flettente dovuto ai carichi permanenti ottenuto con: analisi lineare (in rosso), analisi non lineare in forma d'involuppo (in blu), analisi non lineare con evoluzione a 6 anni dal completamento (in verde).

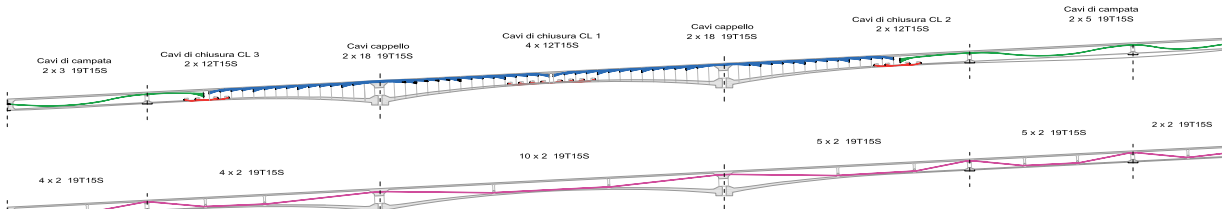


Fig. 12 - Layout schematico dei cavi di precompressione interna ed esterna sullo sviluppo totale dell'impalcato.