

I PONTI A SEZIONE COMPOSTA ACCIAIO-CALCESTRUZZO

Stato attuale e prospettive future

Prof. Ing. Luigino Dezi

Dip. di Architettura Costruzioni e Strutture, Università Politecnica delle Marche, Ancona.

Generalità

Gli impalcati a sezione composta acciaio-calcestruzzo stanno vivendo un momento di rapida evoluzione, sia per la disponibilità di nuovi materiali e prodotti (acciai saldabili ad alta resistenza, piatti di notevole spessore a resistenza garantita, calcestruzzi ad alta resistenza), sia per i progressi raggiunti nelle tecnologie di costruzione e montaggio (saldatura in opera, tecniche di realizzazione della soletta e precompressione esterna).

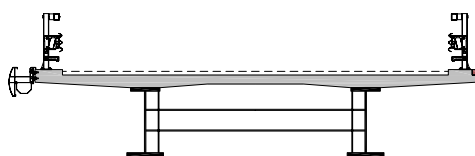
Altrettanto rilevanti sono gli affinamenti raggiunti nelle analisi strutturali con lo sviluppo di specifici programmi di calcolo numerico e nella valutazione della misura della sicurezza strutturale, soprattutto grazie alle conoscenze acquisite sul comportamento post-critico delle anime che consentono una verifica più accurata allo stato limite ultimo delle travi metalliche.

Questa evoluzione ha avuto un'accelerazione tale da conferire competitività alla soluzione composta riportandola all'attenzione dei committenti e dei progettisti di ponti e viadotti. Tra i principali vantaggi offerti da questa tipologia strutturale si possono annoverare: la leggerezza (elevato rapporto resistenza/peso), la snellezza (elevato rapporto L/h), la scarsa sensibilità ai cedimenti differenziali delle fondazioni, la facilità di realizzazione di impalcati continui con campate di differenti lunghezze e con curvature imposte dal tracciato stradale, la durabilità conseguente alla possibilità di rinnovare lo strato protettivo contro la corrosione e di sostituire elementi strutturali anche per aumentarne la capacità portante ed infine la qualità architettonica conferita dalla semplicità dei particolari costruttivi e dalla chiarezza dell'impianto strutturale che lascia comprendere la funzione dei vari elementi.

La sezione trasversale

Le principali tipologie utilizzate per gli impalcati continui sulle luci medie sono riconducibili ai due schemi di *bitrave* e *cassone*.

La sezione *bitrave*, costituita da due travi a I, è quella maggiormente impiegata, per semplicità ed economicità; è dotata di un numero ridotto di traversi ad I, normalmente non solidali alla soletta e saldati agli irrigidimenti verticali delle due travi principali. I traversi hanno un interasse di 6-8 m (Fig. 1a) e nei ponti di piccola luce (< 30 m) possono essere addirittura eliminati, lasciando la funzione di irrigidimento alla soletta e ai traversi di testata. La posizione dei traversi a metà altezza delle travi è quella più conveniente, in quanto consente sia il passaggio delle casseforme mobili per il getto della soletta, sia la manutenzione delle piattabande superiori. Anche il numero degli irrigidimenti è ridotto rispetto al passato, soprattutto per quanto riguarda gli irrigidimenti longitudinali delle anime che in alcuni casi possono essere eliminati completamente facendo ricorso ai più avanzati criteri di verifica basati sul comportamento post-critico dei pannelli d'anima.



a)

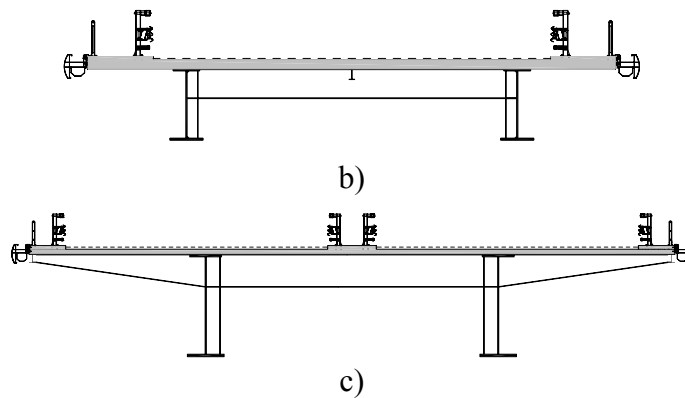


Figura 1 - Sezioni bitrave

Quando la larghezza della soletta è molto grande (15-25 m), la tipologia bitrave risulta ancora vincente se i traversi diventano solidali alla soletta (traversi portanti). Nel caso di Fig. 1b i traversi sono presenti nella sola parte interna dell'impalcato: il loro interasse e la lunghezza degli sbalzi condizionano lo spessore della soletta. L'interasse della travi può essere tale da richiedere una coppia di pile.

Per contenere l'interasse delle travi e quindi l'ingombro delle pile si può ricorrere alla soluzione con traversi aggettanti e sbalzi laterali molto pronunciati (Fig. 1c); in questo caso si possono realizzare soluzioni molto leggere con interasse dei traversi di circa 4 m e spessore della soletta di 22-25 cm.

Per larghezze più contenute la soletta può essere ordita trasversalmente con uno o più appoggi intermedi realizzati con travi secondarie ad I appoggiate sui traversi.

La sezione a *cassone*, ottenuta con una trave metallica aperta superiormente, è generalmente più costosa in quanto più pesante e di più complessa realizzazione. Può diventare competitiva solo se interamente realizzata in officina e quindi solo se ha una larghezza contenuta (< 5 m). Tuttavia costituisce un'ottima soluzione strutturale sia quando è richiesta un'elevata rigidezza torsionale, sia quando si vuol ridurre l'altezza dell'impalcato ed ottenere un risultato estetico più gradevole.

Il cassone trapezio rispetto a quello rettangolare ha il vantaggio di contenere la larghezza del fondo (Fig. 2a) e ridurre la parte non efficace per effetto shear lag.

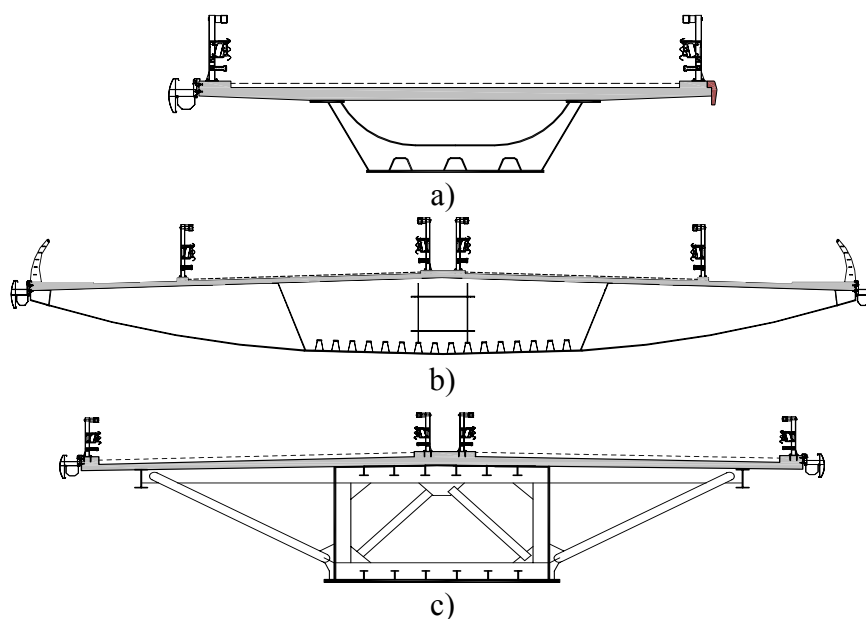


Figura 2 - Sezioni a cassone

Nel caso di impalcati molto larghi la soluzione a cassone monocellulare può essere ancora utilizzata ricorrendo ai traversi aggettanti solidali alla soletta (Fig. 2b), oppure sostenendo gli sbalzi laterali con travi reticolari inclinate o con semplici puntoni collegati al fondo del cassone (Fig. 2c).

Negli impalcati curvi o di grande luce, per aumentare la rigidità torsionale durante il varo, la parte metallica può essere chiusa superiormente (Fig. 2c).

Impalcato

Per quanto riguarda la scelta delle luci di un viadotto a sezione composta, in assenza di vincoli sulla disposizione degli appoggi, ci si può orientare sulle luci comprese tra 50 e 80 m, con campate laterali pari al 65-70% delle campate intermedie. Gli impalcati a sezione composta sono tuttavia utilizzati anche per luci di 120-150 m.

Per il rapporto h/L della sola parte metallica si può far riferimento ad $1/25$ per gli impalcati continui bitrave ed $1/30$ per quelli a cassone.

Le principali innovazioni introdotte nella concezione e costruzione dei ponti a sezione composta riguardano:

- nuovi tipi di acciai e di prodotti
- tecniche costruttive della soletta

Nuovi tipi di acciai e di prodotti

L'impiego di nuove e più sofisticate attrezzature per la lavorazione dell'acciaio ha permesso di mettere a punto processi di laminazione in grado di ottenere direttamente le proprietà meccaniche delle lamiere di forte spessore, senza dover ricorrere a ulteriori trattamenti termici. Gli acciai prodotti con questo metodo di lavorazione vengono detti "acciai termomeccanici". In pratica l'utilizzo di acciai termomeccanici (TM), rispetto a quelli normalizzati (N), presenta il duplice vantaggio di avere maggiori resistenze meccaniche abbinate a migliori caratteristiche di saldabilità (ad es. possibilità di eliminare il preriscaldamento).

Un'altra importante innovazione è data dalla produzione di piatti a spessore variabile, cioè di lamiere profilate con spessore variabile nella direzione del senso della laminazione, i quali consentono di seguire in maniera ottimale la curva del momento flettente ottenendo un risparmio sulla quantità di acciaio. Oltre al risparmio di materiale rispetto alla soluzione tradizionale (che in genere viene compensato dal maggior costo delle lamiere a spessore variabile), l'impiego delle lamiere a spessore variabile presenta i seguenti vantaggi:

- notevole riduzione del numero delle saldature di testa delle piattabande e delle anime. In pratica le saldature di testa si riducono a quelle da eseguire in cantiere per l'assemblaggio dei tronconi di carpenteria metallica;
- spostamento delle saldature al di fuori delle zone maggiormente sollecitate con conseguente riduzione dei problemi connessi alla verifica a fatica;
- miglioramento estetico dell'opera d'arte.

Tecniche costruttive della soletta

Negli impalcati a sezione composta la fessurazione della soletta nelle zone di momento negativo fa parte del suo funzionamento naturale. E' noto tuttavia che se non si ricorre a particolari accorgimenti la fessurazione può interessare l'intero impalcato senza differenze sostanziali tra le sezioni di appoggio e di campata. Le fessure più importanti si manifestano durante le fasi costruttive e sono prodotte dal ritiro alle brevi stagionature e dalle modalità esecutive della soletta. Per contenere le tensioni di trazione in soletta si può ricorrere a:

- getto in opera a tratti non consecutivi su casseri mobili;
- prefabbricazione di conci.

Nel primo caso il getto del calcestruzzo viene effettuato a tratti non consecutivi di 10-15 m di lunghezza, eseguendo dapprima il getto dei "blocchi" ubicati nelle zone di campata e di estremità e successivamente quelli a cavallo degli appoggi (*L. Dezi, S. Niccolini, 2003*).

Questo sistema, rispetto al getto a tratti consecutivi su predalle, richiede un maggior onere per la movimentazione dei casseri ma ha il vantaggio di contenere il peso della soletta che diventa a spessore variabile e limitare in maniera significativa le tensioni di trazione sul calcestruzzo nelle zone in prossimità degli appoggi intermedi.

La tecnica di prefabbricazione della soletta in conci viene utilizzata per opere particolari, quali i sovrappassi autostradali, che richiedono una prefabbricazione integrale per contenere i tempi di esecuzione ed i periodi di interruzione del traffico sottostante.

Nel seguito si illustrano alcune recenti realizzazioni o progetti di viadotti con impalcato bitrave o a cassone, delle tipologie presentate nelle Figure 1 e 2.

Viadotti Bitrave

I viadotti della Bretella di Urbino (L. Dezi, S. Niccolini, 2003)

Il 1° lotto della "Bretella" di Urbino, che collega la città di Urbino alla viabilità principale costituita dalla SS 78 Fano-Grosseto, ha uno sviluppo di 1970 m e comprende il viadotto Santa Maria e i viadotti Ca' Raniero 1 e 2. I tre viadotti sono stati oggetto di un particolare studio architettonico al fine di mitigarne l'impatto ambientale.

La soluzione a struttura composta acciaio-calcestruzzo si è imposta per snellezza, trasparenza e per qualità delle finiture superficiali. Per la carpenteria metallica è stata scelta la saldatura in opera e la verniciatura di tutte le superfici metalliche; nei tratti in curva le travi sono state costruite con la stessa curvatura del tracciato stradale. I canali di raccolta ed allontanamento delle acque di piattaforma, disposti all'estremità di uno sbalzo, sono stati realizzati in alluminio con un rivestimento in alluminio preverniciato.

Le sottostrutture sono state anche esse oggetto di particolare cura nella definizione delle forme al fine di raggiungere un soddisfacente risultato architettonico.

Il *viadotto Santa Maria* si sviluppa su un tracciato curvo di raggio minimo di 450 m ed ha una lunghezza complessiva di 290 m, suddivisa in 5 campate di luci pari a 35, 65, 90, 65 e 35 m. L'impalcato è di tipo bitrave ad altezza variabile da 2,00 m sulle spalle (L/45), a 4,00 m sulle pile centrali (L/22) e 2,50 m in mezzzeria della campata principale (L/36) (Figg. 3 e 4).

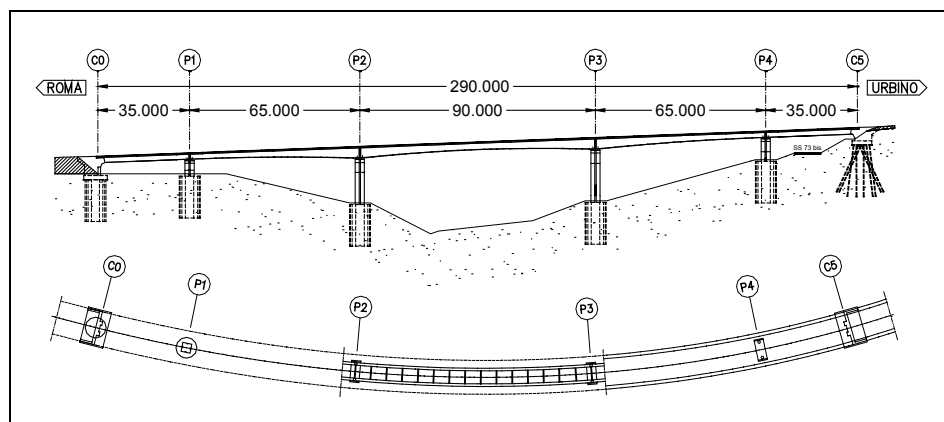


Figura 3 – Viadotto Santa Maria: prospetto e pianta

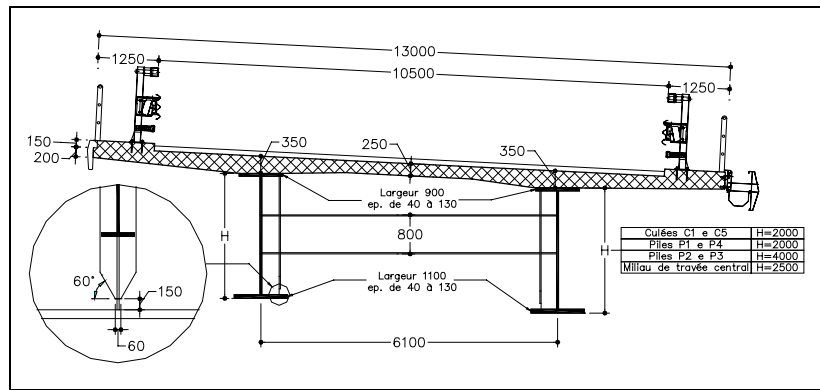


Figura 4 – Viadotto Santa Maria: sezione

Le due travi sono collegate da traversi a doppio T posti ad interasse di circa 6,00 m. I telai costituiti dai traversi e dagli irrigidimenti verticali delle anime, hanno la funzione di garantire la stabilità delle piattabande e di fronteggiare le spinte a vuoto indotte dalla curvatura nelle piattabande. I controventi di costruzione sono stati smontati dopo il getto della soletta.

La soletta è a sezione variabile ed è stata realizzata con casseri mobili e frazionamento dei getti. Le armature sono state preassemblate all'estremità del viadotto in gabbie di 12 m, opportunamente irrigidite con tralicci e varate con un argano longitudinalmente sopra le travi. Il getto è stato eseguito con due casseri mobili, in tratti non consecutivi di 10-12 m di lunghezza; con il primo cassero sono stati eseguiti i getti dei conci in campata e con il secondo quelli a cavallo degli appoggi, ciascuno con frequenza di due conci per settimana. Per lo scasso dei conci dopo un giorno è stata necessaria una resistenza di 22 MPa a 24 ore. In Fig. 5 è mostrata la notevole riduzione dello stato tensionale in soletta, quando si passa dal semplice getto in avanzamento ad un frazionamento ottimizzato dei getti.

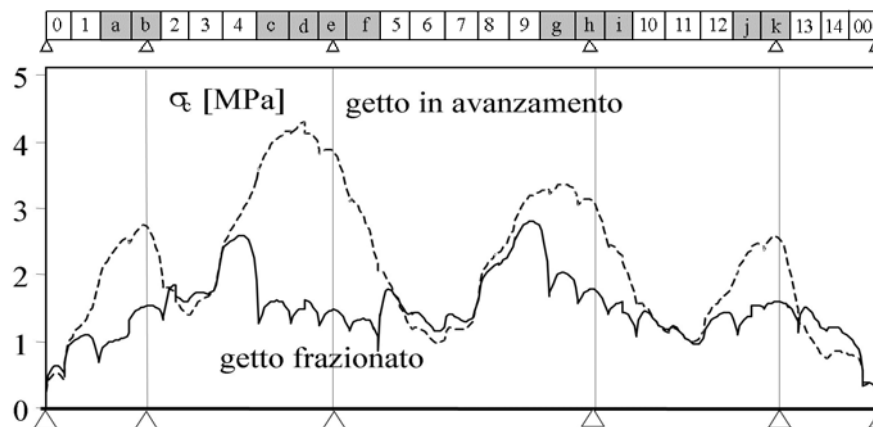


Figura 5 – Tensioni in soletta per differenti modalità di getto



Figura 6 – Varo della carpenteria metallica e getto della soletta



Figura 7 – *Viste dal basso*

I viadotti *Ca' Raniero 1* e *2* hanno uno sviluppo complessivo di 556 m e 424 m e sono realizzati con impalcato continuo su più campate di luce variabile da 41,49 m a 42,97 m (Fig. 8). A differenza del viadotto *Santa Maria*, i controventi non sono stati smontati e i traversi sono bullonati agli irrigidimenti verticali delle travi, fatta eccezione per i traversi di pila che sono stati saldati per consentire il sollevamento degli impalcati.



Figura 8 – *Viadotto Ca' Raniero 1: viste dal basso*

Viadotti e cavalcavia del Passante di Mestre (L. Dezi, M. Raccosta, 2005)

Le opere d'arte principali del Passante Autostradale di Mestre sono state concepite con un'unica tipologia strutturale: impalcato bitrave continuo sostenuto da coppie di pile poste in corrispondenza delle travi. Le travi sono saldate e verniciate, mentre i traversi sono bullonati; le pile hanno sezione cruciforme e presentano un allargamento della sommità in grado di ospitare gli apparecchi di appoggio equipaggiati con shock transmitter e nel contempo consentire l'alloggiamento di martinetti per sollevare gli impalcati in caso di sostituzione degli appoggi.

Nel caso dei viadotti le carreggiate sono separate e i due impalcati, di larghezza variabile da 18,00 a 19,70 m, sono realizzati con due travi a doppio T poste a distanza variabile da 12,00 a 13,70 m, traversi portanti a doppio T ad interasse di 4,00 m e una soletta collaborante in c.a. di 31 cm di spessore. Le travi hanno altezza costante di 2,20 m e i traversi di 1,00-1,10 m (Fig. 9).

Le campate hanno lunghezze variabili da 35 a 60 m.

La soletta è realizzata su predelle di 6 cm di spessore, ordite trasversalmente sulle due fasce esterne di circa 6,00 m e appoggiate sulle travi principali e su una trave rompitratta sostenuta dai traversi, mentre sulla fascia centrale di 6,00-7,70 m sono ordite longitudinalmente ed appoggiate sui traversi.

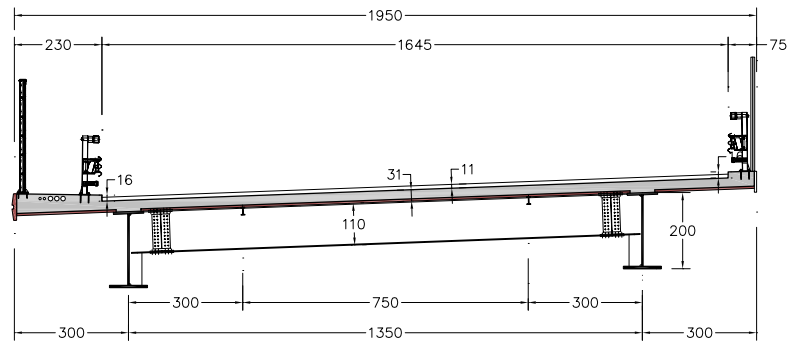


Figura 9 – Viadotti PDM: sezione corrente e viste prospettiche (render)

I cavalcavia hanno una larghezza variabile da 10 a 16,50 m e presentano uno schema di trave continua a tre o più campate. Il cavalcavia tipo è riportato in Fig. 10. Per larghezze superiori a 12 m l’impalcato presenta la stessa tipologia dei viadotti, mentre per larghezze inferiori i traversi sono posti a metà altezza delle travi e la soletta è ordita trasversalmente con predalle appoggiate sulle travi principali.



Figura 10 – Cavalcavia tipo (render)

Viadotto Serra Cazzola sulla SS 640 “di Porto Empedocle” (L. Dezi – M. Raccosta, 2005)
 La nuova SS 640, attraversando una zona molto sensibile dal punto di vista ambientale, per la presenza di territori agricoli di notevole interesse e di altri pregi di tipo paesaggistico, ha richiesto un’attenzione particolare nella progettazione dei viadotti per garantire le migliori condizioni di integrazione e di inserimento ambientale. Il viadotto Serra Cazzola è l’opera principale sia per l’interesse ambientale della vallata attraversata, sia per la lunghezza complessiva del viadotto (980 m) e l’altezza massima da fondo valle (circa 70 m). L’altezza delle pile in particolare ha suggerito una soluzione a grandi luci con un unico impalcato contenente le due carreggiate stradali, al fine di conferire all’opera carattere di unitarietà, leggerezza e trasparenza. La scansione delle campate è stata prevista a luci crescenti con l’altezza da fondo valle, da 55 a 120 m. Parallelamente ai suddetti elementi di carattere

“compositivo”, particolare attenzione è stata dedicata allo studio formale delle pile e alla loro armonizzazione con l’impalcato soprastante, al fine di pervenire ad una soluzione architettonicamente corretta.

Il viadotto presenta 12 campate di luci 55, 70, 3x90, 120, 3x90, 2x70 e 55 m, per uno sviluppo complessivo di 980 m. La larghezza complessiva dell’impalcato è di 26,50 m e contiene entrambe le carreggiate stradali. L’impalcato è costituito da due travi a doppio T poste a distanza di 12,50 m e da traversi a doppio T estradossati e aggettanti ad interasse di 4,00 m, sui quali è ordita una soletta di 25 cm di spessore.

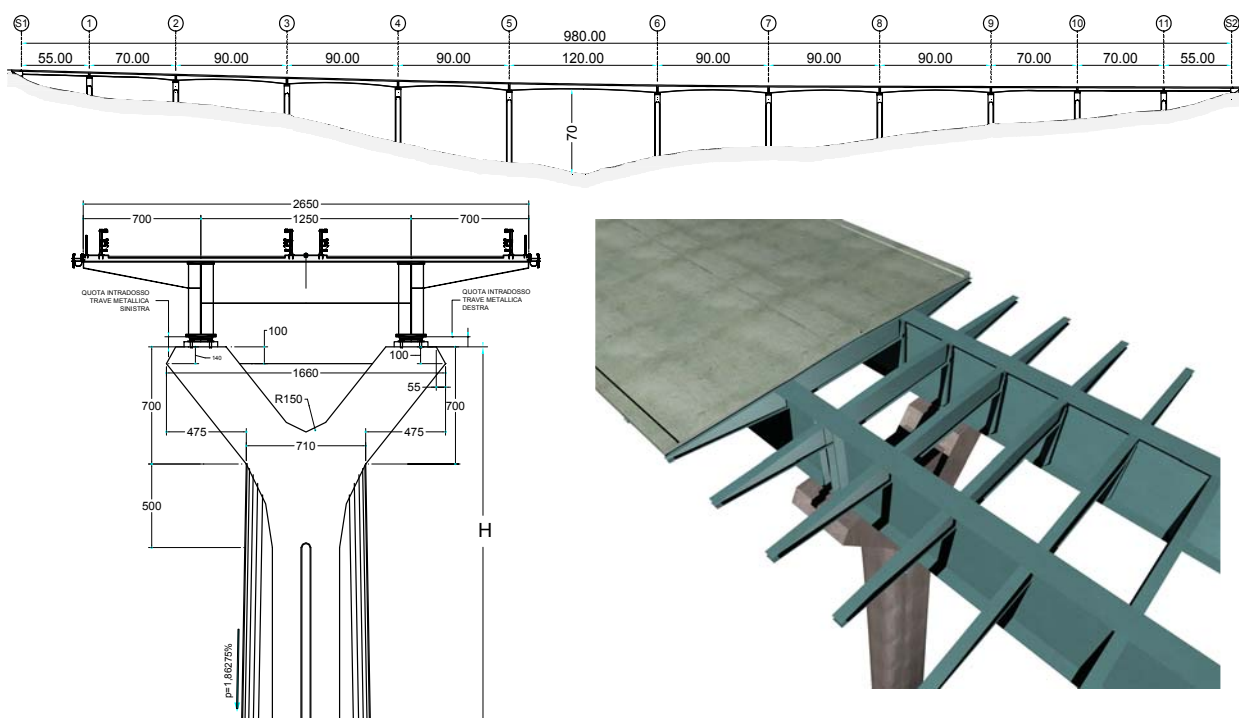


Figura 11 – Viadotto Serra Cazzola: vista longitudinale, sezione

Le travi hanno altezza costante sulle campate da 55 e 70 m e variabile con legge parabolica nelle campate di 90 e 120 m di luce. Sulla campata centrale l’altezza varia da 3 m in mezzeria ($L/40$) a 5,50 m sugli appoggi ($L/22$). Le anime delle travi principali sono irrigidite da montanti verticali a T in corrispondenza di ogni traverso. Il telaio costituito dal traverso e dai montanti ha la funzione di stabilizzare le piattabande in esercizio con l’aiuto della soletta e durante le fasi di varo con l’ausilio di un controvento provvisorio.



Figura 12 – Viste dal basso (render)

Viadotti a Cassone

Viadotto Fontescodella a Macerata (L. Dezi, S. Niccolini, 2001)

Il viadotto, inserito nel tratto terminale della strada che collega lo svincolo di Fontescodella a Via Mugnoz, è costituito da un impalcato curvo continuo a quattro campate di luci 29, 2x37 e 29 m, ha raggio di curvatura di 159,5 m ed una pendenza longitudinale del 9,4 %. La sezione trasversale è a cassone monocellulare costituito da una parte metallica di forma trapezoidale di 1,30 m di altezza ($L/30$) ed una soletta di 30 cm. Il cassone è irrigidito da diaframmi a parete piena solidali alla soletta, posti ad interasse di 5 m, di 15 mm di spessore con passo d'uomo di 1,25x0,75 m; i traversi di appoggio hanno spessore di 40 mm. Il fondo del cassone è dotato di due irrigidimenti longitudinali di tipo chiuso.

La carpenteria metallica è interamente saldata e verniciata. I controventi sono stati smontati dopo il getto della soletta.

La soletta è stata realizzata per tratti con sequenze ottimizzate che hanno previsto il getto dei conci di campata prima di quello sull'appoggio.

Le pile hanno altezza di 6-7 m e sono costituite da un fusto a sezione piena costante con un allargamento in sommità ottenuto con un raccordo curvo.



Figura 13 – Viadotto Fontescodella - Macerata

Viadotto Borgomagno a Padova (L. Dezi, M. Raccosta, 2005)

Nell'ambito dei lavori di riorganizzazione della viabilità urbana nella città di Padova, in sostituzione dei due cavalcavia presenti nei pressi della stazione centrale, è stato proposto un viadotto a carreggiata unica, avente una larghezza di circa 30 m, in grado di ospitare due carreggiate stradali, due piste ciclabili e due marciapiedi. Il progetto (di livello preliminare) prevede un impalcato a sezione scatolare composta o interamente metallica (a piastra ortotropa), dotata di grandi sbalzi laterali sostenuti da traversi aggettanti. I vincoli imposti di limitare i pesi, per ridurre le dimensioni delle pile e delle fondazioni e di contenere la pendenza longitudinale della livelletta stradale, potrebbero far prevalere la soluzione a piastra ortotropa. Con questa tipologia infatti i pesi si dimezzano rispetto alla soluzione composta e la snellezza dell'impalcato (L/h) può essere spinta a valori molto elevati (lo spessore dell'impalcato è pari a $1/34$ della luce).

Il viadotto presenta un impalcato continuo a tre campate di luce pari a 30, 68 e 30 m, per una lunghezza complessiva di 128 m. La sezione trasversale è caratterizzata dalla presenza dei traversi che con il loro intradosso curvo definiscono la forma dell'impalcato (Fig. 14).

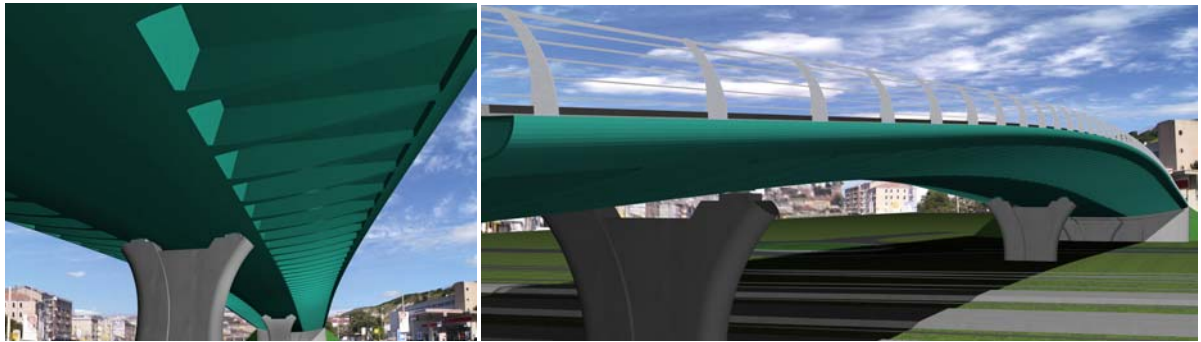


Figura 14 – Viadotto Borgomagno – Padova (render)

Viadotto Verrières (G. Gillet et al., 2004) e **Nuovo Ponte sul Rhône a Valence** (F. Tavakoli, 2004)

Per completare il panorama degli impalcati a cassone con impalcati molto larghi si illustrano brevemente due viadotti recentemente realizzati in Francia, che utilizzano lo stesso criterio di sostegno degli sbalzi laterali. In entrambi i casi si è fatto ricorso ad un cassone metallico chiuso superiormente, varato a spinta, e completato da una soletta in c.a. di piccolo spessore (22-24 cm), sostenuta lateralmente da strutture reticolari.

Il Viadotto Verrières, realizzato sulla A 75 nei pressi di Millau, rappresenta un record per questa tipologia, sia per la lunghezza della campata principale (144 m) che per l'altezza da fondovalle (140 m). L'impalcato, a sei campate di luci 96, 136, 144, 136, 128 e 80 m, ha uno sviluppo complessivo di 720 m e una larghezza di 23,5 m; è costituito da un cassone rettangolare metallico, chiuso superiormente, di 7 m di larghezza e 4.50 m di altezza (L/32), completato da una soletta di 25 cm di spessore, appoggiata su traversi sostenuti da due travi reticolari vincolate sul fondo del cassone. La soletta, in parte prefabbricata ed in parte gettata in opera, è precompressa trasversalmente. Il varo a spinta della carpenteria metallica ha richiesto una verifica di patch loading molto accurata.

Le pile hanno sezione cava leggermente variabile con l'altezza.

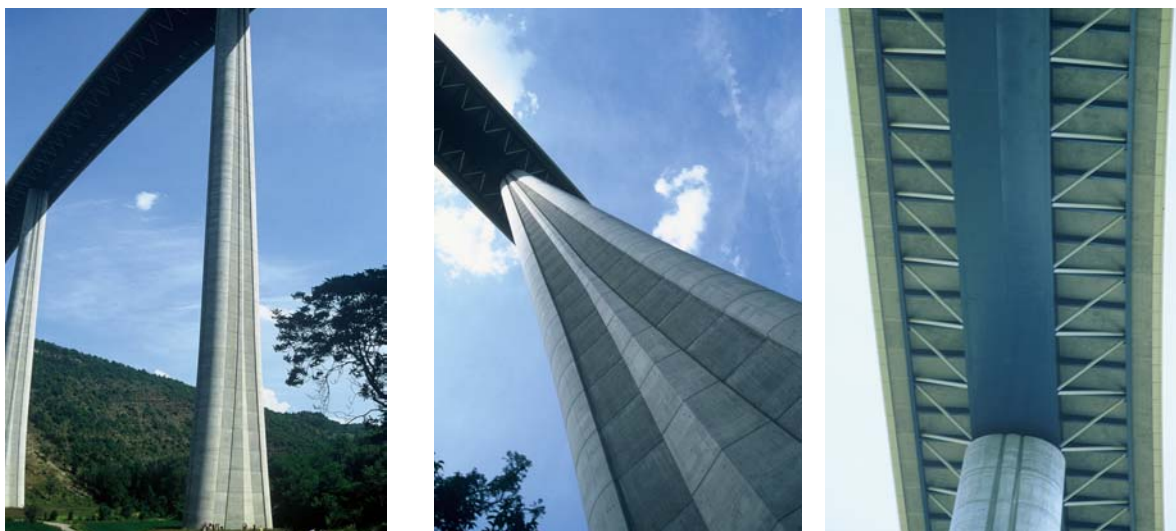


Figura 15 – Viadotto Verrières - Francia

Il nuovo ponte sul Rhône ha un impalcato continuo a cinque campate di luci $75,5 + 125 \times 3 + 75,5$ m con uno sviluppo complessivo di 526 m ed una larghezza di 22,10 m. L'impalcato è costituito da un cassone metallico chiuso di 6,70 m di larghezza e 4 m di altezza (L/31), completato da una soletta di 22 cm di spessore, appoggiata lateralmente sui traversi, posti ad

interasse di 3,90 m, sostenuti da diagonali impostati sul fondo del cassone. La soletta è prefabbricata sugli sbalzi e gettata in opera sul cassone. La carpenteria metallica è stata varata a spinta.



Figura 16 – Nuovo ponte sul Rhône a Valence - Francia

Bibliografia

- Dezi L., Niccolini S. (2003) – “Les Viaducs de la Bretelle d’Urbino – Italie”, Bulletin 22 Ponts Metalliques, OTUA, 2003.
- Dezi L., Raccosta M. (2005) – “I viadotti e i cavalcavia del nuovo passante autostradale di Mestre” – Congresso CTA 2005.
- Dezi L., Raccosta M. (2005) – “Il viadotto Serra Cazzola sulla SS 640 di Porto Empedocle” – Congresso CTA 2005.
- Dezi L., Niccolini S. (2001) – Il viadotto Fontescodella a Macerata – Congresso CTA 2001.
- Gillet G., Bouchon E., Le Faucheur D., Sablon J. Virlogeux M., Hoorpah W. (2004) – “Le Viaduc de Verrières”, Bulletin 23 Ponts Metalliques, OTUA, 2004.
- Tavakoli F. (2004) – “Nouveau pont sur le Rhône a Valence”, Bulletin 23 Ponts Metalliques, OTUA, 2004.

