Fondazione
Promozione Acciaio
CRESCE L'ACCIAIO, CRESCE IL PAESE.

VIADOTTO DI BONNEVILLE – AUTOSTRADA DEL MONTE BIANCO

Il Viadotto di Bonneville rappresenta un evidente esempio di come con l'acciaio si riescano a raggiungere elevate prestazioni grazie sia ad una progettazione all'avanguardia sia ad una conoscenza e maestria nella lavorazione in officina del materiale. Punto focale di quest'opera è sicuramente la ridotta sezione dell'impalcato, la quale ha richiesto il massimo sfruttamento dell'acciaio ottenuto attraverso un'accurata ottimizzazione in fase di progetto.

SOMMARIO

Sintesi dati opera 2

Descrizione dell'opera 3

Costruzione dell'opera 10

Fondazione Promozione Acciaio | Via Vivaio 11 | 20122 Milano | Italia
T +39 02 86313020 | F +39 02 86313031 | info@fpacciaio.it | www.promozioneacciaio.it

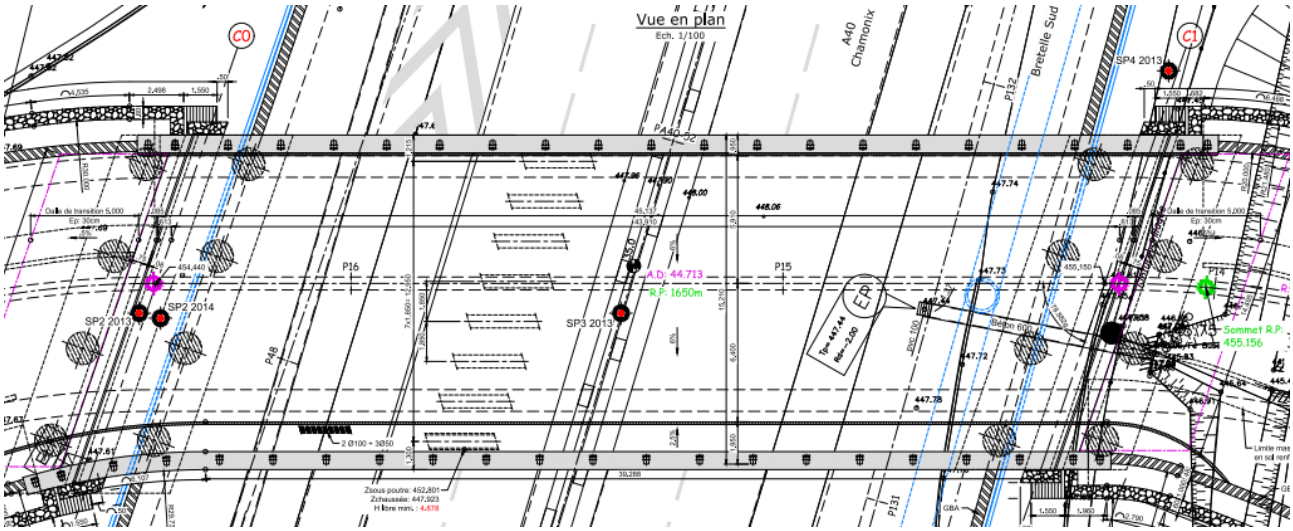
Fondazione
Promozione Acciaio
CRESCE L'ACCIAIO, CRESCE IL PAESE.

Sintesi dati opera

Nome opera	Viadotto di Bonneville - Autostrada del Monte Bianco
Luogo	Bonneville (Francia)
Data ultimazione lavori	Novembre 2019
Stazione Appaltante	Società Autostrada e Traforo del Monte Bianco (AMTB)
Contraente Generale	Bouygues
Progetto esecutivo e di montaggio	Steel Project Italia srl
Costruttore metallico	BIT Costruzioni Metalliche SpA
Altre imprese	Bouygues
Fotografie	BIT SpA
Schema statico	Ponte a travata in semplice appoggio, multitrave con profili doppio T in lamiere composte saldate
Luce totale	44 m (campata unica)
Impalcato	Tipologia: sezione composta acciaio-cls Larghezza totale: 15,5 m Larghezza carrabile: 12,3 m Altezza travi: 1,10 ÷ 1,20 m
Qualità acciaio	S 355 K2 + N profili con t ≤ 30 mm S 355 N profili con 30 < t ≤ 55 mm S 355 NL profili con 55 ≤ t < 80 mm
Altri dati significativi	Quantità di acciaio per ciascun impalcato: 270 t Protezione superficiale: verniciatura

Descrizione dell'opera

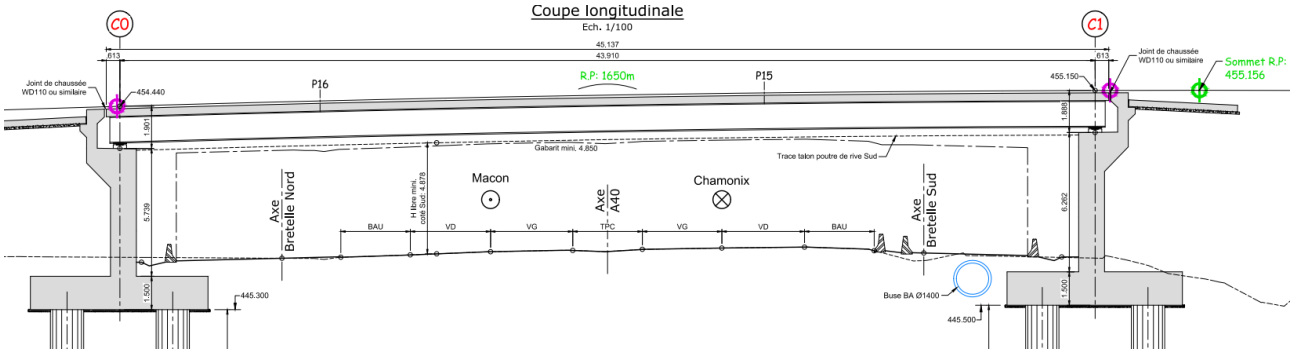
Il viadotto di Bonneville costituisce l'opera principale nell'ambito dei lavori di riqualificazione dell'area di sevizio in prossimità di Bonneville, località situata in Francia ai piedi del Monte Bianco. Il viadotto in progetto si è reso necessario per risolvere le interferenze dello svincolo autostradale nel tratto compreso fra gli abitati di Macon e Chamonix.



Planimetria generale

La configurazione del cavalcavia è del tipo a travata con schema statico in semplice appoggio per coprire una luce di 44 m ed è realizzato da 8 travi in affiancate in sezione mista con connettori a piolo.

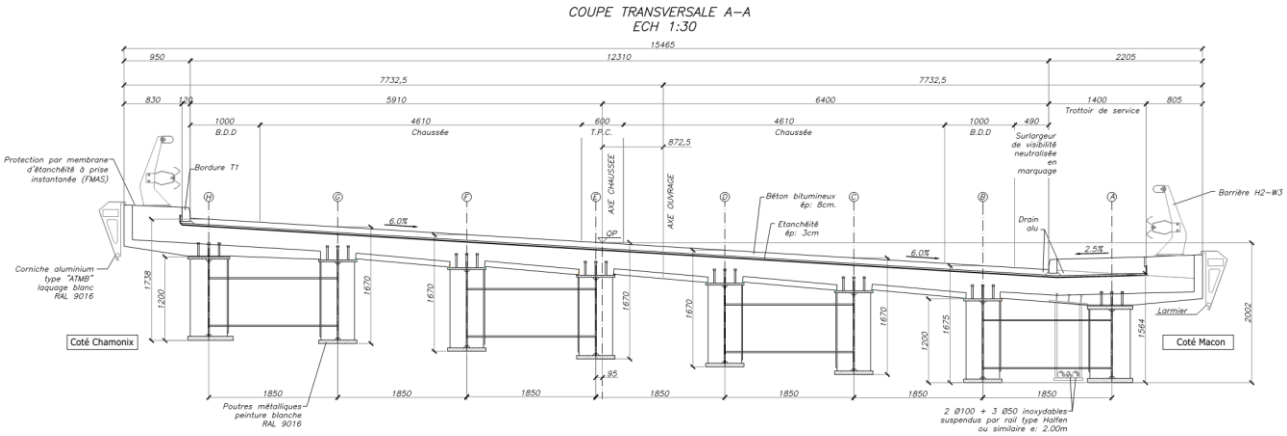
L'inserimento dell'opera in un'area fortemente vincolata da un punto di vista della livelletta altimetrica ed il rispetto dei franchi stradali minimi sulla sottostante autostrada hanno imposto il rispetto di precise limitazioni geometriche: in particolare l'altezza delle travi è stata limitata a 1,2 m e addirittura a 1,1 m per la trave esterna lato Macon.



Sezione longitudinale

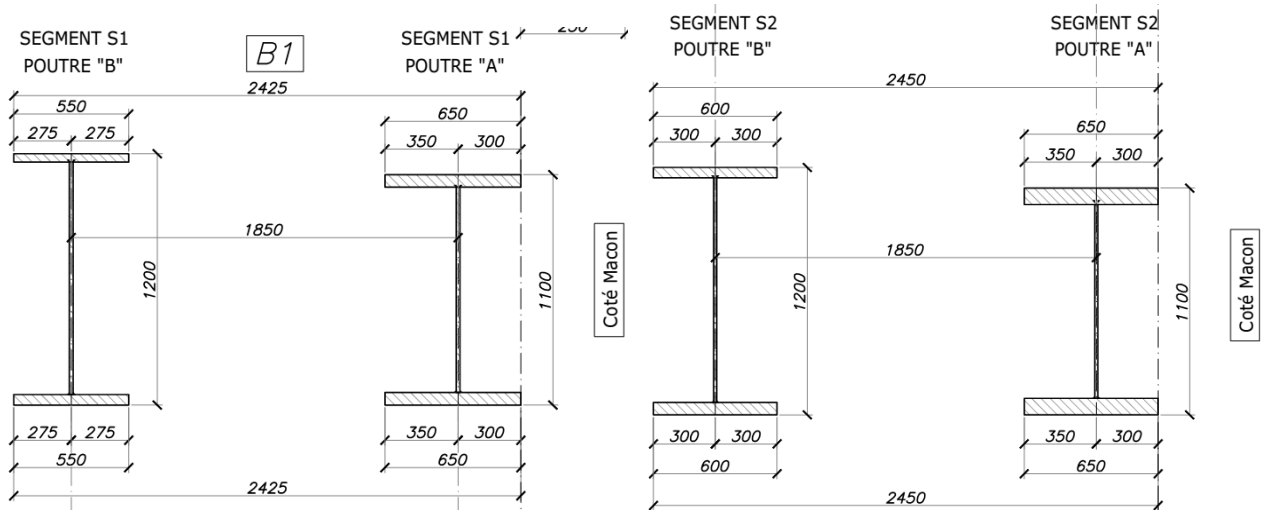
I fattori che maggiormente hanno influenzato la progettazione dell'opera sono stati dunque la limitata altezza delle travi metalliche ed il peso della soletta. Le 8 travi, con sezione a doppio T in lamiera composta saldata, poste ad un interasse di 1,8 m, sono accoppiate a due a due con la classica sezione trasversale degli impalcati in Francia, la cosiddetta "BiPoutre", mediante traversi di altezza 700 mm anch'essi con sezione a

doppio T composta per saldatura e posti ad interasse di 5,5 m; sono stati previsti irrigidenti verticali in sezione a T in corrispondenza dei traversi.



Sezione trasversale tipica

L'esigua altezza delle travi, se rapportata alla luce dell'impalcato (H = L / 40), è ben al di sotto dell'ottimo statico ed ha imposto l'adozione di piattabande di spessore fino a 80 mm. L'inevitabile appesantimento delle sezioni ha fatto sì che fosse necessario imprimere contro-monte rilevanti (300 mm per la trave esterna lato Macon) per compensare l'inflessione elastica delle travi sotto l'effetto dei pesi propri strutturali e dei carichi permanenti portati dell'impalcato.



Sezioni delle travi componenti la BiPoutre esterna lato Macon

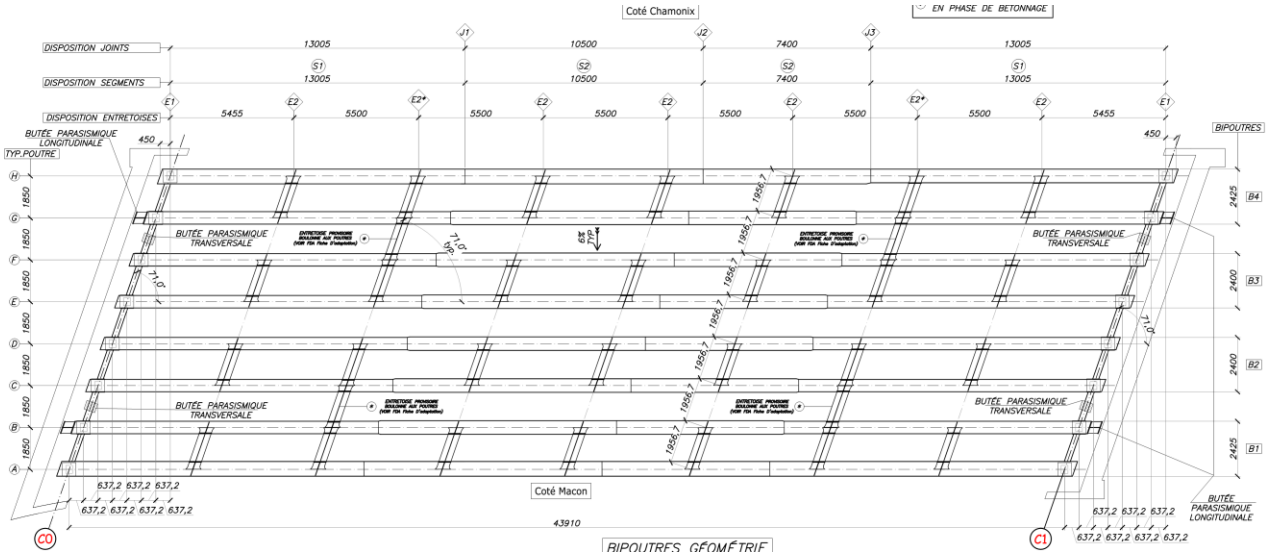
Quanto sopra ha inciso sul tasso di lavoro in fase di getto della soletta di impalcato: in questa fase, infatti, il ponte presenta una sollecitazione pari a circa il 70-75% della sua resistenza caratteristica (allo SLU), condizione molto gravosa soprattutto per le travi esterne che presentano lo sbalzo di soletta ed una predalle di spessori importanti. Questa particolare condizione ha generato alcune problematiche non usuali che il progettista ha dovuto gestire.

In primo luogo, per limitare l'impiego di materiale, è stato necessario verificare le travi allo SLU in esercizio in campo plastico, approccio usuale nella pratica progettuale francese ma non molto in ambito italiano. La

verifica in campo plastico è stata possibile grazie ai rapporti di forma delle sezioni che risultano tozze e di classe 1 o 2.

In considerazione dell'elevato tasso di sfruttamento del materiale per le fasi antecedenti alla maturazione del calcestruzzo e delle basse temperature di esercizio (T = -25°C), è stato necessario valutare attentamente la tenacità del materiale anche alla luce degli importanti spessori delle piattabande. La scelta è ricaduta su acciai normalizzati (N) in accordo alla norma UNI EN 10025-3; per gli spessori maggiori, da 55 a 80 mm, è stato necessario adottare un acciaio di tipo S 355 NL. Le verifiche sono state condotte secondo la normativa europea (Eurocodici) ed integrata con gli annessi nazionali francesi. Come previsto da Annesso Nazionale e Capitolato, per i limiti di snervamento delle lamiere sono stati assunti i valori della normativa EN 10025 che risultano più restrittivi dell'Eurocodice 3 parte 1-1 al crescere dello spessore.

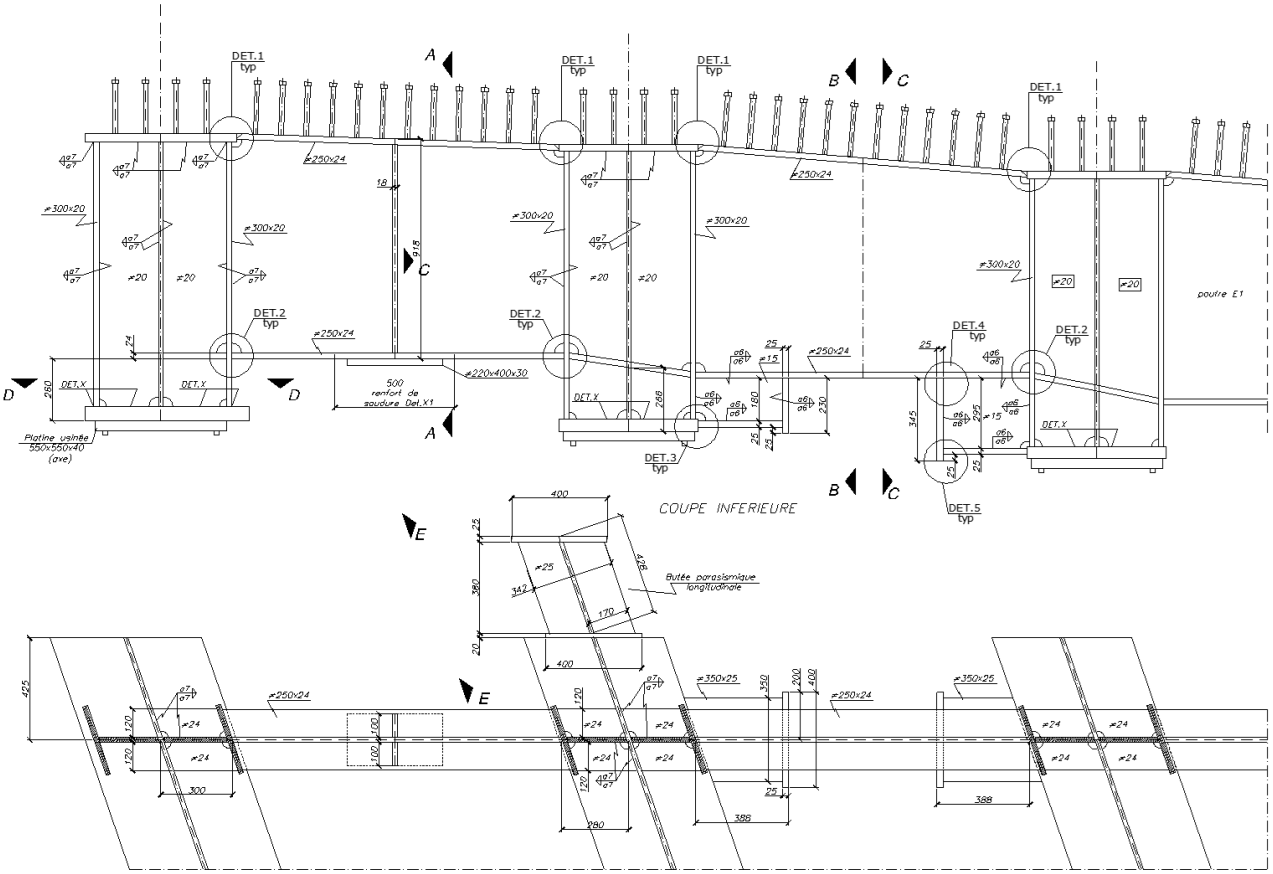
Per garantire la stabilità in fase di getto sono stati inoltre predisposti 4 ulteriori traversi ad uso provvisorio in corrispondenza dei terzi della luce che collegano fra di loro a due a due le BiPoutre: tali diaframmi sono stati collegati con flange bullonate alle coppie di travi in modo da permetterne lo smontaggio una volta che la soletta fosse maturata e che costituisse vincolo torsionale efficace per le travi.



Pianta dell'impalcato

I diaframmi di spalla secondo le specifiche tecniche di capitolato sono stati realizzati in sezione mista mediante connettori a piolo fra la piattabanda superiore e la soletta d'impalcato. Se da un lato il diaframma in sezione mista ha permesso di evitare effetti dinamici al passaggio dei veicoli su giunto stradale, dall'altro ha imposto un'attenta valutazione degli stati di coazione generati dal sollevamento differenziale in fase di sostituzione degli appoggi: il sollevamento era infatti previsto, secondo le specifiche del progetto base gara e dal capitolato di appalto, in 4 punti sotto diaframma: la forte iperstaticità del sistema, estremamente sensibile ai cedimenti differenziali fra i punti di presa, ha richiesto verifiche specifiche sulla struttura ed una limitazione ben precisa al valore di tale cedimento in fase di sostituzione degli appoggi, non accettato oltre il valore di 50 mm.

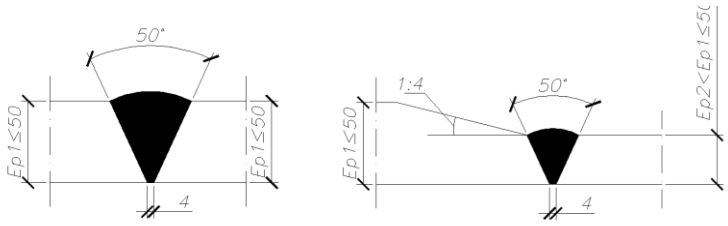
Sui diaframmi di spalla sono stati previsti inoltre ritegni sismici sia in direzione longitudinale che trasversale.

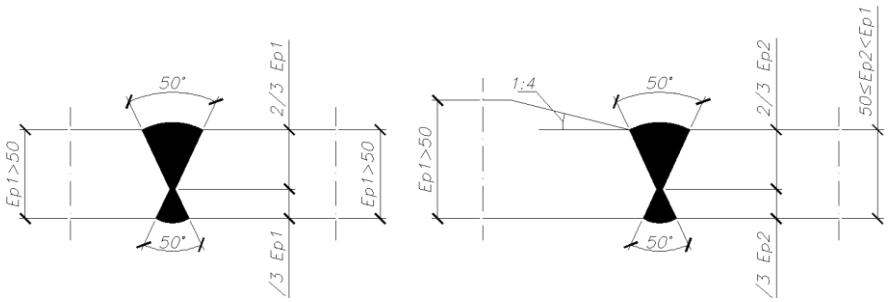


Sezione trasversale e pianta su diaframma di spalla

I giunti trasversali fra i conci di travi principali e fra i traversi di collegamento di ogni Bipoutre sono interamente saldati secondo la prassi usuale in ambito francese per gli impalcati metallici da ponte; unica eccezione a quanto sopra è quella dei collegamenti per i traversi intermedi temporanei per la stabilizzazione delle travi in fase di getto che, essendo temporanei, sono stati realizzati con flange bullonate per consentirne lo smontaggio a getto della soletta indurito.

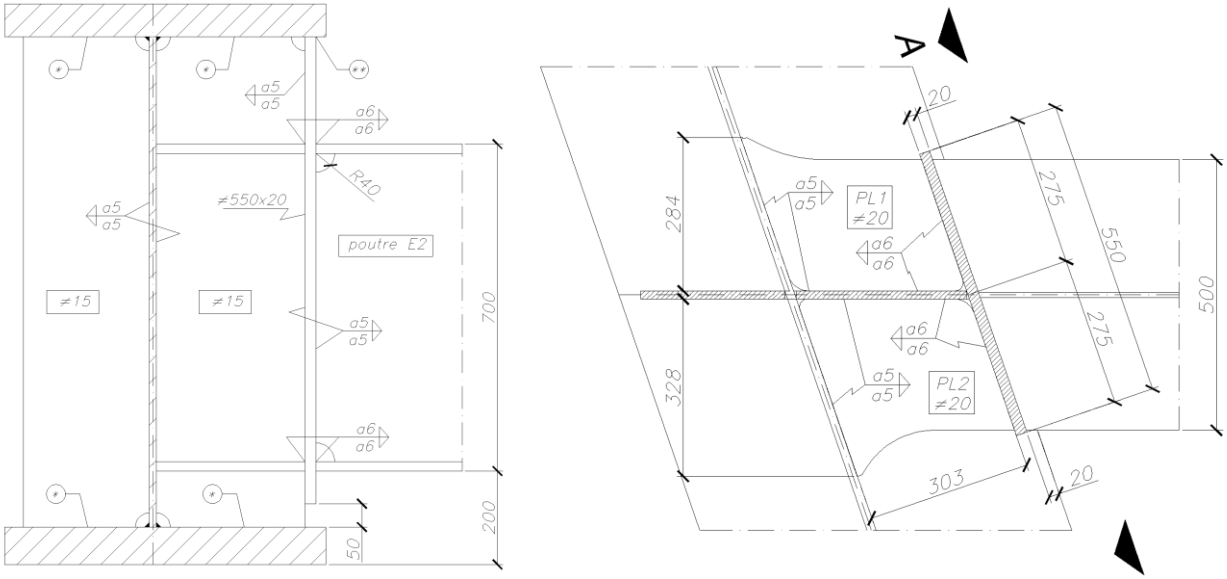
Particolare attenzione è stata posta alla progettazione dei giunti a piena penetrazione delle piattabande: alla luce degli spessori in gioco, i dettagli di saldatura sono stati concepiti per ridurre al minimo gli apporti di saldatura in cantiere, semplificare le operazioni di assemblaggio e garantire un sufficiente margine di sicurezza nei confronti delle verifiche a fatica che prevedono coefficienti riduttivi sui limiti del delta tensionale di riferimento sempre maggiori al crescere degli spessori collegati.





Giunti di piattabanda a piena penetrazione

Particolare attenzione è stata posta sul dettaglio del collegamento fra il traverso intermedio e la trave principale. Le piattabande dei traversi e delle travi principali sono state fra loro sfalsate per due motivi principali: semplificare la costruzione dell'impalcato prevedendo traversi orizzontali ed evitare collegamento diretto fra le piattabande dei due elementi, dettaglio che sarebbe risultato problematico al punto di vista del comportamento a fatica. Il traverso è saldato ad una flangia verticale a sua volta saldata all'irrigidente verticale della trave principale. Le nervature orizzontali saldate tra la flangia e l'anima della trave longitudinale sono atte a riprendere gli sforzi delle piattabande e ad irrigidire il nodo per garantire maggiore stabilità all'impalcato in fase di getto. I suddetti piatti orizzontali si innestano sull'anima con un preciso raggio di curvatura studiato per migliorare il comportamento a fatica di questo dettaglio.



Dettaglio del nodo traverso-trave principale

Dettagli costruttivi. A sinistra: nodo traverso-trave principale. A destra: giunto di piattabanda della trave principale

Dettagli costruttivi

La soletta, ordita in trasversale, presenta un getto di completamento di spessore variabile (da 25 cm a 29 cm) eseguito in opera su predalle in calcestruzzo prefabbricate: su precisa indicazione del Capitolato Tecnico le predalle sono state considerate come mero cassero a perdere e non considerate nello spessore di calcestruzzo collaborante. Le lastre presentano spessori notevoli e variabili da un minimo di 8 cm nelle zone interne a un massimo di 15 cm per le coppelle a sbalzo dalle travi esterne.

Gli appoggi in gomma armata garantiscono l'isolamento dell'impalcato in condizione sismica.

Vista durante la fase di varo

Costruzione dell'opera

L'impalcato è stato diviso in quattro coppie di travi (BiPoutre), già assemblati in stabilimento, che costituiscono dunque gli elementi trasportati e forniti a piè d'opera finiti e pronti per la sola posa. I macroconci di BiPoutre così realizzati, già comprensivi di contromonte, sono stati premontati in officina per verifica in contradditorio fra Committente ed Appaltatore sulla correttezza delle geometrie plano-altrimetriche delle travate e delle relative contromonte.

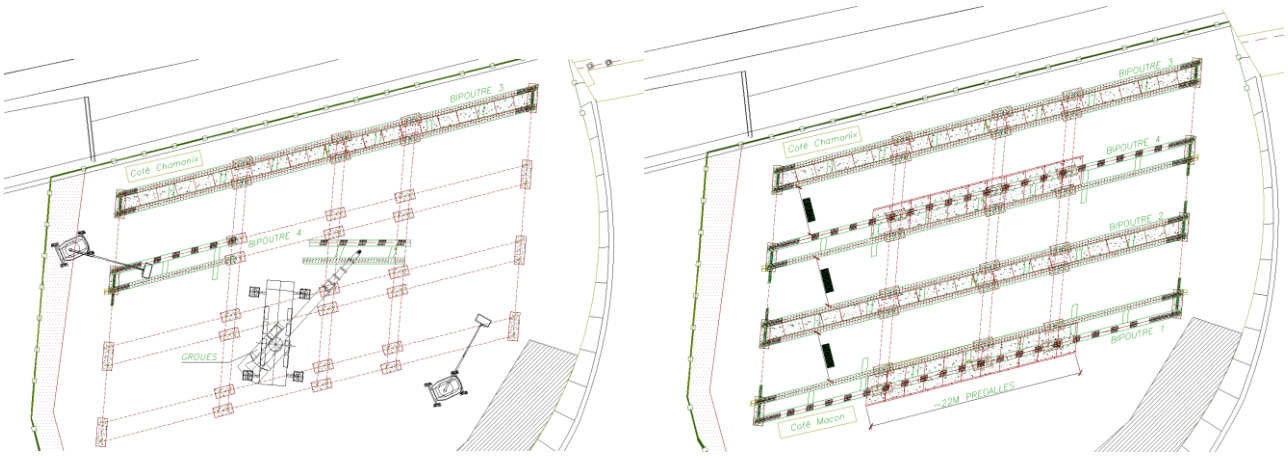
Composizione della BiPoutre in verticale

Preassemblaggio di una BiPoutre

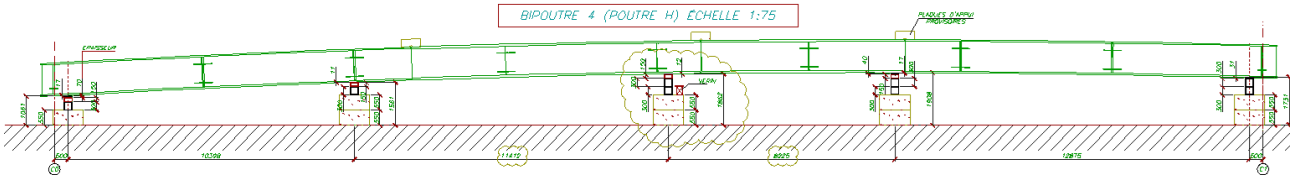
Preassemblaggio delle Bipoutre in officina (notare la monta impressa alle travi)

Premontaggio di una coppia di bipoutre in officina

I conci di BiPoutre sono stati trasportati in una zona di cantiere adiacente il sedime definitivo dell'opera: in quest'area i conci sono stati assiemati e posti in geometria corretta su appositi supporti temporanei.

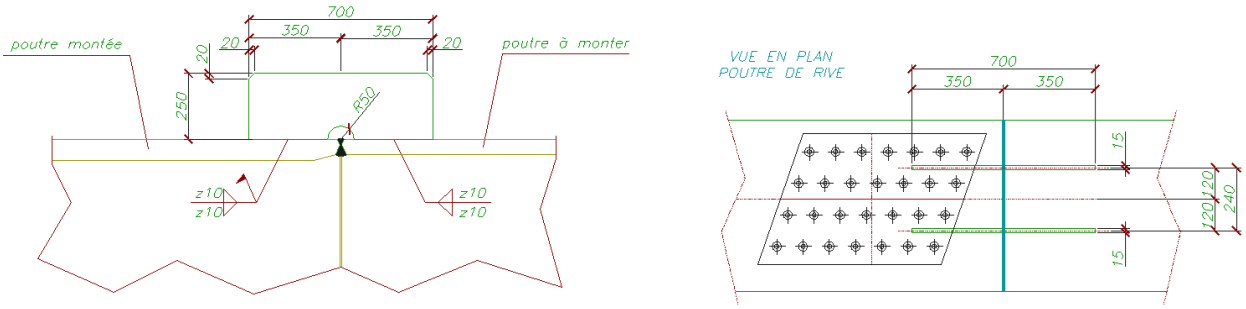


Fasi di assiemaggio delle BiPoutre



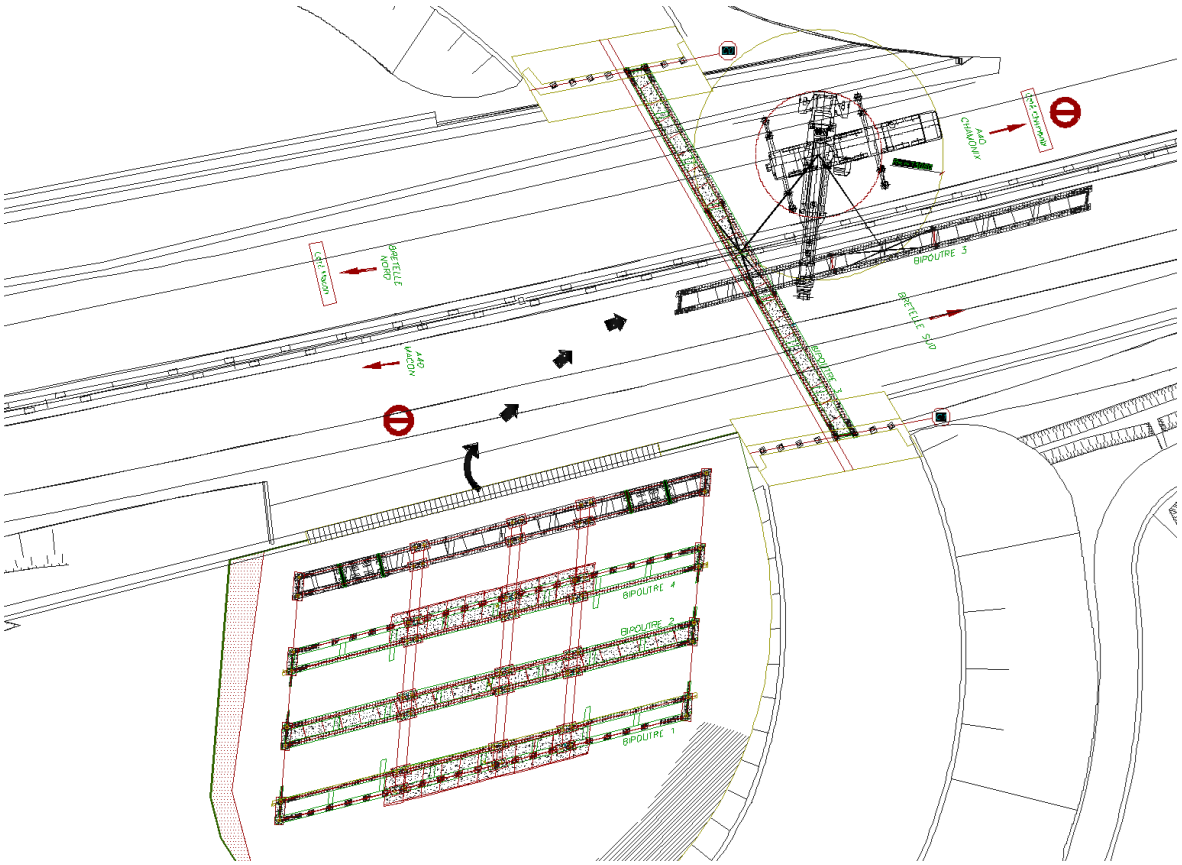
Sezione longitudinale di una trave in fase di assiemaggio

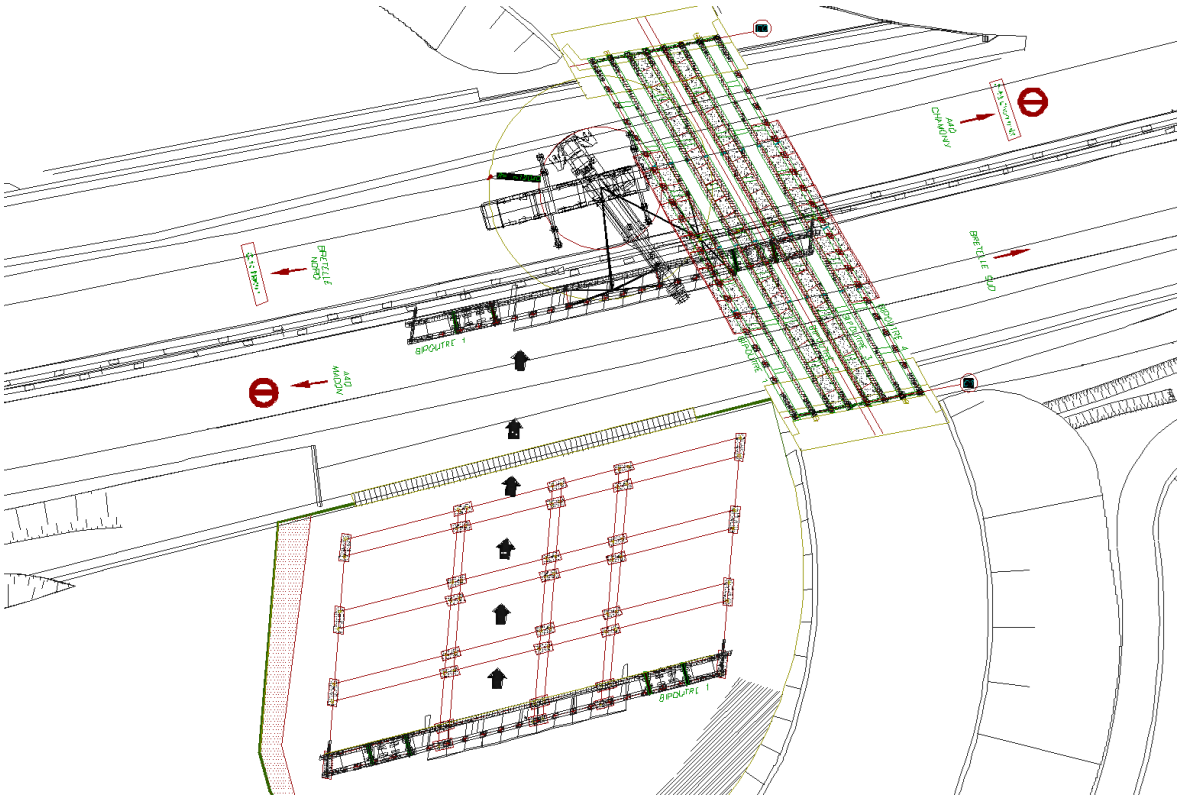
Per limitare il numero di appoggi temporanei le travi sono state predisposte con apposite clampe terminali su piattabanda superiore in modo da essere calate in appoggio sui conci precedentemente assiemati.



Dettaglio delle clampe di appoggio

Una volta ultimato l'assiemaggio delle BiPoutre queste sono state prese in carico mediante carrelloni e spostate a pié d'opera, sollevate mediante gru e posizionate in configurazione definitiva. Il montaggio è stato studiato in modo da ridurre al minimo le interferenze con la sottostante autostrada: le operazioni di montaggio sono state portate a termine nell'arco di due sole interruzioni notturne concesse dall'ente gestore dell'autostrada.

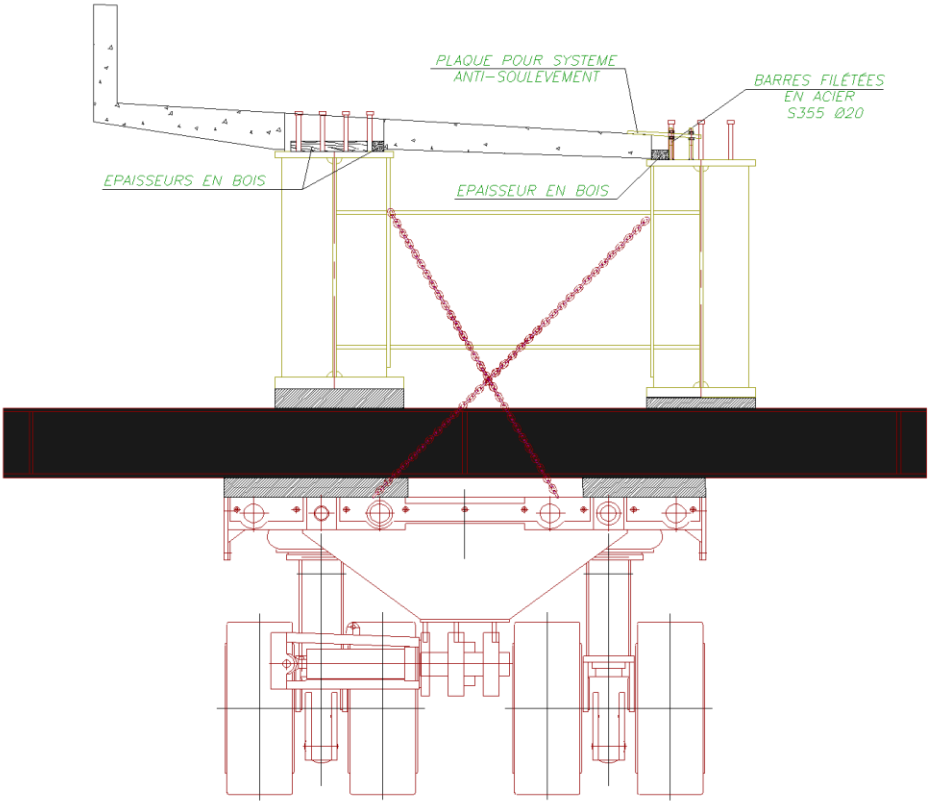




Fasi di movimentazione con carrelloni e presa in carico con gru

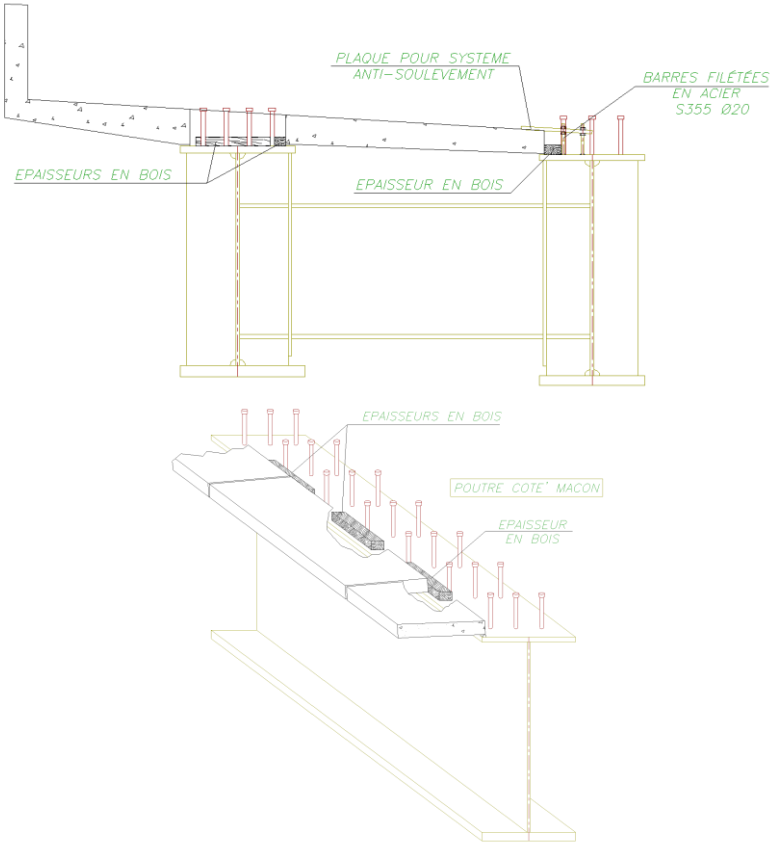
Movimentazione con carrelloni, scarico del carrellone e presa in carico con gru

In fase di montaggio il baricentro delle BiPoutre esterne risultava fortemente sbilanciato verso l'esterno a causa del maggior peso delle travi, più sollecitate in fase di esercizio, e della conformazione delle predalle che realizzano lo sbalzo e la veletta di contenimento del getto. Per limitare questa eccentricità, che avrebbe portato il tiro ad essere troppo sbilanciato, le BiPoutre esterne sono state movimentate con soli 22m di predalle a cavallo della mezzeria. Le BiPoutre centrali, invece, sono state movimentate con tutte le predalle poggiate su di esse.



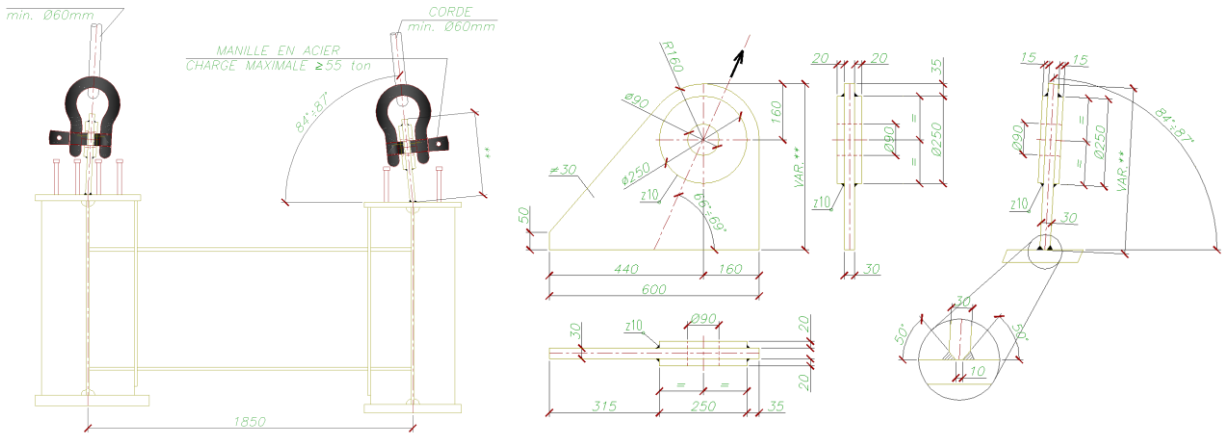
Sezione trasversale BiPoutre Esterna in fase di montaggio

Le predalle sono state messe in sicurezza e bloccate alle travi principali mediante l'interposizione di taccate in legno che ne impedissero gli spostamenti nel piano. Inoltre per le predalle esterne sono stati previsti dispositivi antiribaltamento in senso trasversale.



In alto: sistema antiribaltamento delle predalle esterne. In basso: dettaglio delle taccate di contrasto delle predalle.

La geometria dei golfari è stata attentamente valutata una volta completati i disegni costruttivi: noti con esattezza i baricentri dei macroelementi è stato possibile studiare il tracciato delle funi e stabilire gli angoli e le altezze di ingaggio dei vari golfari. Da un punto di vista statico i golfari sono stati progettati con le formulazioni previste dall'Eurocodice 3 parte 1-8.



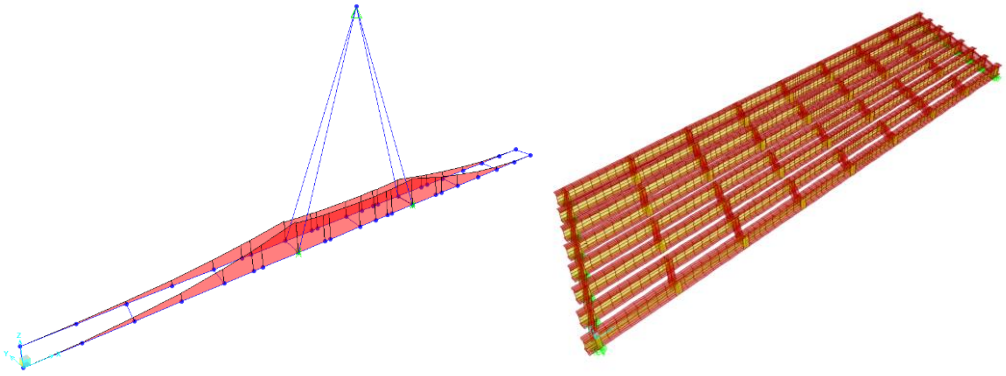
Dettaglio del golfare di sollevamento

Sollevamento con gru e gancio centrale

Posa delle predalle laterali esterne

Particolare attenzione è stata posta nella verifica di stabilità in fase di sollevamento, posa e getto dell'impalcato. In seguito le diverse configurazioni statiche che sono state analizzate:

- Durante il sollevamento ciascuna BiPoutre lavora singolarmente e risulta vincolata in corrispondenza dei golfari
- Durante la fase di posa le BiPoutre lavorano singolarmente in schema statico di semplice appoggio su luce 44m
- Prima del getto della soletta vengono montati i traversi intermedi aggiuntivi che collegano a due a due le BiPoutre. Le travi lavorano in semplice appoggio su luce di 44m e sono soggette al peso della carpenteria metallica e della soletta non collaborante fino alla sua maturazione.

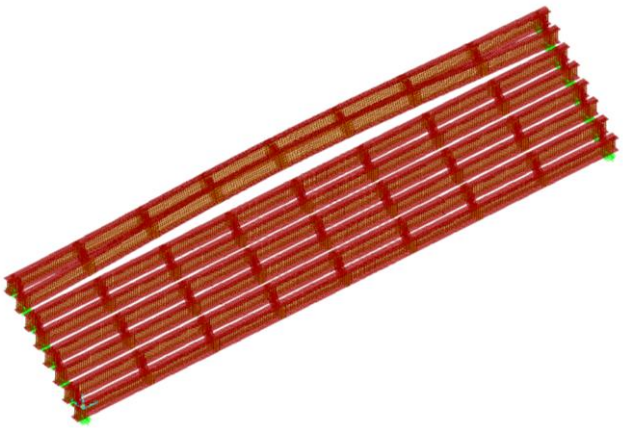


Modelli di calcolo in fase di sollevamento (a sinistra) e in fase di posa/getto (a destra)

La verifica di stabilità è stata condotta secondo il metodo generale previsto dall'Eurocodice 3 parte 1-1 che prevede la ricerca del moltiplicatore critico mediante modellazione FEM il quale permette, tramite opportune correlazioni, di trovare il fattore riduttivo da applicare alla resistenza del materiale.

In fase di sollevamento la BiPoutre risulta stabile e soggetta a momenti di entità modesta se paragonati a quelli in esercizio: questa fase non ha destato particolari preoccupazioni.

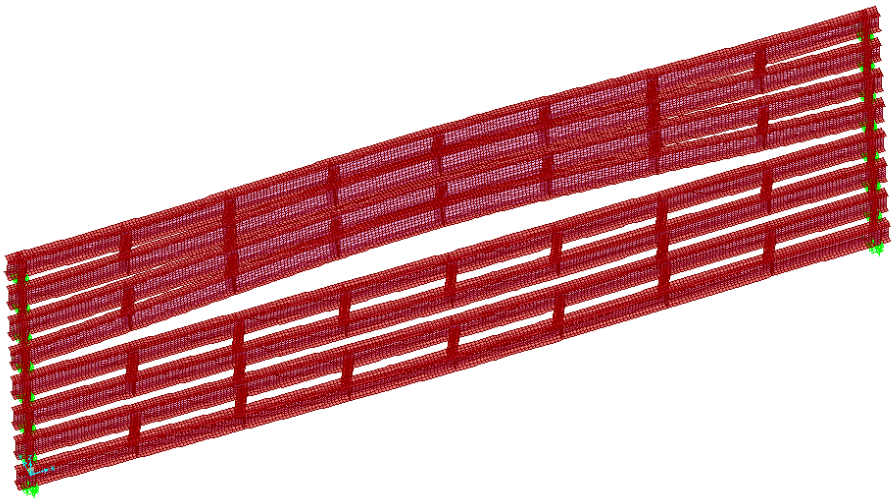
In fase di posa il primo modo di instabilità ha coinvolto la BiPoutre esterna lato Macon, la più pesante e di minore altezza: il moltiplicatore è risultato pari a α_{cr} = 6,45 mentre la tensione massima di compressione σ_{Ed} si è aggirata intorno ai 100 Mpa; il margine di sicurezza è risultato pari a circa 1,80.



Modo di buckling globale della bipoutre in fase di posa (α_{cr} = 6.45; σ_{Ed} = 100 MPa).

La fase più critica è risultata quella di getto dal momento che l'impalcato si trovava a lavorare sull'intera luce (44m) sotto un carico importante, quello dovuto alla soletta che andava ad aggiungersi alla carpenteria metallica. Tale verifica è risultata addirittura più dimensionante rispetto a quelle allo SLU in campo plastico, tanto che è stato necessario rinforzare le sezioni previste dal progetto a base gara ed inserire dei traversi intermedi provvisori che permettessero di coinvolgere nel modo di buckling coppie di BiPoutre collegate a due a due. I rinforzi sono stati progettati in modo da minimizzare l'impatto in termini di peso ed ottimizzare il comportamento del ponte in fase di getto.

A seguito delle varie modifiche apportate il moltiplicatore critico ottenuto è risultato pari a α_{cr}= 6.45 mentre la tensione massima di compressione σ_{Ed} intorno ai 205 Mpa; il coefficente di sicurezza rispetto all'instabilità globale per i fenomeni flessotorsionali è risultato pari a circa 1.05.



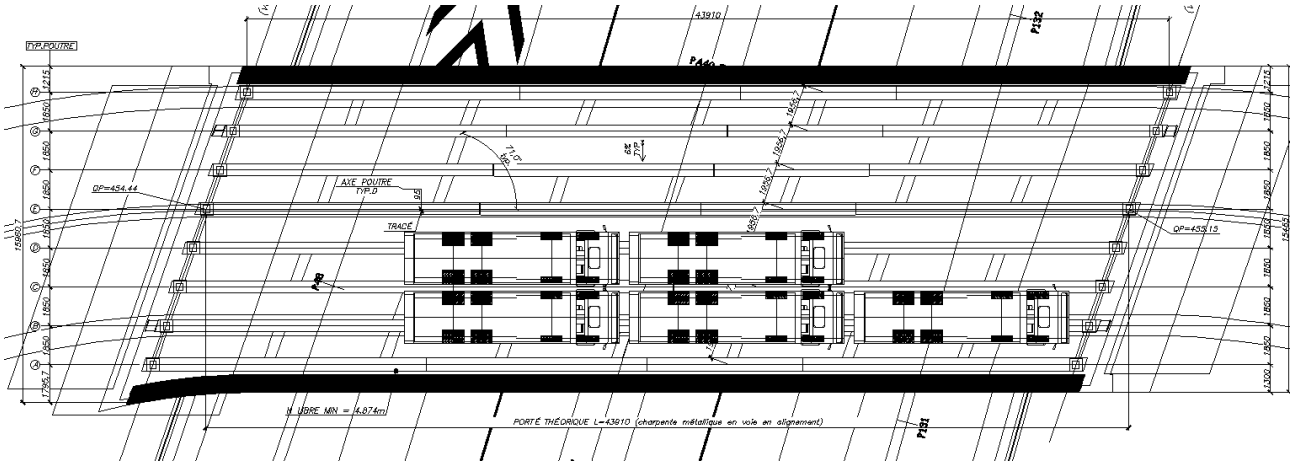
Modo di buckling globale della QuadriPoutre in fase di getto (traversi aggiuntivi montati) (α_{cr} = 5.24; σ_{Ed} = 205 MPa)

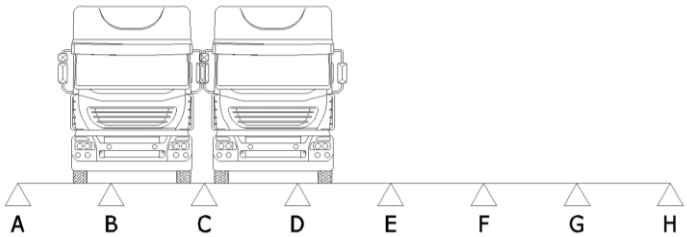
Nella verifica dell'impalcato in questa fase sono stati considerati, oltre ai carichi verticali, i carichi orizzontali dati dal vento e dall'azione equivalente all'instabilità. I momenti flettenti generati nel piano orizzontale da tali azioni sono stati aggiunti a quelli nel piano verticale per la verifica dei traversi.

Dal momento che gli appoggi definitivi, previsti secondo le specifiche del progetto a base gara, non riuscivano a garantire le rotazioni dell'impalcato in fase di getto, è stato necessario prevedere degli appoggi provvisori da sostituire a getto indurito con gli appoggi definitivi.

Controllo delle quote degli appoggi provvisori

Il collaudo è stato realizzato mediante stese di carico costituite da automezzi al massimo carico disposti nella posizione più sfavorevole per le due travi esterne e per la trave centrale per garantire il raggiungimento di almeno l'85% della sollecitazione di progetto massima per ciascuna delle travi sottoposta a prova. Sono inoltre stati testati gli appoggi mediante disposizione del carico in corrispondenza dell'asse appoggi con verifica del valore della reazione teorica. I valori misurati si sono rivelati molto prossimi ai valori previsti mediante modello di calcolo.





Disposizione dei carichi di collaudo sulla piattaforma di impalcato

Contenuti a cura di Fondazione Promozione Acciaio – Riproduzione riservata.
Pubblicazione: giugno 2020
Si ringraziano Steel Project Italia srl e BIT spa per il materiale tecnico fornito.

Fondazione Promozione Acciaio | Via Vivaio 11 | 20122 Milano | Italia
T +39 02 86313020 | F +39 02 86313031 | info@fpacciaio.it | www.promozioneacciaio.it