

Una passerella ciclo-pedonale di circa 100 m di luce libera è stata realizzata sul fiume Reno in località Casalecchio (Bologna).

L'architettura strutturale del ponte è di tipo tensostrutturale: l'oggetto è cioè sospeso, con funi portanti e stabilizzanti presollecitate a curvature contrapposte.

Per ottenere un sistema stabile anche per le azioni trasversali dovute al vento, le funi sono disposte secondo una configurazione spaziale, inizialmente in equilibrio sotto le azioni di tensione iniziali (Stato 0) e carichi permanenti. Lo schema tensostrutturale permette di eliminare le strutture di impalcato con rigidezza longitudinale (cosa che minimizza l'impatto ambientale) e impiega, a sostegno del pavimento in legno di larice, solo elementi trave sagomati trasversali (gondole), i quali sono a loro volta sospesi alla fune portante mediante pendini in funi spirroidali.

Particolare attenzione progettuale è stata dedicata alla massima riduzione delle vibrazioni indotte dalle azioni di moto pedonale sincronizzato.

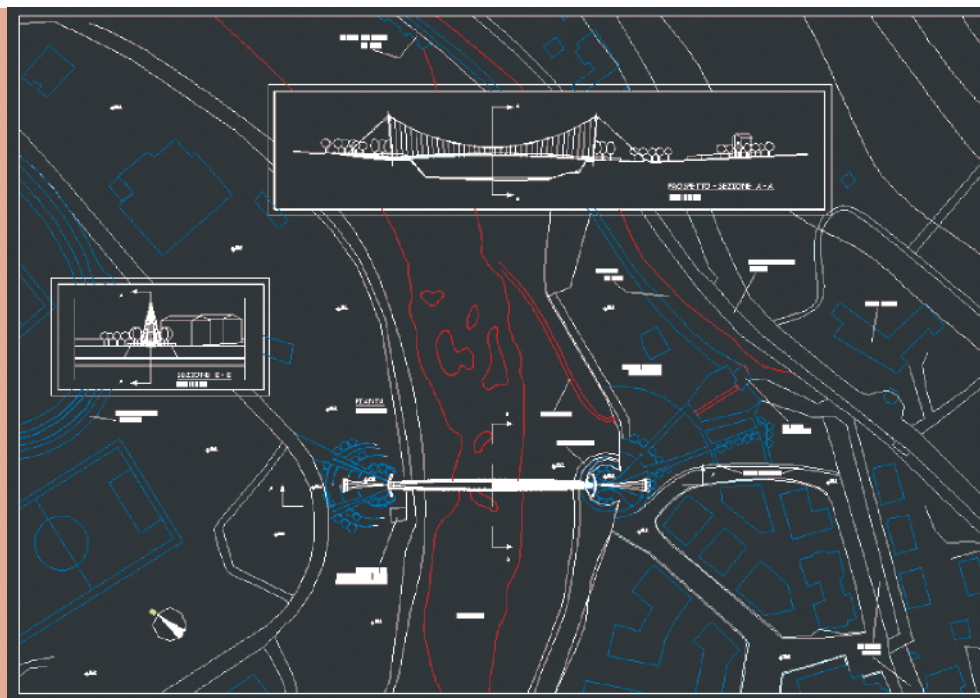
La passerella è ubicata ca. 500 m a valle del ponte stradale sulla via Porrettana e ca. 1.100 m a monte del ponte dell'Asse Attrezzato sud-ovest.

Dal punto di vista urbanistico, in accordo con il Servizio Comunale competente, si è ritenuto che l'ubicazione già individuata nel PRG 1989, cioè la congiunzione tra la prosecuzione di via dei Mille e il termine di via Canale, fosse la più idonea in quanto contribuisce alla definizione di un'asse ciclopedonale di collegamento urbano di notevole valore funzionale e simbolico.

**Prof. Ing.
Massimo Majowiecki**
Docente di Architettura strutturale
IUAV - Venezia



la passerella ciclopedonale sul fiume Reno



Anche dal punto di vista del recupero dell'identità urbana, la collocazione prescelta consente, a chi percorre la passerella, di fruire direttamente di luoghi importanti dell'impianto urbanistico di Casalecchio come la chiesa di S. Martino, l'antico muro in mattoni e gli antichi paraporti Scaletta, S. Luca e Verrocchio del canale di Reno e la chiesa dell'Eremo di Tizzano.

La progettazione concettuale e l'architettura strutturale

Il progetto architettonico-strutturale ha tenuto in particolare considerazione i vincoli funzionali, ambientali ed economici imposti dalla Committenza.

In funzione di questi vincoli è stato redatto un progetto preliminare, consistente essenzialmente in un'analisi tipologica comparativa (fig. 1).

Le tipologie strutturali esaminate sono state le seguenti:

- ad arco con impalcato sospeso da tiranti in fune;
- a impalcato sospeso con strallatura asimmetrica e pilone verticale;
- a impalcato sospeso con strallatura asimmetrica e pilone inclinato;
- a tensostruttura a doppio effetto, presollecitata, con funi a curvature contrapposte.

I risultati della progettazione preliminare sono stati illustrati mediante tecniche interattive grafiche, modellazione solida 3D e fotosimulazioni di impatto ambientale.

I risultati ottenuti sono stati sottoposti all'approvazione della Committenza e della Soprintendenza per i Beni Ambientali e Architettonici, la quale, dopo aver esaminata la documentazione prodotta con lettera dell'8 ottobre 1998, esprimeva l'avviso favorevole alla tipologia con impalcato sospeso da tiranti in fune: «... L'insieme delle argomentazioni tecniche e urbanistiche, i riferimenti di carattere storico e la leggerezza dell'intervento fanno senz'altro propendere per tale soluzione. [...] Si esprime, con la presente, l'apprezzamento di questa Soprintendenza per l'esemplare azione intrapresa da Codesta Amministrazione per la soluzione del non facile progetto in questione».

Il progetto esecutivo

La soluzione strutturale, sviluppata in sede di progettazione esecutiva, consiste essenzialmente in:

- un sistema principale portante di tipo sospeso in funi ad alta resistenza;
- un sistema di funi stabilizzanti a curvatura contrapposta;
- due portali d'ancoraggio con fondazioni a gravità.

Il sistema portante principale

Il sistema portante principale è costituito da due funi portanti di 98 m di luce libera e 15 m di freccia. Ogni fune portante è di tipo spiroidale con fili elementari ad alta resistenza ($\sigma_r > 1600 \text{ N/mm}^2$), protetta contro la corrosione mediante zincatura di classe B ($s > 300 \text{ gr/m}^2$), di diametro nominale $\phi = 60 \text{ mm}$.

Le funi portanti sono disposte secondo linee sghembe nello spazio adottando una configurazione naturale di equilibrio dipendente, dalla distribuzione dei carichi (trasmessi dall'impalcato alle funi portanti tramite i pendini di collegamento) e dalle condizioni di vincolo cardinali. Questa configurazione è data principalmente dalla forma dell'impalcato, di larghezza variabile secondo un andamento a doppia parabola, tra i 2,50 m all'imposta e i 6 m in mezzeria, che permette di ottenere, con la struttura dell'impalcato stesso, la funzione di controventamento orizzontale fuori dal piano verticale (fig. 2).

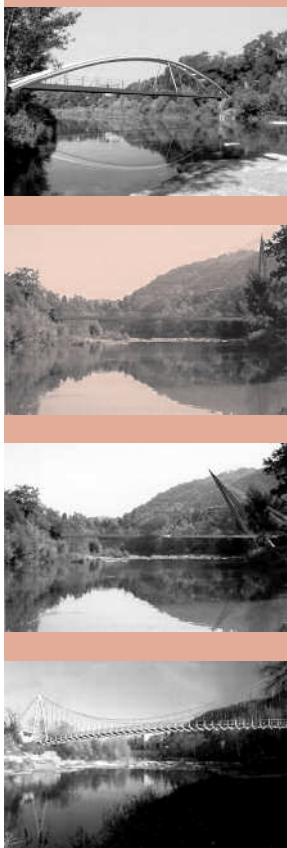


Fig. 1 - Tipologie vagliate.

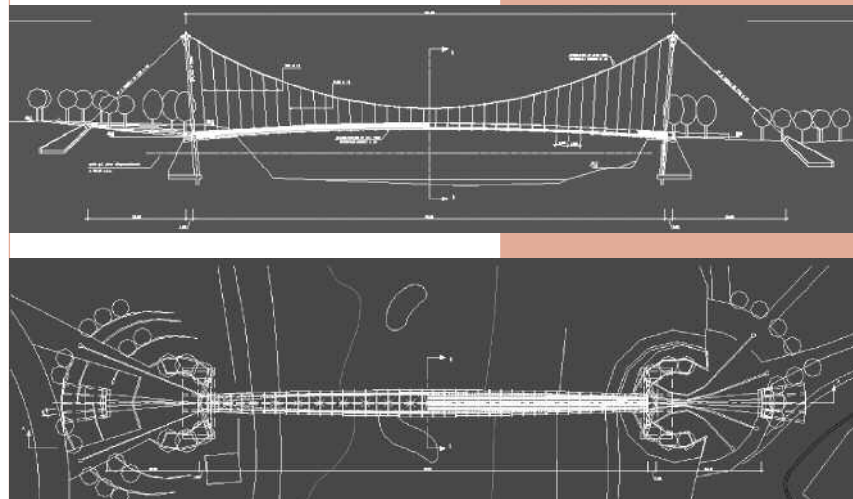


Fig. 2 - Vista e pianta.



I pendini di collegamento tra impalcato e funi portanti sono realizzati in funi spiroidali $\phi = 16\text{mm} - 19\text{ mm}$, zincate; essi sospendono l'impalcato ogni 2,50 m collegandosi a travi trasversali metalliche a luce variabile, a sezione chiusa, in acciaio Fe 430 D e trasmettono gli sforzi alle funi portanti mediante speciali morsetti ad attrito.

L'impalcato, della lunghezza complessiva fra i portali di 98,00 m, è in legno di larice, opportunamente trattato, in tavole aventi spessore 0,07 m, larghezza 0,20 m e lunghezza 5,00 m.

I listelli sono posizionati longitudinalmente al senso di percorrenza della passerella, accostati l'un l'altro con una fuga di alcuni millimetri per consentire il passaggio dell'acqua e le usuali dilatazioni del legno stesso.

Il sistema stabilizzante

Il sistema stabilizzante è costituito da funi a curvatura contrapposta, del diametro nominale di 40 mm, dotate di uno sforzo coattivo di pretensione di 500 KN, disposte in corrispondenza del perimetro esterno dell'impalcato.

Le funi stabilizzanti permettono di ottenere un sistema verticale a doppio effetto generando così un meccanismo strutturale di risposta a tensostruttura, a differenza della classica stabilizzazione per gravità dei sistemi semplicemente sospesi.

Le funi stabilizzanti sono dotate di componenti di curvatura nei piani verticale e orizzontale in modo da ottenere una risposta efficace contro le azioni dei carichi gravitazionali, le azioni di lift (sollevamento) e drag (trascinamento) indotte dal vento.

Le funi stabilizzanti si ancorano su una fondazione in c.a.

I cavalletti d'ancoraggio

Il sistema tenso-strutturale formato dalle funi portanti e stabilizzanti genera, alle imposte, sforzi di trazione, con componenti orizzontali e verticali, che devono essere equilibrate e riportate a terra tramite un sistema d'ancoraggio. Nel presente progetto, si adotta un sistema di ancoraggio a cavalletto costituito da due puntoni configurati ad "A" e da una strallatura costituita da quattro funi di strallo di 40 mm di diametro, disposte sul piano verticale longitudinale (fig. 3). Le funi portanti confluiscono nel punto d'ancoraggio (in sommità delle colonne di sostegno) dove è stato studiato un particolare costruttivo a cerniera-perno che permette di collegare le funi portanti, le funi di strallo e le colonne ad A permettendo, automaticamente, di ottenere la posizione di equilibrio dei vari componenti in situazione di esercizio facilitando, inoltre, le operazioni di montaggio.

I puntoni, dell'altezza fuori terra di ca. 22,00 m, sono realizzati con profili tubolari in acciaio Fe 510 D a sezione circolare di diametro 711,2 mm e di spessore 12 mm, incernierati alla base.

Fig. 3 - Il cavalletto d'ancoraggio.

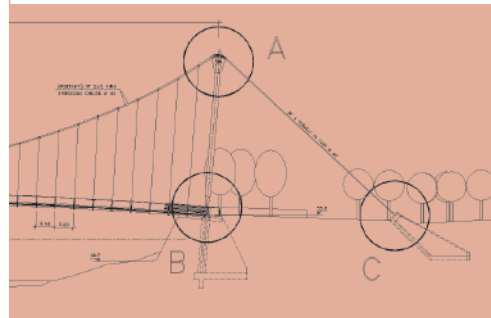
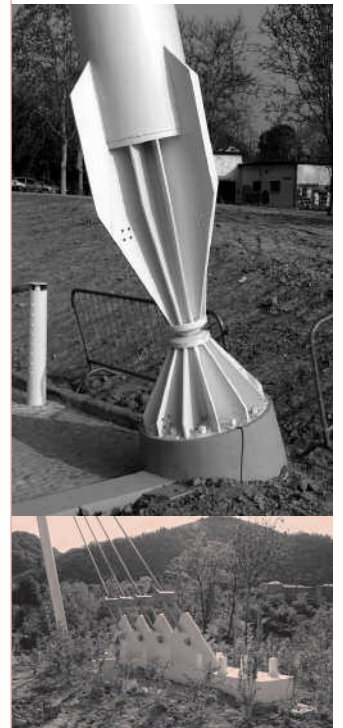




Fig. 4 -
Viste diurne e notturne.



Le fondazioni

Gli sforzi delle colonne sono trasmessi alle fondazioni in c.a.

In funzione delle caratteristiche geotecniche del luogo è stato possibile adottare soluzioni fondazionali di tipo diretto.

Gli sforzi degli stralli sono equilibrati da fondazioni funzionanti a gravità, tipiche dei ponti strallati e sospesi, posizionate a ca. 22-23 m dai puntoni di cui sopra, dove l'equilibrio delle forze si ottiene: in verticale mediante il peso della fondazione stessa e in orizzontale mediante il contributo combinato dell'attrito e di una percentuale della spinta passiva.

La fondazione delle colonne può essere paragonata a un muro di sostegno caricato, verticalmente, dalle colonne e, orizzontalmente, dalle funi stabilizzanti.



Opere complementari

Tutte le parti in carpenteria metallica in acciaio sono sabbiare, opportunamente trattate e successivamente verniciate con colore bianco RAL 9010.

Il parapetto è formato dai montanti, realizzati mediante composizione di piatti pantografati, parti integranti delle travi scatolari trasversali a sezione variabile (gondole), in acciaio verniciato, attraverso i quali passano 8 funi per ogni lato, di diametro nominale 5,00 mm, in fune spiroidale con fili di acciaio inossidabile, dotate di attacchi per la regolazione e la tesatura alle estremità.

Il corrimano collegato ai montanti è realizzato con profilo tubolare a sezione circolare in acciaio inossidabile.

Fig. 5 - Scorci.



il corrimano collegato ai montanti è realizzato con profilo tubolare a sezione circolare in acciaio inossidabile

Accento della Passerella

È stata prevista una doppia tipologia di accento della passerella.

La prima riguarda l'illuminazione a raso del piano di calpestio, realizzata mediante farette posizionate all'interno dei singoli montanti del parapetto.

La seconda, simmetrica su entrambe le sponde, è stata studiata per evidenziare le parti più caratteristiche della struttura e più precisamente: due proiettori per le funi degli stralli e la sommità dei portali; due proiettori per i portali e un proiettore per la parte inferiore della struttura metallica.



Fig. 6 - Visione complessiva della passerella.

I materiali

Acciaio da carpenteria

Acciaio da carpenteria secondo UNI 7070:
Fe 430 C/D con $\sigma_{amm}=190$ N/mm² e $f_y = 275$ N/mm²

Collegamenti bullonati secondo UNI 3740:
viti classe 8.8
classe 10.9
dadi classe 6.S
classe 8 G

Collegamenti saldati secondo UNI 10011 e specifiche I.I.S.

Funi

Funi spirroidali zincate
 $f_u \geq 1570$ N/mm²
Bulk factor: 0.74
Stranding factor: 0.84
Module of elasticity: 165000 MPa

Conglomerato cementizio

Calcestruzzo $R_{bk} \geq 30$ N/mm² per strutture in elevazione e di fondazione
 $\sigma_{amm} = 9.75$ N/mm² $\tau_{c0} = 0.6$ N/mm = $\tau_{c1} = 1.83$ N/mm

Acciaio in barre

Acciaio FeB 44K controllato in stabilimento
 $\sigma_{amm} = 260$ N/mm² e $f_y = 430$ N/mm

Legno

Larice massiccio di I categoria secondo DIN 1052/88
Modulo elastico $E = 0.8 \times 10000 = 8000$ N/mm²
Tensione nominale $\sigma = 13$ N/mm²
Tensione ammissibile
 $\sigma_{amm} = k_d \times k_w \times k_g \times \sigma$ dove
 $k_d =$ coeff. di combinazione = 1.0
 $k_w =$ coeff. di ambiente = 0.8
 $k_g =$ coeff. di geometria = 1.0
da cui $\sigma_{amm} = 10.4$ N/mm²

Analisi strutturale

L'analisi della risposta strutturale all'azione dei carichi di base e delle sue probabili combinazioni è stata eseguita mediante il metodo dell'equilibrio o degli spostamenti.

La maggiore parte delle analisi è stata eseguita mediante elaborazione assistita da computer con procedure interattive grafiche e software indirizzato all'ingegneria civile redatto e controllato in accordo alle CNR-UNI 10024/86 «Analisi di strutture mediante elaboratore: impostazione e redazione delle relazioni di calcolo».

Il programma di analisi strutturale adottato in campo lineare elastico è lo STRAND di Enxsys le cui specifiche generali, librerie di elementi finiti e capacità di modellazione delle azioni, materiali e schematizzazione della struttura e dei vincoli sono illustrate negli allegati di calcolo.

Dove ritenuto necessario è stato eseguito un giudizio motivato di accettabilità dei risultati automatici mediante analisi comparativa eseguita con modelli esemplificati.

Per quanto riguarda l'analisi del comportamento in regime non lineare delle tensostrutture i programmi di calcolo impiegati sono il RETE e TENSO.

Lo stato di configurazione equilibrata della tensostruttura soggetta allo stato di presollecitazione (Stato "0") è determinata mediante un programma di calcolo automatico interattivo grafico (RETE) indirizzato all'analisi geometrico tensionale delle reti di funi.

La ricerca di questo stato iniziale viene fatta usufruendo delle condizioni di equilibrio scritte per ogni nodo della tensostruttura:

$$\sum (S_{ki}^o + P_k^o) = 0$$

$S_{ki}^o =$ sforzo dell'asta k_i generica in stato "0";
 $P_k^o =$ carico applicato al nodo k in stato "0".

La sommatoria è estesa a tutte le aste concorrenti del nodo k .

L'analisi dello stato di sollecitazione nella tensostruttura nelle varie fasi di carico considerate è stata effettuata mediante il programma TENSO, che risolve la maglia nodi-aste equivalenti mediante il metodo dell'equilibrio in campo di non linearità geometrica e materiale.



Osservazioni sulla risposta vibrazionale delle passerelle pedonali

Le passerelle pedonali in generale presentano un basso rapporto tra carichi permanenti e carichi accidentali e, allo stesso tempo, notevoli luci libere. In queste condizioni, i sistemi e le tipologie strutturali, normalmente impiegati per i ponti pedonali, hanno una risposta dinamica caratterizzata da frequenze naturali di vibrazione molto vicine alle frequenze di sensibilità umana (Vibration Upgrading of Gimnasia, Dance Halls and Footbridges – Structural Engineering International 2/92; Dynamic Behaviour of Footbridges – G.P. Tilly, R. Eyre). Dalla letteratura tecnica viene consigliato di evitare i range di frequenze compresi tra 1.6↔2.4Hz. e tra 3.5↔4.5Hz. L'aspetto prestazionale, a livello di *human comfort*, viene considerato dall'Eurocodice n. 3 Design of Steel Structures - Part 2: Steel Bridges, quale stato limite di servizio. L'analisi dinamica, raccomandata dall'Eurocodice, è stata implementata e verificata in modo da contenere l'accelerazione indotta dal carico dinamico di riferimento entro valori ammissibili.

Analisi frequenziale

È stata condotta un'analisi frequenziale volta a determinare i primi modi di vibrare della struttura.

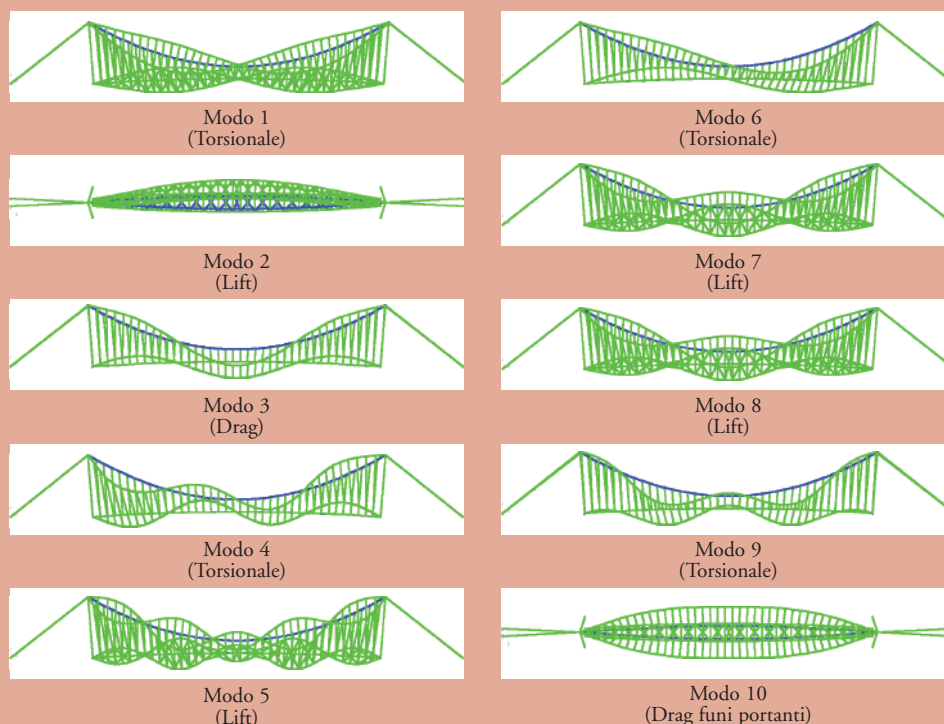
Le masse presenti nella configurazione analizzata sono quelle derivanti dai pesi propri strutturali e dei carichi permanenti portati.

Sono stati individuati i primi 28 modi di vibrare le cui caratteristiche frequenziali vengono riportate nelle tre tabelle seguenti: nella prima i modi di vibrare sono ordinati secondo i periodi propri T , nelle altre due secondo il contributo che ciascuno di essi fornisce in termini di massa modale efficace coinvolta nell'oscillazione secondo una direzione verticale e una trasversale rispetto all'asse della passerella.

Modo	Autovalore	T [sec]	f [Hz]	R
1	9.2819449573e + 000	2.0623405177	4.8488597854e - 001	0.532
2	1.0007259230e + 001	1.9861968719	5.0347476333e - 001	0.545
3	1.0871155391e + 001	1.9056450749	5.2475668905e - 001	0.561
4	1.7913122524e + 001	1.4845479183	6.7360574063e - 001	0.662
5	1.7959215152e + 001	1.4826416358	6.7447181833e - 001	0.663
6	3.6989702840e + 001	1.0330930678	9.6796700241e 001	0.843
7	3.7162153786e + 001	1.0306932466	9.7022077448e - 001	0.845
8	4.6701291522e + 001	0.9194231255	1.0876385119e + 000	0.911
9	5.3539099168e + 001	0.8587056862	1.1645433541e + 000	0.954
10	5.9032231590e + 001	0.8177777083	1.2228261909e + 000	0.985

Nell'immagine seguente vengono visualizzate le prime dodici deformate modali con una descrizione sintetica del moto prevalente rappresentato: torsionale, lift (moto verticale dell'impalcato) e drag (moto di trascinamento dell'impalcato fuori da piano verticale longitudinale medio).

Fig. 8 - Modi di vibrare.



Produzione e montaggio

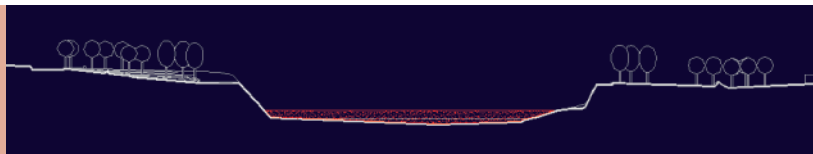
La carpenteria metallica principale è composta dalle colonne e dalle travi trasversali, dette "gondole". Le colonne, in tubo di acciaio a sezione circolare, sono state lavorate essenzialmente nelle parti terminali per eseguire i particolari costruttivi di collegamento in accordo con il progetto esecutivo. In cima alle colonne è stata realizzata una cerniera a perno in modo da poter raccogliere e "deviare" gli sforzi trasmessi dalla tensostruttura centrale (in corrispondenza delle funi portanti) in parte sul puntone e in parte sugli stralli; alla base della colonna si è invece creata una cerniera sferica, in ordine a permettere gli adattamenti angolari, dovuti sia alle tolleranze costruttive sia alle vibrazioni di stato, e insieme trasmettere lo sforzo concentrato alle fondazioni.

Le travi trasversali, appese alle funi portanti e collegate alle funi stabilizzanti, presentano la dimensione principale variabile tra i 2.50 m (alle imposte) e 6.50 m (in mezzeria); esse sono state realizzate mediante composizione saldata di piatti di 8-10 mm di spessore, in modo da ottenere una sezione scatolare ad altezza variabile. Queste travi, sagomate secondo le sollecitazioni flessionali, sono integrate dai parapetti a inclinazione variabile, contenenti l'illuminazione degli impalcati.

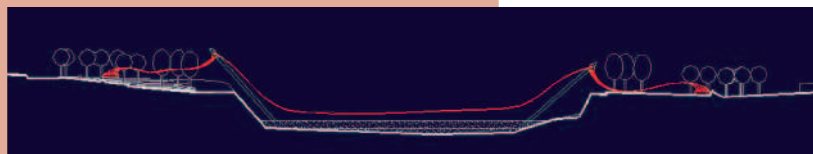


Il montaggio della passerella, facilitato dal regime torrentizio del fiume Reno, è stato eseguito in periodo estivo, dopo l'esecuzione delle fondazioni, in accordo con la sequenza seguente:

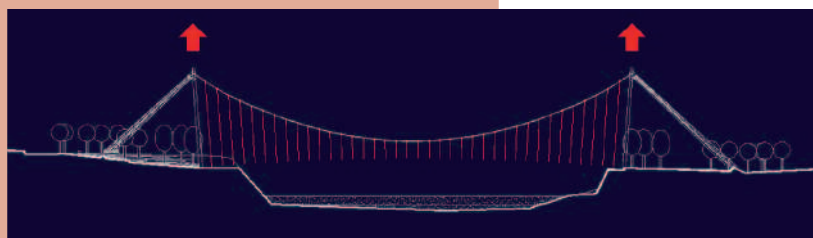
Fase 1 - Esecuzione di guado in terra.



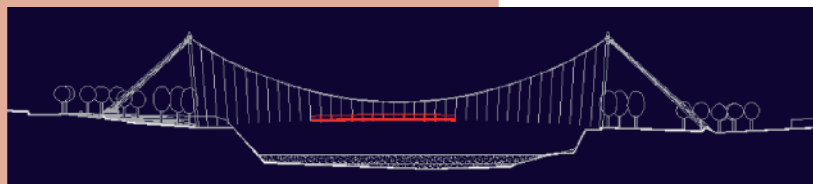
Fase 2 - Predisposizione dei cavalletti di ancoraggio, degli stralli di ancoraggio e distensione delle funi portanti.



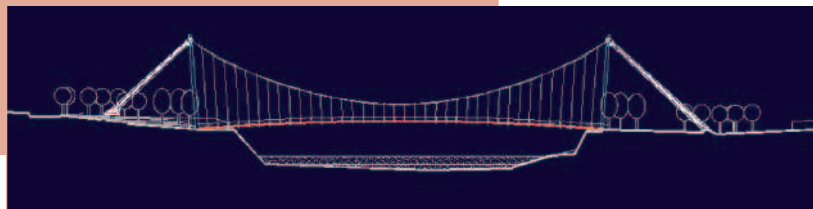
Fase 3 - Collegamento dei pendini alle funi portanti mediante morsetti ad attrito e sollevamento, mediante gru, dei cavalletti e delle funi portanti con i pendini collegati.



Fase 4 - Sospensione dei moduli pre-assemblati di impalcato.



Fase 5 - Installazione delle funi stabilizzanti, pretensionamento e finitura della pavimentazione in legno.



Si riportano alcune foto, ordinate cronologicamente, relative ai momenti salienti della produzione e del montaggio dell'intera opera.



in cima alle colonne è stata realizzata una cerniera a perno in modo da poter raccogliere e 'deviare' gli sforzi trasmessi dalla tensostruttura centrale su puntone e strali

CREDITI

Committente: Comune di Casalecchio di Reno (BO)
 Responsabile del procedimento: Arch. F. Pireira
 Progettazione e direzione lavori: Prof. Ing. M. Majowiecki, Dott. Ing. A. Papetti
 Responsabile per la sicurezza: Dott. Ing. M. Cocchi
 Collaudatore in corso d'opera: Dott. Ing. P. Giovagnini
 Collaborazione: Dott. Ing. S. Pinardi
 Impresa: EdilMecos s.r.l. - Vinovo (TO)
 Peso totale dell'opera: 64.429 kg
 Tempi di realizzazione: Dal 25/11/02 (consegna lavori) al 31/01/04 (ultimazione)
 Importo complessivo dell'opera: 577.552,21 Euro