

IL VIADOTTO MUZZA SUL COLLEGAMENTO AUTOSTRADALE DI CONNESSIONE TRA LE CITTÀ DI BRESCIA E MILANO

Fabio Dall'Aglio Ph.D. Civil Engineer,
Università di Modena e Reggio Emilia,
Dipartimento di Ingegneria "Enzo Ferrari"
Modena, Italia
E-mail: fabio.dallaglio@unimore.it

Luca Piacentini Civil Engineer
Director Piacentini Ingegneri
Bologna, Italia
E-mail: piacentini@pibo.it

ABSTRACT

During the construction of the Highway Brescia-Bergamo-Milan (called highway BreBeMi) the viaduct on Muzza canal, a ramification of Adda river, was built.

The bridge presents a single-span 80.00m long with obliquity greater than 45°. The viaduct has a rectilinear tracing with a double carriageway 15.65m wide, the deck overall width of each carriageway is 17.05m.

The structure of the deck is composed, for each of the two carriageways, of four longitudinal girders 1.70m high with a concrete slab 0.28m thick. The girders are reinforced by a tie system that brings the overall maximum height of steel structure to 5.70m.

The launch of the steel deck was carried out with two cranes, one on each part of the canal, without provisional structures in alveo. This procedure has avoided significant decrease of hydraulic flow during the construction phase not allowed due to the presence of a hydroelectric power station downstream of the bridge.

SOMMARIO

Nell'ambito dei lavori per la realizzazione del collegamento Autostradale di connessione tra le città di Brescia, Bergamo e Milano (autostrada BreBeMi) è stato costruito il viadotto sul Canale della Muzza, diramazione del Fiume Adda.

Il Viadotto presenta un'unica campata di luce di calcolo pari a 80.00m, e presenta una forte obliquità, superiore a 45°. Il viadotto ha un tracciato rettilineo a doppia carreggiata larga ciascuna 15.65m più 0.70m di cordolo per una larghezza totale di ogni singolo impalcato di 17.05m.

La struttura mista acciaio-calcestruzzo è costituita, per ciascuna delle due carreggiate, da quattro travi in acciaio ad altezza costante pari a 1.70m collaboranti con una soletta di spessore 0.28m e rinforzate da un sistema di tiranti che porta l'altezza complessiva massima della struttura metallica a 5.70m.

Il varo dell'impalcato è avvenuto mediante l'utilizzo di due gru tralicciate senza strutture provvisorie in alveo. Tale procedura ha consentito anche in fase di costruzione di evitare perdite di portata idraulica del canale non consentite a causa della presenza di una centrale idroelettrica a valle del ponte.

1 INTRODUZIONE

Nell'ambito dei lavori per la realizzazione del collegamento Autostradale di connessione tra le città di Brescia, Bergamo e Milano (autostrada BreBeMi) è stato costruito il viadotto sul Canale della Muzza, diramazione del Fiume Adda.

Il Canale alimenta, poco a valle dell'intersezione con l'autostrada, una centrale di produzione idroelettrica.



Fig. 1. Ubicazione del viadotto

Il Viadotto presenta un'unica campata di luce di calcolo pari ad 80.00m, e presenta una forte obliquità, superiore a 45° , come evidenziato in figura 2 e come visibile chiaramente nella pianta dell'impalcato di figura 4.

L'impalcato, della tipologia mista acciaio-calcestruzzo, è costituito, per ciascuna delle due carreggiate, da quattro travi in acciaio ad altezza costante pari a 1.70m rinforzate ognuna da un tirante inferiore per un'altezza complessiva massima della struttura metallica di 5.70m e da una soletta collaborante di spessore 0.28m.

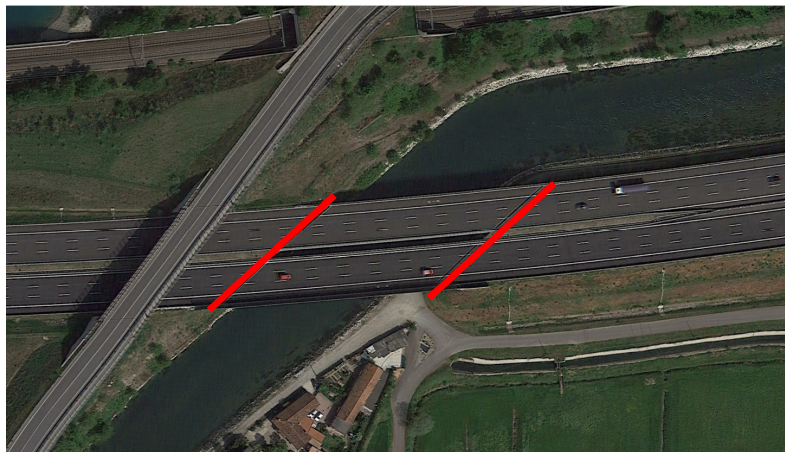


Fig. 2. Vista planimetrica del viadotto

Sino alla fase di progetto definitivo il viadotto ha mantenuto la configurazione a trave continua a due campate, tuttavia in fase esecutiva, a seguito di un più accurato studio sulla riduzione, seppure modesta, della portata idraulica causata dalla presenza della pila in alveo, è emersa l'esigenza di eliminare la pila centrale stessa.

Tale richiesta si è trovata in evidente conflitto con le autorizzazioni paesaggistiche già acquisite per la soluzione di progetto definitivo (che presentava banalmente un impalcato a quattro travi a sezione mista acciaio-calcestruzzo a via superiore) che non consentivano l'adozione di strutture svettanti rispetto il piano viabile. Qualsiasi struttura con elementi in elevazione rispetto al piano viabile (per esempio impalcato a via inferiore o ad arco) avrebbe comportato tempi di approvazione non compatibili con il cronoprogramma della realizzazione dell'infrastruttura.

L'analisi del problema ha portato alla soluzione con configurazione ad arco rovescio (o a trave armata) come evidenziato nella figura che segue.

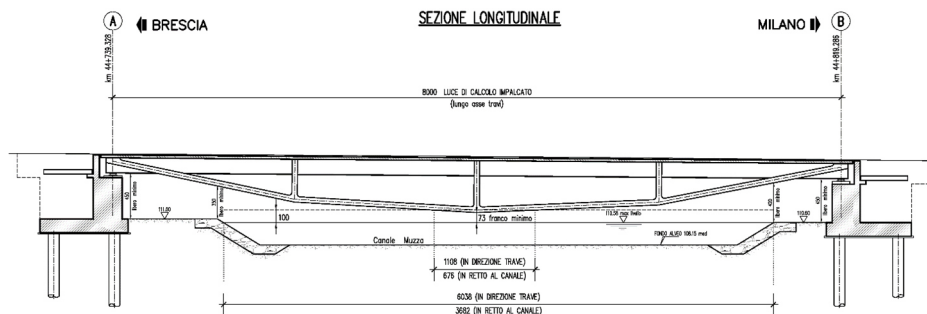


Fig. 3. Sezione longitudinale del viadotto

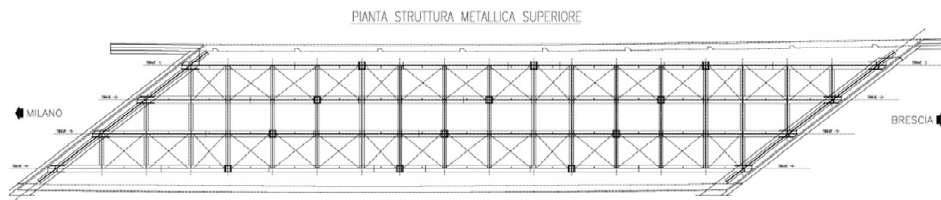


Fig. 4. Pianta superiore struttura metallica

2 GEOMETRIA DEL VIADOTTO

La sede stradale del viadotto, su ciascuna carreggiata, presenta larghezza di 15.65m ed è affiancata da due cordoli laterali di larghezza 0.70m.

Le travi sono collegate da traversi a parete piena di altezza variabile da 0.80m a 1.30m ortogonali alle stesse, ad eccezione dei traversi sugli appoggi che seguono l'obliquità dell'opera. Ad ogni trave sono collegati 3 montanti, uno centrale e due laterali, che hanno il compito di trasferire gli sforzi al tirante costituito da una sezione ad H. L'altezza massima complessiva della trave armata risulta 5.70m.

Il franco idraulico minimo, in corrispondenza del montante centrale che è il punto più basso dell'intera struttura, misura 73cm in corrispondenza del livello massimo del canale che si attesta a 110.58m di quota.

La necessità di contenere il più possibile lo spessore complessivo dell'impalcato determina importanti azioni assiali negli elementi strutturali che lo costituiscono, sia in configurazione provvisoria di montaggio che in esercizio. Quindi, nonostante la struttura in configurazione di esercizio presenti travi presso-inflesse ben stabilizzate dalla soletta e archi rovesci tesi, le rilevanti azioni assiali sui montanti, benché di snellezza contenuta, suggeriscono un controllo rispetto fenomeni di instabilità.

3 VARO

Il varo della struttura, come illustrato nella figura che segue, è avvenuto mediante l'utilizzo di due gru tralicciate, una su ciascun lato del canale, che hanno posizionato le travi preassemblate a gruppi di due (mutuamente controventate per garantirne la stabilità in fase provvisoria) divise in semicampate giuntate in opera in prossimità della mezzeria mediante saldatura.

Tale procedura ha consentito anche in fase di costruzione di evitare perdite di portata idraulica del canale.



Fig. 5. Varo della struttura metallica sulla carreggiata ovest

4 ANALISI DELLA STRUTTURA

Per valutare la stabilità della struttura e l'attendibilità della classica analisi statica lineare effettuata per il calcolo delle sollecitazioni si è proceduto mediante due analisi agli elementi finiti, una di buckling ed una statica non lineare.

L'analisi statica non lineare consente di controllare il comportamento della struttura mediante un caricamento di tipo incrementale, l'analisi lineare di buckling, risolvendo un problema agli autovallori, consente di valutare il moltiplicatore dei carichi applicati che determina perdita di stabilità.

Il vantaggio della prima risiede nella capacità di cogliere importanti variazioni di configurazione statica e geometrica. Tuttavia la seconda individua in modo più intuitivo l'entità delle sollecitazioni che mettono in crisi la stabilità della struttura.

La norma tecnica italiana, in accordo con gli eurocodici, stabilisce che è possibile effettuare un'analisi globale del primo ordine quando risulti:

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 10 \quad \text{per l'analisi elastica}$$

$$\alpha_{cr} = \frac{F_{cr}}{F_{Ed}} \geq 15 \quad \text{per l'analisi plastica}$$

Dove α_{cr} è il moltiplicatore dei carichi applicati che induce l'instabilità globale della struttura, F_{Ed} è il valore dei carichi di progetto e F_{cr} è il valore del carico instabilizzante calcolato considerando la rigidità elastica iniziale della struttura.

Per controllo di tale limitazione, si è effettuata l'analisi di buckling mediante modello FEM facendo riferimento ai carichi di progetto ed alle condizioni di carico considerate nelle verifiche sezionali agli S.L.U. Nella figura che segue è riportata la geometria della parte in acciaio dell'impalcato.

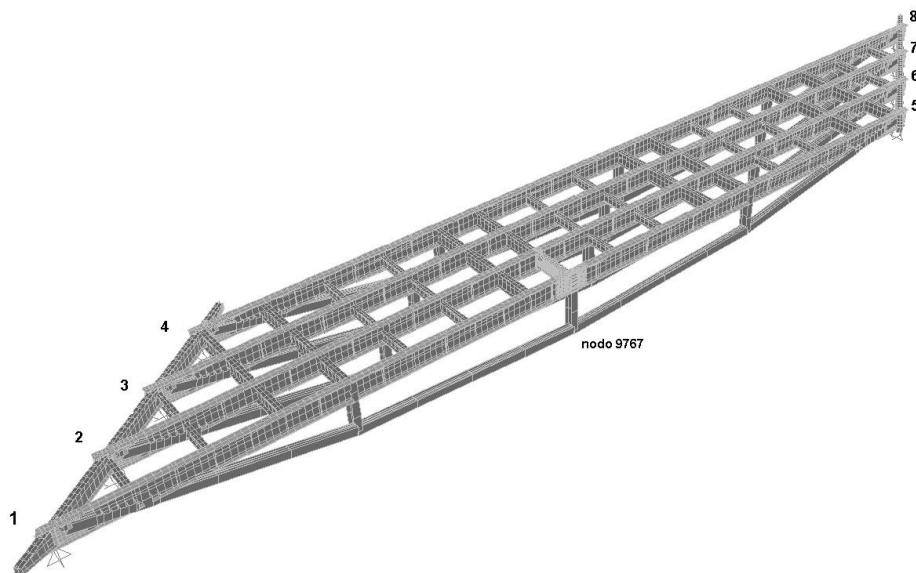


Fig. 6. Geometria del modello FEM

Il moltiplicatore dei carichi che porta al collasso per instabilità globale della struttura nella combinazione di carico S.L.U. risulta essere:

$$\lambda = 1.97$$

Dall'analisi eseguita si è riscontrato quindi il non soddisfacimento della limitazione indicata dalla normativa. In questo caso si rende necessaria un'analisi del secondo ordine, imponendo l'equilibrio sulla configurazione deformata della struttura.

Per studiare correttamente alcune strutture è necessario rimuovere una delle ipotesi fondamentali che sono alla base della scienza delle costruzioni classica: quella di spostamenti piccoli, che porta alla scrittura di equazioni di equilibrio riferite alla configurazione indeformata.

Il controllo richiesto dalla norma indica che nella struttura in esame trascurare l'effetto degli spostamenti sulla configurazione di equilibrio potrebbe portare ad errori apprezzabili. Il montante in particolare può presentare una legge carico spostamento non lineare mostrando tipicamente un comportamento tipo softening: la configurazione deformata, a parità di carico applicato, determina, in questi casi, uno stato di sollecitazione più severo della geometria indeformata. E' possibile, quindi, che si manifestino fenomeni di perdita dell'equilibrio.

Nelle analisi statiche non lineari effettuate è stato quindi monitorato lo spostamento del nodo 9767 rappresentativo dello stato deformativo del tirante maggiormente sollecitato e del montante più lungo, ad esso concorrente, evidenziato nella figura 6.

Per l'analisi statica non lineare è stata inoltre introdotta una imperfezione geometrica iniziale della struttura imponendo la non perfetta verticalità dei tre montanti relativi alla trave di bordo maggiormente caricata. In particolare l'intera catena ed i tre montanti ad essa collegati sono stati ruotati attorno all'asse che identifica la piattabanda inferiore della trave di bordo in modo da ottenere una eccentricità in corrispondenza del nodo di collegamento tirante-montante (nodo 9767) pari a 5.00 cm per il montante centrale e conseguentemente di circa 3.00cm per i due montanti laterali.

In figura 7 si riporta la curva che rappresenta spostamento verticale ed orizzontale del suddetto nodo, in funzione del livello di caricamento dell'impalcato.

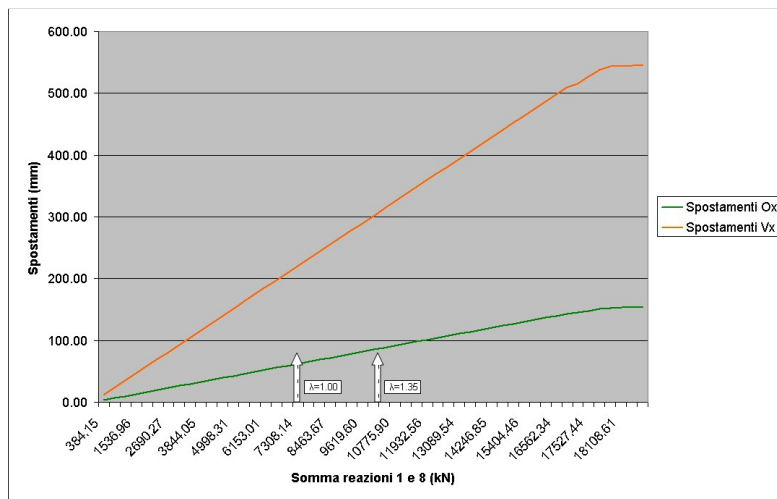


Fig. 7. Spostamenti orizzontale e verticale del nodo 9767

Si osserva quanto segue:

- per valori di λ fino a 1 il comportamento della struttura è sostanzialmente lineare (con spostamenti verticali dell'ordine di 23 cm, ovvero circa 1/350 luce); questo consente di affermare che per configurazioni di carico che possono verificarsi nella sua vita utile, la struttura non risente di fenomeni di softening che determinano forti incrementi di deformazioni a fronte di piccoli incrementi di carico;

- l'analisi mostra un comportamento lineare anche oltre a $\lambda = 1.35$; ciò consente di raggiungere valori di λ superiori a 1.35, mostrando quindi ulteriori riserve di resistenza e stabilità della struttura.
- Si osserva che la curva mostra fenomeni di softening per valori di λ prossimi a 2.5 quindi sensibilmente superiori ai livelli di carico di progetto.

5 VERIFICHE STATICHE PER AZIONI DA URTO

Oltre alle consuete configurazioni di carico da traffico, l'impalcato è stato verificato anche nella condizione di carico eccezionale da urto di un corpo galleggiante sulla struttura metallica.

Benchè il flusso nel canale sia a regime idraulico regolamentato per portata, e controllato nei riguardi della presenza di corpi galleggianti, è stata tenuta in conto la possibilità che un corpo galleggiante colpisca l'intradosso dell'impalcato.

Le verifiche effettuate riguardano la resistenza del tirante e dei montanti e la stabilità globale della struttura tenendo conto che l'azione da urto è in grado di forzare l'instabilizzazione del montante compresso.

5.1 Azioni da corpi galleggianti

L'azione viene valutata come massimo valore ottenuto da due possibili eventi: l'imbrigliamento di rami ed oggetti galleggianti in grado di scaricare la spinta dinamica dell'acqua sull'elemento strutturale e l'urto vero e proprio di un corpo galleggiante.

4.2 Imbrigliamento di oggetti galleggianti

La valutazione dell'azione secondo la prima ipotesi viene eseguita facendo riferimento alla velocità massima dell'acqua prevista nel canale pari a 1.50 m/s. Secondo tale ipotesi la spinta idrodinamica per unità di superficie vale:

$$S_{idro} = \frac{1}{2} \rho v^2$$

Ipotizzando quindi un corpo di dimensioni pari a 10.00m x 2.00m come richiesto dall'ente gestore del canale si ottiene una spinta pari a 22.50 kN.

4.3 Urto da oggetto galleggiante:

La valutazione dell'azione secondo la seconda ipotesi viene eseguita facendo riferimento alla teoria dell'urto completamente anelastico, urto nel quale l'energia cinetica dovuta alla massa ed alla velocità del corpo si trasforma completamente in energia assorbita dall'ostacolo sul quale si verifica l'urto, nel nostro caso l'elemento strutturale.

Nell'ipotesi di urto completamente anelastico quindi, l'energia cinetica deve essere uguagliata al lavoro di deformazione compiuto dalla forza incognita sull'elemento strutturale.

Dal modello di calcolo al quale è stata applicata una forza orizzontale sul nodo tirante-montante è possibile osservare che una forza di 100 kN induce uno spostamento orizzontale pari a 7 mm del nodo stesso. Ammettendo che il comportamento della struttura si mantenga lineare è possibile definire una funzione lineare di coefficiente angolare 0.007 che rappresenti il legame forza-spostamento del nodo di applicazione della forza.

Nella funzione lineare appena descritta si identifica il lavoro di deformazione come l'area sottesa dalla retta. Uguagliando il lavoro di deformazione così definito con l'energia cinetica posseduta dal corpo prima dell'urto è possibile ottenere la forza massima che si scaricherà sulla struttura.

Secondo quanto appena esposto ed assumendo che il corpo galleggiante possieda una massa pari a 12000kg, il valore della forza dovuta all'urto vale 621.06 kN.

4.4 Verifica del montante

Lo studio delle sollecitazioni sul montante in corrispondenza del nodo 9767 è stato eseguito caricando direttamente il modello tridimensionale con un carico orizzontale trasversale all'impalcato pari a 621.06kN.

Dallo stesso modello è stato quindi possibile ricavare le sollecitazioni massime sull'elemento strutturale sulla sezione di attacco alla trave ed eseguire le verifiche di resistenza.

Si riporta di seguito la verifica a presso-flessione della sezione di incastro del montante per la combinazione di carico eccezionale:

A =			1'345'602 mm ²
W =			31'212'000 mm ³
Sollecitazioni SLU	M (kNm)	N (kN)	T (kN)
Fase 0	130.84	693.99	160.28
Fase 1	70.81	381.47	85.04
Urto	2305.37	62.11	621.06
Totale	2507.03	1137.57	866.38
σ (MPa)	80.32	0.85	

La verifica risulta quindi ampiamente soddisfatta.

5 CONCLUSIONI

Nell'ambito dei lavori per la realizzazione del collegamento Autostradale di connessione tra le città di Brescia, Bergamo e Milano (autostrada BreBeMi) è stato costruito il viadotto sul Canale della Muzza. Il viadotto, previsto sino alla fase di progetto definitivo a via inferiore a due campate, è stato trasformato a campata unica in fase di progetto esecutivo. Per rispettare i vincoli paesaggistici imposti all'infrastruttura non è stato possibile prevedere strutture svettanti rispetto il piano viabile, si è quindi fatto ricorso ad un impalcato ad arco rovescio verificato anche nei riguardi di condizioni eccezionali di urto di corpi galleggianti per via dell'esiguo franco idraulico rispetto il livello di massima piena.

Anche le operazioni di varo sono state progettate per evitare perdite di portata del canale che alimenta una centrale idrolettrica.

RIFERIMENTI

- [1] D. M. Min. LL. PP. del 14 gennaio 2008 - Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni;
- [2] UNI EN 1991-1-7: "Azioni sulle strutture – Parte 1-7: Azioni in generale – Azioni eccezionali"
- [3] UNI EN 1993-2: "Progettazione delle strutture d'acciaio - Parte 2: Ponti di acciaio";
- [4] UNI EN 1993-1-5: "Progettazione delle strutture di acciaio – Parte 1-5: Elementi strutturali a lastra"

PAROLE CHIAVE

Trave armata, arco rovescio, azioni da urto, analisi di buckling, analisi statica non lineare.