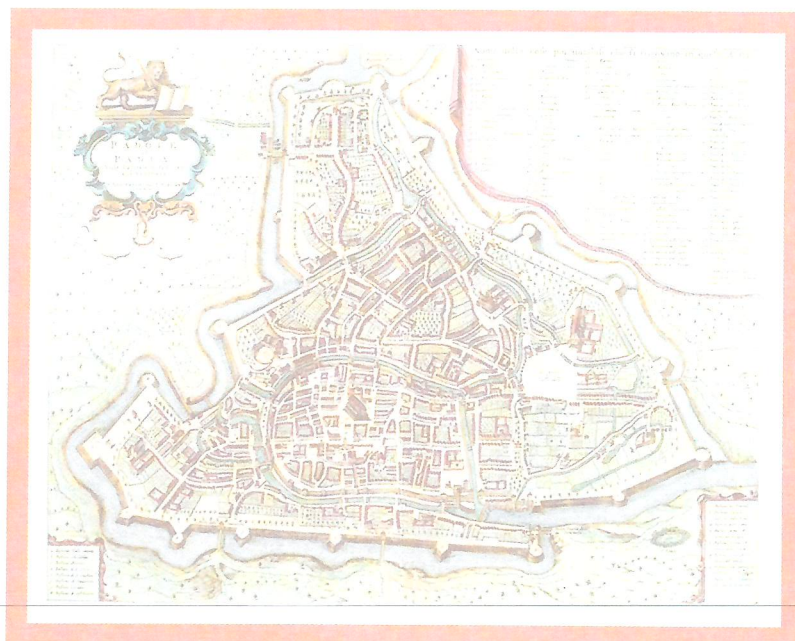




collegio dei tecnici della industrializzazione edilizia

# 12° Congresso C.T.E.

Padova, 5-6-7 novembre 1998





# UNA NUOVA TRAVE COMPOSITA ACCIAIO-CALCESTRUZZO AD ALTA RESISTENZA

**MAURIZIO ACITO,**  
*Scuola di Specializzazione in c.a.  
"F.lli Pesenti" del Politecnico di Milano*  
**LUIGI CASSAR, GIAN LUCA GUERRINI,**  
*Italcementi-Ciments Français Bergamo*  
**VINCENZO COLLINA,**  
*professionista in Forlì*  
**ANTONIO MIGLIACCI,**  
*Politecnico di Milano*

## SUMMARY

*This paper shows some aspects about the structural characteristics and the economic advantages of a new concept of steel-concrete composite beam. The new structural beam element is released by a steel beam with prestressed high strength concrete lower slab.*

## 1. INTRODUZIONE

L'attuale stato dell'arte, nella realizzazione di travi di grandi luci, presenta limiti tecnici e di costo. Infatti, le soluzioni tradizionali in calcestruzzo, anche se precompresso, al crescere delle luci si mostrano sempre più pesanti e costose, mentre le soluzioni in acciaio, pur conservando un gradevole aspetto snello, risultano molto costose, dovendosi peraltro affrontare le esigenze connesse ai fenomeni di fatica.

In particolare, se si utilizzano travi prefabbricate in calcestruzzo precompresso, spesso si hanno limiti nelle realizzazioni, imposti dalla "storia tensionale" delle travi la quale, in generale, conduce a sollecitare a trazione il calcestruzzo all'estradosso. In tal modo può venire compromessa la durabilità della sezione o, per contro, si è costretti a ricorrere a soluzioni molto pesanti (incremento dei cavi di acciaio e/o realizzazione della soletta collaborante superiore), e quindi costose.

Nel caso di travi in acciaio, invece, spesso sono le esigenze, connesse alla fatica, che pongono un notevole limite alle realizzazioni, ed in tal caso le caratteristiche positive di resistenza dell'acciaio non possono essere utilmente e

completamente sfruttate, se non con soluzioni molto costose e pesanti.

Questa nuova trave composita acciaio-calcestruzzo (01) ha lo scopo di realizzare una struttura a trave, che conservi le caratteristiche favorevoli delle soluzioni note, limitando, per quanto più possibile, le difficoltà tecniche e gli inconvenienti ad esse collegate, ovvero di realizzare una struttura a trave che superi le limitazioni delle travi utilizzate solitamente, peraltro con vantaggi nei riguardi dell'impatto ambientale, poiché si utilizzano travi più snelle (anche i rispettivi rilevati nei cavalcavia potranno essere meno ingombranti).

La tecnologia qui descritta si riallaccia a precedenti esperienze maturate prevalentemente in Belgio e nel settore ferroviario, con l'utilizzo di travi composite in acciaio-calcestruzzo.

In particolare, questa trave composita innovativa consiste, sostanzialmente, in una trave in acciaio ad alta resistenza con la soletta inferiore collaborante in calcestruzzo ad alta o altissima resistenza sì da consentirvi l'introduzione di un elevato stato di coazione, mediante di cavi armonici (figura 1).

Il suo impiego nel campo delle costruzioni di opere pubbliche, quali ponti, viadotti, coperture di grandi spazi per attività sociali, consente di realizzare strutture capaci di superare luci, anche assai ampie, senza appoggi intermedi, mantenendo contenuto l'ingombro della struttura.

Nel seguito, dopo avere richiamato le principali caratteristiche dei materiali, si descrivono le caratteristiche strutturali della trave e i vantaggi tecnici ed economici d'impiego.

## 2. CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

Come si è avuto modo di affermare, l'elemento strutturale innovativo utilizza, accanto ai materiali tradizionali, acciaio da carpenteria e acciaio armonico, il più recente materiale calcestruzzo ad alta o altissima resistenza. Per brevità, nel seguito, solo per questi calcestruzzi che costituiscono il materiale strutturale più innovativo, anche se già ampiamente impiegato in campo strutturale (02), si richiamano le principali caratteristiche.

Rimandando alla bibliografia specifica (03) (04) (05), per gli approfondimenti del caso, si ritiene comunque utile richiamare alcuni aspetti fondamentali dei calcestruzzi ad alta e altissima resistenza. Generalmente, per i calcestruzzi ad alta e altissima resistenza, si intendono quei calcestruzzi, aventi una resistenza media a compressione rispettivamente da 70 a 100 MPa (alta)

e maggiore di 100 MPa (altissima), con valori di modulo elastico che in certi casi possono raggiungere valori di 50+60 GPa (06) (07).

Inoltre, è bene ricordare che per ottenere tali calcestruzzi è indispensabile utilizzare cementi di classe almeno 42,5, secondo la norma europea ENV 197.1 (08), aggregati selezionati di elevate caratteristiche meccaniche, per esempio quarzo e/o basalto, superfluidificanti ad elevato effetto disperdente, al fine di ottenere bassi rapporti acqua/cemento, talvolta inferiori a 0,3, e cariche minerali ad attività pozzolanica quali microsilice, loppe o metacaolino. Peraltro, l'aggiunta ulteriore di fibre permette di ottenere ulteriori vantaggi, quali, ad esempio, la riduzione di fragilità e l'aumento delle resistenze alla flessione e alla trazione diretta (09).

Un tipico esempio di mix-design in grado di raggiungere valori di resistenza alla compressione di circa 130 MPa è riportato in (10).

aggregati/legante	1,5
acqua/legante	0.23
Superfluidificante (estratto secco)/cemento	1,5
microsilice/legante	0.225
micro-fibre (% in volume)	1
Sabbia/totale aggregati	0,6

**Tabella 1.** Mix-design

### 3. CARATTERISTICHE PRESTAZIONALI DELLA TRAVE COMPOSITA

Le caratteristiche strutturali ed i vantaggi di questa nuova trave composita (per semplicità, pensata soggetta ad azioni flessionali nel piano verticale tali da tendere le fibre inferiori), nonché il metodo di costruzione, risultano evidenziati dalla seguente descrizione sviluppata con riferimento alle figure allegate.

In particolare, nella figura 2 è mostrata una sezione della trave dalla quale risulta evidente che la trave viene ottenuta dall'associazione di una trave metallica con sezione a doppio T e da due solette in calcestruzzo, solidarizzate alle piattabande mediante connettori metallici. La soletta superiore può essere realizzata in calcestruzzo di caratteristiche ordinarie (NSC) o ad alta resistenza (HSC), mentre, la soletta inferiore è pensata sempre in calcestruzzo ad alta o altissima resistenza, ossia con un calcestruzzo caratterizzato da una grande resistenza a compressione, associata ad un alto modulo elastico (06), ad un basso fluage e ad una maggiore durabilità (04).

All'interno di tale soletta inferiore sono alloggiati i cavi in acciaio armonico da precompressione.

Usualmente, la soletta inferiore è realizzata in un'officina di prefabbricazione, mentre la soletta superiore può essere realizzata anche in opera, oltre che in officina, a seconda delle necessità e delle modalità operative della struttura da realizzare.

Un ulteriore miglioramento del funzionamento della trave sotto i carichi di servizio può essere ottenuto sottoponendo la sola trave di acciaio, prima della precompressione della soletta inferiore, ad una coazione di tipo flessionale mediante vincoli ausiliari che ripristinino le condizioni di rettilineità della trave in acciaio, annullando la premona che può essere indotta in parte nell'officina di produzione e in parte all'atto del montaggio.

Pertanto, questo nuovo concetto di trave consente di associare due tipi di coazione e cioè:

- la coazione di tipo flessionale, ottenuta inflettendo la trave in acciaio verso il basso, in modo da tenderne le fibre inferiori e "congelando" queste trazioni con la realizzazione della soletta inferiore in calcestruzzo;
- una coazione di tipo presso-flessionale, ottenuta mediante il rilascio di cavi d'acciaio armonico pretesi, prima della realizzazione della soletta superiore, in modo da sollecitare la trave in modo opposto rispetto alle sollecitazioni di servizio.

La caratteristica di alta o altissima resistenza a compressione del calcestruzzo della soletta inferiore consente di associare alla prima coazione flessionale, la seconda coazione da precompressione, ottenendo in questo modo un grande aumento delle prestazioni di resistenza della struttura, senza incrementare la quantità di acciaio della trave metallica.

Essendo, poi, possibile dosare l'entità e la distribuzione della coazione flessionale della sola trave in acciaio, in rapporto alla coazione da precompressione della trave composita, risulta possibile ottenere che in servizio lo stato di compressione della soletta inferiore sia pressoché costante su tutta la lunghezza della trave.

Lo stato di trazione impresso alla piattabanda superiore in acciaio consente alla trave di essere posta in opera per il getto della soletta superiore in calcestruzzo senza problemi né tensionali né di stabilità elastica.

Nel prosieguo è descritta la successione delle operazioni necessarie per la realizzazione della trave composita di nuova concezione.

Innanzitutto, in officina viene predisposta una trave in acciaio con premona, completa di ele-

menti connettori in acciaio sulle due piattabande della trave (figura 3).

Successivamente, in una seconda fase, vengono alloggiati i cavi armonici (per esempio in due strati) cavi che sono poi tesati e bloccati, dopodiché si provvede alla imposizione delle forze  $F$ , in grado di annullare la premonta mediante vincoli ausiliari. Nella figura 4 si rileva tale disposizione ed è mostrato il diagramma dei momenti flettenti impressi alla trave in acciaio dalle forze  $F$  (e dalla presenza dei vincoli).

Una volta raggiunta tale condizione, avviene il betonaggio della soletta e, dopo l'indurimento del calcestruzzo (figura 5), il rilascio dei cavi e la rimozione delle forze  $F$ , come è mostrato in figura 6.

La trave parzialmente realizzata è a questo punto sottoposta a sollecitazioni come è rappresentate nello schema di figura 6.

È a questo punto che si può apprezzare l'importanza dell'impiego di calcestruzzo ad alta o altissima resistenza, capace di resistere alle sollecitazioni di compressione indotte sia dalla coazione flessionale che dalla precompressione, consentendo, così, la realizzazione di tale tecnologia costruttiva. Le fasi ora descritte vengono realizzate generalmente nell'officina.

Le fasi successive possono essere realizzate pure in officina oppure direttamente in opera.

Se si ipotizza, a titolo esemplificativo, la costruzione di un viadotto con la soletta superiore in calcestruzzo, realizzata in opera e collaborante, una volta posta in opera la trave composita realizzata in officina, occorre una ulteriore fase di betonaggio in opera, con l'applicazione del relativo peso proprio ( $g_s$ ) della soletta (figura 7). Il diagramma delle sollecitazioni appare quindi variare come è mostrato nella figura 7.

In figura 8 è riportato il diagramma delle sollecitazioni dovute ai carichi permanenti ( $g_d$ ) delle sovrastrutture.

L'applicazione dei carichi variabili, indicati con  $q_v$ , individua il comportamento finale della trave (figura 9).

Si nota che la storia tensionale del calcestruzzo della soletta inferiore attinge ad alti livelli nelle prime fasi costruttive, ove esplica la funzione di raccogliere le compressioni conseguenti alla coazione della trave di acciaio e alla coazione dei cavi, per poi scendere a bassissimi valori nella fase di servizio, con modeste escursioni, dovute ai carichi variabili.

Ciò naturalmente, oltre a costituire una buona garanzia del mantenimento nel tempo delle iniziali possibilità prestazionali, fa sì che le sollecitazioni

di connessione fra la soletta inferiore e la trave in acciaio, scendano a valori bassissimi (figura 9), con conseguente miglioramento dello stato limite di servizio della struttura e riduzione dei fenomeni di fatica cui è sottoposta la struttura.

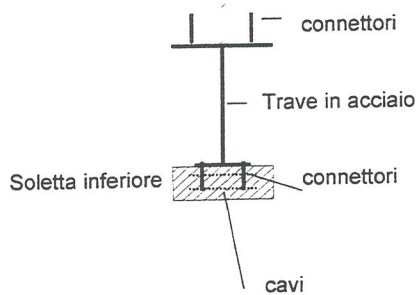
Per ciò che attiene il costo della trave composita si fa rilevare che:

- la trave in acciaio, pur possedendo elevate caratteristiche, presenta un costo contenuto;
- i cavi hanno un costo largamente compensato dal guadagno prestazionale che possono fornire;
- il costo dei calcestruzzi ad alta e altissima resistenza è ormai poco diverso da quello dei calcestruzzi ordinari.

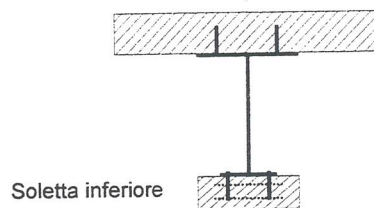
Per quanto attiene gli aspetti economici generali, occorre considerare sia i minori costi, dati dalla possibilità di poter realizzare parte della trave in officina, sia dal suo più agevole trasporto e messa in opera, nonché i minori costi legati alla riduzione degli elementi strutturali di connessione e, infine, come si è già accennato, ai minori oneri delle opere complementari, conseguenti alle minori altezze delle strutture che impieghino questa nuova trave composita.

## CONCLUSIONI

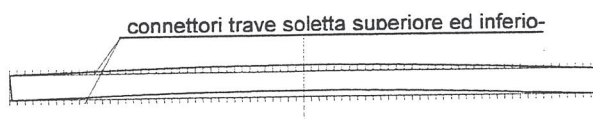
- Una trave composita, realizzata secondo la tecnologia ora descritta, presenta vantaggiose caratteristiche di leggerezza, economicità e durabilità, associate ad elevate resistenza, rigidità e snellezza.
- La maggiore snellezza di tali elementi strutturali consente di realizzare minori impatti ambientali, oltre che una migliore utilizzazione dei volumi costruiti e, ancora, nel caso dei ponti e dei viadotti, risparmi sensibili delle opere complementari (ad esempio, un ponte ferroviario, se più snello, consente un abbassamento della livelletta con la conseguente riduzione dei volumi dei rilevati).
- La possibilità di potere realizzare parte della trave in officina con i più agevoli trasporti e messa in opera, sommati ai minori costi infrastrutturali conseguenti alla riduzione delle opere complementari per la maggiore snellezza delle strutture, rende economicamente sostenibile l'impiego di questa nuova trave composita.



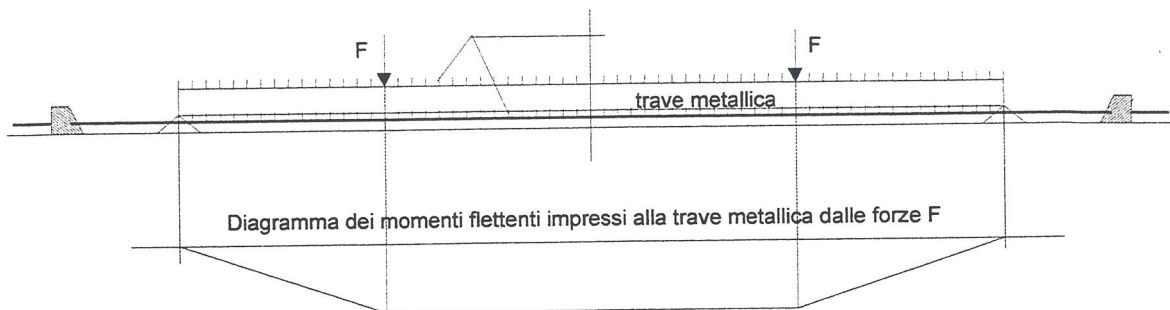
**Figura 1.** Sezione della trave composta



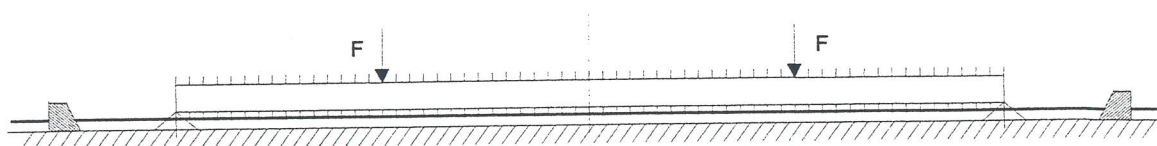
**Figura 2.** Sezione della trave composta in opera



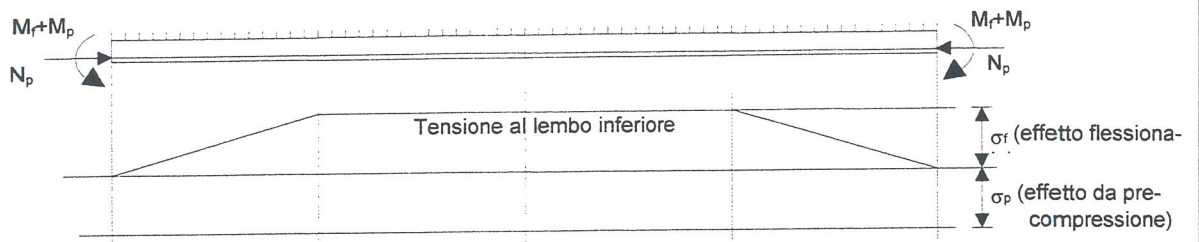
**Figura 3.** trave metallica con premonta



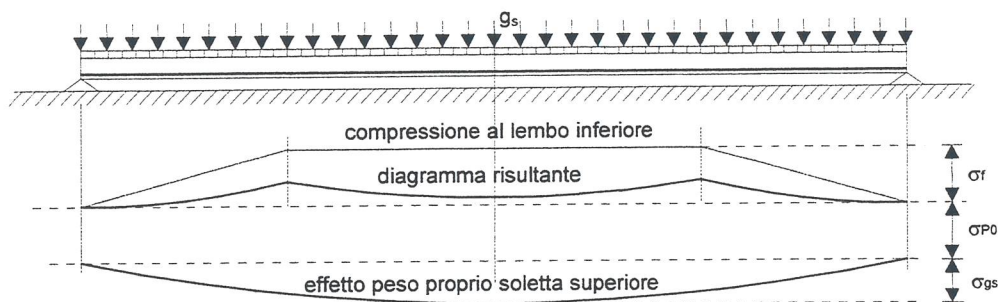
**Figura 4.** Fase di tesatura dei cavi (liberi) e di applicazione della coazione flessionale (forze F) alla trave metallica



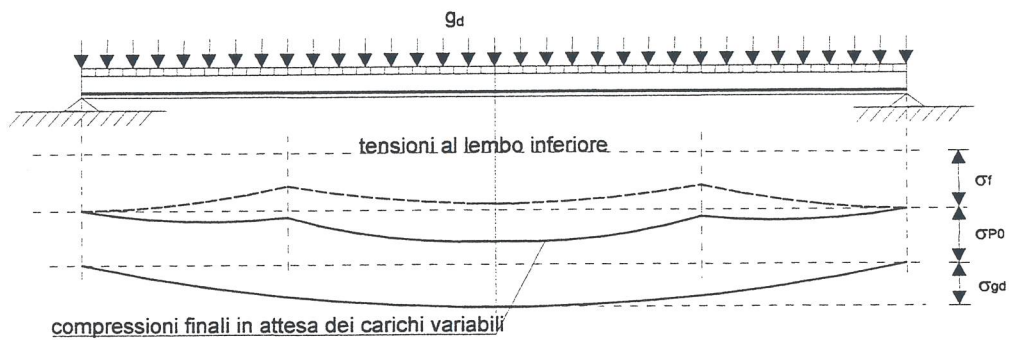
**Figura 5.** Fase di betonaggio e di stagionatura della soletta inferiore



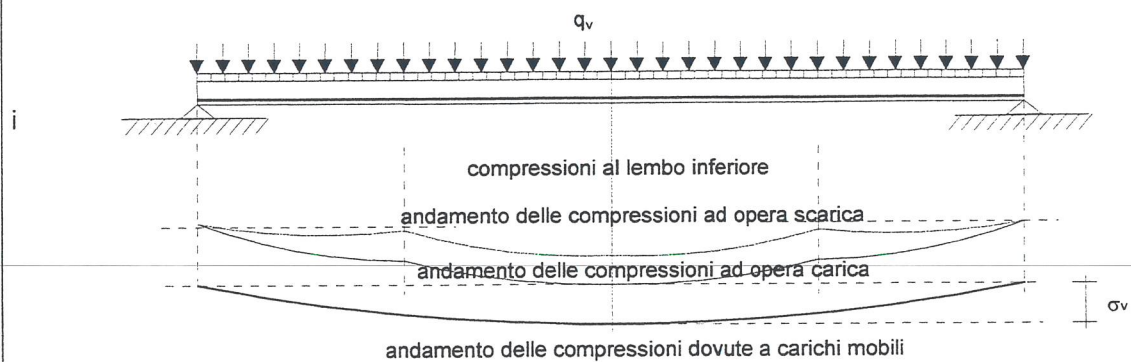
**Figura 6.** Fase di rimozione delle forze  $F$  e di rilascio dei cavi; compressioni nella soletta inferiore



**Figura 7.** Fase in opera di betonaggio della soletta superiore; compressioni risultanti (dopo l'applicazione del peso proprio della soletta superiore).



**Figura 8.** Fase di servizio sotto i carichi permanenti delle sovrastrutture



**Figura 9.** Fase di servizio in presenza anche dei carichi variabili

## BIBLIOGRAFIA

- (01) **U.S. PATENT APPLICATIONS n° 08/811974** "Method for factoring a composite girder and so manufactured girder"
- (02) **C.E.B.** "Application of high performance concrete, Examples, Projects, Regulations, Research", C.E.B. Bulletin d'information n. 222, November 1994.
- (03) **C.E.B.** "High performance concrete, recommended extensions to the Model Code 90, research needs", C.E.B. Bulletin d'information n.228, July 1995.
- (04) **C.E.B.** "High strength concrete, State-Of-The-Art-Report", C.E.B. Bulletin d'information n.197, August 1990.
- (05) **A.C.I. 363R-92** "State of the art report on high strength concrete", A.C.I. 363R-92.
- (06) **M. ACITO, G. L. GUERRINI** "Correlazione fra il modulo elastico e la resistenza a compressione di calcestruzzi ad alta resistenza" Giornate AICAP 1997
- (07) **L. BIOLZI ET ALTRI**, "Overall Structural Behavior of High Strength Concrete Specimens", Construction and Building Materials, Vol. 11, n. 1, Feb. 1997, pp. 57÷63.
- (08) **ENV 197.1** "Cemento – composizione, specifiche e criteri di conformità"
- (09) **E. BADINE ET ALTRI**, "Calcestruzzi ad altissime prestazioni - Proprietà ed applicazioni", l'Edilizia n. 3 / 4 , Marzo/Aprile 1998, pp. 62÷68.
- (10) **G. L. GUERRINI ET ALTRI** "Calcestruzzi ad altissime prestazioni fibro-rinforzati: dal laboratorio alla pratica", 12° Congresso CTE, Padova, 5÷7 Novembre 1998.