

XVII CONGRESSO C.T.A.  
**COSTRUIRE IN ACCIAIO: STRUTTURA E ARCHITETTURA**  
Napoli: 3 - 4 - 5 Ottobre 1999

## **PRESTRESSED STEEL STRUCTURES**

### **STRUTTURE IN ACCIAIO PRECOMPRESSO**

Vincenzo Nunziata

Studio Tecnico di Ingegneria Civile, Palma Campania (NA)

#### **ABSTRACT**

The paper deals with prestressed steel structures; basic principles and an innovative and easy technology of prestressing are illustrated; besides is described a test on 21,40 metres long Prestressed Steel beam bringing concrete blocks which weigh 25 KN each. The calculation method used, herein not related for lack of space, is the same that has been proposed by the Author in his book, as reported in bibliography. The excellent results authorize to the expectation of a quick diffusion of this kind of structures.

#### **SOMMARIO**

Nella memoria viene discusso della precompressione delle strutture in acciaio; vengono introdotti i principi teorici e illustrata una tecnologia semplice ed innovativa di precompressione, viene riportata inoltre la sperimentazione su di una trave in Acciaio Precompresso lunga 21,40 m e caricata con blocchi di calcestruzzo del peso di 25 KN ciascuno. Il metodo di calcolo adottato anche se non riportato nella presente per ragioni di spazio, è quello proposto dall'Autore in un suo libro in bibliografia. Gli eccellenti risultati verificati autorizzano alla previsione di una rapida diffusione di questo tipo di strutture.

## 1. INTRODUZIONE

In questa breve memoria verranno illustrati i principi fondamentali della precompressione delle strutture in acciaio e verranno illustrati inoltre i risultati sperimentali ottenuti su di una trave in Acciaio Precompresso (A.P.) di luce 21,40 m che dovrà far parte di un soppalco di prossima realizzazione.

La precompressione delle strutture in acciaio rappresenta un argomento che anche se non nuovo nel senso stretto del termine, in quanto esistono già delle sporadiche realizzazioni (trattasi in genere di ponti) e delle rarissime pubblicazioni in merito per lo più introvabili, è considerato tale dalla maggioranza degli ingegneri presso i quali è un argomento del tutto sconosciuto. Nell'accingermi a scrivere e pubblicare il Mio "STRUTTURE IN ACCIAIO PRECOMPRESSO" che in Italia rappresenta un'Opera prima e di cui questa memoria è un'estrema sintesi le domande più frequenti provenienti da colleghi, operatori nel settore della carpenteria metallica e dal mondo accademico sono essenzialmente tre a cui voglio subito rispondere e mettere da parte, esse sono:

- 1) Perché l'acciaio precompresso non si è diffuso?
- 2) Perché precomprimere l'acciaio che è un materiale cosiddetto "simmetrico"?
- 3) Qual'è il vantaggio economico?

Alla prima domanda posso rispondere solo facendo delle supposizioni che mi portano a pensare che l'acciaio precompresso non sia diffuso nel settore della carpenteria metallica per due motivi di cui il primo largamente predominante, essi sono:

- a) l'argomento non è stato sufficientemente studiato a livello teorico e sperimentale come è avvenuto invece per il Cemento Armato Precompresso (C.A.P.) per cui non è stato insegnato nelle Scuole Universitarie determinando un vuoto di conoscenza presso gli studenti di ingegneria, futuri professionisti;
- b) problemi di natura tecnologica quali la formazione della trave composta o la precompressione a cavi esterni, oggi giorno inesistenti.

Alla seconda domanda si può rispondere semplicemente, pensando la precompressione come un sistema di carichi equivalenti che ne schematizzi l'effetto, tali carichi producono sulla trave delle sollecitazioni opposte a quelle provocate dai carichi permanenti ed accidentali bilanciando parzialmente gli effetti da essi prodotti, l'entità delle sollecitazioni provocate dai carichi equivalenti dipende dal materiale utilizzato. Per il C.A.P. le sollecitazioni provocate dai carichi equivalenti dovranno per forza di cose essere modeste in quanto il materiale base resiste "bene" a compressione ma poco o nulla a trazione; per l'A.P. tali sollecitazioni saranno sicuramente maggiori oltre che per le migliori caratteristiche resistenti del materiale base anche per la possibilità di poter sfruttare sia la

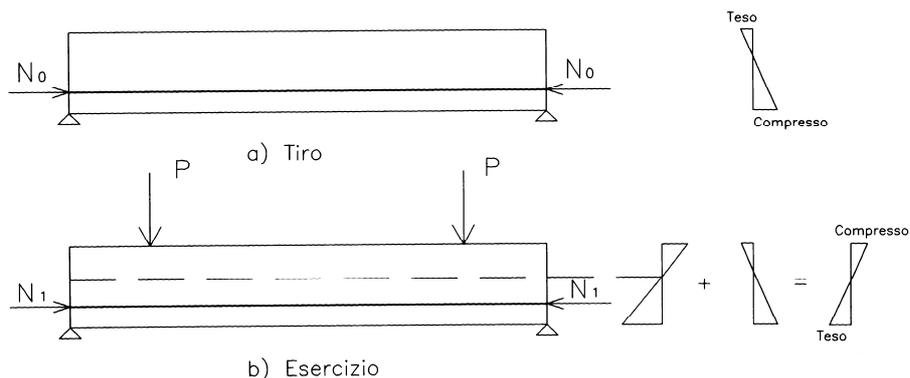
trazione che la compressione appunto per la “simmetria” del materiale (in realtà l'acciaio non è un materiale propriamente simmetrico in quanto resiste bene a trazione ma non altrettanto a compressione per l'intervento di fenomeni di instabilità). In definitiva la “simmetria” è un fattore che esalta l'effetto della precompressione, anche se si può affermare che la precompressione migliora le caratteristiche resistenti (ci si riferisce alle sollecitazioni di flessione e taglio) di qualunque materiale.

Alla terza domanda posso rispondere (avendolo riscontrato in pratica) che il minimo vantaggio economico rispetto alle strutture in acciaio non precompresso, disponendo di una sufficiente organizzazione d'officina, si aggira intorno al 15% tenendo conto del costo di mercato dei cavi e della tecnologia di precompressione. Tale valore minimo può arrivare anche al 40 ÷ 50% in funzione della tipologia strutturale e della destinazione d'uso dell'opera. Oltre al vantaggio economico che è sicuramente quello più sentito, vi sono anche altri tipi di vantaggi come la maggiore snellezza a parità di carichi portati, il che comporta di avere travi più basse di uguale o maggiore sicurezza, la minore deformabilità sotto carico, ecc.

A questo punto penso di poter passare alla trattazione teorica e sperimentale delle strutture in Acciaio Precompresso. Tale trattazione spero voglia essere da stimolo presso i colleghi ingegneri per un maggiore studio e diffusione delle strutture in A.P.; è mia ferma convinzione che una volta superato l'handicap di tipo psicologico l'A.P. si diffonderà velocemente come è già avvenuto per il C.A.P.

## **2. PRINCIPIO DELLA PRECOMPRESSIONE**

Il principio base della precompressione si può esporre semplicemente dicendo che: “Con il sistema della precompressione si sottopone una struttura a dei carichi che producono sollecitazioni opposte a quelle di esercizio”; in definitiva in esercizio si avrà un parziale compenso delle sollecitazioni agenti (a limite si possono annullare) con evidente vantaggio per le tensioni. Nell'acciaio precompresso la precompressione viene applicata sempre tramite cavi esterni (fig. 1).

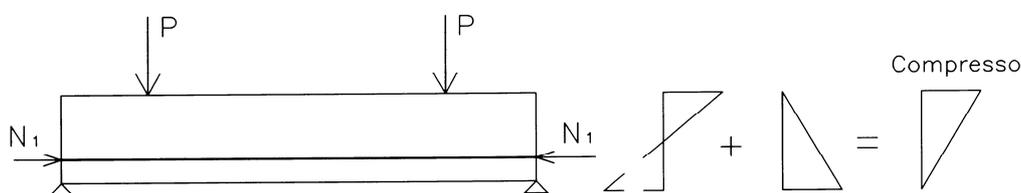


**Figura 1**

Dalla fig. 1 si può osservare, con riferimento alla sezione di mezzeria, che nella fase di esercizio la somma delle tensioni provocate dai carichi esterni e quelle provocate dalla precompressione dà un diagramma risultante in cui le tensioni massime sono alquanto inferiori a quelle derivanti dall'applicazione dei soli carichi esterni.<sup>1</sup> I differenti pedici delle forze di precompressione stanno ad indicare un differente valore delle stesse in quanto in esercizio lo sforzo di precompressione sarà ridotto per effetto delle inevitabili perdite e cadute di tensioni (molto inferiori al C.A.P.) che analizzeremo nel prosieguo.

La disposizione dei cavi rettilinea non è la più razionale in quanto il massimo effetto della precompressione (massima eccentricità) si dovrà avere dove la sollecitazione è maggiore (ci si riferisce in genere alla sollecitazione flettente), e quindi per una trave appoggiata alla sezione di mezzeria, per le sezioni di estremità l'effetto della precompressione dovrà essere minimo;

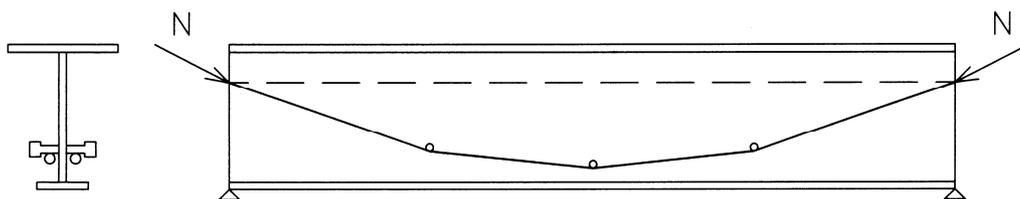
<sup>1</sup>Si vuole osservare che nel C.A.P. la precompressione applicata trasforma la trave da parzialmente reagente (la parte tesa non si considera) ad interamente reagente (solo compressa) (fig. 2).



**Figura 2**

Il fatto che il C.A. non resiste a trazione (o meglio resiste poco a trazione) limita fortemente l'effetto della precompressione in quanto nella fase di tiro non si potranno avere trazioni (o si potranno avere molto basse) nelle fibre superiori della trave che si andrebbero a detrarre alla compressione in fase di esercizio (come avviene per l'acciaio) con evidente beneficio. In definitiva l'aumento di carico portato per la travi in C.A.P. è dovuto unicamente a un maggior utilizzo della sezione (che nell'acciaio si dà per scontato) e non all'effetto benefico della coazione impressa.

supponendo una forza di precompressione costante che agisce sul cavo, questo risultato si può ottenere solo facendo variare l'eccentricità del cavo (fig. 3) in modo che in ciascuna sezione l'effetto della precompressione contrasti l'effetto dei carichi.



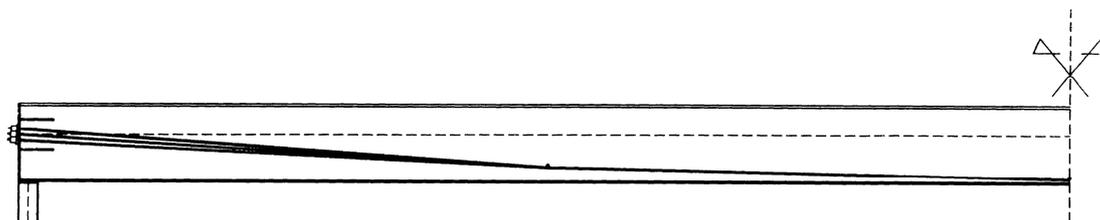
**Figura 3**

La disposizione ottimale dei cavi sarebbe secondo una parabola che segua l'andamento del momento flettente; sia per ragioni tecnologiche sia per motivi statici (le perdite di tensione si riducono notevolmente) si preferisce disporre lungo l'anima della trave pochi elementi di contrasto alla fune il cui andamento tende alla parabola.

### 3. TECNOLOGIA DELLA PRECOMPRESSIONE

La tecnologia della precompressione da me proposta ed adottata si caratterizza per la particolare semplicità tale da poter essere realizzata anche da una piccola officina.

La precompressione dell'acciaio che si sta analizzando è chiaramente una "precompressione a cavi esterni"; una volta scelto il tracciato del cavo risultante con i metodi di calcolo riportati nel testo citato in precedenza si posizioneranno lungo la trave gli opportuni contrasti che definiscono il tracciato di uno (fig. 4) o più cavi la cui linea baricentrica (nell'ipotesi di uguale sollecitazione nei

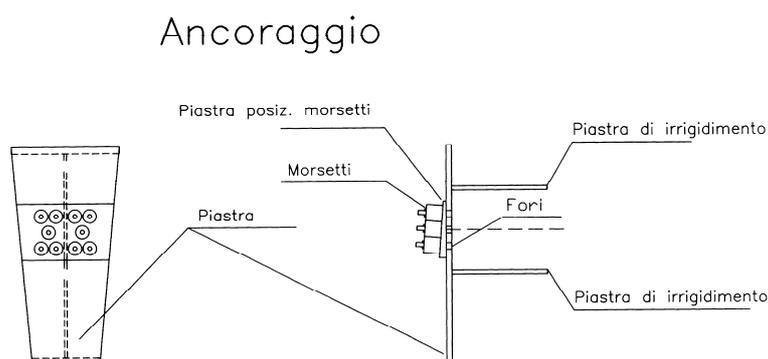


**Figura 4**

cavi) viene detta "cavo risultante". Prendendo di riferimento una trave metallica a doppio T, anche se quello che si dirà potrà essere facilmente esteso anche ad altri tipi di sezione, il cavo viene realizzato mediante due o più trefoli (sempre in numero pari) protetti dalla corrosione (verniciati,

zincati o viplati) ingrassati o lubrificati (ad evitare l'attrito) in corrispondenza del contrasto, e disposti simmetricamente rispetto all'anima; i contrasti vengono realizzati mediante dei pioli disposti simmetricamente rispetto all'anima della trave e dotati di risalti di estremità per tenere in posizione i cavi, essi vengono saldati all'anima.

Gli ancoraggi sono una parte molto delicata della tecnologia della precompressione, ma mentre per il C.A.P. risultano abbastanza complessi da realizzare e il più delle volte brevettati, per l'A.P. il sistema da me proposto risulta semplicissimo e accessibile a tutti, esso è illustrato nella fig. 5 e si compone essenzialmente di:



**Figura 5 – Ancoraggio**

- a) piastra di ripartizione in acciaio
- b) piastra di posizionamento morsetti;
- c) irrigidimenti;
- d) bloccaggi.

In particolare il serraggio dei trefoli è ottenuto mediante l'impiego di morsetti e boccole comunemente adoperate per il C.A.P.

## 4. LA SPERIMENTAZIONE

### 4.1 Introduzione

La sperimentazione<sup>2</sup> è stata eseguita su una trave di luce netta 21,40 m, alta 80 cm e precompressa con 10 trefoli  $d = 0,6''$  ( $\text{Ø}15$ ). Tale trave dovrà far parte di un soppalco in carpenteria metallica; il carico di esercizio previsto in sede di calcolo è di 10,2 KN/m per i carichi permanenti e di 11,4

<sup>2</sup> Voglio sottolineare che tale sperimentazione si è resa possibile grazie all'apporto sia economico che operativo del titolare della CARMEC s.r.l. carpenteria metallica in Palma Campania (NA) che ha creduto e crede nello sviluppo della tecnologia dell'A.P.

KN/m per i carichi accidentali, per un totale di **21,6** KN/m oltre il peso proprio della trave di 1,72 KN/m. La trave è stata predisposta in un piazzale all'aperto (fig. 6) appoggiata su dei sostegni che realizzano i vincoli cerniera e carrello (fig. 7) per la formazione dello schema statico di trave



**Figura 6**



**Figura 7 - Carrello**

appoggiata isostatica. Sono stati predisposti tre pioli deviatori dei trefoli disposti simmetricamente rispetto all'anima (fig. 8) per la realizzazione del tracciato a spezzata inscritto nella parabola di freccia massima compatibile con la geometria della trave, che si è dimostrato teoricamente essere quello ottimale, tali trefoli sono stati ancorati ai baricentri delle sezioni terminali tramite dei bloccaggi (fig. 9) comunemente adottati per il C.A.P.



**Figura 8**



**Figura 9**

Il carico è stato imposto tramite dei blocchi di cemento (fig. 10) del peso di circa 25 KN ciascuno, per un carico totale distribuito di circa **23,5** KN/m (fig. 11).



**Figura 10**



**Figura 11**

I trefoli sono stati tesati ciascuno con una forza di circa 151 kN per cui su ciascuno ancoraggio di estremità scaricano circa 1510 kN. È stata misurata la freccia nella sezione di mezzeria tramite un calibro cinquantessimale (approssimazione  $\pm 0,02$  mm) per le tre fasi considerate di tiro, carico e scarico.

#### ***4.2 Analisi dei risultati.***

Le misurazioni effettuate sono state influenzate dalle escursioni termiche giornaliere tenuto conto che la trave e i trefoli sono stati per circa tre mesi esposti alle intemperie senza alcuna protezione dimostrandosi così anche una buona resistenza dell'Acciaio Precompresso agli agenti atmosferici. Tali escursioni termiche hanno comportato una variazione delle tensioni dell'ordine del 10% ampiamente compensata dai coefficienti di sicurezza per cui è stata confermata l'ipotesi di trascurare gli effetti termici nel calcolo delle strutture in A.P. I risultati di seguito riportati si riferiscono alle tre fasi considerate e risultano depurati degli effetti termici.

**1<sup>a</sup> Fase: Tiro.** Ogni singolo trefolo è stato tesato a circa 270 atm. ( $\sim 15100$  Kg) la freccia misurata di +54,54 mm è in ottimo accordo con il risultato teorico di +54 mm, si è notato un assestamento della trave subito dopo la tesatura essendosi misurato inizialmente una freccia di +52,74 mm che si è portata nel giro di mezz'ora al valore definitivo di +54,54. I risultati evidenziano un azzeramento delle perdite di tensione per attrito (i pioli e i trefoli in corrispondenza dei pioli stessi sono stati ingrassati) oltre che per la corrispondenza tra valore teorico (calcolato in assenza di perdite di tensione) e quello misurato della freccia, anche per il fatto che il tiro è stato effettuato prima da un estremo e poi dall'altro rilevando al secondo estremo la stessa lettura delle pressioni al manometro senza quindi dover ulteriormente tesare i trefoli. Una utile raccomandazione che si può fare a chi si accinge a progettare strutture in A.P. con il metodo da me proposto è quella di controllare scrupolosamente in fase di tiro la corrispondenza tra valore teorico e misurato della freccia

interrompendo il tiro un poco prima che il valore misurato raggiunga quello teorico, questo perché essendo il coefficiente di sicurezza in questa fase di circa 1,2 (in esercizio 1,5) si corre il rischio di instabilizzare l'ala inferiore della trave la qual cosa non è molto grave nei confronti della sicurezza e delle condizioni in esercizio ma risulta fastidiosa esteticamente.

**2<sup>a</sup> Fase: Carico.** Come già accennato, in questa fase alla trave è stato imposto un carico finale di circa 23,5 KN/m superiore di circa il 10% a quello di esercizio.

Anche in questo caso si è notato un assestamento della trave in quanto dal valore della freccia di -68,32 mm misurato subito dopo aver caricato la trave si è passati dopo 3 giorni al valore di -76,04 mm, il valore teorico da me calcolato in assenza di perdite di tensione è di -78,9 mm per cui si è avuto una diminuzione della freccia di circa il 4% la qual cosa è spiegabile con l'incremento di tensione nel cavo che si verifica in seguito alla deformazione della trave (il valore dell'incremento calcolato era di circa il 7%) nel metodo di calcolo da me proposto tale incremento è stato trascurato a vantaggio di sicurezza. Nella tabella 1 è riportata una sintesi delle misurazioni effettuate che per quanto possibile non risentono delle escursioni termiche e relative alla 1<sup>a</sup> fase.

**Tabella 1**

DATA	ORA	FRECCIA (mm)
09/04/1999	16:05	-68,32
12/04/1999	16:30	-76,04
16/04/1999	17:30	-76,00
21/04/1999	9:05	-77,80
22/04/1999	16:45	-78,70
07/05/1999	9:10	-79,84
17/05/1999	9:20	-79,84
14/06/1999	18:32	-79,64

Dalla lettura dei dati, escludendo il primo valore per quanto detto sopra, si evince che in 3 mesi in cui la trave è stata sotto carico si è avuto un aumento della freccia di circa il 5% dovuto al rilassamento dell'acciaio armonico; questa è comunque una situazione limite in quanto la trave è sottoposta a forti temperature e forti carichi (superiori a quelli di esercizio) per cui il rilassamento prevedibile in condizioni normali (acciaio a basso rilassamento) sarà del 2 ÷ 3%. È da notare che il valore finale della freccia misurato è all'incirca uguale a quello calcolato in assenza di perdite di tensione (-78,9 mm) per cui tenendo conto che in esercizio in base al metodo proposto è stato

previsto una perdita di tensione del 10%, si avrà di conseguenza un aumento del coefficiente di sicurezza; peraltro è consigliabile allo stato attuale di conoscenza della tecnologia di conservare questo valore molto cautelativo del 10% prevedendosi in futuro quando l'A.P. avrà trovato maggiore diffusione un suo abbassamento.

**3<sup>a</sup> Fase: Scarico.** Durante la fase di scarico si è osservato un ritorno di tipo elastico (proporzionale ai carichi tolti successivamente); la freccia finale misurata è stata di +37,84 mm che differisce rispetto a quella iniziale (+54,54) di +16,7 mm. Tale risultato finale può essere interpretato solamente con la presenza di cedimenti di tipo anelastico degli appoggi, per cui i risultati relativi alle frecce misurate nella seconda fase andrebbero ridotti denotando un comportamento del sistema ancora migliore di quanto illustrato.

## 5. CONCLUSIONI

I risultati teorici riportati nel testo citato prima sono stati ampiamente confermati dalla verifica sperimentale per cui il metodo proposto è pienamente affidabile. La sperimentazione anche se effettuata in condizioni disagiate ha fornito dei risultati pienamente attendibili che denotano essenzialmente due fatti, ovvero:

- 1) la superiorità in termini di resistenza e di deformabilità delle strutture in A.P. rispetto ad analoghe tipologie strutturali;
- 2) l'economicità e la semplicità di esecuzione della tecnologia proposta.

In definitiva è mia ferma convinzione che le strutture in Acciaio Precompresso troveranno presto una rapida diffusione in settori sempre più importanti del mondo delle costruzioni.

## BIBLIOGRAFIA

1. Belluzzi O. (1956). *Scienza delle Costruzioni*, Vol. 1-2, Zanichelli.
2. Cestelli Guidi C. (1987). *Cemento armato precompresso*, Hoepli.
3. Nunziata V. (1997). *Teoria e pratica delle strutture in acciaio*, Dario Flaccovio Editore.
4. Nunziata V. (1999). *Strutture in Acciaio Precompresso*, Dario Flaccovio Editore.