

Gian Carlo Giuliani  
Gianluca Vesa

## Strutture in acciaio presollecitato per costruzioni civili

Queste strutture appartengono ad una tipologia poco nota che, sulla base degli studi, della sperimentazione e delle opere già realizzate, appare estremamente interessante per gli aspetti tecnici ed economici.

La presollecitazione ha lo scopo di creare nella struttura un favorevole stato di coazione nel quale le tensioni e le deformazioni sono di segno opposto a quelle indotte dai carichi che intervengono successivamente; tale tecnologia, da tempo attuata per alcune strutture in calcestruzzo mediante speciali, ma ampiamente collaudate, attrezzature di tesatura e di vincolo alle testate di elementi in acciaio ad altissima resistenza, può essere vantaggiosamente applicata alle strutture in acciaio.

Nonostante i risultati positivi raggiungibili con tale tecnologia, gli esempi italiani di opere di questo tipo realizzate per le costruzioni sono rarissimi; per altro nelle numerose strutture strallate per viadotti realizzate in campo internazionale, il sistema di precompressione esterno alle travi è prevalentemente usato per riportare i carichi direttamente sulle pile.

Dal punto di vista concettuale, per attuare la precompressione, si fa uso di un materiale ad elevatissime caratteristiche meccaniche ( $f_{ptk} > 1800 \text{ Nmm}^{-2}$ ), disponibile commercialmente sotto forma di trefoli a 7 fili stabilizzati nei confronti del rilassamento della tensione, per conferire all'acciaio da costruzione "normale" (Fe430-510) una maggiore escursione tensionale grazie al pre-carico attuato in senso opposto alle azioni di esercizio.

Il sistema trave + trefoli risulta quindi internamente iperstatico se si considera l'effetto delle deformazioni sul regime tensionale.

Una particolare prerogativa di tale concezione consiste nella possibilità di utilizzare favorevolmente l'interdipendenza fra il valore del tiro applicato ai trefoli per attuare la coazione ed il valore della rigidità finale della struttura, che risulta crescente con la presollecitazione a causa del progressivo effetto di sostentamento fornito dai trefoli.

Le configurazioni strutturali sono studiate in modo da contenere sia le deformazioni entro i valori prefissati per l'uso sia le oscillazioni di tensione al di sotto dei valori critici per la fatica.

In alcuni casi l'elemento in acciaio preventivamente presollecitato è associato a soletta collaborante in calcestruzzo in modo da sfruttare i noti vantaggi delle strutture composite.

Gli ancoraggi dei trefoli, in generale disposti alle estremità della trave in posizione favorevole per il tiro, sono integrati da elementi di guida intermedi che contrastano l'instabilizzazione della trave soggetta alla precompressione.

Tutti i particolari costruttivi devono tenere conto sia della maggiore sensibilità dei trefoli alla corrosione sotto tensione sia della caduta delle loro caratteristiche meccaniche che si manifesta, in caso

Le strutture in acciaio presollecitato appaiono molto interessanti per i vantaggi tecnici ed economici, riscontrati in alcuni progetti di coperture con media luce, ed estrapolabili ai casi con grande portata.

La precompressione è introdotta mediante elementi in acciaio ad altissima resistenza (ad esempio trefoli con  $f_{ptk} > 1800 \text{ Nmm}^{-2}$ ) che vengono pretesi e vincolati alla struttura per conferire all'acciaio da costruzione "normale" (Fe430-510) una maggiore escursione tensionale dovuta al pre-carico opposto alle azioni di esercizio.

Il sistema trave + trefoli risulta in stato di coazione ed internamente iperstatico per l'effetto delle deformazioni sulle tensioni, così che vengono utilizzati favorevolmente l'interdipendenza fra la pretensione iniziale e la rigidità finale della struttura e l'effetto di sostentamento fornito dai trefoli.

Sono trattati gli aspetti teorici della soluzione, le prove su prototipi reali ed esempi di strutture realizzate.

### Prestressed steel structures for civil buildings

*Prestressed steel structures appear very interesting for the technical and economical advantages that were experienced in some projects of medium size roofs and that can be extrapolated to large span cases.*

*Prestressing is effected by means of very high strength steel elements (e.g. strands with  $f_{ptk} > 1800 \text{ Nmm}^{-2}$ ), that are pretensioned and anchored to the structure in order to exploit in the "normal" structural steel (Fe430-510) a wider stress range due to the pre-load opposite to the service actions.*

*The girder + strand system lays in a self equilibrated state and is internally hyperstatic for the effects of the deformations on the stresses, thus using in a favorable way either the interdependence between the initial pretensioning and the final structural stiffness and the direct load carrying effect of the strands.*

*The theoretical aspects of the solution, the tests on full scale prototypes and examples of already built structures are illustrated.*

di incendio, a temperatura inferiore rispetto all'acciaio normale.

L'esperienza progettuale, consolidata dalle prove sperimentali, nonché la messa a punto delle tecnologie di costruzione nel corso di alcune commesse, consentono di utilizzare questa tipologia strutturale innovativa per la realizzazione di una grande varietà di opere, quali ad esempio:

- coperture di media e grande luce
- impalcati di edifici con forte sovraccarico di media luce
- ponti in semplice appoggio o continui in aggiunta alla già nota configurazione strallata
- strutture intelaiate soggette ad elevati carichi orizzontali
- strutture tridimensionali di grandissima luce.

### CONFIGURAZIONI STRUTTURALI

Sono adatte alla presollecitazione sia le configurazioni strutturali ad anima piena che quelle reticolari, queste ultime sia del tipo piano che spaziale: in ogni tipologia devono essere creati gli alloggiamenti per i

trefoli o le barre, le guide, i dispositivi di deviazione ed i relativi ancoraggi predisposti per il tiro.

In alcuni casi, riconducibili abbastanza chiaramente alla tipologia delle travi armate, il corrente teso è rappresentato esclusivamente dall'elemento presollecitato così che la totalità delle azioni assiali e flettenti indotte dalla coazione sono sopportate dal corrente compresso.

La disposizione plano-altimetrica del sistema degli elementi strutturali costituisce una delle variabili progettuali da associare alle varie tipologie; un tracciato a spezzata dell'armatura pretesa, con deviazioni angolari localizzate ed ancoraggi di testata posti a livello del baricentro della sezione di acciaio normale, consente nelle travi ad anima piena di ridurre verso gli appoggi le tensioni di coazione flessionale coerentemente con l'andamento del momento flettente, nonché, grazie alla inclinazione del cavo, di trasferire a questo parte della azione tagliante in modo da ridurre le tensioni tangenziali nell'anima della trave.

Il conseguimento dei vantaggi sopra-esposti impone la realizzazione di dispositivi di deviazione del cavo che devono essere studiati in modo da consentire in fase di tiro lo scorrimento di questo lungo una sede toroidale avente il raggio della generatrice compatibile con quello di curvatura degli elementi da pretendere e raggio minore pari a quello del cavo.

Tali dispositivi sono costosi e non evitano il fenomeno della "fretting corrosion" <sup>(1)</sup> nel cavo dovuta agli spostamenti relativi in presenza di attrito e di elevate pressioni di contatto determinati dalle variazioni di tiro indotti dai carichi accidentali variabili. Il fenomeno di cui sopra può essere attenuato integrando il deviatore con un sistema di bloccaggio longitudinale da attivare dopo la messa in tensione; il prezzo e l'ingombro di tale sistema non risulta in generale compatibile con l'economia e con l'architettura della soluzione.

Per le considerazioni sopra esposte gli autori preferiscono adottare per le travi ad anima piena un tracciato rettilineo del cavo predisponendo elementi localizzati di guida per ottenere in tali punti la congruenza degli spostamenti di questo con quelli della trave, indispensabile per contrastare l'instabilizzazione indotta dalla presso-flessione risultante dallo stato di coazione.

Nelle travi reticolari le deviazioni del cavo trovano in generale una disposizione più consona alla tipologia strutturale e agevolmente realizzabile, pur lasciando aperto il problema della "fretting corrosion", che può in generale essere ridotto diminuendo le tensioni di tiro e locali e soprattutto quando, come nel caso di strutture industriali o edili, le variazioni del carico accidentale sono ridotte in entità e numero di ripetizioni.

Una possibile variante delle modalità di applicazione della presollecitazione sia alle travi ad anima piena che a quelle reticolari, consiste nella creazione di giunti calibrati fra la testata di ancoraggio del cavo e la parte della struttura adiacente in modo da ripartire opportunamente lo stato di coazione fra i vari elementi della trave; la chiusura del giunto che

avviene ad un livello predeterminato del tiro, ripristina l'applicazione all'intera struttura della coazione corrispondente al completamento del tiro.

La realizzazione del dispositivo del giunto calibrato è possibile utilizzando manicotti filettati registrabili

Benché la maggior parte dei casi di applicazione della precompressione sia relativa a travi isostatice, le prerogative del sistema sono applicabili anche a travi continue o in generale a strutture iperstatiche.

## MATERIALI E COMPONENTI

La maggiore economia delle strutture civili ed industriali presollecitate, rispetto a soluzioni convenzionali è conseguita mediante l'uso di materiali e componenti reperibili nel normale mercato delle costruzioni, ossia:

- acciaio strutturale Fe 430 o 510

- acciaio da presollecitazione:

  - del tipo in barre di classe 835-1050 disponibili nei diametri 26÷32÷36÷40 mm

  - o del tipo in trefoli di diametro nominale 15 mm e sezione 140 mm<sup>2</sup> e di classe 1600-1850.

Ogni tipo di sistema di presollecitazione, è corredato dai dispositivi di ancoraggio sotto tensione alle estremità.

Per le barre, allo scopo di limitare le tensioni parassite innescate da non perfetta planarità delle superfici di contatto, si impiegano dadi con una estremità sferica agente su sede conica oppure coppie di rondelle plano-sferiche.

Per i trefoli è consolidato l'uso di boccole con interno troncoconico sul quale prendono contrasto chiavette pure troncoconiche con dentatura che impegna l'acciaio preteso; tale sistema è certificato da numerosi produttori di tali componenti per l'uso nella precompressione del calcestruzzo.

Elementi aggiuntivi indispensabili sono quelli che proteggono dalla corrosione gli acciai presollecitati; oltre alle guaine in lamierino di acciaio o polipropilene ad alta densità impiegate nelle opere in calcestruzzo, e riempite con iniezione in pressione di prodotti cementizi tissotropici e privi di ritiro, sono impiegate guaine termoretraibili applicate alle barre o rivestimenti in grasso contenuto da guaine di vipla direttamente applicati ai trefoli dopo la cordatura.

Tutte le testate di ancoraggio sono normalmente protette con cuffie riempite con cera fusa.

I dispositivi di deviazione non sono di normale produzione e devono essere progettati congruamente con l'architettura strutturale prescelta.

## REALIZZAZIONI

Vengono nel seguito illustrate due opere, corrispondenti a due diverse tipologie, prescelte fra quelle più importanti da noi progettate utilizzando il principio della presollecitazione; in tutti i casi le strutture da noi proposte sono risultate ampiamente vantaggiose rispetto alle soluzioni convenzionali in acciaio.

**Copertura centro commerciale Gulliver - Roma**  
La copertura piana è destinata ad attività varie per

<sup>(1)</sup> Tale fenomeno di corrosione è innescato da microslittamenti dell'acciaio presollecitato in presenza di elevate pressioni di contatto

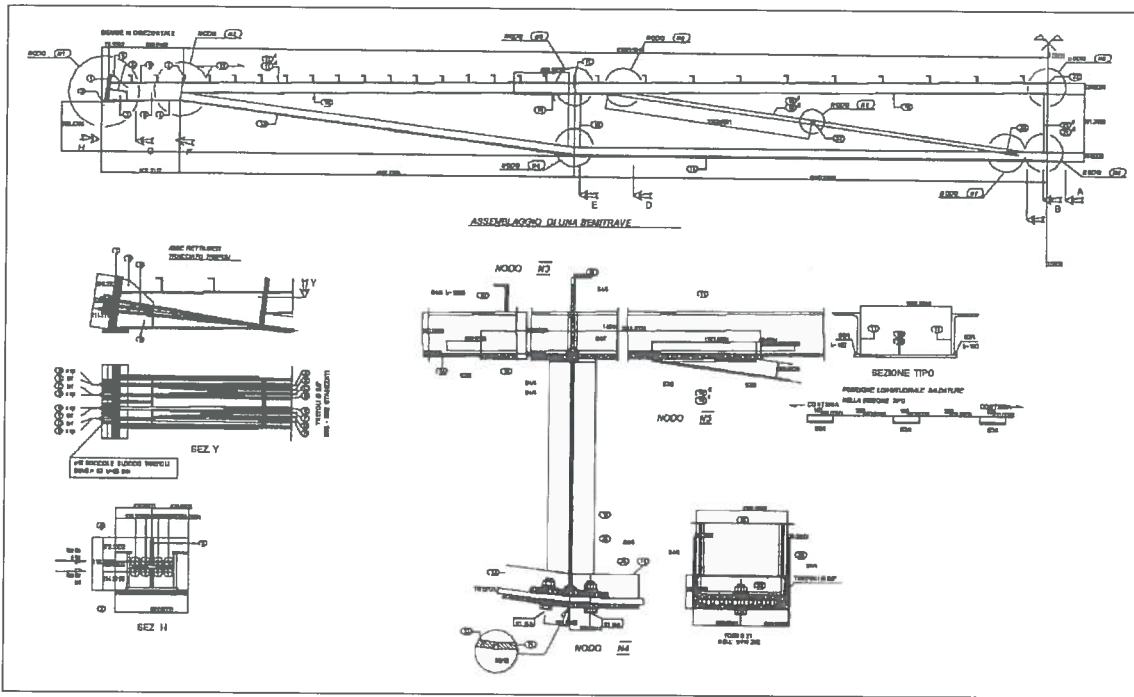


Figura 1 –  
Schema della  
trave reticolare.

le quali sono previsti sovraccarichi permanenti  $2.0 \text{ kN/m}^2$  ed accidentale  $5.0 \text{ kN/m}^2$  oltre al peso proprio  $3.2 \text{ kN/m}^2$  comprensivo della soletta collaborante in calcestruzzo (figure 1 e 2).

Sono utilizzate travi reticolari precomprese di luce  $21.90 \text{ m}$  poste ad interasse  $3.00 \text{ m}$ , fra le quali è ordita una soletta in calcestruzzo armato, gettata su predalles e resa collaborante con il corrente superiore delle travi.

Gli appoggi sono costituiti da mensole aggettanti da una struttura in calcestruzzo.

La precompressione è realizzata con 8 trefoli  $d=15 \text{ mm}$  disposti con tracciato a spezzata rialzato verso gli appoggi; la protezione dei trefoli è assicurata da getto di malta a ritiro controllato che riempie il profilo ad U nel quale sono alloggiati.

Le travi sono state costruite in due parti assemblate in opera mediante bulloni e con la applicazione della pretensione ai trefoli.

La monta di costruzione e quella derivante dalla precompressione sono state determinate in modo da ottenere la completa planarità dopo il getto della soletta e la posa della pavimentazione; per la soletta è stato prescritto calcestruzzo a ritiro compensato in modo da minimizzare gli effetti reologici sulle deformazioni a lungo termine.

Le strutture in acciaio sono state costruite dalla Società COMS – Cividate Camuno (Brescia), per l'Impresa generale Di Veroli srl di Roma.

#### Copertura multisala La Lucchina – Roma

La copertura (figure 3 e 4) è sagomata secondo una superficie ottenuta per traslazione di elementi rettilinei che sono materializzati dalle travi trasversali aventi luce  $17.20 \text{ m}$ , poste ad interasse  $3.60 \text{ m}$  su travi principali posate su colonne in calcestruzzo; fra le travi secondarie sono ordite lamiera grecate sulle quali è gettata una soletta collaborante in calcestruzzo armato.

I carichi di progetto, oltre a quello della soletta ( $2.0 \text{ kN/m}^2$ ), sono pari a  $1.15 \text{ kN/m}^2$  per il sovraccarico accidentale e  $1.50 \text{ kN/m}^2$  per impianti, controsoffitti-



Figura 2 – Travi in opera.



Figura 3 –  
Assieme  
copertura.

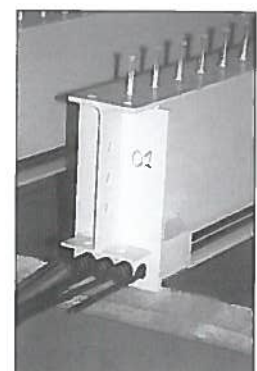
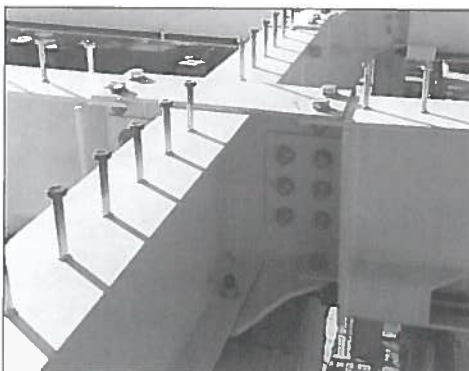


Figura 4 – Particolari delle travi.

Figura 5 - Schema dell'arcareccio.

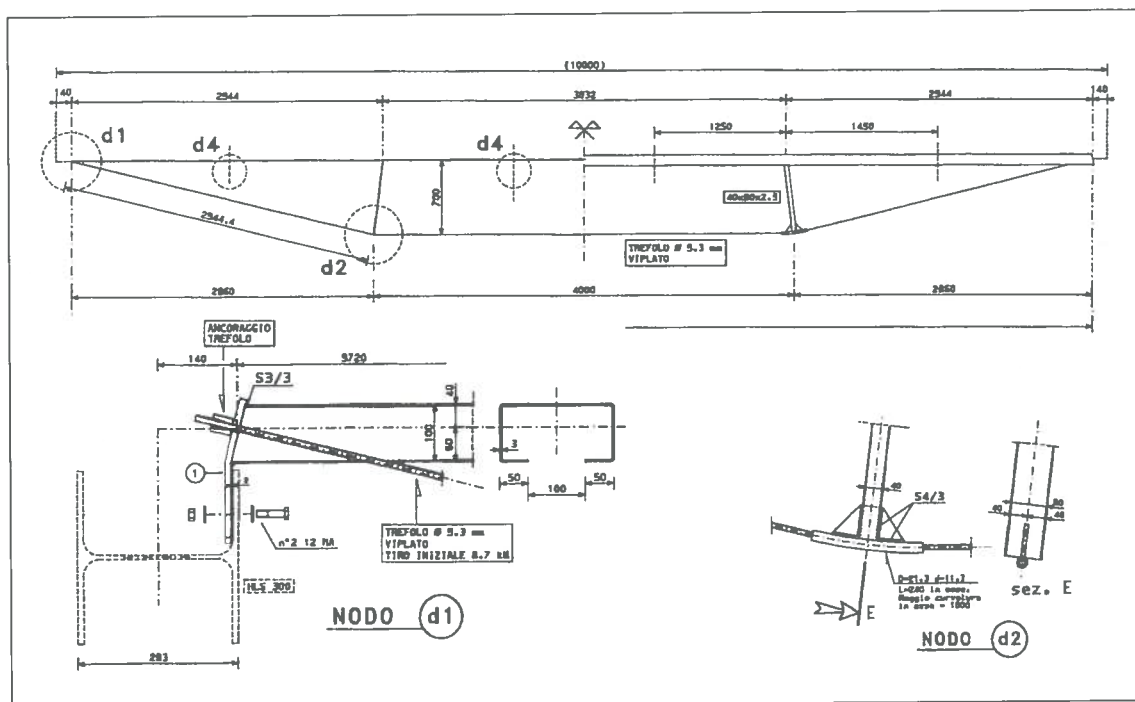


Figura 6 - Capriata con carico prossimo a quello di collasso.

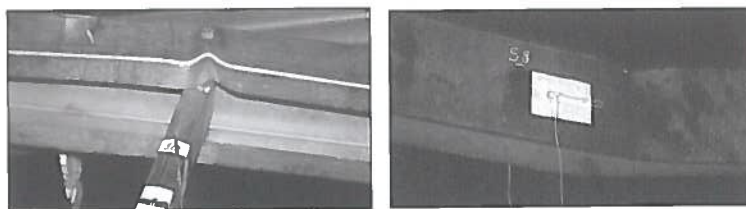


Figura 7 - Modi di collasso dell'arcareccio e della trave.

to, coibentazione ed impermeabilizzazione. Le travi trasversali, costituite da profili laminati HLS 500, sono state precomprese in officina con 4 trefoli d 15 mm del tipo viplato e cerato (autoprotetto) e poi montate in opera utilizzando giunti bullonati per il collegamento alle travi principali, realizzate con profili laminati HLS 450. La protezione dall'incendio è assicurata dal controsoffitto. Le strutture in acciaio sono state costruite dalla Società COMS - Cividate Camuno (Brescia), per l'Impresa generale CITIESTE srl di Roma.

### SPERIMENTAZIONE

A scopo di controllo delle possibilità di completo sfruttamento della tecnologia di presollecitazione, sono stati realizzati, in cooperazione con la soc. COMS, alcuni prototipi di strutture reticolari che sono stati sottoposti a cicli di carico e scarico incrementati fino al raggiungimento del collasso, che si

è sempre manifestato per plasticizzazione locale del corrente compresso.

In particolare un arcareccio con configurazione a trave armata senza corrente inferiore (figura 5) dimensionato per carico accidentale utile pari a 2.5 kN/m, uniformemente ripartito sulla luce di 10 m, presollecitato con un trefolo di 15 mm con ancoraggio alle estremità e due deviazioni intermedie di tracciato ha raggiunto il carico 5,82 kN/m prima del collasso dovuto a plasticizzazione asimmetrica del corrente compresso realizzato in lamiera piegata (figura 7).

Una trave reticolare a doppia pendenza, sulla luce 30.00 m (figura 6), dimensionata per sovraccarico pari a 10.0 kN/m, presollecitata con 4 trefoli d=15mm e dotata di sistema di regolazione sotto tensione del gioco fra la testata di estremità ed il corrente inferiore, ha raggiunto il carico di collasso pari a 23.5 kN/m; anche in questo caso si è osservata la plasticizzazione asimmetrica della sezione (figura 7).

In conclusione le prove hanno confermato la validità della concezione progettuale delle due tipologie strutturali sopra descritte ed hanno messo in luce l'importanza dei problemi di centraggio delle azioni in fase di plasticizzazione e, con riferimento alla seconda architettura descritta, la scarsa influenza della regolazione della ripartizione delle componenti della postcompressione sul carico di rottura.

I moltiplicatori del carico di esercizio raggiunti durante le prove e pari rispettivamente a 2.33 e 2.35 rispettivamente per l'arcareccio e per la capriata, sono risultati superiori al coefficiente di sicurezza 2.00 richiesto dalla normativa per verifica sperimentale della struttura.

### RIEPILOGO FONDAMENTI TEORICI

Vengono richiamati alcuni fondamentali teorici della presollecitazione relativi a travi isostatiche con anima piena.

**Analisi per lo stato limite di servizio**

Con riferimento alla figura 8, vengono identificate le tensioni (in campo elastico) derivanti dallo stato di coazione prodotto dalla precompressione  $P$  agente con eccentricità  $e$  rispetto al baricentro della sezione e quelle di segno contrario prodotte dai carichi  $q$ ; le caratteristiche geometriche della trave sono definite da:

$A_s, I_s$  area e momento quadratico di superficie della sezione di acciaio normale

$W_p, W_s$  moduli resistenti inferiore e superiore.

Nell'ipotesi di raggiungere, al lembo inferiore, nelle condizioni di esercizio, la tensione  $\sigma_a$  ammissibile per l'acciaio strutturale risulta la relazione:

$$M_q / W_i = \sigma_a - P(1 / A_s + e / W_i)$$

( $P$  applicato alla trave è assunto con segno negativo)

nella quale il secondo addendo del secondo membro rappresenta il guadagno tensionale che la sezione è in grado di sostenere; nel caso si voglia verificare che anche in fase di presollecitazione non venga superata la tensione ammissibile, il guadagno di cui sopra vale  $\sigma_a$  così che  $M_q / W_i = 2\sigma_a$  ossia risulterebbe possibile applicare alla sezione un momento doppio rispetto a quello sopportabile in assenza di presollecitazione, sempre che sia verificata anche la condizione, relativa al lembo superiore:

$$-M_q / W_s - P(1 / A_s + e / W_s) \geq -\sigma_a$$

In generale, per soddisfare tale condizione, è necessario adottare sezioni asimmetriche, con piattabanda superiore di dimensioni maggiori ma il guadagno tensionale fornito da  $P$  è molto ridotto.

Per motivi costruttivi l'armatura, pur essendo dotata di numerosi vincoli verticali e trasversali alla trave pretesa viene ancorata longitudinalmente soltanto alle estremità di questa, così che all'incremento di tiro risultante per effetto dei carichi accidentali nel sistema strutturale a trave armata corrisponde un allungamento minore di quello che si avrebbe con vincoli longitudinali distribuiti; a causa di tale particolare costruttivo non è possibile sfruttare completamente la capacità resistente dell'armatura. Nell'ipotesi di trave semplicemente appoggiata sulla luce  $l$ , gli allungamenti  $u_s$  della fibra della sezione di acciaio posta alla quota dell'armatura pretesa risultano rispettivamente per l'effetto del carico  $q$  uniformemente distribuito e per la variazione  $\Delta P$  della pretensione:

$$u_{sq} = \frac{2qe}{E_s I_s} \int_0^{l/2} (-x^2 / 2 + l^2 / 8) dx = \frac{qel^3}{12E_s I_s}$$

$$u_{s\Delta P} = -\frac{2\Delta P}{E_s} \int_0^{l/2} \left(\frac{1}{A_s} + \frac{e^2}{I_s}\right) dx = -\frac{2l\Delta P}{E_s} \left(\frac{1}{A_s} + \frac{e^2}{I_s}\right)$$

risulta inoltre l'allungamento della armatura pretesa:

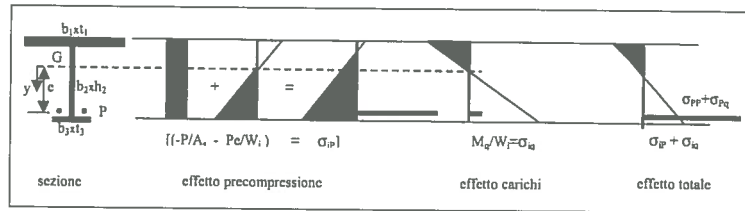


Figura 8 - Diagramma delle tensioni.

$$u_{p\Delta P} = \frac{l\Delta P}{E_p A_p}$$

l'equazione di congruenza degli spostamenti della trave in acciaio e dell'armatura, calcolati al livello di questa si scrive:  $u_{sq} + u_{s\Delta P} = u_{p\Delta P}$  che, posto  $m = E_s / E_p$  fornisce la variazione della tensione nel cavo  $\Delta P = 2eM_q / 3(I_s / A_s + e^2 + mI_s / A_p)$ .

**Esempio**

Trave composta (figura 8) appoggiata sulla luce di 18 m e soggetta al carico distribuito 34.4 kN/m.

Caratteristiche geometriche:

$b_1xt_1=470x30$  mm

$b_2xh_2=10x450$  mm

$b_3xt_3=250x20$  mm

$A_s = 236$  cm<sup>2</sup>  $I_s = 95900$  cm<sup>4</sup>  $y_s = 15.8$  cm

$y_i = 35.7$  cm  $W_i = 2830$  cm<sup>3</sup>  $W_s = 5940$  cm<sup>3</sup>

$E_s = 20.600$  kN/cm<sup>2</sup>.

Presollecitazione con 12 trefoli d 15 mm posti alla distanza  $e = 29.0$  cm dal baricentro con

$A_p = 12x1.40 = 16.8$  cm<sup>2</sup>,

$E_p = 19.000$  kN/cm<sup>2</sup>

$P = -1730.4$  kN.

Per le fasi di presollecitazione (concomitante con il peso proprio 1.8 kN/m) e per le azioni del sovraccarico si ottengono le tensioni evidenziate nella tabella 1, nella quale è anche riportato l'aumento del tiro dell'acciaio presollecitato.

Si osserva che, in assenza di presollecitazione il carico massimo sopportabile dalla trave vale

$$8 \cdot 24 \text{ kNcm}^{-2} \cdot 2830 \text{ cm}^3 / (1800 \text{ cm})^2 = 0.1677 \text{ kN/cm} \equiv 16.77 \text{ kN/m}$$

e, definendo il peso proprio 1.80 kN/m, il carico utile risulta 14.97 kN/m pari a 0.435 di quello determinato in presenza della precompressione.

Adottando profilo simmetrico equipesante, di pari altezza, più razionale in assenza della precompressione, si ottiene il modulo resistente  $W = 4617$  cm<sup>3</sup> e quindi il carico utile:

$$(8 \cdot 24 \cdot 4538 / 18002) \cdot 100 - 1.80 = 25.09 \text{ kN/m} \equiv 0.729 \cdot 34.4$$

Il confronto del prezzo delle due soluzioni è illustrato in Tabella 2 (il peso del cavo è  $16.80 \cdot 0.785 = 13.2$  daM/m).

Azioni	M(kNcm)	P(kN)	Tensioni (kN/cm <sup>2</sup> )				
			bordo inferiore		bordo superiore		cavo
Fase			variazione	totale	variazione	totale	totale
0	7290.00	-1730.40	-21.42	-21.42	-0.62	-0.62	
delta P (kN)		-18.06	-0.25	-21.67	-0.01	-0.62	104.07
1	139320.00	0.00	49.21	27.54	-23.46	-24.08	
delta P (kN)		-345.12	-4.79	22.75	-0.12	-24.20	124.62

Tabella 1

Tabella 2

soluzione	prezzo acciaio	prezzo trefoli	totale L/m	%
normale	3000 L/kg · 180 / 0.729	0	740.000	122
precompressa	3000 · 180	5000 · 13.2	606.000	100

**Analisi per lo stato limite ultimo**

Con le dimensioni geometriche adottate per l'anima e per la piattabanda superiore compressa, la sezione ricade nella classe 1 secondo EC3, così che è possibile adottare per le verifiche l'ipotesi di plasticizzazione completa della sezione di mezzeria, purché siano efficienti vincoli orizzontali tali da prevenire l'instabilizzazione per torsione.

La verifica della sicurezza della struttura isostatica impone di controllare la capacità resistente ultima della sezione sotto l'effetto dei carichi maggiorati con i moltiplicatori  $\gamma_g = 1.4$ ,  $\gamma_q = 1.5$ ; risulta quindi:

$$M_D = 1.4 \cdot 7290 + 1.5 \cdot 139320 = 219186 \text{ kNcm}$$

Si tiene conto della presenza della armatura  $A_p$  pretesa al valore  $\sigma_p$ , e si considera il progressivo aumento del tiro indotto dalla deformazione della trave.

I divisori delle resistenze sono assunti pari a  $\gamma_s = 1.12$  e  $\gamma_p = 1.15$ , rispettivamente per l'acciaio strutturale e per quello di pretensione, così che le resistenze di calcolo dei materiali, con diagramma elasto-plastico, senza incrudimento risultano:

$$f_{sd} = 35.5 \text{ kN/cm}^2 \quad f_{pd} = 185/1.15 = 160.8 \text{ kN/cm}^2$$

Nella figura 9 sono riportati i domini elastici e plastici della sezione; sulla frontiera del secondo sono identificati i valori di P e M risultanti dalla analisi non lineare del sistema trave con cavo; le azioni iniziali dovute alla precompressione:

$$P_O = -1730 \text{ kN}, M_{PO} = -472 \text{ kNm}$$

assumono i valori finali

$$P_R = -2443 \text{ kN}, M_{PR} = -666 \text{ kNm}$$

(punto 1 del dominio), in concomitanza con il momento massimo della sezione di acciaio normale

$M_R = 1526 \text{ kNm}$  (punto 2 sulla frontiera), così che è soddisfatta la relazione:  $M_R + M_{PR} > M_D$  ed il guadagno conferito dalla precompressione vale:

$$K_1 = [ -(-666) + 1526 ] / 1526 = 2192 / 1526 = 1.436$$

Se si considera la sezione equipesante, simmetrica e di pari altezza, il momento plastico ottenibile vale  $1790 \text{ kNm} = 0.817 \cdot 2192$ , nel caso si adottasse la precompressione di tale sezione, il momento massimo vale  $1730 \text{ kNm} = 0.789 \cdot 2192$ ; per converso il rapporto fra le frecce al limite elastico delle due travi è pari a  $K_2 = 0.20/0.187 = 1.07$ , a sfavore della trave precompressa.

L'analisi non lineare è ovviamente condotta su modello matematico della struttura tenendo in conto le non linearità geometriche, gli effetti P,  $\delta$ , ossia l'interdipendenza fra le variazioni delle deformazioni  $\delta$  ed il valore della precompressione P dovute alla applicazione dei carichi esterni e, per le verifiche a rottura, dei legami costitutivi tensioni-deformazioni dei materiali.

In questo procedimento vengono anche individuati i fenomeni di instabilità generale e locale.

L'analisi di cui sopra, sviluppata con il programma ANSYS™, in presenza del cavo presollecitato mette in evidenza lo scostamento dalla linearità del diagramma carico-spostamento quando le tensioni nella piattabanda superiore superano quella di snervamento ed il progressivo incremento del tiro del cavo, pure non lineare (figura 10); il collasso plastico della sezione critica avviene senza che venga raggiunto lo snervamento del cavo; l'effetto irrigidente del cavo, rappresentato dal rapporto fra le frecce della trave presollecitata e della trave normale calcolate per il carico corrispondente al limite elastico della sezione e pari a 1.12.

I primi 10 autovalori corrispondenti ad altrettanti carichi critici (compresi fra 41.8 e 50.3 kN/m) sono relativi a modi di instabilizzazione dell'anima, ai quali è associata una configurazione post-critica stabile, per cui non sono considerati quali limiti per la utilizzazione della struttura che raggiunge il collasso per il carico  $q_R = 54.1 \text{ kN/m}$ .

**Dr. ing. Gian Carlo Giuliani,**  
**dr. ing. Gianluca Vesa**  
Consulenti Redesco srl

Figura 9 – Dominio di rottura della sezione.

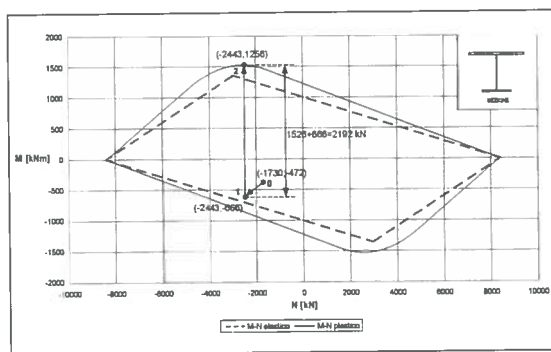


Figura 10 – Diagrammi carico-tiro e carico-spostamento.

