

External prestressing for structural rehabilitation of a school in Enna

Precompressione esterna per il risanamento strutturale di una scuola ad Enna

E. Lo Giudice¹, G. L. Di Marco¹

¹ *Studio Lo Giudice & Di Marco, Canicattì (AG), Italia*

ABSTRACT: The rehabilitation work of the gym and auditorium r/c structures of the Neglia school in Enna involved the use of the technique of external prestressing. It describes the experimental structural behaviour recorded during tensioning steps./ Si descrive l'intervento di risanamento delle strutture in c.a. della palestra e dell'auditorium della scuola Neglia di Enna. L'intervento ha previsto l'impiego della tecnica della precompressione esterna. Particolare attenzione viene posta alla descrizione della risposta deformativa della struttura durante le fasi di tesatura dei cavi.

KEYWORDS: External prestressing / precompressione esterna;

1 INTRODUZIONE

1.1 *Descrizione della struttura oggetto di intervento*

Oggetto dell'intervento sono state le travi di copertura di due ampi ambienti destinati ad Auditorium e Palestra della Scuola F.P. Neglia di Enna. Essi fanno parte di uno stesso plesso scolastico e sono collegati strutturalmente tra di loro da un sistema di telai senza interposizione di giunti tecnici, così da costituire un unico organismo strutturale. L'Auditorium è costituito da 5 portali, aventi interasse di 4.05 m e ha pianta esagonale con asse di simmetria all'incirca coincidente con il portale avente la luce maggiore. La sezione delle travi, aventi base pari a 0.40 m, hanno altezza costante per l'intera lunghezza, ma variabile a secondo la loro luce: 0.70 m per luce di 9,66 m e 1.00 m per luce di 14,20 m. La palestra avente pianta rettangolare e luci di 14,60 m, è costituita da 7 portali aventi interasse di 4,05 m. Le travi hanno sezione con base pari a 0.40 m e altezza costante per la loro intera lunghezza e pari a 1.40 m.

1.2 *Analisi del dissesto*

Le travi dei portali sottoposte ad esame visivo hanno mostrato un quadro fessurativo esteso e rilevante, tale da spingere l'Amministrazione Comunale a un approfondimento sulle cause e sulla possibilità di intervenire efficacemente e in tempi rapidi con risorse economiche contenute.

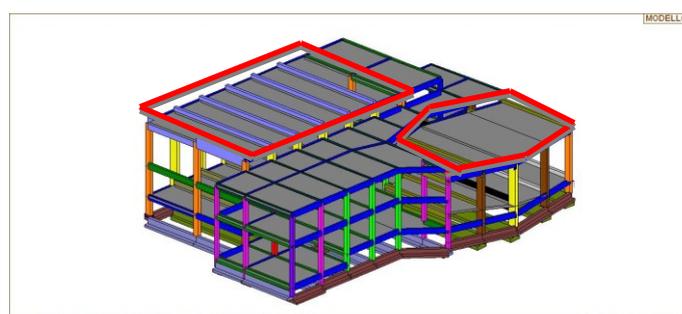


Figure 1. The identification of the two structures object of rehabilitation / Complesso strutturale e individuazione delle due strutture oggetto di intervento.

Il quadro fessurativo, concentrato soprattutto nella mezzeria delle travi, era quello tipico delle lesioni per flessione dovuta, con molta probabilità, ad una deficiente armatura metallica.

La ricerca delle cause del dissesto ha richiesto l'approntamento di una campagna diagnostica.

Alle indagini sperimentali di tipo diretto per la caratterizzazione della resistenza del calcestruzzo, sono seguite, per raggiungere la totale copertura degli elementi interessati, anche indagini di tipo indiretto con risultati tarati sui valori sperimentali ottenuti dalle prove dirette. Anche per l'accertamento delle armature intradossali e della staffatura presente nelle travi si sono utilizzati metodi non invasivi, come le indagini pacometriche estese su tutte le travi, accompagnate da alcune scarificazioni che hanno permesso di tarare la strumentazione. È emerso che, il valore medio di resistenza del calcestruzzo è quello

associabile a un C16/20, con valori pressoché omogenei, mentre l'acciaio utilizzato corrisponde a un FeB 38k. Analizzate le caratteristiche di sollecitazione, il comportamento statico dei portali, le caratteristiche dei materiali utilizzati e il quantitativo di armatura, si è potuto accertare che l'origine del quadro fessurativo fosse legato esclusivamente a un'insufficiente armatura intradossale.

Inoltre dalle analisi condotte sugli esecutivi originali, si è notato, che a causa della insufficiente lunghezza di ancoraggio delle barre e della ridotta dimensione della sezione dei pilastri, il comportamento reale della struttura non è quello di un portale, con travi "perfettamente incastrate" ai pilastri, in cui la ripartizione dei momenti flettenti avviene in funzione della rigidità flessionale dei singoli elementi, ma quello intermedio tra questo e lo schema di trave appoggiata agli estremi. Lo dimostra il fatto che, qualora si fosse realizzata la prima ipotesi, i pilastri sarebbero stati gravati da una sollecitazione di pressoflessione intollerabile per le dimensioni della loro sezione. Ovviamente, il configurarsi di tale schema statico, ha comportato il trasporto di un'aliquota del momento dall'estremità della trave alla sua mezzaria, ivi aggravandone lo stato tensionale e fessurativo.

2 SCELTA DELLA TECNICA DI CONSOLIDAMENTO

2.1 *La precompressione esterna. Generalità*

Tale tecnica che dovrebbe forse meglio chiamarsi post-compressione esterna, permette di generare delle forze antagoniste ai carichi esterni e al peso proprio delle travi, tesando dei cavi posizionati all'esterno della sezione e fissati soltanto in alcuni punti discreti. I trefoli vengono fissati alle testate delle travi tramite dei dispositivi in acciaio di grande rigidità e il loro andamento rettilineo lungo la trave è modificato tramite l'uso di deviatori anch'essi d'acciaio, così da dare al cavo la forma di una spezzata diagonale. I deviatori hanno dunque il compito di generare delle componenti verticali dell'azione di tiro dei cavi nei punti di contatto, che sono tanto maggiori quanto maggiore è l'angolo che possiede la poligonale dei cavi rispetto all'orizzontale. In definitiva, la trave da consolidare sarà soggetta ad un'azione assiale di compressione e da due forze verticali applicate sulla superficie intradossale delle travi in corrispondenza dei deviatori. Tale meccanismo permette di contrastare i carichi permanenti già presenti al momento dell'intervento inducendo un nuovo stato di sollecitazione che a sua volta compor-

ta una riduzione delle frecce della trave e la chiusura delle fessure createsi in precedenza. In breve: si riesce a ridistribuire il carico. Nella precompressione esterna, a causa della mancanza di congruenza tra i cavi e il calcestruzzo, lo stato di sollecitazione dei cavi risulta essere poco sensibile alla fessurazione del calcestruzzo e la rottura si ottiene per il raggiungimento della resistenza a compressione del calcestruzzo con trefoli ancora non snervati. Ad essere più precisi, la precompressione esterna permette che si instauri un meccanismo in grado di ammortizzare le tensioni nell'armatura lenta attiva: ad un picco del momento flettente e quindi della curvatura nella sezione corrispondente, il sistema si oppone, non tanto con un aumento localizzato del tiro nel cavo, come avverrebbe nel caso di armatura aderente, bensì tramite una modesta variazione del tiro ed un aumento del braccio della coppia interna.

Un contributo significativo lo si ottiene anche nella riduzione del taglio generato da carichi verticali.

Ulteriori aspetti positivi legati all'utilizzo di tale tecnica di consolidamento sono legati alla durabilità, alla velocità di esecuzione ed alla economicità.

Infatti: 1) l'utilizzo di cavi inguainati offre buone garanzie di protezione alla corrosione; 2) possono essere facilmente sostituiti; 3) l'adozione di tale tecnica risulta essere, oltre che strutturalmente efficace agli scopi specifici anche economicamente vantaggiosa, rispetto a tutte le scelte disponibili; 4) i tempi di esecuzione sono rapidi perché riconducibili a poche fasi, di cui alcune da svolgersi in officina.

2.2 *Applicazione della tecnica al caso specifico*

Per le considerazioni sopra esposte, analizzata la situazione particolare, si è deciso di procedere con tale tecnica di consolidamento. Innanzitutto, si sono verificati alcuni aspetti essenzialmente tecnologici; tra questi: 1) le travi da consolidare sono sufficientemente alte, così da permettere una deviazione dei cavi idonea a generare una componente verticali del tiro adeguata agli scopi, pur mantenendo la componente normale entro limiti del tutto accettabili rispetto alla resistenza del calcestruzzo e alla fattibilità tecnologica dell'azione di tesatura; 2) le travi sono facilmente accessibili in testata e in campata e presentano spazio sufficiente per l'inserimento dei dispositivi di acciaio fungenti da piastra di contrasto in testata e sella di deviazione in campata; 3) dallo studio geometrico non si sono rilevate interferenze particolari con altri elementi strutturali o con impianti tecnologici.

Altro aspetto è quello strutturale: dalle verifiche si è appurato che il peso proprio delle travi e il carico permanente trasmesso dai solai di copertura con i relativi massetti, è superiore al momento di fessurazione delle sezioni, particolarmente esiguo per la carenza di armatura intradossale in campata. Come visto la tecnica di precompressione per sua natura permette di contrastare i carichi permanenti, anche se già agenti al momento del rinforzo, andando a ridurre frecce e ampiezze delle fessure, svolgendo immediatamente un'azione attiva e consolidante, nonché un presidio di rinforzo nei confronti dei carichi accidentali, quali il significativo carico neve di progetto pari a 130 kg/mq. Le successive analisi hanno dimostrato che tale soluzione è risultata essere efficace nel migliorare la risposta globale della struttura iperstatica nei confronti dei carichi verticali e di creare le condizioni per un miglioramento sismico della stessa. Infatti, condizione irrinunciabile e prioritaria assunta dagli autori per procedere alla verifica sismica, era quella di ottenere una risposta rispettosa dei criteri di sicurezza imposti dalla Norma nei confronti delle combinazioni dei carichi verticali. E ciò, basandosi sul presupposto che una struttura con elementi inadeguati a resistere alle sollecitazioni derivanti da combinazioni SLU caratteristiche ed SLE rare, non può soddisfare neppure le verifiche sismiche, perché non in possesso di ulteriori riserve di resistenza.

Non trascurabili sono stati infine l'aspetto economico e la velocità di esecuzione. Il prezzo unitario per metro di trave consolidata, è risultato essere inferiore a quello delle altre tecniche adottabili e per questo rientrante all'interno dell'esiguo budget a disposizione dell'Amministrazione.

Il tempo di esecuzione dell'intervento, legato soprattutto all'organizzazione dell'officina per la realizzazione dei dispositivi in acciaio, sin da subito è apparso molto ridotto e compatibile con le esigenze dell'Amministrazione.

3 DESCRIZIONE DELL'INTERVENTO



Figure 2. Auditorium: Deviation saddles before of the tensioning steps. / Disposizione delle selle di deviazione nella fase precedente la tesatura.



Figure 3. Deviation saddle and cables at first tensioning / Sella di deviazione con cavi di prima tesatura.

L'andamento dei cavi segue una linea spezzata costituita da due tratti laterali inclinati e da un tratto centrale orizzontale, con apparecchi deviatori situati in corrispondenza dell'intradosso delle travi, disposti ad 1/3 e 2/3 della luce, e ancoraggi terminali posizionati sulle testate delle travi.

La soluzione progettuale è stata comunque studiata e caratterizzata per ogni singola trave, adeguandola alle caratteristiche geometriche e tensionali riscontrate.

Gli apparecchi di ancoraggio e quelli di deviazione sono stati realizzati con piastre in acciaio S 355 JR. Le piastre di testata sono state applicate in corrispondenza del filo esterno dei pilastri dei rispettivi portali, in posizione baricentrica rispetto alla sezione delle travi.

Il raccordo tra ancoraggio e guaina è stato ottenuto tramite un tubo di transizione che garantisce la corretta ermeticità dell'ancoraggio e la curvatura prevista in progetto.

Le travi in corrispondenza delle superfici di contatto con i dispositivi in acciaio di testata e di deviazione, sono state opportunamente rinforzate al fine di permettere una migliore diffusione delle tensioni.

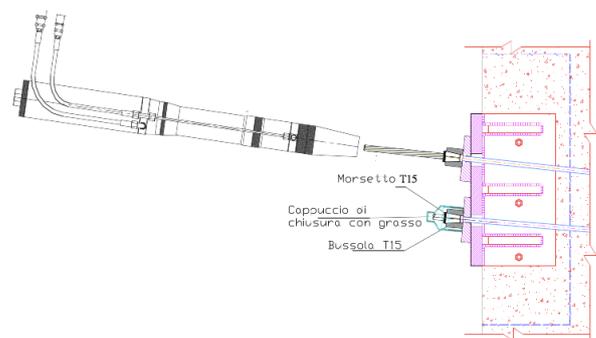


Figure 4. Anchorage zone / Particolare della zona di ancoraggio dei trefoli.

In particolare, si è proceduto alla scarifica del copriferro, alla successiva applicazione di una maglia costituita da ferri in acciaio inox del diametro $\varnothing 10$ ancorata tramite spinotti di ancoraggio e la ricostituzione del copriferro utilizzando malta pronta adesiva fibrorinforzata.

Le piastre sono state fissate alla struttura in cemento armato tramite tasselli chimici, opportunamente disposti.

Sono stati utilizzati trefoli compatti da 15,20 mm, ingrassati e inguainati HDPE, nel numero e nella posizione derivante dal calcolo appresso illustrato.

Il sistema di ancoraggio è stato realizzato tramite Morsetti tipo 7015-T15 in acciaio 16NiCr4Pb UNI EN 10277-4.

4 PROCEDURA DI CALCOLO ADOTTATA

4.1 Inquadramento normativo

Nonostante l'intervento per sua natura si configura come un intervento locale ai sensi delle § 8.4.3. delle NTC 2008, in virtù dell'importanza della struttura e della sua destinazione, si è voluto effettuare la valutazione della sicurezza dell'intero organismo strutturale, tenendo in debito conto dell'interazione esistente tra le strutture dei due locali e la parte restante della struttura di cui fanno parte. In definitiva si è proceduto secondo quanto disposto dal § 8.4.2. delle NTC 2008 e cioè come un intervento di "miglioramento".

Il metodo utilizzato per la valutazione della sicurezza è stata la "Verifica con l'impiego del fattore di struttura q " (cfr. C8.7.2.4).

Nella prima verifica effettuata si è voluto accertare il comportamento della struttura gravata dai soli carichi verticali. Infatti, le lesioni presenti nelle travi di copertura dell'auditorium e della palestra non sono da imputare ad altro tipo di azioni.

Studiato l'intervento di consolidamento delle travi come di seguito riportato e appuratane l'efficacia per i carichi verticali, si è proceduto alla verifica nella fase post-intervento. In questo caso si sono considerate anche le combinazioni sismiche, quindi, si è potuto valutare la capacità degli elementi ad assorbire le azioni sismiche previste dalle NTC 2008. Altro controllo effettuato è quello sugli spostamenti di interpiano utilizzando le combinazioni allo stato limite di danno SLD.

Nelle figure 5 e 6, sono riportati i coefficienti di sfruttamento delle verifiche per tensioni normali delle travi di copertura dei due locali soggette alle sollecitazioni derivanti da combinazioni caratteristiche allo SLU dei carichi verticali, prima e dopo la simu-

lazione dell'intervento. Come si evince il coefficiente massimo di sfruttamento passa da 1,15 nella prima configurazione a 0,96 relativamente alle combinazioni SLU per carichi verticali. Mentre per quanto concerne le verifiche sismiche SLV relativamente alle travi suddette e per l'intera aliquota dell' a_g di progetto, si ottengono valori di sfruttamento di poco superiori ma comunque inferiori a 1. Alcune delle pilastrate risultano invece verificare solo ipotizzando agente un'aliquota dell'accelerazione di progetto pari al 50%.

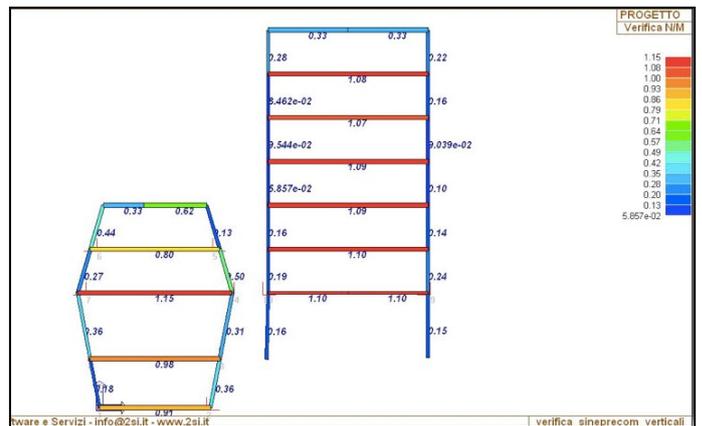


Figure 5. N/M verification for vertical loads in pre-intervention phase / Verifica N/M per carichi verticali nella fase pre intervento

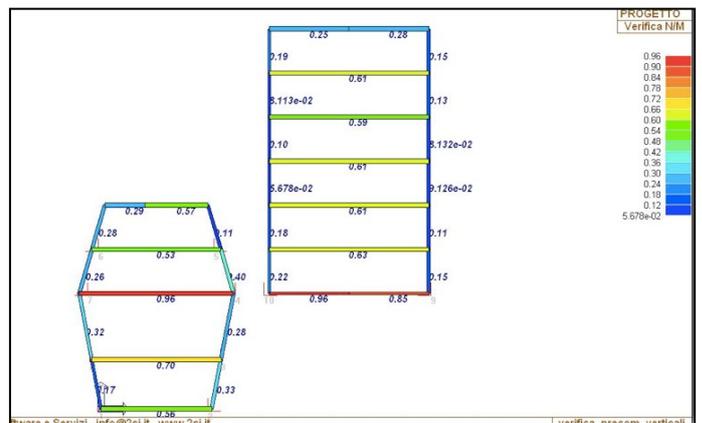


Figure 6. N/M verification for vertical loads in post-intervention phase / Verifica N/M per carichi verticali nella fase post-intervento

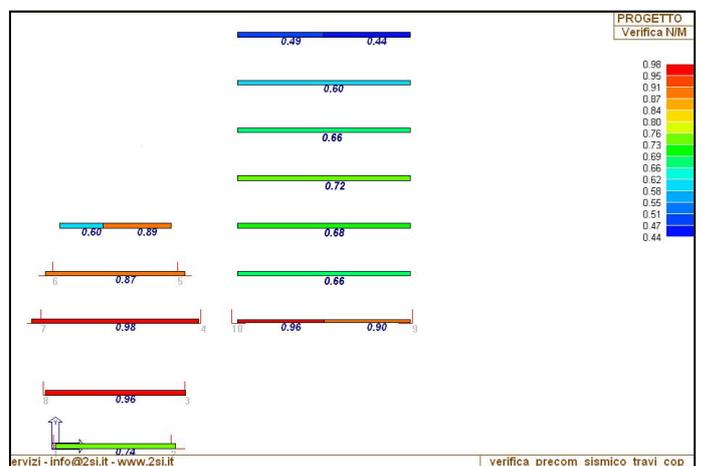


Figure 7. N/M seismic verification in post-intervention phase / Verifica sismica N/M fase post intervento

4.2 Calcolo dell'azione di precompressione

Il procedimento adottato per il calcolo dell'azione di tiro può essere così sintetizzato: detto M_f il momento di fessurazione proprio della trave in campata e $M_{e,rare}$ il momento di esercizio per carichi gravitazionali in combinazioni rare, si può ricavare il momento M_p che la precompressione deve essere in grado di generare per far sì che la trave possa sostenere i carichi previsti secondo la combinazione di esercizio rara:

$$M_f + M_p > M_{e,rare}$$

Table 1. Comparison between M_f and M_{33} moments and the M_p values / Confronto tra i momenti M_f , M_{33} e i valori M_p calcolati.

	M_f (Kgxc m^2)	M_p Kgxc m^2	M_{33} (rare)
Trave 40x140 ^q Auditorium	4 071 472	2 400 000	6 129 000
Trave 40x120 ^q Auditorium	2 729 023	1 470 000	4 139 000
Trave 40x100 ^q Auditorium	1 778 754	700 000	2 240 000
Trave 40x140 ^q Palestra	3 978 468	3 300 000	6 854 000

Quindi determinato M_p (Table 1) si risale alle forze verticali puntuali applicate all'intradosso delle travi e che altro non sono che le componenti verticali dell'azione di tiro. In particolare si è ipotizzato che l'andamento dei cavi segua una linea spezzata costituita da due tratti laterali inclinati e da un tratto centrale orizzontale, con apparecchi deviatori posizionati a 1/3 e 2/3 della luce. I valori della tensione di tiro e delle sue componenti sono indicati in Table 2.

Table 2. Values of the tensioning action and its components T and N, in correspondence with the switches and the head, respectively. / Valori dell'azione di tiro e sue componenti T (in corrispondenza dei deviatori) ed N (in corrispondenza della testata).

	R (Kg)	T (Kg)	N (kg)
Trave 40x140 ^q auditorium	80.000	10.000	79.563
Trave 40x120 ^q Auditorium	61.000	7.000	60.500
Trave 40x120 ^q (corta) Auditorium	24.700	3.000	24.500
Trave 40x140 ^q palestra	85.000	11.000	84.500

Il progetto relativo alle dimensioni e al numero dei trefoli è stato effettuato in funzione dei parametri caratteristici dei trefoli e delle indicazioni fornite dalle NTC 2008 § 4.1.8.1.5

Il calcolo è stato esteso a tutte le tipologie di travi ed i risultati sono sintetizzati nella table 3, dove:

- T_{spi} è la componente verticale trasmessa dal cavo al dispositivo del deviatore;

- $0,75 f_{ptk}$ è il limite imposto dalla Norma.

Come si può evincere si tratta di un numero assolutamente compatibile con le dimensioni delle travi dei consolidare avendo un ingombro molto ridotto.

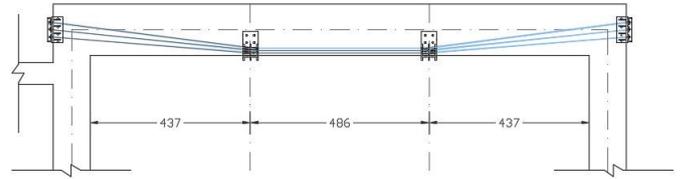


Figure 7. Position scheme of the strands / Schema di posizionamento dei trefoli

Table 3. Characteristics of the strands / Caratteristiche dei trefoli

	R (daN)	N. Trefoli Tipo Compat- to 0,6"	T_{spi} (daN)	$0,75 f_{ptk}$ (daN)
Trave 40x140 ^q auditorium	80.000	6	13.300	22.500
Trave 40x120 ^q auditorium	61.000	4	15.250	22.500
Trave 40x120 ^q (Corta) auditorium	24.700	2	12.350	22.500
Trave 40x140 ^q palestra	85.000	6	14.160	22.500

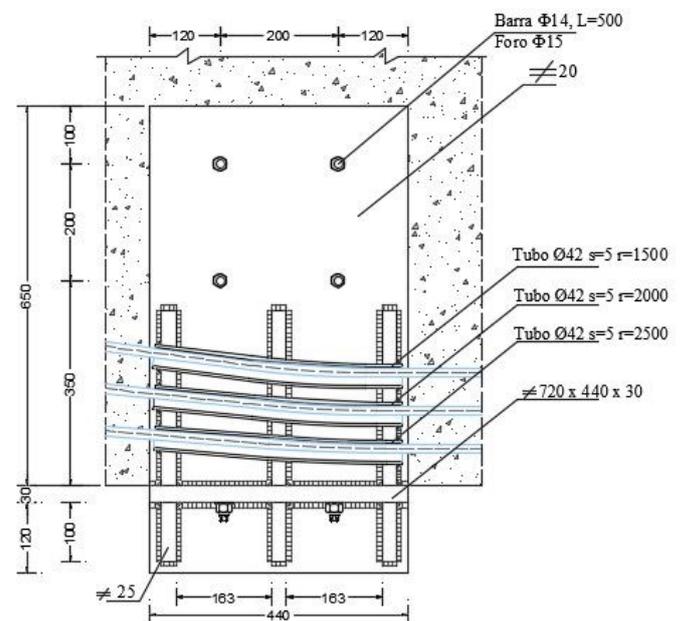


Figure 8. Deflection device / Particolare dispositivo di deviazione

4.3 Risposta deformativa durante la fase di tesatura

La fase di tesatura dei trefoli ha interessato prima tutte le travi della Palestra e successivamente quelle dell'Auditorium. Per monitorare la risposta deformativa delle travi durante la fase di tesatura dei trefoli, sono state strumentate tutte le travi interessate con

dei trasduttori di spostamento, posizionati in corrispondenza della mezzeria di ciascuna di esse. In particolare si è previsto che il tiro avvenisse contemporaneamente su ciascuna coppia di trefoli paralleli raggiungendo il massimo carico previsto in 4 steps. Effettuato il primo step di tiro sulla prima coppia di trefoli, si è proceduto con il primo step sulla seconda coppia e poi sulla terza. Per poi riiniziare con il secondo step agendo sulla prima coppia e così via sino al 4° step di tiro applicato sulla terza coppia. Le operazioni si sono rilevate particolarmente semplici e sono durate 6 ore per le travi della Palestra e 4 ore per le travi dell'Auditorium.

Come rilevato dai trasduttori, sin dal primo step di tiro, si è assistito al sollevamento della trave interessata e unitamente alle altre adiacenti con un effetto "soffice". Tale comportamento è risultato particolarmente evidente nella Palestra, per la sua superficie regolare, un po' meno nell'Auditorium, avente forma romboidale e travi più corte.

La riduzione della freccia delle stesse, è stata sensibile per le travi della palestra, lo spostamento maggiore è infatti pari a 5,78 mm. La trave di maggiore luce dell'Auditorium ha subito uno spostamento di 2 mm.

In perfetta armonia con la riduzione della freccia si è assistito anche a una consistente riduzione del quadro fessurativo.

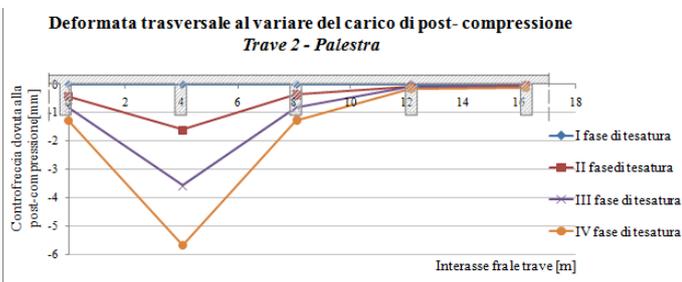


Figure 9. Strain behavior of all gym beams during the tensioning steps of the second beam / Comportamento deformativo di tutte le travi della Palestra durante le fasi di tesatura della 2° trave.

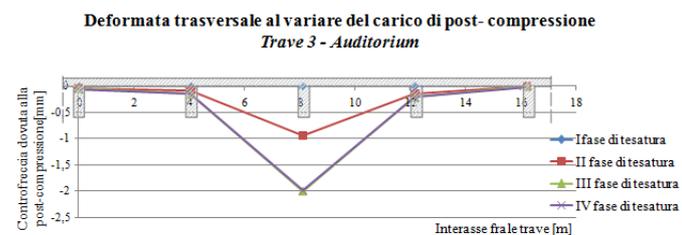


Figure 10. Strain behavior of all auditorium beams during the tensioning steps of the central beam / Comportamento deformativo di tutte le travi dell'Auditorium durante le fasi di tesatura della trave centrale.

5 CONCLUSIONI

The roof beams of the gym and auditorium of the F.P. Neglia school in Enna had a crack pattern concentrated in the middle of the beams due to permanent loads and tied to a low cracking moment.

It is planned to consolidate them through the technique of the external prestressing.

Le travi di copertura della Palestra e dell'Auditorium della scuola F.P. Neglia di Enna presentavano un quadro fessurativo concentrato nella mezzeria delle travi dovuto ai carichi permanenti e legato a un basso momento di prima fessurazione. Si è previsto di consolidarle attraverso la tecnica della precompressione esterna.

BIBLIOGRAFIA

- Mangoni E. Chiarugi A. 1999. L'evoluzione delle tecniche di precompressione. Conseguenze sul comportamento flessionale delle travi e considerazioni sulle verifiche a rottura. *Lo sviluppo del cemento armato e del precompresso in Italia e la lezione di questo secolo*, Giornale AICAP '99, pp. 197-206.
- Pisani M. A., 2008. *Consolidamento delle strutture*. Milano. Hoepli
- Radogna E.F., 1998 *Tecnica delle costruzioni: costruzioni composte "acciaio-calcestruzzo", cemento armato, cemento armato precompresso (vol. 2)*. Masson editore.