

Estratto dagli atti del 16° Congresso C.T.E.
Parma, 9-10-11 novembre 2006

STUDIO DEL COMPORTAMENTO MECCANICO DI TEGOLI DI COPERTURA SOGGETTI A TENSIONI LONGITUDINALI E TRASVERSALI

BEATRICE BELLETTI, PATRIZIA BERNARDI, IVO IORI
Università degli Studi di Parma

SUMMARY

In this work, a procedure for the design of thinwebbed prestressed roof elements is proposed and applied to a new precast element belonging to RDB production. Particular attention has been taken to the design of its transversal reinforcement, which has been studied both by means of simplified methods and through a NLFE approach. The numerical analyses have been performed by implementing a non-linear constitutive matrix for cracked reinforced concrete (so-called "PARC") into a commercial FE code, thus allowing to account for mechanical and geometrical non-linearity.

The efficiency of the so-designed reinforcement arrangement has been verified by performing an experimental program aimed to the verification of the transversal capacity of the element. The obtained experimental results have confirmed the reliability of the procedure, since the specimen has showed a satisfactory behaviour both under SLS and ULS loadings. The experimental tests have then been modelled through the proposed NLFE approach and a good fitting between the numerical and experimental results could be observed.

To complete the design of the element an experimental test aimed to verify its longitudinal behaviour has been carried out.

1. INTRODUZIONE

L'osservazione sperimentale delle modalità di rottura di elementi prefabbricati di copertura in parete sottile evidenzia che il loro comportamento è notevolmente influenzato dalla presenza di sforzi non solo longitudinali, ma anche trasversali, e questi ultimi, in particolare, possono determinare la formazione di improvvisi meccanismi di collasso. Ciononostante, la progettazione di questi elementi strutturali viene in genere condotta considerando in prevalenza il loro comportamento longitudinale.

In questa nota viene presentata una procedura di progettazione e calcolo in grado di mettere in conto l'influenza di sforzi longitudinali e trasversali fino alla fase ultima di questi elementi prefabbricati. Tale procedura è applicata alla progettazione di un tegolo di copertura (denominato commercialmente "MAGUS") recentemente prodotto dalla Società RDB di Pontenure (PC). L'elemento MAGUS è progettato per coprire luci massime di 23 m, ed è caratterizzato da una sezione trasversale con due ali simmetriche ed una soletta inferiore in cui è predisposta l'armatura di precompressione.

Il primo passo della progettazione ha riguardato la definizione dell'armatura lenta trasversale presente nel tegolo. Tale armatura è stata dapprima calcolata facendo ricorso a procedure semplificate e successivamente è stata verificata tramite analisi non lineari agli elementi finiti che implementano la matrice costitutiva PARC [1] all'interno del programma commerciale ABAQUS [2]. Tale procedura consente di includere le non linearità meccanica e geometrica [3-7]. Infine, sono state condotte alcune prove sperimentali per verificare la correttezza delle ipotesi di progettazione e l'effettivo comportamento strutturale dell'elemento. Le prime prove sperimentali effettuate sono state progettate appositamente per verificare il comportamento trasversale del tegolo. Successivamente, per completare la fase di progettazione, è anche stata predisposta una prova per verificare il comportamento longitudinale dell'elemento. Tutte le prove sperimentali condotte sono state in seguito simulate tramite l'approccio non lineare agli elementi finiti proposto. Il buon riscontro con la realtà sperimentale ha consentito di fornire alcune considerazioni utili riguardanti i metodi di progettazione correnti utilizzati per queste strutture prefabbricate.

2. PROGETTAZIONE DELL'ARMATURA TRASVERSALE

2.1 Metodo semplificato

La progettazione dell'armatura trasversale è stata dapprima effettuata con calcoli semplificati.

Tale armatura, in una sezione lontana dalle testate, è stata inizialmente assunta come indicato in Figura 1b, sotto la colonna "tipo A". Le proprietà meccaniche adottate per i materiali sono sintetizzate nella Tabella 1. Adottando le resistenze di progetto ottenibili dai corrispondenti valori caratteristici riportati in Tabella 1, è stato calcolato il momento resistente della sezione trasversale di Figura 1a, il cui valore è risultato pari a 1684 kNm. Successivamente, sono stati calcolati i carichi agenti sul tegolo, considerando, per la determinazione di quelli agenti sulle ali, un elemento interposto leggero in alluminio, con peso proprio di 0.2 kN/m². Sul tegolo, oltre al peso proprio, agisce la guaina impermeabilizzante e la coibentazione (con peso 0.1 kN/m²) e il carico variabile rappresentato dalla neve, assunto pari a 1.30 kN/m². Il tegolo è stato ipotizzato con luce di 23 m (che rappresenta, come detto, la massima lunghezza per cui questo elemento viene progettato) e con interasse tra i tegoli di 6 m, valore piuttosto frequente nelle coperture di edifici industriali. Partendo dalla condizione di carico sopra descritta è stata verificata la capacità portante trasversale dell'elemento in due sezioni "critiche", indicate in Figura 1a con le lettere A-A e B-B. In queste sezioni è stato determinato il momento trasversale prodotto dai carichi agenti sull'ala per una striscia della profondità di 1 m, valore poi confrontato con il corrispondente momento resistente sezionele. Adottando il primo quantitativo di armatura ("tipo A"), il momento agente trasversale è risultato maggiore di quello resistente già per carichi inferiori a quelli corrispondenti alla crisi longitudinale. Il tegolo sarebbe potuto quindi andare in crisi prima per flessione trasversale che longitudinale. E' pertanto stato aumentato il quantitativo di armatura all'estradosso del tegolo fino ad ottenere verifiche positive, adottando l'armatura riportata in Figura 1b sotto la colonna "tipo B". Una verifica analoga è stata effettuata anche considerando un elemento interposto più pesante in cemento armato.

Acciaio	$f_{(0.2)k}$ (MPa)	f_{tk} (MPa)
Armatura lenta	390	440
Trefoli	1670	1870
Calcestruzzo	Rck = 55 MPa	

Tabella 1. Proprietà meccaniche assunte per i materiali costituenti.

	Legenda	Armatura	
		tipo A	tipo B
1 (barre long.)		2+2 f14	
2 (staffe)		f8/300 mm	
R2 (rete)		f6/150 x 5/250 mm	
R4 (rete)		f8/150 x 5/200 mm	
R6 (rete)		f6/150 x 5/250 mm	f8/150 x 5/250 mm
T (trefoli)		7+7 A139 mm ² (6/10")	

Figura 1. (a) Sezione trasversale dell'elemento MAGUS (dimensioni in cm) con disposizione dell'armatura; (b) prima armatura trasversale considerata ("tipo A") e armatura modificata ("tipo B").

2.2 Analisi non lineare agli elementi finiti ANALISI NON LINEARE AGLI ELEMENTI FINITI I risultati ottenuti dai calcoli semplificati sono stati verificati tramite analisi non lineari agli elementi finiti, in grado di mettere in conto contemporaneamente la presenza di tensioni longitudinali e trasversali. Si è quindi discretizzato tramite elementi finiti tipo "shell" a 4 nodi un tegolo MAGUS avente le medesime caratteristiche geometriche (luce di 23 m) e meccaniche (valori di progetto ottenuti da quelli caratteristici di Tabella 1) ipotizzate nei calcoli manuali.

La non linearità geometrica presente è stata messa in conto grazie ad un'opzione presente nel codice ad E.F. ABAQUS, mentre la non linearità meccanica è stata considerata implementando nel programma ad E.F. la matrice di rigidità PARC per elementi in c.a., fessurati e non, soggetti a stato piano di tensione, la cui formulazione teorica completa è presentata in [1].

La precompressione è stata considerata inserendo dei "layer" di armatura all'interno degli elementi "shell", a cui è stata assegnata una tensione iniziale corrispondente alla pretesione dei trefoli depurata dalle perdite a lungo termine.

Le modalità di realizzazione della mesh ad E.F., nonché l'implementazione del modello PARC all'interno del codice ad E.F. utilizzato, possono essere ritrovate in precedenti lavori [3-7] in cui tale procedura è stata applicata allo studio di tegoli e altre tipologie di elementi prefabbricati. Il tegolo è stato assoggettato, in differenti "step", con i carichi agenti allo stato limite di esercizio e ultimo, quindi i carichi sono stati incrementati fino al raggiungimento della rottura numerica.

I risultati ottenuti considerando un quantitativo inferiore ("tipo A") ed uno superiore ("tipo B") di armatura trasversale all'estradosso vengono sintetizzati dal grafico di Figura 2. Qui si riportano i risultati numerici ottenuti in termini di momento massimo agente - freccia in mezzzeria, per il tegolo con interposto leggero. Come si può osservare, adottando il minor quantitativo di armatura ("tipo A") la crisi del tegolo avviene prima del raggiungimento del momento resistente della sezione, e pertanto una progettazione che metta in conto la sola presenza di sforzi longitudinali potrebbe non garantire la sicurezza dell'elemento. Viceversa, incrementando l'armatura trasversale all'estradosso ("tipo B") la crisi sopraggiunge per un valore superiore a quello di rottura per flessione, e quindi in questo caso la progettazione a flessione, benché non del tutto corretta, sarebbe in grado di fornire un margine di sicurezza superiore. L'armatura "tipo B" è pertanto stata adottata nella produzione corrente dell'elemento.

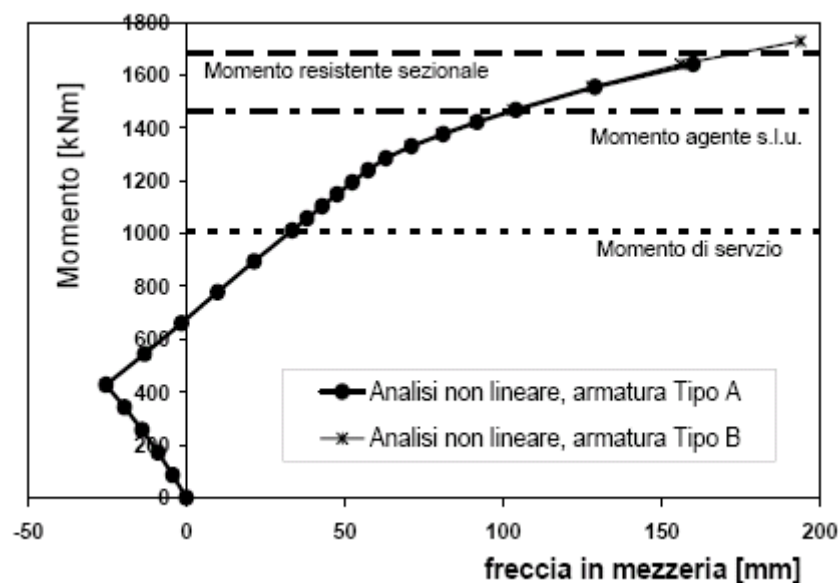


Figura 2. Risposta numerica del tegolo lungo 23 m (resistenze di progetto) al variare dell'armatura trasversale di estradosso in termini di momento massimo - freccia in mezzzeria.

3. VERIFICA DEL COMPORTAMENTO TRASVERSALE

Per la verifica della portanza dell'ala sono state predisposte tre prove di carico su tegoli MAGUS della lunghezza di 7.5 m. Data la modesta luce in gioco, in queste prove non si è presa in considerazione la verifica del comportamento longitudinale. Tutte le prove sono state condotte nel Laboratorio Prove e Materiali della Ditta RDB di Pontenure (PC).

3.1 Descrizione delle prove sperimentali

I tegoli MAGUS sollecitati fino alla resistenza ultima per flessione trasversale sono caratterizzati dalla medesima sezione trasversale riportata nella Figura 1a, nella quale si è unicamente ridotto il numero di trefoli di precompressione presenti nella soletta inferiore (da 14 a 10). L'armatura trasversale inserita è invece stata la medesima riportata nelle Figure 1a e 1b ("tipo B"), quindi la portanza trasversale dell'elemento non viene alterata, a meno degli effetti del second'ordine, che comunque non risultano significativi nel caso di luci così modeste.

Per la determinazione dei carichi da applicare ai tegoli durante le prove, si è voluta simulare una condizione di carico relativa ad un tegolo di normale utilizzo, in particolare si è preso come riferimento un impalcato caratterizzato da un interasse tra i tegoli di 7.5 m, ovvero da una larghezza dell'elemento interposto (ipotizzato nella soluzione leggera) di 5.0 m, sul quale il carico variabile di progetto rappresentato dalla neve è di 1.28 kN/m^2 . Per questa soluzione, il campo d'impiego del tegolo MAGUS prevede una luce massima di 21.38 m. Con riferimento a questa situazione-tipo si sono quindi calcolati i carichi agenti sulla sezione trasversale del tegolo corrispondenti alla situazione di esercizio, di progetto, e alla situazione in cui il tegolo è

soggetto ai carichi che determinano, nella sezione di mezzera, un valore massimo del momento agente pari al momento resistente sezionale. Nelle prove sperimentali condotte si è quindi applicato, sull'ala del tegolo, un carico analogo a quello determinato per l'elemento di riferimento sopra descritto. Lo scopo delle prove è stato quello di verificare che l'ala dell'elemento sia in grado di sopportare almeno una distribuzione di carico corrispondente alla rottura per flessione longitudinale del tegolo scelto come riferimento (ovvero un carico agente che determina il raggiungimento del momento resistente sezionale). Infatti, se in corrispondenza dell'applicazione di questi carichi di rottura l'ala non mostra segnali di crisi, si può assumere che la progettazione dell'elemento a flessione longitudinale avvenga in condizioni di sicurezza, in quanto la rottura per flessione trasversale è comunque successiva a quella longitudinale.

Lo schema di carico adottato è stato il medesimo in tutte le tre prove eseguite. Il carico sulle ali è stato applicato tramite due martinetti simmetrici rispetto alla mezzera del tegolo. Ogni martinetto, attraverso un sistema di putrelle, trasmette il carico alle ali su quattro punti (Figura 3). Considerando una diffusione del carico concentrato secondo una linea di circa 45°, si può assumere che il carico all'attacco tra l'ala e la soletta sia all'incirca uniforme. Il peso totale del dispositivo di carico (due martinetti + putrelle di ripartizione) agente sul tegolo è stato di 10.5 kN.

Per difficoltà tecniche di esecuzione della prova, non è stato possibile applicare anche il carico centrale agente sulla soletta inferiore tramite martinetti, per cui qui è stato utilizzato un carico fisso, applicato direttamente sulla soletta, consistente in fasci di barre f 28 della lunghezza di 8 m (Figura 4).

Dal momento che non è risultato possibile riprodurre l'effettiva distribuzione dei carichi agenti sul tegolo una volta messo in opera, si è cercato comunque di ripartire il carico tra la soletta e le ali con rapporti equivalenti a quelli effettivi presenti sul tegolo di riferimento, secondo le modalità riportate in Figura 5.

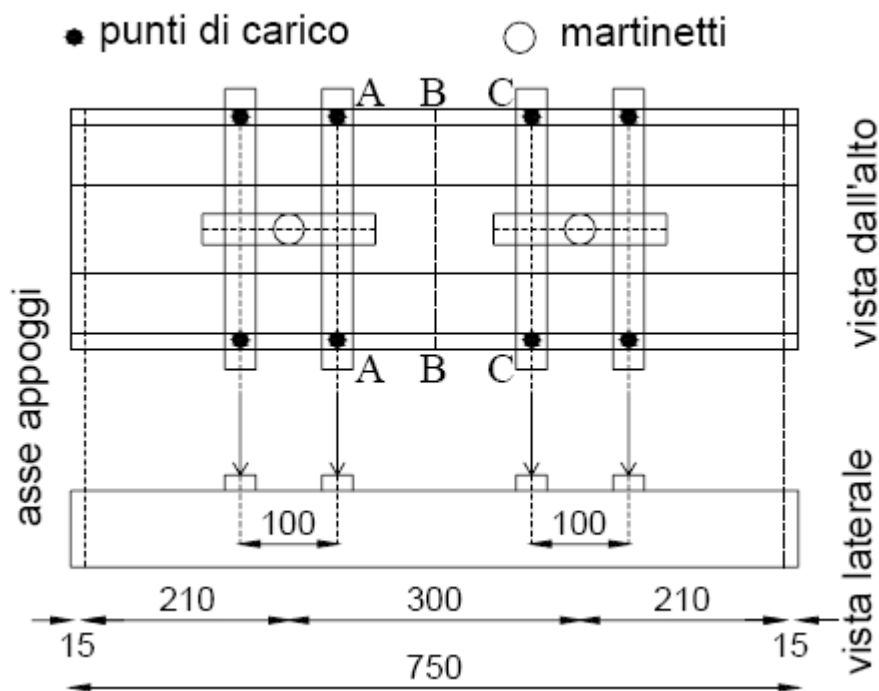


Figura 3. Schema di carico adottato nelle prove: applicazione dei carichi sulle ali (dimensioni in cm).



Figura 4. Sezione trasversale del tegolo durante la prova di carico, con applicazione dei carichi sulle ali tramite martinetti e sulla soletta tramite fasci di barre.

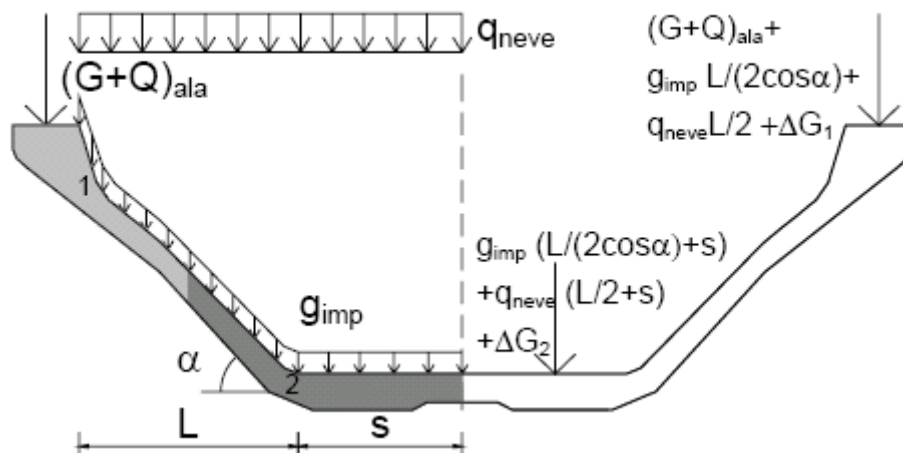


Figura 5. Carichi agenti sulla sezione trasversale del tegolo: distribuzione effettiva (a sinistra) e distribuzione assunta nelle prove (a destra).

Il carico distribuito agente sull'ala è quindi stato affidato per la metà del suo sviluppo alla sommità dell'ala (e quindi aggiunto ai pesi esercitati dai martinetti), mentre per la restante metà alla soletta (quindi ai fasci). Per quanto riguarda il peso proprio, il contributo aggiuntivo dovuto all'introduzione dei coefficienti moltiplicativi dei carichi relativi alle condizioni di carico successive all'esercizio viene suddiviso tra soletta e ala come indicato nella Figura 5 (termini ΔG_1 e ΔG_2).

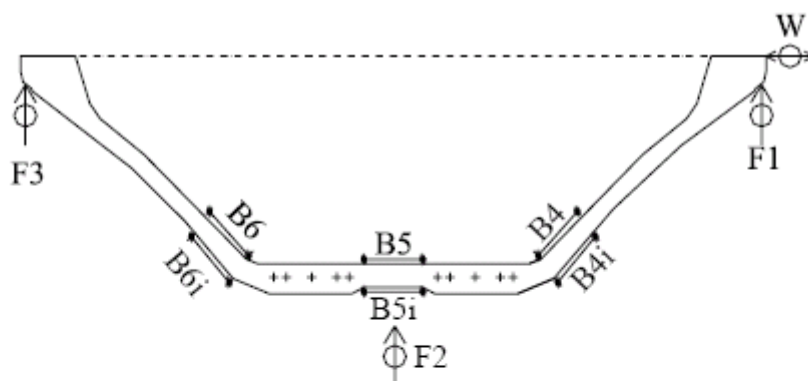
Poiché l'entità del carico sulla soletta (rappresentato dai fasci) non poteva essere modificato durante la prova, si è scelto di caricare l'ala con gli effettivi carichi di sua competenza corrispondenti alle tre condizioni fondamentali del tegolo di riferimento (esercizio, progetto, rottura per flessione longitudinale), riproducendo nello stesso tempo anche sulla soletta inferiore, con il peso dei fasci, queste medesime condizioni di carico in tre prove distinte. In particolare, nella prova 1 la soletta inferiore è stata caricata con fasci che riproducevano i carichi di competenza della soletta stessa al raggiungimento della rottura teorica per flessione longitudinale del tegolo di riferimento, mentre nelle prove 2 e 3 sono stati applicati fasci per un peso corrispondente alle combinazioni di stato limite ultimo e di stato limite di esercizio, rispettivamente. I pesi assunti per i fasci nelle tre prove di carico sono riportati nella Tabella 2. Come si osserva da questa Tabella, solo per la prova 2 i fasci sono stati applicati in due tempi successivi: prima i due fasci relativi alla combinazione di esercizio, poi si è aggiunto l'ulteriore fascio per portare alla configurazione di stato limite ultimo.

	Peso fasci	Carico max	Carico totale
--	------------	------------	---------------

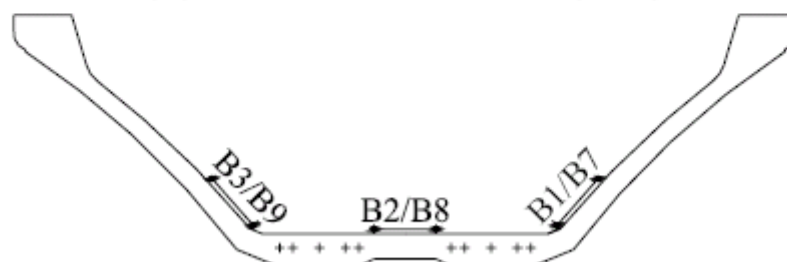
	soletta [kN]	martinetti [kN]	[kN]
Prova 1	28.2X2 (Rottura long.)	130.0x2	316.40
Prova 2	7.92x2+19.8 (SLU)	149.0x2	333.64
Prova 3	7.92x2 (SLE)	144.0x2	303.84

Tabella 2. Pesì totali agenti sui tegoli nelle tre prove effettuate.

E' stata inoltre applicata una opportuna strumentazione di misura, costituita da flessimetri per la misura degli spostamenti verticali e da trasduttori potenziometrici per la misura delle deformazioni trasversali. I punti di applicazione della strumentazione di misura e la relativa numerazione sono indicati nelle Figure 6a, 6b.



(a) sezione di mezzeria (B-B)



(b) sezioni prossime ai punti di carico (A-A e C-C)

Figura 6. Disposizione della strumentazione di misura nelle sezioni (a) di mezzeria (B-B, vedi Figura 3) e (b) prossime ai punti di carico (A-A e C-C, vedi Figura 3).

Per la determinazione della resistenza meccanica del calcestruzzo, nel giorno di esecuzione delle tre prove sperimentali, eseguite alla distanza di una settimana l'una dall'altra, sono state condotte delle prove a rottura a compressione e a trazione su provini provenienti dal conglomerato utilizzato per i tegoli e confezionati contemporaneamente al getto. I risultati delle prove a compressione cubica su provini di lato 15 cm e delle prove a trazione indiretta condotte su provini cilindrici di lunghezza pari a 20 cm e diametro 10 cm, ottenuti per il conglomerato dei primi due tegoli testati sono riportati nella Tabella 3. Il valore medio della resistenza a compressione cubica è quindi risultato pari a 80.7 MPa, mentre quello della resistenza a trazione indiretta pari a 4.33 MPa.

	Resistenza a compressione [MPa]	Resistenza a trazione indiretta [MPa]
Magus Prova 1	83.5	4.31
	76.4	3.72
		4.17
		3.67
Magus Prova 2	83.0	4.62
	79.8	4.58
		5.26

Tabella 3. Resistenze meccaniche del calcestruzzo impiegato per i tegoli.**3.2 Modalità di crisi ultima**

In ciascuna prova condotta sono stati dapprima applicati i fasci di barre sulla soletta, ed in seguito la pressione dei martinetti è stata applicata sulle ali fino al raggiungimento della rottura dell'elemento. Nelle tre prove eseguite, le modalità di rottura registrate sono state del tutto simili. Le fessure principali si sono diffuse dagli appoggi laterali verso la mezzera, seguendo un percorso longitudinale all'estradosso in corrispondenza dell'attacco tra l'ala e la soletta dell'elemento (Figura 7). La rottura, nei tre casi, si è manifestata con espulsione ("spalling") del copriferro di calcestruzzo all'intradosso dell'elemento in seguito alla diversa direzione assunta dalle tensioni di compressione all'intradosso dell'ala e della soletta inferiore, (Figure 7b, 7c). Il carico ultimo dell'elemento è stato superiore a quello di rottura per flessione longitudinale del tegolo di riferimento, da cui si evince che la progettazione dell'armatura trasversale è risultata adeguata.

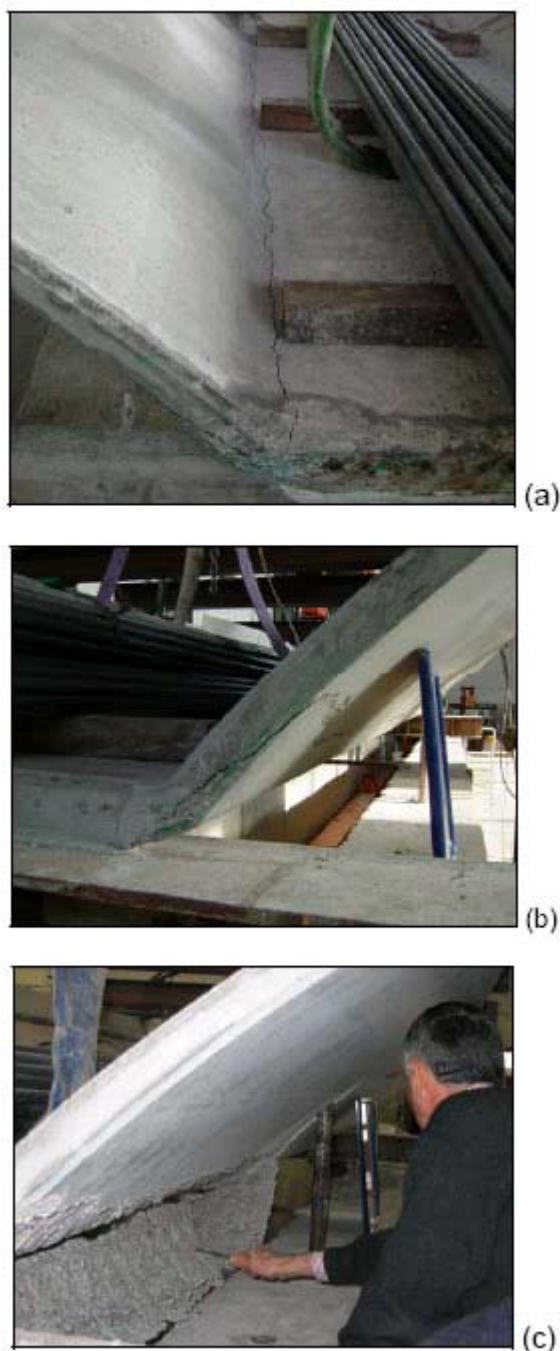


Figura 7. (a) Prova 3: fessura longitudinale, a rottura, all'estradosso del tegolo in prossimità dell'appoggio; (b) Prova 2: fessura di "spalling" del calcestruzzo
(c) Prova 1: il completo "spalling" del calcestruzzo.

3.3 Confronti numerico-sperimentali

Le tre prove sperimentali sono state simulate tramite analisi non lineari agli E.F., secondo la medesima procedura numerica già descritta al punto 2.2. La mesh ad elementi finiti è stata, anche in questo caso, realizzata tramite elementi "shell" e ha interessato metà struttura, avvalendosi della simmetria geometrica e di carico presente. Le proprietà meccaniche assunte per i materiali sono state ricavate dai valori medi ottenuti sperimentalmente e riportati in Tabella 3.

Nella Figura 8 sono riportati i confronti tra i risultati numerici e quelli sperimentali per ciascuna delle prove effettuate. Nella colonna di sinistra sono riportati gli andamenti degli spostamenti verticali misurati in punti diversi della sezione di mezzeria al variare del carico uniformemente distribuito agente sul tegolo. Gli abbassamenti, relativi sia alle curve sperimentali che numeriche, sono stati depurati del peso proprio del tegolo, del peso del dispositivo di carico e di quello dei fasci di barre applicati all'elemento prima dell'azione dei martinetti. In questi grafici è inoltre riportato il livello di carico in corrispondenza del quale le ali risultano assoggettate al medesimo carico presente su di esse al raggiungimento del momento resistente sezionale. Come si può osservare, il carico ultimo ottenuto nelle tre prove è del tutto simile, anche se, in generale, il peso maggiore dei fasci posizionati nella soletta inferiore fornisce un effetto stabilizzante alla sezione. Si osserva inoltre che le misurazioni sperimentali relative ai flessimetri F1 ed F3 terminano prima del raggiungimento del carico ultimo sperimentale, in quanto tali strumenti sono stati rimossi in anticipo per una maggiore sicurezza durante le prove. Il valore sperimentale di F1/F3 riportato nei grafici rappresenta inoltre una media dei risultati effettivi, in quanto il comportamento sperimentale, a differenza di quello numerico, non si è mostrato del tutto simmetrico.

Il punto finale delle curve numeriche rappresenta il raggiungimento della deformazione ultima convenzionale per il calcestruzzo (3.5‰) o per l'acciaio (assunta pari all'8‰). In particolare, nelle analisi numeriche effettuate per la modellazione di queste tre prove sperimentali, il termine delle analisi numeriche ha sempre coinciso con il raggiungimento della deformazione ultima convenzionale nella rete trasversale elettrosaldata presente all'estradosso, in corrispondenza della sezione di attacco tra ala e soletta.

Nella colonna di destra si riporta invece, per le varie prove, l'andamento dell'apertura delle ali misurata nella sezione di mezzeria in funzione del carico a metro lineare a cui sono soggette le sole ali del tegolo. Questi grafici confermano l'efficacia del modello numerico utilizzato nell'interpretazione dei risultati sperimentali, oltre a fornire una ulteriore conferma ai risultati ottenuti dalla sperimentazione.

L'efficacia del modello numerico adottato è ulteriormente confermata dai confronti presentati nella Figura 9, in termini di carico a metro lineare - deformazioni trasversali misurate in diverse sezioni dell'elemento. Per necessità di spazio, sono qui riportati in Figura 9a i risultati ottenuti nella prova 1 all'estradosso della sezione di mezzeria (B-B, Figura 3), in Figura 9b i risultati della prova 2 all'intradosso della medesima sezione di mezzeria, e in Figura 9c i confronti nelle sezioni A-A e C-C di Figura 3 (prossime ai punti di applicazione del carico), ottenuti nella prova 3.

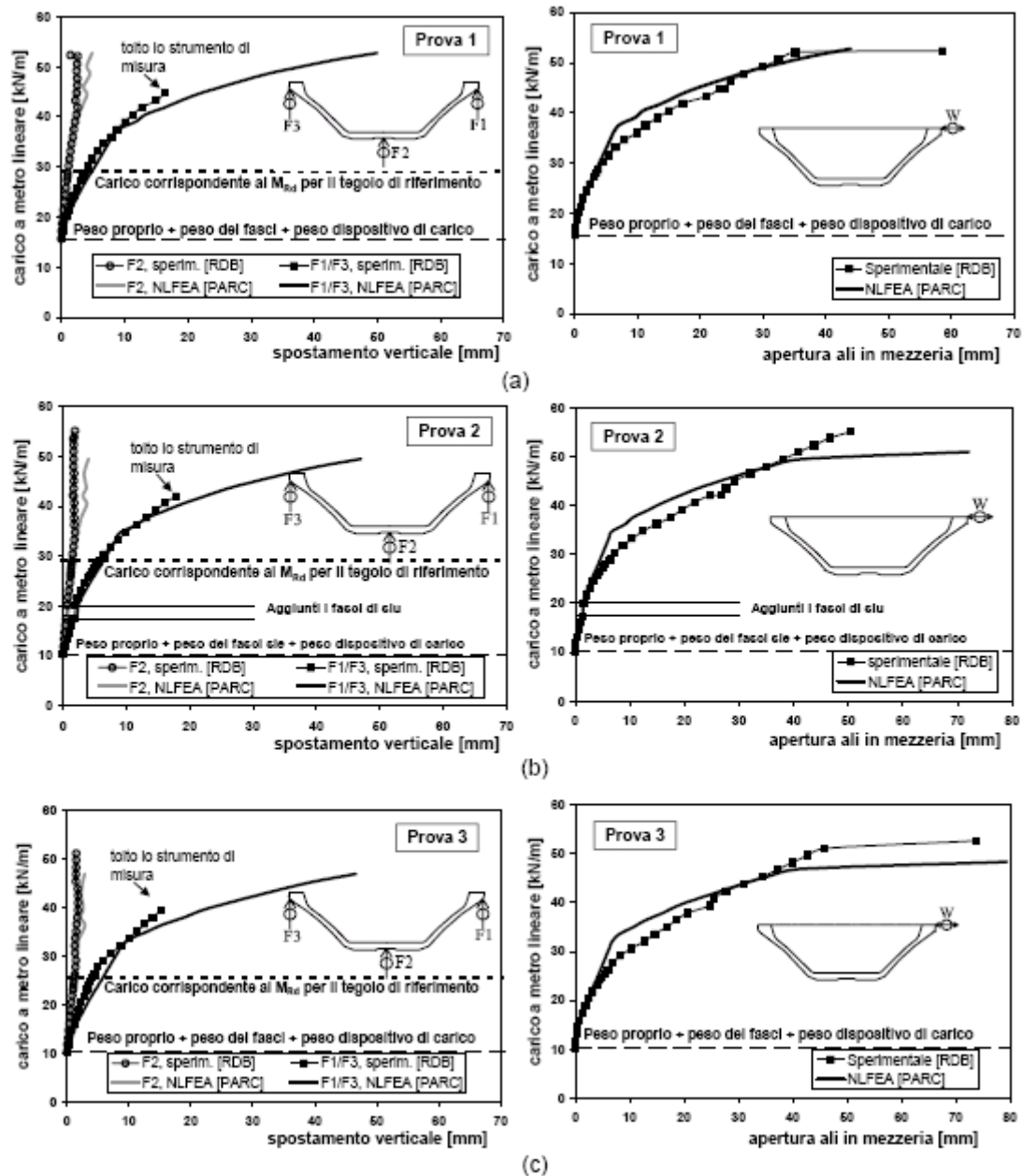


Figura 8. Confronti numerico-sperimentali in termini di carico a metro lineare agente sul tegolo – spostamento verticale nella sezione di mezzeria ai flessimetri F1, F2, F3 (vedi Figure 3, 6a) e di carico a metro lineare – apertura ali nella sezione di mezzeria osservati nelle prove (a) 1, (b) 2 e (c) 3.

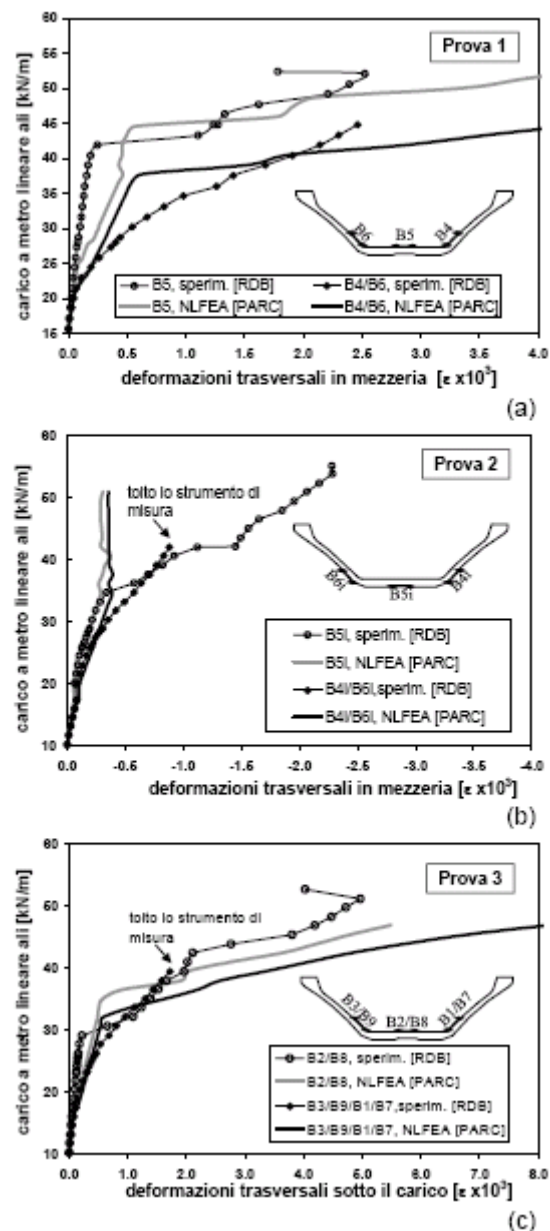


Figura 9. Confronti numerico-sperimentali in termini di carico a metro lineare-deformazioni trasversali registrate (a) all'estradosso della sezione di mezzeria B-B (Figg. 3, 6a), nella prova 1; (b) all'intradosso della sezione B-B (Figg. 3, 6a) nella prova 2; (c) all'estradosso delle sezioni A-A e C-C (Figg. 3, 6b).

In Figura 10 si riporta inoltre il quadro fessurativo numerico ottenuto all'estradosso dell'elemento per la prova 1, in cui appare evidente la formazione della fessura longitudinale all'attacco tra ala e soletta come osservato dalla sperimentazione (Figura 7).

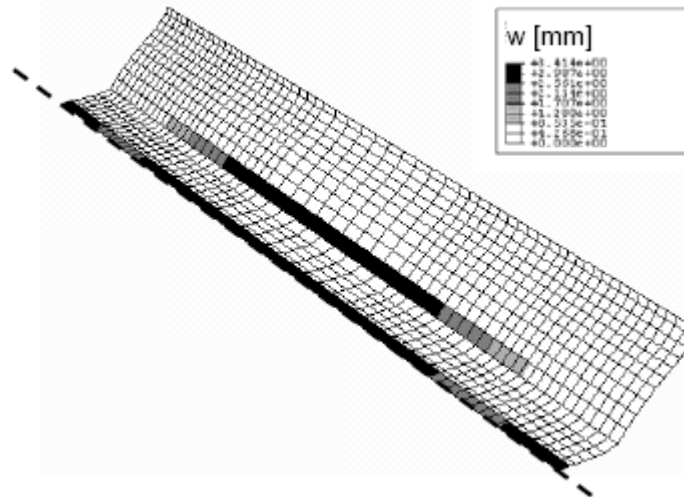


Figura 10. Quadro fessurativo numerico a rottura all’estradosso dell’elemento nella prova 1.

4. VERIFICA DEL COMPORTAMENTO LONGITUDINALE

Per la verifica del comportamento longitudinale del tegolo, è stata effettuata una prova “parziale”, con applicazione dei carichi fino al raggiungimento della sola condizione corrispondente al momento resistente della sezione. Per problemi tecnici e logistici, tale prova è avvenuta con il solo ausilio di fasci di barre per la simulazione dei carichi agenti tanto sulla soletta quanto sulle ali, pertanto rappresenta unicamente un primo livello di conoscenza sperimentale, in attesa della esecuzione di una prova più accurata a rottura con l’utilizzo di strumenti di applicazioni del carico e di misura più sofisticati.

La prova è stata realizzata presso lo stabilimento RDB di Caldiero (VR) e ha riguardato un tegolo MAGUS della lunghezza di 23.50 m, armato secondo lo schema riportato in Figura 1a. Il carico è stato applicato sull’elemento in modo da rappresentare la situazione di un impalcato caratterizzato da un interasse tra i tegoli di 4.5 m, con una larghezza dell’elemento interposto (ipotizzato nella soluzione leggera) di 2 m, sul quale il carico variabile rappresentato dalla neve è di 1.28 kN/m². Come nelle prove di verifica del comportamento trasversale, per questa situazione-tipo si sono calcolati i carichi agenti sul tegolo corrispondenti alla situazione di esercizio e alla situazione di progetto. Il carico effettivo presente sulla sezione trasversale dell’elemento, determinato per questi valori limite, è stato quindi suddiviso in modo proporzionale tra le ali e la soletta centrale, secondo lo schema di Figura 5.

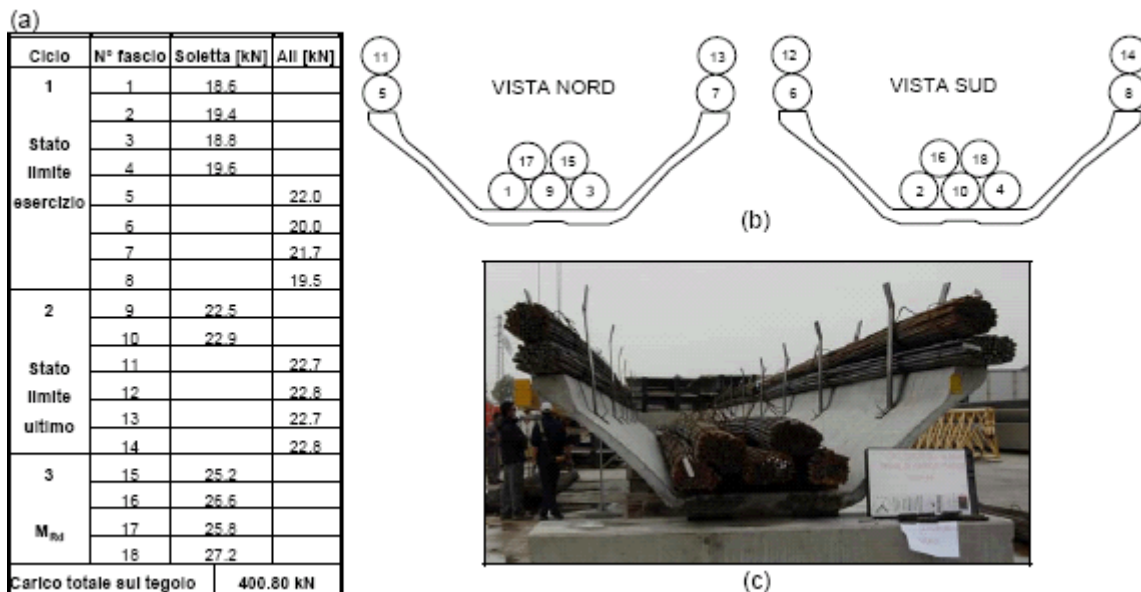


Figura 11. (a) Tabella con la sequenza di applicazione dei fasci sulla soletta e sulle ali con indicazione dei relativi pesi; (b) schema di applicazioni dei fasci sulla sezione trasversale; (c) sezione trasversale del tegolo MAGUS dopo l’applicazione di tutti i fasci di barre.

Sia la soletta che le ali sono quindi state caricate in fasi successive per mezzo di fasci di barre opportunamente predisposti, in grado di simulare un carico uniformemente distribuito. Lo

schema di carico e la sequenza di applicazione dei fasci sono riportati nella Figura 11. Ciascun fascio di barre ha una lunghezza pari a metà tegolo, quindi i fasci sono stati applicati sulle due metà del tegolo (denominate in Figura 11b lato "nord" e lato "sud") cercando di mantenere una disposizione il più possibile simmetrica.

In corrispondenza del raggiungimento del carico finale della prova sperimentale, il tegolo MAGUS ha mostrato la comparsa di fessure verticali di flessione nella sua parte centrale e l'inizio di fessure inclinate di tipo tagliante in prossimità degli appoggi (Figura 12).

E' stata inoltre predisposta una strumentazione di misura consistente in flessimetri meccanici posizionati all'intradosso della sezione di mezzeria e in corrispondenza degli appoggi, per verificare l'entità dei cedimenti. Associate alla prova, sono state valutate le resistenze a rottura di cubetti di calcestruzzo confezionati contemporaneamente al getto dell'elemento (avvenuto circa 15 mesi prima). Il valore medio della resistenza a compressione cubica è risultato pari a 79.65 MPa, mentre il valore medio della resistenza a trazione indiretta ottenuta mediante prova brasiliana su provini cilindrici è stato di 3.8 MPa. (a) (b)

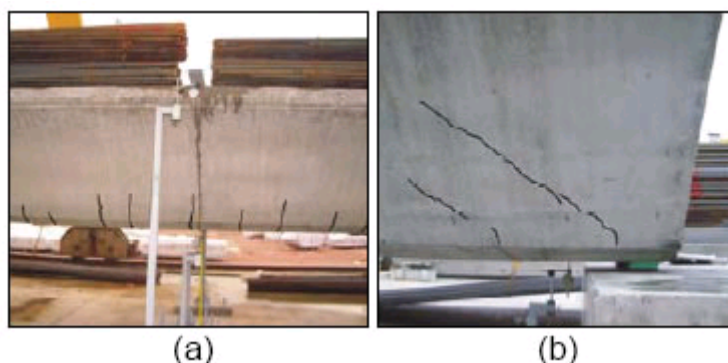


Figura 12. Quadro fessurativo in corrispondenza (a) della mezzeria (b) dell'appoggio del tegolo

Utilizzando le resistenze medie dei materiali, è stata modellata numericamente, con la medesima procedura non lineare già descritta, la prova sperimentale condotta, simulando tutte le fasi di applicazione dei fasci. L'analisi numerica è stata prolungata fino al raggiungimento della rottura teorica dell'elemento, che è risultata avvenire per un valore del carico superiore al momento resistente sezionale ed in corrispondenza del raggiungimento della deformazione ultima nel calcestruzzo.

Il confronto tra i risultati numerici e sperimentali è riportato nella successiva Figura 13. In ordinata viene riportato il carico totale agente sul tegolo, depurato dal peso proprio dell'elemento e dal peso delle barrette metalliche (4.8 kN) utilizzate per contenere i fasci sulle ali, mentre in ascissa si riporta l'abbassamento nella sezione di mezzeria.

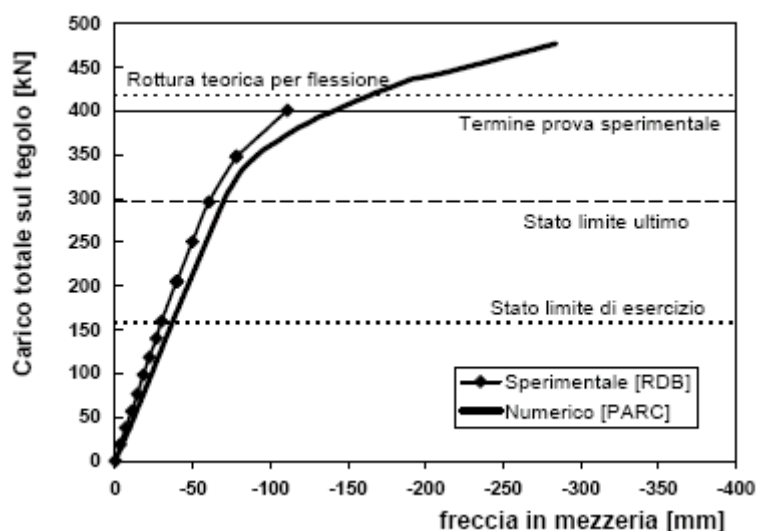


Figura 13. Confronto numerico-sperimentale in termini di carico totale - freccia in mezzeria per il tegolo MAGUS sottoposto a prova a flessione.

5. CONCLUSIONI

In questa nota si è presentata una procedura per la progettazione di tegoli per le coperture di grandi luci. Il corretto dimensionamento dell'armatura di questi elementi dovrebbe tenere in considerazione la presenza di tensioni sia trasversali che longitudinali. Questo è stato fatto ricorrendo ad analisi non lineari a rottura, dalle quali è stata determinata l'armatura

trasversale da utilizzare, in grado di fornire valori di crisi dell'elemento superiori a quelli corrispondenti al raggiungimento del momento resistente di calcolo della sezione. La procedura numerica, avvalorata anche da opportuni calcoli semplificati di tipo manuale, è stata verificata da prove sperimentali mirate allo studio del comportamento trasversale e longitudinale del tegolo. La prova per la verifica del comportamento longitudinale è stata, tuttavia, solo "parziale", in quanto l'elemento non è stato portato a rottura, ma è tuttavia prevista per il futuro una prova "completa" più accurata.

Grazie a queste verifiche analitiche, numeriche e sperimentali, la progettazione del tegolo a flessione secondo la teoria della trave, benché non del tutto corretta, può avvenire comunque in condizioni di sicurezza, a patto di avere preventivamente verificato, come qui fatto, il comportamento strutturale globale dell'elemento.

RINGRAZIAMENTI

Gli Autori ringraziano la società RDB per aver finanziato la ricerca e consentito la pubblicazione dei risultati qui presentati. Ringraziamenti particolari sono dovuti agli Ingg. Gianmatteo Bronzoni e Nello Visconti e ai Geomm. Massimo Bozzani e Matteo Riva.

6. BIBLIOGRAFIA

[01] B. BELLETTI, R. CERIONI, I. IORI, "A Physical Approach for Reinforced Concrete (PARC) membrane elements", Journ. of Struct. Engrg., ASCE, vol. 127, n. 12, pp. 1412-1426, 2001.

[02] ABAQUS/Standard, "User's Manual", vol.1, Version 6.4, Hibbit, Karlsson & Sorensen, Inc. 2004.

[03] B. BELLETTI, R. CERIONI, G. GAZZOLA, I. IORI, R. MERONI, "A Precast Prestressed Reinforced Concrete Roof Element", XVII International Conference BIBM, Istanbul, 1-4 Maggio 2002.

[04] B. BELLETTI, R. CERIONI, I. IORI, "Theoretical and Experimental Analyses of Precast Prestressed Concrete Roof Elements for Large Span", 1st International fib Congress 2002, Osaka, 12-19 Ottobre 2002.

[05] B. BELLETTI, "Analisi nonlineare agli elementi finiti di tegoli di copertura in conglomerato armato precompresso", Atti del 14° Congresso CTE, Mantova, 7-9 Novembre 2002.

[06] B. BELLETTI, P. BERNARDI, M. BOZZANI, G. TODESCHINI, N. VISCONTI, "A study for the design of thin-webbed prestressed roof elements", XVIII International Conference BIBM, Amsterdam, 11-14 Maggio 2005.

[07] B. BELLETTI, P. BERNARDI, A. GASPERI, "Some Remarks Concerning The Evaluation Of The Bearing Capacity Of Thin Walled Prestressed Concrete Roof Elements", 2nd International fib Congress, Napoli, 5-8, Giugno 2006.