

# Experimental and numerical investigation on an innovative wing-shaped precast floor element of exceptional span

## Studio sperimentale e numerico di un tegolo alare prefabbricato innovativo di luce eccezionale

B. Dal Lago<sup>1</sup>, A. Dal Lago<sup>2</sup>, U. Marchetti<sup>2</sup>, A. Basso<sup>3</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

<sup>2</sup> *DLC Consulting, Milan, Italy*

<sup>3</sup> *Antonio Basso prefabbricati, Treviso, Italy*

**ABSTRACT:** The push towards innovation of the Italian precast concrete industry led to the development of a special pre-stressed wing-shaped roof member with exceptional span and slenderness. The design of these elements presents several peculiarities, including the control of the deformative behaviour for a satisfactory service performance of the manufact. The element is particularly sensitive to the problem of deformation due to its long span combined with slenderness. The paper presents the main highlights of the conception of the element and the results of experimental tests performed on an element spanning 40,5 m. Both the deformative behaviour of the element in storage phase and its performance in flexure and combined flexure and torsion are experimentally and numerically investigated. The load tests have been performed through the use of 30 hydraulic jacks in parallel. The semi-analytical procedures used to catch the mechanical behaviour of the element in both serviceability and post-cracking phases are also described in detail. / La spinta innovativa della prefabbricazione italiana in calcestruzzo armato ha portato alla definizione di un tegolo alare di copertura precompresso con cavi aderenti pretesi di dimensioni e snellezza eccezionali. Il progetto di tali elementi presenta alcune importanti peculiarità. Infatti, luci elevate e grandi snellezze esaltano i problemi deformativi dell'elemento. La memoria presenta le caratteristiche salienti della concezione del componente strutturale, insieme ai risultati sperimentali ottenuti da prove su un elemento campione in scala reale di 40,5 m di luce. Vengono descritti sia il comportamento in fase di stoccaggio che il comportamento per flessione semplice e flesso-torsione. Questi ultimi sono ottenuti con l'esecuzione di prove sperimentali eseguite con l'uso di 30 martinetti idraulici in parallelo. Vengono inoltre descritte le procedure semi-analitiche utilizzate per cogliere numericamente il comportamento sperimentale dell'elemento sia in fase di esercizio che in fase di post-fessurazione.

**KEYWORDS:** precast concrete; long span; experimental testing; semi-analytical modelling / precast concrete; grande luce; prove sperimentali; modellazione semi-analitica

### 1 INTRODUZIONE

Nel periodo più duro della recente stagnazione economica, la Basso prefabbricati e DLC Consulting hanno deciso di puntare sull'innovazione, attraverso la produzione, già standard, di un innovativo tegolo alare precompresso in grado di raggiungere la luce massima di 42 metri con interasse di 6 metri e sovraccarico di neve pari a 180 kg/m<sup>2</sup>.

La memoria presenta le caratteristiche salienti del componente strutturale, il cui progetto è caratterizzato da alcune peculiarità, specialmente nei riguardi del suo comportamento deformativo, fondamentale per la corretta prestazione in opera del manufatto. Viene inoltre descritto lo sviluppo di una procedura numerica visco-elastica non lineare al passo che accoppia il calcolo dell'evoluzione della freccia con le perdite elastiche cumulate nel tiro dei cavi di precompressione per accorciamento dell'elemento per i fenomeni combinati di viscosità e ritiro del calcestruzzo e rilassamento dell'acciaio armonico. La

procedura è utilizzata al fine di cogliere il comportamento deformativo dell'elemento con maggiore accuratezza rispetto a quello calcolato con l'ausilio della formulazione chiusa fornita dall'Eurocodice 2 (EN 1992-1-1:2005). Le stime di perdita nei trefoli di precompressione secondo i due differenti metodi sono messe a confronto e commentate.

Sono inoltre presentati i risultati sperimentali di prove di carico effettuate sul medesimo elemento. E' stata effettuata una prova di carico per flesso-torsione al fine di simulare la fase transitoria di installazione delle strutture secondarie da un lato solo dell'elemento, studiando la capacità della sezione di non perdere la forma. I risultati sono messi a confronto con la simulazione numerica effettuata con un modello ad elementi finiti tridimensionali dell'intero manufatto. Sono infine presentati i risultati sperimentali di una prova di flessione eseguita con l'obiettivo di studiare i campi di comportamento pre e post-fessurativi dell'elemento.

I risultati sono confrontati con le simulazioni numeriche effettuate sulla base di un modello meccanico non lineare di trave. Tutte le analisi numeriche presentate nella memoria sono state effettuate dal Politecnico di Milano e da DLC Consulting.

## 2 TEGOLO BIGONDAL

L'elemento ha sezione corrente a V di altezza  $H=150$  cm e proiezione in pianta pari a 250 cm, con nucleo inferiore cavo, e consiste nell'ultima evoluzione del sistema di prefabbricazione denominato "ONDAL" (Dal Lago, 1988). Si stima che siano stati costruiti con tale sistema a partire dal 1988 tra i 10 e i 20 milioni di metri quadrati di coperture prefabbricate in Europa, Africa e America latina.

I tegoli BigOndal sono prodotti in apposite casseforme metalliche autoreagenti, costituite da un cassero di fondo e un controcassero ad apertura oleodinamica.

L'impianto è dotato di sistema di vibrazione e riscaldamento per la maturazione accelerata del calcestruzzo. Il sistema di precompressione è a fili aderenti ed a questo scopo vengono utilizzati trefoli da 0,6", area  $1,39\text{cm}^2$ , diametro nominale  $\phi = 15,2\text{mm}$ , vincolati sulle testate da morsetti di ancoraggio a cuneo. Sono utilizzati trefoli di minimo diametro disposti in modo da avere la sicurezza del posizionamento della rete. Il rilascio dei cavi, a maturazione avvenuta, è realizzato facendo fuoriuscire l'olio in pressione dai pistoni dal lato della testata di rilassamento. Per raggiungere una resistenza nel calcestruzzo sufficiente al rilascio dei cavi, esso viene additivato con superfluidificanti ed acceleranti di presa e sottoposto a trattamento termico per la maturazione accelerata.

I tegoli realizzano un sistema di copertura mediante l'abbinamento ad apposite coppelle. Nel loro uso comune vengono posati su luci nominali comprese fra 30 e 42 m, ad interasse 5m - 5,5m - 6m. Fra i tegoli sono poste lastre curve o a shed tipo sandwich.

L'elemento oggetto di studio nella presente memoria ha luce pari a 40,5 m, e la sua sezione corrente è illustrata in Fig. 1. La sezione è stata concepita a nucleo chiuso per incrementarne rigidità e resistenza torsionali. L'elemento, alto 1,5 m e largo 2,49 m, è rinforzato con 21 trefoli  $\Phi 15.2$  mm in acciaio armonico precompressi con uno sforzo iniziale pari a 1400 MPa, la cui posizione è illustrata in Figura 1. Vengono inoltre disposte armature lente sia trasversali che longitudinali. In Fig. 2 è mostrato il cassero armato prima del getto di calcestruzzo.

Le Figg. 3 e 4 mostrano un elemento simile a quello oggetto di prova in fase di stoccaggio e trasporto, rispettivamente. La fig. 5 mostra un edificio con copertura BigOndal in fase di assemblaggio.

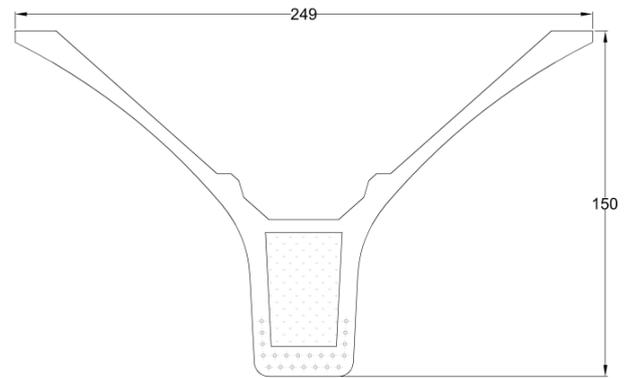


Figure 1. Cross-section of the BigOndal roof element – measures in cm / Sezione corrente del tegolo BigOndal oggetto di studio – misure in cm.

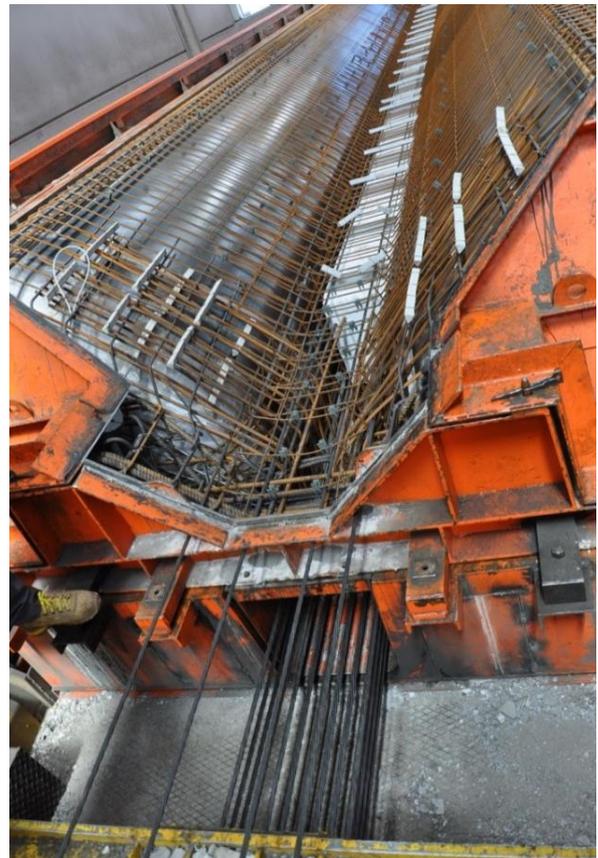


Figure 2. Particular view of the mould end with the disposition of mild and pre-stressing reinforcement / Particolare dell'estremità del cassero con la disposizione delle armature lente e di precompressione.



Figure 3. BigOndal element in storage / Elemento BigOndal in fase di stoccaggio.



Figure 4. BigOndal element in phase of transportation / Elemento BigOndal in fase di trasporto.



Figure 5. Assemblage of a precast industrial building with the BigOndal roof system / Assemblaggio di un edificio prefabbricato con copertura tipo BigOndal.

### 3 COMPORTAMENTO IN STOCCAGGIO

Il comportamento deformativo dei manufatti precompressi è un argomento complesso, frutto della combinazione di numerosi fenomeni fisici, quali le proprietà meccaniche e reologiche di calcestruzzo e acciaio, le condizioni di maturazione del calcestruzzo, il ritiro. L'argomento è stato oggetto di ricerca sin da tempi remoti (un compendio sul problema è fornito da Dal Lago A., 1973) e continua ad esserlo nel nuovo millennio (Barr & Angomas, 2010 e Tadors et al., 2011). Breccolotti & Materazzi hanno anche eseguito prove sperimentali confrontate con analisi progettuali su un elemento Ondal (2015). Di Prisco et al. (1996) hanno condotto sperimentazioni su elementi alari di diversa tipologia.

Il controllo di deformazione dei prodotti precompressi in fase di stoccaggio è una pratica importante per la certezza di qualità del manufatto e un possibile campanello di allarme di problemi tecnologici o progettuali. Il tegolo oggetto di studio è stato monitorato nella fase di stoccaggio nei confronti della freccia di mezzeria e dell'accorciamento assiale. In Fig.6 sono riportate le misurazioni effettuate. Si noti che tali misurazioni sono state effettuate in accordo con la pratica di produzione e sono effettuate con strumenti di bassa precisione, avendo come obiettivo un controllo generale.

Su spunto delle notevoli differenze osservate tra l'andamento della monta di progetto, calcolata in accordo con l'Eurocodice 2, e la monta sperimentale, è stata sviluppata una procedura di calcolo per riuscire

a cogliere il comportamento deformativo di elementi precompressi al passo in regime elasto-viscoso. Una trattazione simile adattata all'uso di armatura di precompressione in fibre di basalto è esposta in Dal Lago et al. (2016).

La formulazione fa riferimento all'EC2 parte 1-1 per la definizione del comportamento viscoso e del ritiro del calcestruzzo considerato confezionato con cemento di classe R, dello sviluppo di resistenza con processi di maturazione accelerata e del rilassamento dell'acciaio. La procedura è basata sulla valutazione dei fenomeni visco-elastici legati all'accorciamento dell'elemento e al suo conseguente profilo di deformazione trasversale. Tale non-linearità geometrica nasce dalle seguenti considerazioni:

- i cavi di precompressione generano un momento uniformemente distribuito che è linearmente dipendente con il tiro nei cavi stessi e che, se opportunamente dimensionato, porta ad un profilo di deformazione positivo con monta in mezzeria, soggetto a comportamento flessionale elasto-viscoso

$$v = f(\sigma_p, \varphi) \quad (1)$$

- un accorciamento assiale elasto-viscoso dell'elemento dovuto all'azione assiale della precompressione porta a perdite elastiche nei cavi stessi, che accorciandosi anch'essi diminuiscono il loro tiro,

$$\sigma_p = f(\varphi) \quad (2)$$

- poiché il comportamento del calcestruzzo è viscoelastico sia nei riguardi del profilo di deformazione trasversale che di quello longitudinale, e poiché il profilo di deformazione trasversale dipende dalla lunghezza complessiva dell'elemento, i due sono accoppiati.

$$v = f[\varphi, L(\varphi)] \quad (3)$$

Inoltre, per elementi precompressi la deformazione viscosa è particolarmente significativa poiché conseguente all'applicazione di carichi assiali, e conseguentemente trasversali, di notevole entità su calcestruzzo molto giovane.

Per descrivere il comportamento elasto-viscoso dell'elemento si fa riferimento alla ben nota formulazione generale (Migliacci & Mola, 1985) avente la seguente forma integrale:

$$v(t, t_0) = v_e(t) + \int_{t_0}^t v_e(t) \varphi'(t, t_0) dt \quad (4)$$

laddove la deformazione elasto-viscosa trasversale al tempo  $t$  viene espressa come somma di una componente di deformazione elastica istantanea al tempo  $t$  stesso cui va sommata la componente viscosa dipendente dalla derivata prima del coefficiente di viscosità  $\varphi(t, t_0)$ . In regime meccanico lineare, alle

deformazioni corrispondono direttamente profili di spostamento. Pertanto, nei riguardi del comportamento in stoccaggio di elementi precompressi, il primo termine ha in generale un andamento monotono decrescente, dovuto alla combinazione dei seguenti fenomeni:

- irrigidimento del materiale nel tempo per maturazione
- accorciamento elasto-viscoso dell'elemento e conseguenti perdite elastiche di tiro dei trefoli

mentre il secondo termine, se la componente elastica è sempre positiva, rappresenta un contributo sempre positivo, caratterizzato da un andamento monotono crescente.

La combinazione di questi fenomeni determina il comportamento deformativo dell'elemento, che può quindi anche subire un'inversione di tendenza, difficilmente spiegabile in termini matematici senza la corretta valutazione dell'evoluzione dell'accorciamento elasto-viscoso dell'elemento e della conseguente perdita elastica nei trefoli.

La metodologia sviluppata risolve per via numerica l'integrale sopra riportato attraverso una discretizzazione nel dominio del tempo, nelle ipotesi di deformazione sezionale piana e sezione omogenea.

In particolare, si considerano il comportamento longitudinale e trasversale dell'elemento come disaccoppiati. In conseguenza a tale ipotesi, è possibile formulare il calcolo della storia di deformazione longitudinale dell'elemento nel tempo, e successivamente la storia di deformazione trasversale in funzione dei risultati trovati.

La deformazione longitudinale dell'elemento pre-compresso, dipendente dalle deformazioni elastica, viscosa e da ritiro, può essere descritta con la seguente legge:

$$\varepsilon_{long}(t, t_0) = \varepsilon_{el}(t, t_0) + \varepsilon_{creep}(t, t_0) + \varepsilon_{cs}(t) \quad (5)$$

con

$$\varepsilon_{creep}(t, t_0) = \int_{t_0}^t \varepsilon_{el}(t) \varphi'(t, t_0) dt \quad (6)$$

e

$$\varepsilon_{el}(t, t_0) = \frac{\sigma_p(t, t_0) A_p}{E_{cmj}(t) A_c} \Phi_{anch} \quad (7)$$

laddove è possibile definire come segue lo sforzo medio nei trefoli armature da precompressione, tenendo conto delle perdite per rilassamento dell'acciaio, termica e per accorciamento:

$$\sigma_p(t, t_0) = \sigma_{p0} (1 - \Phi_{\chi} A_p \frac{z_{cp}^2}{I_{id}}) - \Delta\sigma_{pr}(t) - \frac{\Delta P_{\theta}}{A_p} + \quad (8)$$

$$- \varepsilon_{long}(t, t_0) E_p A_p$$

con il fattore di ancoraggio  $\Phi_{anch}$  che può essere definito semplicemente in termini medi per distribuzione di guaine e sforzo iniziale di tensione dei cavi omogenei come segue:

$$\Phi_{anch} = \sum_p \left( L - L_{anch,p} \frac{\sigma_{0,p}}{mean(\sigma_0)} \right) \quad (9)$$

e il fattore di perdita per curvatura pesato  $\Phi_{\chi}$  che tiene conto della combinazione della flessione dovuta alla pre-compressione e ai carichi dovuti al peso proprio, cui corrispondono i momenti in mezzeria  $M'$  e  $M^*$ , rispettivamente. Il fattore  $\Phi_{\chi}$  è sempre inferiore all'unità.

$$\Phi_{\chi} = \frac{v_{max,p}}{v_{max,q+p}} = \left( 1 + \frac{5 M^*}{6 M'} \right)^{-1} \quad (10)$$

Si evidenzia pertanto la non linearità dell'equazione integrale, dovuta alla presenza dell'incognita  $\varepsilon_{long}$ .

La soluzione non è disponibile in forma chiusa, e l'equazione può essere risolta sulla base di tecniche numeriche. E' comunque possibile identificare una soluzione a variabili indipendenti approssimata che stimi la perdita per accorciamento dell'elemento, irrigidendone fittiziamente la deformabilità assiale. Si ritiene che tale semplificazione, dopo aver opportunamente corretto i termini dell'equazione, introduca errori trascurabili.

In Fig. 6 sono riportate le curve numeriche di deformazione assiale e trasversale in mezzeria ottenute con tale metodo, e sono poste a confronto con le misurazioni sperimentali. Il comportamento assiale è ben colto dalla curva numerica, mentre il comportamento trasversale presenta una tendenza ad un plateau comune con i dati sperimentali, ma con una differenza in modulo. Si noti che la differenza tra i valori di soglia numerico e sperimentale, pari a circa 14 mm, può apparire grande in termini di confronto, ma rappresenta circa un tremillesimo della luce dell'elemento.

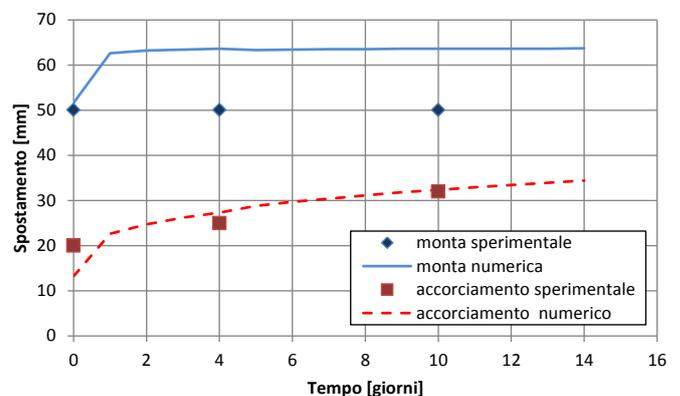


Figure 6. Comparison of experimental measurements and numerical predictions of mid-span deflection and element shortening over time / Confronti tra dati sperimentali e stime numeriche di monta in mezzeria e accorciamento nel tempo.

Parametro fondamentale per la corretta valutazione della monta in mezzeria è la tensione nei cavi di precompressione.

L'EC2 parte 1-1 fornisce una formula chiusa per il calcolo delle perdite elastiche e differite, riportata nel seguito:

$$\Delta\sigma_{p,c+s+r}(t,t_0) = \frac{\varepsilon_{cs}E_p + 0,8\Delta\sigma_{pr} + \frac{E_p}{E_{cm}}\varphi(t,t_0)\sigma_{c,Qp}}{1 + \frac{E_p}{E_{cm}}\frac{A_p}{A_c}\left(1 + \frac{A_c}{I_c}z_{cp}^2\right)}[1 + 0,8\varphi(t,t_0)] \quad (11)$$

Il progetto deformativo dell'elemento, eseguito in accordo con tale formulazione semplificata, fornisce una previsione che si discosta sensibilmente dalle misurazioni sul campo, con valori di monta maggiori rispetto alle misurazioni e una tendenza crescente invece che di plateau. La curva che rappresenta la perdita di tensione temporale nei cavi al livello del baricentro della precompressione con riferimento all'elemento oggetto di studio è illustrata in Fig. 7. Essa è confrontata con la curva ottenuta per via numerica con la procedura di integrazione al passo esplicita. Si noti che la formulazione dell'EC2 parte 1-1 sottostima sensibilmente la perdita di tensione nei cavi. Al momento di esecuzione della prova, effettuata dopo circa due settimane di maturazione, la perdita di tensione media stimata dalla formulazione esplicita è del 15,0%, mentre la formulazione semplificata fornisce una perdita pari all'11,7%.

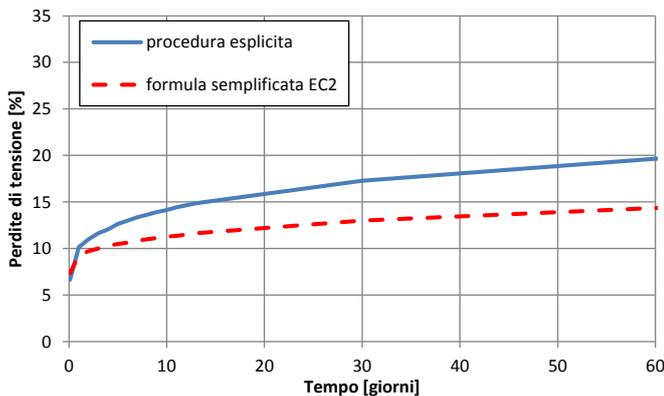


Figure 7. Numerical prediction of the evolution over time of the pre-stress losses: comparison between explicit formulation and EC2 simplified one / Calcolo dell'evoluzione temporale delle perdite di tensione: confronto tra la formulazione esplicita e quella semplificata dell'EC2.

## 4 PROVE DI CARICO

### 4.1 Impianto di prova

Un tegolo BigOndal di luce pari a 40,5 m è stato sottoposto a prova di carico presso lo stabilimento della

Antonio Basso Prefabbricati nel mese di giugno 2015.

La prova di carico aveva la finalità di verificare le proprietà inerziali dell'elemento sia nei confronti della flessione semplice che della flessione-torsione e di trovare il carico di prima fessurazione, sulla base del quale è possibile stimare lo stato tensionale dei trefoli di precompressione dopo le perdite subite durante la fase di stoccaggio.

La prova di carico è stata effettuata con l'ausilio di 30 martinetti idraulici vincolati in corrispondenza dell'estremità delle ali e in centro in 10 posizioni equidistanti lungo l'elemento. Fasci di armatura in acciaio posti inferiormente all'elemento hanno costituito il contro-peso di riscontro del sistema di carico. Un trasduttore di spostamento è stato posizionato in corrispondenza di ciascun martinetto, con l'aggiunta di ulteriori trasduttori orizzontali per misurare lo spostamento reciproco delle estremità delle ali.

Le prove sono state condotte dalla società 4EMME (Altinier, 2015).

### 4.2 Prova a flessione-torsione

La prima prova svolta è stata quella di flessione-torsione, effettuata attraverso l'applicazione del carico alla sola fila di martinetti di un'ala. In questo modo, le forze verticali sono applicate con un'eccentricità pari alla metà della larghezza dell'elemento rispetto al suo baricentro.

La prova ha l'obiettivo di simulare il posizionamento degli elementi strutturali di completamento della copertura, che vengono tipicamente completati una campata per volta, e studiare la stabilità sezionale dell'elemento.

Sotto un carico massimo distribuito equivalente pari a 1,66 kN/m, i trasduttori hanno rilevato degli spostamenti verticali in mezzeria pari a 8 – 13 – 18 mm ed un allontanamento delle ali limitato a mezzo millimetro. Ciò mostra la tendenza della sezione alla piena collaborazione.

Un modello elastico ad elementi finiti solidi dell'intero manufatto è stato sviluppato in ambiente Straus7 (Strand7 Pty Ltd., 2010) per lo studio del fenomeno. Il profilo deformativo della sezione di mezzeria della trave vincolata torsionalmente agli appoggi è illustrato in Fig. 9.

Utilizzando un modulo elastico medio del calcestruzzo pari a 37 GPa, associato ai valori di resistenza sperimentali ottenuti allo schiacciamento di provini cubici avvenuto contestualmente alla prova, gli spostamenti ottenuti numericamente, pari a 12 – 17 – 21 mm nei punti monitorati, sono tendenzialmente in accordo con quelli sperimentali, pur identificando una maggior deformabilità. Ciò conferma ulteriormente la stabilità sezionale dell'elemento.



Figure 8. Loading system consisting of 3 jacks on 10 sections, placed at edges and centre / Disposizione dei martinetti di applicazione del carico in 10 sezioni dell'elemento su 3 punti ciascuna, ovvero estremità delle ali e centro.

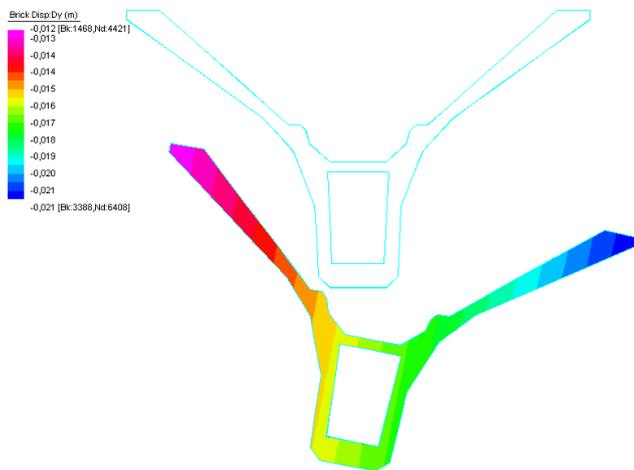


Figure 9. Numerical simulation of the combined flexural-torsional test: displaced shape of the mid-span section / Simulazione numerica della prova di flessio-torsione: deformata della sezione di mezzeria.

#### 4.3 Prova a flessione

La prova a flessione pura è stata effettuata applicando a tutti i martinetti la medesima pressione.

Il grafico sperimentale illustrato in Fig. 10 mostra l'andamento sperimentale della freccia, mediata rispetto alle tre posizioni di misura, rispetto al carico distribuito equivalente applicato. Sono stati effettuati due cicli di carico e scarico.

Dopo un tratto elastico con tutte le sezioni dell'elemento interamente compresse, l'elemento è stato portato a fessurazione per un carico equivalente di circa 10 N/mm, corrispondente al carico SLE di progetto in combinazione rara, dopodiché la curva sperimentale mostra una tendenza di diminuzione di rigidità, dovuta alla diffusione del tratto fessurato dalla mezzeria verso gli appoggi.

In Fig. 11 è riportata una fotografia della mezzeria dell'elemento visto dal basso con evidenziate le fessure flessionali. Una fessura pseudo-orizzontale per taglio-appensione è stata identificata vicino agli appoggi, in corrispondenza del cambio di sezione, come mostrato in Fig. 12.

Si noti che le fessure osservate sono tutte di ben modesta apertura e che sono state individuate a fatica ad occhio nudo.

Il test è stato interrotto ad un carico massimo equivalente di 14,0 N/mm, circa pari al carico SLU di progetto in combinazione fondamentale, a causa del sollevamento dei fasci di contrasto. La massima apertura delle ali è stata misurata pari a 13 mm in mezzeria.

L'elemento, dopo la fase di scarico, ha completamente richiuso le fessure apritesi, il che suggerisce che durante la prova i trefoli di pre-compressione non hanno raggiunto snervamento.

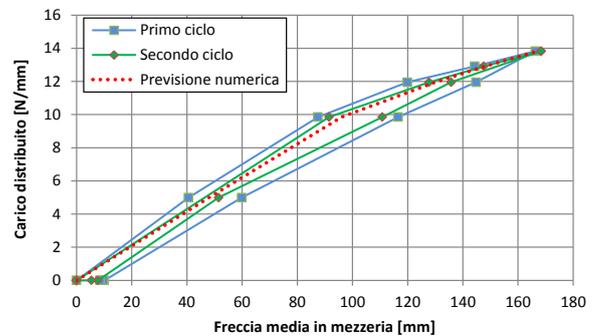


Figure 10. Flexure test: distributed load vs mid-span deflection compared with the numerical prediction / Prove a flessione: grafico carico distribuito – spostamento confrontato con la previsione numerica.



Figure 11. Marked crack pattern for flexure in element the mid-span region, distributed according to the stirrup spacing / Fessurazione evidenziata distribuita con il passo delle staffe per flessione nell'intorno della mezzeria dell'elemento.



Figure 12. The marked horizontal crack developed at the element ends for shear-hang starting from the section of discontinuity / La fessura orizzontale evidenziata si è sviluppata all'appoggio per taglio-appensione a partire dalla discontinuità del cambio di sezione.

E' stato messo a punto un modello numerico in grado di cogliere la non linearità meccanica con l'obiettivo di verificare i risultati sperimentali. Il modello si basa sull'identificazione del diagramma momento-curvatura non lineare della sezione corrente in calcestruzzo armato precompresso. A tal fine sono stati descritti i comportamenti strutturali del calcestruzzo con un modello di Sargin (Sargin, 1971) senza effetto di confinamento, dei trefoli di precompressione in acciaio con un modello elasto-incrudente e delle armature in acciaio dolce con modello elasto-parabolico. Le proprietà meccaniche del calcestruzzo, dichiarato in fase di produzione di classe C45/55, sono state calcolate basandosi su una resistenza cubica maggiore, pari a 70 MPa, alla luce della maggiore resistenza misurata con la rottura di provini cubici. Sono state considerate le proprietà caratteristiche degli acciai.

In Fig. 13 sono illustrate le curve comportamentali con differenti livelli di perdite medie a livello dei cavi di precompressione, ottenute attraverso la risoluzione numerica degli equilibri alla rotazione e alla traslazione della sezione.

Si noti che, come noto, le perdite di precompressione non influiscono sulla resistenza e sulla duttilità dell'elemento per via della plasticità dell'acciaio. Ben diverso è invece il momento di fessurazione, in particolare decrescente con le perdite, che costituisce un importante parametro per la definizione del comportamento in esercizio del manufatto.

Il momento di fessurazione atteso per il manufatto con perdite pari al 15%, come stimate nel paragrafo precedente dopo 14 giorni di maturazione, è pari a circa 4000 kNm. Per un carico distribuito, a tale valore di momento massimo in mezzeria corrisponde un carico distribuito pari a  $q_{fess} = 8M_{fess}/L^2 = 19,5$  N/mm. Nel diagramma con i risultati della prova di flessione si è notato un flesso, corrispondente al raggiungimento della fessurazione, per un carico di circa 10 N/mm (Fig. 10). Sottraendo al carico totale il contributo del peso proprio, già

presente all'inizio della prova, pari a 10,0 N/mm, si nota che il carico di fessurazione è colto con sufficiente precisione. Ciò conferma la stima numerica delle perdite pari al 15%.

La curva carico – spostamento numerica è sovrapposta a quella sperimentale in Fig. 10 e mostra un andamento simile.

Infine, la relazione momento – curvatura non lineare è stata utilizzata per la derivazione del profilo di deformazione dell'elemento, attraverso l'integrazione diretta dell'equazione differenziale di 2° ordine della linea elastica. In Fig. 14 è illustrato il profilo deformativo corrispondente all'applicazione del carico di 24 N/mm, somma dei contributi del peso proprio e del carico applicato con il sistema di carico, depurato del contributo elastico del solo peso proprio.

Si noti la buona corrispondenza con i risultati delle prove sperimentali, laddove oltre alla freccia di mezzeria sono state misurate le frecce ai quarti della luce. Si precisa che i valori sperimentali sono stati depurati degli esigui spostamenti verticali agli appoggi, anch'essi misurati. L'elemento non risulta infatti significativamente influenzato da problemi di stabilità sezionale, fenomeno impossibile da cogliere con la modellazione a trave proposta (eventualmente studiabile con modellazioni 3D non lineari).

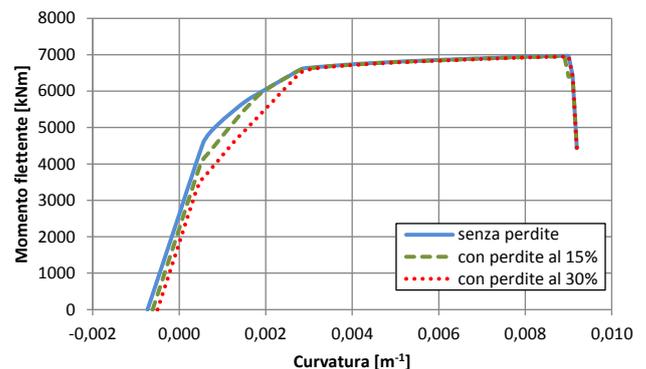


Figure 13. Non-linear bending moment vs curvature diagram of the BigOndal cross section / Diagramma momento – curvatura non lineare della sezione BigOndal.

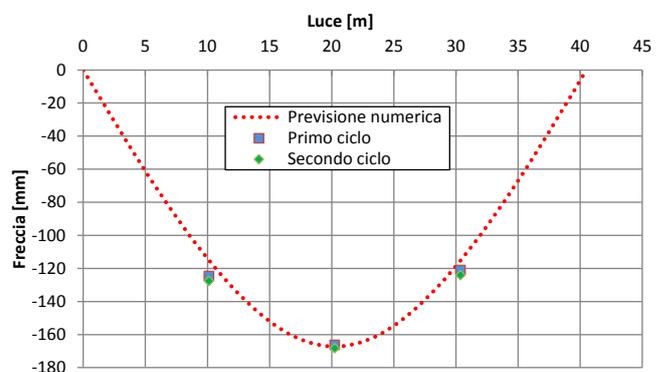


Figure 14. Flexure tests: experimental deflections compared with the numerical predictions / Prove a flessione: deformata sperimentale confrontata con la previsione numerica.

## 5 CONCLUSIONI

An innovative wing-shaped pre-stressed floor element having exceptional span has been engineered through a collaboration between Antonio Basso prefabbricati and DLC Consulting. The technological features of the element have been presented. The experimental results of the monitoring of deformation during storage and of static flexural-torsional and flexural load tests carried out on a 40,5 m long element are presented in detail. The results from the load tests show that the element, even if characterised by a relevant slenderness, is not subjected to relevant sectional distortion under both loading conditions. Concerning the serviceability behaviour, as a consequence of the scarce accuracy of the predictions calculated in accordance with the simplified formulation from EC2, an explicit formulation has been derived on the basis of a visco-elastic mechanical model taking into account the reciprocal influence of the various contributions that determine the evolution of pre-stress losses over time. Such a model is able to catch the experimental behaviour.

A non-linear sectional mechanical model has been implemented to estimate the cracking moment and the pre and post-cracking structural behaviour of the element, confirming the estimation of the pre-stress losses and providing adequate comparison with the experimental results.

Future developments of the research may concern the derivation of advanced numerical techniques able to solve the non-linear fully coupled visco-elastic problem.

Un innovativo tegolo alare precompresso di luce eccezionale, frutto della collaborazione tecnica tra Antonio Basso prefabbricati e DLC Consulting, è stato presentato. I risultati sperimentali relativi a monitoraggio deformativo in esercizio e prove di carico per flesso-torsione e flessione semplici su un elemento di luce pari a 40,5 m sono descritti in dettaglio. Tali risultati mostrano che l'elemento, pur presentando una notevole snellezza, è scarsamente soggetto ad effetti di distorsione sezionale in entrambi i casi di sollecitazione. In conseguenza dello scarso confronto dei profili di deformazione sperimentali e teorici progettuali, calcolati in accordo con la formulazione dell'Eurocodice 2 parte 1-1, che pare sottostimare le cadute di tensione, è stato sviluppato un modello meccanico elasto-viscoso integrale esplicito. Tale modello coglie con maggiore precisione i risultati sperimentali. E' stato inoltre implementato un modello con non linearità meccanica per la stima del momento di fessurazione dell'elemento e del profilo

deformativo in campo pre e post fessurativo. I confronti dei dati numerici con quelli sperimentali confermano la stima delle perdite di carico a livello dei trefoli di precompressione e la predicibilità del comportamento deformativo dell'elemento.

Possibili sviluppi futuri della ricerca consistono nell'approfondimento di tecniche numeriche avanzate in grado di risolvere l'equazione generale accoppiata del problema elasto-viscoso.

## RINGRAZIAMENTI

Il dott. Francesco Foti del Politecnico di Milano è ringraziato per il suo contributo alla definizione del modello elasto-viscoso. Si ringraziano inoltre i tecnici della Basso prefabbricati ed i progettisti della DLC Consulting che hanno collaborato al lavoro. Si ringrazia la società 4 EMME per l'esecuzione delle prove sperimentali.

## REFERENCES

- Altinier, D. 2015. Prova di carico su tegolo tipo BigOndal. Relazione di prova sperimentale.
- Barr, P. J., & F. Angomas. 2010. Differences between Calculated and Measured Long-Term Deflections in a Prestressed Concrete Girder Bridge. *Journal of Performance of Constructed Facilities*, 24(6): 603–609.
- Breccolotti, M. & A. M. Materazzi. 2015. Prestress losses and camber growth in wing-shaped structural members. *PCI Journal*, 60 (1): 98–117.
- Dal Lago, A. 1973. Progetto e verifica della deformazione negli elementi precompressi. *LIPE - L'Industria Italiana Per l'Edilizia*, 4-5-6, 40 pp.
- Dal Lago, A. 1988. Indagine teorico sperimentale sulla durabilità di strutture in calcestruzzo a ridotto spessore (strutture Ondal) impiegando un additivo liquido a base di silice fume. *Proceedings of the 7<sup>th</sup> CTE Congress*, Venezia (Italy), November 4-6.
- Dal Lago, B., Ferrara, L., Taylor, S., Sonebi, M., Deegan, P., Kelly, G. & Pattarini, A. 2016. Design of steel-free prestressed reinforced concrete slabs: theory and experimentation. *Proceedings of ACI Italy Chapter: The New Boundaries of Structural Concrete 2016*, Capri, Italy, 29<sup>th</sup> September - 1<sup>st</sup> October, Paper No. 11.
- di Prisco, M., Toniolo, G., Belletti B. & Pastorino, M. 1996. Analisi sperimentale su voltina con profile alare a nucleo. *Proceedings of the 11<sup>th</sup> CTE Congress*, Napoli, Italy, 7<sup>th</sup> - 9<sup>th</sup> November, 413-422.
- EN 1992-1-1:2005. *Eurocodice 2: Progettazione delle strutture di calcestruzzo. Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici*. European Committee for Standardization, Brussels, Belgium.
- Migliacci, A. & Mola, F. 1985. *Progetto agli stati limite delle strutture in c.a.*, parte seconda, Masson editore.
- Sargin, M. 1971. *Stress-strain relationship for concrete and analysis of structural concrete sections*. Study n. 4, Solid Mechanics Division, University of Waterloo, Canada.
- Strand7 Pty Limited. 2010. *Using Strand7 (Straus7) – introduction to the Strand7 finite element analysis system*, edition 3.
- Tadros, M. K., F. Fawzy & K. E. Hanna. 2011. Precast, Prestressed Girder Camber Variability. *PCI Journal*, 56(1): 135–154.