

VERIFICA DELLA CAPACITA' RESISTENTE AL TAGLIO DI SOLAI ALVEOLARI

MARICA DELLA BELLA,
Gruppo Centro Nord SPA, Cerano (NO)
ALESSANDRO PALERMO,
Politecnico di Milano

SUMMARY

Prestressed hollow core slabs are one of the most utilised products of the precast concrete industry. In fact, they are used for different types of structures, such as industrial and commercial buildings, car parks and residential housings.

The massive production of prestressed hollow core slabs has raised the attention of the European Committee in terms of standardization of the production process and quality control of the product.

In particular, through the European Committee for Standardization (CEN), a special task group worked on the shear failure testing procedure and the analytical verification adopting the expressions proposed by the Eurocode 2 for shear failure.

Based on an extensive database obtained from experimental shear tests, made by the most important European precast companies, the authors herein carry out an accurate comparison of the Eurocode 2 expressions with the experimental results. The results confirm a not good precision in case of shear-tension failure of the hollow core web.

The authors propose, through two additional coefficients, a modification of the Eurocode 2 expression and illustrate an expression developed by Yang in 1994. Both the expressions confirm a good agreement with the experimental results and have been already inserted in the Annex J of the standard EN1168 for precast hollow core slabs.

1 INTRODUZIONE

La produzione di solai alveolari nella prefabbricazione ha un ruolo di primaria importanza coprendo circa il 10% dell'intero mercato italiano di solai e il 20% del mercato dei solai prefabbricati.

L'impiego di tali elementi strutturali come orizzontamenti e' molto diversificato: si passa dall'utilizzo per elementi di copertura in edifici

industriali, a solai per edifici residenziali, commerciali, scuole, parcheggi, etc.

La versatilità di tali solai e' testimoniata dalle più disparate soluzioni strutturali adottate, come l'impiego, con o senza getto di una cappa collaborante armata, su travi prefabbricate in calcestruzzo precompresso e non, su strutture metalliche o su travi e muri gettati in opera.

Recentemente è stato approvato dal CEN (Comitato Europeo per la Standardizzazione) e pubblicata in Gazzetta Ufficiale Europea la norma EN1168, che costituisce la norma di prodotto per la marcatura CE dei solai alveolari che diverrà obbligatoria da Marzo 2008.

Questa norma, frutto di numerosi incontri tra esperti del settore ed aziende di prefabbricazione, riprende i metodi di calcolo dell'Eurocodice 2 (EN1992-1-1:2005) [01], adottando opportuni accorgimenti o modifiche in alcuni casi specifici.

In particolare, nell'ambito del gruppo di lavoro CEN/TC229/WG1 interessanti indagini e ricerche sono stati condotti per verificare la validità delle formule di calcolo di resistenza al taglio riportate nell'Eurocodice 2 per questo particolare prodotto, come riportato nell'allegato J della norma EN1168 [02].

Gli autori hanno analizzato un campione di circa 140 prove sperimentali su solai alveolari fornite da diverse aziende produttrici a livello europeo, con lo scopo di verificare le espressioni (6.2a) e (6.4) dell' Eurocodice 2, distinguendo le due possibili modalità di collasso ("taglio-flessione" Eq. 6.2a, o "taglio-trazione" Eq. 6.4) a seconda che l'elemento sia fessurato o no per momento flettente nella zona critica di rottura per taglio.

Dall'indagine effettuata si sono trovati interessanti risultati, in particolare nel caso di rotture degli elementi per "taglio-trazione", ovvero in condizione di sezione non fessurata: l'espressione 6.4 dell'Eurocodice 2, applicata "tout court" ai solai alveolari senza tenere conto della particolare geometria della sezione trasversale, risulterebbe infatti non a favore di sicurezza per circa il 25% dei casi.

Infine gli autori, sulla base del campione sperimentale sopra menzionato, propongono una modifica dell'espressione 6.4 dell'Eurocodice 2, ed illustrano brevemente una formula alternativa proposta da Yang [03] per la valutazione della rottura per "taglio-trazione" degli elementi alveolari. Entrambe le espressioni di calcolo sono state già inserite nella norma EN1168 [02].

2 CAPACITA' RESISTENTE AL TAGLIO DEI SOLAI ALVEOLARI

2.1 STATO DELL'ARTE

Notevoli ricerche si sono condotte sul comportamento a rottura per taglio delle travi in cemento armato e verifiche delle formule proposte dai codici sono state effettuate sulle più significative prove sperimentali condotte negli ultimi 30 anni, come riportato in [04]. Per quanto concerne invece gli elementi prefabbricati pretesi, questa indagine e verifica e' tuttora in corso.

La diversa geometria di sezione e i differenti rapporti meccanici di armatura rispetto alle tradizionali travi in cemento armato rendono necessari degli ulteriori controlli delle espressioni proposte dai codici e delle attente indagini sulle differenti modalità di rottura per taglio di questa tipologia di elementi strutturali.

Nell'ultimo decennio, indagini sperimentali e numeriche [05], [06] hanno evidenziato che la più ricorrente rottura per taglio si ha con la crisi per trazione in prossimità dell'anima con l'elemento strutturale non fessurato flessionalmente. Oltre all'intensificazione delle campagne sperimentali da parte di ricercatori ed esperti del settore [07], verifiche delle espressioni esistenti proposte dall'Eurocodice 2 con risultati sperimentali e proposte di nuovi approcci di calcolo sono state rispettivamente sviluppate in [05] e [03], [08].

2.2 MODALITA' DI ROTTURA PER TAGLIO

Lo schema strutturale a semplice appoggio dei solai alveolari semplifica l'indagine delle modalità di collasso che si riducono a rottura per momento flettente della sezione di mezzera o per taglio in prossimità degli appoggi, non avendosi infatti gli effetti di eventuali momenti negativi dovuti a continuità od effetti torsionali.

Un'esauriente descrizione delle modalità di rottura e' riportata in [09], [10], [11]. In particolare, i tipici meccanismi di rottura per taglio si possono considerare principalmente quattro: collasso dell'elemento prefabbricato per perdita di ancoraggio dei trefoli, rottura per taglio-flessione, ovvero zona di rottura già fessurata per effetto della sollecitazione flessionale (Figura 1), rottura per taglio nell'anima per trazione, ovvero "taglio-trazione" (Figura 2) e per compressione dell'anima.

Come riportato in Figura 1, la rottura per "taglio-flessione" e' tipicamente caratterizzata da un meccanismo a pettine che si forma a partire dalla prima fessura flessionale, mentre la rottura

per "taglio-trazione" da un meccanismo ad arco con formazione di un'unica fessura passante inclinata a partire dal coltello di carico all'appoggio (Figura 2). Questi due tipi di meccanismi, sono quelli più ricorrenti per solai alveolari prefabbricati.



Figura 1. Rottura per "taglio-flessione"



Figura 2. Rottura per "taglio-trazione"

2.3 FORMULAZIONI DELL'EUROCODICE

L'Eurocodice 2 [01], come riportato nel paragrafo 6.2.2. (EN 1992-1-1:2004), utilizza due differenti espressioni per valutare rispettivamente il "taglio-flessione" (Eq. 6.2a) ed il "taglio-trazione" (Eq. 6.4) in elementi senza armatura al taglio.

La prima espressione può essere utilizzata indistintamente sia per elementi in cemento armato che per elementi precompressi, la seconda solo per elementi precompressi in semplice appoggio.

Si riassume brevemente nei paragrafi 2.3.1 e 2.3.2. le formule proposte dall'Eurocodice 2.

2.3.1 Taglio-flessione – Eq. 6.2a

L'eq. (1) rappresenta l'espressione 6.2a riportata nell'Eurocodice 2 per la valutazione di rottura per taglio nell'ipotesi di elemento strutturale già fessurato flessionalmente.

$$V_{Rd,c} = \left[C_{Rd,c} k (100 \rho_1 f_{ck})^{1/3} + k_1 \sigma_{cp} \right] b_w d \quad (1)$$

f_{ck} [MPa], rappresenta la resistenza cilindrica caratteristica a compressione del calcestruzzo, k coefficiente legato all'altezza utile d dell'elemento, ρ_1 la percentuale di armatura dei trefoli nella zona tesa, σ_{cp} lo sforzo di assiale (per esempio quello dovuto alla forza di precompressione N_{Ed}).

$$k = 1 + \sqrt{\frac{200}{d}} \leq 2; \quad \text{con } d \text{ in mm};$$

$$\rho_1 = \frac{A_{sl}}{b_w d} < 0,02;$$

$$\sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c} < 0,2 f_{cd}.$$

con $C_{Rd,c} = 0,18$; $k_1 = 0,15$.

2.3.2 Taglio-trazione – Eq. 6.4

L'espressione 6.4 dell'EC2, rappresentante il meccanismo di rottura taglio-trazione, e' riportata nell'Eq. (2):

$$V_{Rd,c} = \frac{l \cdot b_w}{S} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \alpha_1 \sigma_{cp} f_{ctd}} \quad (2)$$

con

$$\alpha_1 = \frac{l_x}{l_{pt2}}; \quad \sigma_{cp} = \frac{N_{Ed}}{A_c}.$$

dove S , l sono il momento statico e momento di inerzia della sezione non fessurata, l_x distanza della sezione considerata dal punto iniziale, l_{pt2} massima lunghezza di aderenza del trefolo e σ_{cp} lo sforzo di precompressione baricentrico dovuto alla forza di precompressione totale N_{Ed} .

La resistenza a trazione di progetto f_{ctd} e' calcolata secondo EN 1992-1-1:2004 [01], par. 3.1.3 e le prescrizioni riportate nell' allegato J di EN1168:2005 A/C [02], ovvero:

$$f_{ctd} = f_{ctk,0,05} = 0,7 f_{ctm}$$

con

$$f_{ctm} = \begin{cases} 0,3 \cdot f_{ck}^{(2/3)} \leq C50/C60 \\ 2,12 \cdot \ln(1 + (f_{cm}/10)) > C50/C60 \end{cases}$$

l_{pt2} , deve essere calcolata in accordo alla EN 1992-1-1:2004, par. 8.10.2.3, Eq. (3):

$$l_{pt2} = 1,2 \cdot \alpha_1 \cdot \alpha_2 \cdot \phi \cdot \sigma_{pm0} / f_{bpt} \quad (3)$$

dove α_1 , α_2 , sono rispettivamente i coefficienti di rilascio (1,0 per graduale rilascio, 1,25 per improvviso rilascio) e geometria della sezione del trefolo (0,25 for sezioni circolari, 0,19 per trefoli a 3 e 7 fili); ϕ e' il diametro nominale del trefolo e σ_{pm0} lo sforzo nel trefolo subito dopo il rilascio.

Infine, f_{bpt} e' lo sforzo di aderenza calcolato secondo l' espressione 8.15, EN 1992-1-1:2004, par. 8.10.2.2, Eq. (4):

$$f_{bpt} = \eta_{p1} \cdot \eta_1 \cdot f_{ctd}(t) \quad (4)$$

η_{p1} , η_1 sono rispettivamente i coefficienti per la tipologia di trefolo e la situazione di aderenza al rilascio (2,7 per fili dentati, 3,2 per trefoli da 3 e 7 fili) e condizioni di aderenza (1,0 per buone condizioni, 0,7 per peggiori condizioni); infine si e' valutata la tensione di trazione al tempo di rilascio dei trefoli $f_{ctd}(t)$ (Eq. 3.1.2(8) and 3.1.6(2)P).

In particolare, a causa delle grandi incertezze e mancanza di dati si sceglie di calcolare la tensione di trazione secondo l'Eq. (5)

$$f_{ctd}(t) = (2/3) \cdot f_{ctk,0,05} \quad (5)$$

3 INDAGINE SPERIMENTALE

Il gruppo di lavoro ha inizialmente raccolto i risultati delle prove sperimentali a taglio effettuate negli ultimi anni presso diversi produttori e Istituti Universitari e di ricerca in tutta Europa.

Tutti i produttori di solai alveolari da anni infatti effettuano individualmente, o per esigenze normative nazionali, prove specifiche di rottura su prototipi, per convalidare i propri modelli di calcolo e verificare la conformità della produzione.

Fino ad oggi però questi dati non erano mai stati raccolti in un "database" in modo da poter essere analizzati e confrontati.

Nell'arco di tempo di circa un paio di mesi si sono raccolti 138 risultati di prove sperimentali a taglio, eseguiti in diverse aziende e istituti in Italia, Germania, Finlandia e Olanda.

3.1 TIPOLOGIE DI SOLAIO ALVEOLARE

I solai alveolari, che da 40 anni circa sono prodotti in tutto il mondo, variano oggi da uno spessore minimo di 80 mm a un massimo di 500 mm, e si dividono in due grandi categorie a seconda della tecnologia produttiva: i solai vibrofiniti e quelli estrusi.

I primi sono prodotti con un procedimento detto "slip-form", che impiega macchine vibrofinitrici nelle quali il calcestruzzo viene convogliato entro settori mobili ed ipervibrato da batterie di vibratori con frequenze differenziate. In dette macchine vibrofinitrici si distinguono tre fasi di getto susseguenti: soletta di intradosso, nervature, soletta di estradosso, per realizzare l'intera sezione della lastra. La sezione degli elementi prodotti con questa tecnologia tende ad avere fori (alveoli) molto ovalizzati e setti verticali di sezione quasi costante tra i raccordi con la soletta superiore ed inferiore (Figura 3).



Figura 3. Macchina vibrofinitrice e solai alveolari realizzati con procedimento "slip-form"

I secondi sono prodotti con il procedimento "extruder", che impiega macchine ad estrusione nelle quali il calcestruzzo viene forzato da particolari coclee a costiparsi in una unica fase per realizzare la sezione finita della lastra. La sezione degli elementi prodotti con questa tecnologia tende ad avere fori molto più tondeggianti, e setti verticali di sezione molto variabile dall'asse baricentrico verso l'intradosso e l'estradosso (Figura 4).

A parità di altezza di sezione, i solai "slip-formed" presentano un numero maggiore di setti verticali, e conseguentemente un minore numero di trefoli posizionati per setto. I solai estrusi hanno mediamente un peso proprio inferiore, e una

inferiore dimensione dell'anima equivalente b_w , che è data dalla somma delle nervature in prossimità della corda baricentrica.



Figura 4. Tipiche sezioni di solai alveolari estrusi

In entrambe i casi l'unica armatura presente è quella longitudinale di precompressione e la resistenza a taglio è affidata al calcestruzzo, che è normalmente di classe superiore a C45/55.

3.2 PROVE A TAGLIO SU PROTOTIPO

Fino a allo scorso anno, non esistendo una Norma Europea che standardizzasse una procedura di prova, le prove a taglio su prototipo erano eseguite in diversi modi, a seconda della normativa specifica di ogni Paese.

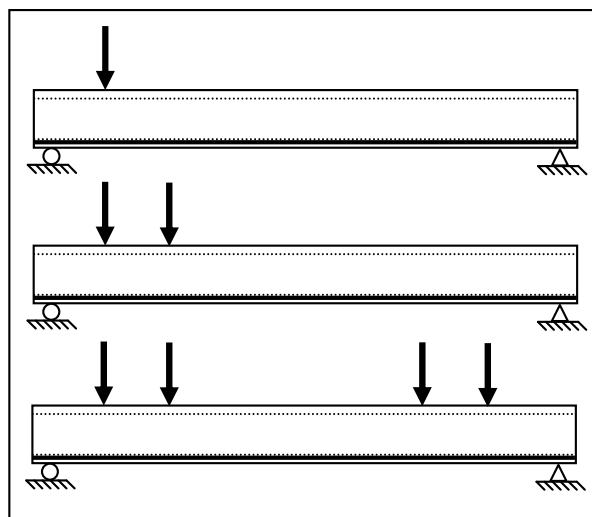


Figura 5. Tre diversi schemi di prove a taglio su prototipo

In particolare le prove che venivano eseguite dai diversi produttori in Europa seguivano

essenzialmente tre schemi (Figura 5): un solo carico concentrato applicato in prossimità di uno degli appoggi; due carichi ravvicinati e applicati in prossimità di uno degli appoggi; quattro carichi concentrati applicati simmetricamente.

Altro fattore, fino ad ora non standardizzato e per nulla trascurabile agli effetti dei risultati ottenuti, è la distanza dell'asse dell'appoggio dalla testata dell'elemento da provare e le dimensioni della base d'appoggio.

3.2.1 Assetto e protocollo di prova

Nel Maggio del 2005 è stata pubblicata dal CEN la Norma di prodotto EN1168 "Precast products – Hollow core slabs" [02], che definisce gli standard per la marcatura CE dei solai alveolari. In particolare nell'allegato J, successivamente emendato, sono riportate le specifiche per la prova a taglio su prototipo.

In accordo a quanto prescritto devono essere sottoposti a prova 3 elementi, che hanno una lunghezza minima di 4 m o 15 volte H (spessore della lastra) e il traverso di carico è posto a una distanza di 2.5 H dall'appoggio, con un minimo di 600 mm (è possibile prevedere due traversi di carico, con il secondo a distanza 500 mm dal primo). L'appoggio può prevedere una striscia di neoprene o di malta di regolarizzazione di larghezza massima 100 mm, l'asse dell'appoggio

deve essere a una distanza di 50 mm dalla testata dell'elemento e predisposto in modo da poter ruotare sotto il carico.

Nella versione originale del citato allegato J, l'applicazione del carico è prevista in 10 cicli, i primi 9 fino ad un valore pari al 70% del taglio resistente di calcolo, il 10° ciclo deve portare a rottura l'elemento. La velocità di carico non deve superare il 10% del valore di rottura per minuto.

Il valore di collasso registrato deve essere poi confrontato con il valore calcolato, tenendo conto della reale geometria della sezione e del reale valore di resistenza del calcestruzzo.

Il gruppo di lavoro CEN/TC229/WG1 ha recentemente approvato la nuova versione della norma di prodotto, che prevede anche delle specifiche formule per il calcolo della resistenza a taglio delle lastre alveolari.

3.2.2 Prove a taglio su prototipo al vero

Il primo passo per questo lavoro di analisi è stato quello di raccogliere il maggior numero possibile di dati di prove a taglio eseguite in diversi Paesi da produttori ed istituti europei.

Sono state raccolte 138 prove, eseguite con i tre metodi sopra descritti, e i risultati sono stati messi a confronto.

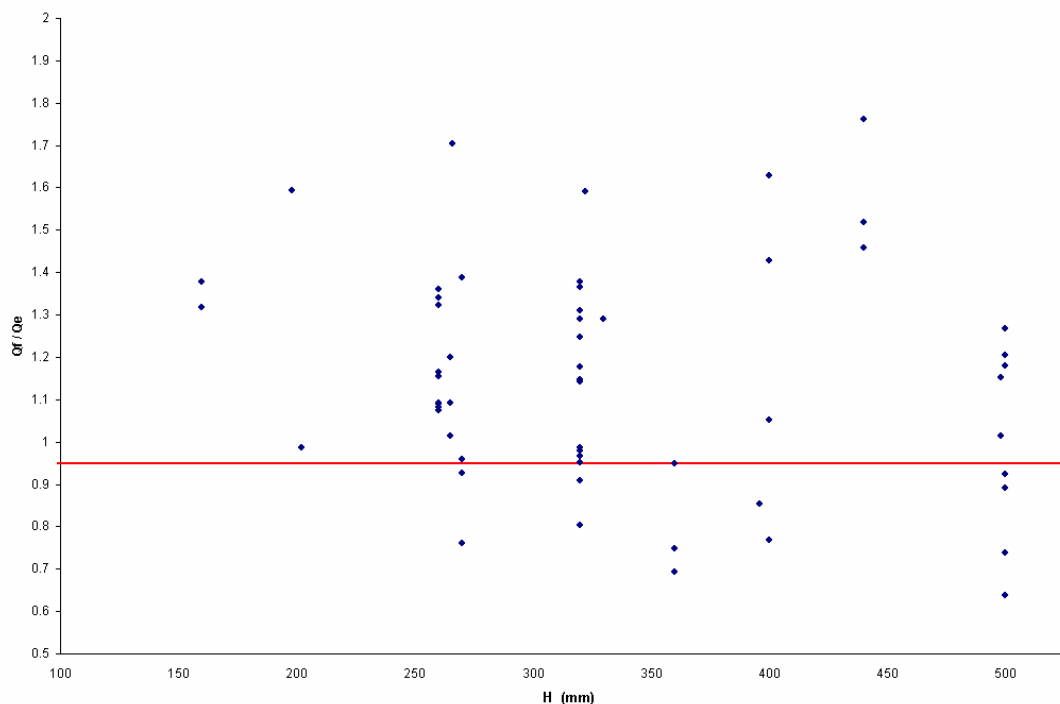


Figura 6. Eq. 6.4 – EC2: rapporto tra carico di rottura sperimentale Q_f ed atteso Q_e per le prove a taglio con tipo di rottura per taglio-trazione, divisi per spessore di solaio.

In particolare si è deciso di mettere a confronto il coefficiente $\gamma = Q_f / Q_e$ che rappresenta il rapporto tra il valore del carico di collasso registrato durante la prova Q_f e il valore del carico di rottura atteso Q_e .

Il valore di quest'ultimo è stato calcolato utilizzando le formule dell'Eurocodice 2 per le due condizioni di sezione fessurata da momento flettente o sezione interamente reagente nella zona critica in cui avviene la rottura per taglio. Secondo le indicazioni contenute nella EN1168 allegato J [02], la prova può considerarsi positiva se tale coefficiente è maggiore di 0,95.

Da una prima analisi effettuata si è osservato che per il 98% delle prove in cui si è registrato una rottura di tipo "taglio-flessione" il coefficiente γ è risultato maggiore di 0,95. Risulta quindi evidente che la formula riportata nell'Eurocodice 2 per il calcolo della resistenza a taglio in condizioni di sezione fessurata per momento flettente trova un riscontro positivo nelle prove effettuate.

Per quanto riguarda invece le prove che hanno presentato una rottura per "taglio-trazione", il risultato non è stato altrettanto positivo: nel 22% dei casi infatti il coefficiente γ è risultato inferiore del valore limite 0,95.

In Figura 6 è riportato il valore di questo rapporto Q_f / Q_e per le prove che hanno evidenziato una rottura per "taglio-trazione", suddiviso per spessore dell'elemento provato.

Si nota che, quasi indipendentemente dall'altezza della sezione provata, una percentuale non accettabile di prove sperimentali ha dato risultato negativo. Questo ha portato a considerare non sufficientemente sicura la formula riportata nell'Eurocodice 2 per il particolare tipo di elemento strutturale in esame.

Le cause di questo comportamento sono principalmente due:

- 1) la particolare forma della sezione, che crea una concentrazione di sforzi tangenziali nella zona intermedia tra la testata e il coltello di carico, dovuta alla combinazione degli effetti del trasferimento per aderenza della precompressione con gli sforzi tangenziali di taglio, in corrispondenza della corda baricentrica dove si ha un restringimento della sezione;
- 2) la tecnologia produttiva che prevede un taglio netto dei trefoli di precompressione, che può creare problemi di aderenza in testata.

In Figura 7 è riportato il valore di rottura registrato durante le prove rispetto al valore di rottura atteso, per le sole rotture di "taglio-trazione", distinte per tipologia di produzione. Dal grafico risulta che i

risultati più divergenti sono quelli relativi agli elementi prodotti con il metodo "slip-form".

Questo è dovuto principalmente alla diversa forma della sezione per le due tipologie (Figura 8); nel caso di solai vibrofiniti infatti la sezione cambia molto più bruscamente nel punto di attacco delle nervature verticali con la piattabanda inferiore, generando una maggiore concentrazione di tensioni di trasferimento di precompressione, che vanno poi a sommarsi con gli effetti del taglio agente. Inoltre, la tecnologia produttiva "slip-formed", che prevede la realizzazione della sezione in più fasi e quindi una non completa omogeneità strutturale può condizionare la capacità portante per taglio dando, origine come evidenziato in Figura 7, a una notevole dispersione dei risultati.

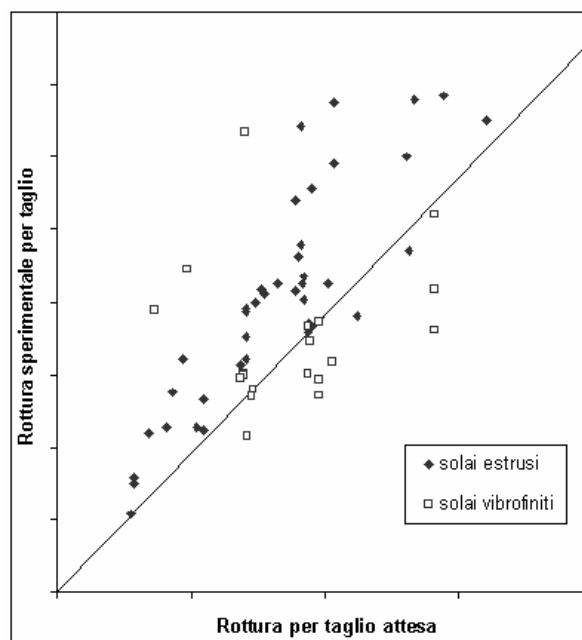


Figura 7. Eq. 6.4 – EC2: rapporto tra risultati sperimentali e attesi di rottura distinti per le due tipologie di produzione.

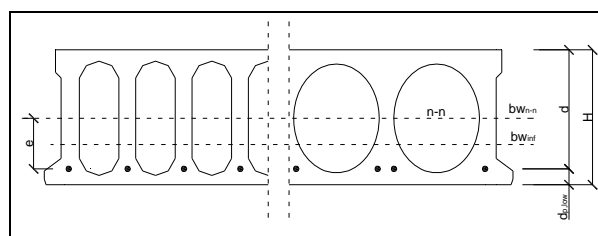


Figura 8. Particolare della geometria delle nervature tipica dei solai vibrofiniti ed estrusi.

Per quanto riguarda i solai prodotti con tecnologia ad estrusione invece, la forma degli

alveoli risulta molto più arrotondata, di conseguenza la sezione delle nervature si restringe in modo più graduale, limitando le problematiche sopra esposte legate alla geometria dell'elemento.

Tanto più la forma dell'alveolo è arrotondata, tanto più tali effetti diminuiscono; il calcolo del taglio resistente in condizioni di sezione interamente reagente quindi dovrebbe tenere conto della specifica geometria della sezione nella zona di trasferimento della precompressione.

4 PROPOSTE ALTERATIVE

A seguito delle considerazioni sopra esposte, nell'ambito del gruppo di studio, si è deciso di proporre una specifica formulazione per i solai alveolari per il calcolo della resistenza a taglio in condizioni di sezione interamente reagente.

Si sono proposte due alternative: una prima che proponesse una modifica all'espressione 6.4 dell'Eurocodice 2 attraverso opportuni coefficienti di riduzione e una seconda più accurata e complessa proposta da Yang [02] e già utilizzata da gran parte dei paesi del Nord Europa.

4.1 MODIFICA COEFFICIENTI CORRETTIVI

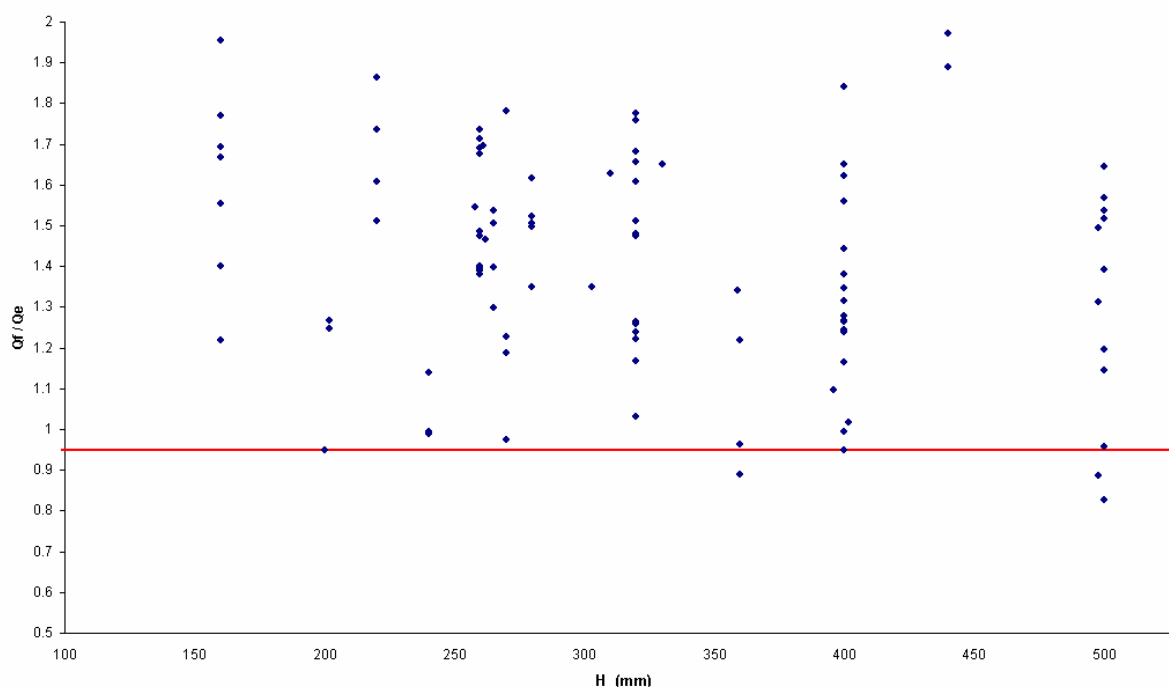


Figura 9. Eq. 6.4 modificata – EC2: rapporto tra carico di rottura sperimentale Q_f ed atteso Q_e per le prove a taglio con tipo di rottura per taglio-trazione, divisi per spessore di solaio.

Dall'analisi dei dati sperimentali in possesso, si è deciso di modificare la formulazione presente nell'Eurocodice 2 con l'introduzione di due coefficienti di riduzione:

$$V_{Rd,c} = \beta \left(\frac{J \cdot \sum b_w}{S_{n-n}} \sqrt{(f_{ctd})^2 + \varphi \cdot \alpha_l \cdot \sigma \cdot f_{ctd}} \right) \quad (6)$$

dove:

$\beta = 0,8$ è un coefficiente forfaitario di riduzione

$\varphi = 0,9$ è un coefficiente che tiene conto degli effetti del taglio dei trefoli con rilascio non graduale della precompressione.

Simili proposte sono state fatte anche da Walraven & Mercx [11], che applicano un coefficiente forfaitario $\beta = 0,75$ senza alcun coefficiente riduttivo φ , e da [12], dove al contrario si assume un coefficiente $\varphi = 0,8$ e nessun fattore riduttivo β .

Avendo introdotto questi due coefficienti di riduzione nell'Eq. (6), si sono ricalcolati i valori del taglio di rottura atteso delle prove sperimentali analizzate e si sono nuovamente confrontati i risultati.

Dal confronto risulta che il 95% delle prove analizzate ha dato esito positivo, indipendentemente dallo spessore di solaio.

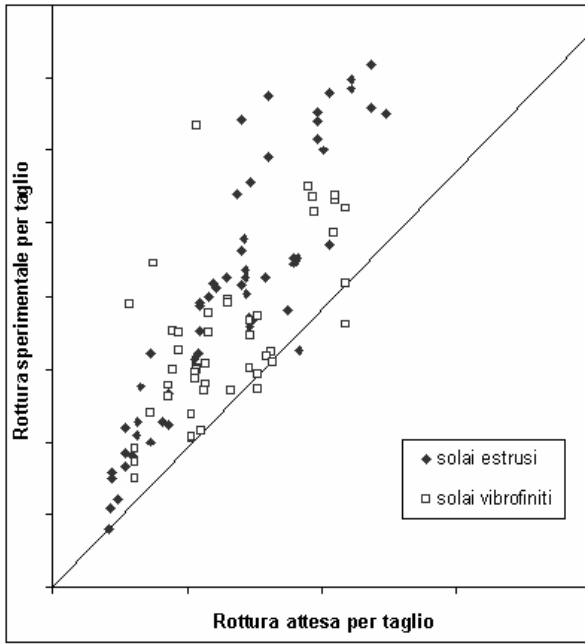


Figura 10. Eq. 6.4 modificata – EC2: rapporto tra risultati sperimentali e attesi di rottura (calcolati con la formula modificata) distinti per le due tipologie di produzione.

Sulla base dei risultati ottenuti, si e' considerata attendibile la formulazione proposta, che è stata dunque proposta per un aggiornamento della Norma EN1168 [02].

4.2 FORMULA DI YANG

La seconda alternativa proposta e' l'approccio di Yang [03], sicuramente molto più accurato nella predizione dei dati sperimentali, come confermato in [05], ma con una formulazione un po' più complessa.

Si riassumono brevemente i passaggi salienti, mentre maggiori dettagli possono essere trovati in [03].

L'Eq. (7) rappresenta la capacità resistente per taglio nell'ipotesi di rottura per trazione dell'anima dell'elemento prefabbricato.

L'Eq. (6) deve essere applicata in prossimità dei punti critici della linea retta di rottura che parte dall'appoggio con un angolo $\beta=35^\circ$ rispetto all'asse orizzontale, come riportato in Figura 11. Si identifica il punto critico sulla linea retta di rottura con la minima capacità portante per taglio $V_{Rd,c}$.

$$V_{Rd,c} = \frac{lb_w(y)}{S_c(y)} \left(\sqrt{(f_{ctd})^2 + \sigma_{cp}(y)f_{ctd}} - \tau_{cp}(y) \right) \quad (7)$$

dove

$$\sigma_{cp}(y) = \sum_{t=1}^n \left\{ \left[\frac{1}{A} + \frac{(Y_c - y) \cdot e}{I} \right] \cdot P_t(l_x) \right\} + \frac{M_{Ed}}{I} (Y_c - y) \quad (8)$$

$$\tau_{cp}(y) = \frac{1}{b_w(y)} \cdot \sum_{t=1}^n \left\{ \left[\frac{A_c(y)}{A} - \frac{S_c(y) \cdot (Y_c - Y_{pt})}{I} + Cp_t(y) \right] \cdot \frac{dP_t(l_x)}{dx} \right\} \quad (9)$$

$\sigma_{cp}(y)$ e' lo tensione di compressione nel calcestruzzo alla quota y e alla distanza orizzontale l_x , mentre $\tau_{cp}(y)$ e' la tensione tangenziale nel calcestruzzo dovuto, alla variazione della forza di precompressione alla quota y e alla distanza orizzontale l_x (Figura 11). Infine si riportano le definizioni di tutti i simboli citati nell'Eqs. (7), (8), (9):

- y altezza del punto critico sulla linea di rottura;
- I momento di inerzia della sezione di calcestruzzo
- $b_w(y)$ dimensione dell'anima nel punto critico;
- Y_c altezza del baricentro della sezione;
- $S_c(y)$ momento statico rispetto l'asse baricentrico della parte compressa sopra la quota y ;
- l_x proiezione orizzontale della distanza dal punto critico al punto di partenza della lunghezza di trasmissione o di aderenza dei trefoli;
- n numero di strati di trefoli;
- A area della sezione;
- $P_t(l_x)$ forza di precompressione alla distanza l_x ; il trasferimento della precompressione deve essere considerato riferendosi al paragrafo 8.10.2.2 di EN 1992-1-1 [01];
- M_{Ed} momento flettente dovuto al carico verticale; per questa espressione l'effetto del momento flettente può essere trascurato $M_{Ed}=0$;
- $A_c(y)$ area al di sopra della quota y
- Y_{pt} altezza del livello di trefoli considerato
- $Cp_t(y)$ fattore che tiene conto della posizione del livello di trefoli considerato
- $Cp_t = -1$ quando $y \leq Y_{pt}$
- $Cp_t = 0$ quando $y > Y_{pt}$

Purtroppo il campione di dati sperimentali fornito dalle aziende non è stato utilizzato anche per la verifica dell'Eq. (7), in quanto mancavano alcuni dati geometrici e meccanici necessari per il calcolo della capacità resistente per taglio secondo l'approccio di Yang. Questo aspetto

conferma una maggiore complessità nell'applicabilità di questa espressione che richiede un numero maggiore di parametri e informazioni rispetto alle espressioni proposte nell'Eurocodice 2. Verifiche di prove sperimentali con l'approccio di Yang si possono trovare in [05] e confermano, come per la precedente soluzione proposta, una accurata attendibilità della trattazione proposta.

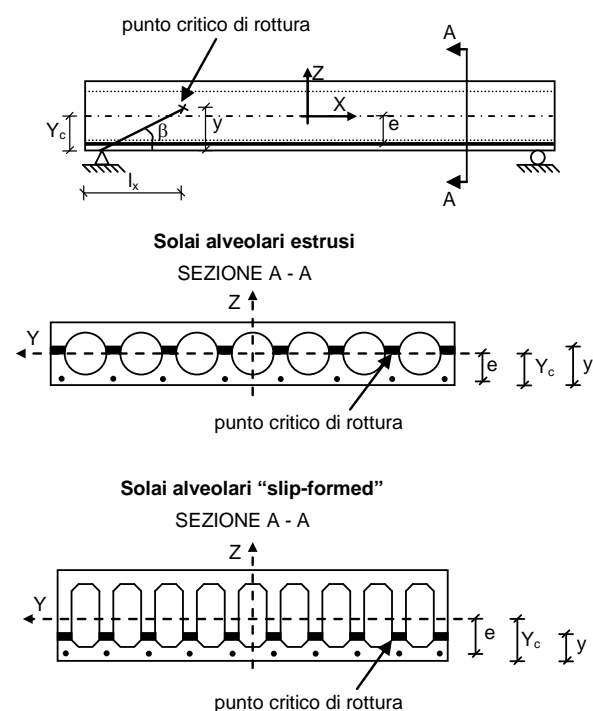


Figura 11. Parametri significativi e , y , Y_c , β , per la trattazione di Yang [03]

5 CONCLUSIONI

L'indagine svolta in questo lavoro ha evidenziato importanti aspetti che si ripercuotono sulla progettazione ed il controllo di qualità dei solai alveolari.

Dal campione di dati sperimentali, si è notato che gran parte delle crisi per taglio dei solai alveolari sono coincise con la rottura dell'anima a trazione.

La verifica delle formule proposte dall'Eurocodice 2 sul campione sperimentale ha messo in evidenza due aspetti:

- 1) attendibilità dell'Eq. 6.2a nel caso di rottura per taglio con elemento strutturale già fessurato flessionalmente nella zona critica; il 98% dei casi analizzati risultano verificati;

- 2) non attendibilità dell'Eq. 6.4 nel caso di rottura per taglio con elemento strutturale non fessurato nella zona critica; il 22% dei casi analizzati risultano non verificati.

Le espressioni alternative presentate in questo contributo hanno confermato una buona conformità con i risultati sperimentali.

L'espressione semplificata dedotta da quella dell'Eurocodice 2 sembra essere un'ottima alternativa, vista la semplicità della formula stessa, ma i coefficienti correttivi necessitano di un maggior affinamento e andrebbero distinti per le due tipologie produttive di solai alveolari.

Un'estensione del "database" sperimentale è tuttora in corso, come pure l'utilizzo di un modello ad elementi finiti 3D che attraverso un'estesa indagine parametrica consenta di calibrare in modo più accurato i coefficienti correttivi β e φ .

L'approccio proposto da Yang, è sicuramente il più accurato ma presenta limiti di applicabilità visto i molti parametri geometrici e meccanici richiesti. Anche per questa trattazione comunque, si stanno conducendo indagini numeriche e sulla base di un'estesa analisi parametrica si vuole arrivare a delle semplificazioni dell'approccio senza perdere in accuratezza della valutazione.

A questo stadio comunque l'utilizzo dell'espressione modificata dell'Eq. 6.4 dell'Eurocodice 2 o dell'approccio di Yang [03], come già previsto in nell'aggiornamento della norma EN1168 [13], permette di stimare con un buon margine di sicurezza la capacità portante per taglio e conseguentemente di tarare con accuratezza il protocollo di prova prescritto per la marcatura CE dei solai alveolari.

6 RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano le aziende produttrici (Generale Prefabbricati, Gruppo Centro Nord e RDB) che hanno attivamente partecipato fornendo dati e i rapporti delle prove sperimentali.

Un particolare ringraziamento va infine attribuito al Prof. Giandomenico Toniolo e all'Ing. Bruno Della Bella, per i preziosi suggerimenti dati durante lo svolgimento della ricerca e la stesura della presente memoria.

7 BIBLIOGRAFIA

- [01] UNI EN 1992-1-1:2004 Eurocodice 2, "Progettazione delle strutture di calcestruzzo – Parte 1-1: Regole generali e regole per gli edifici", 2004.

- [02] **UNI EN 1168:2005**, "Prodotti prefabbricati di calcestruzzo – Lastre alveolari", 2005.
- [03] **YANG L.**, "Design of prestressed hollow core slabs with reference to web shear failure", Journal of Structural Engineering vol.120, pp. 2675-2696, 1994.
- [04] **KÖNIG G. & FISCHER J.**, "Model uncertainties concerning design equation for shear capacity of concrete members without shear reinforcement", CEB-BULLETIN - Model Uncertainties, task group 1.2, pp. 49-100.
- [05] **PAJARI M.**, "Resistance of prestressed hollow core slabs against web shear failure", VTT Research Notes 2292, ESPOO, Finland, 2005.
- [06] **PAJARI M.**, "Shear resistance of PHC slabs supported on beams. I: Tests", Journal of Structural Engineering vol.124, n.9, pp. 1050-1061, 1998.
- [07] **TNO Building and Constructions Research**, "TNO Report: Standard shear tests on Prestressed hollow core slabs according to EN 1168", 2005.
- [08] **PAJARI M. & KOUKKARI H.**, "Shear resistance of PHC slabs supported on beams. II: Analysis", Journal of Structural Engineering vol.124, n.9, pp. 1062-1073, 1998.
- [09] **PAJARI M.**, "Design of prestressed hollow core slabs", Rep. 657, Technical Research Center of Finland, ESPOO, Finland, 1989.
- [10] **GIRHAMMAR U.A.**, "Design principles for simply supported hollow core slabs application advance", Struct. Engrg Rev. Oxford, England, vol.4, n.4, pp. 301-316, 1992.
- [11] **WALRAVEN J.C. & MERCX W.P.M.**, "The bearing capacity of prestressed hollow core slabs", Heron, vol.28 n.3, pp. 46, 1983.
- [12] **BRITISH STANDARDS INSTITUTION** "CP100: part 1.- Code of practice of the structural use of concrete", November 1972.
- [13] **CEN TC229/WG1, doc.n 496/2006** "Proposal for revision of EN1168:2005", 2005.

Contatti con gli autori:

Alessandro Palermo: palermo@stru.polimi.it
 Marica Della Bella: pcn@gruppocestronord.it

Errata corrige:

1 INTRODUZIONE

Alla fine del 4° capoverso sostituire
 Aprile 2007 con **Marzo 2008**