

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

SOLAI NON CONVENZIONALI A STRUTTURA IBRIDA: UNA SOLUZIONE AUTOPORTANTE IN EPS - ACCIAIO- CALCESTRUZZO Parte 1: fondamenti teorici

*ENZO SIVIERO, IUAV – VENEZIA
PIERANTONIO BARIZZA, Padova*

Vedi anche "[Parte 2: realizzazioni](#)"

SUMMARY

The EPS formwork for floors is by now a mature product and, in this case, is selfsupporting (within certain limits) and with interesting performance features not only under the static point of view. The idea of drowning lattice girders in a EPS sheet has turned a simple insulating formwork into a structural selfsupporting element, which completes with the full interaction with the concrete topping. The very good results of the application lead to study more in depth the planning details and the not yet checked test steps. The calculation of this type of floors is very similar to that of the usual composite steel-concrete lattice beams, with some differences that make it easier without losing the necessary accuracy .. Some aspects of the behaviour of the floor are under research, above all to verify the real limits under the highest load condition provided for by law.

SOMMARIO

Il solaio con cassero in EPS è un prodotto ormai maturo e nel caso in oggetto è, entro certi limiti autoportante, con caratteristiche prestazionali particolarmente interessanti, non solo dal punto di vista statico.

L'intuizione di annegare tralicci elettrosaldati in una matrice in EPS ha reso quello che prima era solamente un cassero coibentante un elemento strutturale autonomo, che si completa con la solidarizzazione della cappa in calcestruzzo. I risultati in opera, particolarmente brillanti, spingono affinché si approfondiscano le tematiche di progettazione e verifica non ancora codificate. Il calcolo di questa tipologia di solai è molto simile a quanto normalmente si svolge per le travi reticolari acciaio-calcestruzzo, con alcune differenze che lo rendono più semplice, ma altrettanto delicato. Alcuni aspetti del comportamento del solaio sono sotto indagine, soprattutto per verificarne i limiti effettivi sotto le condizioni di carico ultime previste dalla normativa.

1. INTRODUZIONE

La scelta del solaio è spesso demandata all'impresa, tant'è che, nella pratica comune, i solai, come pure gli impianti, hanno una progettazione originaria di facciata che viene disattesa e superata da una seconda progettazione, in sede di fornitura, suggerita dall'impresa o, nel caso degli impianti, dall'installatore. I motivi per cui questo avviene sono noti ed in parte comprensibili, ma snaturano il progetto e demotivano il progettista a sviluppare compiutamente il proprio mandato. In questa breccia di discrezionalità lasciata al costruttore, da condividere comunque con il progettista, si inseriscono le varie tipologie di solaio: predalles, laterocemento ad elementi sciolti o parzialmente preassemblati, precompresso, estruso, con casseri a perdere etc. Tra questi trova spazio la tipologia a cassero portante in EPS con traliccio autoportante.

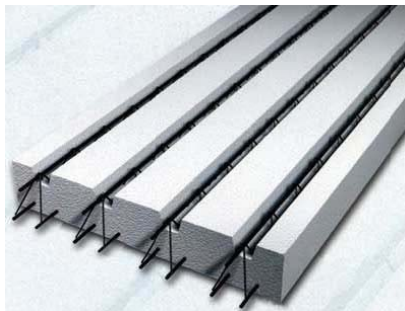


Figura 1. Elemento di solaio ibrido in EPS con tralicci d'acciaio e fresatura superiore

L'idea è semplice, si tratta di predisporre una fila di tralici metallici e di avvolgerli, processo di sinterizzazione, nel polistirene, in modo da creare dei moduli di larghezza ed altezza controllata, lasciando libere dal polistirene le estremità metalliche in modo da poterle solidarizzare con i cordoli perimetrali e le travi. Questo primo passo è il duale del pacchetto sandwich lamiera-polimerolamiera, caratteristici delle coperture in acciaio, ma in questo caso la parte metallica è all'interno. Lo step successivo è quello di fresare la parte superiore del pannello in corrispondenza degli elementi superiori del traliccio metallico, in modo da solidarizzarlo con una soletta in cls per creare una struttura acciaio-calcestruzzo ad anima tralicciata. Questo sistema costruttivo era già stato oggetto di indagine al fine di individuare i diversi impieghi del materiale polistirene espanso nell'edilizia [1].

2. IL SOLAIO AUTOPORTANTE EPS-ACCIAIO-CLS

2.1. Osservazioni generali sul comportamento statico

Il solaio in oggetto può essere correttamente dimensionato studiandolo per passi successivi, corrispondenti alle varie fasi di carico e di realizzazione, così schematizzati:

- fase 1: peso proprio della struttura
- fase 2: getto del calcestruzzo
- fase x: solidarizzazione della struttura
- fase 3: ritiro del calcestruzzo
- fase 4. sovraccarichi permanenti
- fase 5: viscosità del calcestruzzo
- fase 6: sovraccarichi accidentali

Durante la fase 1 e la fase 2 i carichi sono trasmessi ai correnti inferiori attraverso la compressione del polistirene che preme sui correnti inferiori. La situazione è ideale perché il traliccio risulta inflesso a fronte di carichi che, applicati lungo i correnti inferiori, stabilizzano il corrente superiore che è tenuto dalle diagonali di parete. La situazione è dunque di equilibrio stabile, e la configurazione di instabilità da analizzare corrisponde a corrente compresso con luce libera di inflessione corrispondente all'interasse dei diagonali, come si evince dalle prove sperimentali effettuate su elementi in assenza di cappa collaborante.

La fase x risulta la più delicata per il solaio in quanto la sezione mista (o "ibrida") acciaio-calcestruzzo affida il mantenimento delle sezioni piane all'aderenza tra corrente superiore e soletta gettata. Durante lo sviluppo della resistenza del calcestruzzo (fino a valori dell'ordine dei 150 daN/cm^2) la struttura deve rimanere inerte, così come dovrebbe essere per tutte le strutture in c.a. in corso di maturazione.

Il ritiro del calcestruzzo, corrispondente alla fase 3, si sviluppa nel primo periodo e dipende in buona misura dalla perdita d'acqua che avviene quasi esclusivamente dalla superficie superiore della cappa, mentre l'assorbimento del polistirene espanso risulta trascurabile.



Figura 2. Prova su solaio senza cappa [9]

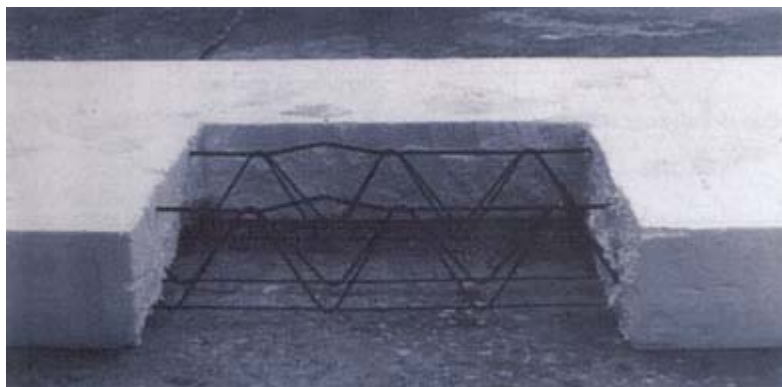


Figura 3. Corrente superiore instabilizzato [9]

Dati gli scarsi spessori in gioco questa perdita si esaurisce in breve tempo e spesso prima dell'applicazione dei sovraccarichi, ma agisce su una struttura ibrida.

La struttura ibrida sopporta i sovraccarichi di fase 4, in ragione delle condizioni ambientali matura deformazioni viscosi in fase 5 e sopporta sovraccarichi accidentali in fase 6.

2.2. Analisi fase 1 e fase 2 – Peso proprio

La situazione statica delle fasi 1 e 2 corrisponde a tralicci metallici autoportanti. Nella realtà sono immersi in una matrice di EPS che ne controlla in parte le deformazioni (soprattutto quelle del second'ordine, legate al divaricamento del traliccio in mezzeria causato dall'inflessione), ma non sono significative per il calcolo e non chiaramente quantificabili. Lo schema statico classico è di trave su due appoggi, con momento massimo positivo in mezzeria, e sezione rappresentata da una "distribuzione di tralicci d'acciaio" lungo il solaio.

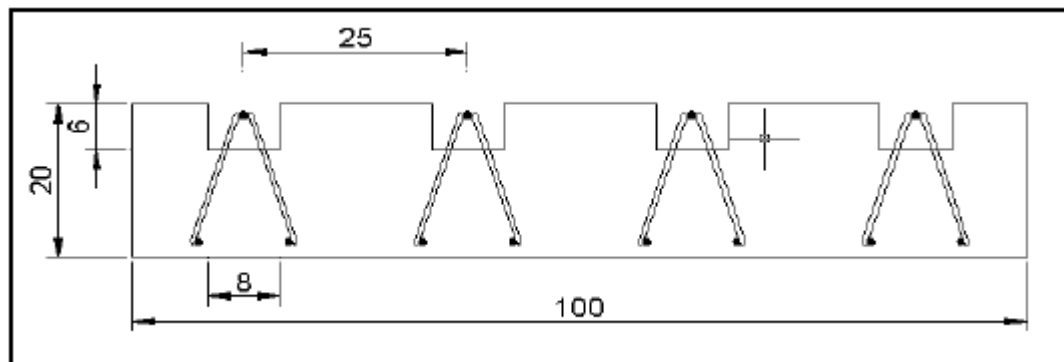


Figura 4. Sezione tipo

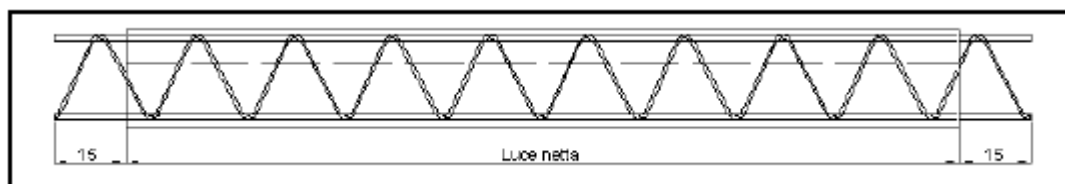


Figura 5. Schematizzazione senza appoggio centrale

In queste condizioni la verifica del solaio si riduce a controllare le condizioni di stabilità del corrente compresso, della diagonale compressa e la freccia dell'elemento strutturale.

Da sperimentazioni effettuate su lastre senza scarifica superiore (e dunque senza soletta in cls) portate a rottura, la crisi del corrente superiore è avvenuta con lunghezza di sbandamento pari a un interasse di diagonale, confermando l'effetto controventante delle diagonali ancorate al traliccio. Nella situazione prevista, in cui i carichi gravano sui tralicci inferiori attraverso la compressione dell'EPS, uno sbandamento superiore che coinvolgesse più interassi comporterebbe il sollevamento di uno dei correnti tesi inferiori (o lo sbandamento per instabilità dell'equilibrio di diagonali di mezzera, poco sollecitati a taglio).

2.3. Analisi fase x - Solidarizzazione della struttura

La fase x, corrispondente alla maturazione del calcestruzzo, è la più delicata.

Normalmente le imprese gettano il solaio ed il giorno successivo già ci lavorano sopra, impegnandolo staticamente e dinamicamente con depositi di materiale e lavorazioni. La tipologia di solaio analizzata ben si presta a luci libere superiori a 5 metri, gettate senza puntelli provvisori in mezzera. Questa soluzione, particolarmente gradita nelle ristrutturazioni, risulta sensibile a sollecitazioni dinamiche, così come a quelle statiche, in grado di determinare uno scorrimento tra il corrente superiore compresso e la sua interfaccia con il calcestruzzo in fase di maturazione.

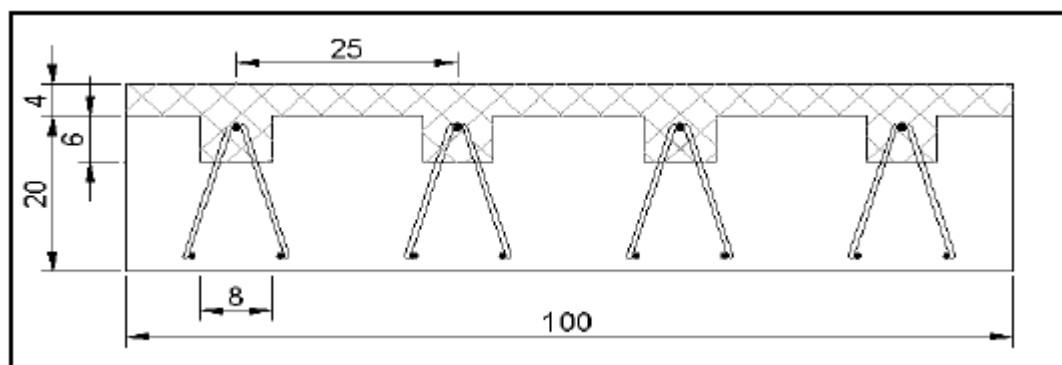


Figura 6. Sezione ibrida

Dovrà essere cura del Direttore dei Lavori indicare all'Impresa quando il calcestruzzo avrà raggiunto (funzione anche delle condizioni climatiche, della qualità del calcestruzzo, etc) la resistenza meccanica necessaria a far "funzionare" il solaio come sezione ibrida, in grado di mantenere le sezioni piane in assenza di scorrimenti relativi.

2.4. Analisi fase 3 – Ritiro del calcestruzzo

Le situazioni che ora si descrivono sono le medesime che si analizzano per le travi a sezione mista (ricordando che per la normativa queste risultano dall'accoppiamento del cls con travi ad anima piena).

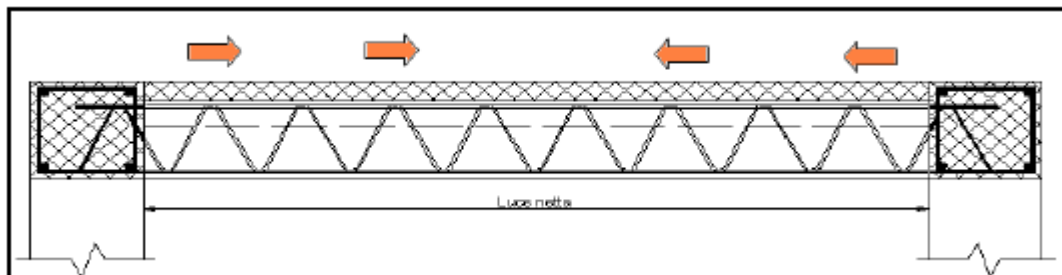


Figura 7. Schematizzazione del ritiro

Il ritiro agisce in corrispondenza della soletta superiore e determina delle coazioni in quanto il corrente superiore ostacola l'accorciamento del calcestruzzo. Quest'ultimo poi non risulta baricentrico rispetto alla soletta per cui la situazione finale vede un accorciamento parzialmente impedito della soletta, una compressione conseguente al corrente superiore ed un incremento di trazione per i correnti inferiori.

2.5. Analisi fase 4 - Sovraccarichi permanenti

La fase 4 si riconduce all'analisi di una trave ibrida in semplice appoggio, con un rapporto $n=Ea/Ec$ valutato a tempo $t=t_0$.

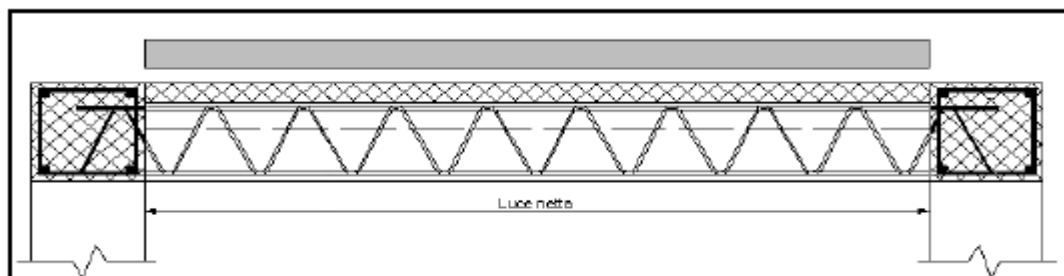


Figura 8. Schematizzazione carico permanente

In questa configurazione non risultano significative le verifiche in quanto lo schema statico è ormai definitivo; la somma dei singoli contributi determinerà le tensioni da confrontare con quelle limite ed i carichi da verificare con quelli che determinano l'instabilità del diagonale compresso. Vale la pena di sottolineare che, per quanto riguarda il taglio sarebbe ora possibile contare anche su eventuali diagonali tese: infatti il cordolo in calcestruzzo rende monolitica l'estremità su cui si ancora il solaio. Si ritiene comunque opportuno utilizzare la luce teorica e le diagonali compresse, in quanto la riduzione del valore del taglio è trascurabile, le incertezze su contributi favorevoli sono ampie, e il pericolo di crisi per taglio (instabilità delle aste diagonali) è opportuno sia ampiamente scongiurato. Dai numerosi esempi applicativi si è trovato che quasi mai il taglio risulta determinante nella scelta dei tralacci, sia nelle dimensioni che nel numero (a meno di casi particolari, con forti carichi e luci corte), attestandosi sovente su valori che sono la metà della capacità portante del traliccio (con luce libera ridotta poiché l'estremità superiore è annegata nel calcestruzzo).

2.6. Analisi fase 5 - Viscosità del calcestruzzo

La fase 5 corrisponde al comportamento viscoso del calcestruzzo, con conseguenze per quanto riguarda l'acciaio inferiore teso e la deformazione conseguente all'integrazione della curvatura delle sezioni. Per semplicità si valutano gli incrementi di tensioni e deformazioni della trave prima con rapporto $n=Ea/Ec$ valutato a tempo $t=t_\infty$, poi con rapporto $n=Ea/Ec$ valutato a tempo $t=t_1$ (conoscendo quanto vale t_1 si potrebbero svolgere analisi raffinate, ma normalmente non si conosce la tempistica di cantiere, questa potrebbe essere poco affidabile, le approssimazioni in gioco suggeriscono di non

essere pignoli sulla valutazione di t_1 e si consiglia di utilizzare $t_1=t_0$). La differenza corrisponde a quanto matura la trave nel passaggio da $t=t_1$ a $t=t\infty$.

2.7. Analisi fase 6 - Sovraccarichi accidentali

Per quanto riguarda i carichi accidentali, questi agiscono su una trave ibrida in semplice appoggio, con un rapporto $n=E_a/E_c$ valutato a tempo $t=t_0$.

I criteri di verifica rimangono il momento flettente in mezzera, il taglio all'appoggio e la deformabilità.

2.8. Particolarità del modello

Come mostrato in precedenza, il calcolo di solai di questo tipo non presenta complessità o attenzioni particolari, se non un controllo dei fenomeni di stabilità dell'equilibrio degli elementi del traliccio in acciaio. La mancanza di calcestruzzo nella parte inferiore, se da un lato consente di risparmiare materiale (economie sul calcestruzzo, ma anche meno massa strutturale, a vantaggio degli elementi portanti), dall'altro non permette di sopportare momenti negativi, se non di così esiguo valore da consentire solo elementi corti di cornice, non certamente poggioli o sbalzi. Lo schema statico previsto è dunque quello di semplice appoggio alle due estremità, anche in condizioni di continuità data dalla rete sulla cappa superiore.

2.9. Vantaggi e svantaggi di un solaio tralicciato a struttura ibrida

Sono parecchi i punti a favore di questo tipo di solaio, e si proverà ad elencarne alcuni:

- semplicità di posa in opera
- sicurezza intrinseca
- autoportanza
- massa ridotta
- elevata coibenza termica

La fornitura di lastre preassemblate, tagliate, numerate, con già tutta l'armatura presente (a parte la maglia di ripartizione superiore), legata ad un peso di circa 20 daN/m² conferiscono al solaio una particolare semplicità di posa in opera. Un grosso vantaggio ne trae anche il Direttore dei Lavori, che non deve controllare armature inferiori aggiuntive, e superiori al negativo (non necessarie perché tale sistema non funziona a momento negativo), così come non sono necessari spezzoni aggiuntivi all'appoggio per assorbire una trazione pari al taglio, in quanto i meccanismi resistenti non sono biella in cls-armatura tesa, ma il traliccio stesso si porta appoggiando sulle proprie estremità.

Una volta posto in opera il pannello è autoportante, con indubbi vantaggi per la sicurezza in cantiere, per di più è in grado di sopportare carichi elevati, sicuramente pari al peso degli operai. La produttività che consegue è un ulteriore punto a favore.

L'autoportanza è un punto di forza soprattutto nelle ristrutturazioni ove, con luci modeste, in genere inferiori a 5 metri (ma non è questo il limite) si riesce a garantire la portanza del solaio per i carichi e sovraccarichi usuali nelle residenze (a patto di riconoscere accettabili le deformazioni di fase 1 e fase 2).

La massa ridotta a circa il 65% di un solaio tradizionale porta benefici alle strutture in genere perché risultano staticamente meno sollecitate, ma soprattutto in situazioni dinamiche, generando forze proporzionalmente ridotte. Un ulteriore vantaggio è dato dalla notevole presenza di armatura, presente in partenza perché costituita dai trallicci, che legano tra loro travi e pareti in direzione longitudinale; mentre in direzione trasversale l'effetto membranale è lo stesso di un solaio tradizionale (a parità di cappa), ma considerando la flessione trasversale risulta più rigido perché non vi sono lastre lunghe 0.38 m (dimensione della pignatta tra travetto e travetto) ma 0.17 m o meno, in ragione del numero di trallicci per metro.

Il fatto di essere costituito da trallicci in una matrice di polistirene alta almeno 15 cm se non di più (a partire dai solai da 20 cm + cappa) conferisce al sistema solaio una esuberante coibenza termica.

Ciò che si guadagna in semplicità si paga da qualche parte con alcuni svantaggi:

- non sono ammessi momenti negativi
- occorre verificare la deformabilità in fase di costruzione
- occorre incrementare la massa per un più efficace isolamento acustico
- è necessaria maggiore attenzione ai dettagli esecutivi nella zona di appoggio, in particolare in zona sismica

Il solaio in oggetto si calcola in semplice appoggio e questo è l'unico schema statico che è in grado di soddisfare: la mancanza di calcestruzzo inferiore non consente di trasferire compressioni significative nella parte inferiore del solaio e di sopportare momenti negativi, in particolare quelli legati ad iperstaticità, continuità di campate e sbalzi; se le prime due condizioni sono ovviabili (in quanto la continuità può non essere necessaria per la portanza del solaio), per la terza occorre predisporre un sistema di travi a mensola per sostenere poggioni e cornici assai sporgenti.

La deformabilità in fase 1 e fase 2 è governata dal momento d'inerzia dei tralicci in acciaio, per cui spesso, anche se il solaio è in grado di reggere tutti i carichi in semplice appoggio, nella fase di getto di usano travi rompitratta inferiori per renderlo inerte (schema a tre o più appoggi), ed affidare la deformazione conseguente alla rimozione degli appoggi alla sezione ibrida, molto più rigida. Questa soluzione è indicata anche quando si voglia utilizzare il solaio prima che il calcestruzzo sia maturato al punto da garantire il comportamento di sezione ibrida.

Come è noto, per abbattere alcune frequenze occorre massa, per cui uno studio accurato dei massetti e del rivestimento inferiore può portare ai risultati richiesti utilizzando un solaio che pesa decisamente meno di uno tradizionale.

Una particolare attenzione deve essere posta agli appoggi, dove i tralicci devono essere tagliati in corrispondenza del nodo senza lesionarlo, in modo che il meccanismo di trasferimento del taglio corrisponda allo schema di calcolo.

In zona sismica, sovente, in prossimità degli appoggi, occorre infittire la staffatura con passi che non sono sempre compatibili con le dimensioni ed i passi rigidi del traliccio metallico del solaio. Il problema riguarda ovviamente tutti i tipi di solaio, ma in particolare questo necessita maggiori attenzioni in fase progettuale in modo da superare questa difficoltà esecutiva senza dover intervenire in cantiere con soluzioni potenzialmente pericolose; infatti non è possibile tagliare ed aggiungere spezzoni d'armatura come spesso viene fatto in altre tipologie di solaio, a volte anche in modo poco ortodosso, ma con una qualche efficacia, in cantiere.

3. IL PROBLEMA DELL'ADERENZA

3.1. Considerazioni normative

Il calcolo di questa tipologia di solaio mutua la normativa UNI 10016, ma non vi aderisce in ogni punto, principalmente perché tale norma tratta le strutture miste acciaio-calcestruzzo in cui le travi in acciaio sono ad anima piena. Anche gli Eurocodici non trattano questo tipo di struttura, pertanto i progettisti si trovano nelle condizioni di dover fare delle considerazioni legate al buon senso, e, ove possibile, ad evidenze sperimentali. Nella stessa situazione si trovano le travi miste tralicciate note come trave REP, ma si differenziano da queste principalmente in 3 punti:

1 - le travi tralicciate hanno un piatto inferiore, mentre il solaio proposto ha un traliccio non stabilizzato inferiormente

2 - le travi tralicciate hanno un'anima in acciaio a sostegno delle fasi costruttive, e possono contare anche su un'anima in calcestruzzo per le condizioni di servizio, viceversa il solaio proposto conta sulla portanza dei tralicci in acciaio per tutte le fasi, in quanto non è prevista un'anima in calcestruzzo

3 - nelle travi tralicciate l'aderenza acciaio calcestruzzo avviene a livello dei correnti superiori, con dei punti fissi costituiti dai nodi ove convergono le reticolari d'anima, in zone molto prossime all'estradosso della trave, mentre nel solaio proposto il corrente inferiore, e i rispettivi nodi fissi, sono un po' più bassi dell'estradosso del solaio e, sebbene bene avvolti di calcestruzzo, non sono efficaci come se si trovassero prossimi all'estradosso.

3.2. Considerazioni pratiche

I primi due punti precedentemente esposti non creano problemi alla comprensione del comportamento del solaio. La mancanza di piatto inferiore e di anima in calcestruzzo impedisce al solaio di poter sopportare momenti negativi, ma questa può essere considerata una prerogativa del solaio. Nasce come elemento portante su due appoggi, e viene calcolato solo per i momenti positivi!

Il terzo punto appare molto più interessante da analizzare.

Le basi di calcolo presentate (UNI 10016) sono state elaborate per travi ad anima piena, di dimensioni non specificate, ma significativamente maggiori delle luci tipiche di un solaio.

Gli schemi esemplificativi sotto riportati illustrano perché non sia consentito affidare

all'aderenza l'interazione acciaio calcestruzzo, ma siano necessari dei connettori.

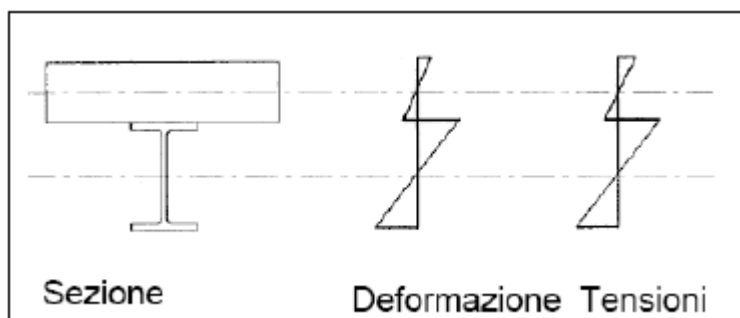


Figura 9. Schematizzazione travi miste

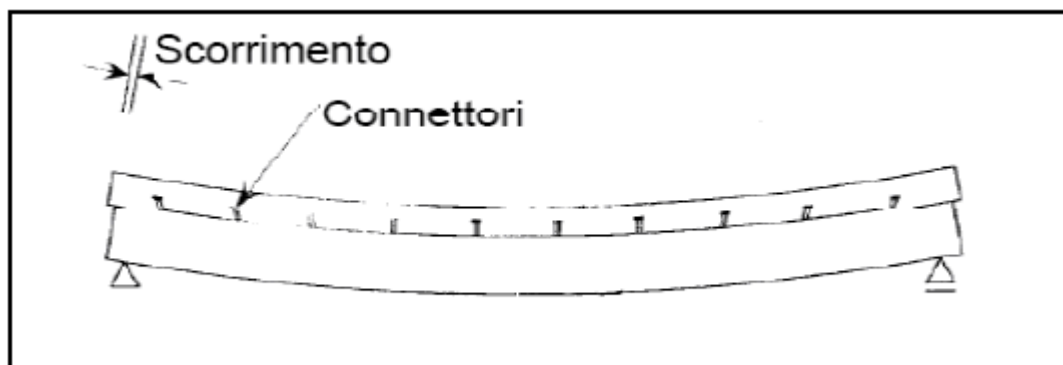


Figura 10. Schematizzazione travi miste

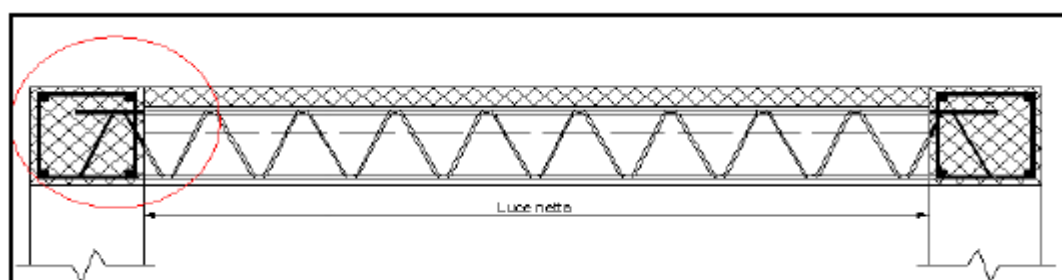


Figura 11. Schematizzazione solaio ibrido

Le azioni, così importanti perché importanti sono le dimensioni e l'impegno statico, devono essere riprese da connettori di sicura efficacia, anche perché contrafforti di estremità di ostacolo allo scorrimento non sono mai presenti; inoltre la superficie di interfaccia è un acciaio laminato, senza elementi che migliorino l'aderenza e la diffondano lungo tutta la superficie di contatto (anche se tutto questo non sarebbe sufficiente per rinunciare ai connettori!). Se questo è vero per travi da ponte e strutture importanti, per i solai dobbiamo mettere in conto anche la presenza del cordolo perimetrale. Quest'ultimo è necessariamente sempre presente, e di dimensioni non trascurabili (almeno 20-25 cm di larghezza). Questo elemento rigido contrasta la possibilità di scorrimento relativo del corrente superiore rispetto al calcestruzzo circostante, lavorando in parallelo all'aderenza acciaio-calcestruzzo che si esplica lungo tutto il corrente superiore ad aderenza migliorata. Semplici calcoli mettono in luce le grandezze di cui stiamo parlando. Dal momento che esiste un numero finito, ed abbastanza ridotto, di configurazioni possibili, dettate dalle possibili forniture di tralicci e dalla spaziatura ottimale nella sezione, è possibile ricondurre i casi a pochi, come sotto illustrato.

altezza pannello (cm)	altezza traliccio (cm)	Ø superiore	Ø inferiore	Ø diagonale
16	12,5	8	6	6
20	16,5	10	8	6
25	20,5	12	10	8
30	25,5	16	12	10

Tabella 1. Caratteristiche geometriche dei tralicci

tralicci/m	6	4	6	4
B sezione (cm)	16,67	25	16,67	25
h sezione (cm)	4	4	5	5
	L (16,7X4)	L (25X4)	L (16,7X5)	L (25X5)

Tabella 2. Caratteristiche geometriche delle solette

Il carico massimo da trasferire corrisponde alla massima azione di compressione sopportabile dalla soletta di calcestruzzo. Tale valore non viene sempre raggiunto, perché la crisi avviene quasi sempre lato acciaio, dunque senza raggiungere le massime compressioni sulla soletta in cls, e quindi con un minor carico da trasferire.

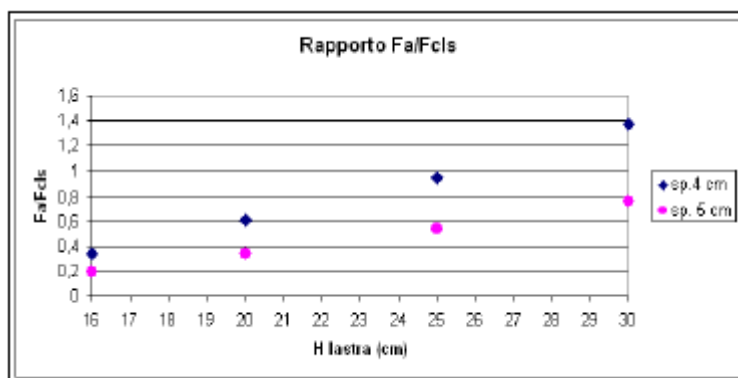


Grafico 1. Rapporto tra carico limite acciaio inferiore e cls della soletta

Come evidenziato in Grafico 1, in tutti i casi tranne uno la crisi è lato acciaio, ed in questo caso l'accoppiata traliccio $h = 25,5$ cm ($2\text{Ø}12$ inferiori) e soletta superiore sp. 4 cm e larga 16,7 cm (corrispondente alla massima densità di tralicci, 6/metro) non è molto probabile, in quanto un addensamento di acciaio (per rispondere ad esigenze statiche) mal si sposa con una soletta di spessore 4 cm. Questo significa che l'azione da trasferire è quasi sempre significativamente minore del carico massimo sopportabile dalla soletta per compressione, perché va in crisi prima l'acciaio teso inferiore, e dunque l'ipotesi di trasferire per aderenza il massimo dell'azione sopportabile dal calcestruzzo compresso risulta a vantaggio della sicurezza, ma eccessivamente penalizzante.

Se il massimo sfruttamento della soletta superiore compressa corrisponde al momento flettente in mezzera si può contare sulla metà della luce di calcolo per passare da momento massimo a momento nullo (ovvero da soletta compressa a soletta inerte) e questa variazione di sollecitazione deve passare attraverso l'aderenza acciaio-calcestruzzo, lungo il perimetro del corrente superiore.

A titolo cautelativo si può pensare che il corrente superiore non sia perfettamente avvolto dalla matrice di calcestruzzo, per cui si considera la collaborazione del solo semiperimetro superiore.

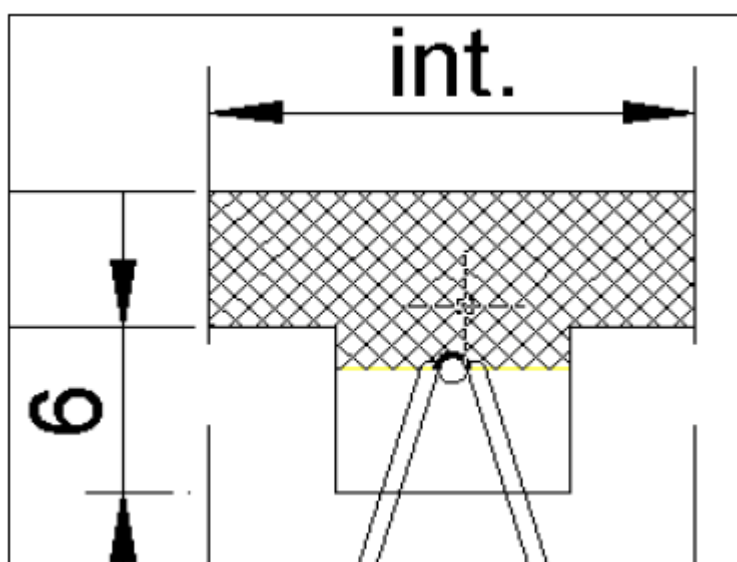


Figura 12. Schematizzazione solaio ibrido

Questa considerazione è compatibile, inoltre, con le condizioni di utilizzo, in quanto il momento flettente massimo deriva da un carico superiore che “preme” la soletta sul traliccio (e quindi permette di considerare azioni assimilabili all’attrito e all’ingranamento tra matrice di calcestruzzo e nervature del corrente superiore), mentre risulta incompatibile con un distacco delle superfici di contatto.

Il confronto va fatto tra massima azione presente, $\min(A_{cls} \cdot f_{cd}; A_a \cdot f_{yd})$ e massima azione trasmissibile per aderenza ($f_{bd} \cdot \text{semiperimetro} \cdot L$)

$$f_{ctk, 0,05} = 1,80 \text{ N/mm}^2 \text{ (Cls C25/30)}$$

$$f_{bd} = 2,25 \cdot 1,8 / 1,6 \cdot 0,7 = 1,77 \text{ N/mm}^2$$

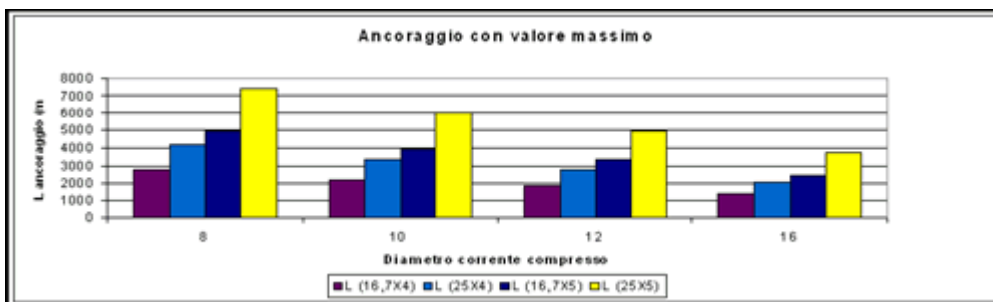


Grafico 2. Lunghezza di ancoraggio (mm) per trasferire la massima compressione della soletta (valore massimo, non sempre raggiungibile)

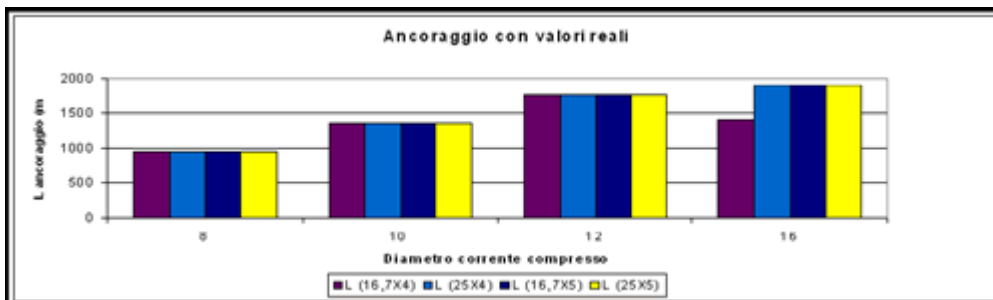


Grafico 3. Lunghezza di ancoraggio (mm) per trasferire la massima compressione della soletta (valore massimo raggiungibile)

Il grafico seguente riporta i valori di carico massimo per ciascun elemento analizzato, in grado di portare allo SLU la soletta compressa, o i tiranti inferiori, per luci pari ad $h_{\text{solaio}} \times 25$.

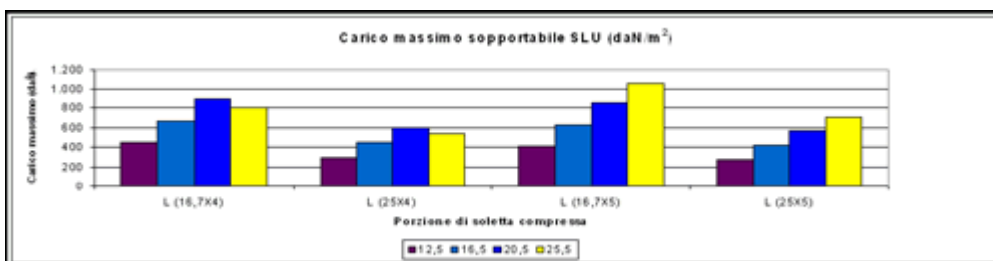


Grafico 4. Carico massimo per luce = $h_{\text{solaio}} \times 25$ ($\gamma = 1,5$)

Il grafico successivo, invece, analizza la luce raggiungibile per ciascuna tipologia di solaio in grado di sopportare 700 daN/m², carico complessivo tipico per edifici residenziali (verifica SLU per flessione, senza considerazioni in merito a instabilità o deformabilità).

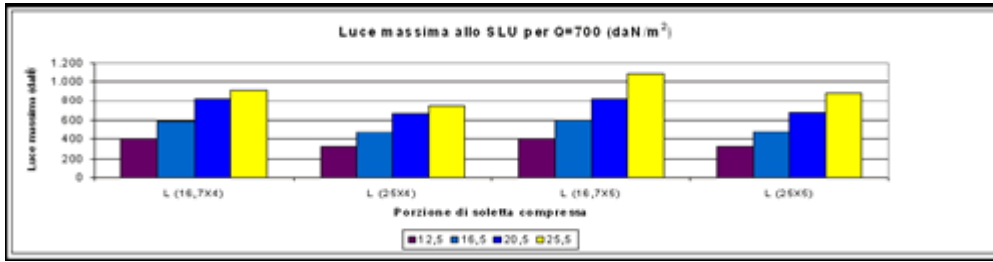


Grafico 5. Luce massima per carichi Q= 700 daN/m² (γ=1,5)

Dai casi studiati appare che, per i carichi usuali, la distanza entro cui si riesce ad "attivare" la massima capacità portante della soletta, affidando all'aderenza la trasmissione degli sforzi, è considerevolmente più lunga della semiluce di calcolo.

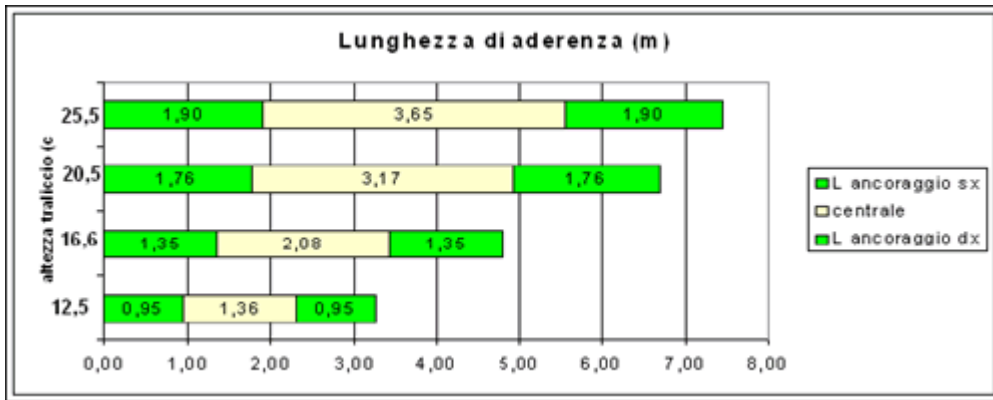


Tabella 3. Luce massima per carico complessivo Q= 700 daN/m² (γ=1,5)

Per portare alla massima compressione la soletta su luci molto corte è necessario incrementare di molto il carico, con la conseguenza che il solaio entrerebbe in crisi prima per taglio (ovvero instabilità dell'equilibrio degli elementi diagonali compressi). Da quanto emerge, per trasmettere gli sforzi per aderenza sono necessari da 1 a 2 m di corrente compresso, a cui è possibile aggiungere il contributo del cordolo perimetrale (larghezza di 0,20-0,30 m), secondo gli schemi limite sotto riportati.

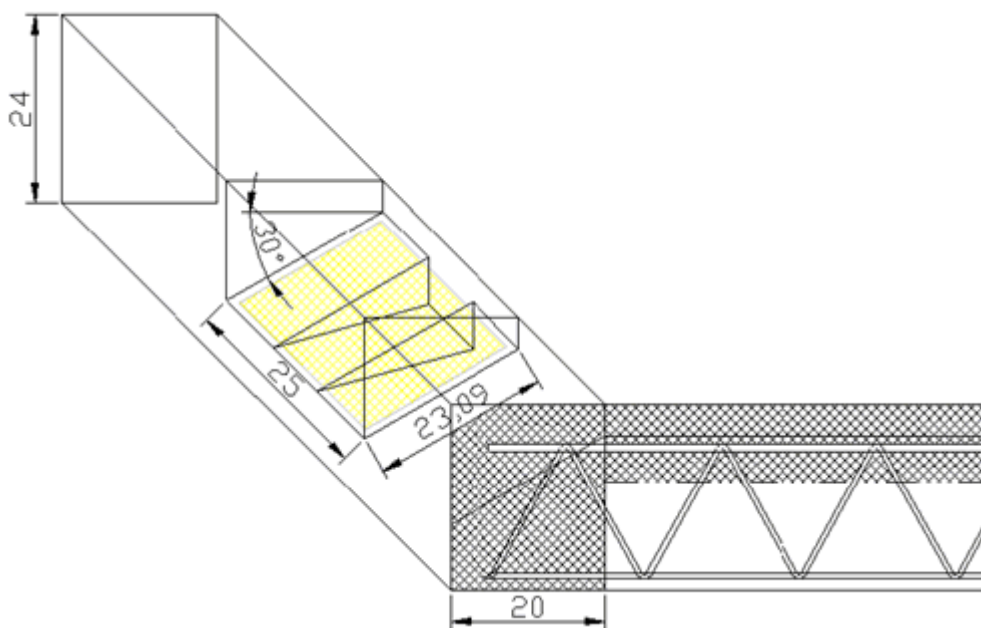


Figura 13. Superficie di rottura favorevole

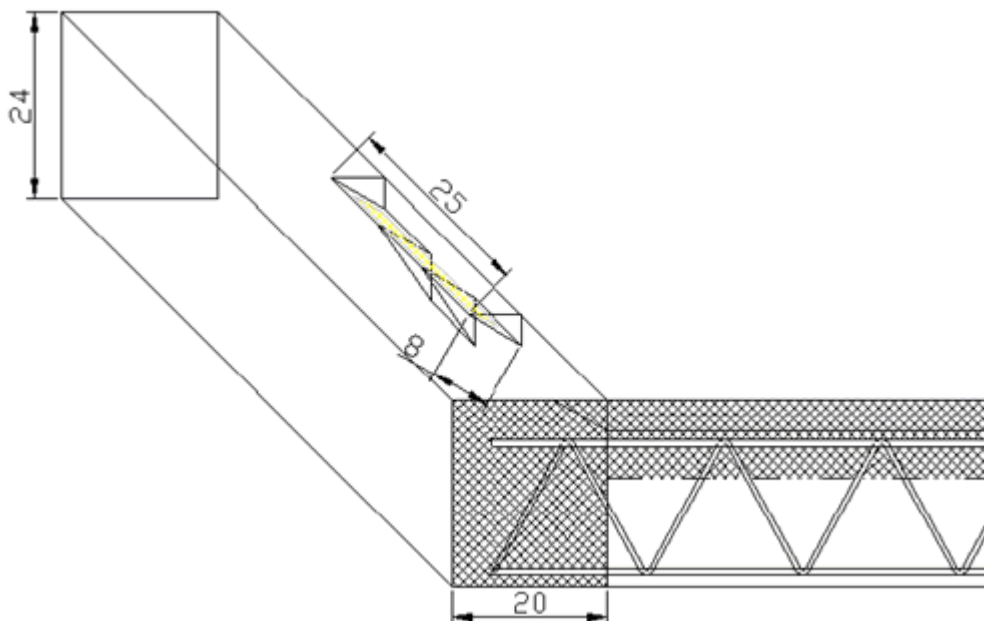


Figura 14. Superficie di rottura sfavorevole

Come evidenziato in Figura 14, esistono condizioni in cui il contrafforte non funziona, a causa della mancanza di carico trasmesso dall'alto e di una adeguata staffatura. In ogni caso, una verifica con queste superfici di scorrimento porta a valori di V_{Rd1} pari a 5-16,7 kN, da confrontare con 37 kN di azione massima sulla soletta in mezzeria, per la sezione presa in esame.

Come è noto la massima azione tagliante si ha agli appoggi, ove si trova una maggiore concentrazione di connettori nel caso di travi miste. Nel caso di solai ibridi il "contrafforte" costituito dal cordolo perimetrale (o dalla porzione di trave, che sarà larga almeno quanto un cordolo) appare elemento supplementare indispensabile per incrementare i margini di sicurezza non ancora indagati a sufficienza con sperimentazioni su vasta scala.

3.3. Considerazioni conclusive

Da quanto illustrato si evince che il trasferimento delle sollecitazioni per aderenza tra soletta in cls e corrente compresso, sebbene non trovi correlazioni nella normativa, può trovare una giustificazione, sia che si consideri il meccanismo dell'aderenza, sia che si consideri la presenza di un "contrafforte" che ostacola l'azione generata dalla soletta compressa. Quest'ultima dovrebbe essere prossima a zero, in vicinanza dell'appoggio, ma se così non fosse rimane il cordolo come ultimo presidio.

Anche nella condizione di non conoscere il reale funzionamento della struttura, ed in attesa di sperimentazioni che confortino le ipotesi assunte, si ritiene che i meccanismi individuati garantiscano riguardo il mantenimento delle sezioni piane, e dunque al riguardo delle ipotesi che stanno alla base del calcolo.

4. PROSPETTIVE FUTURE

4.1. Analisi agli stati limite

Per effettuare un calcolo agli stati limite ci si appoggia a normative consolidate, basate su campagne sperimentali. In questo caso non c'è una normativa specifica e le sperimentazioni sono in fase di programmazione. Ciò che può ragionevolmente fare il progettista è comprendere il comportamento del solaio, nelle sue varie fasi, individuarne i possibili meccanismi di collasso o crisi e trasporlo in un metodo di calcolo verosimile.

4.2. Sperimentazioni in atto e programmate

Sono in corso sperimentazioni comparative per quanto riguarda la sensibilità alla corrosione di armature immerse in una matrice di polistirene. L'ipotesi da verificare è che l'EPS aderisca e formi un film di protezione attorno alla barra, che pure è protetta da un volume di EPS sinterizzato. Se i risultati trovassero conferma, pur in assenza di protocolli consolidati che consentano estrapolazioni nel tempo, si ridurrebbe la necessità dell'uso di

tralicci zincati e/o in acciaio inox.

Sono programmate sperimentazioni su elementi di solaio completi per verificare la corrispondenza tra i modelli proposti e la situazione reale e per avere coefficienti affidabili per gli stati limite ultimi e di esercizio, sia per il momento flettente ultimo, che per il taglio agli appoggi che per l'aderenza corrente superiorecalcestruzzo.

5. CONCLUSIONE

I solai a struttura ibrida in EPS-acciaio-calcestruzzo hanno dimostrato di poter dare soluzioni a parecchie esigenze del mercato delle costruzioni, anche confrontati con i sistemi tradizionali.

Anche in assenza di una normativa specifica è possibile schematizzarne il comportamento per fornire una rappresentazione ingegneristicamente significativa, in grado di consentirne il dimensionamento e prevederne il comportamento sotto carico.

Ai risultati positivi nelle realizzazioni stanno seguendo indagini sperimentali per validare metodi e confortare risultati che altrimenti potrebbero non essere condivisi dalla comunità dei tecnici.

6. BIBLIOGRAFIA

[1] **Barbisan U., Russo S., Siviero E.**: Progettare e costruire con il polistirene espanso ad alta densità, Atti del XII Congresso C.T.E., Padova 1998.

[2] **Cosenza E., Pecce M.**: Le costruzioni composte acciaio-calcestruzzo: Le nuove istruzioni CNR-10016; Settimana della Costruzione in Acciaio, XVII Congresso C.T.A., Napoli 1999; Volume 2 p.207.

[3] **Bernuzzi C., Nusier L.**: Sul dimensionamento di solette composte in acciaio e calcestruzzo; ACS ACAI SERVIZI, XX Congresso C.T.A., Ischia 2005; p.65.

[4] **De Nicolo B., Odoni Z., Pani L.**: Previsione a tempi brevi della resistenza standard a compressione, www.buildup.it

[5] **Siviero E.**, "Determinazione anticipata della resistenza del calcestruzzo", Atti del Seminario Sperimentazione su strutture, Attualità ed Affidabilità delle metodologie d'indagine, Venezia, 1993.

[6] **Siviero E., Sirinic B.**, "Prove accelerate per la determinazione della resistenza di calcestruzzi additivati con superfluidificanti", Atti del Congresso CTE, Arezzo, 5-7 novembre 1992.

[7] **Siviero E., Marasciulo P.**, "Resistenza del calcestruzzo a poche ore dal getto e correlazione con prove a 28 giorni dal getto", L'Edilizia, 4, 1990.

[8] **Siviero E., Martinello S., Marasciulo P., Equestri C.**, "Valutazione della resistenza del calcestruzzo a 28 giorni mediante prove a poche ore dal getto. Indagine teorico-sperimentale", Atti del Congresso CTE, Venezia, 4-6 novembre 1988.

[9] "Il comportamento strutturale di pannelli in polistirene armati con tralicci metallici - solaio "SPEEDY"-", Rapporto di ricerca, settembre 1999.

Contatti con gli autori:

Pierantonio Barizza: marco@iperv.it

Enzo Siviero: enzo.siviero@progeest.com