

SOLAI IN LEGNO-CEMENTO

3^a parte

Ancor oggi nessuno è riuscito a eguagliare il sistema inventato dai professori Turrini e Piazza, che offre la migliore ottimizzazione prezzo/qualità strutturale, sia nelle opere di recupero che di nuova costruzione di solai misti con travetti in legno.



di Giovanni Cenci, strutturista del legno

Il calcolo di un solaio in legno-cemento si completa con la determinazione del diametro e del passo (intervallo) degli spinotti necessari per connettere il calcestruzzo al legno ed impedirne lo scorrimento tra loro. I connettori sono costituiti da barrette in acciaio FeB44K del tipo impiegato per cemento armato, ripiegate in sommità. Questo tipo di solaio, proposto vent'anni or sono dai professori Turrini e Piazza, ancora oggi giorno è senz'altro tra i sistemi di più facile realizzazione e affidabilità prestazionale certa. (Vedi figura 1)

Per completare il calcolo procedo definendo dapprima il valore del momento statico M_i ideale: uguale per le posizioni al di sopra e al di sotto dell'asse neutro nella sezione considerata. Per comodità, prendo in considerazione la zona inferiore, ossia l'area della sezione del travetto e la distanza d_y tra il suo baricentro e l'asse neutro ed è:

$$M_i \text{ ideale} = A_{\text{legno}} \cdot d_y \cdot (\text{Vedi figura 2})$$

Essendo noto il taglio massimo T_{max} e l'inerzia ideale J_{id} della sezione, la tensione massima unitaria di scorrimento S_{max} è in corrispondenza dell'appoggio e risulterà essere:

$$S_{max} = T_{max} \cdot M_i / J_{id}$$

Per la porzione di travetto d tra le posizioni di taglio massimo e taglio nullo, con condizione di carico uniformemente distribuito, il diagramma del taglio è triangolare e quindi la forza complessiva di scorrimento massimo F_s risulterà essere:

$$F_s = (S_{max} \cdot d) / 2 \cdot (\text{Vedi figura 3})$$

Per travetti su due appoggi, la metà lunghezza della campata, ossia $\ell / 2$, corrisponde con la distanza d . Allora è $F_s = (S_{max} \cdot \ell) / 4$. (Vedi figura 4)

Per evitare di posizionare i connettori a passo variabile, incremento cautelativamente F_s del 50%, che considero come forza complessiva riprendibile per pari quota da tutti gli spinotti di connessione della porzione di trave.

È sempre preferibile impiegare connettori che abbiano una conveniente rigidezza, ossia abbiano un diametro apprezzabile, ad esempio Ø16 mm.

agosto • ottobre 2003

36

quaderni

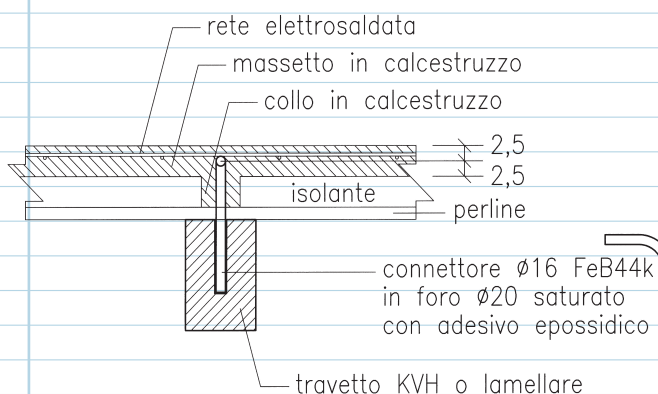


Fig. 1, sopra
Schematizzazione di solaio metodo Turrini-Piazza, integrato con pannello isolante per aumentare l'inerzia (sistema Holzbeton®).

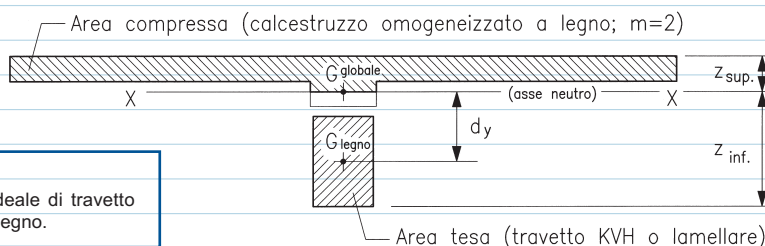


Fig. 2, a lato
Rappresentazione della sezione ideale di travetto con calcestruzzo omogeneizzato a legno.

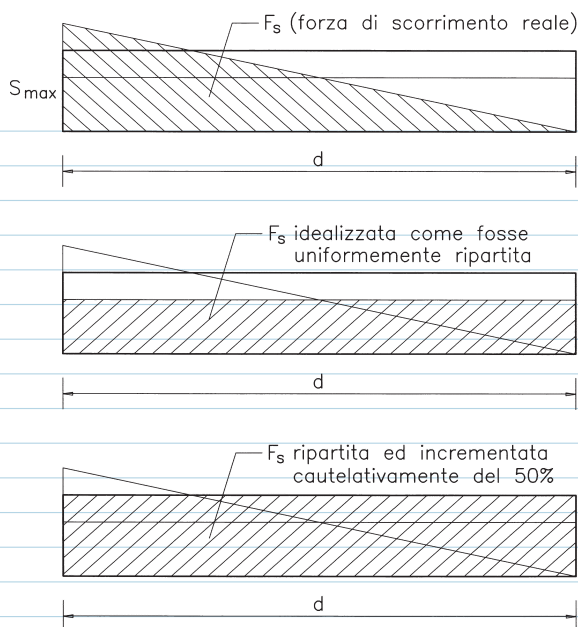


Fig. 3, sopra
Definizione e rappresentazione della forza di scorrimento idealizzata.

Fig. 4, a lato
Diagramma del momento e diagramma del taglio di un travetto su due appoggi.

In presenza di un assito continuo sopra i travetti, che è la condizione più pratica per la formazione dei solai in legno-cemento, i connettori Ø16 possono essere adottati anche su travetti della larghezza di cm 12, purché i fori siano accuratamente tracciati e praticati. E' sempre d'obbligo verificare che la tensione nella sezione al netto dei fori non superi il valore ammesso dalla norma.

La forza concentrata massima di resistenza F_{ϕ} allo scorrimento che posso applicare a un connettore FeB44K è in ragione del suo diametro e della posizione di infissione utile. La tensione massima applicabile a rifollamento è il doppio della tensione a compressione longitudinale alle fibre. Il diametro considerabile è quello del foro in cui è infisso lo spinotto ed è saturato dall'adesivo epossidico. Per la ripresa della forza concentrata considero efficace una profondità di infissione pari a tre volte il diametro del foro, essendo il comportamento del connettore assimilabile al modello di trave su suolo elastico. (Vedi figura 5)

Per quanto sopra:

$$F_{\phi} = 0,5 (\phi \cdot 3\phi) \cdot (2 \cdot \sigma_{compr.//})$$

Nel caso di connettori Ø16 mm FeB44K infissi in fori Ø20 mm praticati in travetti in legno lamellare BS11 o KVH Select (KonstruktionsVollHolz), sarà:

$$F_{\phi 16} = 0,5 (3 \cdot cm^2) \cdot 2 \cdot daN/cm^2 85,$$

ossia

$$F_{\phi 16} = 3 \cdot cm^2 \cdot daN/cm^2 85 = daN 1020.$$

A questo punto è facile determinare il numero di connettori N_c e il loro passo di infissione costante

nel tratto di travetto in esame. Vengono sempre praticati arrotondamenti o esemplificazioni a favore di sicurezza.

$$N_c \text{ connettori} = F_s / F_{\phi}$$

La profondità di infissione degli spinotti nel travetto sarà almeno 6 volte il diametro del foro e possibilmente 2/3 dell'altezza del travetto. La forza F_r di estrazione (rimozione, sfilamento) dello spinotto involuppato da resina è rilevante. In assenza di prove di laboratorio ad hoc, il calcolatore deve limitarsi a considerare la resistenza a taglio del legno per la superficie del foro bagnata dall'adesivo epossidico. Con una foratura del diametro di cm 2, la resistenza in termini assolutamente cautelativi risulta essere:

$$F_r = (cm 2 \cdot \pi) \cdot (6 \cdot cm 2) \cdot daN/cm^2 12 = daN 904$$

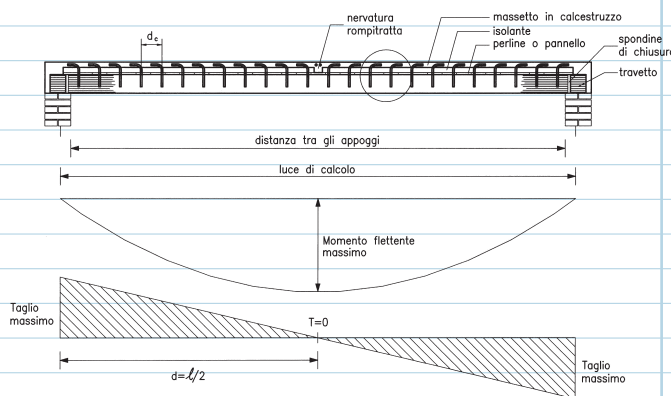


figura 4

Avendo precedentemente stabilito il passo degli spinotti di connessione, sono ora in grado di verificare la forza media di estrazione F_r loro applicata.

Nota la forza media F_{ϕ} applicata a ciascun spinotto e conoscendo la distanza d_c assegnata ai connettori e la distanza h_c tra l'asse del risolto orizzontale del connettore e l'estradosso del travetto ligneo, sarà:

$$F_{r \text{ medio}} = F_{\phi \text{ medio}} \cdot h_c / d_c \cdot (\text{Vedi figura 6})$$

Riprendiamo con un esempio pratico, per riepillare quanto sino a ora considerato. Per semplicità di esposizione viene fatto riferimento a un travetto di solaio su due appoggi, con carico uniformemente distribuito, come in figura 4.

- Distanza tra i muri di appoggio m 4,70; luce di calcolo m $(4,70 \cdot 1,05) = 4,935$, arrot. m 4,95;
- Carichi permanenti accidentali daN/m² 750;
- interasse travetti cm 66, carico complessivo daN/m² 750 · 0,66 = daN/m 500;
- Massetto collaborante cls Rck 250; prescritto Rck 300, spessore cm 5, armato con rete elettrosaldata Ø mm 6, maglia cm 20x20;

- Isolante interposto spessore cm 5, larghezza cm 60; larghezza del collo in cls cm 6,6;
- Formazione di impalcato continuo con perline spessore cm 2, oppure pannello in multistrato o in OSB (Oriented Strand Board) classe 3;
- Travetti in KVH Select sez. cm 12x18;
- Connettori \varnothing 16 mm FeB44K, fori \varnothing 20 mm, profondità del foro cm 12;
- Spessore complessivo del solaio = cm 5 + 5 + 2 + 18 = cm 30;
- $m_1 = E_C R_{ck} 250 / E_{KVH} = (18.000 \cdot \sqrt{R_{ck}}) / 100.000 = 2,84$ che cautelativamente riduco a $m_1 = 2$;
- Per la composizione in essere $J_{id} = \text{cm}^4 63.077$, con l'asse neutro a cm 7,1 dall'estradosso del getto ed a cm 22,9 dall'intradosso del travetto, sarà:
- $W_{id\ cls} = J_{id} / 7,1 = \text{cm}^3 8.884$;

- σ_{legno} al netto del foro = $55,6 \cdot 216 / 192 = \text{daN/cm}^2 62,5$ (valore appross.);
- $f_{max} = (5/384) \cdot [5,00 \cdot 495^4 / (100.000 \cdot 63.077)] = \text{cm } 0,619 = \ell / 799$, che è un ottimo comportamento elastico;
- $T_{max} = 500 \cdot 4,70 / 2 = \text{daN } 1.175$;
- $M_i = (12 \cdot 18) \cdot (22,9 - 9) = 216 \cdot 13,9 = \text{cm}^3 3.002,4$;
- $S_{max} = 1.175 \cdot 3.002 / 63.077 = \text{daN/cm } 55,93$;
- $F_s = 1,5 \cdot 55,93 \cdot 470 / 4 = \text{daN } 9.858$;
- $F_{\varnothing 16} = \text{daN } 1.020$;
- $N_{c\ connettori} = 9.858 / 1.020 = 9,6$, ossia n°10;
- $d_c = (470 / 2) / 10 = \text{cm } 23,5$, portato a cm 20, per cui saranno n° 24 connettori sull'intero travetto, con il primo e l'ultimo a cm 5 dai muri di appoggio;
- $F_{\varnothing\ medio} = 9.858 / 12 = \text{daN } 820 < 1.020$;
- $h_c = \text{cm } 5 / 2 + 5 + 2 = \text{cm } 9,5$;
- $F_r\ medio = 820 \cdot 9,5 / 20 = \text{daN } 389 < 904$.

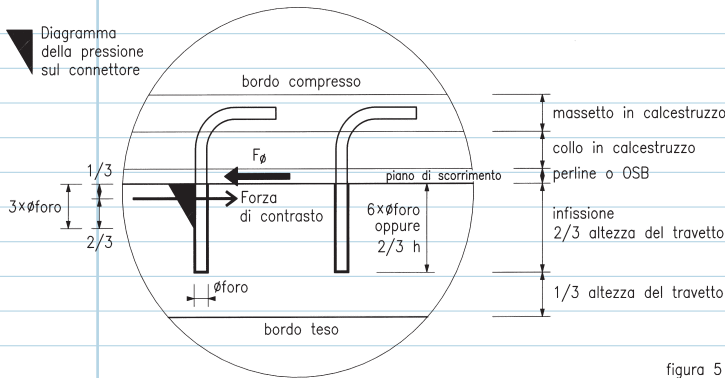


figura 5

Fig. 5 Comportamento dei connettori FeB44K.

- $W_{id\ KVH} = J_{id} / 22,9 = \text{cm}^3 2.754$;
- $M_{max} = 0,125 \cdot q \cdot \ell^2 = 0,125 \cdot 500 \cdot 4,95^2 = \text{daN} \cdot \text{m } 1.531,4$;
- $\sigma_{cls} = M_{max} / (W_{id\ cls} / m_1) = 153.140 / (8.884/2) = \text{daN/cm}^2 34,5 < (85 \cdot 0,8)$;
- $\sigma_{legno} = M_{max} / W_{id\ legno} = 153.140 / 2.754 = \text{daN/cm}^2 55,6 < 100$;
- $A_{netta\ legno} = 12 \cdot 18 - 2 \cdot 12 = 216 - 24 = \text{cm}^2 192$

La verifica è valida anche per la costruzione di solai in legno-cemento continui su due o più campate, con travetti non interrotti, con beneficio di una minore deformazione elastica.

Anche se il taglio massimo di sinistra T_s più quello destro T_d di ciascuna campata corrisponde all'intero cumulo di carichi e sovraccarichi Q imposti nella stessa campata, per la definizione del numero complessivo di connettori per l'intera campata è necessario procedere separatamente per la tratta di destra e la tratta di sinistra, sommando solo alla fine le due quantità, sempre da incrementare cautelativamente del 50%.

In corrispondenza dell'appoggio intermedio, i travetti continui passano dalla condizione tesa a quella compressa. La condizione della parte superiore del sistema composito passa da compressa a tesa, però il calcestruzzo non può essere accettato a trazione. Il problema è superato inserendo una o più barre integrative in acciaio FeB44K. La sezione necessaria di acciaio viene determinata secondo il fattore di omogeneizzazione acciaio/legno e procedendo con verifiche analoghe alle precedenti. (Vedi figura 7)

Fig. 6, a lato Forza tagliante F_\varnothing e forza di estrazione F_r su un connettore FeB44K.

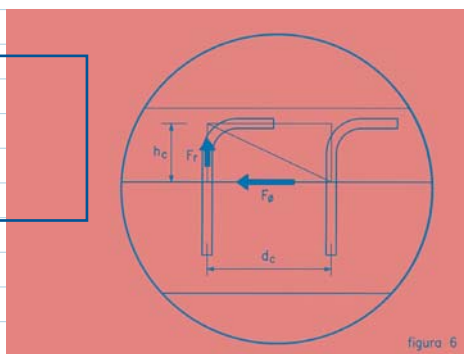


figura 6

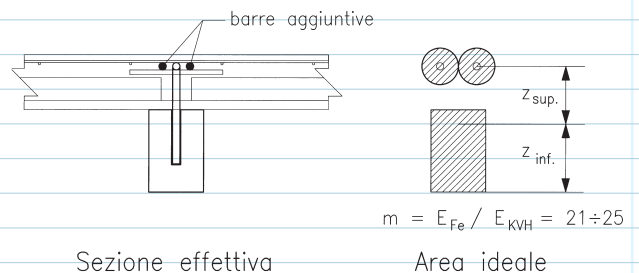


Fig. 7, sopra Sezione effettiva e sezione ideale sull'appoggio intermedio.

In questo caso $m_2 = (E_{Fe} / E_{KVH}) =$
 $= (2.060.000 / 100.000) = 20,6$.

Non tengo conto della viscosità del legno perché ho già applicato molti fattori cautelativi. Quindi va bene l'adozione di un rapporto di omogeneizzazione compreso tra 21 e 25;

$m_2 = (E_{Fe} / E_{KVH}) = 21 \div 25$.

Per un esempio di verifica di solaio continuo in legno-cemento possiamo riprendere i carichi e la sezione del solaio precedentemente considerato.

Sia ora il caso di travetti continui su due campate in KVH sezione cm 12x18, come in figura 8.

- $M_{a \max}$ sull'appoggio centrale =
 $= 0,125 \cdot 500 \cdot 4,95^2 = \text{daN} \cdot \text{m} \ 1.531,4$
- $M_{m \max}$ in campata =
 $= 0,0703 \cdot 500 \cdot 4,95^2 = \text{daN} \cdot \text{m} \ 861,3$
- T_{\max} estremità = $0,4 \cdot 500 \cdot 4,95 = \text{daN} \ 990$;
- T_{\max} sull'appoggio centrale = $0,6 \cdot 500 \cdot 4,95 =$
 $= \text{daN} \ 1.485$ per parte ;
- $R_{\text{estremità}} = \text{daN} \ 990$;
- $R_{\text{sull'appoggio centrale}} = 2 \cdot 1.485 = \text{daN} \ 2.970$;
- Posizione del M_{\max} campata (ove $T = 0$) =
 $= 4,95 \cdot 0,4 = \text{m} \ 1,98$ dall'appoggio esterno ;
- Forza di scorrimento massimo dalla parte dell'appoggio esterno =
 $= 1,5 \cdot [(990 \cdot 3.002) / 63.077] \cdot 198 / 2 = \text{daN} \ 6.696$;
- Forza di scorrimento massimo dalla parte dell'appoggio interno =
 $= 1,5 \cdot [(1.485 \cdot 3.002) / 63.077] \cdot 297 / 2 =$
 $= \text{daN} \ 15.742$;
- N_c sull'intera campata =
 $= (6.696 + 15.742) / 1.020 = n^\circ \ 22$;
 perciò prescriverò n° 25 connettori distribuiti a cm 20 su ciascuna delle due campate.

L'armatura metallica integrativa per il tratto interessato dal momento sull'appoggio centrale sarà costituita da barre FeB44K, posizionate allo stesso livello dei risvolti orizzontali dei connettori.

Per la determinazione dell'area metallica mi concedo di ricorrere in **prima approssimazione** al famoso manuale Santarella :

- $H = \text{cm} \ 30$; $h = \text{cm} \ (30 - 2,5)$;
- $M_{\text{supp.}} = \text{daN} \cdot \text{m} \ 1.531,4$;
- $M_{a \text{ applicato}} = \text{daN} \cdot \text{m} \ 1.531,4 \cdot 0,9 =$
 $= \text{daN} \cdot \text{m} \ 1.378,26$;
- $b = \text{cm} \ 12$ (larghezza del travetto) ;
- $r = h / \sqrt{M / b} = 27,5 / \sqrt{137.826 / 12} = 0,2566$

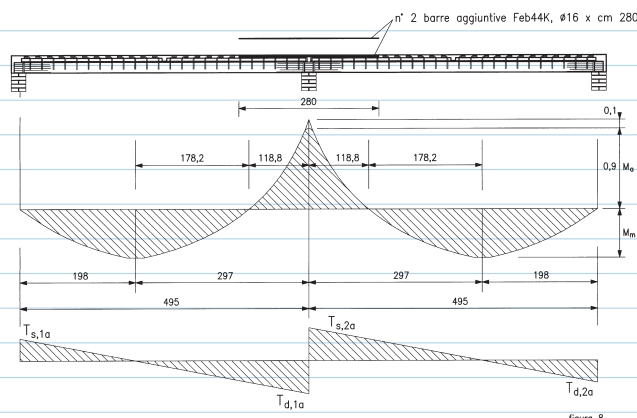


Fig. 8
 Diagramma dei momenti e del taglio di un travetto continuo su due campate, integrato con FeB44K.

Utilizzando le tabelle :

- $m = 15$;
- $\sigma_f = \text{daN/cm}^2 \ 2.600$;
- $r = 0,253$ (valore prossimo a 0,2566);
 leggo il valore di $t = 0,001725$.

$F_f = t \cdot \sqrt{M \cdot b} = 0,001725 \cdot \sqrt{137.826 \cdot 12} = 2,218$

Verifico con 2 Ø16, adottando $m_2 = 25$:

$A_{Fe \ id}$ di ciascun tondo rapportato a legno =
 $= \text{cm}^2 \ 2,01 \cdot 25 = \text{cm}^2 \ 50,25$.

Per questa configurazione $J_{id} = \text{cm}^4 \ 29.710$, con l'asse neutro a cm 12,6 dal centro delle barre ed a cm 14,9 dal bordo inferiore del travetto.

$W_{id \ Fe} = 2.358$; $\sigma_{Fe} = 137.826 / (2.358 / 25) =$
 $= \text{daN/cm}^2 \ 1.496 < 2.500$;

$W_{id \ legno} = 1.994$; $\sigma_{legno} = 137.826 / 1.994 =$
 $= \text{daN/cm}^2 \ 69,2 < 85$;

Posizione M_{\max} campata dall'appoggio centrale =
 $= 495 \cdot 0,6 = \text{daN} \cdot \text{cm} \ 297$;

Posizione passaggio dei momenti =
 $= 297 - 297 \sqrt{M_m / (M_a + M_m)} =$
 $= 297 - 297 \sqrt{86.130 / (153.140 + 86.130)} = \text{cm} \ 188,8$

Siccome la posizione di passaggio del momento è a circa m 1,20 dall'appoggio centrale, i ferri inseriti a trazione verranno prolungati di poco oltre questa misura. Ad esempio vanno bene 2 barre Ø16 della lunghezza di cm 280.

Segue e conclude al prossimo numero.

Avvertenze: L'autore e l'editore declinano ogni responsabilità dall'utilizzo improprio delle informazioni qui contenute e sottolineano che per ciascuna opera edilizia, indipendentemente dalle dimensioni e dalla tipologia, il progetto strutturale deve essere redatto da un professionista responsabile del dimensionamento e la sua realizzazione seguita da un direttore dei lavori espressamente incaricato.