

A SFRC slab for a residential building in Erba, Italy

Piastra di solaio in SFRC per un edificio residenziale a Erba

M. di Prisco¹, C. Gaffuri², A. Bassani², M. Colombo¹, P. Martinelli¹

¹ *Department of Civil and Environmental Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

² *DSC-ERBA s.r.l., Erba, Italy*

ABSTRACT: In Erba (Italy), a two-stories family house has been recently completed. The building is characterized by a Steel Fibre Reinforced Concrete (SFRC) slab used to optimize the presence of conventional steel bars. The paper describes the design philosophy based on the approach proposed in the new Model Code 2010. Some preliminary experimental tests that have driven the design choices are then described. The control of the fibre content at the fresh state and the mechanical strength of the SFRC material are discussed. The reliability of an analytical model used for the design of the SFRC slab is evaluated. The curing procedures adopted to limit the cracking phenomena are described. The advantages of a SFRC slab compared to traditional solutions and an experimental campaign on structural beams carried out after the SFRC slab casting are finally discussed. / Nel centro di Erba è stata recentemente completata una villa privata, ove è risultato conveniente gettare un solaio in calcestruzzo fibrorinforzato per ottimizzare la presenza di armatura tradizionale. Dopo una descrizione della filosofia progettuale elaborata in accordo con l'approccio suggerito nel Codice Modello 2010, si descrive la sperimentazione usata in sede preliminare per garantire le scelte operate dal progettista, quella per controllare l'uniformità delle fibre nei getti, quella per identificare le caratteristiche meccaniche del conglomerato fibroarmato in sede di accettazione, quella per misurare l'affidabilità del modello di calcolo usato nella progettazione del solaio. Infine vengono descritte le procedure di cura del getto allo scopo di scongiurare i fenomeni fessurativi indotti dal ritiro per essiccamento ed i riscontri ottenuti con riferimento alla fessurazione in sede esecutiva. Vengono discussi brevemente anche i vantaggi connessi alle scelte operate rispetto ad altre soluzioni più tradizionali ed alcuni riscontri sperimentali ottenuti a valle della sperimentazione svolta su travi strutturali.

KEYWORDS: fibre reinforced concrete; SFRC elevated slab; design approach; executive procedure / calcestruzzo fibrorinforzato; piastra di solaio fibro-rinforzata; approccio progettuale / procedure esecutive

1 INTRODUZIONE

Il calcestruzzo fibro-rinforzato con aggiunta di fibre in acciaio (SFRC) è un materiale da costruzione molto conosciuto che è stato ampiamente utilizzato in strutture iperstatiche come pavimentazioni industriali, tubature, rivestimenti di tunnel con calcestruzzo proiettato (*shotcrete*), segmenti di tunnel prefabbricati e piastre di fondazione. La ridondanza di queste strutture agevola l'utilizzo del calcestruzzo fibro-rinforzato rendendolo particolarmente conveniente. Infatti, la capacità redistributiva permette: una significativa riduzione dell'armatura convenzionale accelerando e semplificando le operazioni di posizionamento dell'armatura e di getto; l'aumento delle prestazioni meccaniche del conglomerato, consentendo una riduzione dello spessore della struttura; una migliore qualità del manufatto, anche in termini di durabilità, grazie al controllo dell'apertura delle fessure. Inoltre, l'uso di barre d'armatura tradizionali ad alta aderenza, disposte in aggiunta alle fibre d'acciaio nelle regioni critiche, può risultare una

scelta particolarmente vantaggiosa, in quanto favorisce la robustezza delle strutture e la presenza di meccanismi di collasso duttili all'incipiente collasso, conserva il vantaggio tipico del c.a. di un'armatura disomogenea per inseguire panorami non uniformi di azioni sollecitanti, raggiungendo la massima capacità portante allo Stato Limite Ultimo senza richiedere un eccesso di duttilità locale.

Finora l'utilizzo di calcestruzzo fibrorinforzato per piastre di solaio aventi come supporti colonne o pareti è stata molto limitata nei paesi con una normativa cogente o ben delineata (Mobasher & Destrée, 2010). Nel centro di Erba è stata recentemente completata una villa privata di soli due piani, ove è risultato conveniente gettare un solaio in calcestruzzo fibro-rinforzato per ottimizzare la presenza di armatura tradizionale. Il solaio ha una superficie totale di circa 250 m², ed è stato costruito facendo uso di calcestruzzo fibrorinforzato e di armatura ordinaria al fine di ottimizzare la struttura, agevolando la messa in opera e la velocità di esecuzione in fase di

realizzazione. Nel lavoro si descrive la filosofia progettuale, l'approccio sperimentale di controllo usato in sede preliminare per garantire le scelte operate dal progettista e per controllare l'uniformità delle fibre nei getti, quello usato per identificare le caratteristiche meccaniche del conglomerato fibroarmato in sede di accettazione, quello per misurare l'affidabilità del modello di calcolo usato nella progettazione del solaio, e da ultimo la tecnica usata per ridurre la fes-

surazione dovuta al ritiro per essiccamento. Vengono discussi brevemente anche i vantaggi connessi alle scelte operate rispetto ad altre soluzioni più tradizionali ed alcuni riscontri sperimentali ottenuti a valle della sperimentazione svolta su travi $0.5\text{ m} \times 1.5\text{ m} \times 0.25\text{ m}$ in collaborazione con l'università UPC di Barcellona.

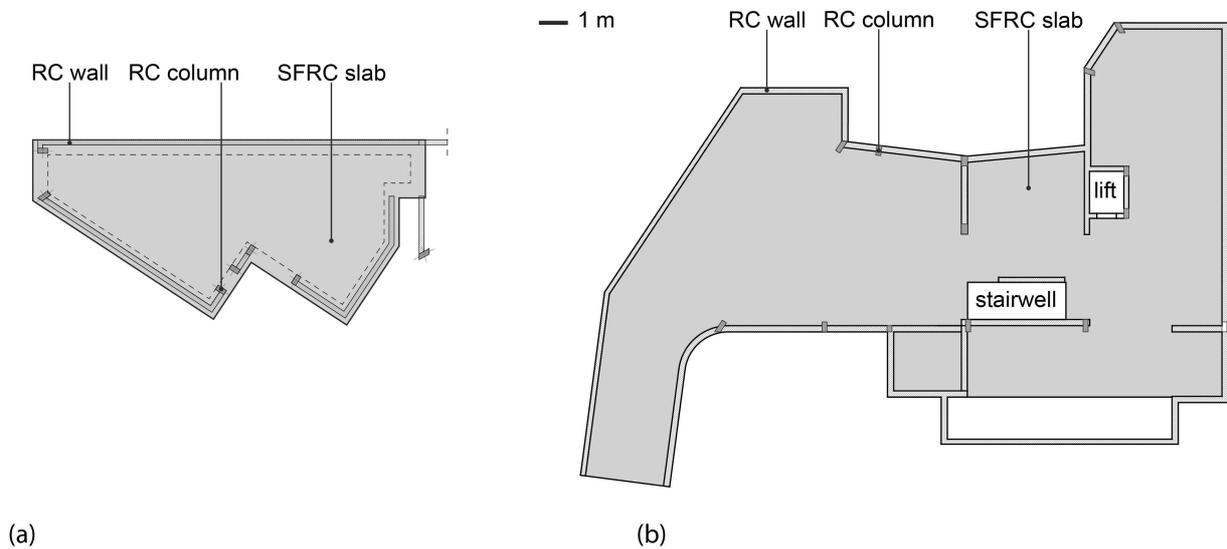


Figure 1. Schematic plan views: (a) foundation SFRC slab and (b) SFRC elevated slab / (a) Piante schematiche in calcestruzzo fibro-rinforzato: (a) platea di fondazione e (b) piastra di solaio.

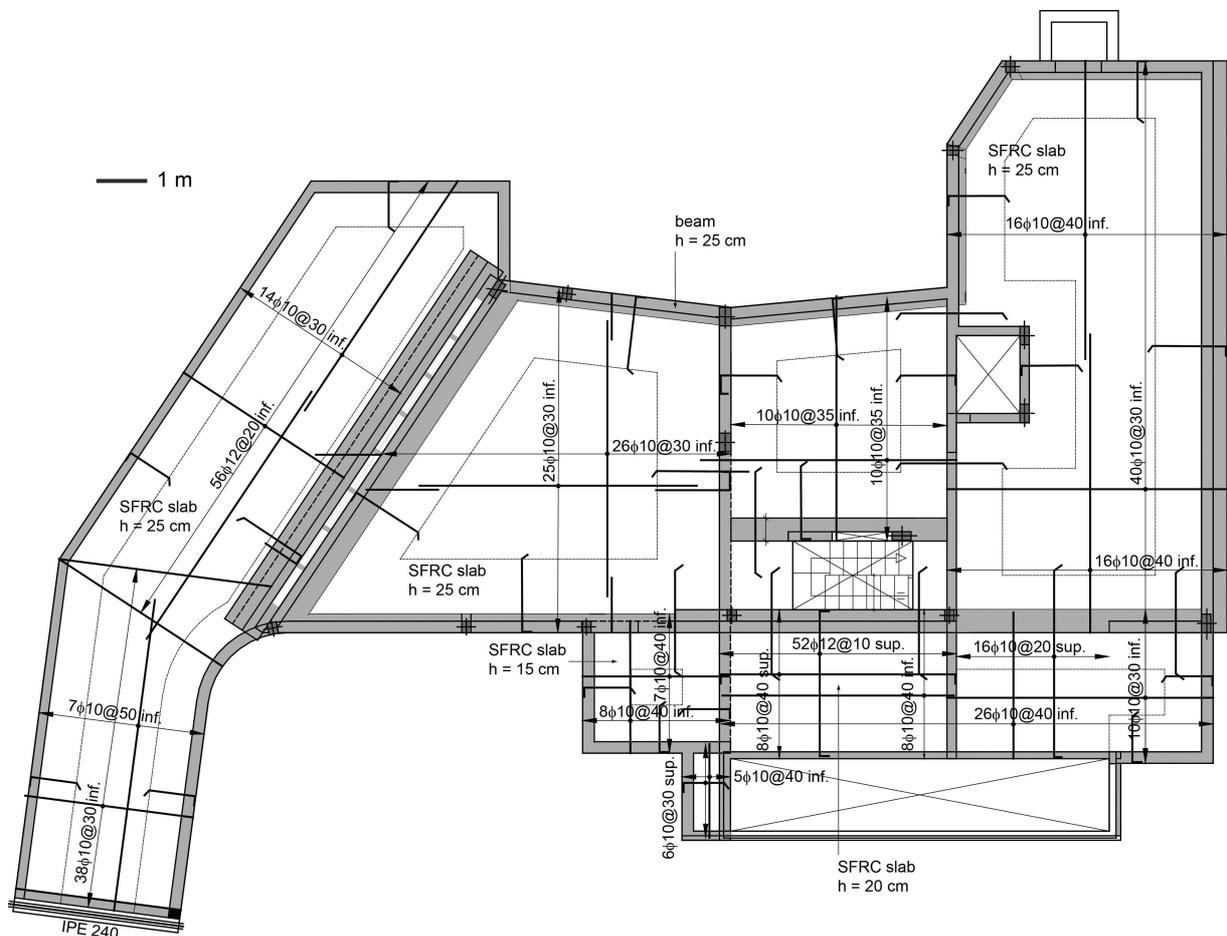


Figure 2. SFRC slab plan view, steel rebar position and reinforcement amount / Pianta del solaio fibro-rinforzato: posizione e quantità delle barre d'armatura tradizionali.

2 IL CASO STUDIO: UN EDIFICIO RESIDENZIALE A DUE PIANI

Il caso studio presentato in questa memoria si riferisce ad un edificio residenziale costituito da un piano interrato e da un piano fuori terra realizzato nel centro di Erba, ove si è giudicato conveniente realizzare un solaio in calcestruzzo fibrorinforzato. La superficie del piano interrato è di circa 290 m², mentre l'area coperta al piano terra è di circa 240 m². Il solaio di calpestio del piano terra è costituito in parte dall'impalcato di copertura dell'interrato e in parte da una platea diretta in c.a. con vespaio d'areazione. Il suolo di fondazione, le cui caratteristiche sono state identificate sulla base della caratterizzazione operata mediante le prove SCPT eseguite, risulta essere ascrivibile alla tipologia C: depositi di sabbie e ghiaie mediamente addensate o di argille di media consistenza, con spessori variabili da diverse decine fino a centinaia di metri, caratterizzati da valori di V_{s30} compresi fra 180 e 360 m/s ($15 < N_{SPT} < 50$, $70 < c_u < 250$ kPa - Gaffuri, 2015).

Si sono previste fondazioni dirette superficiali costituite da una platea di calcestruzzo fibrorinforzato di spessore 400 mm con armatura superiore ed inferiore per la zona priva del piano interrato (Fig. 1a). Alla base del piano interrato, in concomitanza delle strutture portanti verticali, vengono realizzate travi rovesce in c.a. di altezza pari a 50 cm e larghezza variabile con armatura superiore e inferiore simmetrica. Prima della posa delle fondazioni, il terreno è stato consolidato asportando la coltre superficiale di scarsa consistenza; successivamente è stato steso materiale ghiaioso e sabbioso, opportunamente compattato, fino a raggiungere il carico ammissibile. Le fondazioni poggiano su uno stato di calcestruzzo magro di spessore minimo 20 cm.

Per le strutture a sviluppo verticale si sono previste pareti in c.a. di spessore 25 cm per l'interrato, pareti in c.a. di spessore 20 cm e pilastri in c.a. 20×40 cm in corrispondenza delle aperture, per il piano terra; le armature, sia orizzontali che verticali, sono simmetriche rispetto alle due facce. Le armature verticali dei muri vengono incrementate in corrispondenza delle mensole.

Il solaio a copertura del piano interrato è stato realizzato in calcestruzzo fibrorinforzato con altezza pari a 250 mm, calcolato a piastra seguendo i principi esposti nel Codice Modello (di Prisco et al., 2009) e armato superiormente e inferiormente (Fig. 1b; Fig. 2). Tale scelta ha permesso di ottimizzare la struttura, agevolando la messa in opera e la velocità di esecuzione in fase di realizzazione. Anche le travi in corrispondenza delle aperture sono in calcestruzzo fibro-rinforzato. A conoscenza degli autori, questa risulta essere la prima piastra di solaio in elevazione realizzata in calcestruzzo fibrorinforzato in Italia.

La copertura a singola falda rivolta verso il giardino di proprietà, è stata realizzata mediante soletta

piena in c.a. dello spessore di 200 mm incastrata nei muri di elevazione da un lato e in appoggio su colonne in legno 10×25 cm, passo 55 cm, dall'altro. Le travi sono in c.a. calcolate come continue, in semplice appoggio alle estremità.

L'approccio progettuale esposto ha seguito quanto recentemente pubblicato (di Prisco et al., 2014). L'idea progettuale si può esprimere sinteticamente con i seguenti passi con riferimento al generico campo di piastra:

1. progetto dello spessore della piastra sulla base delle equazioni del Codice Modello 2010 che stabiliscono i limiti di deformabilità della piastra, supponendo la piastra in c.a. ed usando le equazioni 7.6.22 (a o b);
2. determinazione dei momenti massimi sollecitanti di involuppo elastico e determinazione mediante analisi limite con valore preassegnato tra momento massimo positivo e negativo, fissato su un valore ridotto i del rapporto elastico determinato sulla base delle condizioni in esercizio con l'analisi elastica;
3. calcolo con modello cinematico di analisi limite della piastra del momento specifico positivo m_+ ($m_+ = im_+$) per soddisfare le verifiche allo Stato Limite Ultimo (Hedebratt, J., & Silfwerbrand, J., 2014);
4. scelta dei rapporti geometrici d'armatura ρ_+ e ρ_- necessari a garantire i valori m_+ ed m_- , fissato il valore della classe del fibrorinforzato scelta sulla base di un valore sufficiente a verificare una regione ampia di piastra senza ricorrere ad armature aggiuntive. Tale scelta può essere operata per tentativi a partire dalla classe 3c per ridurre il pericolo di fragilità locali;
5. controllo dell'apertura di fessura w per la scelta del diametro dell'armatura ed il relativo passo ed eventuale modifica dell'armatura al negativo con aggiornamento del rapporto i .
6. controllo della resistenza a punzonamento in corrispondenza dei pilastri (Eq. 7.7.18) con eventuale aggiunta di armatura locale e controllo della verifica a taglio in prossimità dei muri perimetrali.

Si noti come nel calcolo allo S.L.U. delle piastre sia possibile tener conto usualmente di un coefficiente K_{Rd} pari a 1.4 (valore massimo consentito), per considerare il minor rapporto riscontrabile nella piastra tra valore caratteristico e valor medio, a causa dell'ampio volume coinvolto nell'eventuale meccanismo di collasso e della grande capacità redistributiva della struttura piastra (di Prisco et al., 2016b), fatto salvo in condizioni d'angolo o di ridotta redistribuzione.

In Figura 3 si riporta, a titolo d'esempio, la distribuzione dei momenti sollecitanti lungo la direzione principale corrispondente a quella di minor luce del

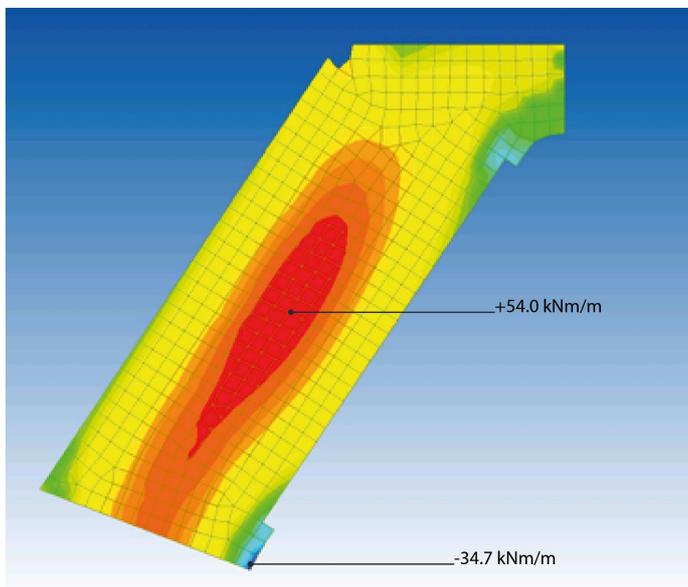


Figure 3. Example of acting moment in a SFRC slab region along one principal direction / Esempio di momento sollecitante in un campo della piastra fibro-armata lungo una direzione principale.

solaio, in un campo della piastra fibroarmata a seguito dell'involuppo delle combinazioni di carico esaminate. In questa sede non siamo tanto interessati al confronto tra momento sollecitante e momento resistente (verifica dell'elemento strutturale), ma si vuole sottolineare come la filosofia di progetto preveda che alle fibre siano affidati i valori "medi" di momento sollecitante registrati nella piastra di solaio, mentre i picchi di sollecitazione siano affidati all'armatura ordinaria in regioni molto più limitate.

È importante anche evidenziare il diverso ruolo che fibre e barre d'armatura tradizionale hanno nei confronti della fessurazione. Le prime, grazie alla loro distribuzione casuale, agiscono in ogni direzione all'interno della piastra e questo fa sì che esse siano in grado di limitare l'insorgere di fessure o di limitarne l'apertura indipendentemente dalla zona in cui la fessura si propaga e dalla sua orientazione. Inoltre, anche le fibre non ortogonali al piano di fessura sono in grado di limitare l'insorgere della fessura e/o di limitarne l'apertura. Le barre d'armatura risultano invece preziose nelle regioni dove le concentrazioni di sforzo sono elevate, localizzate e bene orientate. Esse però sono disposte secondo direzioni ben precise (non possono limitare l'insorgere di fessure parallele alla loro direzione) e sono disposte con un passo discreto e non continuo.

3 CARATTERISTICHE DEI MATERIALI

La Tabella 1 riporta il mix volumetrico adottato in sede preliminare per il calcestruzzo fibrorinforzato. Il calcestruzzo utilizzato nella fase preliminare era stato progettato per ottenere un materiale conforme alle caratteristiche prestazionali tipiche di un calcestruzzo fibrorinforzato per pavimentazioni ad elevata

Table 1. Preliminary and final SFRC mix design / Mix volumetrico preliminare e finale di calcestruzzo fibro-rinforzato.

Component	Dosage (kg/m ³)	
	Preliminary mix	Final mix
Cement type CEM II /A-LL 42.5R	340	370
Filler	-	150
Gravel	565	409
Washed sand	1088	993
Sifted sand	184	244
Water	170	185
Super-plasticizer	2.72	5.6
Straight steel fiber	30	35

durabilità. La densità era pari a 2350 kg/m³, mentre il quantitativo di fibre era pari a 30 kg/m³ (percentuale volumetrica V_f pari al 44%). Le fibre di acciaio utilizzate sono state ottenute mediante il processo di taglio di lamiera, hanno forma rettilinea e presentano 2 tacche indentate longitudinalmente. Le fibre sono caratterizzate da un basso contenuto di carbonio, hanno una lunghezza di 60 mm, un diametro di 1 mm ed una resistenza a trazione maggiore di 1200 MPa. La classe di consistenza del materiale è la S4. La resistenza a compressione cubica media a 28 giorni, è risultata pari a 43.7 MPa misurata su provini cubici con lato di 150 mm.

Al fine di classificare il materiale in accordo con il recente Codice Modello 2010 (fib, 2013), sei travetti intagliati (0.55×0.15×0.15 m, profondità intaglio 25 mm) furono gettati e provati seguendo uno schema con tre punti di carico in accordo con la EN 14651. Il limite di proporzionalità f_L , le resistenze residue oltre la fessurazione f_{R1} , f_{R2} , f_{R3} and f_{R4} furono misurate per tutti i provini con riferimento ai valori di apertura di fessura (CMOD) di 0.5, 1.5, 2.5 e 3.5 mm. In Tabella 2 vengono riportati i valori medi. Nella stessa tabella vengono riportati i valori caratteristici f_{RK} assumendo sia una distribuzione normale, sia una distribuzione log-normale delle proprietà meccaniche oltre la fessurazione della matrice secondo l'approccio proposto in nell'EN 1990 (2006). I valori caratteristici riportati in Tabella 2 fanno riferimento ad un coefficiente di variazione V_x non noto a priori, ma stimato partendo dal campione di sei travetti intagliati. Il materiale è stato classificato come "3c" in base alle specifiche contenute nel Codice Modello 2010 (fib, 2013) con riferimento ai valori caratteristici.

A seguito delle prove preliminari di caratterizzazione, si è ritenuto opportuno incrementare il quantitativo di fibre d'acciaio passando a 35 kg/m³ nella miscela definitiva (Tabella 1). Per garantire al contempo una adeguata lavorabilità dell'impasto è stato necessario modificare la miscela originaria, come si può facilmente notare confrontando le due miscele riportate in Tabella 1. In particolare, la miscela definitiva è più ricca di materiale fine, obiettivo raggiunto introducendo il filler nella miscela preliminare. Il

materiale fibrorinforzato usato per il getto della piastra di solaio è caratterizzato da una densità pari a 2358 kg/m^3 . Durante il getto della piastra di solaio è stato effettuato un controllo della quantità di fibre secondo la EN 14721 (2005), prelevando sette campioni di materiale allo stato fresco da sette betoniere diverse. Il quantitativo medio di fibre misurato è risultato di 33 kg/m^3 , valore prossimo al valore nominale indicato, con un coefficiente di variazione pari del 20.7%. Per ogni porzione di getto scelta per operare una misura delle quantità di fibre allo stato fresco, si è provveduto a confezionare anche un cubo per la prova a compressione a 28 giorni con lato pari a 150 mm: il risultato complessivo ha indicato una resistenza media pari a 55.6 MPa. In modo analogo a quanto fatto per il materiale preliminare, il materiale definitivo è stato classificato in accordo con il Codice Modello 2010 (fib, 2013), utilizzando sei travetti intagliati. I valori medi e caratteristici delle resistenze residue oltre la fessurazione sono riportati in Tabella 3: tali valori permettono di classificare il materiale come "2.5c". I risultati delle prove a flessione su tre punti per il getto preliminare e per il getto definitivo sono riportati rispettivamente in Figura 4a ed in Figura 4b.

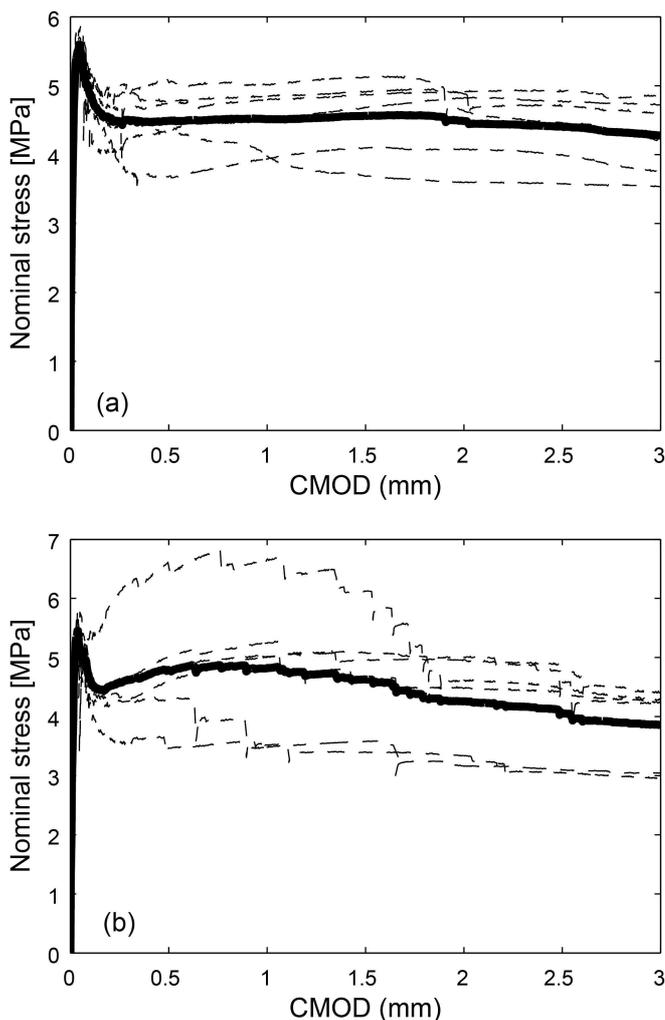


Figure 4. Three-point bending test results according to EN14651: (a) preliminary and (b) final cast / Risultati delle prove a flessione su tre punti: (a) getto preliminare e (b) getto finale.

Table 2. Three-point bending test results for the preliminary cast: nominal strengths according to EN 14651 / Risultati delle prove a flessione su tre punti per il getto preliminare: resistenze nominali secondo la norma EN 14651.

	f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
mean (m_x)	5.653	4.492	4.564	4.405	4.002
st. dev. (s_x)	0.120	0.484	0.554	0.517	0.616
f_k (normal)	5.392	3.438	3.359	3.280	2.661
m_y	1.732	1.497	1.512	1.477	1.377
s_y	0.021	0.112	0.127	0.123	0.154
f_k (log-normal)	5.398	3.501	3.439	3.352	2.835

Table 3. Three-point bending test results for the final cast: nominal strengths according to EN 14651 / Risultati delle prove a flessione su tre punti per il getto finale: resistenze nominali secondo la norma EN 14651.

	f_L	f_{R1}	f_{R2}	f_{R3}	f_{R4}
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
mean (m_x)	5.518	4.784	4.629	4.063	3.649
st. dev. (s_x)	0.300	1.018	1.013	0.777	0.668
f_k (normal)	4.865	2.568	2.426	2.373	2.194
m_y	1.707	1.547	1.512	1.385	1.279
s_y	0.056	0.208	0.223	0.205	0.196
f_k (log-normal)	4.876	2.987	2.790	2.557	2.348

4 MODALITA' ESECUTIVE

Dopo aver disposto l'armatura al lembo inferiore con una maglia variabile di $\Phi 10/30$ o $\Phi 10/35$ cm (Fig.5) come specificato in Figura 2, utile all'incremento del momento positivo e favorevole alla robustezza strutturale, e l'armatura al contorno (genericamente $\Phi 10$) per il collegamenti con i muri ed i pilastri connessi alla fondazione con passo mediamente di 40 cm, si è provveduto ad eseguire un primo getto di prova nel solaio di fondazione del vano ascensore, pompando il materiale ad un distanza di circa 20 m (Fig. 6). Questa prova di getto è servita anche per confezionare le travi-soletta preliminari ed ha fornito una lavorabilità sufficiente per non richiedere alcuna vibrazione, salvo in alcuni punti critici, dove si è operato con il vibratore ad ago. Nella fase esecutiva della piastra a piano terra, il getto della piastra è stato poi operato mediante una apposita canaletta direttamente connessa alla betoniera, come mostrato in Figura 7: i punti di getto per l'intera piastra sono stati 4, in quanto il conglomerato gettato fluiva solo per circa 2-3 metri, e pertanto è risultato necessario un intervento manuale di stesura nelle zone di connessione, facilitato dall'uso della pompa. Gli operai hanno dovuto intervenire per una parziale livellazione solo in alcuni punti ove la presenza di armatura costituiva un parziale ostacolo al flusso del getto. Al termine del getto si è provveduto ad un allagamento superficiale di circa 2 cm, allagamento che è stato mantenuto per circa 1 settimana dal getto. L'esito è stato ot-



Figure 5. Reinforcement disposal in the elevated slab/ Disposizione dei ferri d'armatura nella piastra di copertura del piano interrato.



Figure 6. Preliminary casting of the lift-core compartment foundation base: (a) preliminary and (b) final cast / Getto preliminare della fondazione di base del nucleo ascensore.



Figure 7. Casting of the elevated slab / Getto della piastra di copertura del piano interrato.



Figure 8. Curing conditions of the casting carried out with water flooding of about 2 cm / Condizioni di maturazione del getto con allagamento superficiale di circa 2 cm.



Figure 9. Vista dal piano interrato dell'intradosso della piastra in SFRC / View from the basement of the intrados SFRC plate.

timo in quanto si è potuto riscontrare all'intradosso solo due fessure in prossimità di alcuni fori circolari per l'illuminazione: la presenza di appositi ferri disposti sul contorno, ne hanno ridotto la propagazione.

5 TRAVI SOLETTA DI PROVA

Quattro travi-soletta in calcestruzzo fibrorinforzato sono state realizzate in concomitanza con il getto della piastra di solaio. Le travi-soletta hanno una lunghezza di 1.5 m e una sezione rettangolare pari a 500×250 mm (Fig. 10). Lo spessore delle travi-soletta è uguale allo spessore della piastra di solaio. Le travi-soletta, contrariamente alla piastra di solaio non contengono barre d'armatura ordinaria. Le travi sono state caricate secondo uno schema di carico a quattro punti (si veda Fig. 10); i supporti distano 50 mm dalle estremità delle travi, mentre gli spostamenti furono imposti a 500 mm dalle estremità delle travi.

Le quattro travi-soletta sono rispettivamente denominate A, B, E, F. Le prove sono messe a confronto con ulteriori due travi-soletta preliminari, denominate C e D aventi la stessa geometria, ma un diverso contenuto di fibre (30 kg/m³), provate con lo stesso set-up di prova. I risultati di queste ultime non saranno discussi per brevità nella trattazione. Le prove sono state condotte in controllo di spostamen-

to utilizzando lo spostamento dell'attuatore come parametro di controllo. Lo spostamento in mezzeria è stato misurato attraverso due LVDT (Linear Variable Displacement Transducers) posizionati sui lati anteriore e posteriore delle travi. Sono stati applicati quattro trasduttori in zona centrale: tre sulla superficie inferiore per misurare l'apertura di fessura e uno situato sulla superficie superiore per poter poi computare la curvatura della trave.

La Figura 11 mostra la risposta media delle travi A e B e delle travi E e F, mettendo in relazione lo sforzo nominale con l'apertura di fessura media (COD_m). L'apertura di fessura media è calcolata come la media dei tre trasduttori posizionati sulla superficie inferiore della trave nella zona a momento costante tra i due coltelli di carico. Le travi-soletta E e F sono state provate dopo essere state ruotate di 180° lungo il loro asse longitudinale. L'intento di questa operazione è quella di accertare l'influenza della segregazione delle fibre sulla risposta meccanica delle travi. La segregazione delle fibre per effetto gravitazionale può infatti influenzare positivamente la risposta delle travi-soletta soggette a flessione dal momento che la maggiore concentrazione di fibre è attesa al lembo inferiore teso.

La risposta meccanica delle travi è caratterizzata da una grande dispersione con un coefficiente di variazione (che nel caso di due travi rappresenta la distanza del valore di ciascuna trave dal valor medio) di poco più del 35% per le travi A e B, e pari al 24% per le travi E e F calcolato per un'apertura di fessura pari a 2.5 mm. La grande dispersione dei risultati non sorprende (di Prisco et al., 2016a), dal momento che lo schema di carico è isostatico con una limitata possibilità nella redistribuzione degli sforzi. Il confronto tra la curva media delle travi E e F e la media delle travi A e B mostra come queste ultime abbiano una risposta migliore in tutto l'intervallo COD_m considerato, indicando come la segregazione delle fibre abbia giocato un ruolo non trascurabile.

L'affidabilità dell'approccio progettuale proposto nel nuovo codice modello per la stima della capacità portante delle travi soletta fibrorinforzate è valutata sulla base delle prove a flessione su travetti standard intagliati per la caratterizzazione dei materiali combinata con un approccio analitico multi-strato a sezioni piane.

Il codice modello propone due modelli semplificati per descrivere la risposta a trazione di elementi fibrorinforzati enfatizzando l'effetto pull-out delle fibre: (a) un modello rigido-plastico e (b) un modello lineare elastico-decrescente. Il primo modello richiede l'identificazione di un solo parametro f_{Ftu} , mentre il secondo richiede l'identificazione di due parametri f_{Fts} e f_{Ftu} , essendo f_{Fts} la resistenza residua a trazione in esercizio, definita come la resistenza post-fessurativa per un'apertura di fessura significativa per lo stato limite di esercizio e f_{Ftu} la resistenza residua significativa per lo stato limite ultimo. En-

trambe f_{Fts} e f_{Ftu} sono calcolate utilizzando le resistenze residue flessionali f_{R1} and f_{R3} . Partendo dalla classificazione del materiale ("2.5c") è possibile derivare i valori di progetto f_{R1d} e f_{R3d} dividendo i valori caratteristici per il coefficiente di sicurezza del materiale fibro-rinforzato γ_F pari a 1.5 secondo quanto proposto in [5]. La risposta delle travi strutturali è stata successivamente calcolata utilizzando il metodo multi-strato adottando l'ipotesi di sezioni piane (di Prisco et al., 2013). La distribuzione delle deformazioni lungo la sezione è assunta lineare e la sezione viene discretizzata in un numero variabile di strisce. In compressione viene adottato un modello parabola-rettangolo, mentre a trazione viene assunto il modello lineare-decrescente. La lunghezza caratteristica strutturale è pari all'altezza delle travi-soletta dal momento che nelle travi non vi è presenza di armatura ordinaria. Il momento ultimo specifico è calcolato imponendo l'equilibrio alla traslazione orizzontale e l'equilibrio alla rotazione della sezione e assumendo che l'apertura di fessura ultima (w_u) sia

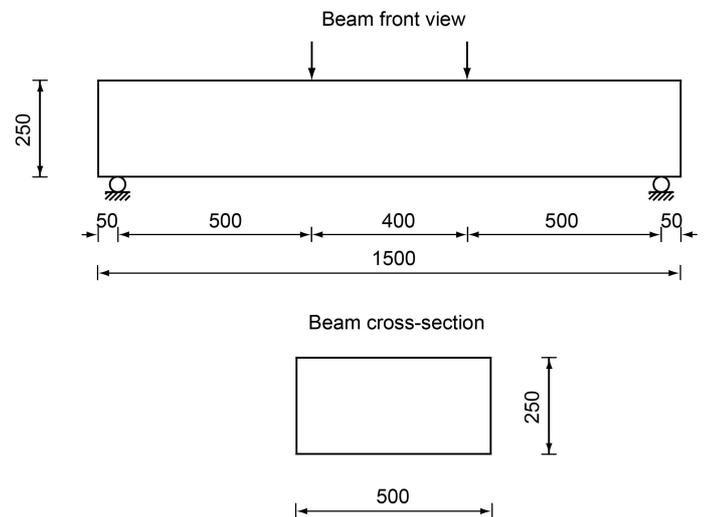


Figure 10. Dimensions (in mm) and test set-up for the shallow beams / Dimensioni (in mm) e set-up di prova per le travi-soletta.

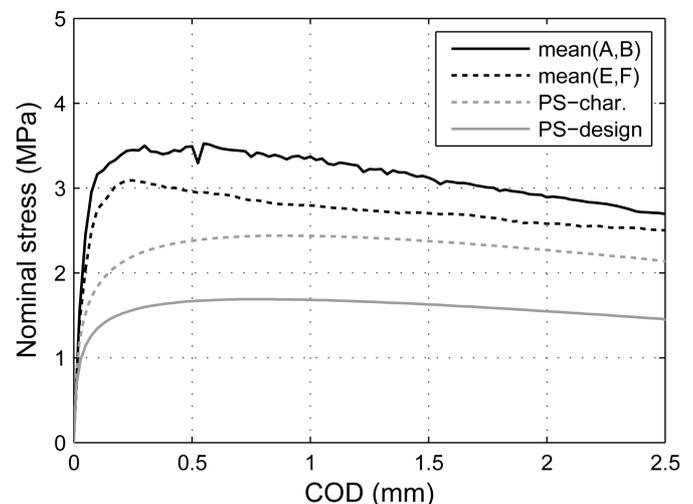


Figure 11. Average experimental responses and plane section models for the shallow beams / Risposte medie sperimentali e modelli a sezioni piane per le travi-soletta.

raggiunta al lembo inferiore. Nel presente caso studio si assume un'apertura di fessura ultima pari a w_u 2.5 mm come proposto nel codice modello.

La Figura 11 confronta le risposte medie sperimentali delle travi strutturali con i valori di progetto ottenute con il metodo multi-strato a sezioni piane. In Figura 11 viene anche mostrata la curva analitica ottenuta con i valori caratteristici. Sia la curva caratteristica, sia la curva progettuale forniscono stime conservative della risposta media delle travi strutturali.

6 CONCLUSIONI

A SFRC elevated slab was designed according to the Mode Code 2010 and built in Erba last year. It represents the first example in Italy according to the author's knowledge. The experience has demonstrated that the use of SCFR can simplify and keep faster the executive procedures and can offer a cost reduction of about 15%, even if a special care on the identification and control of the mechanical parameters is required / A SFRC elevated slab was designed according to the Mode Code 2010 and built in Erba last year. It represents the first example in Italy according to the author's knowledge. The experience has demonstrated that the use of SCFR can simplify and keep faster the executive procedures and can offer a cost reduction of about 15%, even if a special care on the identification and control of the mechanical parameters is required.

RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano l'impresa Stampini e la Calcestruzzi Erbesi per avere confezionato le travi di prova eseguendo scrupolosamente le indicazioni impartite, il geom. Nava e l'arch. Ortalli per il loro contributo nelle fasi di cantiere.

REFERENZE BIBLIOGRAFICHE

- D.M. 14.01.2008, Norme Tecniche per le Costruzioni 2008, published on Gazzetta Ufficiale 04.02.2008.
- EN 1992-1-1 2004. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings. Bruxelles (Belgium): European Committee for Standardization.
- Gaffuri C., 2014. Relazione di calcolo delle opere in c.a. ed SFRC, DSC n° 14004, 2015.
- fib Model Code for Concrete Structures 2010. 2013. Fédération Internationale du Béton, Ernst & Sohn, Lausanne.
- Mobasher, B., & Destrée, X. (2010) Design and construction aspects of steel fiber-reinforced concrete elevated slabs. American Concrete Institute, ACI Special Publication, (274 SP), 95-107.
- Hedebratt, J., & Silfwerbrand, J. (2014) Full-scale test of a pile supported steel fibre concrete slab. *Materials and Structures/Materiaux et Constructions*, 47(4), 647-666.
- di Prisco, M., Plizzari, G., Vandewalle, L., (2009) Fiber reinforced concrete: new design perspectives, *Material and Structures* 42(9), 1261-1281.
- di Prisco, M., Plizzari, G., & Vandewalle, L. (2014) Structural design according to fib MC 2010: comparison between RC and FRC elements. In: *FRC 2014 Joint ACI-fib International Workshop - Fibre Reinforced Concrete: from Design to Structural Applications*, Editors: Charron J.P., Massicotte B., Mobasher B., Plizzari G., Montreal, Canada.
- di Prisco, M., Martinelli, P., & Parmentier, B. (2016a) On the reliability of design approach for FRC structures according to Model Code 2010: the case of elevated slabs. *Structural Concrete*, DOI: 10.1002/suco.201500151
- EN 14651, (2004) Test method for metallic fiber concrete – Measuring the flexural tensile strength (limit of proportionality, residual).
- CEN EN 14721, (2005) Test method for metallic fibre concrete - Measuring the fibre content in fresh and hardened concrete - European Committee for Standardization, Brussels.
- UNI EN 1990, (2006) Eurocode – Basis of structural design, European Committee for Standardization, Brussels.
- di Prisco, M., Colombo, M., & Dozio, D. (2013) Fibre-reinforced concrete in fib Model Code 2010: Principles, models and test validation. *Structural Concrete*, 14(4), 342-361.
- di Prisco, M., Martinelli, P. & Dozio, D. (2016b) The structural redistribution coefficient K_{RD} : a numerical approach to its evaluation. *Structural Concrete*, 17(3), 390-407.



Figure 12. View from the extrados of the elevated / Vista di estradosso della piastra a copertura dell'interrato