

Seismic retrofitting of a school building using inorganic composite systems (PBO-FRCM) reinforced by means of high performance fibers

Miglioramento sismico di edificio scolastico mediante sistemi compositi inorganici (PBO-FRCM) armati con fibre polimeriche ad alte prestazioni

A. Trimboli¹, N. Pontiggia², G. Mantegazza³

¹ Engineer firm, Cosenza, Italy

² Engineer firm, Erba (CO), Italy

³ Ruredil spa, San Donato Milanese (M), Italy

ABSTRACT: A school building has been interested by a recent seismic retrofitting intervention. The numerical checks revealed that the intervention had to provide to increase the bearing and the ductility of some reinforced concrete elements. The beams, columns and walls strengthening has been carried out by means of an inorganic composite system (Fabric Reinforced Cementitious Matrix), made of a special matrix based on a cementitious matrix reinforced with fabrics of PBO, which are fibers highly resistant to tension. The peculiarities of the FRCMs, more performing compared to the composite systems based on polymeric matrix (FRP) thanks to the different material of the matrix which also makes them applicable to wet surfaces, guarantees an high resistance to fire and to high temperatures, and finally ensures an intervention durability coherent with that of r.c. structures, are presented here along with the execution phases of the intervention. / Un edificio scolastico in c.a. è stato oggetto di un recente intervento di miglioramento sismico. Dall'analisi del modello di calcolo è emerso che l'intervento doveva essere indirizzato a ridurre le carenze di resistenza e duttilità più critiche. Il rinforzo delle travi, dei pilastri e dei setti è stato conseguito mediante sistemi compositi a matrice inorganica (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) dotati di rete di armatura costituita da fibre lunghe ad elevate caratteristiche meccaniche (PBO). Le peculiarità degli FRCM, più performanti anche rispetto ai sistemi a matrice polimerica (FRP) grazie alla diversa matrice di base che li rende applicabili su supporti umidi, garantisce una elevata resistenza al fuoco ed alle elevate temperature, ed in definitiva assicura una durabilità dell'intervento coerente con quella delle strutture in c.a., sono qui presentate insieme alle fasi realizzative dell'intervento.

KEYWORDS: seismic retrofitting, RC beam-column strengthening, FRCM, PBO / miglioramento sismico, rinforzo di nodi trave-pilastro, FRCM, PBO

1 DESCRIZIONE DELL'OPERA

1.1 Dati generali del complesso scolastico

Nella memoria viene trattato l'intervento di rinforzo, volto al miglioramento sismico dell'edificio scolastico di Piazza Unità d'Italia in Cernusco sul Naviglio (Milano). L'edificio scolastico è costituito da quattro stabili in c.a. strutturalmente indipendenti e separati da giunti di dilatazione. I diversi corpi di fabbrica presentano caratteristiche costruttive comuni e risultano edificati nella seconda metà degli anni Sessanta. La richiesta dell'Ente Locale (Comune di Cernusco sul Naviglio) è stata inizialmente quella di eseguire uno studio di vulnerabilità sismica, per cui è stata avviata una campagna di indagini diagnostiche e conoscitive. Riguardo gli elementi strutturali le fondazioni sono state realizzate con plinti e travi rovesce, i vani scala ed il vano ascensore con pareti c.a. di spessore 25 cm, i pilastri in c.a. sono rettangolari con sezione 40 cm x 60 cm al piano seminterrato, e 20 cm x 60 cm ai piani superiori, le travi in c.a. sono presenti in entrambe le direzioni ortogonali, ribassate o rialzate, i solai sono latero-cementizi a travetti e pignatte di altezza complessiva 26 cm.

Generalmente le strutture del complesso edilizio sono in buono stato di conservazione, non presentano evidenti stati fessurativi o degradi legati alla carbonatazione e all'ossidazione delle armature, ad esclusione di piccoli fenomeni localizzati nelle zone maggiormente esposte agli agenti atmosferici.

1.2 Proprietà dei materiali costitutivi

La campagna d'indagini ha permesso di assumere i seguenti parametri meccanici per i materiali impiegati:

- Calcestruzzo: Rck 30 Mpa
- Armature: acciaio Aq 50 ad aderenza migliorata (tensione di snervamento: 270 N/mm²)

Il livello di conoscenza acquisito ha determinato il metodo di analisi e i fattori di confidenza da applicare alle proprietà dei materiali.

La conoscenza della struttura è stata stimata ad un livello limitato, corrispondente a LC1.

Nelle analisi numeriche e nelle verifiche effettuate sono stati utilizzati fattori di confidenza pari a FC = 1,35.

In base al livello di conoscenza è stato adottato come metodo di analisi l'analisi lineare dinamica.

1.3 Azione sismica di riferimento

In accordo con le "Norme Tecniche delle Costruzioni DM14/01/2008", par.3.2, il carico sismico è determinato in base ai seguenti parametri:

- vita nominale: $VN = 50$ anni
- classe d'uso: III
- coefficiente d'uso: $cu = 1.5$
- periodo di riferimento per l'azione sismica: $VR = VN \times cu = 50 \times 1.5 = 75$ anni
- categoria del sottosuolo: C
- categoria topografica: T1
- zona sismica 4

1.4 Carenze strutturali del complesso scolastico

La struttura portante è risultata in generale adeguata a sostenere le azioni derivanti dai carichi gravitazionali.

I quadri tensionali nei materiali sono compatibili con i valori ammissibili all'epoca della originaria progettazione.

La struttura tuttavia non risulta idonea a sostenere le azioni sismiche di norma, e ciò in quanto:

- i setti dei blocchi aule non soddisfano le verifiche di pressoflessione e taglio;
- esistono nodi non confinati e non dotati della necessaria duttilità e resistenza.

L'edificio scolastico fu in effetti concepito e realizzato negli anni Sessanta, quando in Italia le norme tecniche per le costruzioni in vigore erano ancora impostate secondo procedure semplificate ed il calcolo sismico di un edificio avveniva mediante una analisi statica equivalente con un valore dell'accelerazione sismica ridotto rispetto a quello reale del terreno a prescindere dalla tipologia strutturale, senza tuttavia che le norme chiarissero in maniera esplicita che per poter operare in questa maniera bisognava dotare l'edificio di elevate risorse di duttilità oltre che di resistenza, progettando quindi con cura i dettagli costruttivi.

Le attuali normative, contenute nel D.M. 14.01.2008, in effetti hanno introdotto lo spettro di risposta elastico attraverso il quale risulta possibile conoscere l'accelerazione sismica cui risulta soggetto un edificio qualora lo si immagini appunto in campo elastico.

La accelerazione di progetto con cui dimensionare l'edificio si ottiene poi dividendo la accelerazione sismica dello spettro elastico per il fattore di struttura "q", parametro numerico adimensionale che tiene conto della capacità dell'organismo strutturale di dissipare energia oltre il campo elastico e che

dipende sostanzialmente dalla tipologia strutturale, dalla regolarità dell'edificio e dalla cura dei dettagli costruttivi.

Nella maggioranza degli edifici esistenti progettati prima dell'avvento delle moderne norme sismiche e quindi prima degli anni Novanta del secolo scorso, i sistemi strutturali in cemento armato presentano sistematicamente una elevata carenza di dettagli costruttivi, infatti oltre ad avere quantitativi di armatura limitati e con spessori di copriferro esigui, le stesse armature presenti non sono adeguatamente ancorate nel nucleo di calcestruzzo, e, riguardo poi alle staffe, non risultano chiuse a 135° e pertanto non è assicurato il corretto svolgimento della loro funzione di confinamento dell'elemento strutturale; in aggiunta a ciò i nodi trave-pilastro sono generalmente privi di staffe e quindi risultano molto vulnerabili in caso di eventi sismici in occasione dei quali è frequente il verificarsi dell'espulsione del pannello non confinato dei nodi esterni degli edifici.

I rilievi eseguiti sulle strutture della scuola in oggetto hanno confermato che in effetti l'organismo strutturale della scuola presenta carenza dei dettagli costruttivi relativi principalmente alle staffe.

Dai rilievi è stato possibile osservare la chiusura delle staffe nei pilastri realizzata ripiegando a 90° le armature trasversali da cui risulta che le stesse non riescono a svolgere pienamente il loro ruolo di confinamento del nucleo di calcestruzzo armato in caso di azioni dinamiche, quali quelle sismiche.

A tale proposito la circolare ministeriale n°617 del 2 febbraio 2009, esplicativa del D.M. 14.01.2008 "Norme Tecniche per le Costruzioni", specifica che per il fattore di efficienza del confinamento α , in assenza di un ancoraggio opportuno delle staffe dovuto per esempio alla mancata chiusura dei ganci non a 135° , è opportuno assumere il valore α pari a 0 (cfr. paragrafo C.8.A.6.1).

Il fattore α è un parametro adimensionale funzione delle armature trasversali, vale a dire della disposizione delle staffe e delle eventuali spille, e del passo delle staffe nelle zone critiche (zone di estremità di un elemento in cemento armato nelle quali può formarsi la cerniera plastica). In particolare assumere un valore nullo per il parametro α equivale a considerare nullo l'effetto di duttilità prodotto dal confinamento delle staffe.

2 GLI INTERVENTI DI RINFORZO

2.1 Requisiti progettuali

L'obiettivo progettuale è stato quello di ottenere il miglioramento sismico sugli elementi strategici e su quelli perimetrali, volto a ridurre le carenze di resistenza e duttilità più critiche.

I criteri delle scelte progettuali sono stati:

- rinforzare le strutture localmente a sopportare i carichi secondo le norme vigenti;
- contenere i tempi di cantiere (periodo disponibile limitato);
- prevedere soluzioni di rapida messa in opera;
- garantire la durabilità nel tempo dei rinforzi (pari minimo alla vita utile dell'edificio).

2.2 Scelta progettuale

La scelta del sistema di rinforzo è ricaduta sui sistemi FRCM (Fabric Reinforced Cementitious Matrix) per le peculiarità dovute all'uso di una matrice cementizia in luogo delle matrici polimeriche tipiche dei sistemi FRP.

Inoltre l'armatura di rinforzo delle matrici è costituita da reti in fibre lunghe di PBO le quali, oltre ad avere caratteristiche meccaniche sensibilmente superiori anche rispetto alle fibre di carbonio, presentano lo stesso coefficiente di dilatazione termica del calcestruzzo e dell'acciaio, circostanza che non avviene con le fibre di carbonio, e pertanto garantiscono una durabilità maggiore per la perfetta compatibilità fisica, chimica e meccanica con gli elementi in cemento armato sui quali si interviene.

A tale proposito si osserva che il modulo elastico delle fibre di PBO è pari a 270.000 N/mmq, e la tensione di rottura a trazione delle fibre di PBO è pari a 5.800 N/mmq.

In generale i vantaggi legati all'uso dei sistemi FRCM sono riassumibili nei seguenti temi:

- esecuzione rapida
- peso trascurabile: consente di rinforzare gli elementi in c.a. senza alterare il regime statico sui terreni di fondazione;
- bassa invasività;
- applicabilità su supporti umidi;
- resistenza al fuoco;
- buona resistenza alle elevate temperature;
- basso rapporto costi/prestazioni;
- durabilità dell'intervento: vita utile $\gg 50$ anni;
- matrice cementizia pienamente compatibile con c.a.;
- matrice cementizia: non risente dei fattori di degrado ambientale più di quanto non ne risenta il supporto.

2.3 Il rinforzo dei nodi trave-pilastro

Gli eventi sismici occorsi negli ultimi 50 anni, quando ormai la tecnica del cemento armato ha definitivamente soppiantato le strutture in muratura ed in acciaio, hanno messo in evidenza come il punto debole di un telaio in cemento armato sia

costituito dai nodi trave-pilastro essendo tali elementi delegati a trasmettere le sollecitazioni tra gli elementi strutturali e soggetti a sollecitazioni dinamiche elevate.

La normativa tecnica italiana sulle costruzioni del D.M. 14.01.2008 ha definitivamente reso obbligatorio il confinamento dei nodi trave-pilastro nelle nuove costruzioni con particolare riguardo al pannello libero dei nodi esterni presenti nelle ossature strutturali.

L'intervento sui nodi trave-pilastro prevede il confinamento mediante l'avvolgimento di reti unidirezionali in fibra di PBO ancorati con matrice cementizia.

Con tale provvedimento si ottiene l'aumento di duttilità e quindi si aumenta la capacità rotazionale delle sezioni di estremità delle colonne in cemento armato ad ogni ordine, benefica ai fini della resistenza del telaio alle azioni sismiche.

La rotazione rispetto alla corda viene in effetti incrementata grazie al confinamento con tessuti in fibra di carbonio e per la valutazione della rotazione ultima rispetto alla corda, θ_u , si è utilizzata la formula seguente:

$$\vartheta_u = \frac{1}{\gamma_{el}} \left[\vartheta_y + (\phi_u - \phi_y) \cdot L_{pl} \cdot \left(1 - 0,5 \cdot \frac{L_{pl}}{L_v} \right) \right]$$

nella quale:

- $\gamma_{el} = 1,5$
- θ_u = rotazione rispetto alla corda quando l'acciaio teso raggiunge lo snervamento

$$\vartheta_y = \phi_y \cdot L_v + 0,0013 \cdot \left(1 + 1,5 \cdot \frac{h}{L_v} \right) + 0,13 \cdot \phi_y \cdot \frac{d_b \cdot f_y}{\sqrt{f_c}}$$

- ϕ_u = curvatura ultima della sezione terminale in corrispondenza della deformazione ultima del calcestruzzo ϵ_{ccu}
- ϕ_y = curvatura ultima della sezione terminale quando l'acciaio teso raggiunge lo snervamento
- L_{pl} = ampiezza della cerniera plastica

$$L_{pl} = 0,1 \cdot L_v + 0,17 \cdot h + 0,24 \cdot \frac{d_b \cdot f_y}{\sqrt{f_c}}$$

- L_v = luce di taglio

- d_b = diametro medio delle barre longitudinali

Eseguito i calcoli nel caso in esame, la ampiezza della zona di possibile formazione della cerniera plastica " L_{pl} " assume i seguenti valori a seconda delle tipologie di pilastri:

- pilastro 400 x 600: $L_{pl} = 500$ mm
- pilastro 200 x 600: $L_{pl} = 500$ mm

- pilastro 200 x 1.000: $L_{pl} = 570$ mm

Ad ogni modo il confinamento dei pilastri è stato eseguito per una profondità di 750 mm sia in testa che al piede dei pilastri (pari a tre fasce di PBO larghe 25 cm).

Oltre all'effetto benefico legato all'aumento della duttilità della sezione in cemento armato rinforzata, l'intervento di confinamento dei pilastri permette anche di incrementare la resistenza ultima a taglio degli stessi.

Nel caso delle travi sono state introdotte in corrispondenza dei nodi delle reti unidirezionali di fibre di PBO disposte a 45° rispetto all'asse longitudinale della trave e quindi allineate con le isostatiche di trazione in modo da ottimizzare le risorse meccaniche.

Le fasce, di larghezza 100 mm, sono state disposte ad interasse di 200 mm e risultano costituite da reti unidirezionali di fibre di PBO aventi spessore equivalente in direzione dell'ordito pari a 0,067 mm.

La resistenza ultima a taglio $V_{Rd,rinf}$ di un elemento in cemento armato rinforzato con armatura integrativa di fibre strutturali, si calcola, in accordo con le Linee Guida del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici 24-07-2009, come il valore minimo tra:

- la resistenza a "taglio compressione" offerta dal calcestruzzo;
- la somma delle resistenze a "taglio trazione" offerta dalle staffe in acciaio esistenti e dalle reti di fibre in PBO di rinforzo:

$$V_{Rd,rinf} = \min \{ V_{Rd,c}, V_{Rd,s} + V_{Rd,f} \}$$

In ottemperanza alle Istruzioni contenute nel documento tecnico 200 del 2004 del CNR, l'incremento di resistenza a taglio dovuto alla introduzione delle reti di fibre di PBO, può essere valutato in base al meccanismo a traliccio di Morsch e risulta pari a:

$$V_{Rd,f} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0,9 \cdot d \cdot f_{fed} \cdot 2 \cdot t_f \cdot (\cot \vartheta + \cot \beta) \frac{w_f}{p_f}$$

dove:

- d = altezza utile della sezione
- f_{fed} = resistenza efficace di calcolo del sistema di rinforzo
- t_f = spessore della rete di PBO di rinforzo in ordito
- b_f = larghezza della rete di PBO di rinforzo
- p_f = passo delle reti di rinforzo di PBO

- $\gamma_{Rd} = 1,20$ per il meccanismo resistente a taglio

Le sequenze operative dell'intervento sono state:

1. rimozione dell'intonaco, delle tamponature, degli infissi inclusi gli elementi di supporto dove presenti nelle zone di intervento.
2. arrotondamento degli spigoli di calcestruzzo mediante smussatura con raggio di curvatura minimo pari a 20 mm nelle zone di testa e del piede dei pilastri dove prevista la posa delle reti di PBO.
3. eliminare polvere e parti incoerenti: procedere ad una sabbiatura meccanica o con idropulitrice, fino a totale eliminazione dello strato millimetrico della boiaccia cementizia. La superficie idonea all'applicazione dei sistemi di rinforzo composito deve risultare planare e priva di irregolarità.
4. bagnare il sottofondo saturandolo con acqua, avendo cura di asportarne l'eccesso. Applicare il primo strato di matrice cementizia con frattazzo metallico liscio in spessore di circa 3-4 mm;
5. attendere 2 minuti prima di annegarvi la rete di fibre di PBO mediante rullo, avendo cura di eliminare bolle d'aria e disponendo le reti con le fibre dell'ordito ortogonali all'asse dei pilastri.
6. posa di secondo strato di circa 3-4 mm, di malta cementizia, in modo tale da coprire completamente la rete, utilizzando apposito rullo ed avendo cura di eliminare ogni eventuale residua bolla d'aria.

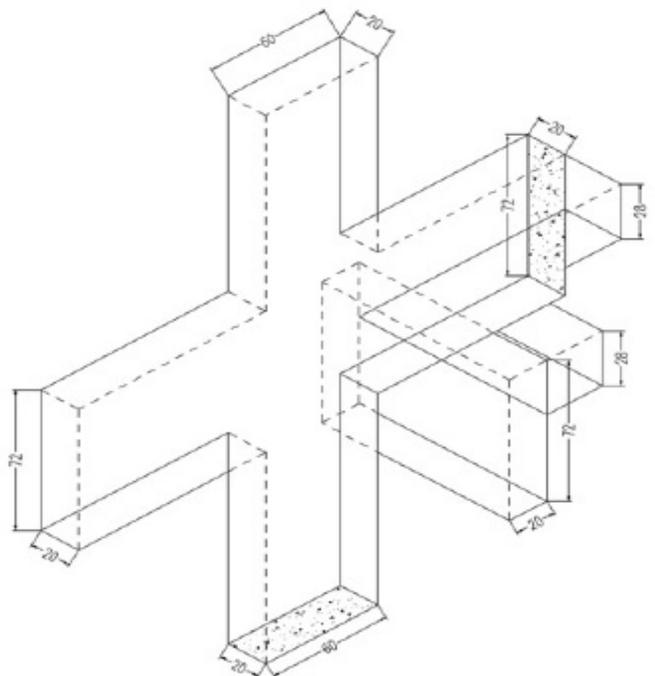


Figure 1 - Axonometric view beam-column joint / Vista assonometrica del nodo tipo trave-pilastro

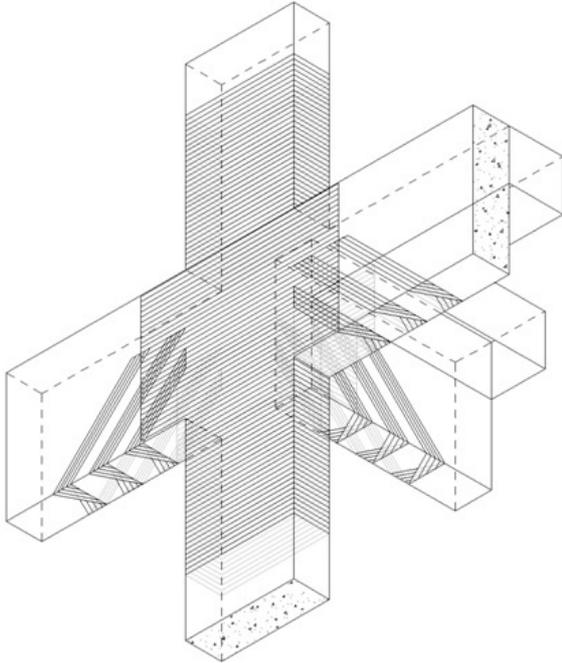


Figure 2 - Axonometric view of beam-column joint retrofitted by FRCM / Vista assonometrica del nodo rinforzato con FRCM



Figure 3 - Surface preparation / Preparazione della zona di intervento



Figure 4 - Application of PBO-FRCM on beam-column joint / Fase esecutiva dell'intervento sui nodi con FRCM

2.4 Il rinforzo dei setti in c.a.

I setti in cemento armato, che costituiscono i nuclei dei vani scala, manifestano delle carenze nei confronti delle sollecitazioni di presso-flessione e di taglio.

Riguardo l'incremento della resistenza a taglio ultima si ricorre ancora all'uso di reti in fibre di PBO, in particolare si introdurranno delle reti unidirezionali di spessore equivalente pari a 0,056 mm in direzione dell'ordito, rispettando le medesime fasi esecutive descritte per i pilastri.

La resistenza a taglio di un pannello in calcestruzzo rinforzato con materiali compositi a base di fibre strutturali (nel nostro caso costituiti da reti in fibra di PBO ancorate con speciale matrice cementizia al supporto di calcestruzzo), in accordo con le Istruzioni del DT200/2004 del CNR, vale:

$$V_{Rd} = \min \{ V_{Rdf} + V_{Rdm}; V_{Rdmax} \}$$

dove:

V_{Rdf} = resistenza a taglio-trazione delle reti in fibra di pbo

V_{Rdm} = resistenza a taglio-trazione del pannello murario in calcestruzzo

V_{Rdmax} = resistenza a compressione del calcestruzzo

Il contributo di resistenza a taglio offerto dalle reti in fibra di PBO si calcola con la formula:

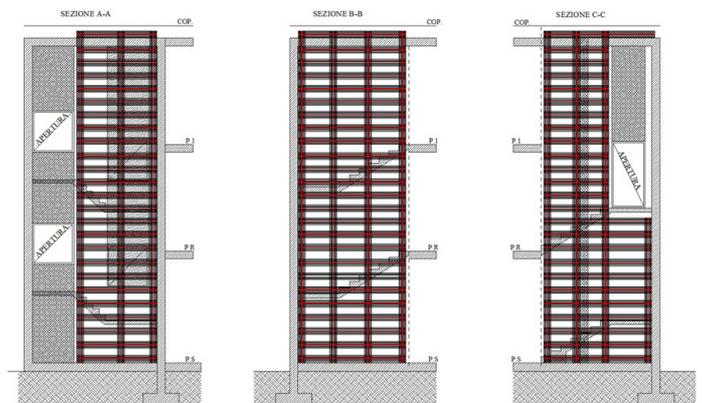
$$V_{Rdf} = \frac{1}{\gamma_{Rd}} \cdot 0,6 \cdot \frac{A_{fv} \cdot E_f \cdot \epsilon_{fdv}}{p_f} \cdot d$$

dove:

A_{fv} = area di fibre di PBO orizzontali presenti sui due lati della parete

$A_{fv} = 2 \times n \times t_f \times b_f = 2 \times 1 \times 0,056 \text{ mm} \times 250 \text{ mm} = 28 \text{ mm}^2$

n = numero strati di rinforzo = 1



durabilità dell'opera rinforzata, comportando quindi notevoli economie sia nell'ottica dell'organizzazione dei lavori e sia in relazione al ciclo di vita delle strutture potendone ridurre i costi di manutenzione.

Figure 5 - Reinforcement of reinforced concrete walls by FRCM / Schema di rinforzo dei setti in c.a. con FRCM



Figure 6 - FRCM application on wall / Fase esecutiva rinforzo setto con FRCM



Figure 7 - Final view of the completed retrofitting work / Vista d'insieme dell'intervento ultimato sui setti del vano scala

3 CONCLUSIONI

L'intervento descritto ha permesso di adeguare l'organismo strutturale in cemento armato, migliorandone il funzionamento meccanico ed evitando di introdurre ulteriori elementi strutturali la cui messa in opera avrebbe comportato opere di demolizione invasive oltre che la riduzione delle dimensioni utili dei vani.

I sistemi compositi FRCM presentano una serie di vantaggi peculiari legati principalmente alla matrice cementizia in cui vengono immerse le fibre di armatura.

Tali vantaggi risiedono principalmente nella massima rapidità delle fasi di cantiere e nella elevata