

L'utilizzo del calcestruzzo **precompresso** in condizioni di resistenza al fuoco

■ Giuseppe Ascenzi

L'abstract

La tecnica della precompressione offre indiscutibili vantaggi dal punto di vista costruttivo, come ad esempio il miglioramento delle prestazioni statiche degli elementi strutturali (portata elevata) o l'assenza quasi assoluta di fessurazione in condizioni di esercizio (durabilità elevata).

Tuttavia la spiccata sensibilità degli acciai da precompressione (armonici ad alta resistenza) nei riguardi delle sollecitazioni termiche postula l'esigenza di una più attenta valutazione del comportamento degli stessi manufatti in condizioni di esposizione all'incendio.

Nella trattazione si fa essenzialmente riferimento a sistemi strutturali che impiegano elementi a grande luce (al fine di aumentare la manovrabilità e migliorare la logistica interna), ovvero elementi idonei a sopportare elevati sovraccarichi (multipiano per parcheggi e grandi centri commerciali).

Si sono, pertanto, tralasciate le strutture più tradizionali (come solai a travetti precompressi) di uso frequente solo nelle comuni tipologie edilizie.

In considerazione della ormai vasta e nota applicazione di elementi prefabbricati in c.a.p. (cemento armato precompresso) in molte opere da costruzione (con prevalenza per il settore industriale, logistico, terziario, sociale e commerciale), le quali spesso rappresentano la componente edilizia di attività soggette al nuovo Regolamento di Prevenzione Incendi (D.P.R. 1 agosto 2011, n. 151), si ritiene utile esporne i relativi principi e tecniche di realizzazione, ponendo soprattutto attenzione alle condizioni ri-

chieste al fine di garantire particolari requisiti per la resistenza al fuoco.

Elementi prefabbricati in c.a.p., con elevate prestazioni statiche, trovano valide applicazioni specie nel campo delle opere infrastrutturali (ad esempio per ponti e viadotti,



stradali e ferroviari), le quali potrebbero pure essere aggredite dall'azione degli incendi che si propagano in campo libero (tipicamente incendi boschivi di vasta proporzione), ma i requisiti di resistenza al fuoco, cui si fa solitamente riferimento, interessano quasi esclusivamente elementi appartenenti ad organismi edilizi, in quanto l'incendio (nominale standard) è un fenomeno che normalmente si sviluppa entro spazi circoscritti (compartimenti antincendio) e ne investe poi le relative strutture (sia dall'interno che dall'esterno).

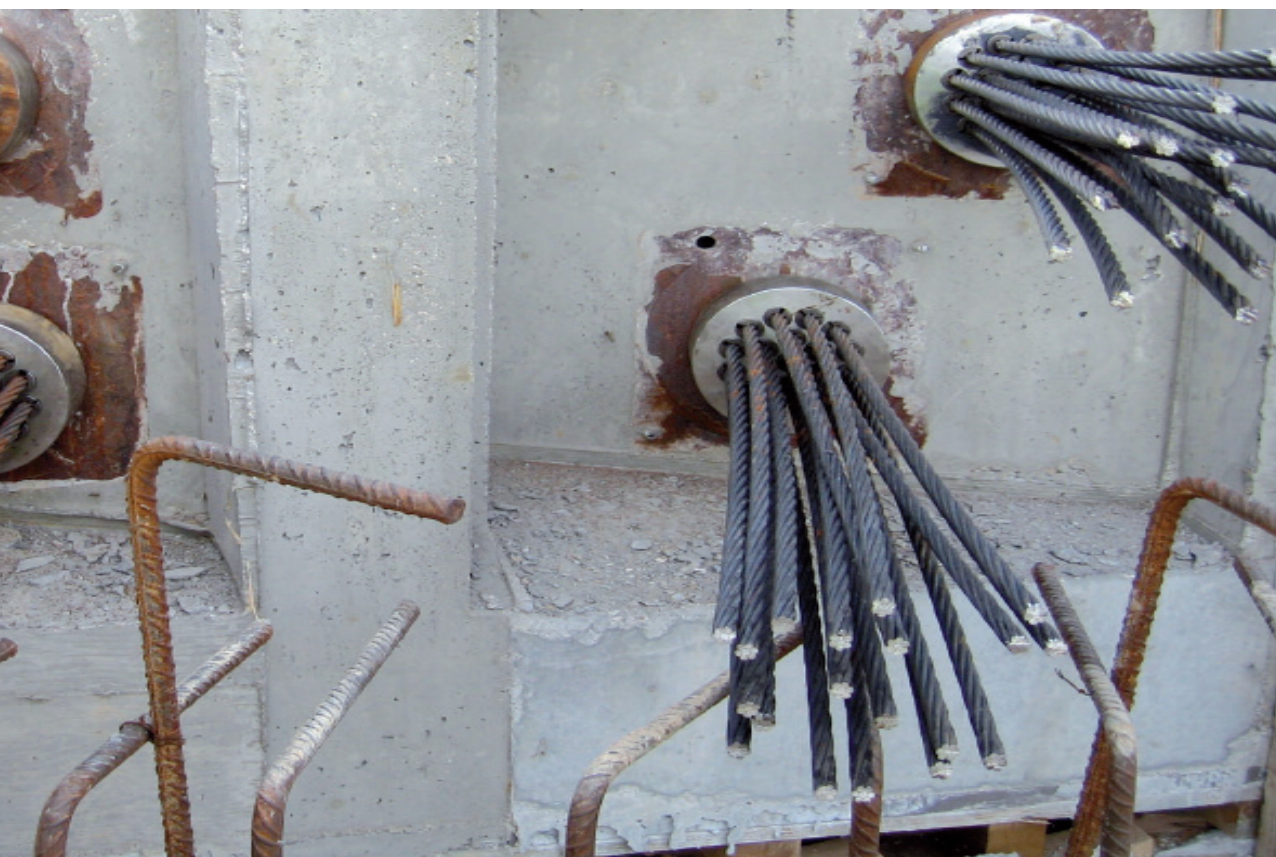
Proprietà dei materiali

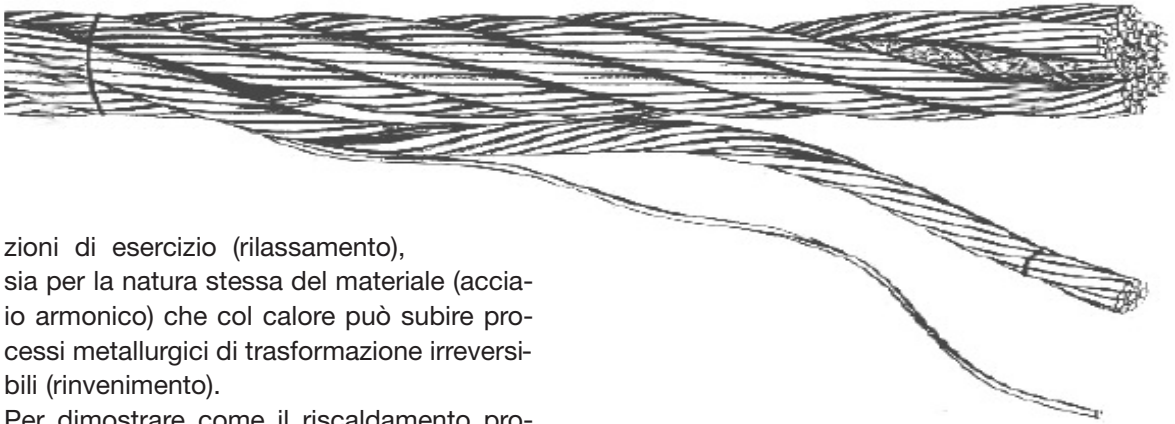
Gli elementi prefabbricati in c.a.p. sono realizzati facendo uso di calcestruzzi di buona classe (le NTC 2008 al punto 4.1 prevedono come classe minima la C28/35, ma nella pratica costruttiva le classi maggiormente

usate risultano essere la C35/45 o la più elevata C45/55) e di acciai ad alta resistenza, spesso designati come acciai armonici (denominazione che denota caratteristiche simili a quelle dei fili usati per la realizzazione di corde per strumenti musicali).

Nelle travi precomprese, inoltre, deve quasi sempre predisporre anche un'armatura ordinaria (armatura lenta aggiuntiva) in acciaio da cemento armato (B450C), sia longitudinale (barre) che trasversale (staffe).

La crisi di un manufatto precompresso (a sviluppo orizzontale) nel corso di un incendio è localizzata in corrispondenza all'intradosso e quindi coincide sostanzialmente con la perdita di resistenza meccanica da parte dell'armatura, in particolare di quella di precompressione: quest'ultima, rispetto agli altri materiali della sezione (calcestruzzo e acciaio da cemento armato), è assai più sensibile agli effetti del riscaldamento, sia per la presenza di elevate sollecitazioni in condi-





zioni di esercizio (rilassamento), sia per la natura stessa del materiale (acciaio armonico) che col calore può subire processi metallurgici di trasformazione irreversibili (rinvenimento).

Per dimostrare come il riscaldamento prodotto dall'incendio (normalizzato) possa causare la perdita di capacità portante di un elemento prefabbricato di c.a.p. si può fare ricorso, in via del tutto esemplificativa, al seguente procedimento.

Per la tensione di tesatura (iniziale) si assume un valore dato da $\min [0,70 f_{ptk}; 0,85 f_{p(0,1)k}]$ che per trefoli 6/10" fornisce una $\sigma_{p0} = 1300 \text{ N/mm}^2$; in conseguenza delle cadute di tensione per rilassamento dell'acciaio (circa 4%), delle perdite istantanee (per accorciamento elastico del calcestruzzo) e delle cadute per deformazioni differite del calcestruzzo (ritiro e scorrimento viscoso sotto carico) si assegna una riduzione del 12% alla tensione di tesatura in esercizio, ottenendo pertanto $\sigma_{sp} = 1160 \text{ N/mm}^2$ (di poco superiore a $0,60 f_{ptk}$).

Per il calcolo della tensione di rottura dell'acciaio di precompressione ad una temperatura $\theta = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ si assume poi $f_{py,\theta}/\beta f_{pk} (cw) = 0,60$ in base alle prescrizioni di UNI EN 1992-1-2 (prospetto 3.3).

Poiché si calcola $\beta = 0,95$ si ha in definitiva $f_{py,\theta} = 0,95 \cdot 0,60 \cdot f_{pk} = 1060 \text{ N/mm}^2$, ne risulta che il riscaldamento a temperatura $\theta = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ dell'acciaio da precompressione riduce la sua resistenza meccanica ad un valore (anche se di poco) inferiore alla tensione di tesatura in esercizio.

Di conseguenza, a temperature superiori alla $\theta = 350 \text{ }^\circ\text{C}$ si ha il rapido cedimento dell'armatura di precompressione e quindi la messa fuori servizio del manufatto in c.a.p. (di fatto questo valore di temperatura veniva appunto indicato come "critico" in base alla UNI 9502:2001).

Pertanto la proprietà che determina il raggiungimento di una qualunque classe di resistenza al fuoco è la riduzione progressiva della tensione di rottura dell'acciaio armonico con il crescere della temperatura: quando la tensione ridotta uguaglia lo sforzo (unitario) di tesatura si ha la perdita di capacità portante dell'elemento e il tempo di esposizione al fuoco intercorso definisce la classe R ottenibile.

Si può migliorare il requisito di resistenza al fuoco (a parità di altre condizioni) disponendo un'armatura lenta in acciaio ordinario, ma soprattutto adottando consistenti valori per gli spessori di ricoprimento di calcestruzzo

Giuseppe Ascenzi - Laureato in Ingegneria Meccanica, è iscritto all'Ordine degli Ingegneri della Provincia di Roma, presso il quale partecipa alle attività di commissione nel ruolo di componente della Commissione Grandi Strutture. Dal 2013 è inoltre iscritto all'AICAP (Associazione Italiana Calcestruzzo Armato e Precompresso).

Presso Società del Gruppo Finmeccanica ha operato in passato come progettista, svolgendo numerosi lavori di analisi e simulazione nel campo strutturale e termo-fluidodinamico.

Esperto di tematiche di qualità, attualmente ricopre il ruolo di Quality Advisor nell'ambito del sistema aziendale integrato di gestione per la qualità, la sicurezza e l'ambiente.

Relatore in seminari e tavole rotonde su argomenti di prevenzione incendi, è coautore di un testo sull'Ingegneria della sicurezza antincendio per l'applicazione del software FDS nella simulazione degli scenari d'incendio.

Trefolo 7 fili - Standard Italiano D.M. 14/1/08

| Diametro nominale | | Sezione | Massa | $f_{p(1)k}$ | f_{ptk} | $f_{p(1)k}/f_{ptk} \times 100$ | E |
|-------------------|------|-----------------|-------|-------------|-----------|--------------------------------|--------|
| Ø | mm | mm ² | g/m | MPa | MPa | % | MPa |
| 5/16 | 7,9 | 39 | 305 | 1670 | 1860 | > 85% | 196000 |
| 3/8 | 9,3 | 52 | 406 | 1670 | 1860 | > 85% | 196000 |
| 1/2 | 12,5 | 93 | 730 | 1670 | 1860 | > 85% | 196000 |
| 1/2 S | 12,9 | 99 | 770 | 1670 | 1860 | > 85% | 196000 |
| 6/10 | 15,2 | 139 | 1090 | 1670 | 1860 | > 85% | 196000 |
| 6/10 S | 15,7 | 150 | 1170 | 1670 | 1860 | > 85% | 196000 |

S – Trefoli stabilizzati a basso rilassamento (Classe 2) con $r < 2,5\%$ a 2000 h al 75% f_{ptk}

Tabella 1 – Caratteristiche dei trefoli da c.a.p. ammessi dalla normativa italiana

(quale efficace protezione dell'armatura di precompressione).

Le proprietà dei materiali sono estesamente documentate nella Sezione 3 della Norma UNI EN 1992-1-2:2005, tuttavia in considerazione di alcune sue proprie particolarità, è bene fare qui qualche precisazione in relazione alle caratteristiche dell'acciaio da pretensione.

Acciaio da pretensione

Per la definizione delle caratteristiche dell'acciaio da pretensione la UNI EN 1992-1-2:2005 rimanda ai seguenti documenti normativi:

- EN 10138-2 Prestressing steels Part 2: Wire (per fili singoli trafilati a freddo)
- EN 10138-2 Prestressing steels Part 3: Strand (per trecce e trefoli)
- EN 10138-2 Prestressing steels Part 4: Bar (per barre laminate a caldo e bonificate)

Qui ci limitiamo ad osservare che la maggior parte degli acciai da pretensione sono impiegati negli elementi precompressi in forma di trecce e trefoli, raramente come fili singoli o barre: le trecce sono costituite da tre fili

avvolti ad elica, mentre i trefoli sono per lo più a 7 fili con un filo rettilineo sull'asse (anima) e gli altri sei a formare una corona di fili avvolti ad elica.

L'acciaio da pretensione, in merito alla sua resistenza meccanica, è caratterizzato da tre parametri che sono indicati (NTC 2008) con la seguente simbologia (la notazione per l'acciaio da pretensione è "p" anziché "s"):

- f_{ptk} tensione caratteristica di rottura
- $f_{p(1)k}$ tensione caratteristica all'1% di deformazione totale sotto carico (che rappresenta l'analogo del limite di snervamento per il caso dei trefoli, corrispondente allo 0,2% di deformazione residua)
- $f_{p(0,1)k}$ tensione caratteristica allo 0,1% di deformazione residua (che rappresenta l'analogo del limite elastico, per il caso dei fili singoli).

Nella realizzazione dei manufatti in c.a.p. le tensioni maggiormente impiegate sono le prime due, per il cui rapporto $f_{p(1)k}/f_{ptk}$ è fissato il limite di $0,85 \div 0,95$, con allungamento massimo a rottura non inferiore a 3,5% (al fine di evitare le rotture di schianto, cioè quelle che possono avvenire quasi senza deformazioni di preavviso): i valori secondo lo standard italiano sono riportati in *Tabella 1*.

La tensione a cui si fa generalmente riferimento come tensione di tesatura (per i trefoli) è la tensione $f_{p(1)k}$ per cui si può facilmente notare come con l'acciaio di pretensione si possano raggiungere valori di tesatura molto prossimi alla tensione ultima (cioè molto elevati) e con deformazione totale sotto carico circa pari a cinque volte quella riscontrabile per gli acciai da cemento armato (B450C) al limite dello snervamento ($\epsilon_{yk} \sim 0,2\%$).

L'acciaio armonico ad alta resistenza, a differenza dell'acciaio ordinario da cemento armato, non presenta fenomeni evidenti di snervamento (plateau della curva sforzi-deformazioni) per cui si è soliti fare ricorso a tensioni corrispondenti a precisi limiti di deformazione (l'1% totale sotto carico, cui corrisponde lo 0,2% di deformazione residua allo scarico).

L'elevata deformabilità sotto carico dell'acciaio armonico consente all'acciaio da pretensione di "compensare" ampiamente le cadute di tensione che si hanno (dopo tesatura) per effetto concomitante del rilassamento stesso dell'acciaio (sempre del tipo a basso rilassamento) e delle deformazioni (istantanee e differite) del calcestruzzo: con un normale acciaio da cemento armato (inadatto per ottenere forti allungamenti in campo elastico) lo stato iniziale di precompressione (o precompressione a vuoto) si perderebbe quasi integralmente proprio per l'intervento dei suddetti fenomeni di caduta (in particolar modo per l'effetto dell'accorciamento elastico del calcestruzzo e del suo successivo scorrimento viscoso), talché in esercizio lo stato di coazione (precompressione sotto carico) risulterebbe del tutto inesistente.

A fronte di questi aspetti positivi, in presenza dei fenomeni d'incendio si manifesta l'effetto negativo per gli acciai da pretensione dato dalla loro estrema sensibilità e vulnerabilità nei confronti del riscaldamento prodotto dall'incendio: questo effetto negativo è una diretta conseguenza del fatto che le elevate caratteristiche tensili degli acciai da pretensione sono ottenute, nel processo di

fabbricazione, con il ricorso a procedimenti in parte meccanici (come l'incrudimento per trafilatura a freddo) ma in parte anche termici (detti di bonifica, ovvero di tempra e rinvenimento), onde il raggiungimento in esercizio di temperature prossime a quelle di rinvenimento (300°-400°C) può facilmente alterare la struttura (metallografica) del materiale, inducendo così perdite drastiche e irreversibili della sua iniziale resistenza.

Pertanto, nella produzione di manufatti prefabbricati in c.a.p. con elevate prestazioni di resistenza al fuoco gli acciai da pretensione devono sempre essere "protetti" da significativi spessori di calcestruzzo (si può ragionevolmente prevedere da un minimo di circa 50 mm, fino a un massimo di 80 mm): a parità di configurazione e dimensioni di sezione (rispetto al cemento armato ordinario) questa condizione (di alto ricoprimento) si traduce in una certa riduzione dell'altezza utile della sezione, da cui dipende in pratica (negli elementi inflessi) il braccio della coppia



interna e quindi in ultima analisi il momento resistente (sotto carico) dell'elemento strutturale.

Tuttavia (e qui sta un altro dei pregi del precompresso) negli elementi inflessi in c.a.p. si può ampiamente e validamente compensare questa riduzione del braccio di forze con il parallelo incremento degli sforzi (di trazione-compressione) che originano la coppia interna, ovvero il momento resistente (sia di esercizio che di carico ultimo): nel c.a.p. si possono avere (lato acciaio) degli sforzi di trazione molto elevati, in conseguenza dell'uso dell'acciaio armonico ad alta resistenza, e parimenti (lato calcestruzzo) sforzi di compressione altrettanto elevati, a seguito del confezionamento del manufatto con calcestruzzi di classe normalmente superiori a quelle di comune impiego per il cemento armato ordinario).

Per inciso, occorre osservare che non è previsto negli elementi in c.a.p. l'impiego di calcestruzzi "ad alta resistenza" HSC (High

Strength Concrete) con classe superiore alla C45/55 in quanto questi manifestano in forma molto accentuata il fenomeno del distacco improvviso del calcestruzzo ad alta temperatura (spalling).

Tutti i calcestruzzi HSC sono ad alto dosaggio di cemento (fino a 500 kg/m³) e pur dovendo rispettare valori drasticamente ridotti per il rapporto a/c (fino a un minimo di 0.35) hanno un contenuto totale di acqua del tutto paragonabile a quello dei calcestruzzi ordinari; tuttavia per diverse ragioni (aggiunte di microsilice, elevata compattazione, etc.) essi hanno una porosità ridottissima e quindi essendo assai meno porosi degli NSC (Normal Strength Concrete) riescono difficilmente a mitigare l'impatto della pressione interstiziale di vapore che si sviluppa ad alta temperatura: risultano perciò fortemente soggetti al fenomeno di spalling.

Metodi di prova e di calcolo

In ambito nazionale il D.M. 16 febbraio 2007 "Classificazione di resistenza al fuoco di prodotti ed elementi costruttivi di opere da costruzione" (emanato sulla scorta di disposizioni europee) ha stabilito una tappa fondamentale nel settore della classificazione di resistenza al fuoco: si tenga conto che per oltre un trentennio l'approccio tecnico è stato sostanzialmente dominato dalla "storica" Circolare N.91 del 14 settembre 1961, secondo cui la classifica degli elementi costruttivi (anche c.a.p.) si poteva ottenere per via essenzialmente "sperimentale", sia diretta che indiretta.

La classificazione diretta doveva riferirsi a prove (al forno) eseguite su campioni (a grandezza naturale, con vincoli isostatici e opportunamente caricati), mentre la classificazione indiretta poteva riferirsi a "tabelle" di dati, a loro volta ricavati per via sperimentale.

A quanto sopra si deve aggiungere che l'obiettivo della circolare stessa non era propriamente la classificazione degli elementi costruttivi, in quanto questa si proponeva la



Poter disporre, in fase di progettazione o di verifica della resistenza al fuoco di elementi in c.a.p., di adeguati strumenti di calcolo basati su programmi in grado di eseguire l'analisi del transitorio termico con elementi finiti bidimensionali, è di fondamentale importanza

classificazione degli edifici (a struttura di acciaio), rapportando il tempo di esposizione al fuoco con il carico d'incendio previsto: la valutazione principale riguardava lo spessore delle protezioni e gli unici elementi in c.a.p. considerati erano quelli delle cosiddette strutture "miste" con travetti precompressi e getto in opera di soletta collaborante in cemento armato ordinario.

In tale contesto nacque l'esigenza (verso la fine degli anni '80, anche in seguito all'attuazione del procedimento del NOP istituito con la legge del 7 dicembre 1984, n. 818 che di fatto coinvolgeva i professionisti abilitati in una più approfondita ed esauriente valutazione della resistenza al fuoco) di predisporre specifiche norme che, in alternativa all'approccio essenzialmente sperimentale della Circolare N.91/61, permettessero la valutazione della resistenza al fuoco in via "analitica", cioè con il ricorso a metodologie di calcolo basate sulla "equazione del calore" (di Fourier) e sulle proprietà fisiche dei materiali definite in funzione della temperatura.

Per iniziativa del CCTS di prevenzione incendi del Ministero dell'Interno, nonché di apposite Commissioni in sede UNI, furono approntate una serie di norme tecniche, fra cui la UNI 9502 (per elementi in conglomerato cementizio armato, normale e precompresso). La prima edizione della norma risale al 1989 ed è stata poi adeguata nel 2001 alle disposizioni della ENV 1992-1-2:1995 (versione provvisoria dell'EC2 Parte Fuoco); in data 01.04.2010 essa è stata ritirata e sostituita

dalla UNI EN 1992-1-2:2005 (unico riferimento in vigore per il calcolo della resistenza al fuoco).

La possibilità di utilizzare il metodo sperimentale è oggi sostenuta dalla seguente documentazione tecnica emessa in sede europea (poi ufficializzata anche in versione UNI):

- EN 13501-2:2009
Classificazione al fuoco dei prodotti e degli elementi da costruzione
Parte 2: Classificazione in base ai risultati delle prove di resistenza al fuoco, esclusi i sistemi di ventilazione
- EN 1363-1:2012
Prove di resistenza al fuoco
Parte 1: Requisiti generali
- EN 1363-2:2012
Prove di resistenza al fuoco
Procedure alternative e aggiuntive.

Nel caso specifico degli elementi strutturali in c.a.p. è facile immaginare quali siano in realtà le difficoltà pratiche nell'impiego del metodo sperimentale: le prove sono eseguite con forni (a carica orizzontale) che in genere non superano lunghezze di 6 ÷ 7 m: ciò per lo più preclude la possibilità di sperimentare "campioni" a dimensioni effettive (essendo gli elementi in c.a.p. del tipo trave quasi sempre caratterizzati da grande luce).

Indiscussa è pertanto l'importanza di poter disporre (in fase di progettazione e/o verifica della resistenza al fuoco di elementi in c.a.p., specie se di grande luce) di adeguati strumenti di calcolo che siano basati su programmi in grado di eseguire l'analisi del transitorio termico con elementi finiti bidimensionali: a tale proposito un valido codice di riferimento è, ad esempio, il FIRES-T3: A Computer Program for the Fire Response of Structure-Thermal (Three-Dimensional Version) di Iding, R.; Bresler, B.; Nizamuddin, Z. (disponibile presso il Building and Fire Research Laboratory National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD USA), utilizzabile anche per le analisi bi-dimensionali di sezioni.

Nei confronti del metodo analitico, la UNI



Figura 1 - Vista di copertura fotovoltaica

1992-1-2:2005 pur non facendo espressamente menzione dell'equazione del calore (introdotta per il calcolo dalla UNI 9502:2001 al fine della esecuzione di analisi di mappatura termica delle sezioni) o altre relazioni per il calcolo degli scambi convettivi e d'irraggiamento fra elementi e ambiente (gas caldi di combustione, superfici radianti, etc.) richiama al punto 4.3 l'impiego di metodi avanzati di calcolo al fine di valutare la risposta termica e meccanica (azioni indirette) degli elementi costruttivi.

Allo stato attuale il mercato italiano offre numerosi programmi di calcolo (come software stand-alone o integrati in pacchetti di analisi strutturale) che possono essere proficuamente utilizzati in caso di valutazione della resistenza al fuoco di elementi costruttivi sia in c.a. che in c.a.p.

In merito alle verifiche tabellari per elementi di c.a.p. si deve osservare come allo stato attuale della normativa debba farsi esclusivo riferimento alla UNI 1992-1-2:2005 (al punto 5.6 per le travi e al punto 5.7 per le lastre): tuttavia le tipologie trattate sono sostanzialmente limitate alle "Travi a I" e alle "Lastre piane" (mono e bi-dimensionali), in semplice appoggio o in continuità.

Di rilievo sono, invece, le avvertenze richiamate al punto 5.2 (5): cioè che per fili e trefoli si deve assumere una temperatura critica

di 350°C e che la distanza "a" dell'asse armature dal bordo esposto sia sempre incrementata di almeno 15 mm (per fili e trefoli pretesi), rispetto ai dati tabellati per le barre in acciaio ordinario.

Tipologie edilizie e sistemi costruttivi

L'impiego di elementi strutturali in c.a.p. per grandi luci o forti sovraccarichi prevede il ricorso a tipologie edilizie sviluppate in base a maglie rettangolari (o quadrate) con elevazione su un solo piano (sistemi monopiano) o su più piani (sistemi multipiano).

Nei sistemi monopiano gli elementi prefabbricati in c.a.p. (che comunemente sono detti tegoli) costituiscono l'ossatura portante di grandi coperture, per le quali è in genere previsto anche l'inserimento di lucernari (zenitali o a shed), di cupolini evacuatori di fumo e calore (ENFC) e in misura fortemente crescente anche di sistemi fotovoltaici (con potenze nominali fino a 1.000 kWp e consegna sia in BT che in MT), come mostrato in *Figura 1*.

In tali disposizioni gli elementi precompressi sono fra loro distanziati e danno luogo a una disposizione discontinua, intervallata dagli altri elementi di chiusura (lastre piane o curve, talvolta designate come coppelle).

Nei sistemi pluripiano gli stessi elementi in c.a.p. costituiscono l'ossatura portante anche degli impalcati e a tale scopo essi vengono affiancati gli uni agli altri (originando una disposizione continua) con completamento di getto integrativo in opera (soletta collaborante). Nel caso di elevati sovraccarichi (fino a 20 kN/m² su luci di circa 12 m) trovano impiego per sistemi pluripiano le lastre piane di c.a.p. alveolari.

In relazione al sistema costruttivo per l'impiego dei prefabbricati di solito si usa, inoltre, fare le seguenti distinzioni:

- sistemi totalmente prefabbricati, in cui il calcestruzzo in opera (ovvero speciali malte) sono impiegati solo per la solidarizzazione di unioni (applicazioni in edilizia industriale, commerciale, agricola e sociale o parcheggi fuori terra)
- sistemi misti, in cui si riscontrano parti consistenti di struttura (pareti o telai) gettate in opera (applicazione nel terziario o parcheggi entro terra)
- sistemi ibridi, in cui in realtà alle strutture portanti verticali in calcestruzzo armato (pilastri) vengono associati elementi orizzontali di materiali "alternativi" rispetto al c.a.p., come il legno o l'acciaio (applicazione in prevalenza nell'edilizia sportiva).

In merito ai sistemi di precompressione degli elementi si deve invece osservare che, allo stato attuale, le tecniche disponibili sono sostanzialmente due:

- sistemi in c.a.p. pre-tesi a cavi aderenti: si tratta del sistema effettivamente usato per la produzione degli elementi prefabbricati in stabilimento con getto entro casseri metallici a vibrazione (per la vibrofinitura dei manufatti) e armature di precompressione costituite da trecce e trefoli posti in trazione (tesatura), prima dell'esecuzione del getto, per mezzo di appositi banchi attrezzati
- sistemi in c.a.p. post-tesi a cavi scorrevoli: si tratta del sistema riservato alla costruzione di strutture precomprese per opere infrastrutturali o grandi travi da

ponte in cui i cavi posti entro guaine sono costituiti da fasci di trefoli, vengono fissati ad un estremo (ancoraggi fissi o del tipo Freyssinet) e tesati dopo maturazione del getto con idonei martinetti.

Per quanto riguarda la precompressione, questa può essere del tipo integrale, limitata o parziale: solo con la prima possono escludersi le tensioni di trazione all'intradosso, mentre con la seconda è ancora garantita l'assenza di fessurazione.

La precompressione parziale (che comporta fessurazione controllata all'intradosso) ha applicazioni molto particolari e non è in uso per i sistemi in c.a.p. a cavi aderenti.

Travi porta-tegoli (orditura primaria)

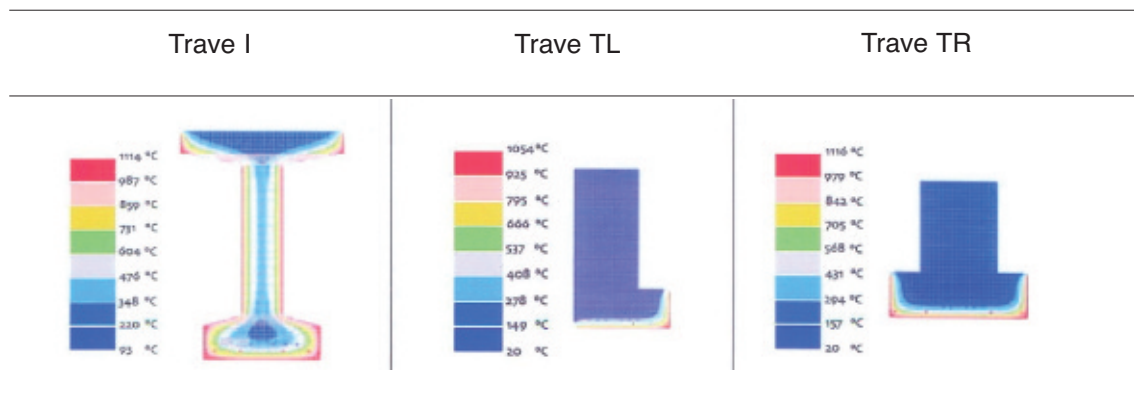
Le travi di banchina TL (di conformazione a L) e quelle di spina TR (di conformazione a T rovescio) possono essere realizzate anche in cemento armato vibrato (c.a.v.), ma più di frequente sono prodotte in c.a.p.: le luci generalmente adottate sono di 10 ÷ 12 m (tipico è il caso della maglia 10x20) e le relative portate in esercizio possono variare da un minimo di 25 kN/m a un massimo di 100 kN/m (per le travi a L) e da un minimo di 50 kN/m a un massimo di 200 kN/m (per le travi a T rovescio). Per il peso proprio (su luci medie di 10 ÷ 12 m) si può stimare approssimativamente un contributo compreso fra le 12 t e le 15 t.

Allo scopo soprattutto di migliorare l'aspetto estetico, molto utilizzate sono anche le travi cosiddette a "I" che si distinguono per il ricorso a una sezione particolarmente snella (la quale contribuisce anche a contenere il peso proprio in relazione alle prestazioni statiche offerte). Le principali dimensioni geometriche, riferite alla sezione, che definiscono la resistenza al fuoco per il requisito R di capacità portante sono:

- "b_w" intesa come larghezza dell'anima (che per la R 120 deve essere di almeno 120 mm, mentre per la R 180 deve essere di almeno 140 mm); per le travi TR e TL

MAPPATURA TERMICA TRAVI PRIMARIE

Esposizione all'incendio standard di 180 minuti



Schema 1 - Esempi di mappatura termica di travi

la geometria della sezione viene proporzionata in base allo spessore dell'ala (che costituisce la zona di appoggio degli elementi orizzontali)

- “b” da intendersi come larghezza dell'ala, per la quale è tabellato un valore massimo pari a 500 mm nel caso di R 120 e di 600 mm per la R 180: per le travi TR e TL si riscontrano valori di b superiori (fino a 90 ÷ 100 cm), mentre per le travi a I (con sezione snella) facilmente si trovano valori molto prossimi a quelli tabellati
- “a” da prendersi come distanza dell'asse (o baricentro) delle armature dalla superficie esposta al fuoco: questa dimensione negli elementi del tipo trave (in genere esposti al fuoco su tre lati) viene combinata con la dimensione b in modo tale che a valori più elevati di b corrispondano valori minori della distanza; in particolare per R 120 si potrà fare riferimento alla combinazione (b/a) con b = 500 mm e a = (50+15) = 65 mm, mentre per R 180 si potrà fare riferimento alla combinazione (b/a) con b = 600 mm e a = (60+15) = 75 mm.

Con validità del tutto generale nella produzione di manufatti strutturali in c.a.p., si deve notare che per ricoprimenti comunque supe-

riori ai 50 mm è buona norma provvedere alla stabilizzazione dello strato di calcestruzzo di ricoprimento per mezzo di un'armatura leggera (ad esempio rete metallica Ø 4 / 20x20 mm) di cui non va tenuto conto nel calcolo (perciò stesso detta talvolta di sacrificio). Nello *Schema 1* sono mostrati esempi di mappatura termica per una data durata di esposizione per le travi porta-tegoli più comunemente utilizzate (forme a I, TR e TL).

Tegoli binervati (TT) e a sezione alare

Gli elementi (lineari) prefabbricati in c.a.p. del tipo a doppia T (spesso chiamati anche TT o tegoloni) sono caratterizzati da prestazioni statiche eccellenti in rapporto al loro peso proprio e perciò trovano opportuna collocazione in molte realizzazioni che richiedono grandi dimensioni (in particolare grandi luci), come mostrato in *Figura 2*.

Tra i loro pregi più evidenti è da considerare la flessibilità insita nel processo produttivo, che consente di disporre (a parità di forma della sezione) di molti modelli differenti con altezza di fabbricazione crescente da H = 40 cm a H = 100 cm e nervature di spessore variabile (fondelli da 8/12/16/20/25 cm), in mo-



Figura 2 - Vista all'intradosso di impalcato in tegoli TT

do da soddisfare le più svariate esigenze costruttive; all'intradosso presentano una superficie perfettamente liscia, mentre l'estradosso (rifinito a staggia vibrante) è mantenuto ruvido per facilitare l'aderenza del getto di completamento in opera.

Dal punto di vista statico sono inoltre sempre provvisti di armatura trasversale al taglio (staffe) che vengono lasciate sporgenti all'estradosso (forchette di ripresa) per facilitare l'aggancio con il getto integrativo (soletta collaborante); la loro posa in opera è rapida in quanto sono autoportanti e non necessitano di puntellature in fase di montaggio.

Nella *Figura 3* sono mostrati i tegoli TT in attesa del trasporto e della messa in opera, in deposito su area scoperta.

La loro resistenza al fuoco può essere variata da un minimo di R 60 fino ad un massimo di R 180 (per casi eccezionali sono offerti sul mercato anche modelli con resistenza fino a R 240): il requisito R è strettamente legato allo spessore adottato per le nervature, in quanto è proprio in queste che sono alloggiare le armature di pretensione: spessori di circa 160 (mm) sono idonei a garantire una resistenza di 120 minuti (*Schema 2*), mentre per le classi superiori occorrono spessori da 200 (mm) fino a un massimo di 250 (mm).

In alcuni sistemi costruttivi multipiano i solai (per lo più di grande luce) sono costituiti da tegoli binervati (TT o Pi Greco) accostati: in questi casi oltre al requisito R di capacità portante sono altresì richiesti i requisiti E (te-

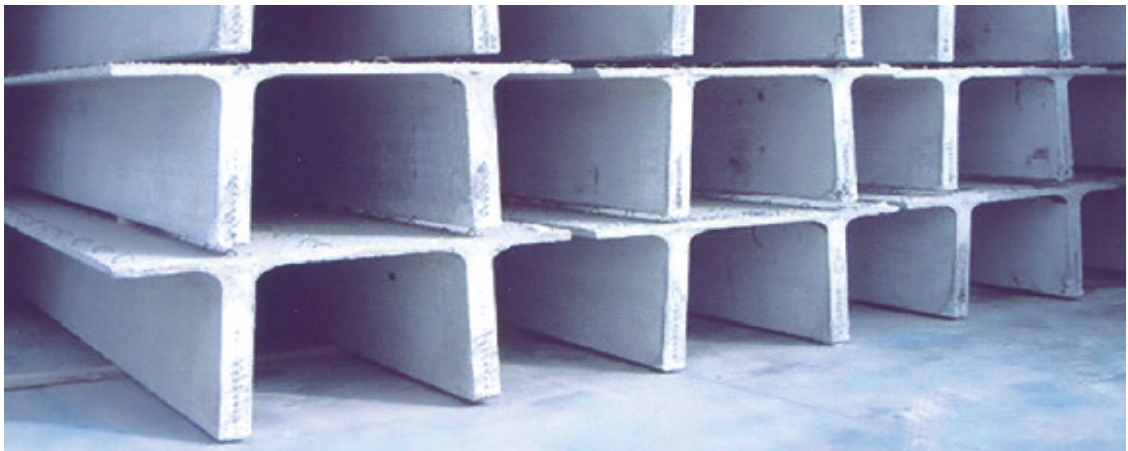
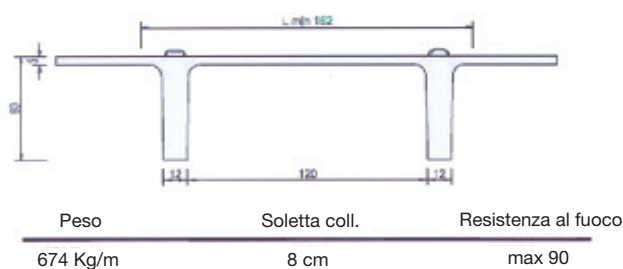
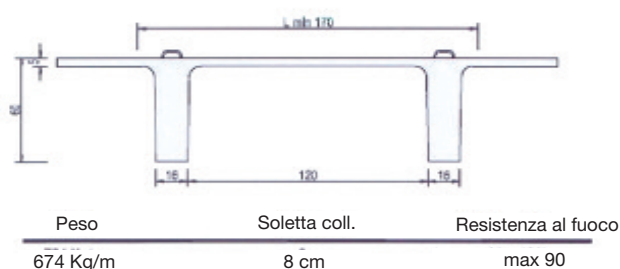


Figura 3 - Stoccaggio di tegoli TT su area esterna



Esempio di mappatura termica a banda di calore (T = 120')



Schema 2 - Esempi di analisi termica di tegoli TT

nuta ai fumi e gas caldi) ed I (isolamento). Per l'uso anzidetto i tegoli, con idonea caratteristica R, diventano RE grazie all'esecuzione di un getto integrativo (soletta) all'estradosso di almeno 50 (mm) e REI (se si richiede la rispondenza al criterio dell'isolamento) a seguito dell'esecuzione di uno strato continuo (convenientemente armato) il cui spessore va definito (cioè calcolato) in rapporto alla durata di esposizione al fuoco: pertanto il soddisfacimento del REI è fortemente dipendente dallo spessore del getto integrativo e il criterio della I (isolamento) è sempre quello maggiormente restrittivo (il requisito è garantito per solo 30 minuti da uno spessore minimo di 50 mm).

Un punto critico è rappresentato dall'acco-

stamento dei tegoli (giunti) che deve essere molto accurato (con scostamento reciproco inferiore a 1,5 cm), in caso contrario l'azione del fuoco potrebbe investire anche il contorno laterale delle ali del tegolo, condizione assolutamente non prevista in sede di progetto (in quanto si ipotizza che l'azione del fuoco incida solo sulla superficie d'intradosso); se si riscontrano anomalie nell'accostamento reciproco si potrà comunque intervenire con una opportuna sigillatura dei giunti.

Al fine di migliorare l'aspetto estetico (in particolare nel caso delle coperture a vista dei sistemi monopiano, come mostrato in *Figura 4*) sono state concepite e modellate le forme di sezione che si definiscono di tipo alare, le quali sono sostanzialmente una variante ar-



Figura 4 - Vista interna di copertura in tegoli alari

chitettonica della sezione a V spesso utilizzata nelle travi da ponte: l'intradosso curvilineo consente di ricavare coperture ondulate con estetica molto gradevole e la configurazione della sezione (se attentamente modellata) permette di ottenere caratteristiche di resistenza al fuoco di R 120 come valore standard su luci anche superiori ai 20 metri.

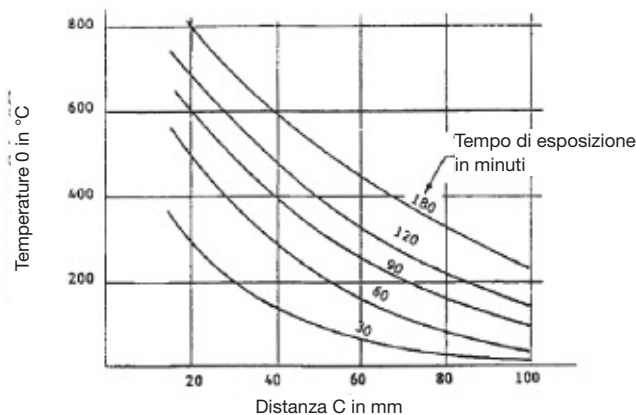
Lastre piane alveolari (di solaio)

Le lastre alveolari (hollow core slab) in calcestruzzo monolitico, dopo i primi tentativi in Germania a partire dal 1930, fecero la loro effettiva apparizione nella pratica costruttiva attorno al 1955 e in questo stesso periodo di tempo fu pure introdotta la precompressione.

La forma degli alveoli (ovale o circolare) risulta dipendente dal processo di fabbricazione adottato: con macchina vibrofinitrice si ottengono le lastre per strati successivi e con alveoli di forma oblunga (processo slip-form), mentre con l'estrusione del calcestruzzo per mezzo di speciali coclee (Spiroll - Canada) si ricavano lastre con alveoli circolari (processo extruder, come illustrato in Figura 5 che mostra le lastre in fase di stoccaggio).

Lo spessore delle lastre varia da un minimo di 80 (mm) a un massimo di 500 (mm), con larghezza standard di 120 cm e lunghezza variabile (in base alle esigenze di calcolo).

La produzione di lastre alveolari in cemento armato ordinario è scarsissima, sia in Italia che all'estero, onde la tipologia in c.a.p. è praticamente l'unica commercialmente disponibile.



Valori medi di temperatura nella nervatura di lastre alveolari $h = 20 \div 400$ mm in funzione della distanza e dall'intradosso

Fonte Manuale ASSAP

Schema 3 - Analisi termica di lastre alveolari (abaco)



Figura 5 - Stoccaggio in magazzino di lastre alveolari

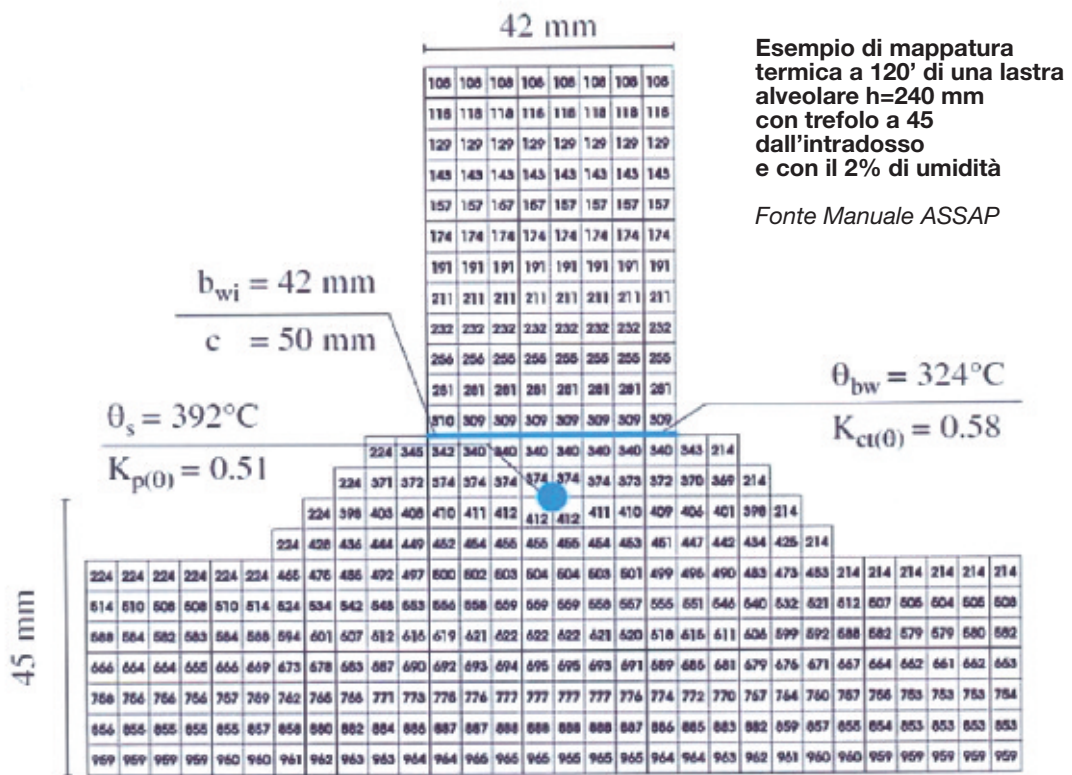
L'acciaio armonico di precompressione (trefoli) costituisce pertanto l'unica armatura dell'elemento che risulta perciò privo di specifica armatura a taglio (la capacità taglio resistente viene interamente affidata alla resistenza a taglio-trazione del calcestruzzo delle nervature). Per quanto riguarda più specificamente la determinazione delle caratteristiche di resistenza al fuoco e le relative prestazioni si può notare quanto segue:

- la verifica tabellare non trova attualmente riscontro nella normativa applicabile (la UNI EN 1992-1-2:2005 tratta esclusivamente il caso delle lastre non forate, di spessore costante o nervate), mentre quanto indicato nelle norme di prodotto può valere solo per un pre-dimensionamento di larga massima (si potrà fare anche riferimento all'abaco mostrato nello *Schema 3*)

PRODOTTI RESISTENTI AL FUOCO

**DAL CERTIFICATO ALLA
DICHIARAZIONE DI CORRETTA POSA**

www.kmimpianti.it



Schema 4 - Mappatura termica di lastre alveolari

- la mappatura termica delle lastre (in Schema 4) può essere ottenuta per via sperimentale, ma assai più estesamente e proficuamente per via analitica con l'impiego di appositi programmi agli elementi finiti
- nella valutazione della resistenza al fuoco il parametro che risulta maggiormente condizionante è la variazione della resistenza caratteristica dell'acciaio armonico f_{tk} con l'aumento della temperatura, in base all'andamento del fattore di riduzione $K_p(\theta)$
- nella pratica costruttiva corrente i solai con lastre alveolari non sempre sono completati con getti integrativi in opera, mentre per la garanzia dei requisiti EI (caso dei sistemi multipiano) l'esecuzione di uno stato continuo (convenientemente armato) all'estradosso (cappa) si rende indispensabile.

Procedure di qualificazione e Marcatura CE

La normativa tecnica nazionale (NTC 2008) ha previsto per i manufatti prefabbricati strutturali delle procedure di qualificazione obbligatorie, descritte al punto 11.8.4 (Procedure di qualificazione). Le procedure di qualificazione sono state prescritte per i seguenti manufatti:

- prefabbricati in serie dichiarata: si tratta di produzioni in serie in stabilimento, dichiarate tali dal fabbricante, per le quali la procedura prevede il deposito della documentazione atta a dimostrare l'idoneità del processo produttivo e la rispondenza delle caratteristiche del prodotto alle norme vigenti
- prefabbricati in serie controllata: si tratta di produzioni in serie in stabilimento che, oltre ad avere i requisiti previsti per la serie di-

chiarata, sono eseguite con procedure che prevedono verifiche sperimentali su prototipo (prove a rottura) e specifici controlli del processo di fabbricazione.

Le procedure di qualificazione costituiscono l'usuale riferimento prima della entrata in vigore delle procedure di attestazione di conformità CE, finalizzate alla libera circolazione dei prodotti da costruzione all'interno dello spazio economico europeo.

Al momento attuale la produzione della maggior parte degli elementi in c.a.p. si svolge nel contesto della Marcatura CE, come previsto dal Regolamento (UE) 305/2011 "Prodotti da Costruzione" (CPR) entrato in vigore il 1° luglio 2013, in sostituzione della Direttiva 89/106/CE (recepita in Italia dal DPR 246/1993) che è stata parimenti abrogata.

Secondo la legislazione comunitaria, qualora per un prodotto da costruzione sia stata emanata una norma europea armonizzata (hEN), ovvero esista un ETA (European Technical Approval), detto correntemente "Benestare Tecnico", il prodotto stesso dovrà sottostare alle prescrizioni tecniche e alle procedure amministrative indicate nella disposizione comunitaria (hEN/ETA), prescindendo quindi da previgenti normative nazionali. Per i manufatti strutturali prefabbricati in c.a. e c.a.p. sono attualmente in vigore le seguenti norme tecniche armonizzate (come riportato in elenco C259/1 pubblicato in G.U.C.E. il 08.08.2014):

- EN 1168:2005 + A3:2011
"Lastre alveolari"

TUTTO SOTTO CONTROLLO CON TAYLOR

Software per Manutentori
antincendio ed Estintoristi.

- ✓ Interventi più rapidi
- ✓ Nessun rischio di errore
- ✓ Incremento delle marginalità



TAYLOR

per maggiori informazioni

0735 751031

WWW.TAYLORSOFTWARE.IT

 Infoservice
soluzioni software

tel 0735 751031 fax 0735 658046
www.infoservicenet.it info@infoservicenet.it

- EN 13224:2011
“Elementi nervati per solai”
- EN 13225:2013
“Elementi strutturali lineari”
- EN 13693:2004 + A1:2009
“Elementi speciali per coperture”
- EN 13747:2005 + A2:2010
“Lastre per solai”
- EN 14844:2006 + A2:2011
“Elementi scatolari”

Nella precedente lista sono state evidentemente richiamate solo le norme armonizzate attinenti ai “Prodotti Prefabbricati di Calcestruzzo” che possono interessare le costruzioni in precompresso.

Nel sistema di attestazione di conformità CE dei manufatti precompressi (per i quali vige il sistema 2+ che prevede il mantenimento del Factory Production Control) gli attestati medesimi, di fatto costituiti dalla Dichiarazione di Prestazione (in linea con il Regolamento CPR 305/2011) sono rilasciati da Organismi Notificati in possesso delle apposite autorizzazioni.

Per la determinazione delle caratteristiche di resistenza al fuoco le norme di prodotto (hEN/ETA) devono essere sempre utilizzate in congiunzione con le norme di progetto, in particolare la più volte citata UNI EN 1992-1-2:2005 (parte fuoco dell'eurocodice strutturale).

Si deve aggiungere, inoltre, che la certificazione di resistenza al fuoco per i manufatti strutturali in c.a.p., redatta da professionista antincendio ai sensi dell'art. 4 del D.M. 16/02/2007 (Mod. PIN2.2 - 2012 CERT.REI) “costituisce la dichiarazione di uso conforme all'impiego previsto”.

Per gli acciai ordinari e gli acciai da pretesione le procedure di qualificazione presso il STC (del Consiglio Superiore dei Lavori Pubblici), così come previsto dalla normativa NTC 2008 sono tuttora attuali e inderogabili: nei manufatti in c.a.p. è infatti ammesso esclusivamente l'impiego di acciai qualificati secondo le procedure di cui al punto 11.3.1.2 delle Norme Tecniche.

Le conclusioni

L'acciaio armonico delle armature di pretesione subisce, per molteplici ragioni, un degrado della resistenza meccanica superiore a quello dell'acciaio ordinario, con rapida riduzione dell'effetto di precompressione per temperature > 300°C: pertanto, ogni manufatto in c.a.p. sotto l'azione del fuoco modifica in maniera assai rilevante la propria capacità portante.

Un'attenta valutazione della resistenza al fuoco condotta mediante il calcolo e relativa mappatura termica (più che sufficiente per gli elementi isostatici normalmente caricati, in assenza di azioni indirette), l'adozione di adeguati spessori di ricoprimento in calcestruzzo per i trefoli e l'integrazione dell'armatura di precompressione con armature aggiuntive in acciaio ordinario rappresentano le migliori pratiche ai fini della rispondenza ai requisiti di sicurezza strutturale in caso d'incendio.

Per ulteriori interventi in opera, se ritenuti necessari o diversamente prescritti, si potrà fare ricorso all'impiego di sistemi di protezione passiva (come plafonature, intonaci, rivestimenti, etc.) ovvero all'installazione di sistemi fissi di estinzione (sprinkler).

Bibliografia

- Cestelli Guidi C., Cemento armato precompresso: teoria, esperienze e realizzazioni, Hoepli, 1987, Milano.
- Sigmund C., Calcolo di elementi prefabbricati in c.a.p., Editore Grafill, 2012, Palermo.
- ASSAP, Il solaio alveolare: progettazione e impieghi, Offset Print Veneta, 2002, Verona.
- FIB, Bulletin No. 46, Fire design of concrete structures: structural behaviour and assessment, DCC Siegmair Kästl, 2008, Germania.
- Buchanan A.H., Gambarova P., Felicetti R., Progetto delle strutture resistenti al fuoco (Edizione italiana aggiornata agli Eurocodici), Hoepli, 2009, Milano.
- Giacalone C., Resistenza al fuoco delle strutture: principi e applicazioni, Maggioli Editore, 2011, Santarcangelo di Romagna (RN).