

ROBUSTEZZA DELLE STRUTTURE PREFABBRICATE

LA GUIDA *fib*

Marco Menegotto

Presidente, Commissione *fib* “Prefabbricazione”

SOMMARIO

Il requisito di “Robustezza” è sempre stato presente nelle norme tecniche per le strutture, in forma generica. Solo in tempi recenti i principi e le regole per soddisfarlo si vanno esplicitando. In particolare la *fib*, promotrice da mezzo secolo della valutazione della sicurezza e dell’evoluzione dei codici per il calcestruzzo strutturale, ne tratta ampiamente nel suo Nuovo Codice Modello MC2010.

Nella prefabbricazione si è sempre provveduto a collegare elementi separati per comporre le strutture. Sin dalla fase concettuale del progetto, il problema è presente. In pratica, quindi, questa tecnica per prima ha dovuto focalizzarsi sui modi di tenere insieme le strutture, cioè di dotarle di robustezza, con ciò anticipando concetti e soluzioni, che risultano poi validi anche per le strutture eseguite in opera “monoliticamente”, troppo facilmente considerate robuste intrinsecamente.

Così, la prefabbricazione si è trovata ad anticipare anche l’esplicazione di regole dettagliate per la progettazione in funzione della robustezza, con una *Guida Pratica*, fornita di esempi e particolari costruttivi, che implementano i principi del MC 2010.

In questo articolo se ne illustrano e commentano i contenuti..

ROBUSTNESS OF PRECAST CONCRETE STRUCTURES: A *fib* GUIDE

SUMMARY

The requirement of “Robustness” has always been present in structural design codes, in generic form. However, only in recent times principles and rules for complying to it are getting explicit. Namely, *fib*, who has been promoting for half a century safety evaluation and design codes for structural concrete, deals with it specifically in its New Model Code MC2010.

In prefabrication, one provides always connections between separate elements to compose structures. Thus, the problem is faced since the phase of conceptual design. Actually, this technique was the first to focus on how to hold structures together, i.e., to provide them robustness, thereby anticipating concepts and solutions, resulting valid also for cast-in-situ “monolithic” structures, that too easily were considered intrinsically robust.

Today, prefabrication finds itself again anticipating detailed rules for the design aimed at robustness, with a *Guide to Good Practice*, giving examples and construction details able to implement the principles of MC2010.

Here, the content is illustrated and commented.

INTRODUZIONE

La *robustezza* rappresenta la capacità di una struttura di opporsi ad azioni eccezionali, non contemplate fra le azioni prevedibili di norma nell’esercizio ordinario della costruzione, limitandone ragionevolmente le conseguenze; più precisamente, andando incontro solo a inevitabili rotture circoscritte, pur accettando il superamento degli stati limite

convenzionali di esercizio e in parte ultimi.

La robustezza assicura quindi che il danno (collasso) della struttura non sia sproporzionato e in particolare non si propaghi rispetto a quello direttamente provocato dall’evento eccezionale.

Tale requisito è stato sempre menzionato nella normativa tecnica in forma generica ma vi riceve oggi un’attenzione crescente e viepiù dettagliata.

Il nuovo Codice Modello *fib* MC 2010 [4] è, come dice il nome, studiato per ispirare la normativa tecnica a venire sulle strutture in calcestruzzo. Riguarda il “calcestruzzo strutturale”, con cui s’intende, come noto, tutto ciò che un tempo era chiamato da noi cemento armato, cemento armato precompresso e cemento non armato. Il MC 2010 è un documento molto avanzato, allineato con lo stato dell’arte, come lo sono stati gli omologhi codici modello, prodotti con cadenza ventennale dai predecessori di *fib*, CEB e FIP, che sono serviti in particolare per l’elaborazione degli Eurocodici strutturali. Al di là di tale funzione, esso può fornire validi modelli e riferimenti operativi in problemi ancora non trattati dalle norme tecniche ufficiali.

La *fib* ha prodotto inoltre una Guida Pratica [6] per progettare in funzione della robustezza le strutture prefabbricate. Questo è il primo documento applicativo che tratta la materia (Fig. 1).



Fig. 1 – Guida fib Robustezza strutture prefabbricate

AZIONI ECCEZIONALI

Le azioni eccezionali si materializzano molto raramente e sono meno prevedibili, nella natura nell’intensità e nel tempo, di quelle ordinarie ma possono provocare danni catastrofici. Esse (dette “accidentali” internazionalmente) possono essere rappresentate dall’impatto di un mobile (veicolo terrestre, mezzo operativo, natante, aereo) o di materiali, detriti o proiettili vari; da un’esplosione casuale o dolosa; da un terremoto o maremoto in zona consideratane non soggetta, in assoluto o per l’intensità riscontrata; da alluvioni, eruzioni, frane, valanghe, crolli di adiacenze; da errori di progettazione e/o di esecuzione; da deterioramento di elemento strutturale. La definizione può essere rivolta anche all’incendio, alla cui resistenza però viene dedicata da più tempo una trattazione specifica nelle norme tecniche.

La robustezza deve essere quindi una proprietà qualitativa intrinseca della struttura per fronteggiare tali azioni, limitandone o circoscrivendone le conseguenze, associata a

una strategia, volta a evitarle o ridurle dall’origine.

Il requisito di robustezza è un componente del concetto più ampio di “affidabilità” di una struttura come sistema.

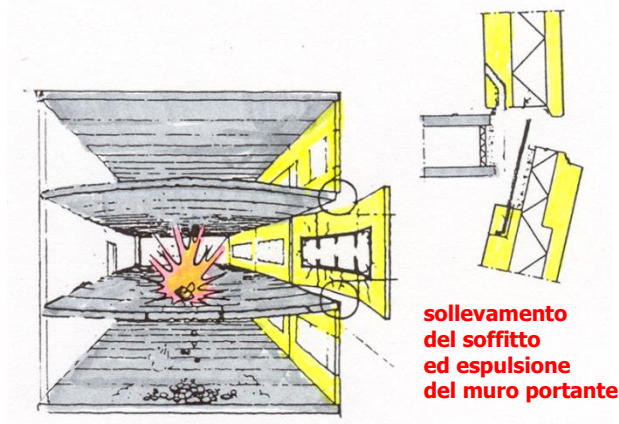


Fig.2 – danno locale da esplosione può minare l’intera struttura

La necessità di imporre un tale requisito divenne evidente a seguito del noto episodio del 1968 a Londra, quando in un edificio di 22 piani a Ronan Point precipitarono tutti i vani sulla verticale corrispondente a quello in cui era avvenuto uno scoppio di gas (Fig. 3).

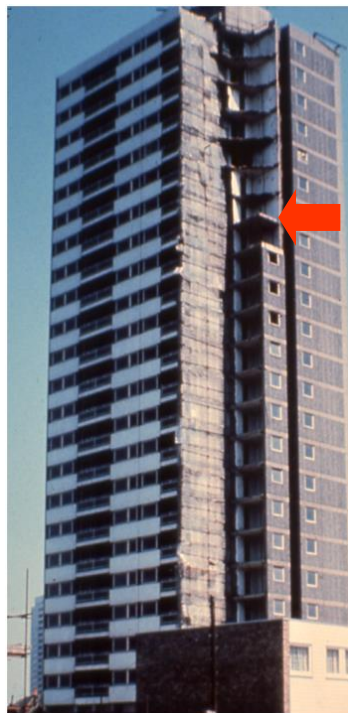


Fig.3 – Collasso progressivo di un angolo della torre di Ronan Point con l’ambiente luogo dell’esplosione di gas al 16° piano

Vari episodi simili si sono verificati successivamente, fra cui quello delle torri gemelle di New York per l’attentato del 2001, che hanno portato ad approfondire le conoscenze in

materia, a cercare un approccio razionale al problema e criteri per farvi fronte, con l'implementazione di regole adeguate per la prevenzione.

Negli Eurocodici EC 0 [1] ed EC 1 [2] la robustezza è definita come la "capacità di una struttura di subire eventi come incendi, esplosioni, urti o conseguenze di errori umani, senza essere danneggiata in modo sproporzionato rispetto alla causa originante".

Vi si considerano due strategie nei riguardi degli eventi eccezionali.

La prima, basata su azioni definite (esplosione interna, urto, ...), comprende vari strumenti, come: progettare la struttura per resistere all'azione; prevenire e/o ridurre dell'intensità dell'azione. La seconda è orientata a limitare comunque la propagazione del danno, mediante: ridondanza (percorsi di scarico alternativi); elementi chiave resistenti all'azione eccezionale; prescrizioni di dettaglio (su integrità, duttilità, ...). In relazione alla necessità di difesa da tali azioni, le strutture sono suddivise in "classi di conseguenza".

Qualitativamente il concetto di robustezza è chiaro. Peraltro, misure quantitative per la valutazione e i provvedimenti sono più complessi. Le specifiche dei codici riguardo alla robustezza per ora non hanno raggiunto un approfondimento pari a quelle per le normali verifiche di resistenza.

Un'analisi molto ampia della questione, con esempi e riferimenti, è trattata nel Rapporto COST "Structural Robustness Design for Practising Engineers" [3]. Gli approcci possono considerarsi di due tipi:

- metodi pratici di valutazione, in cui si modella il comportamento della struttura in un dato scenario di azioni;
- studi di affidabilità o di rischio, riferiti a un sistema soggetto a ipotesi più generali di potenziali scenari di azioni.

I metodi di progetto sono classificati come segue:

- a) controllo dell'evento, che influisce sulla probabilità del verificarsi dell'azione data E, mediante: ubicazione, forma e struttura dell'opera, limitazione di carichi d'incendio, sistemi di rilevazione e spegnimento, allontanamento di materiali pericolosi, protezioni dall'urto, controllo di qualità in costruzione, manutenzione, ecc. (Fig. 4);
- b) resistenza specifica all'effetto, ad es. con dimensionamento ad hoc di elementi portanti chiave per una data azione E, che influisce sulla probabilità del danno locale (diretto), attraverso la quale si riduce la vulnerabilità della struttura;
- c) percorsi alternativi per i carichi, elementi di sacrificio: dato un danno locale, influiscono sulla probabilità di rotture e collassi a catena "indiretti";
- d) misure per ridurre le conseguenze dei collassi, come compartimentazione, rifugi, ecc.

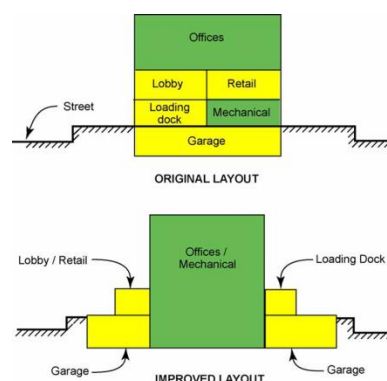


Fig. 4 – Esempio di migliore distribuzione di ambienti pericolosi

IL CODICE MODELLO *fib* MC 2010

Il *fib* Model Code for Concrete Structures 2010 (MC 2010) [4] si caratterizza per i seguenti aspetti, innovativi in buona misura rispetto al passato:

- sottolinea l'importanza primaria della "concezione progettuale" (conceptual design)
- privilegia la "trasparenza" dei modelli
- tratta i nuovi materiali e tecniche costruttive
- tiene conto del fattore tempo fra i parametri di progetto
- considera anche le costruzioni esistenti
- richiama la sostenibilità dello sviluppo
- è orientato al progetto riferito all'intero ciclo di vita dell'opera (life cycle design)

Il tutto è inquadrato nel "progetto basato sulle prestazioni" (performance based design), cui fanno riscontro i requisiti prestazionali, di esercizio, di sicurezza, di sostenibilità.

Tra i secondi, rientra la robustezza, riferita al mantenimento di una certa funzionalità in situazioni eccezionali, rivolta alla salvaguardia della vita e alla sicurezza delle operazioni, alla protezione di beni e dell'ambiente, in relazione alla possibilità di collasso del sistema o di suoi elementi pericolosi.

Per quanto detto, tutte le prestazioni sono considerate nell'arco temporale di vita dell'opera, comprese le fasi di esecuzione, con le probabilità di occorrenza delle corrispondenti azioni, e sono riferibili anche alle costruzioni esistenti.

Il MC 2010 tratta della verifica di robustezza, considerando concettualmente di operare sia sulla struttura (limitazione del danno) sia al di fuori di essa (prevenzione dell'azione, protezione della struttura, mitigazione delle conseguenze del danno). Richiama altresì le provvisori di ridondanza e duttilità. Viene indicato il criterio dei percorsi alternativi delle forze per trasferire i carichi a seguito della perdita di un elemento strutturale, con procedure di verifica più o meno semplificate, nonché il progetto "a capacità", per bypassare nei meccanismi di collasso gli elementi più fragili.

Per quanto riguarda gli urti, vengono trattati la determinazione dei carichi dinamici o quasi-statici equivalenti e i provvedimenti costruttivi atti a ridurne gli effetti.

Le prescrizioni rimangono soprattutto sul piano di criteri concettuali dei provvedimenti da adottare, senza molte indicazioni di dettaglio né verifiche analitiche.

È evidente, d'altronde, che la robustezza si riferisce al comportamento generale della struttura nei confronti di azioni di per sé non (poco) prevedibili e della più varia origine e che soprattutto una buona concezione della struttura, avendo in mente scenari di pericolo, può portare a un progetto adeguato, più che una serie di prescrizioni di dettaglio. Tanto più che il tema era stato trascurato dalla ricerca in passato. Nondimeno, i codici odierni, in primis il Codice Modello, cercano di trattare analiticamente i requisiti prestazionali e i corrispondenti criteri per soddisfarli.



Fig. 5 – collasso progressivo di balconi di una struttura monolitica

STRUTTURE PREFABBRICATE

Nell'ambito del calcestruzzo strutturale, la progettazione delle strutture prefabbricate, essendo queste composte di elementi eseguiti separatamente e poi assemblati in opera, ha necessariamente avuto presente il problema della robustezza, in particolare ai provvedimenti positivi per la continuità strutturale.

Infatti, esse sono state sin dall'inizio dotate di "incatenamenti" continui, attraverso gli elementi, lungo le tre dimensioni dell'intera struttura. Per esse è stato ideato il criterio della soppressione accidentale simulata di un elemento qualsiasi, con la ricerca di percorsi alternativi delle forze per scaricarsi a terra e con provvedimenti atti a trattenere gli elementi collassati, evitando azioni indirette del collasso parziale, come la caduta sugli altri.

In seguito, tali criteri sono stati estesi anche alle verifiche di strutture eseguite in opera, la cui monoliticità non assicura da effetti analoghi (come nell'esempio in fig. 5, dove il cedimento di un pilastro ha provocato il crollo di una colonna di balconi).

Il citato episodio di Ronan Point, su un edificio a pannelli portanti prefabbricati dotato di incatenamenti, mise in luce uno scenario in cui avviene, per uno scoppio di gas, l'espulsione

contestuale di due pannelli d'angolo (fig. 1), che non veniva all'epoca contemplato e che causò il collasso progressivo dei vani di quell'angolo su tutta l'altezza dell'edificio.

Scenario che venne subito dopo inserito nelle norme tecniche e che, in casi successivi, ebbe una risposta adeguata dalle strutture, senza propagazione del danno, in alcuni casi reali in cui si ripropose (Fig. 6).



Fig. 6 – edificio dopo espulsione di due pannelli portanti d'angolo per esplosione di gas: la struttura restante è integra

Il modello simulante la rimozione accidentale di elementi strutturali, con l'esame dei percorsi alternativi delle forze per scaricare a terra i pesi, è stato poi recepito anche nelle prescrizioni di progetto delle strutture eseguite in opera, nelle quali gli incatenamenti si rendono necessari a prescindere dalla continuità dei getti di calcestruzzo (fig. 5), non bastando il dimensionamento alle sollecitazioni usuali, in specie negli orizzontamenti in genere e nei loro collegamenti alle strutture controventanti.

Nei solai e nelle travi, infatti, opportune armature di incatenamento sono necessarie sia per la trasmissione degli sforzi di diaframma, sia al fine di trattenere gli elementi dal cadere dopo una possibile perdita di appoggio, realizzando membrane e catenarie, che richiedono importanti reazioni di trazione per l'equilibrio.

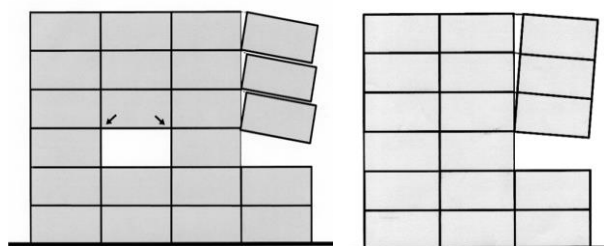


Fig. 7 – Meccanismi per percorsi alternativi di scarico a seguito di azione accidentale in strutture a pannelli portanti

Non sorprende quindi che per prima nel campo della prefabbricazione sia stata prodotta una Guida Pratica, che rappresenta un ulteriore passo nella linea del MC 2010, con l'implementazione pratica dei suoi concetti a un dato tipo di strutture. Guida che con questo articolo si vuole far conoscere.

LA GUIDA *fib*

Il documento (2012), intitolato **Progetto di Strutture Prefabbricate in Calcestruzzo Riguardo alle Azioni Eccezionali** [6], è stato redatto come *Guida Pratica* (Guide to Good Practice) dal Task Group coordinato da A. van Acker della Commissione *fib* "Prefabbricazione" e contiene provvedimenti progettuali, procedure di verifica e indicazioni di particolari costruttivi, in funzione del conferimento alla struttura di robustezza, nel significato sopra discusso.

La Guida è un volume di 70 pagine, molto agile e di facile consultazione. Le strutture considerate sono quelle per edifici di qualsiasi tipo, non di opere infrastrutturali di ingegneria civile. Esso è utile per trarne sia un'informazione d'insieme sia suggerimenti puntuali. Si compone di sei capitoli:

- Generalità
- Azioni e risposte strutturali
- Strategie per affrontare le azioni eccezionali
- Metodi di progetto per prevenire il collasso progressivo
- Particolari costruttivi
- Riferimenti

oltre a un esempio di calcolo.

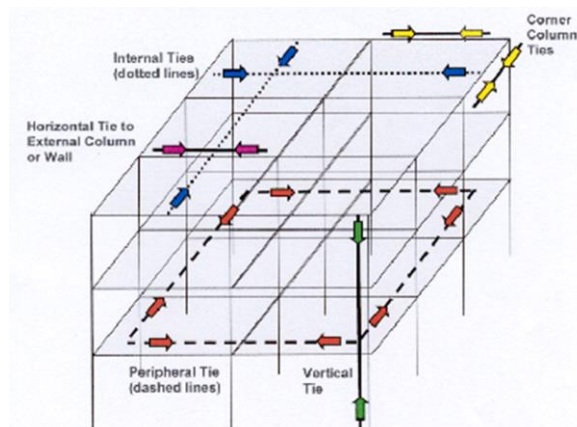


Fig. 8 – Schema degli incatenamenti minimi in una struttura

Il primo capitolo contiene l'inquadramento del problema, definizioni e confronti.

Il secondo tratta i tipi e l'importanza delle azioni eccezionali, lo sviluppo temporale delle pressioni esplosive; gli effetti dinamici, la loro influenza sui modi di rottura e gli effetti concatenati; le principali proprietà delle strutture ai fini della risposta dinamica.

Il terzo capitolo richiama le classificazioni degli edifici in

relazione alle conseguenze di un collasso; alla valutazione del rischio di sistema; alle misure distributive, protettive e riduttive nei confronti delle azioni eccezionali; alla concezione strutturale necessaria.

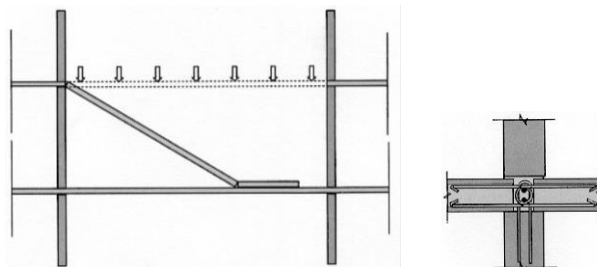


Fig. 9 – prevenzione di collasso locale (caduta di solaio o copertura) mediante adeguati collegamenti d'estremità

Il quarto capitolo è il più specifico e contiene informazioni per il progetto, anche numeriche e di dettaglio; in particolare, riguardo al contenimento sia del danno locale (es. Fig. 9) sia della propagazione del collasso progressivo delle strutture. Vi si distinguono le tre procedure tipiche:

- a) il metodo indiretto, con provvedimenti standard con dimensionamento indicato da documenti tecnici (deemed to satisfy), come ad esempio incatenamenti minimi (es. Fig. 8);
- b) il metodo dei percorsi alternativi di scarico (PAS), con cui si simula a turno la rimozione di un qualsiasi elemento e la struttura deve redistribuire il percorso delle forze fra gli elementi residui e gli incatenamenti, ad esempio fra mensole complesse di pannelli (fig. 7) oppure fra le altre maglie di telai (fig.13);

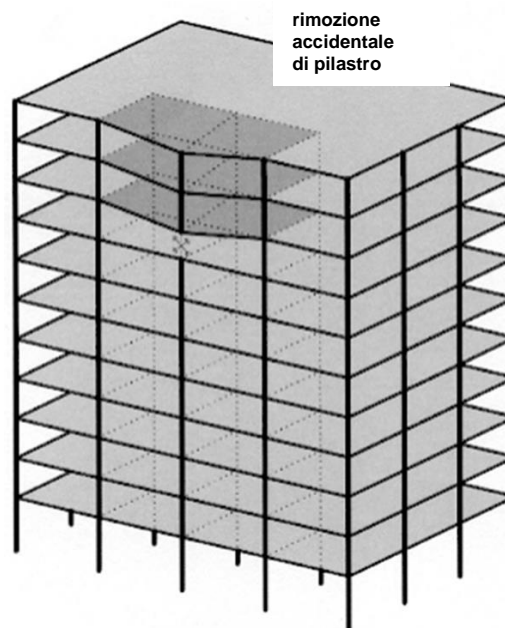


Fig. 10 – sviluppo di cateneria locale e percorso alternativo globale a seguito di espulsione di un pilastro

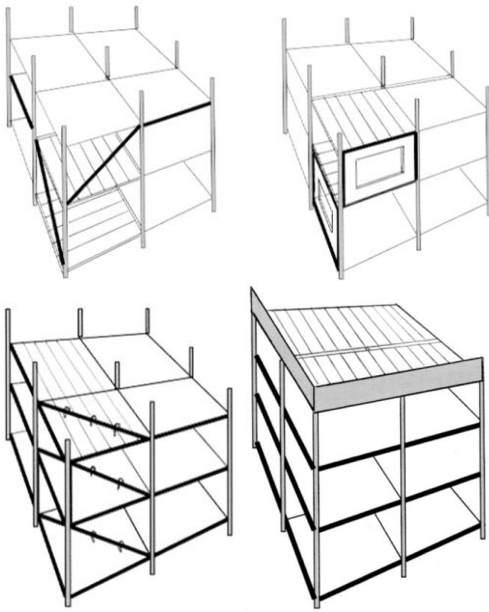


Fig. 11 – possibili soluzioni per rimozione angolo
 a: inserimento diagonali; b: inserimento pannelli;
 c: incatenamenti obliqui; d: trave di coronamento

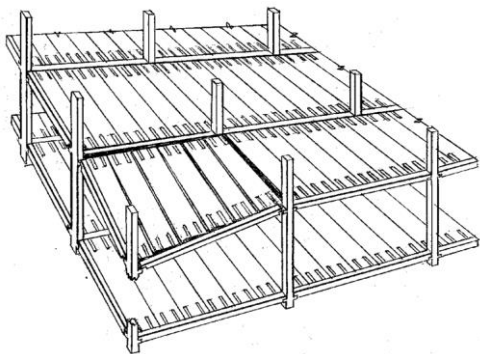
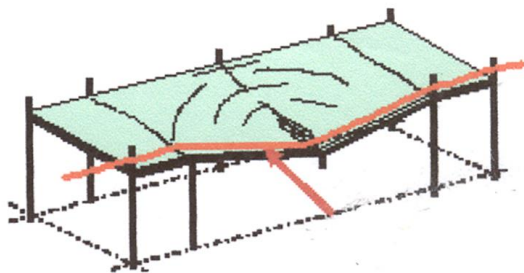


Fig. 12 – esempi di comportamento a membrana di solai e sviluppo di catenarie di bordo

L'affidamento a percorsi alternativi richiede anche una capacità locale di adattamento e di resistenza delle strutture piane (solai e coperture) in deformazioni a membrana (fig. 10 e 12).

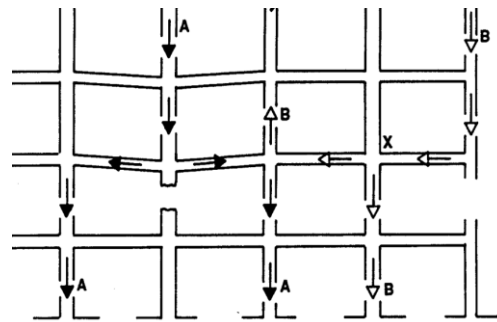


Fig.13 – schema di meccanismo di PAS per telai e conseguenti sforzi aggiuntivi: A compressione verticale / B trazione verticale per sospensione o reazione di mensola / C trazione orizzontale catenaria

- c) il metodo della resistenza specifica, con cui ogni elemento portante critico viene dotato di resistenza all'azione eccezionale considerata, ad es., pilastri resistenti all'urto di carrelli elevatori;

Vengono altresì indicate le combinazioni di azioni da considerare, con i relativi coefficienti parziali, i metodi di dimensionamento degli incatenamenti, la definizione degli elementi critici da rimuoversi per le verifiche di percorsi alternativi di scarico con i relativi meccanismi resistenti, le mensole complesse, gli sforzi a membrana, a catenaria, ..., infine i procedimenti analitici semplificati.

Il quinto capitolo esemplifica molti dettagli costruttivi per diversi tipi di elementi strutturali, specialmente con riguardo alla continuità delle armature di incatenamento, sia in senso longitudinale sia a formare nodo con quelle ortogonali, con rinvio anche ad un'altra precedente pubblicazione della Commissione stesse sui collegamenti in genere [5].

Infine, un esempio di calcolo pratico viene applicato al caso di un semplice edificio.

Riferimenti bibliografici

- [1] Comité Européen de Normalisation CEN (2002) – EN 1990 – Eurocode: Basis of Structural Design, Brussels
- [2] Comité Européen de Normalisation CEN (2006) – EN 1991 – Eurocode 1 – Actions on Structures – Part 1-7: General Actions – Accidental Actions, Brussels
- [3] COST TU0601 (2011) – Structural Robustness Design for Practising Engineers, T.D.G.Canisius ed., European Cooperation in Science and Technology, Brussels
- [4] Fédération Internationale du Béton (2013) – *fib* Model Code for Concrete Structures 2010 – Ernst & Sohn, Berlin
- [5] Fédération Internationale du Béton (2008) – Structural Connections for Precast Concrete Buildings – *fib* Bulletin 43, *fib* Lausanne
- [6] Fédération Internationale du Béton (2012) – Design of Precast Concrete Structures against Accidental Actions – *fib* Bulletin 63, *fib* Lausanne

