

On Shear and Torsion in R/C Structural Members in Fire

In Tema di Taglio e Torsione negli Elementi di C.A. Soggetti ad Incendio

Pietro G. Gambarova¹, Nataša Kalaba¹, Sergio Tattoni²

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

² *Department of Architecture, Built Environment and Construction Engineering, Politecnico di Milano, Milan, Italy*

Italian Concrete Days 2016 – Roma, 27-28 Ottobre 2016

ABSTRACT: Designing or checking shear- and torsion-sensitive R/C members in fire is still an open issue, because very rarely shear and torsion are the controlling internal forces, and there is no experimental evidence on shear- or torsion-induced failures in fire. A reasonable guide, however, comes from the available design models and from the knowledge of the shear-transfer mechanisms active in reinforced concrete. In this rather general paper, the design models well known in the calculations at the ultimate limit state in ordinary environmental conditions are recalled and their use in fire is discussed, with reference to both *solid* and *thin-walled open* sections. Both the *effective-section* method and the *zone* method are treated, as well as the fire-sensitivity of the various shear-transfer mechanisms active in shear and torsion. On the whole, what stands out clearly in fire is the increasing role played by the stirrups in shear and by the concrete struts in torsion, where concrete might become the weakest link of the resisting chain within the tube model.

La progettazione e la verifica al fuoco degli elementi in c.a. sensibili al taglio ed alla torsione è tuttora un problema aperto, in quanto molto raramente taglio e torsione controllano il comportamento strutturale, e pressochè nulla è l'evidenza sperimentale su collassi controllati dal taglio o dalla torsione in presenza di incendio. Indicazioni utili tuttavia vengono dai modelli di calcolo ben noti per le condizioni ambientali normali e dalla conoscenza dei meccanismi resistenti del calcestruzzo armato. In questo lavoro - piuttosto generale - i suddetti modelli vengono richiamati per taglio e torsione, ed il loro impiego in condizioni di incendio viene discusso per sezioni *compatte* ed *in parete sottile*, rispettivamente con i metodi *della sezione efficace* e *delle zone*. Viene anche trattata la sensibilità al fuoco dei vari meccanismi taglio-resistenti. I ruoli delle staffe nel caso di *taglio e fuoco* e dei puntoni compressi in calcestruzzo nel caso di *torsione e fuoco* sono critici, semprechè nel caso della torsione si faccia riferimento all'analogia del prisma cavo equivalente.

KEYWORDS/PAROLE CHIAVE: R/C structures; shear; torsion; fire; shear-transfer mechanisms / strutture in c.a.; taglio; torsione; incendio; meccanismi taglio-resistenti.

1 INTRODUZIONE

Taglio e torsione in quanto tali intervengono molto raramente nelle strutture in c.a. in quanto nella grande maggioranza dei casi altre – e più rilevanti – sollecitazioni (come la flessione e l'azione assiale) intervengono su porzioni estese della luce, mentre il puro taglio può al più riguardare sezioni singole e la torsione può non essere necessaria per assicurare l'equilibrio allo stato limite ultimo (ACI, 2008).

Il taglio tuttavia si presenta come sollecitazione prevalente in zone localizzate (*di discontinuità* o *D-zones*, Reineck, 2002; Reineck e Novak, 2010), mentre la torsione è spesso più un fattore critico per l'intera struttura che per ogni elemento strutturale.

Nel caso della torsione, il trascurare la sua presenza nell'usuale progettazione è giustificato da almeno due altre ragioni: (a) le strutture tradizionali in c.a. sono costituite da telai bidimensionali paralleli collegati da piastre unidirezionali o da sistemi di tra-

vi/travetti con soletta collaborante, che trasmettono alle travi di bordo taglio e flessione, ma scarsa o nulla torsione; e (b) l'iperstaticità della maggior parte delle strutture in c.a. fornisce altre modalità resistenti che – grazie ad un aggravio di taglio e flessione negli elementi strutturali – rendono la resistenza a torsione non necessaria per assicurare l'equilibrio (torsione *secondaria* o di *congruenza*, in opposizione alla torsione *primaria* o di *equilibrio* qualora il comportamento torsionale giochi un ruolo essenziale per assicurare l'equilibrio).

Un'altra e più generale ragione è che nel caso delle sollecitazioni assiali e flessionali la resistenza di un elemento è essenzialmente un problema sezionale (ad esempio, nel caso della flessione la resistenza è controllata da una o più sezioni fessurate in ciascuna delle quali si sviluppa un meccanismo resistente staticamente determinato – una coppia di forze), mentre nel caso delle sollecitazioni di taglio o di torsione la resistenza è controllata da vari mecca-

nismi, che si attivano su porzioni dell'elemento strutturale e che costituiscono sistemi staticamente indeterminati. Tali considerazioni mantengono la propria validità anche in condizioni di incendio, in quanto tutti i meccanismi resistenti attivi in condizioni ambientali normali continuano ad essere attivi anche durante l'esposizione all'alta temperatura.

In tale contesto, si procederà innanzi tutto a richiamare i modelli di calcolo presenti nella normativa del c.a. per la progettazione a taglio e a torsione, in modo da poterli aggiornare all'ambiente *fuoco/incendio* caratterizzato da *alta temperatura* e *gradienti termici*.

Nel caso di taglio, la validità del *metodo della sezione efficace* o *ridotta* viene discussa per le sezioni compatte (in cui il campo termico è – di norma – disomogeneo), mentre il *metodo delle zone* risulta necessario per le sezioni in parete sottile (in cui il campo termico tende ad essere piuttosto uniforme attraverso lo spessore).

Nel caso di torsione, *l'analogia del prisma cavo equivalente* (o del *tubo sottile*) fornisce un modello semplice ed efficace, sebbene venga trascurato il *nocciolo* o *nucleo* della sezione, il cui contributo alla resistenza torsionale tende ad aumentare con la temperatura, in quanto la parte centrale della sezione in molti casi si mantiene a lungo *fredda*, cioè all'interno dell'*isoterma di riferimento* (500°C). (In condizioni ambientali normali la quotaparte del momento torcente assorbita in regime elastico dal nocciolo/nucleo oscilla fra 5-10% e 10-15% a seconda delle dimensioni e della forma della sezione, e della posizione dell'armatura).

Per quanto riguarda infine i vari meccanismi di trasferimento del taglio (staffe, ingranamento delle particelle di aggregato, azione di spinotto ed effetto pettine), l'evoluzione dei loro ruoli con la temperatura è alquanto interessante, seppure complessivamente – a parte le staffe se presenti – si verifichi una generalizzata perdita di efficacia.

2 TAGLIO E TORSIONE NEGLI ELEMENTI DI C.A. ESPOSTI AL FUOCO

Il comportamento degli elementi strutturali in c.a. esposti all'alta temperatura od al fuoco è simile al comportamento in condizioni ambientali normali, in quanto il calcestruzzo continua a rimanere un materiale piuttosto fragile. (Ad alta temperatura la resistenza a trazione diminuisce in proporzione più di quella a compressione). Il calcestruzzo quindi cede in trazione fessurandosi, ed inizialmente la fessurazione è controllata dalle tensioni principali.

Per quanto riguarda invece l'armatura (supposta metallica) il suo comportamento tende a virare con la temperatura, da elasto-plasto-incrudente ad elasto-plastico o addirittura a rigido-plastico a temperature molto elevate (oltre 500°C), potendosi trascurare il ramo elastico rispetto all'esteso ramo plastico.

Le fessure tendono inizialmente a formarsi a 45° rispetto all'asse dell'elemento strutturale, se taglio o torsione controllano il regime statico. Nel caso del taglio tuttavia, le fessure tendono a divenire verticali verso l'intradosso (la cui superficie è scarica) in zona tesa, mentre tendono ad appiattirsi in prossimità dell'asse neutro, tanto più quanto più si avvicinano alle fibre compresse.

Nel caso del taglio, la formazione di fessure inclinate sull'asse di circa 40-45°, tipiche degli elementi in c.a. dotati di armatura trasversale a taglio, suggeriscono un comportamento a *traliccio bidimensionale* (traliccio di Morsch-Ritter, Figura 1a, sinistra), mentre la formazione di fessure piuttosto appiattite sull'asse, tipiche degli elementi in c.a. privi di armatura trasversale, suggeriscono un comportamento ad *arco-tirante* (Figura 1a, destra).

Nel caso di torsione, solo gli elementi rinforzati longitudinalmente e trasversalmente sono efficaci; le fessure tendono a svilupparsi secondo spirali inclinate di circa 45° (se è assente l'azione assiale di compressione), poste nello strato più superficiale, con la formazione di un traliccio spaziale (Figura 1b).

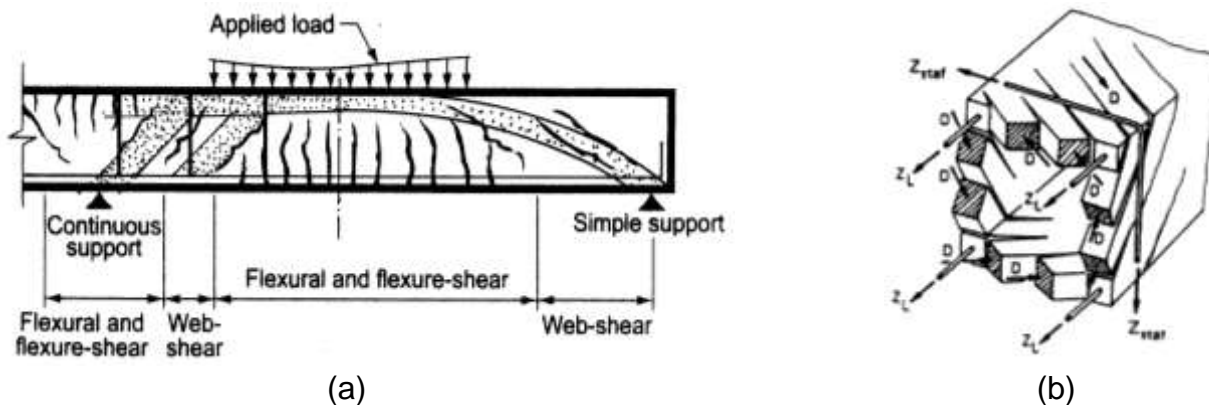


Figure 1. R/C beam (a) in shear, working as a truss system consisting of struts and ties (left) or as an arch-and-tie system (right), in members provided with/devoid of transverse reinforcement, respectively; and (b) in torsion, working as a 3D truss system. Figura 1. Trave in c.a. soggetta a taglio (a) con formazione di un traliccio a puntoni e tiranti (a sinistra) ovvero di un sistema ad arco e catena (a destra), rispettivamente in elementi con/senza armatura trasversale; e soggetta a torsione (b), con formazione di un traliccio tridimensionale. Fig.1a: adapted from/adattata da ACI 318M-08. Fig.1b: from/da Fuchssteiner, see/si veda Leonhardt in "Spannbeton für die Praxis", Ernst Verlag, Berlin (1973).

3 MODELLI DI CALCOLO A TAGLIO ED A TORSIONE

Gli stessi modelli impiegati per taglio e torsione nell'ordinaria progettazione a temperatura ambiente possono in via di principio essere impiegati anche nella progettazione al fuoco, purchè le proprietà meccaniche dei materiali e/o le caratteristiche geometriche delle sezioni vengano aggiornate sulla base dell'alta temperatura raggiunta durante l'incendio.

Va tuttavia detto che i modelli introdotti a temperatura ambiente non sono stati mai validati in condizioni di incendio, come chiaramente riconosce l'Annesso D di EC2 (2004), che recita: "...i collassi dovuti a taglio e a torsione sono molto rari I metodi di calcolo ... non sono completamente verificati (per le condizioni di incendio) .." e ciò nonostante il numero non piccolo di lavori dedicati al comportamento strutturale al fuoco (si vedano – ad esempio – Kordina, 1979; Hertz, 1985; Ellingwood & Lin, 1991; Felicetti & Gambarova, 1999; Kodur & Hantinger, 2011; Smith et al., 2011).

Nel caso del taglio, può essere usato il metodo molto semplice della *sezione ridotta* o *sezione efficace*, che si basa sulle seguenti ipotesi:

- nessun danneggiamento nel calcestruzzo e nell'armatura che - ad una assegnata durata di incendio - siano all'interno o sul contorno dell'*isoterma di riferimento* (500° per il calcestruzzo ordinario); le resistenze sono quindi le stesse che a temperatura ambiente;
- totale danneggiamento nel calcestruzzo posto all'esterno dell'*isoterma di riferimento* (*nessuna resistenza residua*);
- in ciascuna delle barre d'armatura esterne all'*isoterma di riferimento*, la resistenza è quella corrispondente alla propria temperatura, così come risulta dall'analisi termica della sezione.

Questo metodo è stato inizialmente introdotto per la flessione in presenza di incendio standard, ma è stato poi verificato – ed accettato – anche per la presso/tensoflessione. Le sue ipotesi peraltro non sono in contrasto con il comportamento a taglio.

Un metodo concettualmente simile, ma più preciso è quello *delle zone*, che si basa sulla suddivisione in strisce della sezione (in genere parallelamente alle isoterme e quindi alle superfici riscaldate più estese), permettendo di valutare una *spessore efficace* (mai maggiore di quello geometrico); ogni zona è a temperatura uniforme (pari alla sua temperatura media), sia per il calcestruzzo che per l'armatura.

Nelle verifiche al fuoco di sezioni soggette a taglio, tutti e due i metodi possono essere usati, purchè la temperatura nelle staffe sia valutata nel punto di *massima sollecitazione* (*punto di riferimento P*, Fig. 2a). Questo è un aspetto chiave in quanto la temperatura nelle staffe non è uniforme, tendendo a decrescere verso la parte alta della sezione, di modo che la temperatura media nelle staffe è inferiore a quella del circostante calcestruzzo (Tattoni, 2005; Campanale, 2005). In EN 1992-1-2 si suggerisce di fare riferimento al punto P posto sulla corda a-a (Fig. 2a) fra l'area efficace a trazione ed il resto della sezione (EC2, 2005). Sempre secondo EN 1992-1-2 la posizione di P dipende dalla posizione delle staffe e delle fessure immaginate a 45° . La temperatura delle staffe è comunque poco variabile, essendo le staffe parallele alla superficie esposta al fuoco.

Per quanto riguarda le barre longitudinali, le proprietà meccaniche dipendono dalla loro temperatura, che coincide con quella del calcestruzzo adiacente, così come fornita dall'analisi termica.

Nel caso della torsione, il concetto di sezione ridotta od efficace confluisce nel concetto di *prisma cavo equivalente*, ove le caratteristiche meccaniche dei due materiali – calcestruzzo ed armatura - vanno aggiornate in base alle rispettive temperature medie. Barre longitudinali, staffe e puntoni di calcestruzzo contribuiscono alla resistenza a taglio. Il punto di riferimento P (Figura 2b) può essere scelto a metà dei lati del prisma (corda a-a).

Per la valutazione della capacità portante a taglio e a torsione, sono riportate le equazioni fornite da EC2 (2005) per $\gamma_c = \gamma_s = 1$; l'*isoterma di riferimento* (se richiesta) è quella di 500° ; non sono riportate tutte le limitazioni nell'uso delle equazioni.

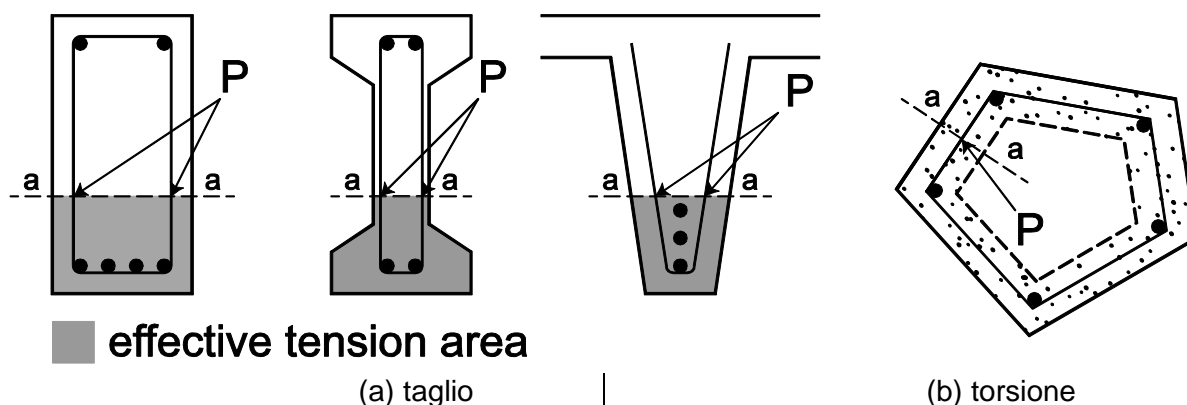


Figure 2. Identification of the reference temperature/Figura 2. Identificazione della temperatura di riferimento.

3.1 Taglio in sezioni compatte senza staffe

$$V_{Rc,fire} = [C_{R,c} k (100 \rho_1^* f_{ck}^{20})^{1/3}] b_{w,fire} d \quad (1)$$

ove $k = 1 + (200/d)^{1/2} \leq 2$; $C_{R,c} = 0.18$; $b_{w,fire} =$ larghezza ridotta della sezione efficace; $\rho_1^* = \rho_1 (f_{ctk}^T/f_{ck}^{20})$.

3.2 Taglio in sezioni compatte con staffe

$$V_{R,fire} = V_{R_s,fire} = (A_{sw}/s) z f_{ywk}^T \quad (2a)$$

$$\leq V_{Rc,fire} = 1/2 \alpha_{cw} b_{w,fire} z v f_{ck}^{20} \quad (2b)$$

dove $v = 0.6 (1 - f_{ck}^{20}/250)$; $\alpha_{cw} = 1$ (non è applicata alcuna azione assiale di compressione); $A_{sw} =$ sezione di ogni staffa x no. dei bracci (si ipotizza che non ci siano bracci *interni* alla sezione); $s =$ passo delle staffe; $z =$ braccio della coppia interna ($= 0.9 d$).

3.3 Torsione in sezioni compatte con armatura longitudinale e trasversale ($\theta = 45^\circ$)

$$T_{R,fire} = \text{Min} (T_{Rl,fire}, T_{Rw,fire}, T_{Rc,fire}) \quad (3)$$

dove: $T_{Rl,fire} =$ capacità resistente fornita dall'armatura longitudinale $= 2 A_k (A_{sl}/u_k) f_{ylk}^T$ (3a)

$T_{Rw,fire} =$ capacità resistente fornita dall'armatura trasversale $= 2 A_k (A_{sw}/s) f_{ywk}^T$ (3b)

$T_{Rc,fire} =$ capacità resistente fornita dai puntoni inclinati di calcestruzzo $= v_{fire} \alpha_{cw} A_k t_{eff} f_{ck}^{T^*}$ (3c)

$A_k, u_k =$ area involupata e lunghezza della linea media della sezione del prisma cavo equivalente;

$A_{sw} =$ sezione di un singolo braccio di staffa x numero dei bracci (all'interno del prisma cavo);

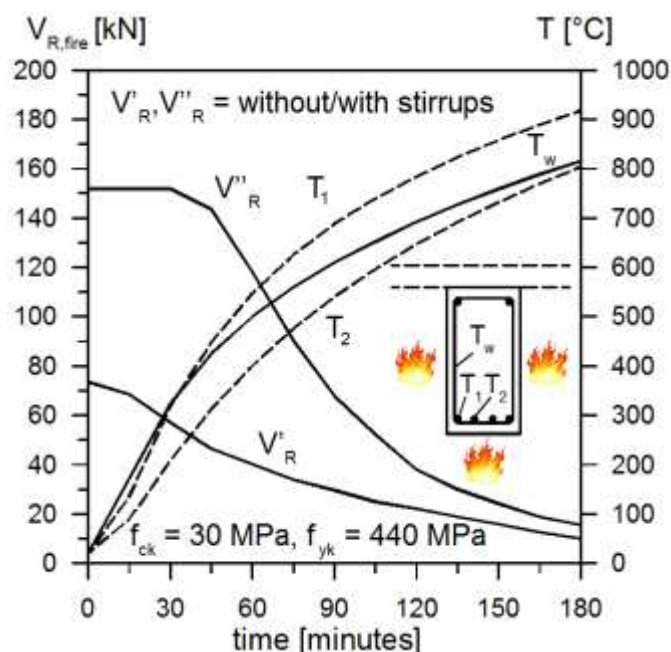


Figure 3. Rectangular R/C section in shear: bearing capacity without and with stirrups (V'_R and V''_R) respectively, and temperature in the tension bars (T_1 and T_2) and in the stirrups (T_w). Figura 3. Sezione rettangolare in c.a. soggetta a taglio: capacità resistente rispettivamente senza e con staffe (V'_R e V''_R), e temperature nelle barre tese (T_1 e T_2) e nelle staffe (T_w); net cover of stirrups and bars/copriferro netto di staffe e barre: 21 and 34 mm.

t_{eff} e $T^* =$ spessore efficace e temperatura media del prisma cavo;

$f_{ck}/f_{ylk}/f_{ywk} =$ resistenze caratteristiche del calcestruzzo/dell'armatura longitudinale/dell'armatura trasversale; tutte le barre longitudinali sono considerate alla stessa temperatura, e così le staffe. Per l'armatura contenuta nel prisma cavo (Equazioni 3a e 3b), gli eventuali strati di armatura longitudinale sono stati considerati alla stessa temperatura, così come le staffe più/meno prossime alla superficie riscaldata.

3.4 Esempio di sezione compatta senza staffe

E' stata considerata una sezione rettangolare esposta su tre lati all'incendio standard, inizialmente senza armatura trasversale, usando l'Eq.1 (Figura 3).

Le dimensioni della sezione e l'armatura sono: $b \times h = 200 \times 400$ mm; 4 barre $\varnothing 16$ mm all'intradosso, e 2 barre $\varnothing 14$ mm all'estradosso; la percentuale geometrica delle barre tese è $\rho_1 = 1.21\%$.

Come atteso, in assenza di armatura trasversale il taglio resistente ultimo V_R' (Figura 3) è controllato dal decadimento del calcestruzzo. Sempre in Figura 3 sono diagrammate le temperature delle barre longitudinali d'angolo ed intermedie, e delle staffe.

3.5 Esempio di sezione compatta con staffe

E' stata considerata la stessa sezione del punto precedente, ma ora con staffe a due bracci $\varnothing 10$ mm e passo 150 mm; la percentuale geometrica delle staffe è $\rho_w = 0.52\%$.

Il taglio resistente ultimo V_R'' (Figura 3, Eq.2a) è controllato dal decadimento dell'acciaio delle staffe. All'inizio dell'incendio ($t = 0$) il taglio resistente ultimo con staffe è circa il doppio di quello senza staffe, mentre - ad esempio - alla durata di incendio di 3h il primo si riduce ad essere solo del 50% superiore al secondo. E' chiaro che il vantaggio maggiore si ottiene con staffe parzialmente all'interno della sezione, come nel caso di tre o quattro braccia, essendo il nucleo della sezione *freddo*.

3.6 Sezioni in parete sottile

Una trave precompressa a fili aderenti, indirettamente appoggiata agli estremi (tramite mensoline) e con sezione a V inversa è stata verificata all'incendio standard per valutarne la resistenza (in termini temporali) e le modalità di collasso (Figura 4a), si veda Bamonte et al. (2011).

Le principali caratteristiche geometriche sono: luce di semplice appoggio = 12 m; larghezza ed altezza della sezione = 2.4 e 1.6 m; spessore ed angolo delle due anime inclinate rispetto al piano orizzontale = 90 mm e 51° . La precompressione è stata realizzata con 26 trefoli da 7 fili l'uno (diametro 12.5 mm); le anime sono armate con doppio strato di barre longitudinali e da staffe, per cui di fatto sono presenti due reti di armatura in ciascuna anima.

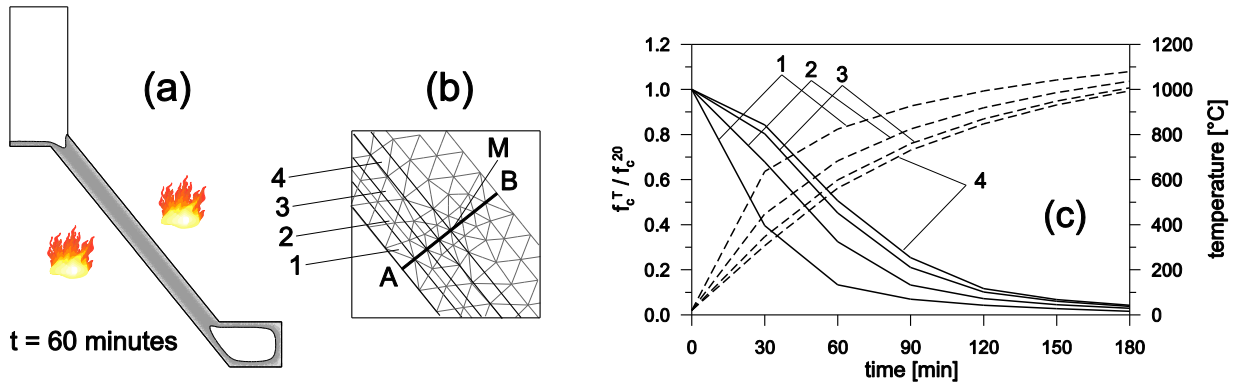


Figure 4. Half of the inverted-V section with the isotherm 500°C at 60 minutes of standard fire (a); subdivision into 4 + 4 zones of the inclined webs (b); and normalized diagrams of the compressive strength (full curves) and of the temperature (dashed curves) in the 4 + 4 zones (c).
 Figura 4. Metà della sezione a V inverso con isoterma 500°C a 60 minuti di incendio standard (a); suddivisione in 4 + 4 zone delle anime (b); e diagrammi normalizzati del decadimento della resistenza a compressione (a tratto continuo) e della temperatura (a tratteggio) nelle 4 + 4 zone (c).

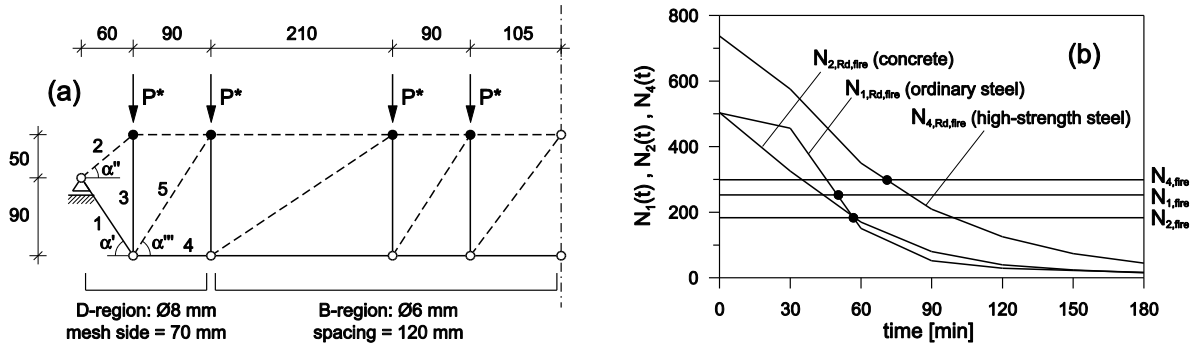


Figure 5. Strut-and-tie system used in modelling each inclined web (a); and decrease of the bearing capacity (b) in the main members of the *disturbed zone* (D-zone, Strut 2; Ties 1 and 4; the straight lines stand for the design values in fire).
 Figura 5. Traliccio a puntone e tiranti adottato nella modellazione delle anime inclinate (a); e decadimento della capacità portante (b) degli elementi principali della *zona disturbata* (Zona-D, Puntone 2; Tiranti 1 and 4), con i valori di progetto al fuoco. $P^* = 82$ kN (own-weight included/peso proprio incluso).

A causa del piccolo spessore delle anime (il cui campo termico tende all'uniformità durante l'incendio) non è applicabile il metodo della sezione ridotta od efficace (che oltre 500°C diverrebbe pressochè nulla, Figura 4a), ma occorre applicare il metodo delle zone (Figura 4b: suddivisione dello spessore in 8 strati simmetrici rispetto al piano medio).

La resistenza normalizzata del cls e la temperatura media nei dei 4 + 4 strati sono diagrammate in Figura 4c. L'armatura ed il calcestruzzo sono modellati con

un sistema di tiranti e puntone (Fig. 5a). La diminuzione della resistenza negli elementi principali (Puntone 2, e Tiranti 1 e 4) è diagrammata in Fig 5b. La resistenza al fuoco è risultata prossima a 50 minuti nelle regioni di estremità (Regioni D, Figura 5b), ed il collasso è risultato controllato dal Tirante 1.

3.7 Torsione in sezioni compatte

E' stata considerata la sezione-tipo (200 x 400 mm, Figura 6) di una trave armata longitudinalmente e

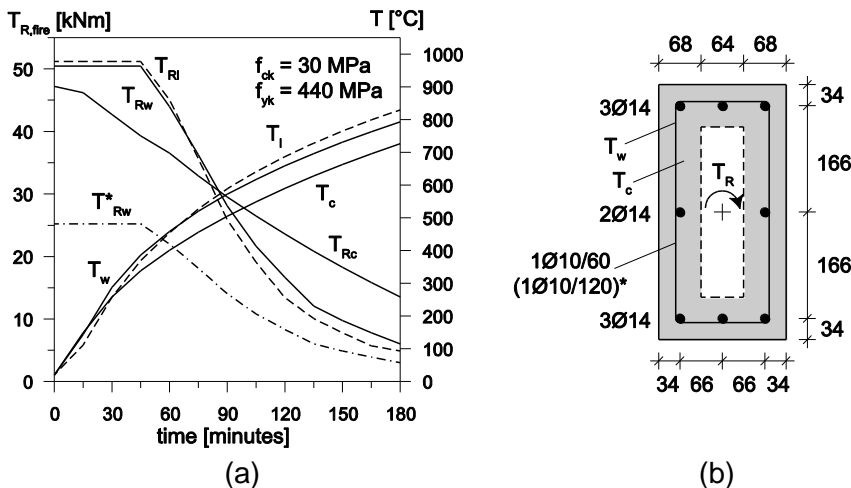


Figure 6. Rectangular R/C section in torsion: resisting moments T_R , and temperatures T .
 Figura 6. Sezione rettangolare in c.a. soggetta a torsione: momenti resistenti T_R , e temperature T ; l, w (w^*) = longitudinal, transverse reinforcement /armatura longitudinale e trasversale; c = concrete strut/puntone in calcestruzzo; net cover of stirrups and bars/copriferro netto di staffe e barre = 22 and 34 mm.

trasversalmente, con forma rettangolare ed esposta al fuoco lungo i 4 lati. Nell'analisi è stata utilizzata l'Eq.3, applicandola al prisma cavo equivalente di spessore 68 mm; le staffe a due bracci sono state introdotte con due diverse percentuali geometriche (1Ø10 mm/60 mm con $\rho_w = 1.92\%$, oppure 1Ø10 mm/120 mm con $\rho_w^* = 0.96\%$). Nel primo caso l'armatura a torsione è bilanciata, in quanto la percentuale dell'armatura longitudinale totale ($\rho_l = 1.95\%$), è pressochè uguale a quella della staffatura ($\rho_w = 1.92\%$), situazione difficilmente riscontrabile nella realtà in quanto esige staffatura molto forte. Si noti che nel calcolo di ρ_l , ρ_w e ρ_w^* è stato fatto riferimento alla geometria del solo prisma cavo.

I momenti torcenti resistenti sviluppati dalle staffe (T_{Rw} e T_{Rw}^*), dall'armatura longitudinale (T_{Rl}) e dai puntoni in calcestruzzo - inclinati a 45° - (T_{Rc}) sono diagrammati in Figura 6 in funzione della durata dell'incendio standard. Sono pure diagrammate le temperature medie nelle staffe, nelle barre e nei puntoni di calcestruzzo, rispettivamente T_w , T_l and T_c .

Si noti che (a) in presenza della staffatura più forte la perdita di capacità portante è controllata dal calcestruzzo (T_{Rc}), ma solo per durata di incendio inferiore a 80-85 minuti, e che (b) in presenza della staffatura più debole la perdita di capacità portante è sempre controllata dalle staffe (T_{Rw}^*). La vicinanza delle temperature nelle staffe e nelle barre longitudinali durante l'incendio, unita all'armatura bilanciata a 20°C , fanno sì che i momenti resistenti T_{Rw} e T_{Rl} siano sempre molto prossimi.

4 MECCANISMI TAGLIO-RESISTENTI

Per comprendere appieno il decadimento meccanico in presenza di incendio degli elementi in c.a. soggetti a taglio o a torsione, occorre esaminare l'evoluzione con la temperatura dei vari meccanismi che contribuiscono al trasferimento delle tensioni tangenziali,

siano esse dovute al taglio oppure alla torsione. Tale esame è tanto più necessario in quanto i suddetti meccanismi sono introdotti nelle equazioni progettuali in modo alquanto indiretto e forfettario.

Si consideri il caso di Figura 7, dove viene mostrata la sezione della trave a I studiata da Di Prisco e Gambarova (1995). La scrittura delle condizioni di equilibrio per il singolo puntone inclinato e di congruenza per l'insieme dei puntoni, in presenza di tutti i meccanismi taglio-resistenti, e l'introduzione delle leggi costitutive dei singoli meccanismi ha permesso di scrivere un sistema di equazioni, la cui soluzione dà informazioni sul ruolo di ciascun meccanismo taglio-resistente. In particolare, due cinematici sono stati introdotti per gli spostamenti relativi fra le facce di ogni fessura, in quanto si è ritenuto che le fessure riguardassero solo l'anima nel c.a.p. (Figura 8a) ed invece l'anima e la soletta inferiore nel c.a. (Figura 8b). I vari meccanismi taglio-resistenti presi in considerazione sono stati l'ingranamento delle particelle di aggregato lungo le fessure - *aggregate interlock* - (INT), l'azione di spinotto dell'armatura longitudinale - *dowel action* - (DWL), il taglio assorbito in zona compressa associato al comportamento a flessione dei puntoni diagonali (BND), le staffe (STR). Si noti che nel caso delle staffe è stato tenuto in conto l'effetto irrigidente indotto dall'aderenza con il calcestruzzo (*tension stiffening*) e che l'azione di spinotto è stata ignorata nel c.a.p., non essendo la soletta inferiore fessurata.

Estendendo le formulazioni analitiche dei singoli meccanismi all'alta temperatura (Campi e Spirio, 2012), i loro contributi resistenti normalizzati possono essere valutati in funzione della durata dell'incendio standard ISO 834 (Figure 7a,b); l'analisi termica è stata eseguita mutuando da EC 2 le caratteristiche termiche del calcestruzzo e dell'acciaio.

Sebbene la sezione scelta sia puramente indicativa, risulta chiaro - e di validità piuttosto generale -

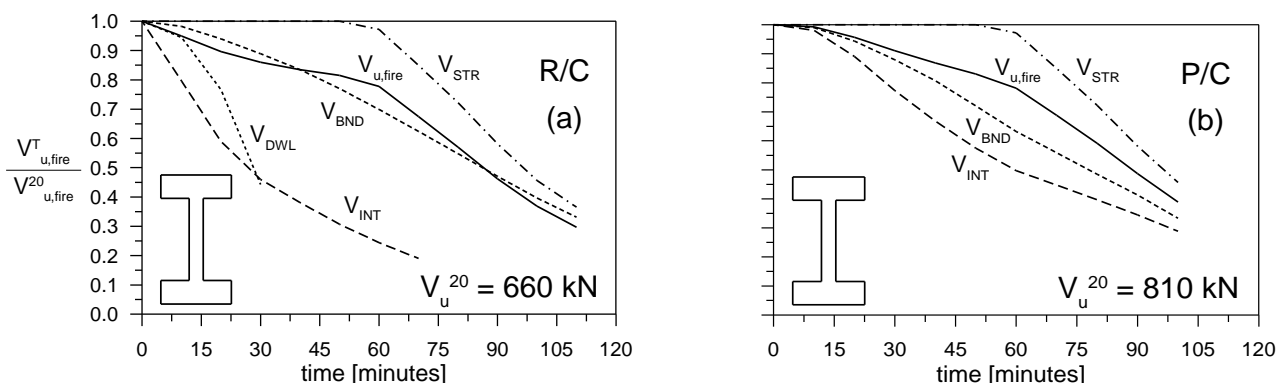


Figure 7. Example of a shear-sensitive I section : diagrams of the normalized shear-resisting contributions (a,b).

Figura 7. Esempio di sezione a I sensibile al taglio: diagrammi normalizzati dei contributi taglio-resistenti (a,b).

Section depth/altezza della sezione $h = 1100$ mm; chords/solette $a \times b = 600 \times 200$ mm; web thickness/spessore dell'anima $t = 120$ mm. In Fig.7a: crack angle to the axis/inclinazione delle fessure rispetto all'asse $\varphi_{cr} = 40^\circ$; $f_{ck} = 30$ MPa; $f_{yk} = 440$ MPa; steel ratio/percentuale d'armatura $\rho_l = 2\%$; bar diameter/diametro delle barre $\varnothing_1 = 18$ mm; stirrup diameter and spacing/diametro e passo delle staffe $\varnothing_{st}, s = 8, 100$ mm; maximum aggregate size/dimensione massima dell'aggregato $d_a = 20$ mm. In Fig.7b: $\varphi_{cr} = 30^\circ$; $f_{ck} = 45$ MPa; $f_{yk} = 440$ MPa; $\varnothing_{st}, s = 8, 150$ mm; $d_a = 20$ mm).

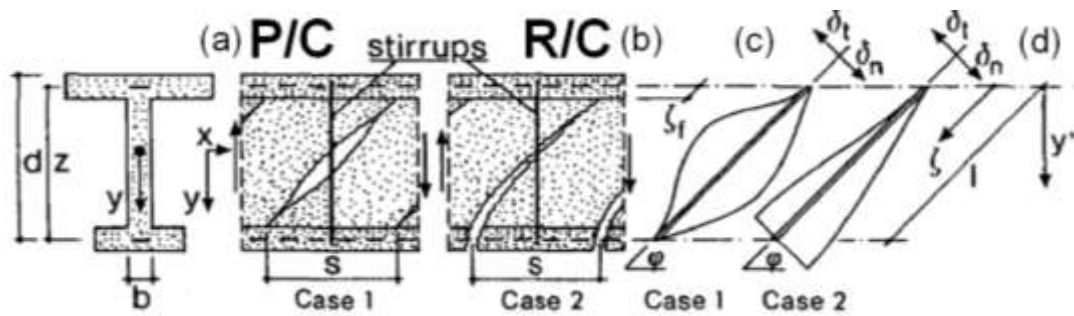


Figure 8. Modelling of web cracking in P/C (a) and in R/C (b), with the laws adopted to describe interface kinematics (c,d), where δ_t = slip and δ_n = crack opening. Figura 8. Schematizzazione delle fessure d'anima nei casi di c.a.p. (a) e di c.a. (b), con le funzioni assunte per la cinematica di interfaccia (c,d), ove δ_t = scorrimento e δ_n = apertura di fessura. See/si veda Di Prisco and/e Gambarova (1995).

come i due contributi maggiori siano quelli dovuti alle staffe ($V_{STR} = 70-75\%$ della capacità ultima a taglio, a temperatura ambiente) e dell'ingranamento delle particelle di aggregato ($V_{INT} = 20-25\%$), Figure 7a,b. Il primo contributo non risente del fuoco fintanto che la temperatura delle barre metalliche rimane sotto i 400°C (staffe lavorate a caldo), e poi inizia a diminuire. Il secondo incomincia a diminuire fin dalle prime fasi dell'incendio, in quanto la temperatura tende a modificare la cinematica degli spostamenti interfacciali a vantaggio dell'apertura della fessura rispetto allo scorrimento (Figure 8c,d); inoltre, la perdita di importanza dell'ingranamento è minore nel c.a.p. in quanto più controllata è l'evoluzione delle fessure.

Per quanto riguarda l'azione di spinotto e la zona compressa (il cui contributo è legato al comportamento a flessione dei puntoni inclinati), i loro contributi a taglio – già piccoli a temperatura ambiente (attorno al 2% nel primo caso ed al 3% nel secondo caso) - diminuiscono con la durata dell'incendio, molto rapidamente il primo (V_{DWL} , con perdita totale dopo 30 minuti – Figura 7a - a causa del danneggiamento del copriferro), e in modo graduale – e quasi lineare - il secondo (V_{BND}), in quanto i puntoni di calcestruzzo si danneggiano gradualmente, dall'esterno all'interno.

5 CONCLUSIONS/CONCLUSIONI

The mathematical models introduced in the design of R/C and P/C structural members in shear and torsion are still valid - from a mechanical point of view – at high temperature and in fire, since they are justified by concrete cracking, which is facilitated at high temperature by the high thermal sensitivity of concrete strength in tension. Furthermore, the models contain a number of parameters which can be easily adapted to high temperature, even if the validation of the models as such still needs further systematic experimental campaigns (to say the least).

In fire conditions:

- in shear, the method based on the *reduced* or *effective* section is suitable for solid sections, where the thermal field is fairly variable and the refer-

ence temperature of 500°C is a sort of mean temperature in the heated concrete.

- still in shear, the more general *zone method* covers also those cases, in which the thermal field is fairly uniform, as in thin-walled members.
- among the shear-resisting mechanisms, the contributions of the stirrups (in transversely-reinforced members) and of the inclined struts (forming a sort of *comb* in transversely-unreinforced members) regularly decrease under increasing temperature and with the fire duration. (It is worth noting, however, that the *comb effect* plays a minor role at any temperature). On the contrary, the contribution of aggregate interlock quickly decreases because of crack opening, and the contribution of dowel action decreases even more quickly because of the thermo-mechanical damage in the concrete cover. On the whole, the stirrups and aggregate interlock still play a major role in fire, but the latter tends to lose most of the relevance it has at room temperature.
- in torsion, the model based on the *hollow equivalent prism* is still mechanically justified in fire for solid sections, even if it underestimates the bearing capacity of the section by neglecting the contribution of the *core*, which remains fairly cold even in prolonged fires.

Once more, shear and torsion in R/C and P/C members appear to be worth of further systematic investigations at high temperature and in fire, to have reliable test data to refine the design models.

I modelli di calcolo ben noti per la progettazione degli elementi strutturali in c.a. e c.a.p. rimangono meccanicamente validi nelle condizioni di alta temperatura ed incendio. Tali modelli sono, infatti, legati al comportamento fessurativo del calcestruzzo, che si accentua ad alta temperatura per la grande sensibilità al calore della resistenza a trazione. Inoltre, i parametri che appaiono nei modelli possono essere abbastanza facilmente adattati all'alta temperatura, anche se la loro validazione in tali condizioni attende tuttora di essere affrontata in modo sistematico (per usare un eufemismo).

In particolare, in presenza di incendio:

- nel caso di taglio, il metodo della *sezione ridotta* od *efficace* va bene per le sezioni compatte, dove il campo termico è alquanto variabile e la temperatura di riferimento (500°C) è una sorta di temperatura media del calcestruzzo più o meno riscaldato.
- ancora nel caso di taglio, il metodo delle *zone* è più generale e quindi copre anche i casi in cui il campo termico del calcestruzzo tenda ad essere alquanto uniforme, come è tipico degli elementi strutturali in parete sottile.
- fra i meccanismi taglio-resistenti, i contributi delle staffe (per gli elementi armati al taglio) e dei puntoni inclinati (*pettine*, per gli elementi non armati a taglio) diminuiscono regolarmente con la temperatura e con la durata dell'incendio, il primo a causa del decadimento dell'acciaio ed il secondo mantenendo comunque valori piuttosto bassi. Al contrario, il contributo dell'ingranamento degli aggregati diminuisce rapidamente a causa dell'aprirsi delle fessure, ed il contributo dell'azione di spinotto diminuisce ancor più rapidamente, a causa del danneggiamento del copriferro; in complesso, anche in presenza di incendio le staffe e l'ingranamento degli aggregati rimangono i meccanismi taglio-resistenti principali, ma il secondo tende a perdere ad alta temperatura gran parte dell'importanza che ha a temperatura ambiente.
- nel caso di torsione, il modello basato sull'ipotesi del *prisma cavo equivalente* mantiene la propria giustificazione meccanica nelle sezioni *solide* esposte all'incendio, anche se tende a sottostimare la capacità resistente della sezione trascurando il contributo del *nucleo*. Tale contributo – pur trascurabile nelle normali condizioni ambientali – aumenta di importanza con il prolungarsi dell'incendio in quando il nucleo tende a rimanere *freddo* e quindi a mantenere intatte le proprie proprietà meccaniche.

Si può concludere una volta di più che taglio e torsione nel c.a. e c.a.p. sono meritevoli di ulteriori indagini sperimentali ad alta temperatura ed in condizioni di incendio, in modo da avere informazioni attendibili per l'affinamento dei modelli di calcolo.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro trae spunto da un seminario tenuto dal primo autore sul tema "Shear and Torsion Resistance of R/C Structures in Fire" organizzato presso il Politecnico di Milano in data 17 Giugno 2015, nell'ambito della Giornata "Shear Resistance of R/C, P/C and FRC Members", coordinata dal Prof. Marco Di Prisco. Alcuni dei temi sono stati riproposti - in modo più approfondito ed in collaborazione con il Dr. Patrick Bamonte (che gli autori qui desiderano ringraziare) - alla Nona Conferenza Internazionale "Structures in Fire – SIF 2016" tenutasi a

Princeton (NJ, USA) in data 8-10 Giugno 2016 ("Shear and Torsion in R/C Structural Members in Fire", Atti, pp.37-44).

BIBLIOGRAFIA

- ACI 318M-08 and Commentary (2008). *Building Code Requirements for Structural Concrete*, Capitolo 11 "Shear and Torsion".
- Bamonte, P., Felicetti, R., & Gambarova, P.G. 2011. On Fire Safety of Thin-Walled P/C Beams Subjected to Cracking and Corrosion. *ACI – SP 279*: 137-169.
- Campanale, F. 2005. On the Shear Resistance of R/C Members in Fire Based on Available Experimental and Numerical Results" (in Italian). *Tesi. Relatore Prof. Sergio Tattoni, Politecnico di Milano, Aprile 2005*: 175 pp.
- Campi, G.A., & Spirio, D.A. 2012. On the Shear Behavior of R/C and P/C Thin-Walled Members Exposed to High Temperature" (in Italian). *Tesi, Relatore Dr. Patrick Bamonte, Politecnico di Milano, Dicembre 2012*: 170 pp.
- Di Prisco, M., & Gambarova, P.G. 1995. Comprehensive Model for Study of Shear in Thin-Webbed RC and PC Beams. *ASCE – J Structural Engineering*, V.121 (12): 1822-1831.
- Ellingwood, B., & Lin, T.D. 1991. Flexure and Shear Behavior of Concrete Beams during Fires. *ASCE – Journal of Structural Engineering*, V.117, No.2: 440-458.
- Eurocode 2 (EN 1992-1-2, 2005). *Design of concrete structures – Part 1-2: General rules – Structural fire design*, CEN, Bruxelles, Belgio.
- Felicetti, R., & Gambarova, P.G. 1999. Residual Capacity of HSC Thermally-Damaged Deep Beams. *ASCE – Journal of Structural Engineering*, V.125, No.3: 319-327.
- Hertz, K. 1985. Analyses of PC Structures Exposed to Fire. *Report No.174, Institute of Building Design, Technical University of Denmark, Lyngby (DK)*: 152 pp.
- Kodur, V.K.T., & Hatinger, N.R. 2011. A Performance-Based Approach for Evaluating Fire Resistance of Prestressed-Concrete Double T-Beams. *Journal of Fire Protection Engineering*, V.8: 185-222
- Kordina, K. 1979. Über das Brandverhalten von Bauteilen und Bauwerken (On Fire Behavior of Structural Members and Constructions). *Rhein.-Westfäl. Akademie derer Wissenschaften, Report No. 281*.
- Reineck, K.H. (Editor) 2002. Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models". *ACI SP-208*, 242 pp.
- Reineck, K.H. & Novak, L.C. (Editors, 2010). Further Examples for the Design of Structural Concrete with Strut-and-Tie Models, *ACI SP-273*, 288 pp.
- Smith, H.K.M., Reid, E.R.E., Beatty, A.A., Stratford, T.J., & Bisby, L.A. 2011. Shear Strength of Concrete at Elevated Temperature. *Workshop on "Application of Structural Fire Engineering"*, Prague (Czech republic): 133-138.
- Tattoni, S. 2005. Fire Resistance of Precast Elements: Research Activity within the Italian National Project ULISSE". *Proc. Int. Workshop on "Fire Design of Concrete Structures: What's Now? Whats Next?"*, Milan (Italy), 2-4 Dec. 2004: 307-310.