

STUDIO SPERIMENTALE SUL COMPORTAMENTO TERMICO E ASSIALE DI COLONNE RCFST ESPOSTE AL FUOCO

MAURIZIO ACITO, *Politecnico di Milano*

SUMMARY

In this paper the results of a series of full-scale tests on Reinforced Concrete-Filled Steel Tubes (RCFST) columns, exposed to the standard fire, are described.

The specimens had the same section as the actual columns, but their length was limited to a fraction of the actual length because of some size limitations of the press and of the furnace.

Testing in fire was requested by the designers of the structural members of a new hospital in Bergamo.

1. INTRODUZIONE

L'impiego di colonne in calcestruzzo semplice o armato, incamiciate con tubo metallico, indicate con gli acronimi più usati in letteratura di CFST e/o RCSST (Concrete Filled Steel Tube o Reinforced Concrete Filled Steel Tube) è, ormai da anni, diffuso in molti paesi (Australia, Cina, USA).

Nel nostro paese, invece, solo di recente, si sono visti degli episodi di costruzioni, che utilizzano le colonne incamiciate come sistema costruttivo. Infatti, anche se ancora in numero limitato, importanti episodi sono, ad esempio, la costruzione del nuovo Ospedale di Bergamo e del nuovo Ospedale di Vimercate, per i quali, la richiesta, da parte del committente, di tempi di esecuzione molto contenuti, hanno contribuito ad indirizzare la soluzione costruttiva con colonne incamiciate, capaci di concretizzare, sia un efficiente sistema strutturale, che un significativo risparmio economico, laddove, come generalmente si verifica per queste grandi opere pubbliche, è richiesta una ottimizzazione dei tempi di costruzione.

Con riferimento all'efficienza strutturale delle colonne incamiciate, in letteratura sono presenti diverse memorie che evidenziano i diversi vantaggi del loro impiego strutturale. In particolare, sia nei primi lavori degli anni '60 e '70, come quelli di Garder e Jacobson (1967), Furlong (1967); Knowles and Park (1969); Furlong (1974) [1-4], che in quelli più recenti, come quelli di Lin (1988), Ge and Usami (1992) e (1994); Boyd, Cofer e McLean (1995), Bradford (1996); Shams e Saadeghvaziri (1997), Schneider (1998), Zhang e

Shahrooz (1999), Huang et al. (2002) [5-13], viene evidenziato, sperimentalmente e/o teoricamente, il ruolo che il calcestruzzo interno esplica nei riguardi della stabilità del tubo metallico e il ruolo che il tubo esplica, nei riguardi del calcestruzzo, per effetto del confinamento laterale.

Peraltro, la più recente possibilità di impiego dei calcestruzzi di nuova generazione HPC e HSC ha determinato, a partire dall'inizio degli anni '90, molti studi, che hanno riguardato colonne CFST, riempite con tali calcestruzzi, talvolta anche additivati con fibre di diverso tipo. I lavori, che riguardano tali studi, sono, ad esempio, quelli di Prion et al. (1994), Sagupta et al. (1995), O'Sea et al. (1997) [14-16], Yu et Al. (2008) [17]. Anche in questo caso, tali studi ben evidenziano i vantaggi di maggiore capacità portante e di maggiore rigidità e duttilità, delle colonne CFST/RCFST, rispetto alle soluzioni tradizionali.

Come detto, a questi vantaggi statici della fase di servizio, si possono aggiungere importanti vantaggi della fase costruttiva, dati dalla possibilità di utilizzare il tubo metallico come cassaforma, in grado di far fronte ai carichi della fase costruttiva. Tale circostanza permette una più rapida costruzione, realizzando conseguenti economie, rispetto ai sistemi tradizionali. Tutti questi vantaggi spiegano il sempre più diffuso impiego delle colonne CFST/RCFST, per le strutture di edifici alti e di edifici caratterizzati da grandi luci, come ad esempio, gli edifici industriali, i parcheggi, gli uffici e gli edifici del terziario, in generale.

Peraltro, con l'aumentata sensibilizzazione, nei riguardi degli eventi eccezionali, come gli incendi, accanto agli studi di caratterizzazione meccanica del sistema delle colonne CFST/RCSST, sempre più spesso, sono stati affrontati studi teorici e/o sperimentali per la caratterizzazione termica e meccanica, nei riguardi dell'azione, data dall'esposizione al fuoco.

In particolare, fra i primi studi sulla resistenza al fuoco delle colonne CFST, vi sono quelli svolti in Europa, da Kordina and Klingsch (1983) [18] e da Grimault (1982) [19]. In questi studi viene sperimentalmente evidenziata la maggiore resistenza al fuoco delle colonne CFST, nei riguardi delle colonne convenzionali in acciaio, sia nel caso che la camicia non presenti protezioni al fuoco, che, ovviamente, nel caso vi sia una protezione della camicia.

Successivamente, all'inizio degli anni '90, anche in Giappone - dove le condizioni di severità sismica del sito ne limitavano la diffusione, data la iniziale difficoltà di realizzare dei nodi travicolonne resistenti alle azioni sismiche - sono stati svolti studi sulla resistenza al fuoco di colonne CFST, come, ad esempio, gli studi di Okada et al. (1994) [20], dove la sperimentazione riguarda colonne con camicia metallica con acciaio resistente

al fuoco, sottoposte a full-scale fire tests, in presenza di carico.

Un notevole contributo nella comprensione del comportamento e nella definizione di procedure di calcolo della resistenza al fuoco di colonne CFST, proviene dagli studi dei ricercatori del National Research Council of Canada.

In questi studi, sono stati investigati i comportamenti di CFST con diversi tipi di calcestruzzo di riempimento, quali, ad esempio, i calcestruzzi di tipo normali e SCC, con resistenza normale o alta e con rinforzo o meno, mediante barre di armatura e/o fibre metalliche. In particolare, importanti sono i lavori di Lie (1994) [21], Lie e Irwing (1995) [22]. Il primo, relativo a studi sulle colonne a sezione circolare classica, il secondo su colonne a sezione rettangolare. In entrambi i lavori, sulla base dei risultati sperimentali, vengono forniti dei modelli per il calcolo della resistenza al fuoco delle colonne. Ancora di interesse, sono i lavori sperimentali di Kodur e Lie (1996) [23, 24], di Kodur (1999) [25], sulle colonne CFST che, in questo caso, gli autori indicano con l'acronimo HSS (Hollow Structural Steel), e riempite di calcestruzzo di resistenza ordinaria, corredati, anche in questo caso, da proposte operative per la valutazione della resistenza di fuoco.

Molto importanti, sono i lavori sperimentali volti alla comprensione del comportamento al fuoco delle colonne riempite con calcestruzzo ad alta resistenza. Infatti, la possibilità di utilizzare calcestruzzi ad alta resistenza (HSC), in alternativa ai calcestruzzi tradizionali, ha richiesto lo sviluppo di nuovi studi sperimentali, poiché il comportamento del calcestruzzo ad alta resistenza, a temperature elevate, è significativamente diverso da quello del calcestruzzo tradizionale. In tale ambito, risultano di interesse i lavori sperimentali di Kudor (1998) [26], di Kodur e Lie (1996) [27], e di Kudor e Sultan (2003) [28].

In particolare, nel primo lavoro è riportato lo studio sperimentale su colonne HSS, riempite con calcestruzzi ad alta resistenza, poste a confronto con colonne con calcestruzzo ordinario e a colonne con calcestruzzo ad alta resistenza, additivato con fibre metalliche.

In ambito della modellazione analitica e della ricerca sperimentali, sono da considerare i recenti lavori di L. Han (2001) [29], di L. Han et Al. 2005 [30]. In particolare, nel primo lavoro è riportato un confronto fra colonne con sezione circolare e quelle con sezione quadrata, esposte alle alte temperature. Il confronto viene sviluppato attraverso la modellazione non lineare, per la valutazione del comportamento a compressione assiale. Nel secondo lavoro, gli autori riportano i risultati di una serie di test a compressione e a flessione di CFST, esposte a incendio standard.

In tutti questi lavori sperimentali, che riguardano il comportamento delle colonne incamiciate al fuoco, pur essendo presenti numerose sperimentazioni di colonne con dimensioni in scala reale, riferite ad un ampio range di snellezze geometriche (L/D), non si sono trovati degli studi sperimentali, in scala al vero, di colonne incamiciate di grandi dimensioni, in cui viene caratterizzato il comportamento a compressione assiale nella fase "a caldo" e nella fase "a freddo".

Lo studio sperimentale, presentato in questa memoria, rappresenta uno dei pochi studi, se non l'unico, in cui viene affrontata la caratterizzazione del comportamento sperimentale al fuoco, di colonne che presentano una sezione di circa 46 cm, sia dal lato meccanico, con prove a compressione assiale delle colonne di tipo residuale "a freddo" (cold test) e di tipo "a caldo" (hot test), sia dal lato del comportamento termico, con la mappatura tridimensionale delle temperature, determinate dall'azione termica.

In particolare, nello studio con le prove di tipo residuale "a freddo", si è inteso caratterizzare il comportamento a compressione delle colonne, dopo che, le stesse, sono state sottoposte ad azione termica, così da evidenziare le risorse di sicurezza, offerte dopo l'esposizione al fuoco, la cui valutazione, come è noto, è essenziale nei problemi di valutazione della sicurezza, nel riuso di strutture interessate da incendio. Mentre, con la prova "a caldo", si è inteso caratterizzare il comportamento delle colonne, quando, nelle condizioni di servizio, vengono esposte all'azione del fuoco, così da evidenziare le risorse di sicurezza, offerte dalle colonne durante la fase di servizio.

A tale scopo, sono state predisposte quattro prove, del tipo residuale "a freddo" ed una prova "a caldo", con pre-carico.

Le prove, condotte con l'azione termica, sono state eseguite con riscaldamento, secondo la curva standard della Circolare Ministeriale n. 91 (CM 91) [31] - sostanzialmente coincidente con la curva ISO 834 [32] - prodotta da combustione a gas, al Centro Sperimentale Italiano di Bollate (CSI), e secondo una curva non standard, prodotta con forni elettrici, al Dipartimento di Ingegneria Strutturale (DIS).

Con riferimento ai risultati delle prove eseguite descritte in questa sede, in [33] sono riportati degli interessanti confronti sperimentale-analitico, sia sul comportamento meccanico a compressione "a caldo" e "a freddo, sia con riferimento al comportamento termico.

Tali confronti sono basati su validi modelli di calcolo, capaci di riprodurre gli aspetti del comportamento dei materiali calcestruzzo e acciaio, in funzione della storia termica a cui sono stati interessati, che permettono di valutare con sufficiente attendibilità le capacità resistenti di elementi strut-

turali esposti al fuoco. Tali modelli presentano, in generale, una certa complessità operativa (si veda [34]), ma i risultati delle valutazioni analitiche, sono ben più coerenti con la sperimentazione, di quelli ottenibili con modelli semplificati come, ad esempio, il modello di calcolo plastico, il quale, come si evidenzia in [33], sovrastima in modo eccessivo, la capacità resistente “a caldo” e residuale “a freddo” delle colonne.

2 PROGRAMMA SPERIMENTALE E CARATTERISTICHE DEI COLONNE

2.1 Descrizione del programma di prove

Come si è detto, lo studio sperimentale considera colonne (RCFST), con dimensioni al vero, con sezione di diametro circa 46 cm e di altezza limitata a 160 cm; questo, sia per limitare le difficoltà di ingombro delle colonne, che per escludere gli effetti del secondo ordine. Le colonne sono state ottenute con la predisposizione di una gabbia metallica, all'interno di un tubo di acciaio, successivamente riempito con un getto di calcestruzzo (Figg. 1, 2 e 3). Si tratta, quindi, di colonne con armatura interna, sia perché le colonne studiate sono la riproposizione esatta di quelle utilizzate nelle strutture del nuovo Ospedale, sia in ragione delle migliori capacità resistenti delle colonne RCFST, rispetto alle colonne CFST semplici, senza armature interne. Infatti, anche limitandosi ai soli aspetti di resistenza al fuoco, la presenza delle barre di armature risulta di notevole importanza statica, in quanto le armature possono surrogare la camicia metallica, recuperando parte del carico sulla camicia, che se non protetta, con l'aumento della sua temperatura, perde rapidamente la sua capacità portante. Peraltro, il trasferimento del carico dalla camicia esterna al calcestruzzo e alle barre interne, unito alla contemporanea perdita della eventuale capacità di confinamento in condizioni di rottura per il calcestruzzo interno, da parte della camicia metallica, con l'aumento della sua temperatura, rende opportuna la presenza di staffe di confinamento per le barre interne, disposte secondo le classiche regole delle strutture in calcestruzzo armato.

Il programma sperimentale, come detto, considera sia gli aspetti del comportamento termico, che gli aspetti del comportamento meccanico a compressione assiale. In particolare, lo studio degli aspetti termici è articolato con delle prove al fuoco, con mappatura delle temperature durante la fase di esposizione all'incendio. A tale scopo, sono state predisposte sei colonne, di cui due prive di camicia, ma con caratteristiche geometriche e meccaniche, uguali alla parte interna in calcestruzzo armato, delle altre 4 colonne con camicia. Tutte le colonne sono state attrezzate con termo-

coppie. Quattro colonne, compresa una di quelle senza camicia metallica, sono state esposte all'incendio standard, in un forno provvisto di bruciatori a gas del CSI di Bollate. La durata dell'esposizione al fuoco è stata di 180 minuti.

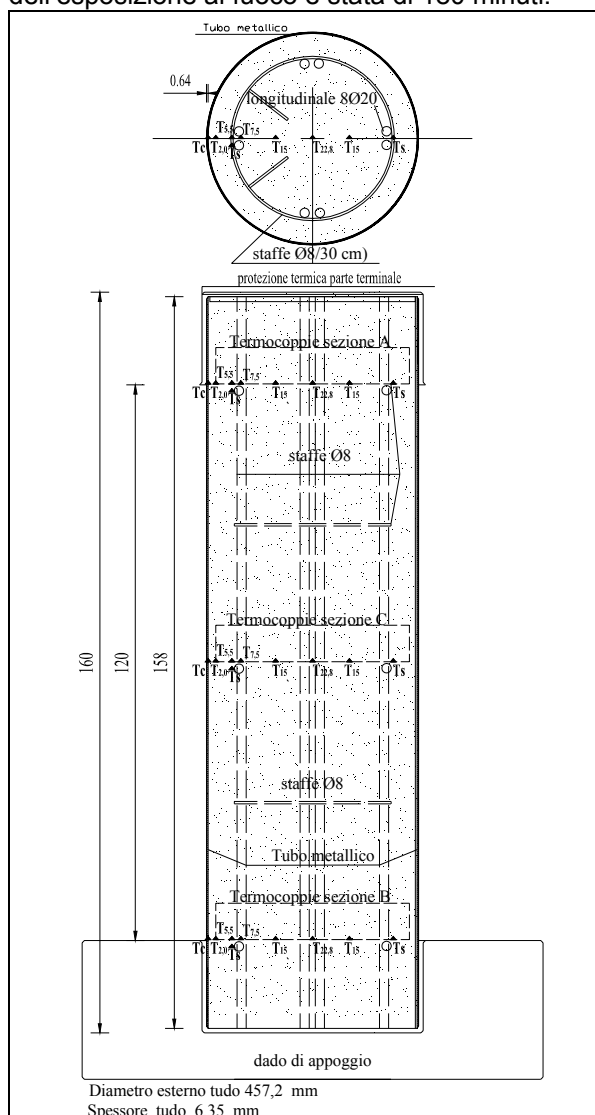


Figura 1: Sezioni di monitoraggio della temperatura nella prova CSI e geometria della colonna.

La prova al fuoco, eseguita sulle colonne (denominate colonne I, II, III e IV, di cui la IV senza camicia), prevedeva il riscaldamento assial - simmetrico, su un'altezza di 120 cm (con le parti terminali di altezza circa 20 cm, protette termicamente).

Nella Tabella 1, è sinteticamente riportato il quadro delle prove sperimentali eseguite.

Colonna	Prova incendio CSI con mappatura	Prova resist.za residua	Prova resist.za a caldo con mappatura termica
Colonna I	si	si	
Colonna II	si	si	
Colonna III	si	si	
Colonna IV	si	si	
Colonna V			si

Tabella 1: Tabella riassuntiva delle prove.



Figura 2: Posizionamento termocoppie presso il cantiere del nuovo ospedale di Bergamo



Figura 3: Fase di getto dei colonne presso il cantiere del nuovo ospedale di Bergamo

Dopo il raffreddamento, le colonne sono state sottoposte a prova a compressione, presso il Laboratorio Prove Materiali del DIS - Politecnico di Milano, per valutarne il comportamento residuale "a freddo", in modo da quantificare il decadimento meccanico, indotto dal danneggiamento termico.

Il programma delle prove è stato completato con l'esecuzione di una prova "a caldo", sulla colonna V, incamicciata, in condizioni di pre-carico. Il carico applicato durante la prova, è stato pari a quello assunto nella condizione di servizio con incendio di progetto (2200 kN), utilizzato per le verifiche della struttura reale. Applicato il carico, la colonna è stata poi riscaldata con forni elettrici a pannelli, il tutto sempre presso il Laboratorio del DIS del Politecnico di Milano. In questo caso, la necessità di applicare un carico, prima dell'attivazione del fuoco, ha richiesto la predisposizione di un sistema di riscaldamento con pannelli elettrici, compatibile con la geometria della pressa utilizzata per l'applicazione del carico.

La camera del forno è stata realizzata ad hoc, con caratteristiche d'isolamento termico, tali da evitare il riscaldamento della pressa, durante il riscaldamento della colonna. Peraltro, per verificare che, durante la prova al fuoco, non si determinasse un riscaldamento rilevante delle parti della pressa più vicine ai pannelli, è stato disposto un monitoraggio in tempo reale, con termo camera ad infrarossi. Questa prova, eseguita presso il Laboratorio Prove Materiali del DIS – pur non consentendo il riscaldamento con curva tipo standard, data la minore potenza termica dei forni a pannelli elettrici, rispetto al forno con bruciatori a gas del

CSI - ha comunque permesso di riprodurre, nella sezione di mezzeria della colonna, delle isoterme simili a quelle delle sezioni di mezzeria delle colonne incamicciate, registrate dopo 120 minuti di esposizione al fuoco standard, presso il CSI di Bollate. In tal modo, si è potuto simulare, in modo indiretto, seppure in modo ben approssimato, il comportamento sperimentale "a caldo" di una colonna, riscaldata per 120 minuti con incendio Standard.

In particolare, per poter realizzare un campo termico, simile a quello registrato dopo 120 minuti, nelle sezioni di mezzeria delle colonne soggette ad incendio standard al CSI, la colonna (n. V), pre-caricata, è stata riscaldata con il forno elettrico per circa 5 ore. Successivamente, la colonna è stata scaricata, per essere poi ricaricata fino a rottura (rottura "a caldo"), con una pressa oleodinamica da 5000 kN.

2.2 Preparazione delle colonne e loro caratteristiche

Le colonne sono state attrezzate con termocoppie in tre sezioni significative (Figg. 1 e 2), di cui la prima, posta in corrispondenza della mezzeria (sez. C) della colonna e le altre due poste a 60 cm dalla sezione di mezzeria, rispettivamente verso le estremità inferiore (sez. B) e superiore (Sez. A). In ciascuna sezione, sono state collocate 9 termocoppie, disposte secondo lo schema di figura 1, dove: T_c=termocoppia posta sulla camicia metallica; T_s= termocoppia posta in corrispondenza della staffa; e dove T con pedice numerico = termocoppia posta alla distanza in cm, dalla superficie esterna, pari al numero posto a pedice (ad esempio, T_{2,0}= termocoppia posta a 2,0 cm dalla superficie esterna). Per tenere in posizione le termocoppie, si è fatto ricorso ad elementi prefabbricati in calcestruzzo ("biscottini"), realizzati con calcestruzzo analogo a quello delle colonne, a cui sono state preventivamente ancorate le termocoppie (Fig. 2).

2.2.1 Materiali e geometria dei colonne

I materiali utilizzati, per il confezionamento delle colonne, del tutto corrispondenti a quelli impiegati nelle colonne al vero, presentano le caratteristiche meccaniche di Tabella 2.

Calcestruzzo	Acciaio camicia	Acciaio barre
Classe C35/45	Tipo Fe430 B (f _{yk} =275 MPa) (f _{ym} =298 MPa)	Tipo FeB44k (f _{yk} =430 MPa) (f _{ym} =452 MPa)

Tabella 2: Proprietà dei materiali acciaio

Nella tabella 2, i valori medi delle resistenze allo snervamento degli acciai sono stati stimati dai valori caratteristici, assumendo una distribuzione normale e un coefficiente di variazione del 4-5%.

Le colonne presentano una armatura longitudinale, costituita da 8 barre ad aderenza migliorata di diametro 20 mm e staffe circolari di diametro 8 mm, disposte con passo 30 cm, secondo lo schema di figura 1, dove sono anche riportate le caratteristiche geometriche delle colonne. La geometria del tubo risulta essere caratterizzata da un diametro esterno di 457,2 mm (18 ") con spessore di 6,35 mm (Fig. 1).

Per quanto riguarda il calcestruzzo, la resistenza cubica media (a 28 gg.), misurata su 4 cubi di 15 cm di lato, è risultata pari a circa 45 MPa ($f_{cm}=37,35$ MPa). La massa volumica media dei cubi è risultata di circa 2300 kg/m³.

2.2.2 Preparazione dei colonne

La preparazione delle colonne è avvenuta presso il cantiere del nuovo Ospedale di Bergamo, in modo da garantire che le colonne studiate avessero materiali con le stesse proprietà termomeccaniche delle strutture al vero. Il getto delle colonne è stato eseguito direttamente dalla betoniera. La stagionatura è avvenuta al coperto, ma in contatto con il normale ambiente esterno.

Nella precedente figura 3, è mostrata la fase conclusiva del getto delle colonne.

3. MAPPATURA TERMICA IN PRESENZA DI INCENDIO STANDARD (ISO 834)

3.1 Descrizione della prova d'incendio

La prova di esposizione al fuoco delle colonne I, II, III e IV, in camera di combustione a gas, si è svolta presso il laboratorio del CSI di Bollate. Le colonne sono state poste all'interno del forno, che è stato riscaldato, in modo da ricreare una curva di riscaldamento temperatura-tempo del tipo CM 91, con temperature leggermente superiori alla curva ISO 834 (Fig. 4).

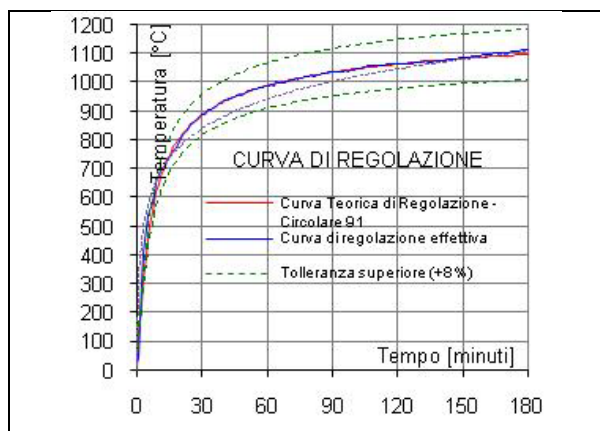


Figura 4: Curva temperatura – tempo ISO 834, circolare 91 e curva di regolazione utilizzata nella prova (CSI).

La figura 4 evidenzia come la curva effettiva segua talmente bene la curva teorica della CM 91, da risultare ad essa praticamente sovrapposta, e come le due curve standard, CM 91 e ISO 834, siano praticamente molto simili.

3.2 Risultati delle prove d'incendio

Le prove d'incendio si sono concluse dopo 180 minuti di riscaldamento, con curva termica standard. Successivamente, dopo il raffreddamento a camera chiusa, il forno è stato aperto (Fig. 5) e le colonne con camicia si sono presentate apparentemente modificate solo nella colorazione, mentre, la colonna senza camicia si è presentata con il ricoprimento di calcestruzzo totalmente "sbriciolato".



Figura 5: Effetto del riscaldamento delle colonne nel forno del CSI, dopo la rimozione del soffitto.

Per quanto riguarda i risultati del monitoraggio delle temperature, nelle tre sezioni di ciascuna colonna, di seguito, sono riportati i grafici delle temperature medie, relative alle sole colonne con camicia (figure 6-8).

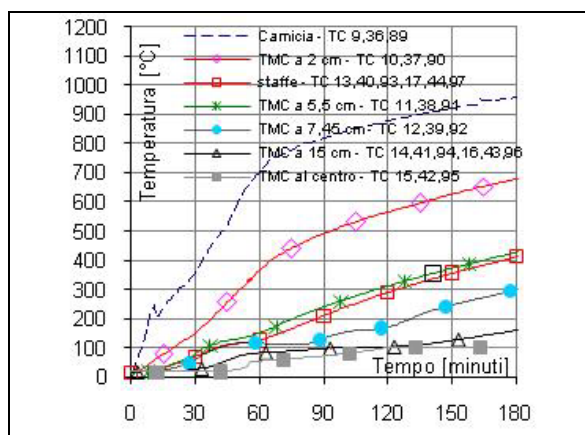


Figura 6: Andamento temporale delle temperature medie, misurate nella Sezione A delle colonne incamiciate (sezione in alto).

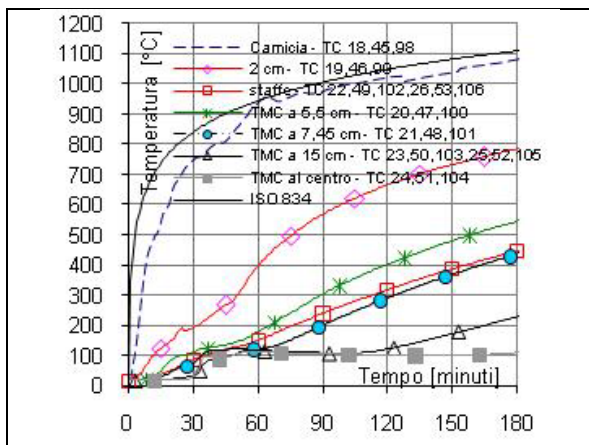


Figura 7: Andamento temporale delle temperature medie, misurate nella Sezione C delle colonne incamiciate (sezione al centro).

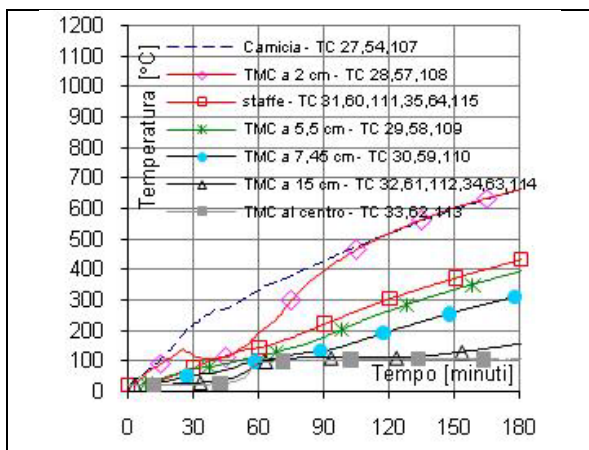


Figura 8: Andamento temporale delle temperature medie misurate nella Sezione B delle colonne incamiciate (sezione in basso).

3.3 Considerazioni sui risultati delle prove d'incendio

La distribuzione spaziale delle temperature, evidenziata con i diagrammi delle mappature termiche, relative alle tre sezioni delle colonne con camicia, consente di osservare che la sezione in alto (sez. A), presenta una distribuzione delle temperature simile a quella registrate nella sezione C. Mentre, la sezione in basso (sez. B), presenta una distribuzione con temperature con valori minori di quelle della sezione C.

Tale circostanza è presumibilmente legata a diverse evenienze. La prima, potrebbe essere la circostanza che il calcestruzzo del dado rappresenti una protezione più efficace dell'estremità inferiore della lana di ceramica, posta all'estremità superiore (Fig. 5). La seconda, potrebbe essere che la temperatura nel forno sia maggiore nella parte alta in prossimità dei bruciatori. La terza, potrebbe essere che la camicia, per effetto del distacco dal calcestruzzo interno, e di cui si parlerà

nel prosieguo, favorisca un più importante contributo convettivo, verso la parte alta della colonna, con una sorta di effetto "camino/pentola a pressione" esplicito per i vapori di acqua provenienti dal calcestruzzo.

Peraltro, quest'ultima evenienza si è potuta osservare nella prova con riscaldamento con forni elettrici eseguita al DIS, con i vapori che fuoriuscivano in pressione dai fori "finestra" superiori, eseguiti sulla camicia metallica, per il posizionamento delle basi di lettura di spostamento tipo L_i , e di cui si dirà nel prosieguo.

Per quanto riguarda la distribuzione delle temperature sulle sezioni, per una migliore lettura delle mappature termiche, in figura 9 si riportano i diagrammi che evidenziano il profilo delle temperature, lungo il diametro della sezione su cui sono posizionate le termocoppie, in funzione del tempo di esposizione considerato.

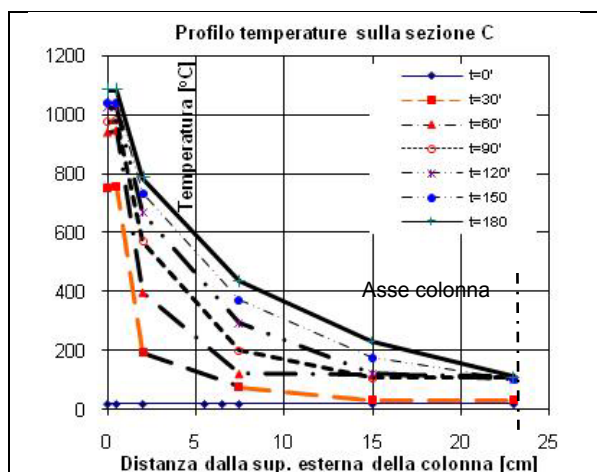


Figura 9: Andamento sperimentale della media delle temperature registrate nella Sezione C delle colonne incamiciate (sezione di mezzeria), per varie durate di esposizione.

In particolare, in figura 9 viene mostrato l'andamento, per diversi tempi di esposizione (30, 60, 90, 120, 150 e 180 minuti), delle isoterme, con riferimento al valore medio delle temperature, registrate nelle sezioni C (sezioni mezzeria) delle tre colonne incamiciate.

4 PROVE DI RESISTENZA RESIDUA "A FREDDO"

4.1 Metodologia di prova

Le prove a compressione sono state eseguite con una pressa da 5000 kN di tipo oleodinamico, che opera in controllo di carico. Le colonne sono state preparate, disponendo uno strato di malta ad alta resistenza (di spessore circa 2 cm) sulle sezioni di estremità, in modo da applicare il carico direttamente al calcestruzzo.

Per l'acquisizione dei dati, sono state utilizzate centraline tipo Spider 8 di produzione HBM. I dati, rilevati attraverso trasduttori tipo LVDT, hanno riguardato:

- l'accorciamento del calcestruzzo (Fig. 10), misurato con 3 LVDTs, posti su piani a 120°, fra due sezioni (A e B), collocate in prossimità degli estremi dei colonne (basi di lettura denominate L_i);
- l'accorciamento della camicia di acciaio (basi di lettura denominate C_i), letto a cavallo della mezzeria dei colonne;
- lo scorrimento locale fra il calcestruzzo e la camicia metallica, letto in prossimità della estremità dei colonne (basi di lettura denominate A_i e B_i), ma anche l'accorciamento della camicia in prossimità delle estremità della colonna.

La scelta di posizionare i trasduttori direttamente sulla parte in calcestruzzo delle colonne (Basi L_i), invece che fra i piatti della pressa, è legata alla opportunità di considerare la deformabilità della sola zona di colonna, direttamente esposta all'azione termica, escludendo i conci di estremità della colonna. Le modalità di prova, in generale, hanno previsto un primo ciclo di carico fino a circa 500 kN, per poi effettuare lo scarico e successivamente il ricarico fino al carico massimo previsto o fino a rottura. Il carico è stato applicato con velocità prossima a 0,01 MPa/s. Le caratteristiche delle colonne e il tipo di prova a compressione, eseguite presso il DIS, sono sinteticamente riportate nella tabella 3.

L'allestimento dei trasduttori LVDTs e il loro posizionamento è schematicamente riportato nella figura 10, dove sono anche riportate le lunghezze delle basi di lettura, generalmente, utilizzate per le prove.

COL.	TIPO DI PROVA	PROVA
III	Residuale con misura della curva carico - spostamento	Colonna con camicia metallica trattata in forno al CSI con curva standard per 180'
II	Residuale con misura della curva carico-spostamento	Colonna con camicia metallica trattata in forno al CSI con curva standard per 180'
IV	Residuale con misura della curva carico-spostamento	Colonna senza camicia trattata in forno al CSI con curva standard per 180'
I	Residuale con misura della curva carico - spostamento	Colonna con camicia trattata in forno al CSI con curva standard per 180' e provata a compressione dopo la rimozione della camicia metallica
V (Fase 0)	In condizioni vergini, con misura della curva carico - spostamento fino al carico di esercizio	Colonna in condizioni vergini, cioè non trattata termicamente, con camicia.
V (Fasi 1, 2, 3 e 4)	A caldo, con misura della curva carico-spostamento	Colonna con camicia trattata in forno elettrico al DIS, in presenza di carico di esercizio e poi portata a rottura a caldo

Tabella 3: Tipologia delle prove e caratteristiche dei colonne.

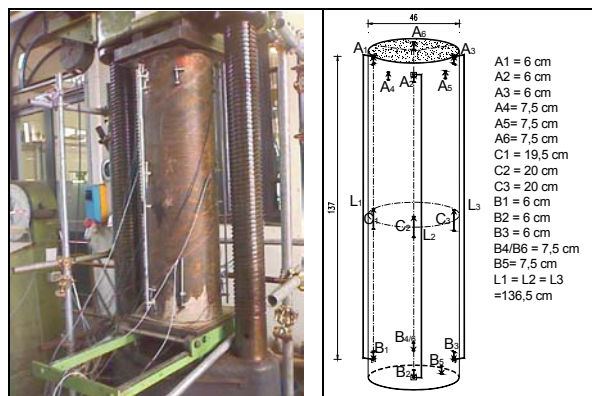


Figura 10: a) Pressa oleodinamica (5000 kN); b) Schema di posizionamento LVDT (Schema della Colonna V-Fase 0).

4.2 Risultati delle prove a compressione

Le colonne, sottoposte a prove di carico residuo (dopo il riscaldamento e raffreddamento=cold test), sono state pesate prima della prova. La colonna, sottoposta al trattamento termico al DIS, è stata pesata prima e dopo l'esecuzione della prova. I pesi delle colonne sono riportati in Tabella 4.

Colonna	Prova incendio	Peso prima del trattamento [kN]	Peso dopo il trattamento[kN]
Colonna n. III	CSI		6,72
Colonna n. II	CSI		6,65
Colonna n. I	CSI		6,72 con camicia
Colonna n. IV	CSI		4,90
Colonna n. V	DIS	7,20	6,85

Tabella 4: Pesi Colonne prima e dopo trattamento

Dalla tabella dei pesi dei campioni, considerata la massa volumica del calcestruzzo delle colonne analoga a quella dei cubi prelevati nella fase di getto, si può stimare la perdita in peso del calcestruzzo, per effetto del riscaldamento, in circa l'8,1 %, per le colonne trattate al CSI e in circa il 5,8 %, per la colonna riscaldata al DIS. Nella valutazione della perdita in peso si è assunta, ovviamente, trascurabile la variazione di peso dell'acciaio.

Nelle figure seguenti, per brevità, sono riportati solo i diagrammi di carico-spostamento, rilevato dai trasduttori L_1 , L_2 e L_3 , posti su base di circa 137 cm, collegati direttamente al calcestruzzo delle colonne, mediante tassellatura, realizzata in apposite "finestre" ricavate nella camicia metallica.

In particolare, nella figura 11, sono riportati solo i diagrammi carico-spostamento, registrati nella prova di comportamento residuo a compressione della colonna III, incamiciata. La prova è stata protratta fin quasi al raggiungimento di circa 5000 kN, senza che si evidenziasse alcun segno premonitore di collasso della colonna. La prova ha evidenziato un comportamento, caratterizzato da una variazione di pendenza, osservata intorno ai 2200 kN di carico.

Nella foto di figura 11, sono mostrati gli evidenti segni di danneggiamento con “sfogliazione”, riguardanti la parte corticale della camicia metallica, che evidenzia gli effetti del riscaldamento, combinato al processo di formazione dei tubi metallici, ottenuto con l’avvolgimento elicoidale di lastre saldate sui bordi.

Nella figura 12, sono invece riportati i diagrammi carico-spostamenti, registrati nella prova di comportamento residuo a compressione, della colonna II, incamiciata.

La prova è stata svolta con le stesse modalità della prova, relativa alla colonna III. Nella figura 13, sono riportati i diagrammi carico-spostamenti, registrati nella prova di comportamento residuo della colonna IV, riscaldata (al CSI) senza camicia. La prova è stata condotta fino a rottura della colonna, osservata a 2500 kN.

Nella figura 14, sono riportati i diagrammi carico-spostamenti, registrati nella prova di comportamento residuo a compressione della colonna I, a cui è stata rimossa la camicia (Foto in figura 14), dopo il trattamento termico al CSI. La prova è stata condotta fino al raggiungimento del carico di rottura della colonna, osservato a 3500 kN.

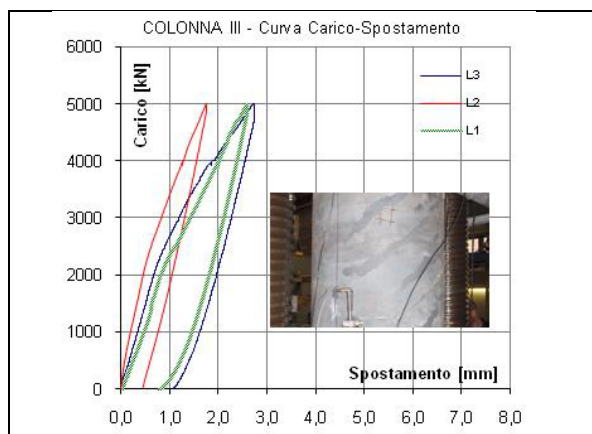


Figura 11: Diagrammi carico-spostamento da misure effettuate sul calcestruzzo (Colonna III).

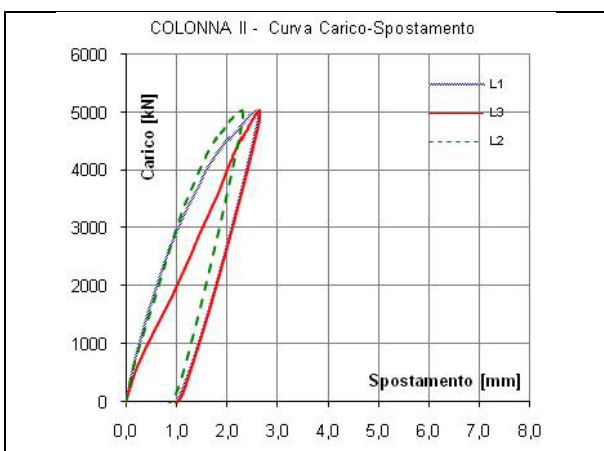


Figura 12: Diagrammi carico-spostamento da misure effettuate sul calcestruzzo (Colonna II).

Nella figura 15, sono riportati i diagrammi carico-spostamenti, registrati nella prova di comportamento a compressione della colonna V, incamiciata, prima del trattamento termico. La prova è stata condotta fino al raggiungimento del carico sulla colonna di 2500 kN, per poi essere scaricata. Lo scopo della prova è stato quello di raccogliere dati sul comportamento della colonna incamiciata in condizioni originarie, senza trattamento termico.

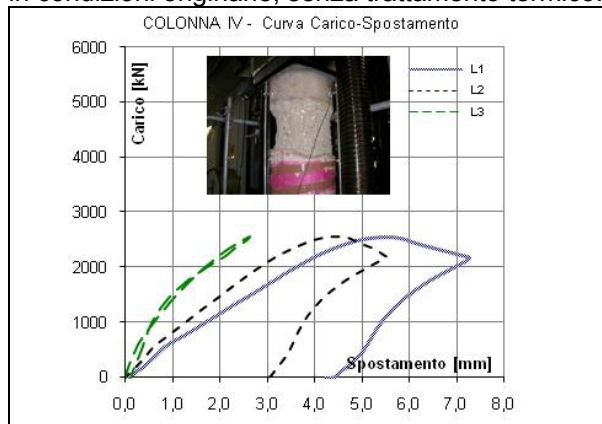


Figura 13: Diagrammi carico-spostamento da misure effettuate sul calcestruzzo (Colonna IV).

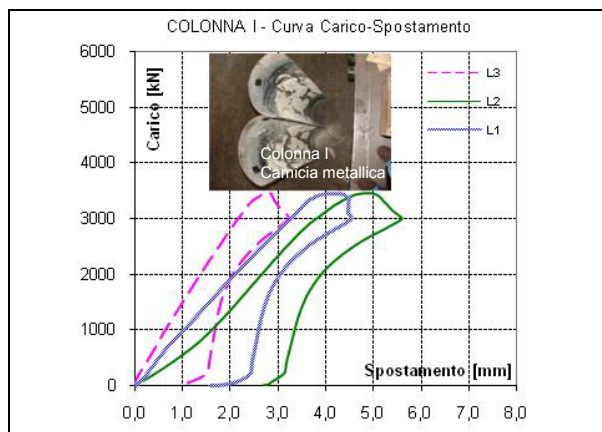


Figura 14: Diagrammi carico-spostamento da misure effettuate sul calcestruzzo (Colonna I)

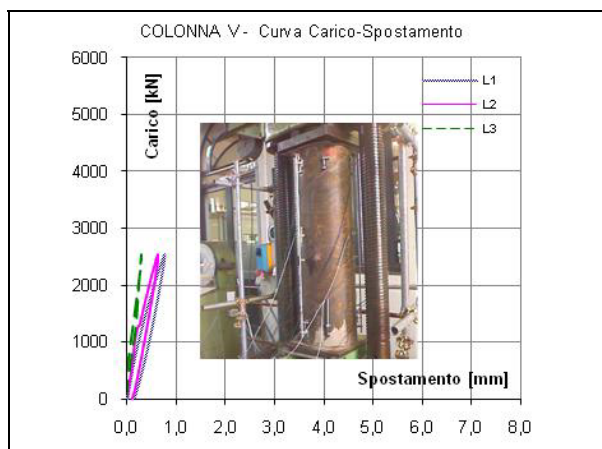


Figura 15: Diagrammi carico-spostamento fase 0. Misure effettuate fino ad un carico di 2500 kN e successivo scarico (Colonna V-Fase 0).

5 PROVA DI RESISTENZA “A CALDO”

5.1 Metodologia di prova ed apparecchiatura sperimentale

La prova è stata eseguita sempre sulla Colonna V, incamicciata, la quale, dopo essere stata inserita nella camera, costruita ad hoc, su cui si agganciano i due forni a pannelli (Fig. 16), è stata provata secondo le seguenti quattro fasi (Fig. 17).

Nella Fase 1, la colonna è stata caricata, fino al raggiungimento del carico di esercizio (combinazione dei carichi in presenza di incendio =2200 kN). Tale carico è stato poi mantenuto costante, durante la fase di riscaldamento della colonna.

Nella Fase 2, la colonna è stata sottoposta a riscaldamento in forno elettrico per circa 300 minuti (5 ore), così da raggiungere nella sezione C di mezzeria, un campo termico, analogo a quello registrato dopo 120 minuti di riscaldamento, secondo l'incendio standard al CSI (Fig. 18).

Nella Fase 3, la colonna è stata scaricata fino a 500 kN.

Nella Fase 4, la colonna è stata ricaricata fino a rottura, osservata a 4300 kN.



Figura 16: Camera del forno vista dall'esterno, con la parete di sinistra e la parete di destra rappresentate dalle due valve del forno.

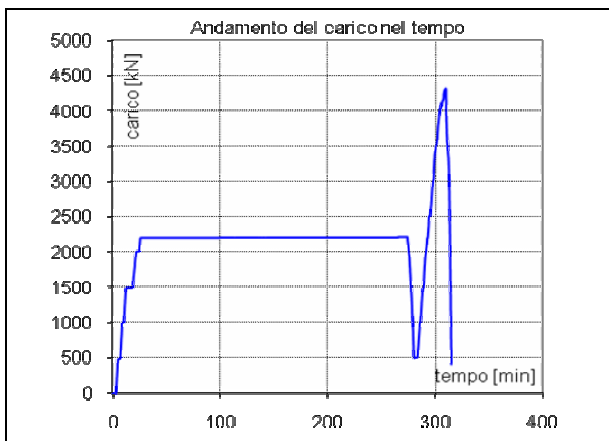


Figura 17: Colonna V, Storia di carico (Fasi 1, 2, 3 e 4).

L'attrezzatura di prova utilizzata è costituita dalla pressa oleodinamica, da due forni elettrici a pannelli e da 3 centraline di acquisizione dati, del tipo Spider 8 di produzione HBM, collegate ad un elaboratore, per la gestione e l'acquisizione dei risultati.

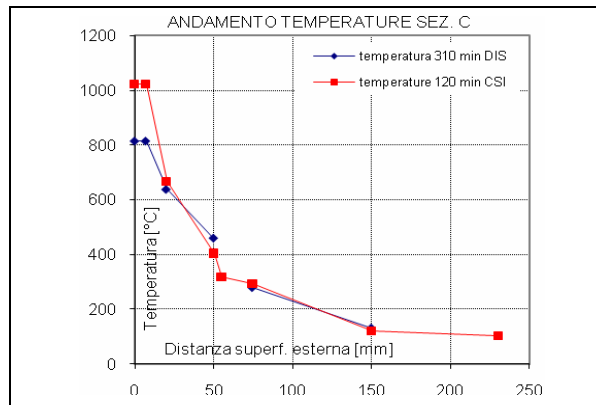


Figura 18: Mappa delle temperature nelle due prove “a caldo” sulla sez. C

Nella figura 16, sono riportate alcune immagini che illustrano l'attrezzatura utilizzata. La camera del forno, ha dimensioni esterne di circa 630x630x1260 mm.

Le due pareti verticali, prospicienti e aperte (Fig. 16), consentono l'innesco dei due forni a pannello, dotati di resistenze elettriche. Le altre due pareti sono state realizzate con struttura esterna in profilati e lamiera di alluminio, protette all'interno da pannelli in fibra ceramica, dello spessore complessivo di 10 cm, atti a isolare termicamente. Inoltre, la camera è dotata delle due pareti di base (superiore e inferiore), sempre in lamiera di alluminio, protette anch'esse da pannelli in fibra ceramica, dotate di fori per consentire il passaggio della colonna, da caricare con i piatti della pressa (Fig. 16).

I due forni sono agganciati ad una struttura tubolare, per la movimentazione in sicurezza (Fig. 16). Sempre nella figura 16, si può anche osservare il sistema utilizzato per la lettura degli spostamenti su base L_i , durante la prova di carico “a caldo”. Il sistema prevede la solita lettura sui piani a 120° , che in questo caso, sono riferite i vertici di un triangolo, ottenuto con piatti metallici, collegato con tassellatura nel calcestruzzo, nei punti di tangenza dei lati con la camicia.

Come si è detto, durante la prova, per controllare il riscaldamento all'esterno, è stata utilizzata una termo-camera, che, in tempo reale, mappava il campo termico della strumentazione e delle parti della pressa, prossime alla colonna. Il sistema di monitoraggio ha permesso di evidenziare che le temperature, esterne alla camera e ai forni, non hanno mai superato temperature di 50-60°C.

5.2 Risultati della prova “a caldo”

Di seguito, sono sinteticamente riportati i risultati, ottenuti nella prova di comportamento a compressione “a caldo” (hot test) della Colonna V.

Nella figura 17, è riportata la storia di carico “a caldo” durante la Fase 4, che evidenzia la rottura della colonna V, osservata ad un valore del carico pari a circa 4300 kN. Il diagramma carico-spostamento medio è riportato nella figura 19, ed è posto a confronto con il diagramma relativo alla prova in fase 0, della colonna V, eseguita sulla stessa colonna, ovviamente prima del riscaldamento. Un primo confronto fra le due curve, evidenzia la riduzione di rigidità della colonna provata “a caldo”. La curva della prova “a caldo”, nel tratto iniziale, è stata tracciata per estrapolazione fino al carico nullo. Tale ipotesi è, ovviamente, una forzatura, in quanto non considera che, nel primo tratto della curva carico spostamento, per effetto delle tensioni interne, dovute alle diverse temperature e dilatazioni termiche, si ha un primo tratto con concavità verso l’alto. Per gli scopi del confronto, in questa sede, si ritiene accettabile la semplificazione effettuata sulla estrapolazione della curva.

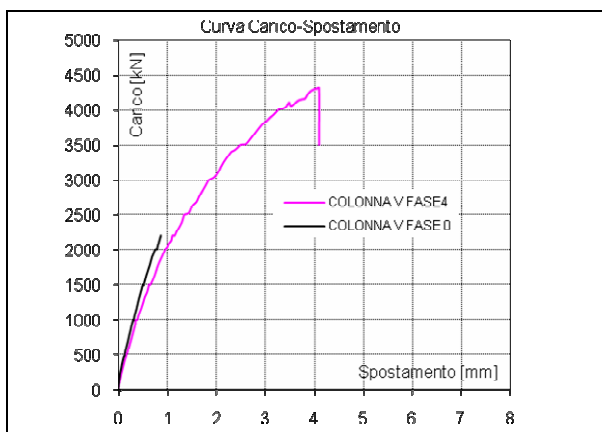


Figura 19: Diagrammi carico-spostamento medio relativi alla prova della fase 0 (curva superiore) e la curva della fase 4, “a caldo” (curva inferiore).

Nella figure 20, 21, e 22, sono riportate gli andamenti delle temperature registrate, nella fase di riscaldamento e nella fase di raffreddamento, in condizioni di forno chiuso, dalle termocoppie poste, rispettivamente, nelle sezioni C (di mezzeria), A e B (rispettivamente, inferiore e superiore), monitorate durante il riscaldamento e durante le successive 13 ore di raffreddamento.

Dalle mappature termiche, registrate nelle tre sezioni, si può notare che nella fase di raffreddamento, in condizioni di forno chiuso, come è avvenuto anche per le colonne riscaldate nel forno del CSI, il principio dell’equilibrio termico comporta il riscaldamento ulteriore delle parti meno calde,

più interne (onda termica). In particolare, in tutte e tre le sezioni, si può osservare come, con lo spegnimento del forno, le termocoppie posizionate nella parte più calda esterna, registrino una riduzione delle temperature, mentre la termocoppia, posta a 15 cm dalla superficie esterna della colonna, registri un aumento della temperatura, fintantoché non raggiunge una temperatura analoga a quella delle zone più calde in raffreddamento.

Per un corretto confronto delle mappature termiche, registrate nella prova al fuoco con le mappature delle prove al CSI, occorre considerare che la sezione indicata con A, in questo caso corrisponde alla posizione in basso, in quanto la colonna V è stata posizionata al contrario, rispetto alle colonne provate al CSI.

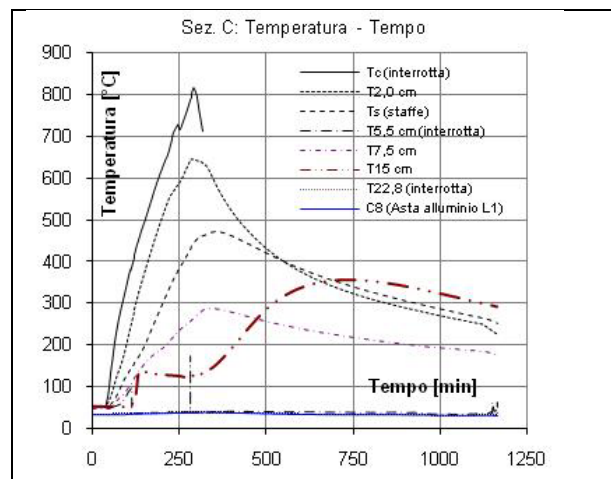


Figura 20: Andamenti temporali delle temperature registrate dalle termocoppie poste nella sezione di mezzeria (Sezione C).

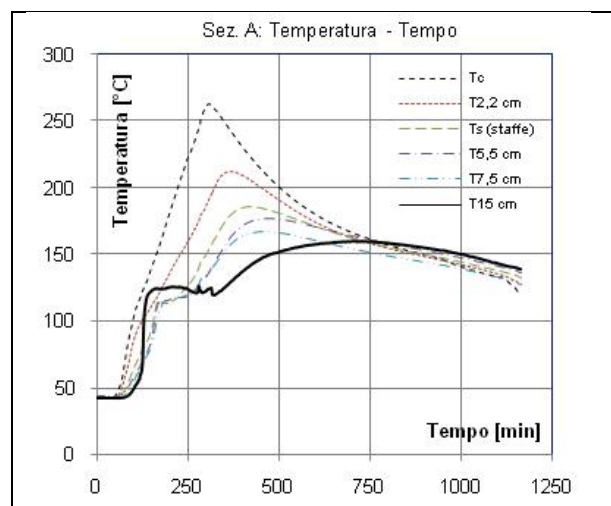


Figura 21: Andamenti temporali delle temperature registrate dalle termocoppie poste nella sezione A, posta in basso (colonna posizionata al contrario rispetto alla prova CSI).

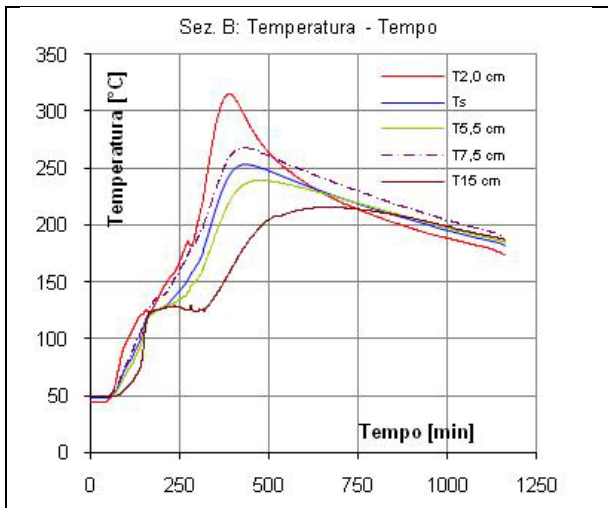


Figura 22: Andamenti temporali delle temperature registrate dalle termocoppie poste nella sezione B, posta in alto.

6 CONCLUSIONI

Il lavoro ha riguardato una ricerca sperimentale sul comportamento a compressione assiale di colonne in calcestruzzo armato, con camicia metallica e non, sottoposte ad azione termica in scala al vero (diametro 46 cm, altezza 160 cm). Gli aspetti studiati hanno riguardato sia il comportamento a compressione "a caldo" (hot test), che il comportamento residuo "a freddo" (cold test). In tutte e due i casi, lo studio ha riguardato anche il monitoraggio delle temperature, attrezzando tre sezioni di ciascuna colonna con 9 termocoppie.

Le prove sperimentali sono state accompagnate (confrontate) da valutazioni analitiche e numeriche, sia con riferimento agli aspetti termici, che agli aspetti di comportamento meccanico (di cui si discute in [33]).

Per quanto riguarda gli aspetti termici delle colonne, lo studio sperimentale permette di evidenziare che:

- I. nella fase di riscaldamento in forno a gas, con incendio standard, la temperatura, registrata sulla camicia metallica, è risultata poco diversa dalla curva di controllo (temperatura nel forno), che è praticamente coincidente con la curva standard;
- II. il valore delle temperature, raggiunte dai materiali più interni, nella fase di raffreddamento, per effetto dell'onda termica, può risultare notevolmente maggiore di quella registrata al termine della fase di riscaldamento.

Per quanto riguarda il comportamento a compressione assiale sperimentale "a caldo" e "a freddo" delle colonne, lo studio permette di evidenziare che:

- I. la colonna I, trattata al CSI, secondo la curva standard per 180 minuti, alla quale era stata rimossa la camicia metallica, prima della prova a

compressione, ha evidenziato una resistenza residua pari a 3500 kN;

- II. la colonna IV, notevolmente danneggiata dall'azione termica al CSI, con perdita del ricoprimento delle armature (per uno spessore di circa 5,5 cm), ha evidenziato una resistenza residua di 2500 kN, ossia pari a circa il 70 % della colonna I (privata della camicia);
- III. le colonne III e II, trattate nel forno del CSI, secondo la curva standard per 180 minuti, con camicia metallica, sono state portate fino a circa 5000 kN di carico. Le due prove hanno evidenziato un comportamento molto simile.
- IV. la colonna V, trattata termicamente al DIS, in modo da determinare una distribuzione termica nella sezione di mezzeria, simile a quella registrata dopo 120 minuti, nelle colonne incamiciate trattate al CSI, ha evidenziato una resistenza di circa 4300 kN, ossia circa doppia del carico di servizio, utilizzato per il progetto delle colonne in opera.

7 RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il prof. ing. Antonio Migliacci, il dott. ing. Paolo Bosi e il dott. ing. Donato Romano, che in qualità, rispettivamente, di Collaudatore Statico, di Responsabile Unico del Procedimento, e di Progettista e Direttore dei Lavori del Nuovo Ospedale di Bergamo, hanno promosso lo svolgimento di questa ricerca, finanziata in primis dall'Azienda Ospedaliera di Bergamo e in secundis dalla Dec SpA, Impresa Costruttrice del Nuovo Ospedale di Bergamo. Si ringraziano ancora i professori Roberto Felicetti e Gianpaolo Rosati per aver favorito la predisposizione e l'utilizzo di alcune attrezzature di prova. Si ringrazia, infine, l'ing. Giuseppe Grella del Centro Sperimentale Italiano (CSI), per la preziosa collaborazione per lo svolgimento delle prove presso il CSI.

Contatti con l'autore: acito@stru.polimi.it

8 BIBLIOGRAFIA

- [01] Garder J, Jacobson R. "Structural behavior of concrete filled steel tubes" ACI J Struct Div 1967;64(7):404-13.
- [02] Furlong, R. W. (1967), "Strength of steel-encased concrete beam columns." J. Struct. Div. ASCE, 93 5 , 113-124.
- [03] Knowles, R.B., Park, R. (1969). "Strength of concrete filled steel tubular columns." J. Struct. Div., ASCE, 95 12, 2565-2587.
- [04] Furlong, R. W. 1974. "Concrete encased steel columns—Design tables", J. Struct. Div., ASCE, 100 9 , 1865-1882.
- [05] Lin CY. "Axial capacity of concrete in filled cold-formed steel columns", In: 9th international conference on cold-formed steel structures 1988. p. 443-56.

- [06] Ge, H. B., and Usami, T. (1992), "Strength of concrete-filled thin-walled steel box columns: Experiment." *J. Struct. Eng.*, 118 11, 3036–3054.
- [07] Ge, H. B., and Usami, T. (1994), "Strength analysis of concrete-filled thin-walled steel box columns." *J. Constr. Steel Res.*, 30 3 , 259–256.
- [08] Boyd, F. P., Cofer, W. F., and McLean, D. (1995), "Seismic performance of steel-encased concrete column under flexural loading." *ACI Struct. J.*, 92 (3) , 355–365.
- [09] Bradford, M. A. (1996), "Design strength of slender concrete-filled rectangular steel tubes." *ACI Struct. J.*, 93 2 , 229–235.
- [10] Shams, M., and Saadeghvaziri, M. A. (1997), "State of the art of concrete-filled steel tubular columns." *ACI Struct. J.*, 94 5 , 558–571.
- [11] Schneider SP., "Axially loaded concrete-filled steel tubes". *Journal of Structural Engineering*, ASCE 1998;124(10):1125–1138.
- [12] Zhang, W., and Shahrooz, B. M. 1999 . "Comparison between ACI and AISC for concrete-filled tubular columns." *J. Struct. Eng.*, 125 11 , 1213–1223.
- [13] Huang CS, Yeh YK, Hu HT, Tsai KC, Weng YT, Wang SH et al. Axial load behavior of stiffened concrete-filled steel columns. *Journal of Structural Engineering*, ASCE 2002;128(9):1222–30.
- [14] Prion HGL, Boehme J. Beam–column behaviour of steel tubes filled with high strength concrete. *Canadian Journal of Civil Engineering* 1994;21: 207–18.
- [15] Sugupta DPG, Mendis PA., "Design of high-strength-concrete filled tube column". In: *Proceedings of the fifth East-Asia-Pacific conference on structural engineering and construction*. Australia: Griffith University; 1995. p. 427–32.
- [16] O'Shea MD, Bridge RQ., "Circular thin-walled tubes with high strength concrete infill". In: *Proceedings of the engineering foundation conference ASCE*. 1997. p. 780–93.
- [17] Qing Yu, Zhong Tao, Ying-Xing Wu, "Experimental behaviour of high performance concrete-filled steel tubular columns". *Thin-Walled Structures* 46 (2008) 362–370
- [18] Kordina, K., and Klingsch, W. (1983). "Fire safety of composite columns of concrete filled steel hollow sections." CIDECT Report No. 15, C1/C2, Comite International pour le Development et L'etude de la Construction Tubulaire, London, England, 1-91.
- [19] Grimault, J. P. (1982), "Calcul a l'incendie des profiles creux remplis du bdtou, manual pratique". *Chambre Syndicale des Fabricants du Tubes d'Acier*, Paris, France, 1- 72 (in French).
- [20] Okada T, Yamaguchi T, Sakumoto Y, M. Yoshida, S. Tasaka "Fire resistance of concrete-filled , fire resistance steel-tube columns", *J. of Materials in civil Engineering*, V. 6, n. 2 May 1994.
- [21] Lie TT. "Fire resistance of circular steel columns filled with bar-reinforced concrete". *J Struct Eng* 1994;120:1489–509.
- [22] T.T. Lie, R.J. Irwinn (1994), "Fire resistance of rectangular steel columns filled with bar-reinforced concrete". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 120(5): 1489–1509.
- [23] Lie, T.T., and Kodur, V.K.R. 1996a. "Fire resistance of steel columns filled with bar-reinforced concrete". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 121(1): 30–36.
- [24] Kodur, V.K.R., and Lie, T.T. 1996b. "Fire resistance of circular steel columns filled with fibre-reinforced concrete". *ASCE Journal of Structural Engineering*, 122(7): 776–782.
- [25] Kodur VKR. "Performance-based fire resistance design of concrete-filled steel columns". *J Constr Steel Res* 1999; 51:21–6.
- [26] Kodur VKR. "Performance of high strength concrete-filled steel columns exposed to fire". *Can. J Civ. Eng.* 1998; 25: 975–956.
- [27] Lie, T.T., and Kodur, V.K.R. 1996b. "Thermal and mechanical properties of steel-fibre-reinforced concrete at elevated temperatures". *Canadian Journal of Civil Engineering*, 23(2): 511–517.
- [28] Kodur VKR, Sultan MA. Effect of temperature on thermal properties of high-strength Concrete: *J. Materials in Civil Engineering*, Vol. 15, N. 2, April 1, 2003, 101-107.
- [29] Han LH. Fire performance of concrete filled steel tubular beam–columns. *J Constr Steel Res* 2001;57:695–709.
- [30] Lin-Hai Han, Jing-Si Huo, Yong-Chang Wang, "Compressive and flexural behaviour of concrete filled steel tubes after exposure to standard fire". *Journal of Constructional Steel Research* 61 (2005) 882–901
- [31] C. M. del 14.09.1961 "Norme Di Sicurezza Per La Protezione Contro Il Fuoco Dei Fabbricati A Struttura In Acciaio Destinati Ad Uso Civile", Italy, 1961.
- [32] ISO 834: 1975 "Fire Resistance Tests - Elements of Building Construction, International Organization for Standardization", Switzerland.
- [33] Acito M. "Confronto Teorico-Sperimentale sul comportamento assiale e termico di colonne RCSFT esposte al fuoco". 17° Congresso CTE – Roma 5, 6, 7 e 8 Novembre 2008.
- [34] Acito M. "Sulla Modellazione del comportamento in regime assiale di colonne CFST e RCSFT esposte al fuoco", 17° Congresso CTE – Roma 5, 6, 7 e 8 Novembre 2008.