

# Compression tests on fiber reinforced concrete at high temperatures

## Prove di compressione su calcestruzzo fibro rinforzato ad alte temperature

M. Caciolai<sup>1</sup>, P. Castelli<sup>2</sup>, A. Meda<sup>3</sup>, A. Caratelli<sup>4</sup>, M. Como<sup>5</sup>

<sup>1</sup> Italian National Fire Service, Control Directorate for Fire Prevention and Technical Safety, Roma, Italy

<sup>2</sup> Italian National Fire Service, Control Directorate for Fire Prevention and Technical Safety, Roma, Italy

<sup>3</sup> Department of Civil Engineering, University of, City, Country

<sup>4</sup> Department of Civil Engineering, University of Tor Vergata, Roma, Italy

<sup>5</sup> Department of Civil Engineering, University of Tor Vergata, Roma, Italy

**ABSTRACT:** The analysis of the safety of civilians in large concrete structures such as subways, tunnels or road tunnels requires knowledge of its mechanical and thermal properties to evaluate the hot behavior and consequent residual strength. Pouring concrete in this study, has the following features: hooked steel fibers, 4D\_BKT: 40 kg / m<sup>3</sup>, calcareous aggregates with a maximum size = 25 [mm], w / c = 0.4 and cement content = 450 kg / m<sup>3</sup>. The compression tests performed in this study, have the aim of evaluating the compressive strength of the concrete test at high temperatures, following the basic points of the UNI EN 12390-3 at room temperature for tests; the tests has involved two treatment temperatures: 350 ° C and 650 ° C; have only two choices for temperatures and the tests have more data for each step and the steps have a reserve of results in case of any unforeseen during the tests.instructions set below. / L'analisi della sicurezza di grandi strutture civili in calcestruzzo come metropolitane, tunnel o gallerie stradali richiede la conoscenza delle sue proprietà meccaniche e termiche per valutare il comportamento a caldo e la conseguente resistenza residua. Il getto di calcestruzzo oggetto del presente studio, ha le seguenti caratteristiche: fibre metalliche uncinato, 4D\_BKT: 40 kg/m<sup>3</sup>, aggregati calcarei con taglia massima = 25 [mm], w/c = 0.4 e contenuto di cemento = 450 kg/m<sup>3</sup>. I test di compressione eseguiti in questo studio, hanno lo scopo di valutare la resistenza a compressione del provino di calcestruzzo ad alte temperature, seguendo i punti fondamentali della norma UNI EN 12390-3 per prove a temperatura ambiente; i test hanno interessato due temperature di trattamento: 350 ° C e 650 ° C; si sono scelte solo due temperature per avere più dati per ogni step ed avere una riserva di risultati in caso di eventuali imprevisti durante le prove. La lunghezza delle memorie non dovrà essere maggiore di 8 pagine. Per assicurare uno stile uniforme in tutto il volume, tutti i documenti devono essere preparati rigorosamente secondo le istruzioni riportate nel seguito.

**KEYWORDS:** fibre-reinforced concrete; structural robustness; material heterogeneity / calcestruzzo fibro-rinforzato; robustezza strutturale; eterogeneità del materiale

### 1 GENERALITA'

La lunghezza delle memorie non dovrà essere maggiore di 8 pagine. Il sommario dovrà avere una lunghezza compresa tra 100 e 150 parole. Il testo principale può essere scritto in italiano o in inglese. Il titolo, il sommario, le didascalie di tabelle e figure, le parole chiave e le conclusioni devono essere scritti sia in Inglese, sia in Italiano dove la prima lingua dovrà essere l'Inglese. La lunghezza del titolo dovrà essere contenuta su una linea.

Il problema degli incendi, oltre che per gli edifici comuni, è uno dei principi su cui si basa l'analisi della sicurezza di grandi strutture civili come metropolitane, tunnel o gallerie stradali; l'analisi richiede quindi la conoscenza delle proprietà meccaniche e termiche per valutare il comportamento a caldo e la conseguente resistenza residua conseguente ad un eventuale evento che presenti un incendio.

Per quanto riguarda la resistenza al fuoco, in genere, il calcestruzzo ha una resistenza migliore rispetto agli altri materiali, come l'acciaio, usati nelle

realizzazione di strutture più o meno complesse; sia in termini di deformabilità e resistenza che in termini di protezione al fuoco. Tuttavia, un incendio ha sempre conseguenze negative nei confronti degli elementi costruttivi, conseguenze che sono funzione della temperatura raggiunta, del tempo di permanenza dell'incendio, delle condizioni al contorno, della geometria degli elementi e molte altre variabili spesso non prevedibili.

In genere, i danni causati dal fuoco nel calcestruzzo, si possono classificare in due categorie: danni meccanici e conseguenze chimiche sulla microstruttura che compone il materiale.

I danni meccanici sono rappresentati per lo più dalla fessurazione, dalla frattura e dallo spalling; i primi due effetti dovuti dalla differente espansione termica degli aggregati e della matrice cementizia e il terzo dal gradiente di temperatura indotto nell'acqua contenuta nei pori del gel, che raggiungendo pressioni superiori alla resistenza a trazione

del calcestruzzo, induco l'espulsione del materiale superficiale.

Le conseguenze chimiche sono dovute prettamente dalla disidratazione della pasta cementizia e dalle trasformazioni e decomposizioni degli aggregati.

Uno degli esempi più evidenti, è quello dell'incendio del 18 Novembre del 1996, avvenuto nel tunnel sotto la Manica collegante Francia e Inghilterra. E' stato rilevato che per un tratto di circa 50 m, il rivestimento della galleria spessa 0.4 m è stato ridotto alla media di 0.17 m con spessori minimi anche di 0.02 m. Anche se nell'incidente non ci sono state vittime, il degrado progressivo dello spessore del tunnel e lo spalling ha reso poco agibili e pericolose le fase dello spegnimento dell'incendio da parte dei Vigili del Fuoco [Colombo, 2001].

L'obiettivo della ricerca riguarda il comportamento a caldo e post raffreddamento di calcestruzzi ordinari. Si osserva come le prove ad alta temperatura sul calcestruzzo non sono standardizzate, in nessun paese, per cui è stata effettuata una ricerca bibliografica per individuare, apprendere e simulare con i mezzi a disposizione, le metodologie di prova più comuni per valutare le conseguenze che le alte temperature hanno sul calcestruzzo.

I risultati sono stati poi analizzati e confrontati con quelli presenti in letteratura scegliendo opportuni studi che presentino caratteristiche analoghe sia in termini di modalità di prova, sia in termini di calcestruzzo esaminato.

Il titolo, il sommario, le didascalie di tabelle e figure, le parole chiave e le conclusioni avranno un carattere di colore nero per la versione in Inglese e un carattere di colore grigio per la versione in Italiano.

Il testo deve adattarsi esattamente all'interno dei margini 187 × 272 millimetri. Per modificare le impostazioni dei margini nella finestra di dialogo Imposta pagina (menu File) vedi tabella 1.

## 2 CALCESTRUZZO FIBRORINFORZATO E METODI DI CARATTERIZZAZIONE

Gli elementi strutturali vengono modellati fondamentalmente tramite le proprietà meccaniche dei materiali che li compongono. I parametri fondamentali sono descritti dalle resistenze e dalle curve sforzo-deformazione. Curve che possono descrivere comportamenti duttili, con tratti non-lineari prima del collasso, o fragili, dove la resistenza massima è raggiunta subito dopo un tratto lineare. Il calcestruzzo è materiale fragile, poiché comporta rotture improvvisate durante una risposta ancora elastica; in particolare i materiali a base cementizia presentano una scarsa resistenza a trazione e scarse capacità deformative. A seguito di una sollecitazione di trazione, nell'elemento strutturale, si presentano fessure, con una veloce propagazione, che causano il collasso improvviso dell'elemento. Questo comportamento viene limitato dall'aggiunta di un quantitativo di fi-

bre all'interno della matrice cementizia che ne limita la fragilità, aumenta la resistenza a trazione post fessurazione.

Le fibre quindi iniziano a lavorare dopo la fessurazione e non portando benefici sostanziali alle resistenze pre-fessurazione. E' fondamentale comunque il comportamento globale fibra-matrice cementizia e il modo in cui si legano.

I materiali impiegati classificano le fibre in metalliche, sintetiche o naturali. La funzione che assumono invece le caratterizza come strutturali o non-strutturali; fibre metalliche, di vetro o carbonio hanno modulo di elasticità maggiore della matrice cementizia e aumentano la tenacità del materiale (fibre strutturali) mentre quelle come ad esempio di propilene o nylon risultano utili contro la fessurazione da ritiro o per la resistenza al fuoco.

Fibre di vetro: sono fibre con modulo elastico maggiore del calcestruzzo, costituite da filamenti più o meno lunghi in funzione dell'utilizzo.

Fibre di carbonio (FRP): questa tipologia comporta resistenze a trazione elevatissime permettendo sezioni del filamento di decimi di millimetro; inoltre le proprietà chimiche le proteggono dagli agenti corrosivi.

Fibre sintetiche: sono composte da materiali polimerici; tra i materiali più utilizzati ci sono: polipropilene, polietilene, il poliestere, poliacrilonitrile, kevlar, nylon con una tendenza maggiore del mercato al polipropilene. Il materiale più performante ma più costoso è il kevlar. Le fibre in poliestere invece, con una maggiore resistenza del polipropilene ma maggiore fragilità, sono delle possibili alternative commerciali.

Le fibre di acciaio vengono classificate tramite il materiale di cui sono composte, la forma, le dimensioni e il processo con cui sono realizzate. Le proprietà fondamentali sono la resistenza a trazione e la qualità di ancoraggio alla matrice cementizia.

Processo di produzione:

Il CNR-DT 204/2006 classifica le fibre in:

- Tipo A: da filo trafilato;
- Tipo 1: acciaio a basso contenuto di carbonio (carbonio < 0.20%);
- Tipo 2: acciaio ad alto contenuto di carbonio (carbonio > 0.20%);
- Tipo 3: fibre in acciaio inox;
- Tipo B: da lamiera tagliata;
- Tipo C: da altri tipi produzione.

Geometria:

Come molte sperimentazioni hanno evidenziato, una sagomatura ondulata dell'intera lunghezza o degli estremi della fibra, portano ad una aderenza maggiore rispetto ad una fibra rettilinea, consentendo quindi lunghezze più corte. Il parametro più influente, per quanto riguarda la distribuzione degli sforzi, è il rapporto d'aspetto, ovvero il rapporto tra la lunghezza e il diametro della fibra ( $l_f/d_f$ ), che in generale, più è elevato e maggiore risulta la risposta mec-

canica del calcestruzzo fibrorinforzato ; un valore troppo elevato però compromette la lavorabilità e un impasto più omogeneo. I valori più usuali di questi parametri sono:

- $d_f$  [mm]: 0.15 – 1.20;
- $l_f$  [mm]: 6 – 70;
- Rapporto d'aspetto  $l_f/d_f$  [-]: 50 -150.

Contenuto di fibre:

il contenuto di fibre viene valutato in percentuale di volume dell'impasto, in genere compreso tra lo 0.5% e il 2%, tradotto in peso tra 30 Kg/m<sup>3</sup> e 150 Kg/m<sup>3</sup>, con un minimo imposto da normativa di 25 Kg/m<sup>3</sup>.

Il trasferimento degli sforzi tra matrice e fibra non è univocamente determinato ma è caratterizzato da più fattori come:

- Geometria della fibra ( fibra rettilinea, sagomata, uncinata);
- Attrito dell'interfaccia fibra-matrice;
- Confinamento;
- Adesione fisica e chimica dell'interfaccia fibra-matrice;

Nella prima fase è presente la perfetta aderenza tra fibra e matrice, la matrice non è fessurata e in questa fase ancora elastica c'è congruenza di spostamenti tra le due componenti. L'andamento degli sforzi tangenziali all'interfaccia è massimo agli estremi della fibra e tende a zero al centro. In genere la resistenza a trazione è maggiore dello sforzo di ancoraggio. Se nella seconda fase si verifica lo sfilamento prima della fessurazione della matrice cementizia, allora si ha il collasso della sezione (la fibra non lavora più nel processo post-fessurazione). Si possono verificare due tipi di meccanismi: collasso dell'elemento per completa perdita dell'ancoraggio e scorrimento della fibra con attivazione della resistenza frizionale, con la seconda alternativa più frequente della prima.

Il comportamento a compressione nel calcestruzzo fibrorinforzato non ha sostanziali differenze per quanto riguarda i valori di picco della resistenza, ma quello che si nota durante una prova di compressione, è una certa duttilità raggiunto il valore massimo.

Le fibre sono i fattori che determinano in maniera prevalente il comportamento a trazione nella fase post-fessurazione. Agiscono fondamentalmente come cucitura andando ad intercettare le fessure create e le propagano traslandole (shifting) o ramificandole (branching). In prossimità del valore di picco della resistenza si può presentare la rottura del sistema fibra-matrice (debonding) o lo sfilamento della fibra (pull out). Si possono tipologie diverse di comportamento: softening e hardning, dove nel primo, raggiunto il valore di picco non si ha un collasso fragile ma la resistenza diminuisce in maniera graduale, mentre nel secondo la resistenza può aumentare.

Il comportamento a trazione del FRC è stimato in termini di resistenza residua e la prova sul campione prismatico appoggiato-appoggiato con carico in mezzzeria, fornisce la relazione carico-apertura di

fessura. La velocità di carico è di 0,05 mm/min, fino al raggiungimento di una apertura di fessura pari a 0,1mm per poi aumentare a 0,2 mm/min fino al termine della prova.

### 3 PROGRAMMA SPERIMENTALE

Il programma sperimentale è diviso in tre fasi distinte:

- Fase di getto del calcestruzzo, maturazione, carotaggio e rettifica dei provini;
- Studio dell'andamento della temperatura all'interno dei campioni di calcestruzzo, riscaldamento e prova di compressione a temperatura;
- Riscaldamento, raffreddamento e studio del comportamento a trazione post raffreddamento;

La prima fase di preparazione dei campioni è stata svolta presso il laboratorio Materiali e Strutture del Dipartimento di Ingegneria Civile e Informatica della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Roma Tor Vergata; la seconda fase è stata effettuata nel laboratorio di resistenza al fuoco, presso la DCPST dei Vigili del Fuoco di Roma Capannelle; la terza, invece, è rappresentata dalla parte di riscaldamento e raffreddamento dei provini realizzata nel laboratorio di resistenza al fuoco e dai successivi test sulle resistenze presso il laboratorio dell'Università di Tor Vergata.

Il getto di calcestruzzo oggetto di studio ha le seguenti caratteristiche:

- Fibre metalliche uncinata, 4D\_BKT: 40 [kg/m<sup>3</sup>],  $l/d=60$ ;
- Aggregati calcarei, taglia massima = 25 [mm]
- $w/c = 0.4$ ;
- Contenuto di cemento = 450 [kg/m<sup>3</sup>];



Figura 4.1: fibre metalliche.

I campioni utilizzati per le prove di flessione, compressione, trazione diretta e per il Barcellona test sono stati realizzati secondo i seguenti modi:

- Con getto diretto di calcestruzzo all'interno di cassaforme metalliche e in PVC;
- Tramite carotaggio di piastre di calcestruzzo e successiva rettifica;
- Tramite carotaggi delle travette, successivi alla prova di flessione;

Si riassumono le tipologie dei campioni per metodo di studio:

- Resistenza a compressione a caldo:
- 21 provini cilindrici,  $d = 154$  [mm],  $h = 300$  [mm];
- Resistenza a trazione post raffreddamento:

- 21 Provini cilindrici:  $d = 154$  [mm],  $h = 150$  [mm];



Figura 4.2: fasi del getto di calcestruzzo.

Per quanto riguarda i campioni testati ad alte temperature, il getto è stato lasciato maturare per 120 giorni; successivamente sono stati carotati un totale di 42 provini con diametro 154 [mm], di cui 21 da rettificare con un'altezza  $h=300$  [mm] per le prove di compressione e 21 con un'altezza di 150 [mm], per le prove di trazione;



Figura 4.3: fasi di carotaggio.

Si è passati poi alla fase di rettifica dei provini carotati secondo le norme tecniche UNI EN 12390-1:2002 – (Prova sul calcestruzzo indurito - Forma, dimensioni ed altri requisiti per provini e per casseforme), realizzando 21 cilindri di  $h=150$  [mm] e 21 di  $h=300$  [mm];



Figura 4.4: rettifica dei provini.

Il test di compressione sui provini di calcestruzzo è stato eseguito a caldo seguendo i punti fondamentali della norma UNI EN 12390-3 per prove a temperatura ambiente; il test ha interessato le temperature di  $350^{\circ}\text{C}$  e  $650^{\circ}\text{C}$ ; si sono scelte solo due temperature per avere più dati per ogni step ed avere una riserva di risultati in caso di eventuali imprevisti durante le prove; inoltre si è deciso di eseguire due modalità distinte per le singole temperature:

- Prima modalità: il provino raggiunge la temperatura prossima a quella di interesse e viene stabilizzato per un'ora;
- Seconda modalità: rispetto alla prima il campione si tiene stabilizzato per 6 ore;

Per poter eseguire la compressione a caldo è stato fatto uno studio per poter mantenere il volume di calcestruzzo a temperatura costante e omogenea, con approssimazioni trascurabili,

I campioni utilizzati per le prove di resistenza a compressione ad alta temperatura, sono di forma cilindrica, con dimensioni rettificate secondo le norme tecniche UNI EN 12390-1:2002:

- $h = 300$  [mm]
- $d = 154$  [mm]

Per il trattamento termico dei provini è stato usato un forno a muffola con rivestimento refrattario e riscaldamento a resistenza elettrica (massima temperatura:  $1340^{\circ}\text{C}$ ). Per studiare l'andamento della temperatura nel tempo, i provini sono stati muniti di termocoppie; si è scelto di monitorare una zona che rappresenti circa  $2/3$  dell'altezza totale; sono stati realizzati fori da 3 mm di diametro con profondità calibrate, riempiti da una colla ceramica adatta per alte temperature; le profondità in questione sono di 1 cm e 7,5 cm dal bordo esterno;

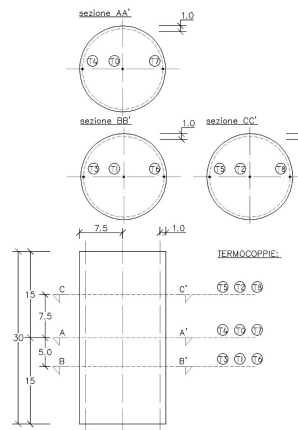


Figura 4.5: (a), (b) e (c) sezioni tipo e preparazione dei fori, (d) e (f) acquisizione della temperatura.



Figura 4.6: (a) Sistema di acquisizione – Data logger; (b) termocoppia.

Per mantenere la temperatura il più possibile costante, si è realizzato un thermos con diametro di 26 cm uguale al lato del piatto della pressa; al materiale coibente contenuto dalle due lamiere concentriche, è stato aggiunto uno strato di lana di roccia;



Figura 4.7: (a) e (b) Thermos.

#### 4 RISULTATI SPERIMENTALI.

In questa sezione sono riportati i risultati sperimentali delle prove precedentemente descritte nel capitolo 4 con le seguenti sottosezioni:

- Prova di resistenza a compressione e decadimento del modulo elastico in funzione della temperatura; confronto con Eurocodice 2 e altri studi;
- Prova di resistenza a trazione post raffreddamento; confronto con altri studi;

Le modalità delle prove di resistenza a compressione, sono descritte nel capitolo 4; I risultati sono evidenziati nella tabella 5.1 dove la  $f_{ck} = N_{max}/A$  [MPa] è il rapporto tra il carico massimo e l'area della sezione trasversale del cilindro; la deformazione assiale è ottenuta dal rapporto tra lo spostamento relativo dei due piatti della pressa, valutata con gli estensimetri posti a 120° attorno all'asse centrale e l'altezza totale  $h=300$  mm del provino;

Si ricorda che per le due temperature, 350° C e 650° C, sono presenti due modalità di prove: la prima consiste nel portare il provino, in maniera omogenea, alla temperatura stabilita lasciandolo stabilizzare per un'ora, la seconda invece ha previsto un tempo di stabilizzazione pari a 6 ore;

I risultati hanno portato a considerare che, al momento in cui il volume di calcestruzzo è stabilizzato, 6 ore di mantenimento costante della temperatura non hanno portato effetti di decadimento sulla resistenza a compressione; nella tabella 5.2 sono presenti i valori di resistenza complessivi in funzione della temperatura;

Nei risultati sperimentali della seconda prova a 650°C, due dei quattro provini sono esplosi, questo giustifica la mancanza dei due dati nelle tabelle riassuntive;

Nelle tabelle seguenti, 5.1 e 5.2, vengono riportati i valori complessivi delle resistenze cilindriche a compressione delle prove effettuate a temperatura ambiente, a 350°C e 650°C; in particolare, i valori di resistenza ricavati secondo le due diverse modalità precedentemente descritte, hanno dato risultati confrontabili; quindi un trattamento con una durata di ulteriori 6 ore non ha influito sul decadimento della resistenza a compressione; le sigle \_1h e 6h indicano il tempo di stabilizzazione in ore.

| 4D_BKT         |      |      |        |       | Data del getto | Maturazione | Data prove di compressione |
|----------------|------|------|--------|-------|----------------|-------------|----------------------------|
| Serie          | d    | H    | N      | σ     |                |             |                            |
| 4D_BKT         | [mm] | [mm] | [kN]   | [Mpa] |                |             |                            |
| T_AMBIENTE n.1 | 154  | 300  | 1034,1 | 55,5  | 19/12/2014     | cassaforma  | 14/04/2015                 |
| T_AMBIENTE n.2 | 154  | 300  | 1027,7 | 55,2  |                |             |                            |
| T_AMBIENTE n.3 | 154  | 300  | 1036,1 | 55,6  |                |             |                            |
| T_350°C_1h n.1 | 154  | 300  | 925,0  | 49,7  |                |             | 16/04/2015                 |
| T_350°C_1h n.2 | 154  | 300  | 805,52 | 43,2  |                |             |                            |
| T_350°C_1h n.3 | 154  | 300  | 895,87 | 48,1  |                |             |                            |
| T_350°C_6h n.1 | 154  | 300  | 837,8  | 45,0  |                |             | 17/04/2015                 |
| T_350°C_6h n.2 | 154  | 300  | 848,3  | 45,5  |                |             |                            |
| T_350°C_6h n.3 | 154  | 300  | 858,5  | 46,1  |                |             |                            |
| T_350°C_6h n.4 | 154  | 300  | 900,6  | 48,4  |                |             | 21/04/2015                 |
| T_650°C_1h n.1 | 154  | 300  | 289,5  | 15,5  |                |             |                            |
| T_650°C_1h n.2 | 154  | 300  | 246,6  | 13,2  |                |             |                            |
| T_650°C_1h n.3 | 154  | 300  | 264,5  | 14,2  |                |             | 22/04/2015                 |
| T_650°C_6h n.1 | 154  | 300  | 256,0  | 13,7  |                |             |                            |
| T_650°C_6h n.2 | 154  | 300  | 246,3  | 13,2  |                |             |                            |
| T_650°C_6h n.3 | 154  | 300  | /      | /     |                |             |                            |
| T_650°C_6h n.4 | 154  | 300  | /      | /     |                |             |                            |

Figura 5.1: Risultati delle prove a compressione.

| serie 4D_BKT |      |                 |                            |               |                                    |   |
|--------------|------|-----------------|----------------------------|---------------|------------------------------------|---|
| 20°C         |      |                 |                            |               |                                    |   |
| t            | test | f <sub>ck</sub> | f <sub>ck(t)</sub> [media] | dev. Standard | f <sub>c(t)</sub> /f <sub>ck</sub> | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub> [media] |
| [°C]         | [-]  | [MPa]           | [MPa]                      | [-]           | [-]                                | [-]                                       |
| 20           | n.1  | 55,52           | 55,44                      | 0,19          | 1,00                               | 1,00                                      |
| 20           | n.2  | 55,18           |                            |               | 1,00                               |   |
| 20           | n.3  | 55,62           |                            |               | 1,00                               |   |
| -            | -    | -               |                            |               |                                    |   |
| 350°C - 1h   |      |                 |                            |               |                                    |   |
| t            | test | f <sub>ck</sub> | f <sub>ck(t)</sub> [media] | dev. Standard | f <sub>c(t)</sub> /f <sub>ck</sub> | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub> [media] |
| [°C]         | [-]  | [MPa]           | [MPa]                      | [-]           | [-]                                | [-]                                       |
| 350          | n.1  | 49,66           | 47,00                      | 2,73          | 0,90                               | 0,85                                      |
| 350          | n.2  | 43,25           |                            |               | 0,78                               |   |
| 350          | n.3  | 48,10           |                            |               | 0,87                               |   |
| -            | -    | -               |                            |               |                                    |   |
| 350°C - 6h   |      |                 |                            |               |                                    |   |
| t            | test | f <sub>ck</sub> | f <sub>ck</sub> [media]    | dev. Standard | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub>  | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub> [media] |
| [°C]         | [-]  | [MPa]           | [MPa]                      | [-]           | [-]                                | [-]                                       |
| 350          | n.1  | 44,98           | 46,24                      | 1,28          | 0,81                               | 0,83                                      |
| 350          | n.2  | 45,54           |                            |               | 0,82                               |   |
| 350          | n.3  | 46,09           |                            |               | 0,83                               |   |
| 350          | n.4  | 48,35           |                            |               | 0,87                               |   |
| -            | -    | -               |                            |               |                                    |   |
| 650°C - 1h   |      |                 |                            |               |                                    |   |
| t            | test | f <sub>ck</sub> | f <sub>ck</sub> [media]    | dev. Standard | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub>  | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub> [media] |
| [°C]         | [-]  | [MPa]           | [MPa]                      | [-]           | [-]                                | [-]                                       |
| 650          | n.1  | 15,54           | 14,33                      | 0,95          | 0,28                               | 0,26                                      |
| 650          | n.2  | 13,24           |                            |               | 0,24                               |   |
| 650          | n.3  | 14,20           |                            |               | 0,26                               |   |
| -            | -    | -               |                            |               |                                    |   |
| 650°C - 6h   |      |                 |                            |               |                                    |   |
| t            | test | f <sub>ck</sub> | f <sub>ck</sub> [media]    | dev. Standard | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub>  | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub> [media] |
| [°C]         | [-]  | [MPa]           | [MPa]                      | [-]           | [-]                                | [-]                                       |
| 650          | n.1  | 13,74           | 13,48                      | 0,26          | 0,25                               | 0,24                                      |
| 650          | n.2  | 13,22           |                            |               | 0,24                               |   |
| 650          | n.3  | /               |                            |               | /                                  |   |
| 650          | n.4  | /               |                            |               | /                                  |   |

Tabella 5.2: Valori di resistenza cilindrica a compressione in funzione della temperatura e delle modalità di prova.

Tabella 5.2: Valori di resistenza cilindrica a compressione in funzione della temperatura e delle modalità di prova.

| Serie 4D_BKT.1 |      |                 |                            |               |                                    |   |
|----------------|------|-----------------|----------------------------|---------------|------------------------------------|---|
| t              | test | f <sub>ck</sub> | f <sub>ck(t)</sub> [media] | dev. Standard | f <sub>c(t)</sub> /f <sub>ck</sub> | f <sub>c,θ</sub> /f <sub>ck</sub> [media] |
| [°C]           | [-]  | [MPa]           | [MPa]                      | [-]           | [-]                                | [-]                                       |
| 20             | n.1  | 55,52           | 55,44                      | 0,19          | 1,00                               | 1,00                                      |
|                | n.2  | 55,18           |                            |               | 1,00                               |   |
|                | n.3  | 55,62           |                            |               | 1,00                               |   |
| 350            | n.1  | 49,66           | 46,57                      | 2,07          | 0,90                               | 0,84                                      |
|                | n.2  | 43,25           |                            |               | 0,78                               |   |
|                | n.3  | 48,10           |                            |               | 0,87                               |   |
|                | n.4  | 44,98           |                            |               | 0,81                               |   |
|                | n.5  | 45,54           |                            |               | 0,82                               |   |
|                | n.6  | 46,09           |                            |               | 0,83                               |   |
|                | n.7  | 48,35           |                            |               | 0,87                               |   |
| 650            | n.1  | 15,54           | 13,99                      | 0,86          | 0,28                               | 0,25                                      |
|                | n.2  | 13,24           |                            |               | 0,24                               |   |
|                | n.3  | 14,20           |                            |               | 0,26                               |   |
|                | n.4  | 13,74           |                            |               | 0,25                               |   |
|                | n.5  | 13,22           |                            |               | 0,24                               |   |
|                | n.6  | /               |                            |               | /                                  |   |
|                | n.7  | /               |                            |               | /                                  |   |

Tabella 5.3: Valori delle resistenze cilindriche a compressione in funzione della temperatura.

Per la modalità con 6 ore di stabilizzazione, 2 dei 4 provini sono esplosi. Durante questa prova i cilindri non erano monitorati da termocoppie in quanto simulando la prova precedente ( $T_{max}=650^{\circ}C$ , tempo di stabilizzazione 1h) con uguale rampa di salita della temperatura e stessa configurazione di provini, si può assumere un comportamento analogo dei campioni. Si è però sempre monitorata la temperatura della camera interna tramite una termocoppia inserita tramite un foro della parete posteriore. Si è studiata quindi l'acquisizione della prova con 1 ora di stabilizzazione e si è sovrapposto l'andamento del forno durante la prova in esame. Nel grafico seguente vengono riportati le curve  $T(t)$  durante il riscaldamento:

- Del forno - test\_650°C\_6h
- Del forno - test\_650°C\_1h
- Del provino - 650°C\_1h

Si nota come la termocoppia del forno (linea continua rossa), dopo 140 minuti dall'accensione, registri un abbassamento della temperatura. Questo abbassamento è dovuto all'esplosione del provino che ha spostato la termocoppia verso l'esterno, non registrando più la temperatura della camera interna. Questo fatto ha solo danneggiato il rivestimento refrattario delle pareti, mentre il riscaldamento ha continuato senza problemi, in quanto il sistema di rilevamento proprio del forno indicava la temperatura corretta e un successivo test di collaudo ha confermato il corretto funzionamento. Per quanto riguarda il provino, al momento dell'esplosione, aveva raggiunto una temperatura interna di circa  $200^{\circ}C$  contro una temperatura esterna di circa  $250^{\circ}C$ ; il fenomeno quindi è dovuto sia ad una rampa di salita del forno elevata, sia per una differente temperatura tra l'esterno e l'asse centrale del campione.

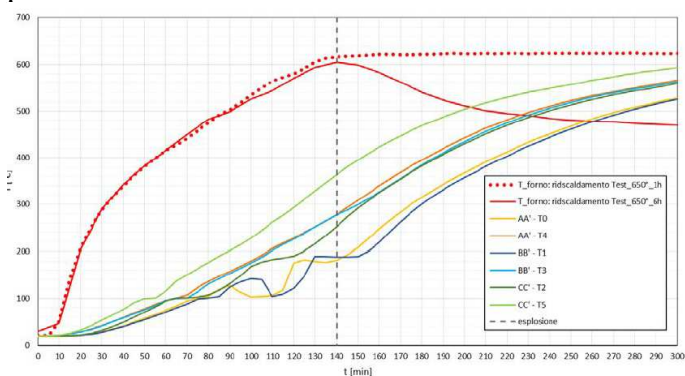


Figura 5.1: fase di riscaldamento - andamento della temperatura del forno e del provino test\_650°C\_1h sovrapposta con l'andamento del forno del test\_650°C\_6h.



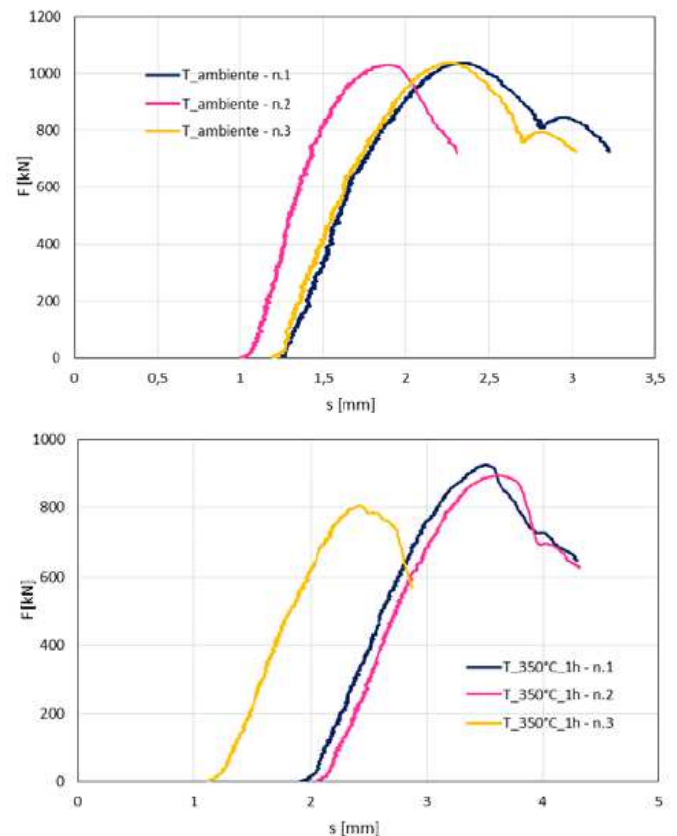
Figura 5.2: (a) e (b) conseguenze dell'esplosione; (d) e (e) termocoppia interna al forno.

Alla temperatura di  $350^{\circ}C$  i provini non hanno evidenziato spalling, viceversa, il fenomeno è presente nei campioni a  $650^{\circ}C$ , soprattutto sulla zona superficiale rivolta verso le resistenze del forno; inoltre durante il test a  $650^{\circ}C$ , due dei provini sono esplosi. Di seguito vengono riportati tutti i campioni testati;



Figura 5.3: campioni testati: (a) T ambiente; (b) e (c)  $350^{\circ}C$ , 1° e 2° modalità; (d) e (e)  $650^{\circ}C$ , 1° e 2° modalità;

Nelle figure seguenti sono riportate le curve carico/spostamento acquisite con i metodi precedentemente descritti e successivamente le curve carico/deformazione:



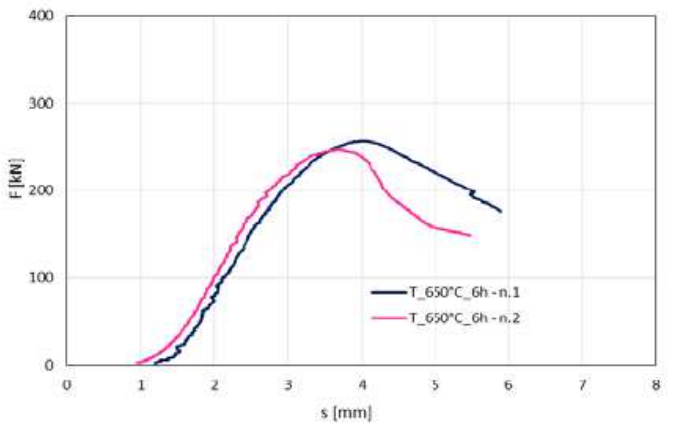
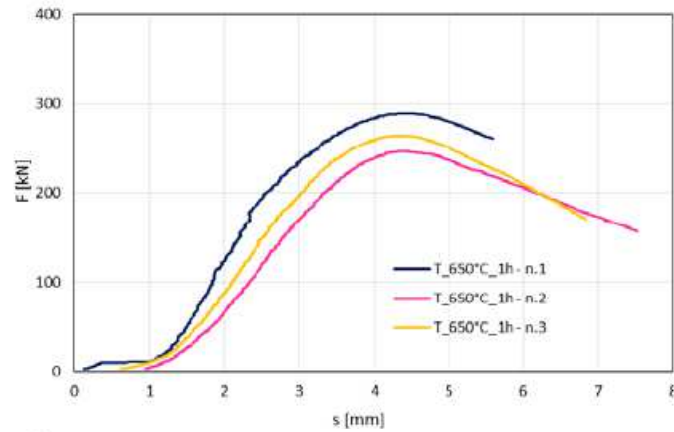
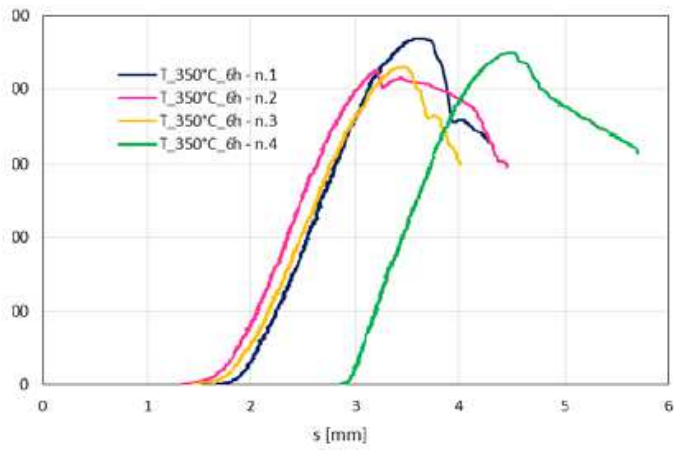


Figura 5.4: Resistenza a compressione cilindrica a varie temperature – curve carico/spostamento: (a) a temperatura ambiente; (b) e (c) a 350°C, 1 ora e 6 ore di stabilizzazione; (d) e (e) a 650°C, 1 ora e 6 ore di stabilizzazione;

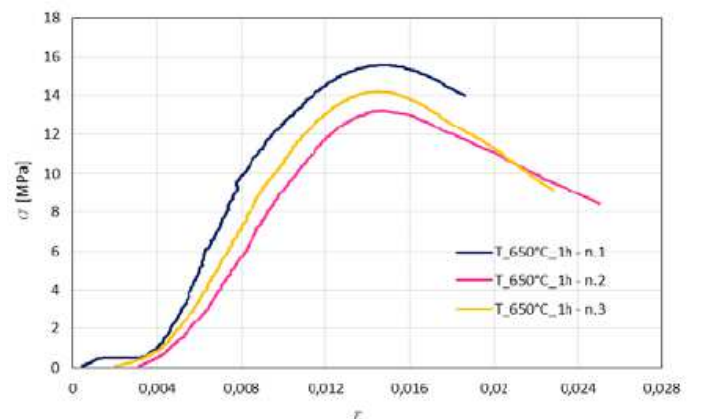
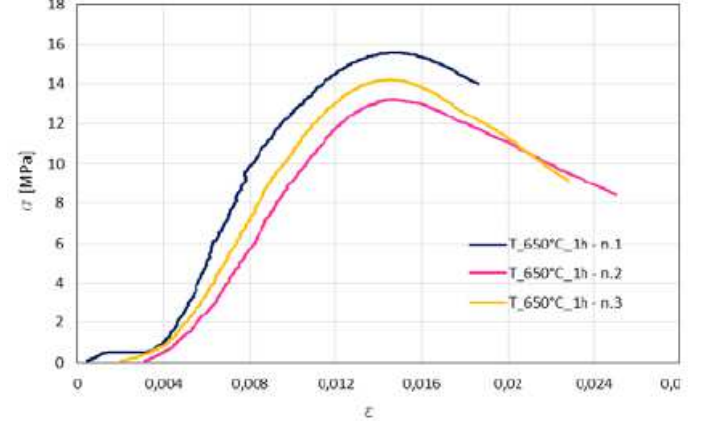
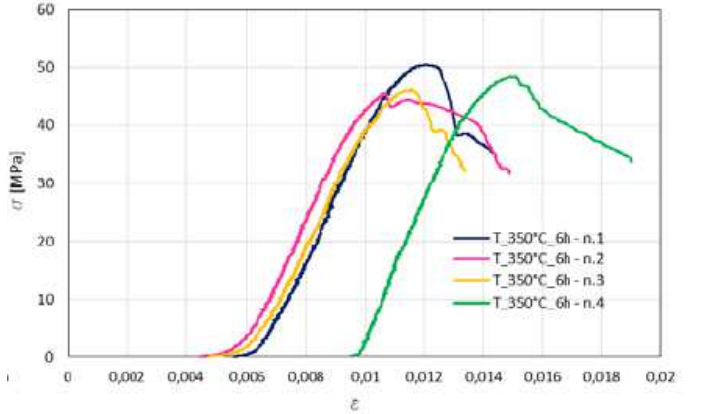
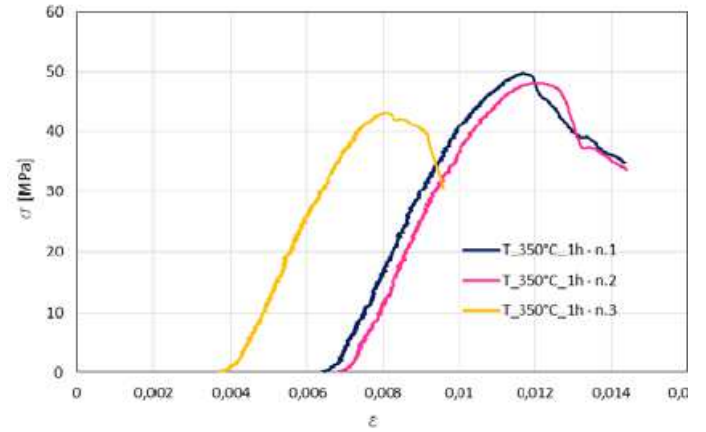
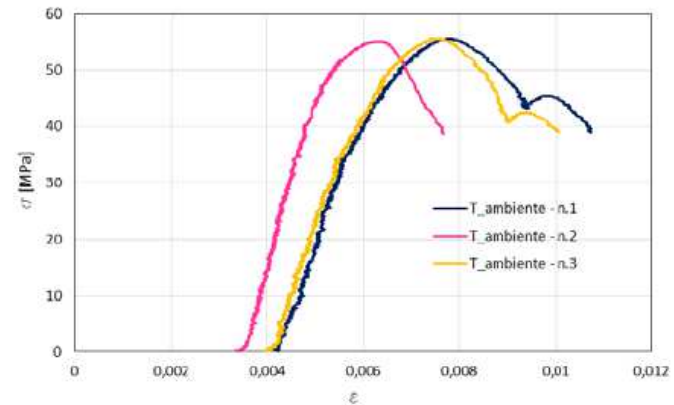


Figura 5.5: Resistenza a compressione cilindrica a varie temperature – curve sperimentali carico/deformazione: (a) a temperatura ambiente; (b) e (c) a 350°C, 1 ora e 6 ore di stabilizzazione; (d) e (e) a 650°C, 1 ora e 6 ore di stabilizzazione;

Le curve sperimentali sono state successivamente traslate nello zero, sottraendo gli spostamenti iniziali che gli estensimetri hanno registrato durante la fase di avvicinamento della superficie superiore del cilindro, con il piatto superiore della pressa:

## REFERENCES

- Eurocodice 2: Progettazione delle strutture di calcestruzzo -Parte 1-2: Regole generali - Progettazione strutturale contro l'incendio - UNI EN 1992-1-2.
- Model Code 2010
- State of art report – Bulletin 46 – Fire designe of concrete structures – structural behavior and assessment.
- [1] RILEM's Report of Materiala t High Temperature – Concrete, [1985];
- [2] Bazant e Kaplan, [1996];
- [3] Contributi sulla resistenza a compressione: Zoldeners, Dougill, Hrmanthy, Crook, Kasami et al., Schneidere Diederichs, presenti in “RILEM, [1985]”;
- [4] Khoury et al., [1985], Khoury, [2000];
- [5] Felicetti e Gambarova, [1998]; Harada, [1972]; RILEM, [1985];
- [6] Chan e Carino, [2002];
- [7] Blanco A, Pujadas P, Cavalaro S, de la Fuente A, Aguado A. Constitutive model for fibre reinforced concrete based on the Barcelona test. *Cem Concr Compos* 2014;53:327–40.
- [8] Carmona S, Aguado A, Molins C. Generalization of the Barcelona test for the toughness control of FRC. *Mater Struct* 2012;45(7):1053–69.to generalize the Barcelona test using axial displacement. *J Civ Eng Manage* 2013;19(2):259–71.
- [9] Chen WF. Double punch test for tensile strength of concrete. *ACI Mater J* 1970; 67(2):993–5.
- [10] Chen WF, Yuan RL. Tensile strength of concrete: double punch test. *J Struct Div* 1980; 106(8):1673–93.