



Analisi della resistenza meccanica a compressione di calcestruzzi ad alta temperatura

Martino Labanti, Antonino Coglitore, Matteo Scaf , Giancarlo Raiteri
ENEA - Centro Ricerche Faenza

RIASSUNTO. L'analisi della sicurezza di grandi strutture civili, come le gallerie stradali, ferroviarie, metropolitane, richiede la conoscenza delle propriet  termiche e meccaniche dei materiali strutturali alle temperature di incendio, al fine di valutarne il comportamento durante l'incidente e la conseguente resistenza residua.

Nell'ambito del progetto SITI (Sicurezza in Tunnel intelligente) cofinanziato dal MUR, ENEA CRF ha sviluppato una attrezzatura per effettuare prove di compressione su campioni in calcestruzzo fino ad 800  C.

Nel presente lavoro vengono descritti lo sviluppo e calibrazione dell'attrezzatura e l'esecuzione di prove di compressione in temperatura su un calcestruzzo Rck30. I valori di sollecitazione a rottura ed il modulo elastico in funzione della temperatura vengono poi valutati anche mediante il confronto con le propriet  previste negli Eurocodici.

PAROLE CHIAVE. Calcestruzzo; Compressione; Spalling; Pseudo-plasticit .

INTRODUZIONE

Nell'ambito del progetto SITI (Sicurezza in Tunnel intelligente) cofinanziato dal MINISTERO DELL'ISTRUZIONE DELL'UNIVERSIT  E DELLA RICERCA a valere sui fondi della legge 297/99 riguardo alla sicurezza delle grandi opere civili (gallerie stradali, ferroviarie, e metropolitane) sono state valutate le propriet  termiche e meccaniche del calcestruzzo sottoposto ad elevata temperatura, al fine di valutarne il comportamento durante l'incidente e la conseguente resistenza residua.

Nell'ambito di una valutazione dei metodi di caratterizzazione dei materiali in uso nelle gallerie, sono state inizialmente prese in esame le diverse tipologie di prova standard a temperatura ambiente, regolate dalle norme UNI o ASTM.

Sono state esaminate le diverse prove di caratterizzazione meccanica a temperatura ambiente e la geometria e le dimensioni dei campioni.

Si   osservato che le prove ad alta temperatura non sono standardizzate, in nessun paese, per cui   stata effettuata una ricerca bibliografica per individuare le principali metodologie di prova per la valutazione della resistenza del calcestruzzo ad alta temperatura.

Sono state effettuate inizialmente considerazioni ed analisi sui diversi tipi di calcestruzzo: calcestruzzo, tradizionale, detto "normal strenght concrete" (NSC) e calcestruzzo ad alta resistenza, detto "high strenght concrete" (HSC), soprattutto in relazione alla resistenza al fuoco ed alle alte temperature, con particolare riferimento al fenomeno dello spalling.

Si   poi passati all'esame dei metodi di caratterizzazione a compressione del NSC attualmente impiegato per la realizzazione dei diversi tipi di gallerie. Infine sono state eseguite diverse prove di compressione sia a temperatura ambiente sia ad alta temperatura su calcestruzzo Rck30. I risultati ottenuti, modulo elastico e sollecitazione a rottura, sono stati confrontati con le propriet  previste negli Eurocodici.



ANALISI DELLE NORMATIVE ESISTENTI

Le normative esistenti riguardano essenzialmente prove a temperatura ambiente. Sono state esaminate le seguenti norme italiane:

- ✓ UNI 6130, che riguarda forma e dimensioni dei provini di calcestruzzo per prove di resistenza meccanica [1];
- ✓ UNI 6132-72, che riguarda la prova di compressione su provini di calcestruzzo [2];
- ✓ UNI 6133, che riguarda la prova di flessione su provini di calcestruzzo [3];
- ✓ UNI 6134-72, che riguarda la prova di compressione su monconi di provini in calcestruzzo rotti per flessione [4];
- ✓ UNI 6135-72, che riguarda la prova di trazione su provini di calcestruzzo [5].

La norma UNI 6130 definisce la forma e le dimensioni dei provini di calcestruzzo per le prove di resistenza meccanica previste dalle norme UNI 6132-72, UNI 6133, UNI 6134-72, UNI 6135-72.

I provini per prove di resistenza a compressione e trazione indiretta devono avere forma cubica con dimensione del lato dipendente dalla dimensione massima dell'aggregato di cui è costituito il calcestruzzo.

In casi particolari possono essere impiegati provini cilindrici con diametro proporzionato alla dimensione massima dell'aggregato ed altezza pari al doppio del diametro.

La norma UNI 6132-72 riguarda il procedimento da seguire per la determinazione della resistenza a compressione dei provini di calcestruzzo.

La forma dei provini può essere cubica o cilindrica (vedi UNI 6130), con tolleranza ammessa di planarità di 0,05mm, sulle facce che vendono a contatto con i piani della pressa. Eventuale spianatura per rientrare nella tolleranza può essere fatta mediante lavorazione meccanica di rettifica o mediante applicazione di pasta di cemento o gesso, o altro materiale idoneo, ma tale da essere perfettamente aderente al calcestruzzo e sufficientemente resistente da non frammentarsi durante la prova.

I provini devono essere conservati in ambiente analogo a quello della prima stagionatura, o comunque devono essere mantenuti per almeno 48 ore, fino a due ore prima della prova, a $20 \pm 2^\circ\text{C}$ e ad un'umidità relativa $\geq 90\%$.

Per confronto sono state prese in esame le corrispondenti norme ASTM.

La norma C39 – 86 [6] (Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens) è relativa alla prova di compressione e consiglia provini cilindrici con tolleranza di cilindricità del 2% e angolo fra la base e l'asse del cilindro di $90^\circ \pm 30'$.

La norma prevede che uno dei due piani della pressa sia montato su uno snodo sferico così da favorire il centraggio del provino.

Nel seguito si sono prese in considerazione le metodologie per la caratterizzazione in temperatura, avendo come base di partenza le illustrate metodologie standard di caratterizzazione a temperatura ambiente.

ANALISI DELLE METODOLOGIE DI CARATTERIZZAZIONE DEI MATERIALI STRUTTURALI PER I TUNNEL IN CONDIZIONE DI INCIDENTE

Quando è richiesta ai materiali strutturali una elevata resistenza, la scelta del materiale può orientarsi verso un calcestruzzo ad alta resistenza High-Strength Concrete (HSC) che, come illustrato in [7], fornisce altre prestazioni strutturali, specialmente in relazione a resistenza e durata, se confrontato con il calcestruzzo tradizionale, detto Normal-Strength Concrete (NSC). L'elevata resistenza a compressione dell'HSC consente di progettare sezioni resistenti più piccole. Quando ad una struttura è richiesta anche resistenza alle alte temperature, ed al fuoco in particolare, bisogna considerare il fatto che il comportamento del calcestruzzo ad alta resistenza differisce da quello normale e può non fornire una buona resistenza al fuoco, soprattutto a causa del fenomeno dello spalling, che è uno dei principali problemi per l'HSC [8].

Il degrado della resistenza del calcestruzzo all'aumentare della temperatura dipende, anche nelle più favorevoli condizioni dry, da numerosi fattori legati alla morfologia dello stesso fra cui, ad esempio dalla dimensione e tipologia degli aggregati.

In generale, sopra i 300°C , la dilatazione termica differenziale fra aggregati e legante cementizio porta a microfessurazioni con conseguente riduzione della resistenza.

Lo spalling consiste invece in un danneggiamento localizzato del calcestruzzo, con riduzione della sezione resistente, dovuto alla compresenza di alta temperatura e trasferimento di massa di vapore all'interno del materiale che, concentrandosi, può innalzare la pressione fino alla rottura e distacco di parte della struttura.



L'eventuale distacco degli strati superficiali del calcestruzzo espone inoltre il cuore del materiale alle temperature del fuoco, aumentando la velocità di trasmissione del calore alle armature che possono quindi danneggiarsi aumentando i rischi per persone e soccorritori.

Lo spalling è attribuibile alla crescita della pressione dell'umidità si trova imprigionata nelle porosità del calcestruzzo in forma di vapore, ed il calcestruzzo ad alta resistenza, a causa della sua bassa permeabilità, è più suscettibile al fenomeno rispetto al calcestruzzo normale.

L'alta pressione del vapor d'acqua, generato durante l'esposizione al fuoco, non può sfogarsi facilmente all'esterno, a causa dell'alta densità e della bassa permeabilità dell'HSC.

La pressione spesso raggiunge la pressione di saturazione del vapore, che a 300°C è circa 8 MPa, mentre il materiale ha una resistenza a trazione di 5 MPa; si ha quindi distacco di materiale, anche in forma esplosiva.

In generale il comportamento al fuoco, ed in particolare allo spalling, dell'HSC dipende da:

- ✓ resistenza a compressione del calcestruzzo
- ✓ contenuto di umidità
- ✓ densità del calcestruzzo
- ✓ intensità del fuoco
- ✓ dimensione della struttura
- ✓ rinforzo laterale
- ✓ condizioni di carico
- ✓ tipo di aggregato che costituisce il calcestruzzo

Per quello che riguarda la resistenza a compressione, calcestruzzi con resistenza maggiore di 55 MPa sono quindi, in generale, più suscettibili allo spalling ed hanno, di conseguenza, una minore resistenza al fuoco.

Una struttura che già sia sottoposta ad un carico, in presenza del fuoco vedrà quindi sommarsi al carico statico e di esercizio, quello dovuto alla pressione dell'umidità contenuta al suo interno.

Ciò può essere investigato anche in laboratorio variando le modalità di prova, ad esempio riscaldando il materiale sottoponendolo, o meno, ad un precarico [9].

Per aumentare la resistenza del calcestruzzo si utilizzano, in generale, componenti aggiuntivi come aggregati e rinforzi metallici che consentano di ottenere la migliore resistenza a compressione, ed aggiungere fibre di propilene per migliorare la resistenza al fuoco [8].

Il problema dello spalling può essere molto limitato mediante l'uso di fibre di propilene che a circa 150°C fondono e creano dei canali preferenziali per ridurre la pressione e per l'uscita del vapore.

Riepilogando, l'utilizzo del calcestruzzo ad alta resistenza per strutture dove sia richiesta una resistenza al fuoco deve essere effettuato tenendo conto degli aspetti positivi e negativi che questo comporta, e apportando le soluzioni opportune per migliorarne il comportamento.

Passando ad esaminare le modalità di caratterizzazione dei materiali in condizione di incidente, si evidenzia che le prove vengono effettuate principalmente a compressione, e talvolta a flessione.

Le principali metodologie di prova sono riportate in [9].

Tutte le prove sono da eseguirsi con i campioni in condizioni di temperatura stabilizzate.

Le variabili delle prove sono, oltre al tipo di calcestruzzo utilizzato, il metodo di prova e la velocità di applicazione del carico.

I provini possono essere di tipo prismatico o cilindrico (es. 100x200 mm²) e possono essere strumentati con termocoppie per monitorare la temperatura nella sezione.

Prima della prova i provini sono misurati e pesati.

Il riscaldamento va effettuato con un determinato tasso di incremento (es. 5°C/min), fino alla stabilizzazione della temperatura.

I metodi di prova elencati sono confermati anche da altri autori [10-13], che hanno effettuato prove analoghe, adattando le procedure previste dalle norme per le prove a temperatura ambiente, alle prove ad alta temperatura.

Le prove di seguito descritte sono state eseguite con il calcestruzzo in condizioni dry, quindi senza rischi di attivare il fenomeno di spalling.

ATTREZZATURA E CAMPIONI

Per le prove di compressione è stata utilizzata una macchina di prova universale MTS a quattro colonne da 1000kN con cella di carica da 500kN e spostamento massimo del pistone di 150 mm [14][15]. Per la determinazione del modulo elastico si è utilizzato un estensimetro con aste in quarzo, 25mm di base di misura, posizionato al centro

del campione.

Per effettuare le prove a caldo è stata progettata e realizzata una attrezzatura in lega di nichel, Fig. 1, utilizzabile fino alla temperatura di 800°C, Foto 1e 2, opportunamente dotata di snodo sferico per eliminare la tolleranza di planarità delle facce di compressione del campione e quindi avere un sollecitazione uniforme distribuita su tutto il campione.

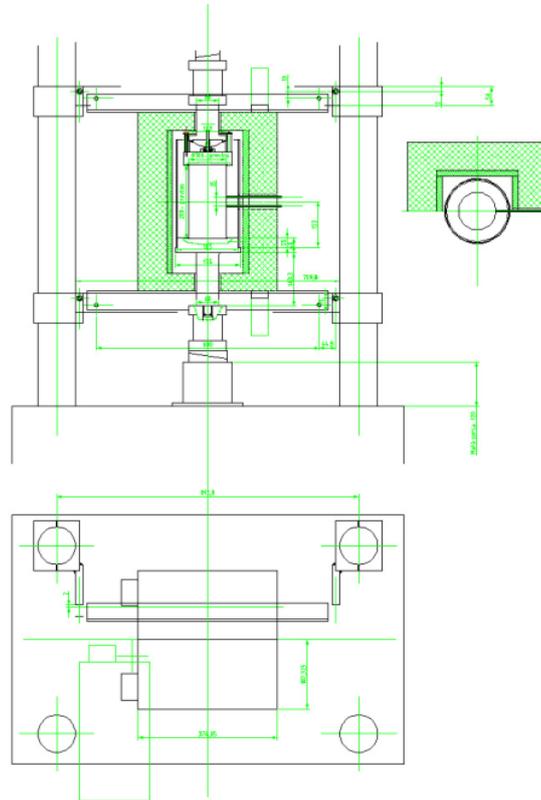


Figura 1: Complessivo definitivo del sistema di prove a compressione su calcestruzzo fino a 800 °C.

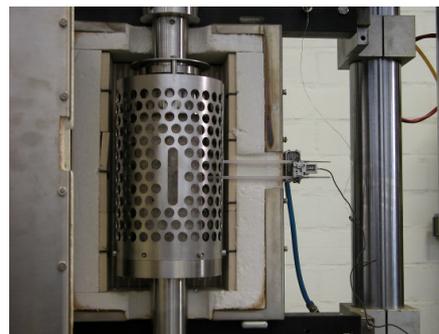


Foto 1 e 2: Attrezzatura realizzata per prove di compressione fino 800°C.

Per il riscaldamento è stato utilizzato un forno ATS in grado di raggiungere 1000°C.

Le prove sono stati effettuate su un calcestruzzo tipo Rck30 attualmente utilizzato nella realizzazione di nuove gallerie ferroviarie per l'alta velocità e stradali per la variante di valico.

Il calcestruzzo ha un carico di rottura nominale a temperatura ambiente di 30MPa ed un Rapporto Acqua/Cemento < 0,5. I campioni di calcestruzzo di forma cilindrica (diametro x lunghezza) di 108 x 215 mm forniti non rientravano all'interno della tolleranza ammessa di planarità di 0,05mm sulle facce che vendono a contatto con i piani di compressione. Quindi è stata eseguita mediante lavorazione meccanica una opportuna rettifica dei campioni.



METODOLOGIA DI PROVA ED ANALISI DEI RISULTATI

Inizialmente, prima dello svolgimento delle prove di compressione sui campioni di calcestruzzo sono state effettuate delle prove di riscaldamento del campione alle temperature di 300, 450, 600 e 800° C. Le prove sono state eseguite su campioni reali al fine di determinare l'andamento della temperatura nel tempo ed i tempi di stabilizzazione, Grafico 1. Prima di effettuare le prove all'interno del campione sono state inserite 8 termocoppie, per verificare sia la distribuzione della temperatura all'interno del campione e sia il tempo necessario per raggiungere la temperatura desiderata.

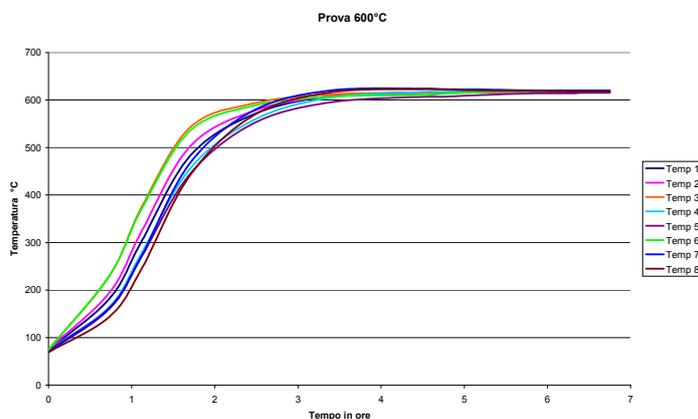


Grafico 1: Andamento della temperatura del campione in funzione del tempo rilevata dalle diverse termocoppie.

Si riporta nel grafico 2 l'andamento della temperatura all'interno del campione, in funzione del tempo, nelle prove effettuate alle diverse temperature.

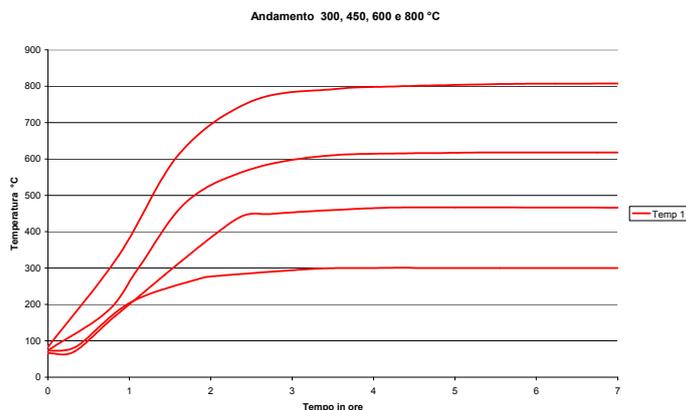


Grafico 2: Confronto della temperatura rilevata dalla termocoppia centrale a differente temperatura.

Come si evince dal grafico 2, i tempi di stabilizzazione dipendono dalla temperatura impostata ed il tempo massimo di stabilizzazione di 5 ore si ha per la temperatura di 800°C.

Una volta individuati i tempi necessari affinché il campione si trovi ad una temperatura stabile ed uniforme sono state fatte delle prove preliminari a temperatura ambiente. Le prove sono state condotte in controllo di corsa con una velocità di avanzamento del pistone di 0,25 mm/min.

L'estensimetro è stato rimosso poco prima della rottura del provino, al fine di evitare un possibile danneggiamento durante la rottura del provino stesso.

Per le prove ad alta temperatura i campioni sono stati riscaldati con una rampa di 5°C al minuto ed una volta arrivati a temperatura si è atteso il tempo di stabilizzazione ricavato dalla prova di riscaldamento precedente. Infine si è proceduto con le analoghe condizioni di prova a temperatura ambiente.

Sono state effettuate diverse prove a differente temperatura: in Tab. 1, vengono riportati i valori significativi per temperatura del modulo elastico, E [GPa] e la sollecitazione massima, Stress Max [MPa]. Nel grafico 3 vengono riportate e confrontate le curve stress-strain per singola temperatura. Dallo studio dell'andamento delle singole curve si evidenzia il passaggio da un comportamento di tipo fragile a bassa temperatura, che diventa sempre più di tipo pseudo plastico-



plastico all'aumentare della temperatura, con una conseguente diminuzione, prevedibile, del modulo elastico e della sollecitazione massima. Le prove a 800°C non sono state eseguite perché il campione dopo il solo riscaldamento si presentava del tutto disgregato, Foto 6.

Sono state anche effettuate diverse prove a temperatura ambiente su campioni in assenza di rettifica sui piani di compressione, Tab. 2, al fine di verificare la eventuale diminuzione della sollecitazione massima rispetto ai campioni rettificati. Come viene evidenziato il valore medio risulta inferiore circa del 17% rispetto ai campioni rettificati.

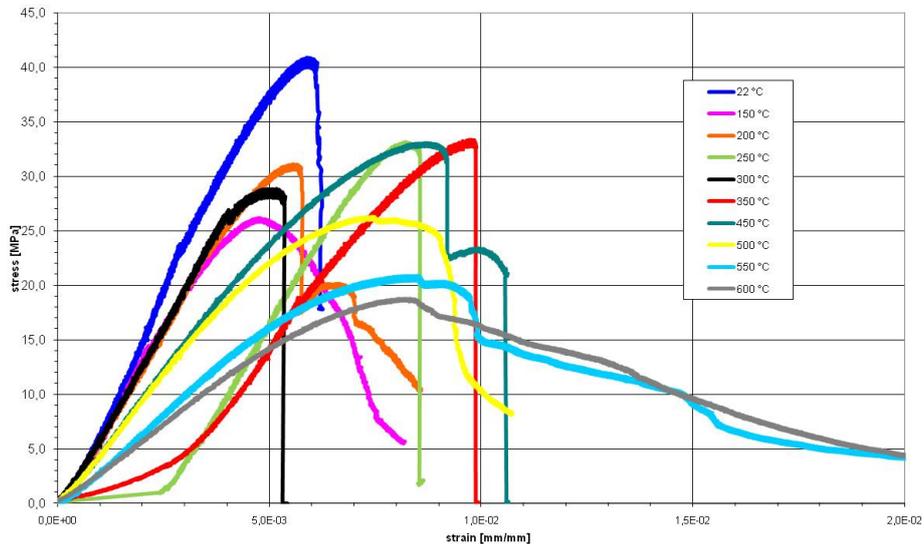


Grafico 3: Andamento della sollecitazione in funzione della deformazione a diverse temperature.

Temp. °C	stress max MPa	E GPa
22	39,3	24,3
150	26,0	24,0
200	31,0	23,0
250	32,0	20,5
300	29,0	19,0
350	33,0	9,0
450	32,0	7,0
500	26,00	10,0
550	20,8	5,7
600	19,0	6,0

Tabella 1: Dati sperimentali prove a diversa temperatura

Infine è stato riportato su un grafico l'andamento della sollecitazione massima e del modulo elastico in funzione della temperatura. Questi valori sono stati anche confrontati, per normalizzazione, con i valori che vengono riportati sull'Eurocodice [16-19] in base ai due tipi di aggregati, calcarei e silicei, (Grafico 4). Dal confronto si è evidenziato che i valori di sollecitazione a rottura ottenuti sul calcestruzzo Rck30 sembrano inferiori a quelli dell'Eurocodice per le temperature inferiori a 300°C mentre si allineano quelli a temperature superiori.

Un maggior numero di prove permetterebbe di meglio definire questi aspetti.

Si può quindi dedurre che per il calcestruzzo provato il danneggiamento causato dalla temperatura si verifica in maniera analoga a quanto previsto dall' Eurocodice, con la possibilità di una minore resistenza per temperature relativamente basse.



N° campione	stress max	Temp.
	MPa	°C
20	34,52	22
21	35,74	22
23	30,33	22
24	29,84	22
25	32,15	22
30	33,59	22
35	35,05	22
media	33,03	

Tabella 2: Campioni con rettifica grossolana.



Foto 3 e 4: Esempio di rottura del campione con particolare.



Foto 5: Esempio di rottura del campione.



Foto 6: Campione dopo il riscaldamento a 800° C.

CONCLUSIONI

Analizzando i dati ottenuti dalle prove di compressione a differente temperatura del calcestruzzo, tipo Rck30 attualmente utilizzato nella realizzazione di nuove gallerie ferroviarie per l'alta velocità e stradali per la variante di valico, si deduce che:

- ✓ a temperatura ambiente presenta, come prevedibile, un comportamento di tipo fragile;
- ✓ con l'aumentare della temperatura il comportamento diviene sempre più di tipo pseudo - plastico con conseguente diminuzione del modulo elastico e della sollecitazione massima;
- ✓ la riduzione di resistenza e di modulo elastico diventa significativa per temperature superiori a 300 °C;
- ✓ a temperatura inferiore a 300°C i valori della sollecitazione sembrano inferiori rispetto a quelli riportati dall'Eurocodice;
- ✓ a temperature superiori a 300°C il comportamento si allinea a quello previsto dall'Eurocodice.

In definitiva si può concludere che per il calcestruzzo provato il danneggiamento causato dalla temperatura si verifica in maniera significativa al di sopra dei 300 °C con modalità analoghe a quanto previsto dall'Eurocodice.

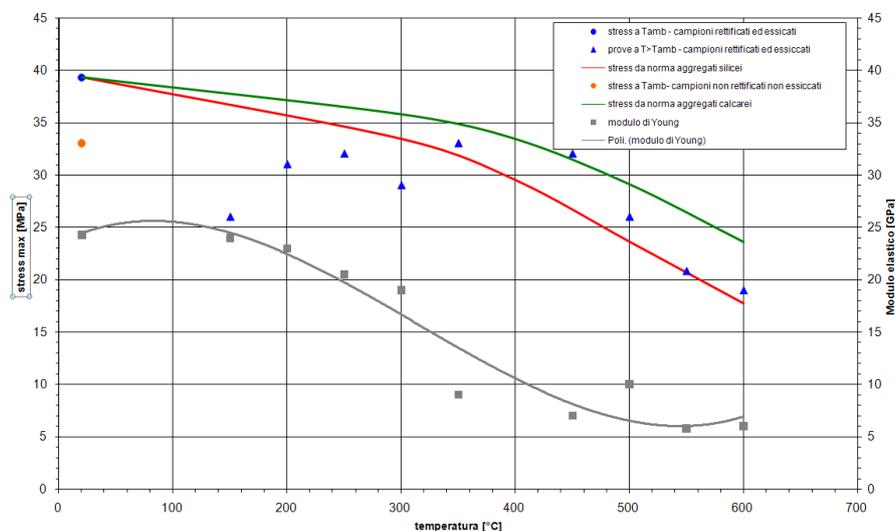


Grafico 4: Andamento della sollecitazione massima e del modulo elastico in funzione della temperatura.

BIBLIOGRAFIA

- [1] UNI 6130 Provini di calcestruzzo per prove di resistenza meccanica
- [2] UNI 6132-72 Prove distruttive sui calcestruzzi – Prova di compressione
- [3] UNI 6133 Prove distruttive sui calcestruzzi – Prova di flessione
- [4] UNI 6134-72 Prove distruttive sui calcestruzzi – Prova di compressione sui monconi di provini rotti per flessione
- [5] UNI 6135-72 Prove distruttive sui calcestruzzi – Prova di trazione
- [6] ASTM C39 – 86 Standard Test Method For Compressive Strength Of Cylindrical Concrete Specimens
- [7] V.K.R. Kodur, *Construction Technology Update*, (1999).
- [8] AA.VV. , In: *International Symposium on Ultra High Performance Concrete*, University of Kassel, Germany, Kassel (Germany), (2004).
- [9] Long T.Phan, Nicholas J.Carino, *Mechanical properties of high strength concrete at elevated temperatures*, Building And Fire Research Laboratory, National Institute Of Standards And Technology (NIST), March, Gaithersburg, MD (USA), (2001)
- [10] AA.VV, *Progress Report for Laboratory Testing of Concrete Properties at Elevated Temperatures*, Sandia National Laboratories, Albuquerque, Feb, Albuquerque, NM (USA), (1999)
- [11] Jianzhuang Xiao, Gert Konig, , *Fire Safety J.*, 30 (2004) 89
- [12] M. Saad, S.A. Abo-El-Eneini, G.B. Hanna and M.F. Kotkatat, *Cement and Concrete Research*, 26 (5) (1996) 669.
- [13] Evandro Tolentino, Fernando S. Lameiras, Abdias M. Gomes, Cláudio A. Rigo da Silva, Wander L. Vasconcelos, *Materials Research*, 5 (3) (2002) 301.
- [14] SIT Certificate for load cell 500 kN, s/n 1027871, CERMET N° 0706520FSE, 2007-07-04
- [15] SIT Certificate for LVDT 150 mm, s/n 250, CERMET N° 0706566FSE, 2007-07-06
- [16] EN 1992-1-1:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [17] EN 1992-1-2:2004 Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-2: General rules - Structural fire design
- [18] EN 1994-1-1:2004 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-1: General rules and rules for buildings
- [19] EN 1994-1-2:2005 Eurocode 4: Design of composite steel and concrete structures Part 1-2: General rules - Structural fire design