

Performance characterization of the concrete subjected to fire in terms of sustainability

“Caratterizzazione prestazionale del calcestruzzo sottoposto ad incendio in un’ottica di sostenibilità”

“Performance characterization of the concrete subjected to fire in terms of sustainability”

M. Nicolella, C. Scognamillo

D.I.C.E.A. – Università degli Studi di Napoli, Federico II
maurizio.nicolella@unina.it – claudio.scognamillo@unina.it

Topic: Sostenibilità

Abstract

The research, in a context of a sustainability of the building process, that should consider adequately the problem of building waste disposal, has the objective of determining the performance characteristics of concrete under the effect of fire, in order to evaluate the possibility of reutilization, and in positive case, what could the best uses be, considering the current regulations.

The experimentation, carried out on cubic samples with a side of 15 cm (according to UNI EN 12390, using aggregates with $D_{\max}=30$ mm), with Portland cement of mixture 42,5 in two types (one with Pozzolana CEM II/B-P 42.5 and one with limestone CEM II/A-LL 42.5), with class of resistance C25/30, is based on the following parameters: increase of temperature, nature of fire, heating speed, time of exposition. The tests that have been carried out were both destructive (sclerometric, ultrasounds, *Sonreb*) and non-destructive (crushing and thermogravimetric), and the experimental results obtained also show that:

- the concretes present a remaining mechanical resistance that is lower than 50% of the initial one, after they have been subjected to the full cycle of temperature increase;
- between 200°C and 600°C, there is a significant decomposition of the binding component (hydrated cement), while that of limestone is predictable for temperatures higher than 700°C;
- the phenomenon of the “explosive spalling” – verified on two samples – has far more devastating consequences than the simple decay of the mechanical characteristics as, considered in a structural element, it causes a reduction of the resisting section, with a consequential increase of tensions in the remaining part, and direct exposition of the reinforcement without protection, situations which can cause the structural collapse of the element.

Some uses in the field of transport have been hypothesized, also basing on the indications of the current regulations and on the detected statistics of the current uses.

1. Introduzione

La sperimentazione condotta, in un ambito generale di sostenibilità del processo edilizio, che tenga in giusto conto la questione dello smaltimento dei materiali di risulta, si pone l'obiettivo di caratterizzare le caratteristiche prestazionali del calcestruzzo sottoposto ad incendio, al fine di valutarne, sulla scorta del quadro normativo vigente, la possibilità di riutilizzo e, in caso affermativo, quali possano essere gli impieghi più idonei.

Nel quadro normativo europeo si pone particolare enfasi alla resistenza delle costruzioni nei confronti dell'evento incendio. Gli Eurocodici trattano questo aspetto relativamente all'oggetto specifico fornendo elementi di verifica della sicurezza "a caldo", ossia durante l'evento incendio stesso, per il tempo previsto dai requisiti di sicurezza imposti (REI). Salvo casi particolari, implicitamente si ammette che l'incendio di progetto comporti danni significativi alla costruzione, tali da dover impostare, successivamente all'evento, un progetto di demolizione o di recupero, ove possibile, di un idoneo livello prestazionale. Appare dunque di fondamentale interesse studiare il comportamento del calcestruzzo sottoposto ad incendio e la capacità di quest'ultimo di conservare un livello prestazionale adeguato al suo impiego, al fine di avere un parametro di valutazione dell'opportunità di provvedere a interventi manutentivi oppure di demolizione. In quest'ultimo caso, in particolare, esiste l'esigenza di individuare la possibilità di eventuali reimpieghi del materiale in un'ottica di sostenibilità.

1. Introduction

The experimentation that has been carried out, in a context of a sustainability of the building process, that should consider adequately the problem of building waste disposal, has the objective of determining the performance characteristics of concrete under the effect of fire, in order to evaluate the possibility of reutilization, and in positive case, what could the best uses be, considering the current regulations.

In the European regulations, a particular emphasis is given to the resistance of building constructions towards the fire event. The Eurocodes consider this aspect in relation to the specific component, providing elements of safety tests "on the field", that is to say during the fire event itself, for the time required by the safety demands (REI). Except particular cases, it is implicitly allowed that the fire, in the project, causes significant damage to the construction, enough to give start, after the event, to a project of demolition or restoration of a suitable performance level, if possible.

Then, studying the behavior of concrete under the effect of fire, and its capacity to keep an adequate performance level, appears as a matter of fundamental interest, in order to have a parameter of evaluation of the opportunity to proceed to maintenance or demolition interventions. In the latter case, in particular, there is the need to individuate the possibility of contingent reuses of the material, in logic of sustainability.

2. Materiali e metodi

Al fine di caratterizzare la variazione delle caratteristiche prestazionali dei calcestruzzi per effetto delle alte temperature generate da un incendio, è stata condotta presso i laboratori della Scuola Politecnica dell'Università di Napoli Federico II e della società Tecnolab s.r.l. di Napoli una sperimentazione, che ha preso in considerazione due tipi di calcestruzzo ordinario in cui il parametro discriminante è costituito dal legante (Cemento Portland alla Pozzolana CEM II/B-P42.5, Cemento Portland al calcare CEM II/A-LL 42.5). Come è noto, gli scenari di incendio sono numerosi e si contraddistinguono tra loro per cause, per tipo di combustibile interessato e per ambiente di propagazione. Focalizzare l'attenzione al campo edilizio ha permesso di delineare i parametri di caratterizzazione degli effetti dell'incendio più idonei allo specifico fine ultimo:

Incremento di temperatura: normalmente le temperature medie raggiunte non superano i 600-700°C. Si sono assunti valori fra 20°C e 600°C, ipotizzando sei classi di temperatura:

T=20°C	T=400°C
T=200°C	T=500°C
T=300°C	T=600°C

Natura dell'incendio: la curva standard riprodotta con maggior frequenza rappresenta l'incendio ideale di natura cellulosica (legno, carta e tessuto). Su di essa è basata la maggior parte di prove e metodi di calcolo deputati a definire la resistenza al fuoco degli elementi strutturali, e dunque si è studiato un incendio a **natura cellulosica**.

Velocità di riscaldamento: la norma ISO-834 prevede una crescita della temperatura da 20 a 842 °C in 30', con velocità media di riscaldamento dell'ordine di 27,4°Cmin⁻¹.

2. Materials and methods

In order to characterize the variation of the performance characteristics of concrete, under the effect of the high temperatures caused by fire, an experimentation has been carried out in the laboratories of the Polytechnical School of University of Naples Federico II and of the society Tecnolab s.r.l. of Naples, which has taken into consideration two types of ordinary concrete, with the binder as the discriminating parameter (Portland Cement with Pozzolana CEM II/B-P42.5, Portland Cement with limestone CEM II/A-LL 42.5).

As it is known, there are numerous fire sceneries, and they differ between them for causes, for type of interested fuel, and for the environment of propagation.

Focusing the attention on the building field has allowed to give shape to the most fitting parameters of characterization of the fire to the specific aim:

Temperature increase: normally the mean temperatures that are reached, aren't beyond 600-700°C. Values between 20°C and 600°C have been chosen, hypothesizing six classes of temperature:

T=20°C	T=400°C
T=200°C	T=500°C
T=300°C	T=600°C

Nature of fire: the standard curve that is reproduced most frequently, shows an ideal fire of cellulosic nature (wood, paper and fabric). The major part of tests and calculation methods used to define the fire resistance of structural elements is based on it: a fire of **cellulosic nature** has been studied.

Heating speed: ISO-834 standard considers a temperature increase from 20°C to 842°C in 30', with a mean stepwise heating speed in the order of 27,4°Cmin⁻¹. Hence, a speed

Si assume allora la velocità di 20 °C min^{-1} .
Tempo di esposizione: come nella maggior parte delle prove finalizzate allo studio del comportamento dei materiali esposti alle alte temperature, lo studio si basa su un tempo di esposizione di **60'**.

2.1 Definizione delle caratteristiche dei provini

Definito il tipo di legante, si è individuata la classe di resistenza ai sensi delle NTC08, in quella maggiormente diffusa (C25/30).

Requisiti dimensionali

I provini di calcestruzzo sono stati confezionati secondo le prescrizioni della norma UNI EN 12390-1. Avendo utilizzato inerti di diametro massimo pari a 30 mm, i provini sono cubici di lato pari a 150 mm.

Numero di provini

Al fine di limitare le aleatorietà della sperimentazione sono stati realizzati 3 campioni cubici da sottoporre a trattamento termico per ogni step di temperatura, per un totale di 18 campioni per ognuno dei due tipi di calcestruzzo.

Riassumendo, sono stati confezionati i seguenti campioni:

- n.18 cubi con Cemento Portland al Calcare (CEM II/A-LL 42.5) indicato in seguito come “calcestruzzo al calcare”.
- n.18 cubi con Cemento Portland alla Pozzolana (CEM II/B-P 42.5) indicato in seguito “calcestruzzo alla pozzolana”.

Caratteristiche dei materiali

Per il confezionamento dei provini sono stati adottati i seguenti componenti.

Calcestruzzo al calcare:

- Aggregati costituiti da frammenti di roccia calcarea della cava sita in Salza Irpinia (AV): fine 0/4, naturale 10/20, naturale 16/31,5.
- Additivo superfluidificante
- Cemento Portland al calcare (CEM II/A-LL 42.5)

of 20 °C min^{-1} is assumed.

Time of exposition: as in the major part of the tests aimed to the study of the behavior of materials exposed to high temperatures, the study is based on a time of exposition of **60'**.

2.1 Definition of the characteristics of samples

After defining the type of binder, the resistance class was individuated, choosing the most used one in accordance to the NTC08 (C25/30).

Dimensional requirements

The concrete samples were packaged according to UNI EN 12390-1 standard. As the concrete aggregate used have a maximum diameter of 30 mm, the samples are cubic with sides of 150 mm.

Number of samples

In order to limit the aleatority of the experimentation, 3 cubic samples per temperature step were realized, for a total of 18 samples for each of the two types of concrete.

Summarizing, the following samples were packaged:

- n.18 cubes of Portland Cement with limestone (CEM II/A-LL 42.5), indicated in the following as “limestone concrete”.
- n.18 cubes of Portland Cement with Pozzolana (CEM II/B-P 42.5), indicated in the following as “pozzolana concrete”.

Characteristics of materials

The following components were used for the packaging of samples.

Limestone concrete:

- Aggregates constituted by fragments of limestone rock from the cave situated in Salza Irpinia (AV): thin 0/4, natural 10/20, natural 16/31,5
- Superfluidifying additive
- Portland Cement with limestone (CEM II/A-LL 42.5)
- Water

- Acqua

Calcestruzzo alla pozzolana:

- Aggregati costituiti da frammenti di roccia calcarea della cava sita in Salza Irpinia (AV): fine 0/4, naturale 10/20, naturale 16/31,5.
- Additivo superfluidificante
- Cemento Portland alla pozzolana (CEM II/B-P 42.5)
- Acqua

Gli aggregati impiegati, gli additivi, e l'acqua di impasto, hanno caratteristiche conformi rispettivamente alle disposizioni delle NTC08, della UNI EN 934-2 e della UNI EN 1008: 2003.



Pozzolana concrete:

- Aggregates constituted by fragments of limestone rock from the cave situated in Salza Irpinia (AV): thin 0/4, natural 10/20, natural 16/31,5
- Superfluidifying additive
- Portland Cement with pozzolana (CEM II/B 42.5)
- Water

The aggregates used, the additives and the mixture water have characteristics that suit respectively suit the dispositions of the NTC08, the UNI EN 934-2 and the UNI EN 1008:2003.

figura 1 Cubo - dimensioni nominali

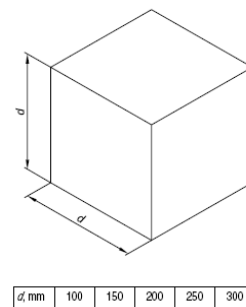


Fig.1 – Sample cube packaged and his nominal dimensions

2.2 Preparazione e stagionatura dei provini

Confezionamento

L'impasto dei componenti del conglomerato è stato eseguito presso l'impianto di betonaggio C.M.C. s.r.l. in S. Maria la Carità (NA). Nella definizione del fuso granulometrico gli aggregati sono gli stessi in entrambe le miscele (cfr. Fig. 2).

Una volta terminata la fase di getto, in accordo con quanto riportato nella norma UNI 12390-2, il calcestruzzo è stato lasciato nelle casseforme per 24 ore a temperatura ambiente. La sformatura è stata effettuata dopo 24 ore e una volta rimossi dalle casseforme i provini sono stati

2.2 Preparation and seasoning of samples

Packaging

The mixture of the components in the conglomerate was carried out in the plant C.M.C. s.r.l. situated in S.Maria la Carità (NA). In the definition of the granulometry, the aggregates are the same for both mixtures (cf. Fig.2).

Once the casting phase had been completed, the concrete was left in the formworks for 24 hours at room temperature, in accordance with what is prescribed in the UNI 12390-2 standard. The pushing took place after 24 hours, and after being removed from the formworks, the samples

conservati in acqua alla temperatura di $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ fino alla prova. | were kept in water at a temperature of $(20 \pm 2)^\circ\text{C}$ until the test.

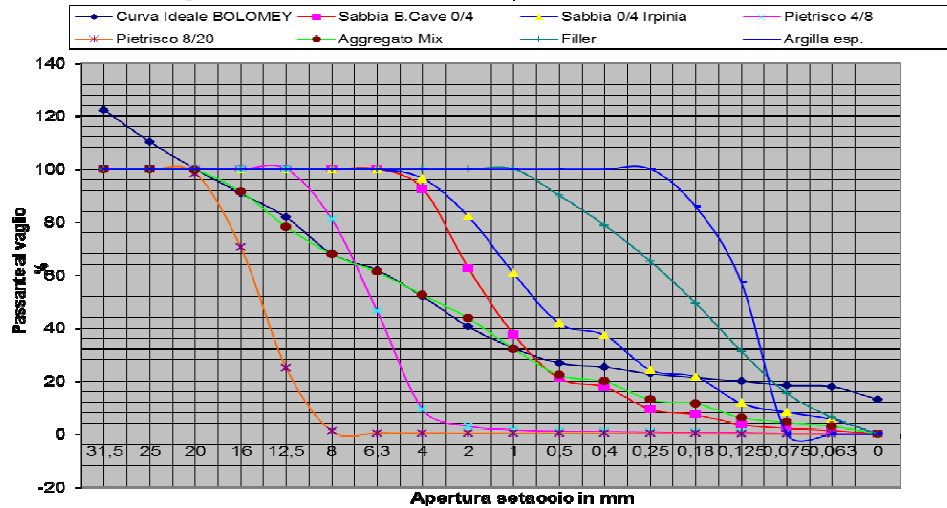


Fig.2 – Linear granulometric distribution

Operazioni pre-trattamento termico

Una volta passati i 28 giorni, i provini di calcestruzzo sono stati tolti dall’acqua e posti in ambiente ventilato ($T=20^\circ\text{C U.R. } 65 \pm 10\%$) per 15 giorni per consentire all’acqua intrappolata nei pori di evaporare ed evitare problemi di sovrappressione nella massa esposta alle alte temperature.

Inoltre i 36 provini sono stati etichettati in ordine crescente, in funzione di legante e temperatura di riferimento della prova.

Caratteristiche fisiche e geometriche

Dopo le operazioni pre-trattamento termico, sono state rilevate le esatte dimensioni dei cubi per la determinazione dell’area di contatto e del volume. Si è proceduto quindi a tabellare le caratteristiche geometriche e fisiche di ogni provino secondo lo schema riportato in Figg. 3-4.

Pre-thermal treatment operations

After the 28 days had passed, the concrete samples were removed from water, and put in a ventilated environment ($T=20^\circ\text{C U.R. } 65 \pm 10\%$) for 15 days, to allow the water in the voids to evaporate, in order to avoid problems of overpressure in the mass exposed to high temperatures. Also, the 36 samples were labeled in crescent order, in function of the binder and of the temperature of reference of the test.

Physical and geometrical characteristics

After the pre-thermal treatment operations, the exact dimensions of the cubes were revealed, to determine area of contact and volume. Then, the geometrical and physical characteristics of each sample were charted according to the table shown in Figg. 3-4.

Calculation of the geometrical characteristics of cube n.7							
Side	Nominal Dimensions	Effective Dimensions (5 values for the x side and for the y side, 4 values for the z side)					Effective Dimension
		mm	mm	mm	mm	mm	
/	mm	mm	mm	mm	mm	mm	mm
a (x side)	150	150,0	150,0	150,0	150,0	150,0	150
b (y side)	150	150,5	150,5	151,0	151,5	151,0	151
c (z side)	150	150,0	151,5	150,0	150,0	-	150

Fig.3 - Calculation of the geometric characteristics of concrete specimens with pozzolana ($T=300^\circ\text{C}$)

Geometrical and physical characteristics of cube n.4									
Side	Effective Dimensions	Base area a x b	Side area a x c	Side area b x c	Total area	Volumen	Weight	Specific weight	Specific weight
/	mm	mm ²	mm ²	mm ²	mm ²	mm ³	g	kg/cm ³	kN/m ³
a (x side)	150	22500	22500	22500	135000	3375000	8026,3	2,378	23,78
b (y side)	150								
c (z side)	150								

Fig.4 - Calculation of the physical characteristics of concrete specimens with pozzolana (T=300°C)

2.3 Programma di prova

In un edificio l'incendio dà origine ad una serie di trasformazioni nel calcestruzzo, che si susseguono al crescere della temperatura, con conseguente decadimento irreversibile delle prestazioni. Per definire le modalità con cui si simulano le condizioni di incendio è importante ricordare gli obiettivi principali perseguiti ai fini della ricerca:

- comparazione, in termini di decadimento prestazionale, delle proprietà meccaniche dei calcestruzzi esposti ad incendio;
- valutazione delle possibilità di reimpiego del materiale.

Nel momento in cui si sviluppa un incendio, le strutture saranno investite da gas di combustione, fiamme, fumo e calore. Ai fini della sperimentazione si è analizzato il decadimento prestazionale del calcestruzzo per effetto delle sole alte temperature, trascurando il contatto diretto con la fiamma. A tal fine sono state condotte le seguenti operazioni, effettuate presso il Laboratorio della Tecnolab s.r.l.:

Trattamento termico

Effettuato con un forno elettrico di potenza 3,3 kW, costruito secondo le norme di sicurezza Europee EN 60335-1 (Fig.5).

Prove non distruttive

Prova ultrasonica (UNI EN 12504-4)

Con metodo di misurazione diretto (Fig.6).

Prova sclerometrica (UNI EN 12504-2)

Determinazione dell'indice sclerometrico (Fig.7).

Prova ultrasuono-sclerometrica (Sonreb) (UNI 12504-2 e UNI EN 9524)

Resistenza a compressione del cls indurito.

2.3 Testing program

In a building the fire gives start to a series of transformation in the concrete, that evolve as the temperature increases, with a consequent irreversible performance decay. In order to define the modalities the conditions of fire are simulated with, it is important to remember the main objectives pursued by this research:

- comparison of the concretes exposed to fire in terms of performance decay and mechanical properties;
- evaluation of the possibilities of reuse of the material.

In moment the fire starts to develop, the structures are hit by gas of combustion, flames, smoke and heat.

For the purpose of the experimentation, only the performance decay of concrete because of high temperatures was analyzed, overlooking the direct contact with the fire.

To this aim, the following operations were carried out in the Laboratory of Tecnolab s.r.l.:

Thermal treatment

Carried out in an electric oven with a power of 3,3 kW, built in accordance with the EN 60335-1 standard (Fig.5).

Non-destructive

Ultrasound test (UNI EN 12504-4)

With direct method of measurement (Fig.6).

Sclerometric test (UNI EN 12504-2)

Determination of the sclerometric index (Fig.7).

Ultrasound-sclerometric test (Sonreb) (UNI 12504-2 and UNI EN 9524)

Compression strength of hardened concrete.

Prove distruttive

Prove di schiacciamento (UNI 12390-2,3,4)
Si registra il carico massimo sopportato dal provino e si calcola la resistenza a compressione del calcestruzzo (Fig.8).

Analisi termogravimetrica (TGA)

Si ottengono le curve termogravimetriche (massa in funzione della temperatura).

Destructive test

Crushing tests (UNI 12390-2,3,4)

The maximum load that the sample can endure is recorded, and the resistance to compression is calculated (Fig.8).

Thermogravimetric analysis (TGA)

The thermogravimetric curves are obtained (mass in function of temperature).

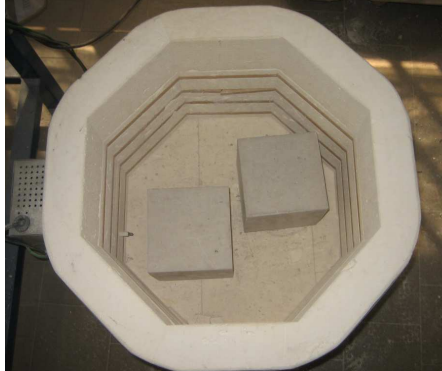


Fig.5 - Samples in the oven for heat treatment



Fig.6 - Application of ultrasonic probes



Fig.7 - Carrying over sclerometric tests



Fig.8 - Breaking specimen under crushing

3. Risultati

Scopo della campagna sperimentale, come anticipato, è quello di studiare le proprietà residue del calcestruzzo esposto a temperature che variano tra 20°C e 600°C. Quello che ci si aspetta è di notare un degrado delle proprietà meccaniche del materiale con l'aumentare della temperatura: passando da 20°C a 600°C,

3. Results

The aim of the experimental campaign, as it has been anticipated, is that of studying the remaining properties of the concrete after being exposed to temperature that vary between 20°C and 600°C.

What is expected is to notice a decay of the mechanical properties as the temperature increases: passing from 20°C to 600°C,

all'interno del materiale si generano microfessure e difetti sempre più consistenti che determinano infatti una progressiva riduzione delle proprietà meccaniche. L'analisi dei risultati ottenuti è stata effettuata seguendo lo stesso ordine con cui le prove sono state eseguite:

Trattamento termico

- Posizionamento dei 2 campioni nel forno a temperatura ambiente;
- Avvio del forno a programmazione in funzione della temperatura di riferimento;
- Mantenimento della temperatura di riferimento per 60 minuti;
- Estrazione dal forno e raffreddamento a temperatura ambiente.

Calcolo del peso specifico

- Pesatura dei campioni raffreddati;
- Calcolo del peso specifico.

A titolo esemplificativo si riporta una tabella riassuntiva dei valori rilevati:

more and more consistent micro cracks and defects are generated in the material, in fact determining a progressive reduction of the mechanical properties.

The analysis of the results obtained was realized following the same order the tests were carried out with:

Thermal treatment

- Positioning of the 2 samples in the oven at room temperature;
- Start of the oven, programmed in function of the temperature of reference;
- Maintenance of the temperature of reference for 60 minutes;
- Extraction from the oven and cooling at room temperature.

Calculation of the specific weight

- Weighing of the cooled samples;
- Calculation of the specific weight.

As an example, a summarizing chart of the values found is reported.

Calculation of the specific weight after the thermal treatment						
Cube number	Weight	Volume	Specific weight	Specific weight	Mean specific weight	Temperature of reference
/	g	mm ³	kg/cm ³	kN/m ³	kN/m ³	°C
1	8142	3420150	2,381	23,81	23,99	20
2	8185	3397500	2,409	24,09		
3	8068	3352500	2,407	24,07		
4	7884	3375000	2,336	23,36	23,38	200
5	7951	3375000	2,356	23,56		
6	7889	3397500	2,322	23,22		
7	7811	3397500	2,299	22,99	23,02	300
8	7804	3397500	2,297	22,97		
9	7845	3397500	2,309	23,09		
10	7620	3397500	2,243	22,43	22,50	400
11	7669	3397500	2,257	22,57		
12	7648	3397500	2,251	22,51		
13	7715	3375000	2,286	22,86	22,70	500
14	7720	3397500	2,272	22,72		
15	7706	3420150	2,253	22,53		
16	7569	3397500	2,228	22,28	22,4	600
17	7551	3352500	2,252	22,52		
18	5777*	3397500	/	/		

Fig.9 - Calculation of the specific weight, concrete with pozzolana

Calcolo della velocità (prova ultrasuoni)

- Applicazione delle sonde al campione;
- Lettura del valore della velocità.

Calculation of velocity (ultrasound test)

- Application of the probes to the sample;
- Reading of the value of velocity.

Calculation of the velocity via ultrasound test							
Cube number	Weight	Dimensions			Speed	Mean speed	Temperature of reference
/	g	mm	mm	mm	m/s	m/s	°C
1	8142	150	151	151	3826,53	3776,51	20
2	8185	150	151	150	3676,47		
3	8068	149	150	150	3826,53		
4	7884	150	150	150	3289,46	3309,05	200

5	7951	150	150	150	3289,47		
6	7889	150	151	150	3348,21		
7	7811	150	151	150	3024,19	3026,05	300
8	7804	150	151	150	2976,19		
9	7845	150	150	151	3077,76		
10	7620	150	151	150	1953,13		
11	7669	150	150	151	1893,94	2083,64	400
12	7648	150	151	150	2403,85		
13	7715	150	150	150	1659,29		
14	7720	151	150	150	1838,24	1728,91	500
15	7706	151	151	150	1689,19		
16	7569	151	150	150	1109,47		
17	7551	150	150	149	986,84	1048,16	600
18	5777*	150	151	150	/		

Fig.10 - Calculation of the velocity, concrete with pozzolana

Calcolo dell'indice di rimbalzo

- Definizione di 9 punti sulla superficie del provino;
 - Stabilizzazione provino, carico di 30kN;
 - Lettura del valore dell'indice di rimbalzo.
- In Fig.11 una tabella riassuntiva dei valori riscontrati:

Calculation of the rebound index

- Definition of 9 points on the surface of the sample;
 - Stabilization of the sample, load of 30 kN;
 - Reading of the value of the rebound index.
- Fig.11 reproduces a summarizing table of the found values:

Calculation of the rebound index via sclerometric test												
Cube number	Resistance per beat									Mean value	Mean value	T of reference
/	Mpa									Mpa	Mpa	°C
1	38	39	39	35	43	35	45	42	36	39,1	39,4	20
2	38	30	39	40	41	37	41	39	46	39,3		
3	39	39	40	41	37	38	41	41	40	39,7		
4	40	39	45	40	37	39	47	39	40	40,3	40,2	200
5	50	42	40	41	40	41	44	39	42	41,4		
6	36	39	44	39	42	37	38	40	38	39,0		
7	42	39	42	39	37	40	39	39	41	39,9	40,1	300
8	40	39	41	40	40	42	38	39	43	40,1		
9	40	40	39	40	40	41	41	41	41	40,4		
10	42	44	42	42	42	40	40	41	43	41,7	41,1	400
11	41	41	42	42	41	44	43	44	44	42,4		
12	39	39	41	39	40	39	38	39	39	39,1		
13	39	40	42	43	39	42	42	40	40	40,7	41,4	500
14	42	41	41	42	43	40	41	41	41	41,3		
15	42	43	42	42	43	43	44	40	41	42,3		
16	40	39	37	38	39	40	41	40	40	39,4	38,8	600
17	38	40	40	39	39	36	38	36	37	38,1		
18	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/		

Fig.11 - Calculation of the rebound index, concrete with pozzolana

Calcolo della resistenza a compressione

- Incremento graduale del carico fino a rottura del provino;
 - Lettura del valore del carico di rottura e del tipo di rottura.
- In Fig.12 si tabellano i valori riscontrati:

Calculation of the compression strength

- Gradual increase of the load to the break of the sample;
 - Reading of the value of the breaking load and of the type of breaking.
- The values found are charted in Fig.12:

Calculation of the resistance to compression via crushing test								
Cube number	Nominal area	Effective area	Fm	Type of crushing	Rcnom.	Effective Rc	Mean effective Rc	Temperature of reference
/	mm2	mm2	kN	/	Mpa	Mpa	Mpa	°C
1	22500	22650	1073	Sat.	47,7	47,4	48,81	20
2	22500	22650	1084	Sat.	48,2	47,8		
3	22500	22350	1145	Sat.	50,9	51,2		

4	22500	22500	871	Sat.	38,7	38,7	38,35	200
5	22500	22500	862	Sat.	38,3	38,3		
6	22500	22650	862	Sat.	38,3	38,1		
7	22500	22650	789	Sat.	35,1	34,8	34,67	300
8	22500	22650	803	Sat.	35,7	35,5		
9	22500	22500	758	Sat.	33,7	33,7		
10	22500	22650	732	Sat.	32,5	32,3	32,20	400
11	22500	22500	767	Sat.	34,1	34,1		
12	22500	22650	684	Sat.	30,4	30,2		
13	22500	22500	706	Unsat.	31,4	31,4	30,54	500
14	22500	22650	689	Sat.	30,6	30,4		
15	22500	22801	680	Unsat.	30,2	29,8		
16	22500	22650	455	Unsat.	20,2	20,1	19,72	600
17	22500	22500	435	Unsat.	19,3	19,3		
18	22500	22650	/	/	/	/		

Fig.12 - Calculation of the compression strength, concrete with pozzolana

Visual analysis on the samples of Pozzolana concrete						
Temperature	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
Colour	Gray	Light pink	Pink	Pink	Dark gray	Dark gray
Appearance	Compact	Compact	Porous	Porous	Porous	Very porous
Cracks	None	None	Accidental microcracks	Numerous microcracks	Numerous microcracks	Numerous microcracks
Visual analysis on the samples of limestone concrete						
Temperature	20°C	200°C	300°C	400°C	500°C	600°C
Colour	Light gray	Gray	Pink	Pink	Dark gray	Dark gray
Aspect	Compact	Compact	Porous	Porous	Porous	Very porous
Cracks	None	None	Accidental microcracks	Accidental microcracks	Accidental microcracks	Numerous microcracks

Fig.13 - Approximate evaluation of the visual characteristics

3.1 Confronto macroscopico dei provini al variare di T

Per una prima analisi visiva condotta sui campioni sottoposti a trattamento termico, possono essere utili le indicazioni sulla variazione del colore e del suo aspetto superficiale. Infatti, con il variare della temperatura il calcestruzzo assume, per variazioni dei suoi componenti, colorazioni passando dal grigio chiaro (20°C) al rosa (300÷400°C), al grigio scuro (600°C).

Parallelamente la superficie diventa sempre più porosa fino a presentarsi friabile e con micro fessure sempre più diffuse.

3.2 Andamento del peso specifico al variare di T

Dal grafico in Fig.14 si evince che due tipologie di calcestruzzo, a meno di piccoli scarti, presentano una variazione di peso specifico identica.

3.1 Macroscopic comparison of the samples as a function of T

The indications on the variation of colour and on the superficial appearance can be useful for an initial visual analysis, carried out on the samples gone under the thermal treatment. In fact, the temperature varies the concrete assumes colorings in accordance to the variation of its components, passing from light gray (20°C) to pink (300÷400°C), to dark gray (600°C).

In parallel, the surface becomes more and more porous until it shows itself friable and with more and more micro cracks.

3.2 Variation of the specific weight as a function of T

It can be deduced from the graph in Fig.14 that the two typologies of concrete, overlooking small differences, show an identical variation of specific weight.

Dato rilevante è la considerevole perdita di massa che fa pensare ad un decadimento delle prestazioni. Infatti, se si ragiona sui campioni trattati a 600°C che hanno riportato una riduzione di peso specifico all'incirca del 6%, il peso specifico del calcestruzzo, passa da 24,0kN/m³(NTC/08) a 22,6 kN/m³. Considerando il principio di conservazione della massa, tale riduzione può essere spiegata come evaporazione dell'acqua all'interno dei campioni oppure espulsione di materia sotto forma di gas.

A significant information is the considerably high loss of mass, which leads to think to a decay of performances. In fact, reasoning on the samples treated at 600°C which have reported a reduction of specific weight of about 6%, the specific weight of concrete changes from 24,0kN/m³(NTC/08) to 22,6 kN/m³. Considering the principle of mass conservation, this reduction can be explained with the evaporation of the water inside the samples, or with the expulsion of matter in the form of gas.

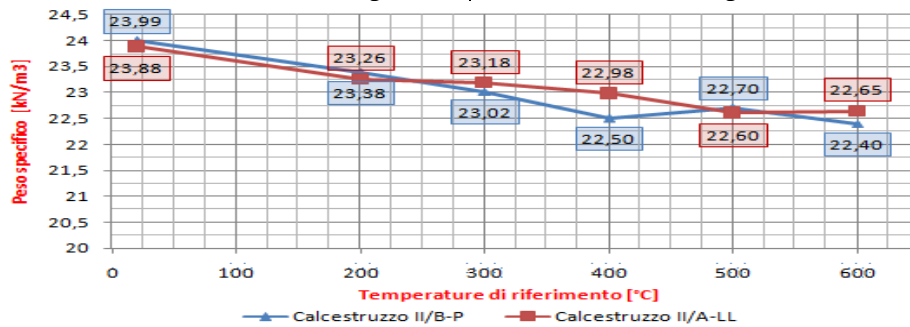


Fig.14- Yield of the specific weight as a function of temperature

3.3 Andamento della velocità ultrasonica al variare di T

Il calcolo della velocità ultrasonica ci fornisce delle informazioni sul livello di qualità del calcestruzzo, maggiore sarà la velocità migliore sarà la qualità del calcestruzzo, scongiurando danni interni. Il grafico di Fig.15 dà validità a quanto sopra, e trova riscontro nel decadimento di

3.3 Variation of the ultrasonic speed as a function of T

The calculation of the ultrasonic speed provides information on the level of quality of concrete: the higher is the speed, the better is the quality of concrete, avoiding internal damage. The graph in Fig.15 validates the above, and finds a correspondence in the decay of both the

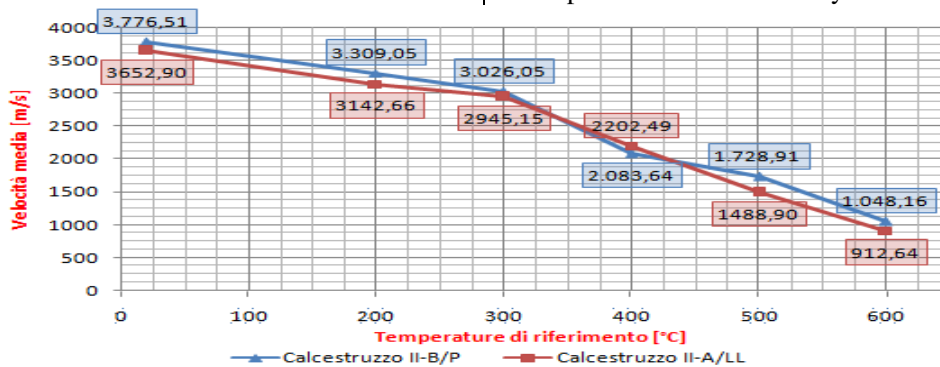


Fig.15- Yield of the ultrasonic speed as a function of temperature

entrambe le tipologie di calcestruzzo. Il decadimento è rilevante in quanto a 600°C si presenta una velocità circa un quarto rispetto alla velocità iniziale, questo lascia intendere una notevole fessurazione interna.

3.4 Andamento dell'indice di rimbalzo al variare di T

Il grafico di Fig.16 mostra per entrambe le tipologie di calcestruzzo un andamento dell'indice di rimbalzo medio poco variabile fino alla temperatura di 500°C, dopodiché si assiste ad un decadimento di circa 5 MPa.

Si può quindi affermare che l'indice di rimbalzo, preso da solo, non è un parametro attendibile per la definizione della resistenza a compressione.

typologies of concrete. The decay is relevant, as at 600°C it shows a speed that is equal to about a quarter of the initial one; this hints at a notable situation of internal cracking.

3.4 Variation of the rebound index as a function of T

The graph in Fig.16 shows a little variable yield of the mean rebound index of both typologies of concrete until the temperature of 500°C; then, a decay of about 5 MPa can be observed.

Hence, it is possible to affirm that the rebound index alone is not a reliable parameter for the definition of the compression strength.

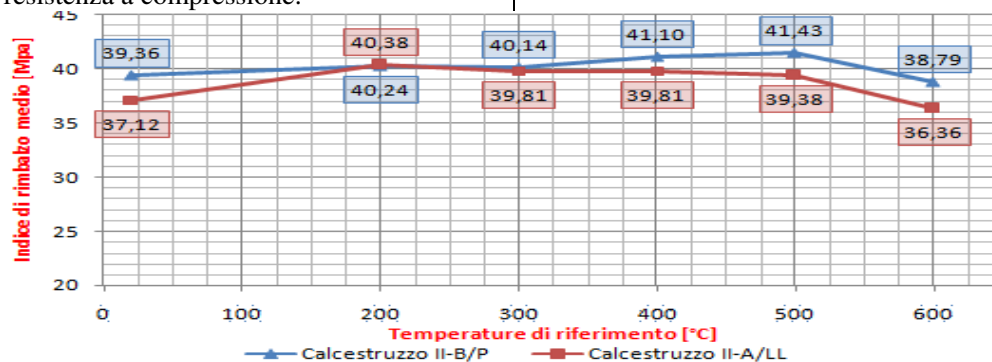


Fig.16 - Yield of the rebound index as a function of temperature

3.5 Andamento della resistenza a compressione al variare di T

Analizzando il grafico di Fig.17, si nota un andamento confrontabile della resistenza a compressione dei due calcestruzzi:

- Il calcestruzzo alla Pozzolana presenta una resistenza maggiore, anche se di 3÷5 MPa, per temperature inferiori a 300°C, mentre per le restanti temperature, superiori ai 300°C, le resistenze sono di poco superiori rispetto a quelle del calcestruzzo al Calcare (per T=500°C la resistenza è addirittura minore);

3.5 Variation of the compression strength as a function of T

Analyzing the graph of Fig.17, it can be noted that the two concretes have a comparable yield of the compression strength:

- The Pozzolana concrete shows a higher resistance, though by 3÷5 MPa, at lower temperatures than 300°C, while for those higher than 300°C, the resistances are slightly higher than those of the limestone concrete (the resistance is even lower for T=500°C);

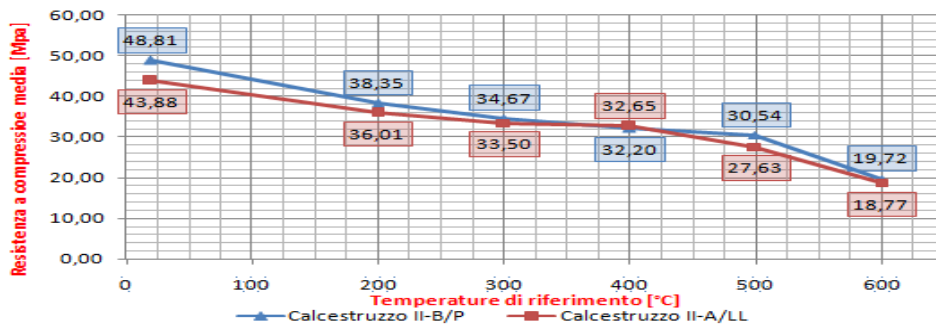


Fig.17 -Yield of the compression strength as a function of temperature

- Il calcestruzzo al Calcare mostra un andamento della resistenza a compressione simile a quello alla Pozzolana con la differenza che la pendenza di decadimento della resistenza è minore.

Rapportando la resistenza a compressione media dei campioni trattati termicamente con quella a compressione dei campioni bianchi, notiamo che il calcestruzzo al Calcare presenta, in linea di massima, una riduzione minore della resistenza a compressione rispetto a quella del calcestruzzo alla Pozzolana.

Dato rilevante per entrambi i calcestruzzi è la riduzione di resistenza a compressione a 600°C (del 60% circa), ciò in un edificio soggetto a incendio può corrispondere ad un collasso degli elementi strutturali.

In definitiva possiamo dire che:

- Per temperature comprese tra 20°C e 500°C il calcestruzzo alla Pozzolana presenta delle resistenze a compressione maggiori rispetto a quelle del calcestruzzo al Calcare (Fig.17), ma un decadimento prestazionale più marcato.

Questo significa che il calcestruzzo alla Pozzolana è per proprietà intrinseche migliore di quello al Calcare, ma di contro il calcestruzzo al Calcare presenta un miglior comportamento nei confronti delle alte temperature.

- Per $T > 500^{\circ}\text{C}$ il decadimento prestazionale è pressoché identico.

Ciò significa che l'andamento della

- The Limestone concrete shows a yield of compression strength that is similar to that of Pozzolana, with the difference that the decay tendency is lower.

Comparing the mean compression strength of the samples with thermal treatment, with that of the white samples, we note that the Limestone concrete shows, generally, a lower reduction of the compression strength, than that of the Pozzolana concrete.

A significant information for both concretes is the reduction of compression strength at 600°C (equal to about 60%), which could correspond, in a building hit by fire, to the collapse of the structural elements.

In the end, it is possible to say that:

- For temperatures between 20°C and 500°C the Pozzolana concrete presents higher compression strength than those of the Limestone concrete (Fig.17), but with a higher decay of performances.

This means that the Pozzolana concrete is better than the Limestone one for its intrinsic properties, but on the other hand the limestone concrete shows a better behavior towards high temperatures.

- For $T > 500^{\circ}\text{C}$ the performance decay is mostly identical.

This means that the yield of the compression strength isn't determined by the binder, but by the decay of aggregates.

3.6 Considerations on the

resistenza a compressione non è più dominato dal decadimento del legante bensì dal decadimento degli aggregati.

3.6 Considerazioni sull'attendibilità del metodo Sonreb

Nel grafico Fig.18 vengono confrontate le resistenze a compressione medie valutate mediante metodo Sonreb e le resistenze a compressione medie valutate mediante prova di schiacciamento. Analizzando in dettaglio le due curve (per brevità si riporta

reliability of the Sonreb method

In the graph in Fig.18, the mean compression strengths evaluated through the Sonreb method, and the mean resistances to compression evaluated through crushing test, are compared.

Analyzing in detail the two curves (only the one referring to the Pozzolana concrete is reported, for brevity), in both the comparisons two different yields can be seen:

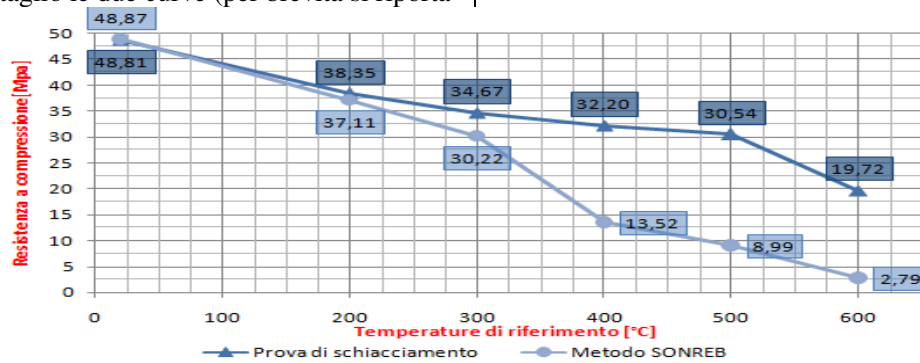


Fig.18 -Comparing crushing test – Son-Reb method

solo quella relativa al calcestruzzo alla pozzolana) in entrambi i confronti si assiste a due diversi andamenti:

- Da 20°C a 300°C i valori della resistenza a compressione calcolati sono prossimi a quelli desunti dalla prova di schiacciamento;
- Da 300°C a 600°C i valori della resistenza a compressione calcolati sono molto minori di quelli desunti dalla prova di schiacciamento.

Ne deriva che i valori di resistenza a compressione calcolati mediante metodo Sonreb non rispecchiano il reale andamento della resistenza a compressione nei casi in cui la struttura fosse investita da un incendio significativo ($T > 300^{\circ}\text{C}$).

3.7 Valutazione del degrado

- Between 20°C and 300°C the values of compression strength are close to those obtained from the crushing test;
- Between 300°C and 600°C the values of compression strength are much lower to those obtained from the crushing test.

It results that the values of resistance to compression calculated through Sonreb method do not mirror the real variation of compression strength, in case the structure is hit by a significant fire ($T > 300^{\circ}\text{C}$).

3.7 Evaluation of the decay through chemical decomposition

For this evaluation, 4 samples were subjected to the thermogravimetric analysis:

- Natural limestone aggregate 10/20;

attraverso decomposizione chimica

Per tale valutazione sono stati sottoposti ad analisi termogravimetrica 4 campioni:

- Aggregato naturale calcareo 10/20;
- Cemento Portland al Calcare;
- Calcestruzzo con Portland alla Pozzolana;
- Calcestruzzo con Portland al Calcare.

Dai risultati dell'analisi sui campioni di calcestruzzo, non si rileva alcuna influenza da parte delle aggiunte (Calcare o Pozzolana) sul comportamento, a T inferiori a quella di decomposizione del carbonato di calcio (700°C). Si individuano 2 fasi:

- Tra 25°C e 700°C: il peso diminuisce per la progressiva decomposizione delle fasi idrauliche (silicati idrati di calcio) responsabili delle proprietà meccaniche della fase legante.
- Tra 700°C e 850°C: la perdita di peso è invece causata dalla decomposizione dell'aggregato calcareo.

Possiamo inoltre trarre due osservazioni:

- Fino a circa 600°C il comportamento meccanico del calcestruzzo, in relazione alle sollecitazioni termiche, dipende dalla frazione legante (cemento idratato) che si decompone a partire da T=200°C.
- A temperature superiori a 700°C è da prevedere l'effetto della decomposizione del calcare, sia quello di aggiunta al cemento sia sotto forma di aggregato.

3.8 La problematica dello spacco esplosivo (explosive spalling)

Il danneggiamento indotto dallo spalling esplosivo su una struttura in calcestruzzo può inficiare l'accuratezza dei calcoli relativi alla resistenza al fuoco e ridurre il grado di sicurezza al fuoco. Il fenomeno assume importanza nella progettazione

- Limestone Portland Cement;
- Pozzolana Portland Concrete;
- Limestone Portland Concrete.

No influence from the additions (Limestone or Pozzolana) is revealed in the results of the analysis on the samples of concrete, on the behavior at temperatures that are lower than that of the decomposition of the calcium carbonate (>700°C). Two phases can be individuated:

- Between 25°C and 700°C: the weight decreases because of the progressive decomposition of the hydraulic phases (hydrate silicates of calcium), responsible for the mechanical properties of the binding phase;
- Between 700°C and 850°C: the loss of weight is here caused by the decomposition of the limestone aggregate.

It is also possible to make two observations:

- Until about 600°C, the mechanical behavior of the concrete, relatively to thermal stress, depends on the binding component (hydrated cement), which decomposes from T=200°C.
- At higher temperatures than 700°C the effect of the decomposition of limestone has to be considered, both as a cement addition and as an aggregate.

3.8 The problem of explosive spalling

The damage induced by explosive spalling on a concrete structure may affect the accuracy of calculations in relation to fire resistance, and reduce the level of safety of the structure itself towards fire.

The phenomenon assumes importance in the structural design because, in case spalling takes place, a part of the load bearing structure ends up missing, with a reduction of the resisting section, and with the possibility to let the reinforcement be exposed.

strutturale perché, nel caso in cui si verifici lo spalling, una parte della struttura portante verrebbe a mancare, con riduzione della sezione resistente e possibilità di esposizione delle armature.

Durante il trattamento termico alcuni campioni (C-16, P-18) sono esplosi intorno a 400°C mostrando la gravità del fenomeno. Tra le possibili cause che hanno portato al manifestarsi di tale evento ci sono:

- Bassa permeabilità del calcestruzzo, che limita la fuoriuscita dell'umidità prodotta dal riscaldamento, producendo un incremento della pressione nei pori. Tale incremento continua fin quando gli sforzi interni diventano talmente elevati da causare un'esplosione.
- Gradienti di temperatura molto elevati tra faccia esterna del campione (molto vicina alle resistenze del forno) e nucleo interno (freddo a causa dell'inerzia).

Nel caso in oggetto la causa principale dello spalling pare attribuibile all'eccessivo gradiente termico tra la temperatura delle facce del provino e quella dei 3 nuclei freddi; questo giustifica il mancato manifestarsi del fenomeno per gli altri trattamenti termici.

Ne consegue che in caso di incendio, per strutture massive (alti gradienti termici) e per calcestruzzi ad elevate prestazioni (basse porosità) il spalling ha conseguenze senz'altro più devastanti del decadimento delle resistenze meccaniche.

During the thermal treatment, some samples (C-16, P-18) have exploded at about 400°C, showing the gravity of the phenomenon. Among the possible causes that led to this event taking place there are:

- Low permeability of the concrete, which reduces the leakage of damp produced by heating, generating an increase in the pressure of pores. This increase goes on as long as the internal stress becomes so high to generate an explosion.
- Very high gradients of temperature between the external side of the sample (very close to the oven resistances) and the internal core (cool because of the inertia).

In the specific case, the main cause of the spalling seems to be attributable to the excessive thermal gradient between the temperature of the sides of the sample, and that of the 3 cold cores; this justifies the phenomenon not taking place in the other thermal treatments.

It follows that in case of fire, for massive structures (high thermal gradients) and for concretes with high performances (low porosity) the phenomenon of spalling has even more devastating consequences than the decay of mechanical resistances.



Fig.19 - Sample P-18 after explosive spalling

4. Conclusioni

In relazione ai risultati sperimentali ottenuti si possono fornire una serie di indicazioni sia al tecnico diagnosta che rileva i danni riportati dall'edificio, causati dall'incendio, sia al progettista degli interventi a farsi:

- Dall'analisi macroscopica sugli elementi in calcestruzzo non è immediata una stima del degrado; i parametri che variano sono il colore, l'aspetto e la presenza di lesioni.
- Dalle prove di schiacciamento è evidente un decadimento repentino della resistenza a compressione all'aumentare della temperatura; per temperature elevate la resistenza residua è minore di più del 50% rispetto a quella iniziale.
- Dalle prove non distruttive, in particolar modo dal confronto tra i valori della resistenza a compressione e quelli calcolati mediante metodo Sonreb, è emersa una notevole divergenza dei valori, crescente al crescere della T di riferimento. Appaiono quindi necessari studi integrativi per limitare gli errori associati a tale metodo.
- Dalla prova ad ultrasuoni, essendo la velocità ultrasonica un parametro legato alla qualità del calcestruzzo, è possibile risalire qualitativamente al decadimento delle caratteristiche meccaniche.
- Dall'analisi termogravimetrica si evince che il decadimento delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo, a partire da 200°C fino a 600°C, è legato alla decomposizione della frazione legante (cemento idratato) che si decompone sempre più intensamente; per temperature superiori a 700°C è da prevedere l'effetto della decomposizione del calcare, sia quello di aggiunta al cemento sia quello sotto forma di aggregato del calcestruzzo.
- Il fenomeno dello spalling esplosivo ha conseguenze ben più devastanti del

4. Conclusions

In relation to the experimental results obtained, a series of indications can be provided both to the diagnostic technician who reveals the damages to the building, caused by the fire, and to the designer in regard to the planned interventions:

- From the macroscopic analysis on the concrete elements the estimation of the decay is not immediate; the parameter that vary are the colour, the appearance and the presence of cracks.
- From the crushing tests, a rapid decay of the compression strength is evident; for elevated temperatures, the remaining resistance is lower than the initial one by more than 50%.
- From the non-destructive tests, especially from the confrontation between the values of compression strength and those calculated through Sonreb method, a notable divergence of values has resulted, increasing along with the increase of the T of reference. Then, some integrative studies appear necessary, in order to reduce the errors linked to that method.
- From the ultrasound test, as the ultrasonic speed is a parameter linked to the qualities of the concrete, it is possible to know qualitatively the decay of the mechanical characteristics.
- From the termogravimetric analysis, it is evident that the decay of the mechanical characteristics of concrete, between 200°C and 600°C, is linked to the decomposition of the binding component (hydrated cement), which decomposes more and more intensely; for higher temperatures than 700°C, the effect of the decomposition of limestone has to be expected, both as a cement addition and as an aggregate.
- The phenomenon of the explosive

semplice decadimento delle caratteristiche meccaniche in quanto, contestualizzato in un elemento strutturale, il distacco di una parte comporta una riduzione di area resistente con conseguente incremento di tensioni nella parte residua. Questo, associato al decadimento della resistenza a compressione può decretare il collasso strutturale dell'elemento.

- Il decadimento prestazionale appare tale da rendere complesso concepire interventi di recupero della struttura, per cui diventa auspicabile l'ipotesi di una demolizione selettiva al fine di riutilizzare il cls.

Dal punto di vista della possibilità di reimpiego del calcestruzzo, le pavimentazioni stradali rappresentano un settore di indubbio interesse ed efficacia, anche con riferimento alle "Norme funzionali e geometriche per la costruzione, il controllo ed il collaudo delle strade, dei relativi impianti e servizi" emanate dal Ministero dei LL.PP. in attuazione del D.Lgs. 30/04/1992 s.m.i.

La richiesta di materiale per la manutenzione e realizzazione di pavimentazioni stradali, infatti, è in continuo aumento, considerato anche il notevole aumento delle infrastrutture negli ultimi anni.

Uno studio SITEB evidenzia la fase recessiva della manutenzione stradale in Italia, con una riduzione degli investimenti che dovrebbero essere circa il doppio di quelli sostenuti lo scorso anno. Se consideriamo anche il fatto che tale tipologia di interventi comporta notevoli consumi di risorse pregiate e non rinnovabili, come aggregati lapidei e bitume, e che vengono contestualmente prodotte ingenti quantità di materiali di risulta, con costi sia economici di dismissione, che ambientali di inquinamento, si rende ancora più necessario adottare tecniche di riciclaggio.

- Il reimpiego del calcestruzzo

spalling has far more devastating consequences than the simple decay of the mechanical characteristics as the disjunction of a part causes a reduction of the resisting area, with a consequential increase of tensions in the remaining part. This, together with the decay of compression strength, can determine the structural collapse of the component.

- The performance decay appears such to make it complex to define interventions of restoration of the structure, then it is best to hypothesize a selective demolition in order to reuse the concrete.

From the point of view of the possibilities of reuse of the concrete, street pavings represent a field of indubitable interest and effectiveness, also in reference to "Functional and geometrical standards for the construction, the control and the collaudation of the streets, of the relative systems and services", promulgated by the Ministry of Public Works, in actuation of the D.Lgs. 30/04/1992 s.m.i.

The demand of materials for the maintenance and the realization of street pavings is in fact in continuous growth, considering also the notable increase of infrastructures in the last years.

A SITEB study highlights the recessive phase of the street maintenance in Italy, with a reduction of the investments, which are predicted to be about the double of those sustained last year. If we consider the fact that this typology of interventions requires notable consumptions of valuable and unrenovable resources, such as lapideous aggregates and bitumen, and that in the process high quantities of waste are produced, both with economic costs of disposal, and environmental costs of pollution, the adoption of recycling techniques becomes even more necessary.

- The reuse of concrete coming from the demolitions of building subjected to fire, constitutes then an interesting possibility,

proveniente da demolizioni di edifici sottoposti a incendio costituisce pertanto un'interessante possibilità, potendo esso costituire un inerte dalle caratteristiche senz'altro compatibili con gli impieghi specifici nell'ambito della stratigrafia delle pavimentazioni stradali.

as it can constitute an aggregate with characteristics that are surely compatible with the specific uses in the field of the stratigraphy of the street pavings.

5. References

1. Tattoni, S., (2010) Metodi di indagine sulle strutture; strutture in c.a. dopo l'incendio, CIAS IASBE, Madrid
2. Cosenza, E., Manfredi G., Pecce M., (2008) Strutture in cemento Armato, Hoepli, Napoli
3. Collepardi M., Valente M., (1978) Effetto delle alte temperature sulle proprietà dei calcestruzzi armati, L'industria italiana del cemento, Milano
4. De Lucia T., Miranda M., Basile A., Formisano A., (2011) Confronto teorico-sperimentale per il calcolo della resistenza in situ dei calcestruzzi, Napoli
5. Bamonte P., Gambarova P., D'Agostino L., Genoni A., (2004) Preliminary Pull-Out Tests on post-Installed Mechanical Fasteners Embedded in Thermally Damaged Concrete, Proc. Of the Workshop "Fire Design of Concrete Structures", AAVV, Reparability of Fire Damaged Structures, Fire Safety Journal, n° 4, Milano
6. UNI EN 12504 – 4, (2005) Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici
7. UNI EN 12504 – 2, (2001) "Prove sul calcestruzzo nelle strutture – Prove non distruttive – Determinazione indice sclerometrico
8. UNI EN 12390 – 3, (2009) Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini
9. Collepardi M., Comportamento al fuoco delle strutture in cemento armato, Enco, Milano
10. Nigro E., Il progetto delle strutture in caso di incendio, Hoepli, Napoli
11. Finuoli F., (2012) Evoluzione della normativa antincendio, Parma
12. Norme Tecniche per le Costruzioni 14 Gennaio 2008 (NTC-08)
13. Klingsh E.W., Frangi A., Fontana M., (2009) Residual Strength of Thermally-Damaged Concrete: Blended Cement versus Ordinary Portland Cement, Studies and Reserches, Starrylink Ed., Brescia
14. Colombo M., Felicetti R., (2007) New NDT Techniques for the Assessment of Fire-Damaged Concrete Structures, Fire Safety Journal n.42
15. Menditto G., Menditto S., (2008) Indagini semidistruttive e non distruttive nell'ingegneria civile: disciplina tecnica, applicativa e normativa, Pitagora Editrice, Bologna