

METODO RAPIDO PER IL CONTROLLO DI ACCETTAZIONE DEL CALCESTRUZZO

Compressive strength of concrete cured for 28 days at room temperature (20°C) can be determined by measuring the compressive strength of steam cured specimens. The results of the present paper confirm the reliability of this method provided that the 28 - day (at 20°C) "characteristic" compressive strength (R_{ck}) is in the range of 20-30 Mpa. However, a new relationship has been found between the 28 - day compressive strength and 18 - hour steam cured compressive strength which can be used for higher strength concretes ($R_{ck} = 30-35$ MPa).

Il controllo della qualità del calcestruzzo è di fondamentale importanza per la costruzione di opere conformi alle prescrizioni del progetto, ancorchè altre operazioni in aggiunta alle confezioni di un calcestruzzo di qualità, quali la messa in opera e la stagionatura, siano altrettanto necessarie al conseguimento dell'obiettivo. Resta il fatto, però, che un calcestruzzo di qualità scadente è sicuramente destinato a produrre strutture scadenti anche con messa in opera e stagionatura eseguite a regola d'arte.

La normativa di questi ultimi anni - dalla legge N 1086 sulle opere in c.a. e c.a.p., alla norma europea ENV 206 [1] ed a quella nazionale UNI 9858 [2] sulla produzione e messa in opera del calcestruzzo - si è sempre più rivolta al controllo delle qualità prestazionali, in particolare alla resistenza meccanica, piuttosto che ai parametri composizionali (in particolare il dosaggio di cemento) di difficile valutazione soprattutto in caso di contestazioni.

Inoltre, anche altre importantissime caratteristiche prestazionali quali la durabilità e l'impermeabilità possono essere correlate con la resistenza meccanica e, attraverso la misura di queste proprietà, possono essere sottoposte ad un controllo continuo, semplice ed immediato [3].

Mario Collepari

Luigi Coppola

In sostanza, la misura della resistenza meccanica diventa uno strumento essenziale per il controllo indiretto anche delle altre caratteristiche del calcestruzzo. Tuttavia, a differenza di molti altri materiali da costruzione, quale per esempio l'acciaio, il calcestruzzo viene valutato per legge solo dopo 28 giorni dalla sua messa in opera, quando spesso i getti (dell'opera) sono nel frattempo terminati o comunque giunti in una fase così avanzata che l'eventuale carenza prestazionale non può più essere tempestivamente corretta.

Sorge, pertanto, l'esigenza di poter disporre di un sistema della misura della resistenza meccanica rapido che, in meno di 24 ore, consenta di prevedere, con la massima precisione possibile, il risultato atteso ai fatidici 28 giorni.

Un sistema del genere, ancorché non sostitutivo dal punto di vista legale della misura della resistenza caratteristica a 28 giorni (R_{ck}), presenta indubbiamente un duplice vantaggio:

- consente al produttore di calcestruzzo di poter immediatamente verificare

con prove preliminari, se la prestazione richiesta per una specifica opera può essere soddisfatta con una composizione "standard" ormai collaudata oppure se richiede la messa a punto di una "ricetta" per la quale calcolare con precisione e rapidità i relativi costi;

- consente al committente di controllare giorno per giorno la qualità del calcestruzzo gettato richiedendo immediatamente al produttore l'eventuale aggiustamento prestazionale nel caso di eventuali carenze nel materiale. La previsione rapida (meno di un giorno) della resistenza meccanica attesa a 28 giorni può essere effettuata sfruttando il principio che la resistenza meccanica di un calcestruzzo stagionato con un determinato ciclo di vapore è correlabile con quella ottenuta dopo 28 giorni di stagionatura a 20°C [4-7]. L'obiettivo del presente lavoro è quello di verificare la fattibilità di questa previsione mediante l'impiego di uno strumento prodotto industrialmente e commercialmente già disponibile.

MATERIALI E METODOLOGIE DI PROVA

Per la realizzazione del programma sperimentale sono stati utilizzati i se-

guenti materiali

a) cemento Portland di classe 325 e 425 (325 Pt e 425 Pt);

b) cemento pozzolanico di classe 425(425 Pz);

c) inerti calcarei di origine alluvionale in quattro diverse pezzature: una sabbia fine (0-2 mm), una sabbia grossa (2-5mm), un ghiaietto (5-19 mm) e una ghiaia (19-25 mm);

d) additivi liquidi superfluidificanti a base naftalinica (soluzione acquosa al 40% di polimero attivo).

Con questi materiali sono state confezionate due serie di calcestruzzi, dettagliatamente descritte nei paragrafi che seguono, che si differenziano per il valore della resistenza caratteristica:

a) calcestruzzi di qualità media e bassa (R_{ck} 30 MPa);

b) calcestruzzi di alta qualità (R_{ck} > 30 MPa).

Per quanto concerne i metodi di prova, oltre alla misura tradizionale della resistenza meccanica media a 28 giorni (R_{cm28}) a 20°C secondo le norme di legge, è stata anche determinata la "resistenza accelerata correlata" (R_{acc}) cioè quella "prevista" dallo strumento *Speedymet* a 28 giorni. Lo strumento si compone di un forno per la maturazione a vapore in automatico (durata del ciclo: 18 ore) dei provini, di una pressa per la misura sperimentale della resistenza meccanica alla fine del ciclo (R_{fcm}), e di un sistema di calcolo per determinare il valore di R_{acc} a partire dal valore misurato di R_{fcm} .

I dati sperimentali già disponibili indicavano che la correlazione tra R_{acc} ed R_{cm28} era buona per valori di R_{cm28} < 35 MPa, e meno soddisfacente per valori di R_{cm28} > 35 MPa. Pertanto il programma sperimentale del presente lavoro è stato finalizzato al raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- valutare l'attendibilità dell'apparecchiatura *Speedymet* nel prevedere la resistenza meccanica attesa dopo 28 giorni, confrontando i valori R_{acc} calcolati dallo strumento con quelli della re-

sistenza meccanica a compressione per calcestruzzi di media e bassa qualità (R_{cm28} < 35 MPa ed R_{ck} < 30 MPa) maturati per 28 giorni a 20°C e UR = 95% secondo le norme di legge;

- ricavare eventualmente una nuova correlazione tra il valore dell' R_{acc} determinato con apparecchiatura *Speedymet* e la resistenza meccanica a compressione dello stesso calcestruzzo di alta qualità (R_{cm28} > 35 MPa ed R_{ck} > 30 MPa) maturato per 28 giorni a 20°C.

Prove e risultati sulla attendibilità dello strumento

Sono stati confezionati diciotto impasti di calcestruzzo di media e bassa qualità (R_{cm28} < 35 MPa), sei per ogni tipo e classe di cemento a disposizione (325 o 425 Pt oppure 425 Pz), variando, inoltre, la scelta della pezzatura massima dell'aggregato (D_{max} = 19 mm oppure 25 mm) e del rapporto acqua/cemento (da 0.55 a 0.80): in Tabella 1 è riportato, per

D_{max}	19mm	25mm
Cemento 325 Pt	3	3
Cemento 425 Pt	3	3
Cemento 425 Pz	3	3

Tabella 1. Numero di calcestruzzi di media e bassa qualità realizzati per tipologia di impasto.

le diverse tipologie d'impasto realizzate, il numero di calcestruzzi confezionati. Tutti gli impasti sono stati realizzati mescolando gli ingredienti in una betoniera a bicchiere per 5 min. Al termine della miscelazione è stato determinato l'abbassamento al cono di Abrams (slump) e la massa volumica del calcestruzzo fresco, al fine di valutare le rese effettive degli ingredienti per metro cubo di conglomerato cementizio. Per quanto attiene alla

lavorabilità, tutti i calcestruzzi confezionati possedevano consistenze di classe S4 secondo la norma europea ENV 206 (slump > 16 cm) e dosaggi di cemento variabili da 220 a 320 Kg/m³.

Terminate le caratterizzazioni del calcestruzzo fresco, per ogni impasto si è proceduto al confezionamento di quattro provini cubici (lato 8 cm) - utilizzando le casseforme in dotazione all'apparecchiatura *Speedymet* che venivano preliminarmente ricoperte da un leggero velo di disarmante - e otto provini cubici con lato di 15 cm. Terminato il riempimento delle casseforme i provini cubici con lato di otto centimetri venivano introdotti nel forno dell'apparecchiatura *Speedymet* dove subivano un ciclo di maturazione accelerata per 18 ore al termine del quale, utilizzando la pressa di cui è provvista l'apparecchiatura, venivano sottoposti ad una prova di schiacciamento con conseguente determinazione della "resistenza accelerata correlata" (R_{acc}).

I provini cubici con lato di 15 cm, invece, venivano sistemati in camera di maturazione alla temperatura di 20°C ed UR del 95%, conformemente a quanto prescritto dalla normativa di legge per la stagionatura di provini di calcestruzzo destinati ai controlli di accettazione; questi provini a 28 giorni sono stati sottoposti alla prova di schiacciamento condotta con le modalità indicate nella norma UNI 6132 (gradiente di tensione pari a 0.5 MPa/s) per la determinazione della R_{cm28} .

Nelle Tabelle 2, 3 e 4, sono riportati per tutti gli impasti di calcestruzzo di media e bassa qualità i valori di R_{acc} determinati mediante l'apparecchiatura *Speedymet*, unitamente a quelli di R_{cm28} .

Come si può notare, i valori medi della "resistenza accelerata correlata" (R_{accm}) risultano praticamente coincidenti con i valori di resistenza meccanica a compressione a 28 giorni, determinati secondo le modalità di leg-

Tabella 2. Resistenza accelerata correlata dei singoli provini (R_{ac}) e valore medio (R_{acm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e 20°C dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio (R_{cm28}) per i calcestruzzi di media e bassa qualità ($R_{cm28} < 35$ MPa) confezionati con cemento Portland di classe 325.

Impasto N°	D_{max} (mm)	R_{ac} (MPa)	R_{acm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (MPa)	$\frac{R_{acm28} - R_{cm28}}{R_{cm28}} \cdot 100$
1	25	15.3 - 15.8 16.7 - 16.2	16.0	14.9 - 15.0 - 15.0 - 15.4 16.0 - 14.1 - 14.8 - 14.0	14.9	+ 7.38
2	25	20.8 - 20.7 21.0 - 20.3	20.7	19.9 - 19.8 - 19.7 - 18.4 18.8 - 21.0 - 20.4 - 20.4	19.8	+ 4.54
3	25	30.7 - 32.2 31.0 - 31.3	31.3	30.0 - 29.8 - 28.8 - 32.0 30.4 - 30.7 - 30.0 - 31.5	30.4	+ 2.97
4	19	39.5 - 37.0 36.3 - 38.4	37.8	34.7 - 34.3 - 35.4 - 35.8 36.2 - 35.0 - 34.8 - 35.4	35.2	+ 7.39
5	19	25.0 - 25.2 25.3 - 25.7	25.3	24.3 - 25.4 - 25.3 - 24.7 24.8 - 24.2 - 25.1 - 23.8	24.7	+ 2.43
6	19	19 - 21.0 20.0 - 19.6	20.1	19.8 - 20.3 - 20.4 - 19.5 19.7 - 19.8 - 19.0 - 17.5	19.5	+ 3.08

Tabella 3. Resistenza accelerata correlata dei singoli provini (R_{ac}) e valore medio (R_{acm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e 20°C dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio ($R_{cm28} < 35$ MPa) confezionati con cemento Portland di classe 425

Impasto N°	D_{max} (mm)	R_{ac} (MPa)	R_{acm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (Mpa)	$\frac{R_{acm28} - R_{cm28}}{R_{cm28}} \cdot 100$
7	25	31.2 - 31.8 32.3 - 31.9	31.8	29.0 - 30.0 - 30.0 - 30.4 29.0 - 30.0 - 30.0 - 30.0	29.8	+ 6.71
8	25	34.7 - 36.3 36.0 - 36.2	35.8	32.7 - 32.5 - 33.8 - 34.1 32.7 - 33.0 - 33.0 - 33.8	33.2	+ 7.83
9	25	32.8 - 32.9 33.7 - 32.6	33.0	34.8 - 35.5 - 35.2 - 35.7 35.1 - 34.4 - 35.0 - 35.9	35.2	- 6.25
10	19	15.7 - 16.2 17.0 - 18.3	16.8	16.5 - 16.3 - 17.0 - 17.4 17.2 - 17.1 - 16.6 - 17.1	16.9	- 0.59
11	19	20.2 - 20.7 21.7 - 22.6	21.3	20.7 - 22.0 - 20.8 - 20.4 21.2 - 21.5 - 20.3 - 21.9	21.1	- 0.95
12	19	23.8 - 24.6 25.7 - 24.3	24.6	25.8 - 25.7 - 26.3 - 26.1 25.4 - 26.3 - 26.8 - 28.8	26.4	- 6.82

Tabella 4. Resistenza accelerata correlata dei singoli provini (R_{ac}) e valore medio (R_{acm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e 20°C dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio (R_{cm28}) per i calcestruzzi di media e bassa qualità ($R_{cm28} < 35 \text{ MPa}$) confezionati con cemento pozzolanico di classe 425

Impasto N°	D_{max} (mm)	R_{ac} (MPa)	R_{acm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (MPa)	$\frac{R_{acm28} - R_{cm28}}{R_{cm28}} \cdot 100$
13	25	20.0 - 20.7 20.4 - 20.1	20.3	18.5 - 19.1 - 19.9 - 20.4 20.8 - 20.8 - 20.0 - 19.7	19.9	+ 2.01
14	25	29.7 - 29.1 28.8 - 30.0	29.4	29.1 - 29.8 - 29.7 - 28.7 30.4 - 31.7 - 29.3 - 30.5	29.9	- 1.67
15	25	34.7 - 35.8 36.3 - 36.4	35.8	35.7 - 36.0 - 36.7 - 36.0 35.8 - 36.3 - 35.4 - 36.9	36.1	- 0.83
16	19	15.8 - 16.8 16.2 - 18.4	16.8	16.5 - 16.8 - 16.8 - 16.9 16.1 - 16.5 - 16.9 - 17.1	16.7	- 0.60
17	19	27.1 - 26.8 27.5 - 29.0	27.6	27.4 - 28.3 - 28.8 - 29.0 27.7 - 27.8 - 28.0 - 28.6	28.2	- 2.13
18	19	31.8 - 31.5 30.3 - 34.8	32.1	33.9 - 35.8 - 34.9 - 34.9 34.1 - 34.0 - 34.0 - 36.0	34.7	- 7.49

ge. Infatti, il massimo scostamento registrato per la R_{acm} rispetto alla R_{cm28} risulta inferiore all'8%, con un valore medio che si attesta intorno al 4%. Ne consegue che lo *Speedymet* consente di predire la resistenza meccanica di calcestruzzi di media e bassa qualità ($R_{cm28} < 35 \text{ MPa}$) con un errore massimo di 2.8 MPa ($35 \text{ MPa} \cdot 0.08 = 2.8 \text{ MPa}$), che mediamente si riduce a circa 1.4 MPa ($35 \text{ MPa} \cdot 0.04 = 1.4 \text{ MPa}$). Come si può notare si tratta di errori praticamente trascurabili nella tecnologia del calcestruzzo.

Ricerca di una nuova correlazione per i calcestruzzi di alta qualità

Come già detto, la correlazione tra R_{acm} ed R_{cm28} - più che buona per i calcestruzzi di media e bassa qualità - è risultata, invece, meno precisa sulla base delle prove preliminari per i calcestruzzi con $R_{ck} > 30 \text{ MPa}$. Pertanto, è stato affrontato uno specifico

programma di sperimentale per meglio correlare R_{acm} con R_{cm28} ed in questa sezione sono discussi i risultati di questo lavoro.

Sono stati confezionati 44 impasti di calcestruzzo di alta qualità ($R_{cm28} > 35 \text{ MPa}$), dieci dei quali con cemento Portland di classe 325 ed i restanti trentaquattro impasti con cemento di classe 425 tipo Portland e pozzolanico. Il confezionamento degli impasti, come anche la loro caratterizzazione allo stato fresco, è stato effettuato con le modalità già descritte al paragrafo precedente. Tutti gli impasti realizzati possedevano consistenze di classe S4 secondo la norma europea ENV 206 ($slump > 16 \text{ cm}$) e dosaggi di cemento variabili da 300 a 420 Kg/m^3 . Terminata la caratterizzazione del calcestruzzo fresco, si è proceduto al confezionamento di quattro provini cubici da 8 cm di lato e sei provini cubici con lato di 15 cm, i quali hanno subito la stessa maturazione già descritta per i provini del paragrafo precedente. I provini matu-

rati a vapore nel forno dello *Speedymet* sono stati sottoposti ad una prova di schiacciamento per la determinazione delle resistenza meccanica a compressione alla fine del ciclo di vapore (R_{fcm}). I provini cubici maturati per 28 giorni alla temperatura di 20°C ed UR=95% sono stati, invece, sottoposti ad una prova di schiacciamento per la determinazione della R_{cm28} . Nelle tabelle 5,6,7 e 8 sono riportati i valori di R_{fcm} , determinati mediante l'apparecchiatura *Speedymet*, unitamente a quelli di R_{cm28} . Sulla base dei risultati ottenuti, è stata, quindi, ricercata la nuova correlazione tra la resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore (R_{fcm}) e quella (R_{acm}) che lo stesso calcestruzzo avrà presumibilmente dopo 28 giorni di stagionatura a 20°C.

Per i calcestruzzi confezionati con cemento 325 Pt e con inerti aventi diametro massimo di 19 o 25 mm la correlazione è risultata la seguente:

$$R_{acm} = - (R_{fcm})^2 \cdot (0.047) + R_{fcm} (3.64) - 12.27 \quad (1)$$

Tabella 5. Resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore dei singoli provini (R_{fc}) e valore medio (R_{fcm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e $T = 20^\circ\text{C}$ dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio (R_{cm28}) per i calcestruzzi di alta qualità confezionati con cemento Portland di classe 325.

Impasto N°	D_{max} (mm)	R_{fc} (MPa)	R_{fcm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (MPa)
19	19	20.9 - 22.5 20.4 - 20.1	21.1	40.8 - 41.8 - 41.7 - 41.1 40.4 - 40.4 - 40.8 - 43.4	41.3
20	19	21.7 - 21.5 24.1 - 23.9	22.8	47.3 - 46.8 - 46.4 - 48.0 47.6 - 46.5 - 46.0 - 47.4	47.0
21	19	25.4 - 28.5 28.5 - 28.4	27.7	51.8 - 50.8 - 53.0 - 51.2 52.5 - 52.2 - 51.8 - 54.3	52.2
22	19	20.0 - 19.8 22.7 - 22.7	21.3	45.1 - 45.4 - 43.9 - 44.0 45.0 - 44.1 - 45.1 - 42.6	44.4
23	19	22.4 - 22.5 25.1 - 25.6	23.9	48.1 - 48.4 - 49.7 - 49.9 48.3 - 48.5 - 49.1 - 50.8	49.1
24	25	16.1 - 19.7 20.2 - 12.8	17.2	37.1 - 37.8 - 37.9 - 36.8 36.5 - 37.1 - 37.5 - 39.3	37.5
25	25	23.2 - 26.4 24.8 - 25.6	25.0	51.2 - 52.1 - 50.4 - 49.3 50.4 - 50.1 - 49.1 - 51.4	50.5
26	25	22.7 - 21.6 21.6 - 20.5	21.6	45.3 - 46.1 - 46.2 - 46.2 45.5 - 47.0 - 47.1 - 45.4	46.1
27	25	19.8 - 23.1 20.0 - 15.1	19.5	39.3 - 40.7 - 40.1 - 40.1 40.1 - 39.8 - 39.8 - 40.9	40.1
28	25	22.4 - 20.7 22.1 - 23.6	22.2	44.8 - 44.7 - 44.7 - 46.8 45.0 - 45.1 - 45.1 - 46.2	45.3

Tabella 6. Resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore dei singoli provini (R_{fc}) e valore medio (R_{fcm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e $T = 20^\circ\text{C}$ dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio (R_{cm28}) per i calcestruzzi di alta qualità confezionati con cemento Portland e pozzolanico di classe 325.

Impasto N°	D_{max} (mm)	R_{fc} (MPa)	R_{fcm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (MPa)
29	25	16.4 - 22.1 21.7 - 15.8	19.0	38.3 - 39.7 - 40.4 - 40.8 42.1 - 41.3 - 41.4 - 36.8	40.1
30	25	19.1 - 19.7 22.8 - 25.2	21.7	37.2 - 38.7 - 39.4 - 38.3 41.3 - 40.5 - 40.7 - 36.7	39.1
31	25	22.7 - 18.1 19.9 - 22.9	20.9	42.7 - 43.0 - 40.0 - 40.0 39.8 - 41.0 - 41.3 - 41.8	41.2
32	25	20.0 - 20.4 21.0 - 19.0	20.1	41.4 - 40.2 - 40.0 - 38.9 43.6 - 43.0 - 41.4 - 42.7	41.4
33	25	22.8 - 21.0 23.0 - 15.6	20.6	45.7 - 44.8 - 42.0 - 43.1 42.5 - 42.7 - 43.2 - 43.2	43.4
34	25	23.1 - 24.8 22.1 - 22.8	23.2	45.1 - 44.0 - 40.9 - 41.2 42.7 - 42.6 - 42.8 - 41.5	42.6
35	25	26.4 - 23.1 22.4 - 22.1	23.5	43.2 - 43.1 - 44.0 - 47.3 43.7 - 43.0 - 42.5 - 46.0	44.1
36	25	20.5 - 26.3 22.8 - 22.8	23.1	44.2 - 48.0 - 48.0 - 49.0 45.2 - 46.4 - 45.5 - 51.3	47.2
37	25	24.1 - 27.8 24.3 - 23.0	24.8	54.0 - 52.7 - 51.0 - 50.8 48.9 - 49.4 - 49.7 - 52.3	51.1
38	25	28.1 - 23.3 27.1 - 23.5	25.5	55.4 - 57.1 - 52.0 - 48.9 51.5 - 51.0 - 50.8 - 51.7	52.3
39	25	30.1 - 29.1 27.7 - 27.1	28.5	53.8 - 54.4 - 51.2 - 50.8 50.0 - 51.5 - 50.7 - 50.4	51.6
40	25	29.1 - 31.9 27.0 - 26.4	28.6	57.7 - 54.5 - 57.1 - 55.0 55.5 - 56.0 - 56.1 - 56.7	56.1

Tabella 7. Resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore dei singoli provini (R_{fc}) e valore medio (R_{fcm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e $T = 20^{\circ}\text{C}$ dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio (R_{cm28}) per i calcestruzzi di alta qualità confezionati con cemento Portland e pozzolanico di classe 425.

Impasto N°	D_{\max} (mm)	R_{fc} (MPa)	R_{fcm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (MPa)
41	25	16.9 - 17.9 19.9 - 24.1	19.7	43.2 - 38.7 - 42.5 - 41.3 41.0 - 40.8 - 40.4 - 42.5	41.3
42	25	27.7 - 21.3 24.1 - 23.3	24.1	46.9 - 44.8 - 45.3 - 42.7 44.0 - 45.1 - 44.4 - 46.0	44.9
43	25	25.1 - 26.9 24.8 - 23.6	25.1	55.7 - 51.2 - 53.2 - 54.4 52.0 - 51.8 - 51.5 - 52.6	52.8
44	25	31.2 - 31.3 32.1 - 35.0	32.4	59.1 - 58.1 - 57.5 - 57.4 56.0 - 55.8 - 56.5 - 61.2	57.7
45	25	37.1 - 35.9 33.9 - 26.7	33.4	67.4 - 60.0 - 61.2 - 64.0 65.0 - 64.8 - 65.2 - 69.2	64.6
46	19	21.0 - 25.8 23.5 - 22.9	23.3	48.3 - 48.0 - 51.0 - 46.1 46.8 - 47.0 - 47.4 - 43.8	47.3
47	19	24.1 - 31.2 29.7 - 28.6	28.4	54.7 - 52.0 - 53.1 - 50.7 50.8 - 51.0 - 52.5 - 52.0	52.1
48	19	28.4 - 32.7 32.1 - 26.8	30.0	54.1 - 57.5 - 60.7 - 58.5 57.8 - 56.1 - 55.8 - 57.9	57.3
49	19	16.4 - 17.1 17.5 - 17.8	17.2	38.2 - 37.1 - 37.4 - 38.4 39.3 - 39.8 - 40.0 - 36.1	38.3
50	19	24.8 - 25.3 22.7 - 20.4	23.3	47.5 - 46.0 - 41.2 - 44.8 45.1 - 42.7 - 43.5 - 47.6	44.8
51	19	28.1 - 27.3 22.1 - 25.3	25.7	73.4 - 68.0 - 68.1 - 67.4 69.3 - 69.5 - 70.0 - 67.9	69.2
52	19	36.4 - 31.1 32.5 - 33.6	33.4	62.7 - 61.5 - 61.5 - 61.7 60.7 - 60.8 - 60.0 - 61.5	61.3

Tabella 8. Resistenza meccanica alla fine del ciclo di vapore dei singoli provini (R_{fc}) e valore medio (R_{fcm}) e resistenza a compressione a 28 giorni e $T = 20^{\circ}\text{C}$ dei singoli provini (R_{c28}) e valore medio (R_{cm28}) per i calcestruzzi di alta qualità confezionati con cemento Portland e pozzolanico di classe 425.

Impasto N°	D_{\max} (mm)	R_{fc} (MPa)	R_{fcm} (MPa)	R_{c28} (MPa)	R_{cm28} (MPa)
53	19	21.7 - 20.0 20.0 - 17.9	19.9	47.1 - 44.4 - 42.1 - 40.0 41.0 - 40.7 - 43.9 - 51.2	43.8
54	19	27.1 - 28.4 24.3 - 23.4	25.8	52.7 - 49.1 - 51.0 - 51.5 52.1 - 51.0 - 51.7 - 47.3	50.8
55	19	21.2 - 23.7 23.8 - 26.9	23.9	54.1 - 54.4 - 51.8 - 56.1 57.1 - 58.4 - 48.3 - 42.2	52.8
56	19	23.7 - 23.8 27.1 - 19.0	23.4	53.1 - 54.5 - 55.1 - 52.0 51.8 - 51.0 - 51.2 - 52.9	52.7
57	19	21.2 - 25.1 27.9 - 29.4	25.9	57.1 - 55.4 - 51.3 - 52.7 54.0 - 53.8 - 53.7 - 54.8	54.1
58	19	24.8 - 25.7 26.1 - 33.8	27.6	57.1 - 53.8 - 54.1 - 55.0 52.7 - 53.9 - 54.1 - 54.5	54.4
59	19	27.1 - 28.4 24.8 - 22.9	25.8	59.7 - 61.3 - 60.7 - 56.1 57.3 - 58.5 - 58.0 - 58.0	58.7
60	19	28.5 - 27.1 25.8 - 25.8	26.8	60.1 - 60.0 - 56.7 - 56.1 59.3 - 59.5 - 59.4 - 60.1	58.9
61	19	29.1 - 31.4 30.0 - 23.5	28.5	60.1 - 60.0 - 60.0 - 58.0 57.4 - 59.1 - 59.0 - 59.2	59.1
62	19	28.1 - 27.5 24.7 - 29.3	27.4	60.0 - 60.4 - 63.7 - 62.1 60.0 - 60.3 - 61.0 - 62.1	61.2

Con questa correlazione i risultati che fornirebbe lo strumento in termini di "resistenza accelerata correlata", R_{acm} , sono riportati in Tabella 9, unitamente ai valori di R_{cm28} .

1.2 MPa). E' inutile sottolineare che si tratta di errori praticamente trascurabili. Per i calcestruzzi confezionati con un cemento di classe 425 Portland o pozzolanico sono state trovate le se-

dente con il valore della R_{cm28} determinato secondo le modalità di legge. Lo scostamento massimo registrato, infatti, è pari all'8.95%, con un valore medio che si attesta intorno al 2.8%. Quindi, l'errore massimo commesso dallo strumento nella previsione della R_{cm28} è di 4 MPa ($45 \cdot 0.0895 = 4.03$ MPa), il quale mediamente si riduce a circa 1.3 MPa ($45 \cdot 0.028 = 1.26$ MPa). Anche per i calcestruzzi con $R_{cm28} > 45$ MPa (Tabella 11) la previsione della R_{cm28} fatta dall'apparecchiatura è sufficientemente corretta, in quanto il massimo scostamento registrato (non tenendo conto dei dati relativi all'impasto N 51) è pari al 9.97%, con un valore medio di circa il 4.3%.

Pertanto, l'errore massimo dello strumento nel prevedere la R_{cm28} sarà di circa 6 MPa ($60 \cdot 0.0997 = 5.98$ MPa) e si attesterà mediamente intorno a 2.6 MPa ($60 \cdot 0.043 = 2.58$ MPa).

CONCLUSIONI

Mediante l'apparecchiatura utilizzata (Speedymet) è possibile prevedere in sole 18 ore dal confezionamento la resistenza meccanica del calcestruzzo dopo 28 giorni di stagionatura a 20°C (R_{cm28}) come previsto dalle norme di legge.

La previsione della R_{cm28} è effettuata sfruttando le correlazioni esistenti tra la resistenza meccanica del calcestruzzo stagionato con un determinato ciclo di vapore e quella dello stesso calcestruzzo maturato per 28 giorni a 20°C. Nel presente lavoro è stata verificata l'attendibilità dello strumento nel prevedere la R_{cm28} per calcestruzzi di media e bassa qualità ($R_{cm28} < 35$ MPa). Inoltre, sono state ricercate nuove correlazioni tra la resistenza del calcestruzzo alla fine di un determinato ciclo di vapore e la resistenza dello stesso calcestruzzo maturato secondo le modalità di legge.

Dallo studio è emerso che, con que-

Impasto N°	R_{cm28} (MPa)	R_{acm} (MPa)	$\frac{R_{acm28} \cdot R_{cm28}}{R_{cm28}} \cdot 100$
19	41.3	43.9	6.30
20	47.0	46.6	-0.85
21	52.2	52.9	1.34
22	44.4	44.2	-0.45
23	49.1	48.2	-1.83
24	37.5	36.6	-2.40
25	50.5	49.7	-1.58
26	46.1	44.7	-3.04
27	40.1	41.1	2.49
28	45.3	45.7	0.88

Tabella 9. Resistenza accelerata correlata desunta dalla curva di correlazione 1 (R_{acm}) e resistenza meccanica a compressione a 28 giorni e 20°C (R_{cm28}) per calcestruzzi confezionati con cemento Portland 325.

Come si può notare, grazie alla nuova correlazione trovata, lo strumento in sole 18 ore è in grado di predire con sufficiente accuratezza la resistenza meccanica del calcestruzzo stagionato secondo le modalità di legge per 28 giorni. In particolare, occorre sottolineare che il massimo scostamento registrato per la R_{acm} dalla R_{cm28} risulta pari al 6.30%, con un valore medio di circa il 2%.

Ciò equivale a dire che, grazie alla correlazione trovata, lo Speedymet è in grado di predire la resistenza meccanica a 28 giorni di calcestruzzi di alta qualità ($35 \text{ MPa} < R_{cm28} < 60 \text{ MPa}$) con un errore massimo di circa 3.8 MPa ($60.0 \text{ MPa} \cdot 0.0630 = 3.78 \text{ MPa}$), che mediamente si riduce a 1.2 MPa ($60.0 \text{ MPa} \cdot 0.02 =$

guenti correlazioni:

$$R_{acm} = - (R_{fcm})^2 (0.02) + R_{fcm} (1.61) + 17.3 \quad (2) \text{ valida per calcestruzzi con } 35 < R_{cm28} < 45 \text{ MPa e}$$

$$R_{acm} = - (R_{fcm})^2 (0.021) + R_{fcm} (2.35) + 6.7 \quad (3) \text{ valida per calcestruzzi con } R_{cm28} > 45 \text{ MPa.}$$

Con queste nuove correlazioni i risultati che fornirebbe lo Speedymet, in termini di resistenza accelerata, sono riportati nelle Tabelle 10 e 11 che si riferiscono rispettivamente a calcestruzzi con R_{cm28} compresa tra 35 e 45 MPa ed $R_{cm28} > 45$ MPa. Come si può notare per i calcestruzzi con R_{cm28} compresa tra 35 e 45 MPa il valore di R_{acm} è praticamente coinci-

Impasto N°	R_{cm28} (MPa)	R_{acm} (MPa)	$\frac{R_{acm28} - R_{cm28}}{R_{cm28}} \cdot 100$
29	40.1	40.5	1.00
30	39.1	42.6	8.95
31	41.2	42.0	1.94
32	41.4	41.4	0.00
33	43.4	41.8	-3.69
34	42.6	43.6	2.35
35	44.1	43.8	-0.68
41	46.1	44.7	-3.04
42	44.9	44.2	-1.56
46	44.8	43.7	-2.46
49	38.3	38.9	1.57
53	43.8	41.2	5.94

Tabella 10. Resistenza accelerata correlata desunta dalla curva di correlazione 2 (R_{acm}) e resistenza meccanica a compressione a 28 giorni a 20°C (R_{cm28}) per calcestruzzi confezionati con cemento Portland o pozzolanico di classe 425 con 35 MPa < R_{cm28} < 45 MPa

Impasto N°	R_{cm28} (MPa)	R_{acm} (MPa)	$\frac{R_{acm28} - R_{cm28}}{R_{cm28}} \cdot 100$
36	47.2	49.6	5.08
37	51.1	51.9	1.57
38	52.3	52.8	0.96
39	51.6	56.4	9.30
40	56.1	56.5	0.71
43	52.8	52.3	-0.95
44	57.7	60.5	4.85
45	64.6	61.4	-4.59
47	52.1	56.3	8.06
48	57.3	58.0	1.22
51*	69.2	53.2	-23.12*
52	61.3	61.4	0.16
54	50.8	53.2	4.72
55	52.8	50.7	-3.98
56	52.7	50.0	-5.12
57	54.1	53.3	-1.48
58	54.4	55.3	1.65
59	58.7	53.2	-9.40
60	58.9	54.4	-7.64
61	59.1	56.4	-4.57
62	61.2	55.1	-9.97

Valore non utilizzato per il calcolo della correlazione*

Tabella 11. - Resistenza accelerata correlata desunta dalla curva di correlazione 3 (R_{acm}) e resistenza meccanica a compressione a 28 giorni a 20°C (R_{cm28}) per calcestruzzi confezionati con cemento Portland o pozzolanico di classe 425 con $R_{cm28} > 45$ MPa.

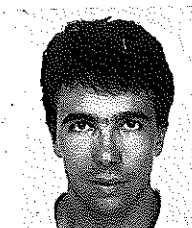
ste nuove correlazioni, lo *Speedymet* è in grado in sole 18 ore di prevedere con sufficiente precisione la resistenza meccanica del calcestruzzo dopo 28 giorni di stagionatura indipendentemente dalla sua qualità e fino ad un R_{ck} di 55 MPa.

Il massimo scostamento della resistenza accelerata correlata dal valore di resistenza a compressione determinato secondo le modalità di legge, è pari al 10%. Tale scostamento si attesta mediante intorno al 3%



Mario Collepari

Enco, Engineering
Concrete, Spresiano (TV).



Luigi Coppola

Enco, Engineering
Concrete, Spresiano (TV).

Bibliografia

- [1] Norma ENV 206: Concrete. Production, placing and compliance criteria.
- [2] Norma UNI 9858. Calcestruzzo. Prestazioni, produzione, posa in opera e criteri di conformità.
- [3] M.Collepari, L.Coppola, L'Industria Italiana del Cemento, 665, pg.271-277, Roma (1992).
- [4] L.Coppola, G.Mariconi, L'Industria Italiana del Cemento, 655, pg.341-346, Roma (1991)
- [5] E.Siviero, "Nuova tecnica e apparecchiature per la misura della resistenza del calcestruzzo a poche ore dal getto", III° Convegno Nazionale sulle Indagini non distruttive per il controllo di qualità e la diagnostica delle opere di Ingegneria Civile, Bologna, 21-22 ottobre 1987.
- [6] E.Siviero, S.Martinello, P.Marasciulo, C.Equestri, "Valutazione della resistenza del calcestruzzo a poche ore dal getto II° fase sperimentale", Conferenza Nazionale sulle prove non distruttive, Bologna, 8-11 maggio 1988.
- [7] E.Siviero, S.Martinello, P.Marasciulo, C.Equestri, "Valutazione della resistenza del calcestruzzo mediante prove a poche ore dal getto, indagine teorico-sperimentale", Congresso C.T.E., Venezia, 4-6 ottobre 1988.

Renzo Aicardi

PAVIMENTI INDUSTRIALI IN CALCESTRUZZO



ITEC
editrice

DE LETTERA EDITORE
20131 MILANO - VIA BAZZINI 17
TEL. 02/2664781 - 2666345 - FAX 2664781