

CAROTAGGIO E CLASSIFICAZIONE DEL CALCESTRUZZO: INCERTEZZA ED AFFIDABILITA'

F. Bovio

BOVIAR s.r.l. – Milano

A. Brencich¹, G. Cassini², G. Riotto², D. Pera²

Dipartimento di Ingegneria Civile, Chimica e Ambientale - DICCA, Univ. of Genoa, Italy

¹ Direttore Tecnico dei Laboratori DICCA

² Laboratori DICCA, Ingegnere, Ph.D.

Tematiche: controlli e caratterizzazione meccanica e monitoraggio dell'ingegneria civile, tecniche innovative nel controllo NDT in campo civile.

Introduzione

La stima della resistenza del calcestruzzo di strutture esistenti è uno dei temi centrali per i laboratori di Ingegneria Strutturale che trova due principali applicazioni: i) su calcestruzzi con maturazione di diversi decenni, per gli edifici oggetto di ristrutturazioni e modifiche; ii) su calcestruzzi con maturazione di pochi mesi quando vi siano contestazioni sulla qualità del calcestruzzo posto in opera. Quest'ultimo caso si pone quando i risultati dei campioni standard (cubi in Italia, cubi e cilindri all'estero) si pongono al di sotto dei valori attesi con risvolti tecnico-giuridici ed economici che possono essere anche di assoluto rilievo. Nel primo caso, invece, i risultati delle campagne d'indagine possono definire limiti, anche molto stringenti, alle trasformazioni previste.

Nel contesto tecnico internazionale questo problema è stato studiato fin dagli anni '50, particolarmente negli U.S.A., giungendo a conclusioni, codificate nelle diverse normative tecniche [1 e 2], che è utile ricordare esplicitamente:

ASTM C42 Section 3.5: "There is no unique relationship between the compressive strength of a core and the corresponding compressive strength of standard-cured moulded cylinders. The relationship is affected by many factors such as the strength level of the concrete, the in-place temperature and moisture histories, the degree of consolidation, batch-to-batch variability, the strength gain characteristics of the concrete, the condition of the coring apparatus and the care used in removing cores. Historically, it has been assumed that core strengths are generally 85% of the corresponding standard-cured cylinder strengths, but this is not applicable to all situations."

ACI 214.4: "There is no universally accepted method for determining the 10% fractile of the in-place strength."

Le molte incertezze osservate hanno condotto la comunità tecnica e scientifica internazionale a stimare la resistenza del calcestruzzo in opera mediante l'uso di diverse tecniche sperimentali [3] e dedurre la precisione della stima dal confronto tra diverse tecniche [4, 5]; in Europa, un parziale inquadramento normativo è dato da [6-8] mentre

negli USA dalle già citate istruzioni ASTM e ACI [1 e 2]. Essenzialmente, in campo internazionale, così come in Italia, la stima della resistenza del calcestruzzo in opera viene eseguito, ove non vi siano stringenti e strette limitazioni di tipo economico, con l'impiego sia di procedure non distruttive (sclerometro, ultrasuoni) che di prove moderatamente distruttive (pull-out, carotaggi, sonda Windsor).

I costi connessi con l'impiego di diverse procedure sperimentali, particolarmente quelle moderatamente distruttive come il pull-out e, soprattutto, il carotaggio, hanno condotto a cercare di migliorare la precisione della stima mediante l'uso combinato di diverse tecniche non distruttive, dando origine ai metodi combinati noti anche come metodi SONREB [3, 9-17].

L'evoluzione tecnologica, la ricerca scientifica e specifiche condizioni tecnico-economiche dei diversi paesi hanno condotto a prassi e procedure nazionali che, pur se riferita a standard di prova internazionali, possono essere alquanto diverse. Ad esempio, in Belgio il pull-out, sia nella sua versione danese CAPO-test che nella versione italiana, è conosciuto a livello accademico ma pressoché sconosciuto (e non usato) nel contesto professionale; in Turchia la tecnologia del pull-out pare essere ancora non conosciuta.

In Italia, il carotaggio viene tipicamente considerato come la prova per eccellenza nella definizione della resistenza del calcestruzzo di strutture esistenti a cui riferire e su cui tarare le altre prove. Eppure, la letteratura scientifica, particolarmente quella statunitense, ha evidenziato come la resistenza di una carota sia alquanto diversa da quella di un campione cilindrico confezionato durante il getto, e come la resistenza dei due tipi di cilindri sia difficilmente correlabile, come ricordato in apertura di questo lavoro.

In questo lavoro viene posta l'attenzione sulla variabilità delle stime di resistenza e sulle anomalie che si possono verificare per condizioni di maturazione diversificate. La base dati è costituita da campioni cilindrici, cubici e prismatici, questi ultimi impiegati per estrarre le carote, confezionati con 5 distinte classi di calcestruzzo.

Tabella 1: Classi di calcestruzzo impiegate nella campagna sperimentale

Classe	C8/R10	C25/R30	C40/R50	C55/R67	C70/R85
R_c - cubica [MPa]	17.8	41.9	50.1	72.4	97.1
R_c - std. Dev. [MPa]	0.3	1.5	3.0	7.3	3.5
R_c - CoV %	1.6	3.5	6.3	10.1	3.6
Densità [kN/m³]	2133	2175	2180	2255	2382
f_c - cilindrica [MPa]	13.9	30.7	38.2	53.7	71.3
f_c -std. Dev. [MPa]	1.3	1.9	2.4	5.13	6.8
f_c - CoV %	8.7	5.6	6.0	9.6	9.5
Densità [kN/m³]	2150	2179	2171	2262	2380
f_c/R_c	0.78	0.73	0.74	0.74	0.73

La campagna sperimentale

Le Tabelle 1 e 2 riassumono le principali caratteristiche dei 5 calcestruzzi impiegati per la campagna sperimentale, tutti con granulometria compatibile alla curva di Bolomey. Per ogni calcestruzzo sono stati confezionati 30 campioni cubici 15x15x15cm, 30 campioni cilindrici 15x30cm e 15 prismi 30x30x50cm da cui sono state poi ricavate 30 carote. Il numero elevato di campioni ha consentito di misurare la resistenza del calcestruzzo a diversi stadi di maturazione e di conservare i campioni in diverse condizioni di maturazione:

- maturazione in acqua, $T=20\pm 2^{\circ}\text{C}$;
- maturazione in laboratorio, $T=24\pm 3^{\circ}\text{C}$, $\text{RH}=80\pm 5\%$;
- maturazione in ambiente esterno (Desio, MB) con forti escursioni termiche stagionali (T prossime a 0°C in inverno e fino a 35°C in estate), umidità variabile.

Tabella 2: Composizione principale dei calcestruzzi

Portland composito	Classe progettata	a/c	cemento kg/m^3	inerte kg/m^3	m. v. kg/m^3	saturo kg/m^3	asciutti kg/m^3
IIBLL 32,5R Buzzi	C8/10	1,179	200	1937,84	2200	2277	2158
	C25/30	0,579	306,2	1928,11	2287	2245	2157
IIALL 42,5R Buzzi	C40/50	0,45	372,2	1812,38	2240	2249	2185
	C55/67	0,347	441,1	1797,47	2285	2269	2237
	C70/85	0,301	506,9	1844,95	2458	2409	0,0

Le figure da 1 a 5 riportano le curve di maturazione delle 5 classi di calcestruzzo analizzate previste dall'EuroCodice 2 [18], unitamente ai dati rilevati nel tempo sui diversi campioni (cubici, cilindrici e carote); i dati medi sono riassunti in Tabella 3.

La curva di maturazione dell'EC2 (eqq. 3.1 e 3.2) è data da:

$$f_c(t) = f_{c,28} e^{s \left(1 - \sqrt{\frac{28}{t}} \right)}, \quad (1)$$

in cui $s = 0.2, 0.25, 0.38$ in funzione del tipo e della classe del cemento; nelle figure 1-5 è stato assunto $s=0.25$ in tutti i casi.

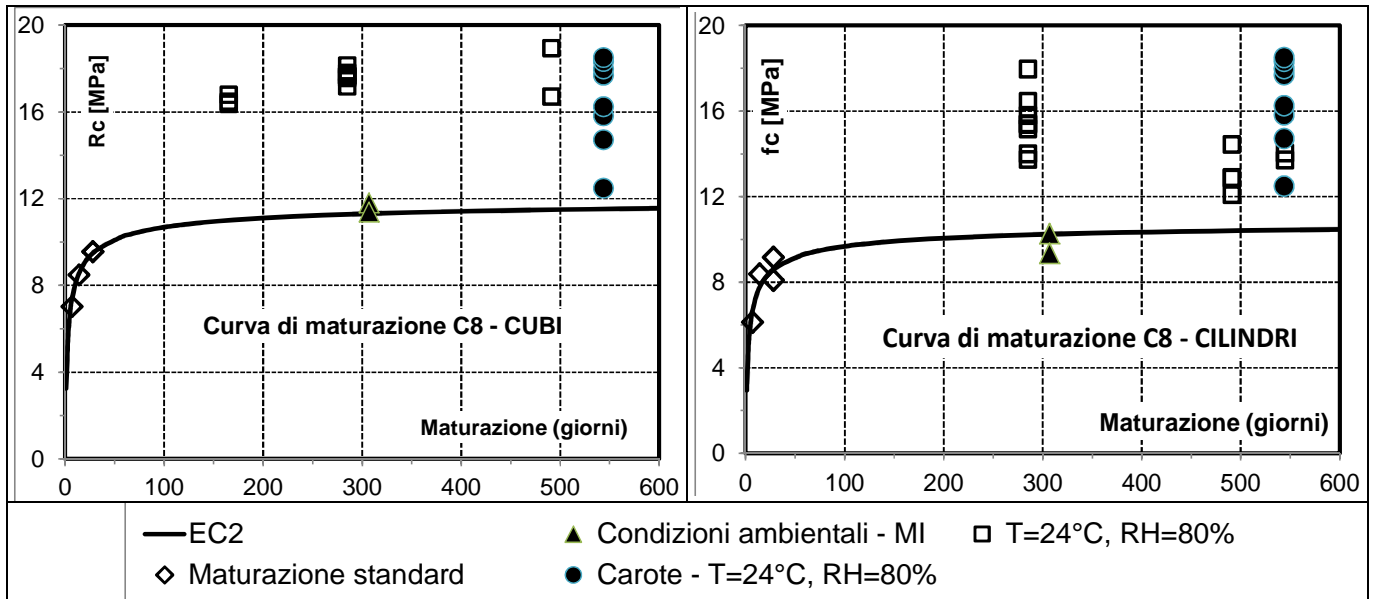


Figura 1. Curve di maturazione e dati sperimentali per cls C8/10

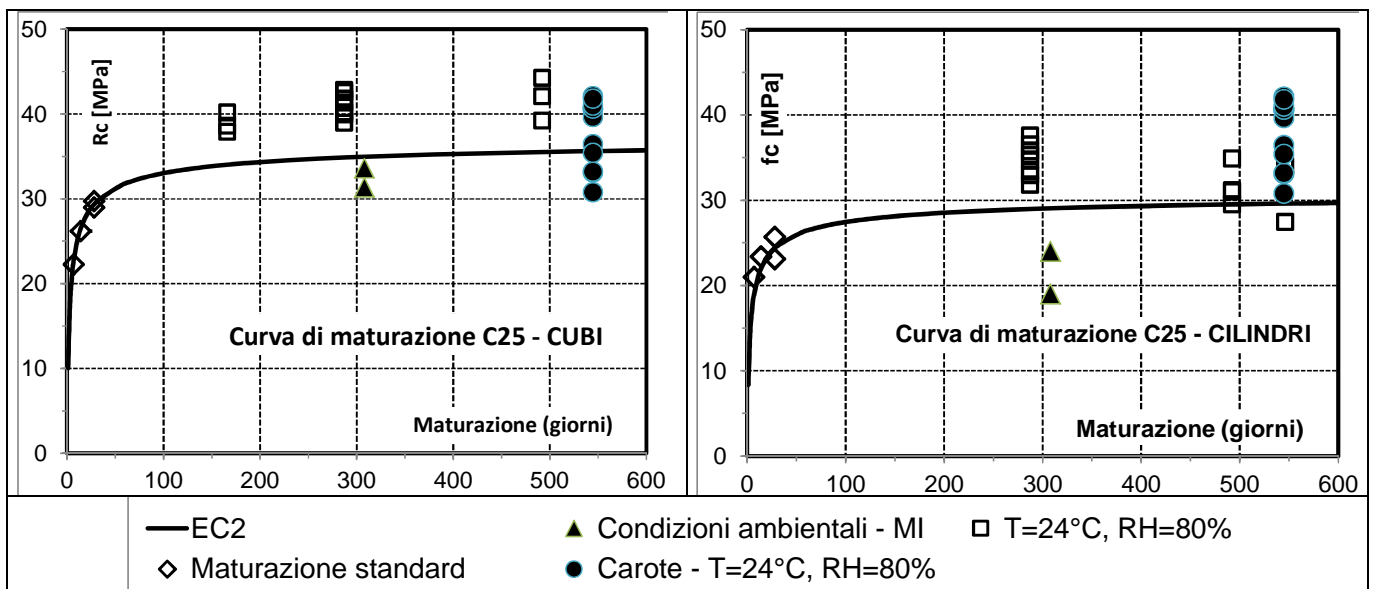


Figura 2. Curve di maturazione e dati sperimentali per cls C25/30

Discussione

Il pur non vastissimo campione di dati sperimentali evidenzia alcune circostanze ricorrenti:

- il rapporto f_c/R_c tra resistenza cilindrica f_c e resistenza cubica R_c viene assunto da tutte le normative pari a 0.83. Esso tuttavia coincide con tale valore solo nelle prime settimane (a 28gg) mentre a 1 anno o più tale rapporto si colloca attorno a 0.75 per condizioni di maturazione controllate (laboratorio) e scende a 0.66 per condizioni di maturazione incontrollate (ambientali). Inoltre, quanto meno resistente è un calcestruzzo tanto maggiore è il rapporto f_c/R_c ;

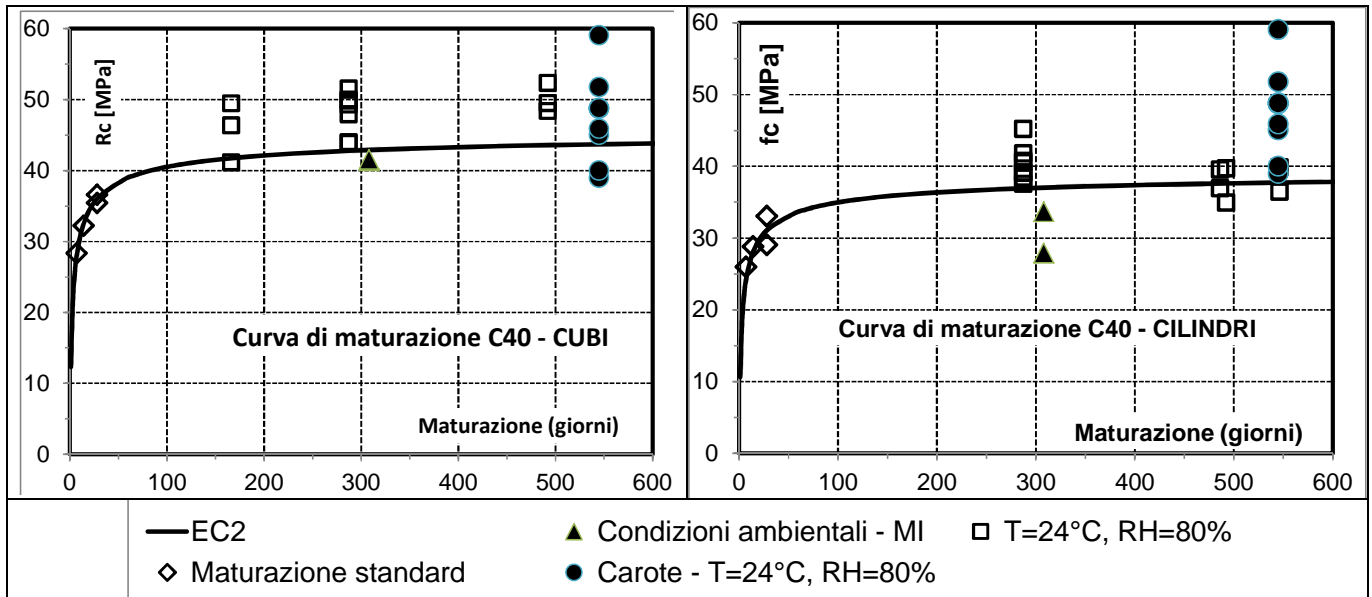


Figura 3. Curve di maturazione e dati sperimentali per cls C40/55

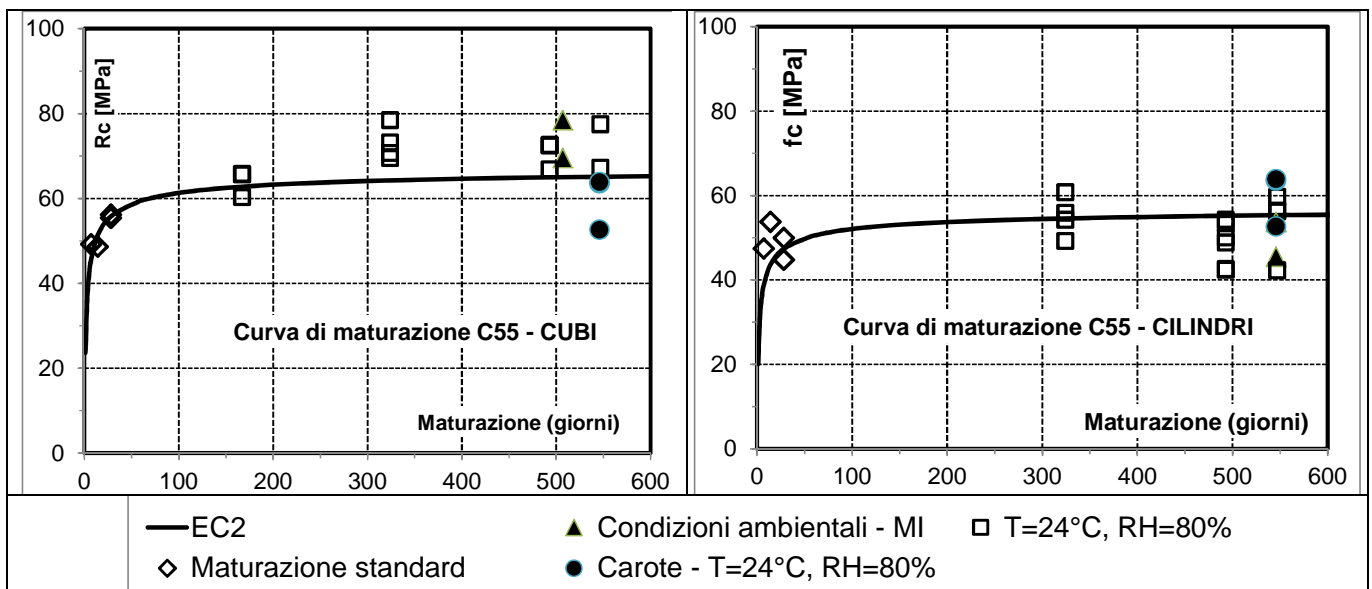


Figura 4. Curve di maturazione e dati sperimentali per cls C55

- la curva di maturazione proposta da EC2, e da questo esplicitamente indicata come riferimento orientativo, interpola bene i dati dei primi giorni, essendo riferita alla resistenza del calcestruzzo a 28 giorni. Quando si consideri l'asintoto delle curve dell'EuroCodice, ovvero la resistenza a tempo "infinito", si osserva, in genere, una forte differenza rispetto al dato sperimentale per calcestruzzi a bassa resistenza, per i quali la resistenza prevista può essere anche ridotta ai 2/3 della resistenza misurata effettivamente, mentre un buon accordo si rileva per calcestruzzi ad alta resistenza;

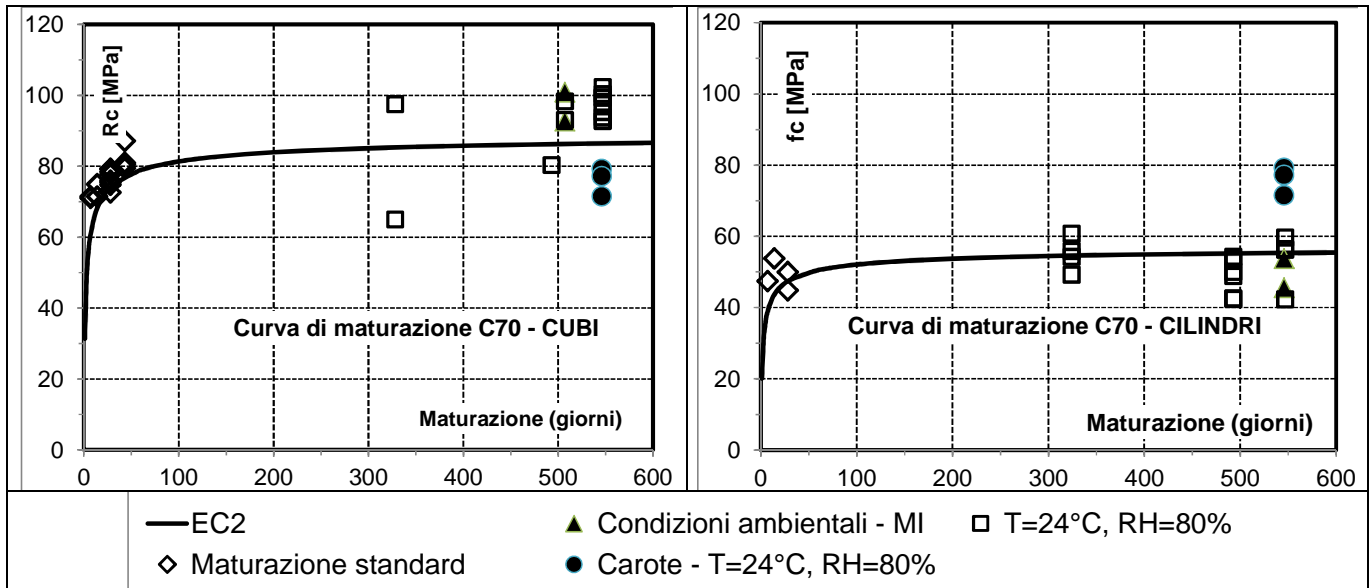


Figura 5. Curve di maturazione e dati sperimentali per cls C70

Tabella 3: Risultati sintetici della campagna sperimentale

	R_c	f_c	f_c/R_c	R_c	f_c	f_c/R_c	R_c	f_c	f_c/R_c	f_{car}
Matur. [gg]	28			300			490			550
Matur. [condizioni]	T=20±2°C RH=100%			Ambiente (Desio, MB)			Laboratorio T=24±3°C RH=80±5%			
C10	9,6	8,6	0,90	11,58	9,8	0,85	17,8	13,9	0,78	16,5
C25	29,4	24,4	0,83	32,5	21,5	0,66	41,9	31,6	0,73	37,9
C40	36,0	31,1	0,86	41,5	30,8	0,74	50,1	38,2	0,76	47,6
C55	55,8	47,4	0,85	73,9	49,6	0,67	72,4	53,7	0,74	60,0
C70	74,1	61,8	0,83	96,8	61,7	0,64	97,1	71,3	0,73	76,0

- i cubi e cilindri maturati in condizioni ambientali non controllate e con forti gradienti sia di temperatura che di umidità presentano resistenza nettamente inferiore rispetto a quanto rilevato su campioni maturati in condizioni controllate; inoltre, la resistenza dei cilindri maturati in condizioni non controllate è sempre inferiore rispetto alla resistenza dei corrispondenti cubi;
- la dispersione dei dati sperimentali, anche quella dei campioni maturati in condizioni controllate, è piuttosto elevata; per i cilindri la dispersione appare maggiore di quella dei cubi;
- in generale si osserva come la resistenza delle carote sia maggiore della resistenza dedotta da campioni cilindrici e come sia, nella media, superiore a quella prevista dalla curva di maturazione dell'Euro Codice 2. Tale osservazione contrasta con il disposto normativo che ammette in opera una resistenza misurata pari a 0.85 volte la resistenza prevista.

Conclusioni

I dati sperimentali sono riportati in modo riorganizzato nella Tabella 4. Si osserva come la resistenza della carota non sia mai inferiore alla resistenza cilindrica misurata su campioni cilindrici. Pur escludendo la classe di calcestruzzo inferiore, che manifesta un inatteso recupero di resistenza nel tempo, si osserva come la valutazione della resistenza su cilindro (confezionato con calcestruzzo fresco) sia costantemente la stima inferiore della resistenza. Questa circostanza è probabilmente dovuta alla maggiore superficie specifica della carota che la rende intrinsecamente più sensibile alle condizioni di maturazione; tale osservazione giustificherebbe anche la circostanza per la quale la resistenza della carota estratta dal prisma sia sempre quella più elevata, in quanto la carota, essendo estratta da un prisma di calcestruzzo, è costituita da una massa di materiale che non ha risentito, sulla superficie esterna, delle condizioni di maturazione.

Tabella 4: Variazione della resistenza cilindrica del calcestruzzo

Classe	f_c 28gg	f_c 300gg	f_c 490gg	f_{c_EC2} $t \rightarrow \infty$	f_{c_carota} 550gg	$f_{c_carota}/$ f_{c_28}	$f_{c_carota}/$ f_{c_300}	$f_{c_carota}/$ f_{c_490}	$f_{c_carota}/$ f_{c_EC2}
C10	8,6	9,8	13,9	10,5	16,5	1,91	1,68	1,19	1,57
C25	24,4	21,5	31,6	29,8	37,9	1,55	1,76	1,20	1,27
C40	31,1	30,8	38,2	38,0	47,6	1,53	1,54	1,25	1,25
C55	47,4	49,6	53,7	55,6	60,0	1,27	1,21	1,12	1,08
C70	61,8	61,7	71,3	72,3	76,0	1,23	1,23	1,07	1,05

Sulla base dei dati raccolti, si vuole mostrare come l'impiego delle formule oggi disponibili in letteratura possa condurre a stime della resistenza alquanto diverse da quanto verificabile sperimentalmente.

Si supponga di dover definire la resistenza di una struttura realizzata con il calcestruzzo classificato come C25; la sua resistenza cubica R_c a 28gg è pari a 29.4MPa, mentre quella cilindrica f_c a 28gg è di 24.4 MPa. Tali due numeri sono nel rapporto di 1/0.83, con questo soddisfacendo appieno la classificazione di EC2. Il calcestruzzo denominato C25 è, in realtà un calcestruzzo di classe C29/24.

I carotaggi eseguiti a 550gg dal getto hanno restituito una resistenza media di 37.9MPa. Applicando le formule delle diverse normative, si perverrebbe ad una resistenza cubica R_c pari a $37.9/0.83/0.85=53.7$ MPa, mentre quella cilindrica f_c di $37.9/0.85=44.6$ MPa, valori che sfiorano il doppio di quella effettiva di riferimento. Se si applicassero i coefficienti correttivi reperibili in letteratura, variabili da 1.06 [2 e 19] a 1.10 [20] si salirebbe a 57 e 59MPa per la resistenza cubica rispettivamente.

I valori particolarmente elevati della resistenza delle carote, evenienza decisamente inattesa, si spiegano con due circostanze:

- i) le carote sono state prelevate dal cuore di prismi di 30x30x52cm conservati in condizioni ambientali costanti, semi-controllate e a temperatura più elevata sia delle

condizioni standard di maturazione sia di quelle medie ambientali; pertanto, si tratta di carote maturate in condizioni particolarmente vantaggiose che non hanno risentito dell'abbassamento di resistenza dovute a forti gradienti di temperatura/umidità ambientale;

ii) le operazioni di carotaggio, eseguite in laboratorio, sono state particolarmente accurate in modo da minimizzare il danno al campione.

Per ovviare a questo possibile bias, si assume come coefficiente correttivo α delle condizioni di maturazione il rapporto tra la resistenza rilevata su campioni maturati all'aria aperta f_{c_300gg} e quella a 490gg, approssimativamente quella dell'epoca del carotaggio:

$$\alpha = f_{c_300gg} / f_{c_490gg} = 21.5/31.6 = 0.68,$$

Per una struttura maturate in condizioni ambientali medie, quindi, è necessario attendersi una resistenza del 32% inferiore rispetto a quella delle carote prelevate in laboratorio nell'ambito di questa ricerca. Applicando tale riduzione alla resistenza della carota, si perverrebbe ad una resistenza della carota "maturata in ambiente incontrollato" di 25.7MPa, pressoché coincidente con la classe del calcestruzzo.

Sebbene la base dati sia ancora troppo limitata per poter trarre considerazioni generali, da analoghe considerazioni sulle altre classi di calcestruzzo, è possibile dedurre che le condizioni di maturazione dei campioni e della massa di calcestruzzo da cui viene prelevata la carota sono elementi centrali nella stima della resistenza e della classe del calcestruzzo. Infatti, la classe del calcestruzzo è definita con riferimento a condizioni di maturazione standard mentre le carote sono prelevate da strutture maturate in condizioni affatto diverse. Non tenere conto dell'effetto della maturazione può falsare profondamente la classificazione del materiale, con ripercussioni tecnico-economico-giuridiche anche irrimediabili. Se, in vero, le condizioni di maturazione usuali delle strutture sono ben lontane da quelle controllate del laboratorio, è vero che all'interno delle strutture massicce si possono creare condizioni locali di maturazione molto prossime a quelle conseguite nel laboratorio in questo lavoro.

I dati, ancora non estesi, di questa campagna sperimentale, esemplificati dalle valutazioni speditive svolte poco sopra, mostrano anche come la riduzione di resistenza del 15% nelle strutture in opera, indicata dalla normativa nazionale vigente, possa essere una sottostima rilevante (dal 15% al 32%) dell'effetto della maturazione. Queste conclusioni sono coerenti con quanto rilevato in alcune ricerche.

Riferimenti bibliografici

- [1] ASTM C42-C42M, 2013. *Standard Test Method for Obtaining and Testing Drilled Cores and Sawed Beams of Concrete.*
- [2] ACI 214.4, 2010: *Guide for obtaining cores and interpreting compressive strength results.*
- [3] Malhotra, V.M., Carino, N.J., *Handbook on non destructive testing of concrete*, 2nd ed., CRC Press, Boca Raton, 2004.

- [4] Hobbs B., Kebir M.T., 2007. Non-destructive testing techniques for the forensic engineering investigation of reinforced concrete buildings. *Forensic Science International*, **167**, 167–172.
- [5] Qasrawi H.Y., 2000. Concrete strength by combined nondestructive methods simply and reliably predicted, *Cement and Concrete Research*, **30**, 739-746.
- [6] EN 13792, 2007. *Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components*.
- [7] EN 12390, 2009. *Testing hardened concrete*.
- [8] EN 12504, 2009. *Testing concrete in structures*.
- [9] Arioğlu E., Köylüoğlu O., 1996. *Discussion of prediction of concrete strength by destructive methods by Ramyar and Kol*. *Cem., Concr. World* 3, Turkish.
- [10] Bocca P., Cianfrone S., 1983. *Le prove non distruttive sulle costruzioni: una metodologia combinata*. *L'Industria Italiana del Cemento*, 6, 429-436.
- [11] Del Monte E, Lavacchini G., Vignoli A, 2004. *Modelli per la previsione della resistenza a compressione del calcestruzzo in opera*. *Ingegneria Sismica* anno XXI n°3.
- [12] Di Leo A., Pascale G., 1994. *Prove non distruttive per l'affidabilità e la sicurezza delle strutture civili*, Bologna SAIE 1994.
- [13] Gašparik J., 1992. *Prove non distruttive in edilizia*. Quaderno didattico A.I.P.N.D., Brescia.
- [14] Giachetti R., Lacquaniti L., 1980. *Controlli non distruttivi su impalcati da ponte in cemento armato*. Nota Tecnica 04, Università degli studi di Ancona – Facoltà di Ingegneria.
- [15] Masi A., La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive, *Il Giornale della Prove non Distruttive Monitoraggio e Diagnostica*, 1/2005.
- [16] Puccinotti R., D'Elia A., De Lorenzo R., *I metodi combinati a più parametri nella stima della resistenza a compressione del calcestruzzo*, Atti di PnD Milano 2007, Milano, 11-13 ottobre 2007.
- [17] Zocca A., Di Lena M., (1986). “I controlli non distruttivi e la valutazione della resistenza dei calcestruzzi in opera”, Istituto Sperimentale FS.
- [18] EN 1992-1-1:2005. Eurocode 2 - Design of concrete structures
- [19] Federal Emergency Management Agency - FEMA 274, 1991: *Guidelines for the seismic rehabilitation of buildings*
- [20] Masi, A., Vona M., 2009. La stima della resistenza del calcestruzzo in-situ: impostazione delle indagini ed elaborazione dei risultati, *Progettazione sismica*, **1**, IUSS Press.