

PROVE SPERIMENTALI DI RESISTENZA DI CALCESTRUZZI IN OPERA

M.T. Cristofaro¹, S. Barducci¹, R. Nudo¹, M. Tanganelli¹, A. D'Ambrisi¹, M. De Stefano¹,
R. Pucinotti²

¹ Dipartimento di Architettura – Sezione Materiali e Strutture – Università degli Studi di Firenze

Piazza Brunelleschi, 6 – 50121 Firenze

² Dipartimento Patrimonio, Architettura, Urbanistica – Università Mediterranea di Reggio Calabria

Via Melissari, Feo di Vito - 89124 Reggio Calabria

ABSTRACT

La valutazione delle proprietà meccaniche del calcestruzzo in opera si basa solitamente sull'esecuzione di prove di resistenza a compressione condotte, in laboratorio, su provini cilindrici prelevati da edifici esistenti (carote). Dalla resistenza in situ è possibile risalire successivamente alla resistenza attuale e potenziale del calcestruzzo esaminato mediante opportune formule di letteratura calibrate in modo tale da depurare i risultati iniziali da tutti quei fattori perturbativi che caratterizzano le operazioni di prelievo (carotaggio).

Nella presente memoria, si riportano i risultati di una serie di indagini condotte su un edificio esistente in c.a., basate sull'esecuzione di prove di rottura per compressione e trazione indiretta. In particolare, dall'edificio indagato è stato estratto un numero consistente di carote, ciascuna delle quali è stata utilizzata per ricavare provini per l'esecuzione di prove sia di compressione monoassiale che di trazione indiretta (prova brasiliana o splitting tension test); la parte centrale del provino è stata sottoposta a schiacciamento mentre le parti residue di estremità, ottenute dalla rettifica della carota, a prova di trazione. Attraverso i risultati ottenuti è stato possibile pervenire innanzitutto a una stima della resistenza caratteristica a compressione del calcestruzzo indagato, utilizzando alcune formulazioni reperibili nella letteratura tecnica nazionale ed internazionale. In parallelo, i risultati delle prove di trazione hanno fornito importanti riscontri sia in merito ai rapporti di resistenza con i corrispondenti valori di compressione, sia relativamente alla validazione di formulazioni adottate dalle norme italiane vigenti (NTC 2008).

1. INTRODUZIONE

Le prove per la valutazione della resistenza meccanica del calcestruzzo possono essere classificate in due principali categorie: prove di compressione e prove di trazione.

La prima tipologia, caratterizzata da prove di compressione monoassiale condotte su provini cubici o cilindrici di dimensioni standard, è quella maggiormente utilizzata in quanto maggiormente rappresentativa delle caratteristiche del calcestruzzo. Le prove sono eseguite in laboratori ufficiali o comunque autorizzati secondo procedure stabilite dalle norme UNI (UNI 12390-3: 2009 per calcestruzzi 'nuovi' ed UNI EN 12504-1: 2009 nel caso di campioni ricavati da strutture esistenti).

La resistenza a trazione del calcestruzzo, di valutazione più incerta, può essere valutata attraverso tre procedure alternative: trazione diretta, trazione per flessione, prova brasiliana (Figura 1). Tali prove restituiscono in genere risultati intorno al 10% della resistenza a compressione [Santarella, 2006]:

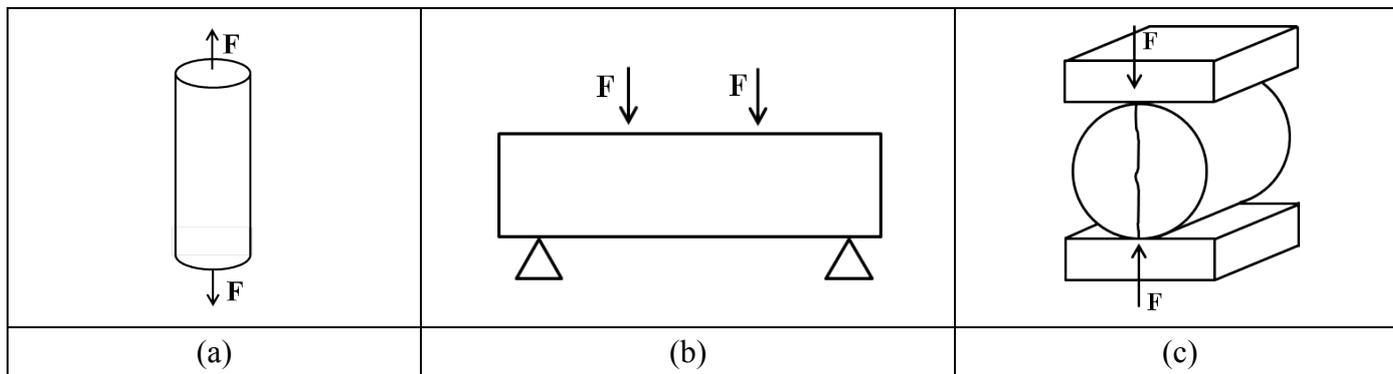


Figura 1: Prova di trazione – a) diretta; b) per flessione; c) brasiliana.

La prima procedura di prova consente di determinare la resistenza a trazione del calcestruzzo per via diretta, applicando una forza crescente fino a rottura secondo quanto previsto dalle norme UNI 6135-72. A causa delle difficoltà di esecuzione di tale tipo di prova essa di fatto non è più utilizzata, per cui si preferisce ricorrere a metodi indiretti quali la prova di trazione per flessione e la prova brasiliana o splitting tension test. La prova a trazione per flessione consente di stimare la resistenza del calcestruzzo caricando un provino prismatico su uno o due punti fino a rottura [UNI EN 12390-5: 2009]. Infine, la prova brasiliana prevede la compressione longitudinale lungo due generatrici diametralmente opposte di un provino generalmente cilindrico, secondo le norme UNI EN 12390-6: 2010; in tal caso, nel piano diametrale contenente la retta di carico si genera a rottura una tensione rappresentativa della resistenza a trazione del calcestruzzo.

Nel presente lavoro sono illustrati i risultati di una campagna sperimentale finalizzata alla valutazione della resistenza a compressione e a trazione di calcestruzzi provenienti da un edificio esistente attraverso prove di schiacciamento e di trazione indiretta.

2. PROVE DI RESISTENZA ED ELABORAZIONE DEI RISULTATI

Le prove di resistenza (compressione e trazione indiretta) hanno interessato un numero significativo di provini, con diametro variabile tra 44 e 104 mm, ricavati da carote provenienti da un edificio esistente in c.a. [Cristofaro et al, 2015]; in particolare le carote sono state prelevate da 8 elementi strutturali (2 travi e 6 pilastri) provenienti dall'edificio indagato.

2.1 Prove di compressione

Le prove di compressione monoassiale, eseguite su 235 provini cilindrici, hanno consentito di definire una resistenza in seguito indicata con f_{car} . Tale valore, com'è noto, non è rappresentativo della resistenza del calcestruzzo in situ, in seguito indicata con f_{cil} , in quanto risente di una serie di fattori connessi alla geometria del provino ed alle modalità di estrazione della carota. Esistono in letteratura numerose formulazioni che consentono di passare dai valori di f_{car} a quelli di f_{cil} , tra le quali quelle proposte dalle British Standard

[BS 6089, 2010], dalle Norme ACI [ACI 214.4R-03, 2003] ed altre reperibili in numerosi lavori di ricerca [Augenti, 2003; Masi, 2005-2007; Pucinotti, 2013]. In questo lavoro, per ricavare la resistenza f_{cil} relativa agli elementi strutturali indagati, sono state utilizzate le formulazioni proposte da Masi e Pucinotti: i risultati ottenuti sono riportati in Figura 2.

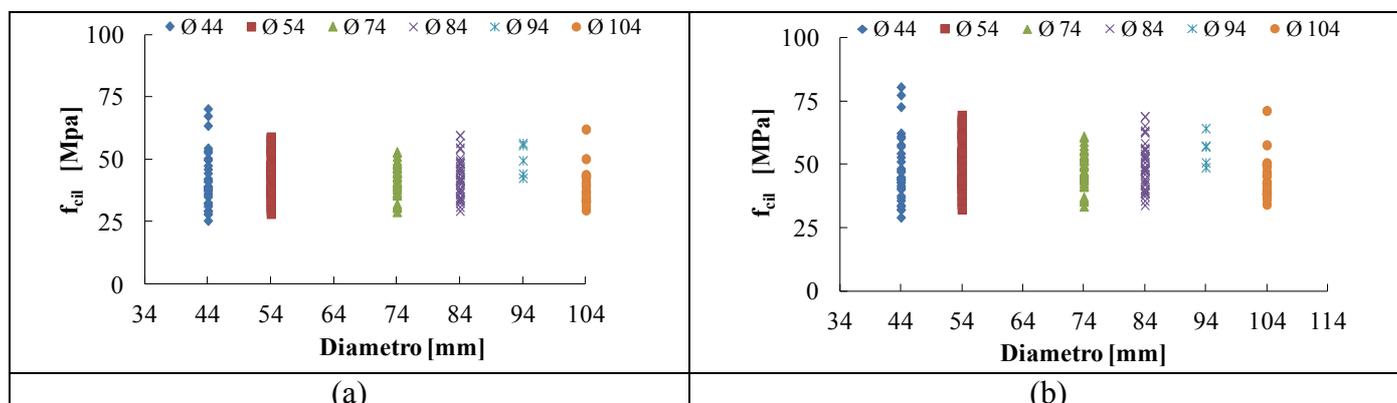


Figura 2: Resistenze f_{cil} al variare del diametro del provino – Masi (a); Pucinotti (b).

Dal confronto tra i diagrammi riportati in Figura 2 si rileva come la formulazione di Pucinotti determini valori maggiori della resistenza f_{cil} ; ciò è sostanzialmente dovuto al fatto che in tale formulazione si tenga conto di un numero maggiore di fattori influenzanti le modalità di prelievo della carota.

In aggiunta alle formulazioni che consentono di stimare la resistenza in situ f_{cil} è possibile reperire in letteratura degli studi concernenti la valutazione del valore caratteristico della resistenza a compressione (f_{ck}). Di seguito riportiamo alcune delle suddette formulazioni.

- Formulazione EN 1990 [EN 1990, 2006]:

$$f_{ck} = \exp\{f_{cm}(Y)\} \cdot \exp\left\{-t_{n-1,p=0.05} \cdot s(Y) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}\right\} \quad [1]$$

In tale espressione f_{cm} rappresenta il valore medio della resistenza in situ; n rappresenta il numero delle carote; $s(Y)$ è la deviazione standard; t_{n-1} è un valore ricavato in accordo con la distribuzione t di student.

- Formulazione di Steenbergen-Vervuurt [Steenbergen & Vervuurt, 2011]:

Essa introduce una modifica alla precedente, la cui formulazione è:

$$f_{ck} = \min \left[\begin{array}{l} \exp\{f_{cm}(Y)\} \cdot \exp\left\{-t_{n-1,p=0.05} \cdot s(Y) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}\right\} \\ \exp\{f_{cm}(Y)\} \cdot \exp\left\{-t_{n-1,p=0.05} \cdot s_{min}(Y) \cdot \sqrt{1 + \frac{1}{n}}\right\} \end{array} \right] \quad [2]$$

- Formulazione EN 13791 [EN 13791, 2007]:

Per $n < 15$ si ha:

$$f_{ck} = \min \left[\begin{array}{l} f_{cm} - k \\ f_{c,min} + 4 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} k = 7 \text{ per } 3 < n < 6 \\ k = 6 \text{ per } 7 < n < 9 \\ k = 5 \text{ per } 10 < n < 14 \end{array} \right\} \end{array} \right] \quad [3a]$$

mentre per $n > 15$ si ha:

$$f_{ck} = \min \left[\begin{array}{l} f_{cm} - 1.48 \cdot s \\ f_{c,min} + 4 \end{array} \right. \left. \begin{array}{l} \left\{ \begin{array}{l} k = 7 \text{ per } 3 < n < 6 \\ k = 6 \text{ per } 7 < n < 9 \\ k = 5 \text{ per } 10 < n < 14 \end{array} \right\} \end{array} \right] \quad [3b]$$

in cui f_{cm} ed $f_{c,min}$ rappresentano rispettivamente il valore medio e minimo della resistenza in situ; n è il numero delle carote.

- Formulazione di Pucinotti [Pucinotti, 2013]:

Sono presentate due diverse formulazioni per la stima del valore medio e del valore caratteristico della resistenza in situ.

$$f_{cm,P} = \sum_{i=1}^n (\alpha_2^i \cdot C_{dia}^i \cdot C_d^i \cdot C_{l/d}^i \cdot f_{car,i}) / n \quad [4a]$$

$$f_{ck} = \min \left[\begin{array}{l} \min \left[\begin{array}{l} f_{cm,P} - 1.48s \\ f_{cmin,P} + 4 \end{array} \right. \left. \{n > 15\} \right. \\ \min \left[\begin{array}{l} f_{cm,P} - k_p \\ f_{cmin,P} + 4 \end{array} \right. \left. \left\{ \begin{array}{l} k_p = 6 \text{ per } 3 < n < 6 \\ k_p = 5 \text{ per } 7 < n < 9 \\ k_p = 4 \text{ per } 10 < n < 14 \end{array} \right\} \right. \end{array} \right] \quad [4b]$$

Nella [4a], α_2 è un parametro dipendente dalla direzione della perforazione; C_{dia} tiene conto del diametro della carota; C_d tiene conto del disturbo arrecato al campione dalla perforazione; $C_{l/d}$ tiene conto del rapporto lunghezza/diametro carota; $f_{car,i}$ rappresenta la tensione di rottura della singola carota. In dettaglio, la procedura prevista dalla EN 1990 consente la stima di f_{ck} dalle prove condotte su carote prelevate da calcestruzzi in opera in cui le incertezze dipendono dal numero di provini testati. In Steenbergen & Vervuurt gli autori propongono una modifica alla formulazione EN 1990. La EN 13791 perviene alla determinazione della resistenza caratteristica mediante due approcci in funzione del numero di campioni. Infine in Pucinotti, viene suggerita una procedura in grado di fornire sia una stima del valore medio che di quello caratteristico della resistenza in situ tenendo conto anche degli aspetti più importanti che ne influenzano la stima: rimaneggiamento, direzione di prelievo, diametro delle carote, rapporto diametro/altezza, disturbo arrecato ai campioni durante le operazioni di estrazione. Tutti i valori ottenuti di f_{ck} fanno implicitamente riferimento ad una probabilità di non eccedenza pari al 5%.

In Figura 3 è riportata la distribuzione cumulativa della deviazione standard delle resistenze a compressione delle carote (f_{car}), mentre in Tabella 1 sono riportati i valori della deviazione standard per differenti valori di probabilità di eccedenza. Ai fini dell'applicazione della formula di Steenbergen, per la valutazione della resistenza caratteristica, si è fatto riferimento ad un valore di σ_{min} pari a 5.045 MPa, corrispondente ad una probabilità di eccedenza del 50%.

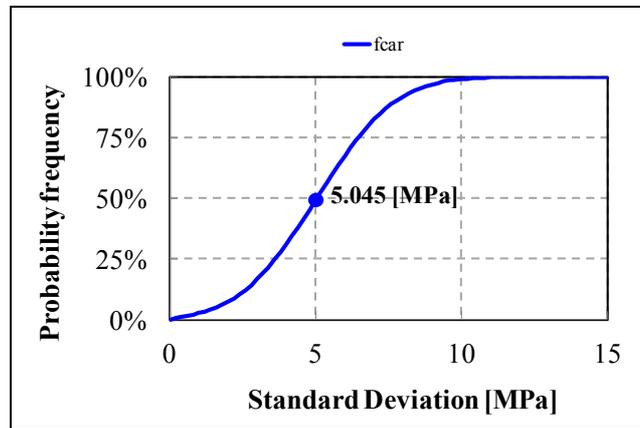


Figura 3: Distribuzione cumulativa della deviazione standard.

Tabella 1: σ_{\min} per differenti valori della probabilità di eccedenza.

	σ_{\min} [MPa]				
	95%	80%	50%	20%	5%
f_{car} [MPa]	1.59	3.27	5.045	6.81	8.51

In Figura 4 e in Tabella 2 si riportano i risultati della f_{ck} ottenuti applicando le 4 formulazioni introdotte in precedenza. I risultati mostrano che la formulazione di Pucinotti restituisce valori di f_{ck} superiori rispetto alle altre formulazioni; essa però, a differenza delle altre, valide esclusivamente per campioni cilindrici di dimensioni standard, tiene conto anche del diametro delle carote attraverso il coefficiente C_{dia} .

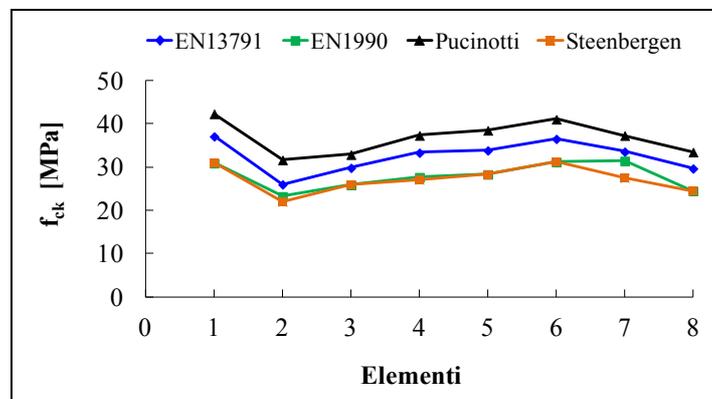


Figura 4: Valori di f_{ck} calcolati con le diverse formulazioni per i vari elementi strutturali.

Tabella 2: Valori di f_{ck} ottenuti con le diverse formulazioni per i vari elementi strutturali.

f_{ck}	Elementi							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
EN13791	37.11	26.00	29.83	33.32	33.86	36.53	33.57	29.68
EN1990	30.91	23.24	25.90	27.68	28.32	31.17	31.45	24.49
Steenbergen	30.91	19.72	25.90	24.73	28.32	31.17	27.51	22.32
Pucinotti	42.32	31.67	32.88	37.32	38.50	41.07	37.29	33.48

2.2 Prove di trazione indiretta

A seguito della rettifica delle carote ricavate dagli elementi strutturali provenienti dalla struttura indagata, necessaria all'esecuzione delle prove di compressione, si è ottenuto un numero significativo di spezzoni di carota, di diverse dimensioni, dai quali sono stati ricavati una serie di campioni sottoposti a prova di trazione indiretta (prova brasiliana) secondo le disposizioni delle norme UNI [UNI EN 12390-6: 2010]. La resistenza dell'iesimo campione è stata calcolata con la nota espressione:

$$f_{ct,i} = 2F / \pi L d \quad [5]$$

in cui F è il carico a rottura, L la lunghezza della linea di contatto tra provino e piastre della macchina di prova (in genere pari alla lunghezza del provino) e d la dimensione nominale del provino (diametro per provini cilindrici, altezza per provini cubici o prismatici).

In Tabella 3 sono riportati i valori statistici delle prove di trazione in funzione del diametro, mentre in Figura 5 sono riportati i valori forniti dai diversi provini ancora suddivisi in base al diametro.

Tabella 3: Valori statistici relativi alle prove di trazione.

	Diametro carote					
	φ44[mm]	φ54[mm]	φ74[mm]	φ84[mm]	φ94[mm]	φ104[mm]
N° dati	32	51	38	40	5	22
$f_{ct,m}$ [MPa]	4.692	4.623	3.891	3.687	3.809	3.818
Dev. St. [MPa]	1.251	0.760	0.587	0.669	0.445	0.744
Cov. [%]	27	16	15	18	12	19

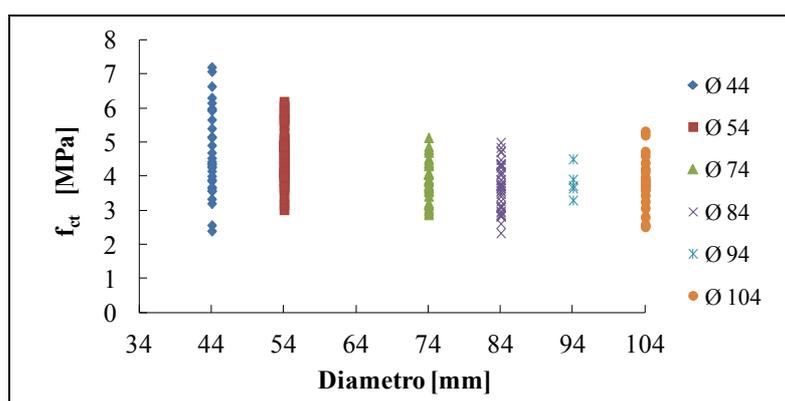


Figura 5: Valori di f_{ct} al variare del diametro del provino.

2.3 Confronti con le formulazioni di normativa

Le Nuove Norme Tecniche per le Costruzioni [NTC, 2008], per la determinazione della resistenza media a trazione del calcestruzzo forniscono la seguente espressione:

$$f_{ctm} = 0,3 \cdot f_{ck}^{2/3} \quad [6]$$

Si riportano di seguito, in Figura 6 e Tabella 4, i risultati delle resistenze a trazione ottenute tramite la [6], utilizzando i valori caratteristici stimati con le formulazioni esaminate in precedenza e riportati in Tabella 2. In Figura 6 sono altresì riportate le resistenze sperimentali medie ($f_{ct,m (exp)}$) valutate per i vari elementi strutturali e le stesse resistenze ridotte della deviazione standard ($f_{ct,m-1 Dev.St(exp)}$). Dal suddetto diagramma si evince che le formulazioni [1] e [2] determinano risultati simili e comunque poco discosti dai valori ottenuti con le [3] e [4]. Si rileva anche una uniformità di valori per i diversi elementi strutturali all'interno di una stessa formulazione, escluse alcune eccezioni. I risultati forniti dalle prove sperimentali ($f_{ct,m (exp)}$) risultano significativamente più elevati rispetto a quelli ricavati tramite le formulazioni teoriche, mentre valori più prossimi si ottengono se da tali resistenze si sottrae il valore della deviazione standard ($f_{ct,m-1 Dev.St(exp)}$). Infine, in Tabella 5, si riportano i valori sperimentali delle prove di trazione (f_{ctm}) e le stime delle resistenze a compressione in situ (f_{cil}) ottenute con le formulazioni di Masi e Pucinotti, mediati per singolo elemento strutturale, assieme ai loro rapporti percentuali. Si rilevano rapporti percentuali compresi tra 8 e 11%.

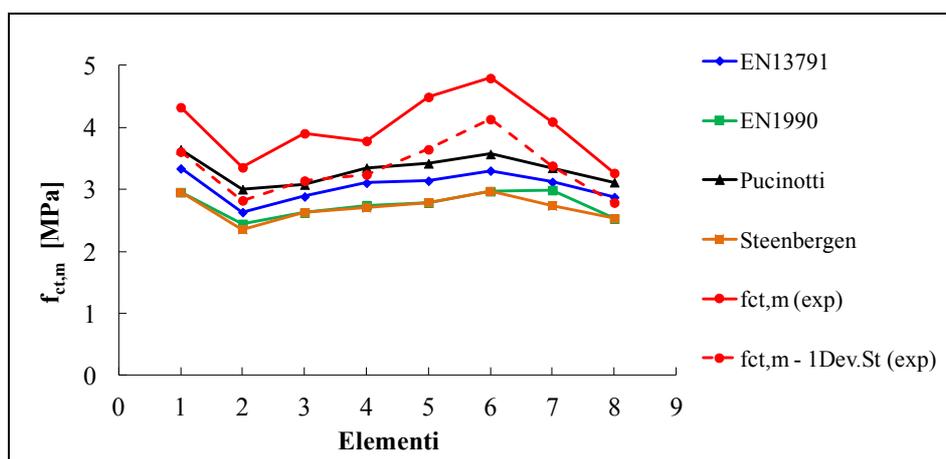


Figura 6: Valori di $f_{ct,m}$ suddivisi per elemento.

Tabella 4: Valori di $f_{ct,m}$ suddivisi per elemento.

$f_{ct,m}$	Elementi							
	1	2	3	4	5	6	7	8
	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
EN13791	3.34	2.63	2.89	3.11	3.14	3.30	3.12	2.88
EN1990	2.95	2.44	2.63	2.75	2.79	2.97	2.99	2.53
Steenbergen	2.95	2.36	2.63	2.71	2.79	2.97	2.73	2.53
Pucinotti	3.64	3.00	3.08	3.35	3.42	3.57	3.35	3.12
$f_{ct,m (exp)}$	4.39	3.33	3.92	3.78	4.48	4.8	4.08	3.24
$f_{ct,m-1 Dev. St(exp)}$	3.67	2.80	3.16	3.24	3.64	4.14	3.37	2.76

Tabella 5: Valori di $f_{ct,m}$, f_{cil} e loro rapporti percentuali.

Elemento	Totale provini	Resistenze						
		f_{car} [MPa]	$f_{ct,m}$ [MPa]	$f_{ct,m}/f_{car}$ [%]	$f_{cil,Masi}$ [MPa]	$f_{ct,m}/f_{cil,Masi}$ [%]	$f_{cil,Pucinotti}$ [MPa]	$f_{ct,m}/f_{cil,Pucinotti}$ [%]
1	24	40.39	4.325	11	46.09	9%	52.47	8%
2	12	27.1	3.356	12	30.99	11%	35.67	9%
3	22	38.56	3.905	10	44.16	9%	51.53	8%
4	22	32.21	3.782	12	36.67	10%	42.27	9%
5	23	37.41	4.492	12	42.42	11%	49,40	9%
6	46	41.41	4.796	12	47.51	10%	54.64	9%
7	23	37.51	4.094	11	43.09	10%	49.61	8%
8	16	29.8	3.265	11	33.64	10%	39.28	8%

3. CONCLUSIONI

Nella presente memoria, sono riportati i risultati di prove di compressione e di trazione indiretta condotte su campioni estratti da elementi in c.a.. Entrambe le prove a rottura sono state eseguite su porzioni differenti della medesima carota: la parte centrale del provino è stata sottoposta a prova monoassiale di compressione mentre le due estremità a quella di trazione indiretta. I dati sperimentali provengono da una campagna che ha interessato 8 elementi (2 travi e 6 pilastri) da cui sono state estratte 235 carote di diametro variabile tra 44 e 104 mm le cui fasi di estrazione, preparazione ed esecuzione delle prove di compressione e di trazione indiretta (brasiliane) sono state eseguite nel rispetto delle disposizioni normative (Norme UNI EN). Vengono affrontati tre aspetti principali legati alla definizioni di valore di resistenza del calcestruzzo: un primo aspetto si riferisce al passaggio dalla resistenza della carota f_{car} ad una resistenza potenziale (f_{cil}) che consideri dei fattori correttivi; un secondo riguarda la determinazione della resistenza caratteristica a compressione (f_{ck}); infine è stato affrontato il problema del calcolo della resistenza a trazione f_{ct} . Con riferimento al passaggio da f_{car} a f_{cil} le due formulazioni a confronto (Masi e Pucinotti) hanno restituito valori che differiscono tra loro fino al 20%. Per quanto riguarda la resistenze caratteristiche i confronti mostrano che l'espressione proposta da Pucinotti restituisce valori di f_{ck} superiori rispetto alle altre formulazioni; queste ultime presentano però la limitazione di essere valide solo per campioni cilindrici di dimensioni standard.

Le prove sperimentali per la stima della resistenza a trazione del calcestruzzo restituiscono valori che si attestano intorno al 10% della corrispondente resistenza a compressione, in accordo con quanto presente in letteratura. Per quanto riguarda la resistenza a trazione i risultati hanno evidenziato che la stima di $f_{ct,m}$ ottenuta partendo dai valori di f_{ck} stimati mediante la formulazione di Pucinotti restituiscono risultati più vicini a quelli sperimentali.

BIBLIOGRAFIA

- ACI 214.4R-03. Guide for Obtaining Cores and Interpreting Compressive Strength Results.
- Augenti N. (2003). La resistenza dei Calcestruzzi negli Edifici Esistenti. Crolli ed Affidabilità delle strutture – Structural Diseases and Realibility - Atti del II Convegno Internazionale su Crolli e Affidabilità delle Strutture, Napoli, CUEN, pp. 29-39.
- British Standard 6089-2010. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. Complementary guidance to that given in BS EN 13791.
- Cristofaro M.T., Barducci S., Nudo R., Tanganelli M., D'Ambrisi A., De Stefano M., Pucinotti R (2015). Influenza del diametro della carota per la definizione della resistenza a compressione del calcestruzzo, Atti Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, Milano, 21-23 ottobre 2015.
- EN 13791. Assessment of in-situ compressive strength in structures and precast concrete components. European Standard, January 2007, Brussels; 2007.
- EN 1990; Eurocode 1: Basis of structural design. Brussels: European Standard; 2006.
- Masi A., Dolce M., Chiauzzi L., Nigro D., Ferrini M. (2005). Indagini sperimentali sulla variabilità della resistenza del calcestruzzo negli elementi strutturali di edifici esistenti in c.a.. Atti Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, Milano, 13-15 ottobre 2005.
- Masi A., Vona M. (2007). Prove Distruttive e non Distruttive su Materiali ed Elementi Strutturali di Edifici Esistenti in Cemento Armato. Conferenza Nazionale sulle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica, Milano 11-12-13 Ottobre 2007. CD-Rom.
- Ministero delle Infrastrutture (2008). “DM 14 gennaio 2008, Norme tecniche per le costruzioni”, Suppl. Ord. n. 30 alla G.U. n.29 del 4/2/2008.
- Pucinotti R. (2013). Assessment of in-situ Characteristic Concrete Strength, Construction and Building Materials, n.44, pp. 63-73.
- Santarella L. (2006). Il Cemento Armato - La tecnica e la statica – 22^a edizione ampliata ed aggiornata. Hoepli.
- Steenbergen R., Vervuurt A. (2012). Determining the in-situ concrete strength of existing structures for assessing their structural safety. Struct. Concr. 2011;13(1): 27–31.
- UNI EN 12390-3: 2009, Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 3: Resistenza alla compressione dei provini.
- UNI EN 12390-5: 2009, Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 5: Resistenza a flessione dei provini.
- UNI EN 12390-6: 2010, Prove sul calcestruzzo indurito - Parte 6: Resistenza a trazione indiretta dei provini.
- UNI EN 12504-1: 2009, Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 1: Carote - Prelievo, esame e prova di compressione.
- UNI 6135-72, Prove distruttive sui calcestruzzi – Prova di trazione.