

# Role of experimental investigations in existing concrete building assessment

## Ruolo delle indagini sperimentali nella verifica statica di costruzioni esistenti in c.a.

G. Concu<sup>1</sup>, B. De Nicolo<sup>1</sup>, D. Meloni<sup>1</sup>, N. Trulli<sup>1</sup>, M. Valdés<sup>1</sup>

<sup>1</sup> *Department of Civil, Environmental Engineering and Architecture, University of Cagliari, Cagliari, Italy*

**ABSTRACT:** The issue of assessing the structural adequacy of existing buildings involves several problems when a unique and reliable strategy of modelling and analysing is looked for. This is mainly related to the peculiarity of each construction in a context of broad variety. In this light the structural model and consequently the judgment on structural adequacy should be derived from a process of analysis of the construction carried through steps of different reliability. This paper illustrates the application to a reinforced concrete structure of the process of analysis suggested by the Italian Building Code, with emphasis on the design of the survey campaign as a function of the desired level of knowledge of the construction and on the correlation between non-destructive testing data and those derived from destructive tests. / Nell'approccio alla verifica di sicurezza di un edificio esistente subentrano oggettive difficoltà a definire strategie univoche ed affidabili di modellazione ed analisi, in quanto la varietà tipologica e la singolarità specifica delle opere già in essere condizionano fortemente l'implementazione del modello strutturale e le procedure di verifica stesse. Al fine di formulare il giudizio sulla capacità residua di una struttura è pertanto necessario seguire un percorso di conoscenza in cui la definizione del modello strutturale consegue all'analisi ed interpretazione del costruito, mediante fasi conoscitive dal grado di attendibilità variabile. Il presente lavoro illustra l'applicazione del percorso conoscitivo suggerito dalle NTC ad una struttura in c.a., con particolare attenzione sia alla progettazione della campagna di indagini in funzione del livello di conoscenza desiderato sia alla calibrazione dei dati delle prove non distruttive con quelli derivanti da prove distruttive, al fine di pervenire ad una stima affidabile delle grandezze meccaniche ed elastiche dei materiali in opera.

**KEYWORDS:** non-destructive testing; in-situ concrete strength evaluation, level of knowledge / prove non distruttive; valutazione della resistenza in situ del cls; livello di conoscenza

### 1 INTRODUZIONE

La valutazione della sicurezza strutturale degli edifici esistenti è diventata in questi anni una tematica di grande interesse, soprattutto in Italia a causa della vetustà del patrimonio edilizio esistente e della numerosità degli edifici storici soggetti a tutela, i quali necessitano sempre più spesso di interventi di manutenzione straordinaria o di consolidamento. Non sempre, anche a causa degli interventi succedutisi negli anni, è disponibile per il tecnico il progetto originale dell'edificio, e soprattutto non sono note le caratteristiche elastiche e meccaniche dei materiali che costituiscono l'ossatura portante del fabbricato. In particolare gli edifici in calcestruzzo armato risalenti agli anni '50-'60 costituiscono ancora una grossa fetta del patrimonio edilizio esistente e necessitano sempre più spesso di interventi dovuti al degrado dei materiali.

Dal punto di vista normativo, a livello internazionale il problema della verifica della persistenza dell'affidabilità delle costruzioni con il passare del

tempo è affrontato dalla norma ISO 13822 (2010). I requisiti e le procedure formulate nella ISO 13822 si basano sui principi di affidabilità strutturale e la norma comprende anche specifiche raccomandazioni per la verifica di costruzioni appartenenti al patrimonio artistico di un territorio.

A conferma della rilevanza della tematica, a livello europeo il CEN/TC 250 "Structural Eurocodes" ha attivato un apposito Working Group (WG2) sul tema "Assessment and retrofitting of existing structures", con l'obiettivo a lungo termine di pervenire alla pubblicazione di uno specifico Eurocodice. Il lavoro del WG2, recentemente pubblicato nel Report EUR 27128 EN (2015), presenta proposte di carattere scientifico e tecnico da intendere come base per un ulteriore lavoro finalizzato al conseguimento di un approccio europeo armonizzato al tema dell'assessment e del retrofitting delle strutture esistenti, e identifica le questioni chiave che richiedono una soluzione. Tra queste, l'opportunità o meno di accettare livelli di affidabilità differenti per le costruzioni esistenti rispetto alle costruzioni nuove; la

possibilità di aggiornare i coefficienti parziali di sicurezza in funzione della conoscenza della struttura tenendo conto delle incertezze insite nel processo di updating; l'opportunità di condurre la valutazione della sicurezza sulla base di livelli di conoscenza, analogamente a quanto prescritto per la progettazione sismica (CEN EN 1998-3, 2013), anche per le altre situazioni progettuali. Il lavoro del WG2 contiene anche una collazione delle varie normative nazionali vigenti e degli standard in Europa relativi alle strutture esistenti, dalla quale bene si evince la vasta gamma di posizioni diverse e talvolta divergenti in materia di indirizzo per la valutazione delle strutture esistenti.

In Italia le Norme Tecniche per le Costruzioni - NTC (DM 14/05/2008) e la relativa Circolare di applicazione (Circ. Min. Infrastr. 02/02/2009), recependo l'Eurocodice 8 (CEN EN 1998-3, 2013) hanno introdotto un intero capitolo dedicato alle nuove regole per la valutazione della sicurezza e la progettazione degli interventi sugli edifici esistenti. Il tipo e il numero di prove in situ dipendono dal livello di conoscenza che si ha, o che si può raggiungere, con le indagini sull'edificio in esame.

Sono definiti tre livelli di conoscenza: Limitata (LC1), Adeguata (LC2) e Accurata (LC3). Gli aspetti che definiscono i livelli di conoscenza per le strutture in cemento armato sono:

- la geometria, ossia le caratteristiche geometriche degli elementi strutturali (tessitura dei solai; dimensioni geometriche di travi, pilastri e pareti; larghezza delle ali di travi a T; possibili eccentricità fra travi e pilastri ai nodi; etc.);

- i dettagli strutturali, ossia la quantità e disposizione delle armature negli elementi e nei nodi trave-pilastro; la lunghezza delle zone di sovrapposizione delle barre; le condizioni di vincolo degli elementi orizzontali; lo spessore del copriferro; il passo delle staffe e la loro chiusura; etc.;

- i materiali, ossia resistenza a compressione del calcestruzzo; resistenza a snervamento, rottura e deformazione ultima dell'acciaio.

Il livello di conoscenza conseguito determina il metodo di analisi e i fattori di confidenza FC da applicare alle proprietà elastiche e meccaniche dei materiali. La resistenza in situ di progetto  $f_d$  è espressa come:

$$f_d = \frac{f_m}{FC \cdot \gamma} \quad (1)$$

in cui  $f_m$  è il valore medio della resistenza determinata mediante prove distruttive e/o non distruttive, FC è il fattore di confidenza proprio del livello di conoscenza raggiunto e  $\gamma$  è il coefficiente di sicurezza parziale del materiale. I fattori di confidenza hanno sostanzialmente la funzione di ulteriori coefficienti di sicurezza che tengono conto delle carenze

nella conoscenza dei parametri del modello strutturale.

Al contrario del caso relativo alle costruzioni ex novo, nel caso di strutture esistenti il valore di calcolo delle resistenze si basa dunque non sul valore caratteristico ma sul valore medio determinato in situ. Ciò dipende principalmente dal fatto che l'esistenza della struttura comporta la possibilità di determinare le caratteristiche meccaniche effettive dei materiali, le quali non possono essere imposte come dati progettuali da conseguire in fase costruttiva, come avviene per una costruzione nuova. Pertanto una fase conoscitiva accurata riduce le incertezze insite nel passaggio dal dato di progetto alla realizzazione, tipico della costruzione nuova. Oltre a ciò, e particolarmente per le costruzioni soggette a tutela, il numero di prove che è possibile eseguire in situ è generalmente limitato e non consente una trattazione statistica dei risultati significativa al fine dell'applicazione di procedure basate su metodi probabilistici o semi-probabilistici. La definizione delle proprietà dei materiali va pertanto inquadrata in procedure di carattere più generale, nelle quali si possa attribuire significatività al limite anche ad un solo dato sperimentale.

La stima in situ della resistenza a compressione del calcestruzzo svolge un ruolo chiave nella valutazione della sicurezza della costruzione. La valutazione della resistenza a compressione del calcestruzzo di una struttura esistente è abbastanza complessa e articolata perché deve essere effettuata tenendo conto dei materiali in uso e delle tecnologie disponibili al tempo della sua costruzione, che possono influire pesantemente sulle proprietà fisiche del calcestruzzo e sul suo stato di conservazione.

La stima della resistenza del calcestruzzo in strutture esistenti diventa necessaria nel momento in cui occorra valutarne la capacità residua, anche sismica, ma anche nei casi di semplice ristrutturazione. Questa stima è di solito eseguita mediante prove di compressione effettuate su provini cilindrici estratti da elementi strutturali. Prove non distruttive possono essere eseguite in aggiunta alle precedenti, con l'obiettivo di approfondire le informazioni e limitare i danni derivanti dal prelievo delle carote su strutture già degradate.

La norma suggerisce di stimare le proprietà meccaniche del cls su campioni estratti dagli elementi strutturali mediante carotaggio; ma consente anche l'impiego di prove non distruttive, singole o combinate (ad esempio sclerometro, ultrasuoni, SonReb, etc.), da tarare su quelle distruttive (De Nicolo et al. 2013, Concu et al. 2014, Pucinotti 2015, Concu et al. 2015).

Le Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive (2008) forniscono alcune indicazioni sulle modalità di esecuzione delle

principali prove non distruttive (metodo sclerometrico, pull-out, ultrasuoni) e sulle curve da utilizzare per correlare il parametro non distruttivo alla resistenza a compressione; i coefficienti di tali curve sono determinati tramite prove su carote prelevate in situ.

Infatti la relazione tra il parametro non distruttivo e la resistenza a compressione del calcestruzzo può essere stabilita solo dopo la costruzione di una specifica e univoca relazione determinata attraverso la resistenza a compressione di provini cilindrici ricavati in situ mediante carotaggio. Relazioni empiriche o generali costruite in laboratorio su calcestruzzi generici non garantiscono la corretta previsione della resistenza in situ (Concu et al. 2015).

Il presente lavoro illustra l'applicazione del percorso conoscitivo suggerito dalle NTC ad una struttura ricettiva in c.a. per l'ottenimento di un Livello di Conoscenza Adeguata sui materiali (LC2). Saranno descritti i criteri che hanno portato alla scelta dei test distruttivi e non distruttivi eseguiti, la calibrazione dei dati delle prove non distruttive con quelli derivanti da quelle distruttive; la stima delle grandezze meccaniche ed elastiche dei materiali in opera secondo le vigenti Norme Tecniche per le Costruzioni.

## 2 PROGETTO DELLA CAMPAGNA SPERIMENTALE

L'edificio, costruito negli anni sessanta, è situato a Cagliari, in una zona residenziale prospiciente il mare.

Oltre al piano terra, dove è situata la hall, il ristorante e la sala conferenze, sono presenti 4 piani in elevazione, dove sono situate le camere, e un seminterrato destinato a magazzino e zona impianti. Il primo piano, non accessibile al momento della campagna diagnostica, non è stato sottoposto ad alcuna indagine. L'edificio ha un'ossatura in cemento armato costituita da pilastri e travi, con solaio in laterocemento.

In Figura 1 è riportata la pianta schematica dei livelli dell'edificio unitamente alla disposizione dei pilastri in c.a.

La campagna di indagini è stata progettata per conseguire un livello di conoscenza LC2, cioè un livello di conoscenza adeguato, mediante estese verifiche in situ sui dettagli costruttivi ed estese prove in situ sui materiali.

Tale livello di conoscenza impone l'utilizzo di un fattore di confidenza  $FC = 1.2$  da applicare ai valori di resistenza medi dei materiali per ricavare i valori di progetto, che andranno, quando previsto, ulteriormente ridotti mediante i coefficienti parziali di sicurezza.

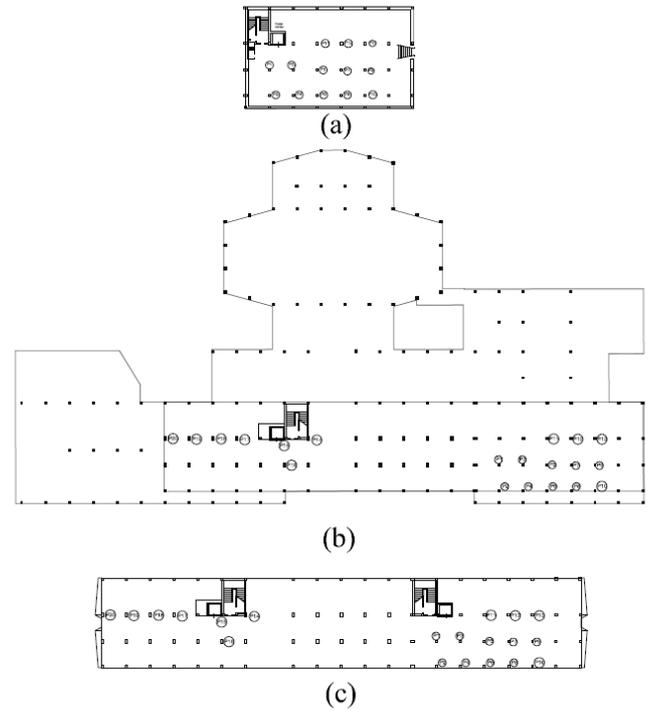


Figure 1. Schematic plans of the building: (a) underground level, (b) ground level, (c) I to IV floor / Piante schematiche dell'edificio: (a) seminterrato, (b) p. terra, (c) piani I-IV

Le NTC prescrivono, per tale livello di conoscenza, che almeno il 35% degli elementi primari (travi e pilastri) venga analizzato per rilevare disposizione e quantitativo di armatura e che le proprietà dei materiali vengano determinate con prelievi in situ nella misura di: 2 provini di cls ogni  $300m^2$  di piano dell'edificio; 2 campioni di armatura per piano dell'edificio. Situazioni ripetitive e omogeneità delle strutture e dei materiali possono essere tenute in conto per variare in più o in meno la numerosità dei campioni da prelevare; inoltre le NTC consentono di sostituire alcune prove distruttive sui materiali, non più del 50%, con un più ampio numero, almeno il triplo, di prove non distruttive, singole o combinate, tarate su quelle distruttive.

Basandosi su tali indicazioni e tenendo conto che le parti dell'edificio sono state realizzate in contemporanea e che la costruzione non ha subito nel tempo interventi di ristrutturazione che modificassero l'ossatura portante, il numero di provini di cls previsti è stato ridotto, sostituendo la prova di compressione, distruttiva, con l'esecuzione di un numero congruo di prove non distruttive calibrate su quelle distruttive.

Complessivamente sono state eseguite 15 prove di compressione su cls (carotaggi) dalle quali è stato possibile ricavare 26 valori di resistenza a compressione, 8 prove di trazione su campioni di acciaio prelevati dalle strutture in situ, e 169 prove non distruttive, come riepilogato nelle Tabelle 1 e 2.

Table 1. List of destructive tests planned and actual / Elenco delle prove distruttive previste ed effettive

Livello	Sup. m <sup>2</sup>	provini di cls		campioni di armatura	
		previsti	effettivi	previsti	effettivi
P. Semint.	415	2	3	2	0
P. Terra	3600	12	6	2	2
P. Secondo	1600	6	2	2	2
P. Terzo	1600	6	2	2	2
P. Quarto	1600	6	2	2	2

Il protocollo di prova prevedeva l'esecuzione di diversi tipi di prove non distruttive:

- Prova Magnetometrica (MG), per individuare la posizione e il diametro delle armature ed evitare che influenzassero negativamente le successive prove; tale indagine, essendo propedeutica alle prove non distruttive, ma anche necessaria per il rilievo dei dettagli strutturali, è stata eseguita a tappeto su tutti gli elementi analizzati;
- Prova Ultrasonica (UT) – è stata determinata la velocità V di attraversamento dell'onda ultrasonica all'interno della sezione di calcestruzzo impiegando il metodo diretto o per trasparenza secondo la norma UNI EN 12504-4;
- Prova sclerometrica (SC) – è stato determinato l'indice di rimbalzo I<sub>r</sub> come media di almeno 6 misure secondo le procedure previste nella norma UNI EN 12504-2;
- Prova di Pull-Out (PO) – è stata misurata la forza di estrazione F necessaria ad estrarre un tassello precedentemente inserito all'interno della sezione di cls, in conformità alla norma UNI EN 12504-3.

Inoltre, su tutti i campioni di calcestruzzo estratti mediante carotaggio è stata eseguita la Prova Colorimetrica (C) eseguita in conformità alla UNI EN13295, al fine di determinare la profondità di carbonatazione del calcestruzzo.

La Tabella 2 riporta per singolo piano la tipologia e la numerosità di prove non distruttive eseguite.

Table 2. Non Destructive Test Protocol / Protocollo di prova

Livello	MG	UT	SC	PO	C	Totale
P. Seminterrato	15	4	15	4	3	41
P. Terra	18	5	18	8	6	55
P. Secondo	14	2	13	1	2	32
P. Terzo	10	2	8	1	2	23
P. Quarto	7	2	6	1	2	18

### 3 RISULTATI SPERIMENTALI

I metodi non distruttivi indiretti per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in opera sono basati sulla misura di proprietà diverse dalla resistenza meccanica, pertanto la stima della resistenza meccanica in opera mediante tali metodi comporta l'utilizzo di correlazioni tra il parametro non distruttivo proprio del metodo impiegato e la re-

sistenza a compressione del calcestruzzo in esame. La legge di correlazione può essere determinata utilizzando un adeguato numero di campioni ottenuti mediante carotaggio.

Su ciascun elemento in cui è stato effettuato il carotaggio, precedentemente è stato eseguito almeno un test non distruttivo, al fine di avere un valore di resistenza effettivo da correlare con il parametro non distruttivo. Inoltre, su tutte le carote è stato eseguito il test della carbonatazione.

In Tabella 3 sono riepilogati i valori medi della resistenza a compressione e della profondità di carbonatazione ottenuti per ciascun elemento strutturale analizzato, con l'indicazione del parametro non distruttivo associato, mentre in Tabella 4 sono riepilogati i risultati della prova di trazione eseguita sulle barre di armatura estratte dagli elementi strutturali.

Table 3. Results of Compressive Test on cores/ Risultati delle prove di compressione sulle carote

Elemento	f <sub>c,med</sub> N/mm <sup>2</sup>	Strato	Parametro non distruttivo		
		carbonatato mm	associato		
P2 st	19.8	130	SC	US	PO
P5 st	21.2	5	SC	US	PO
P14 pt	21.2	28	SC	US	PO
P18 pt	22.3	28	SC	US	
P23 pt	25.3	52	SC		PO
P28 pt	29.9	15	SC	US	PO
P29 pt	20.7	40	SC	US	PO
P32 2°p	22.7	61	SC	US	PO
P18 3°p	24.3	52	SC	US	PO
P34 4°p	17.3	55	SC	US	PO
T3-5 st	22.9	20	SC	US	
T16-37 2°p	30.8	50	SC		
T38-47 3°p	31.8	44	SC		
T16-37 4°p	15.0	60	SC		

Table 4. Tensile Test Results / Risultati delle prove di trazione

Id.	φ*	A	f <sub>y</sub>	f <sub>t</sub>	A <sub>gt</sub>
	mm	mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	N/mm <sup>2</sup>	%
TR29-47	10.0	78.9	410	541	10.6
P30 pt	11.9	112	271	376	19.8
P38 p2	15.5	188.8	358	538	9.0
TR38-47 p2	19.4	296.9	327	489	20.2
P36 p3	11.4	102.6	354	502	16.4
TR14-15 p3	19.7	303.7	336	473	21.4
P12 4°p	12.1	115.8	381	610	12.0
TR40-41 p4	9.3	67.3	510	700	9.7

\* Diametro della barra equipesante.

La profondità di carbonatazione sembra non influire in alcun modo né sulla resistenza a compressione né sulle prove non distruttive, in particolare sull'indice di rimbalzo, come si può evincere dal basso valore del coefficiente di correlazione riportato nelle Figure 2 e 3.

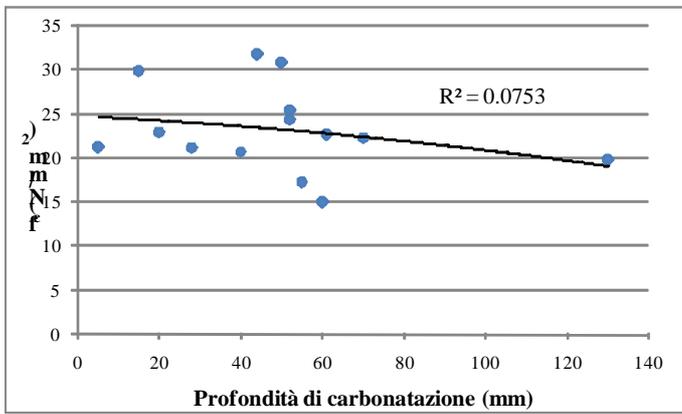


Figure 2. Depth of carbonation vs compressive strength / Profondità di carbonatazione vs resistenza a compressione.

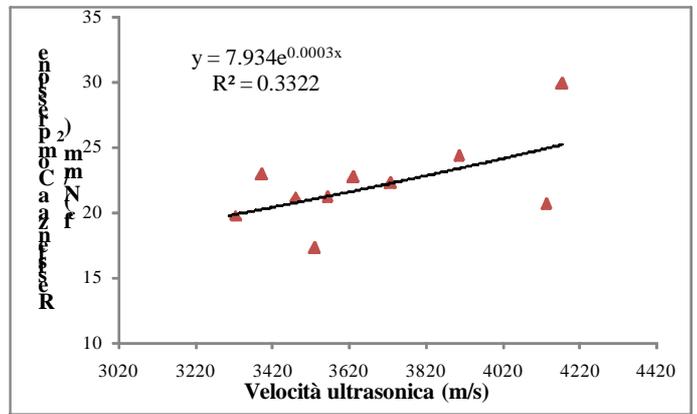


Figure 5. Ultrasonic Velocity vs compressive strength / Velocità Ultrasonica vs Resistenza a compressione

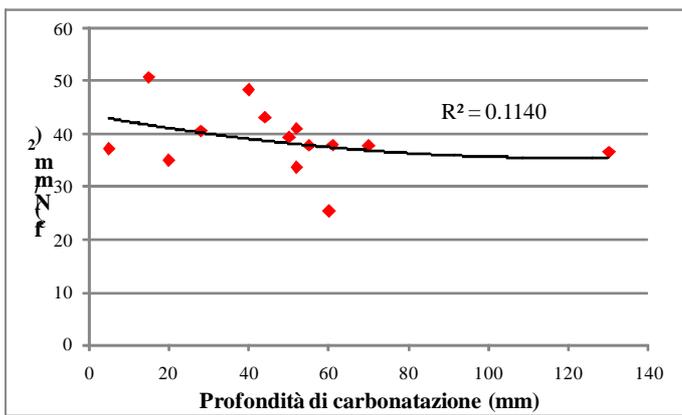


Figure 3. Depth of carbonation vs Rebound index / Profondità di carbonatazione vs Indice Sclerometrico.

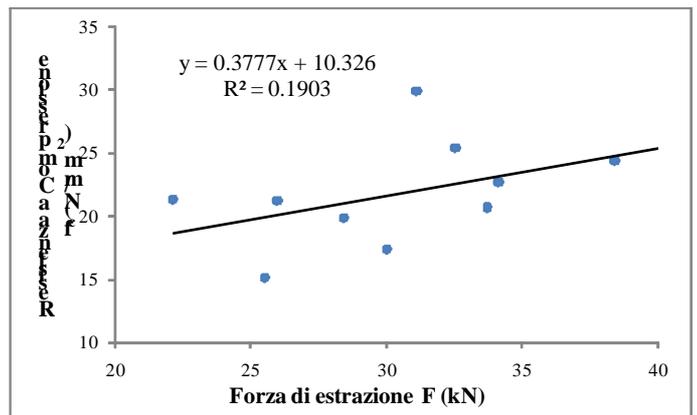


Figure 6. Pull-Out Force vs compressive strength / Forza di Estrazione vs Resistenza a compressione

Le Linee Guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive (2008), edite dal Ministero dei Lavori Pubblici, suggeriscono delle curve di correlazione i cui coefficienti sono da tarare sulla base delle prove su carote.

Le Figure 4-6 riportano le curve di calibrazione tra la resistenza a compressione in situ e i parametri non distruttivi  $I_r$ ,  $V$ , e  $F$  ricavati con le curve di correlazione suggerite dalle Linee Guida, con i rispettivi coefficienti di correlazione  $r^2$ .

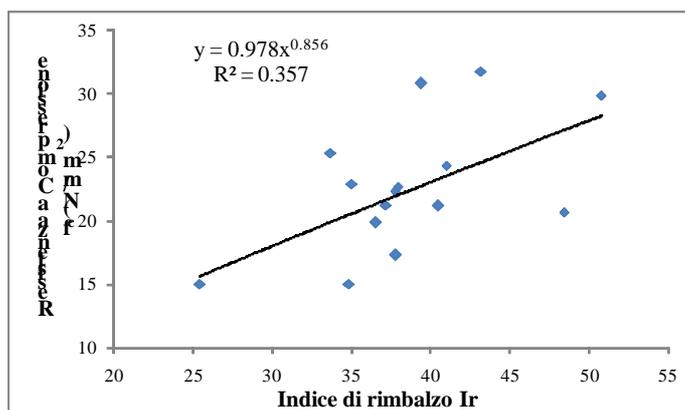


Figure 4. Rebound Index vs compressive strength / Indice di rimbalzo vs Resistenza a compressione

Ulteriori analisi, eseguite con l'impiego di curve di correlazione differenti rispetto a quelle indicate dalle linee guida hanno fornito un coefficiente di correlazione migliore, come riepilogato in tabella 5.

Table 5. Correlations between the in-situ compressive strength and the PND test results / Correlazioni tra la resistenza in situ del cls e i parametri non distruttivi

Parametro PND	Equazione di correlazione	$r^2$
$I_r$	$\text{Log}(f_c) = -0.0171 + 0.8610 \text{Log}(I_r)$	0.3603
$V$ (m/s)	$f_c = -2.4999 + 0.0067 V$	0.3601
$F$ (kN)	$\text{Log}(f_c) = 1.0909 + 0.0079 F$	0.2049

L'esecuzione di prove combinate consente di migliorare la precisione del risultato mediante l'applicazione di tecniche statistiche di correlazione multivariabile. A tal fine i parametri non distruttivi sono stati analizzati anche in combinazione, mediante una formulazione del tipo  $f_c = a + bP_1 + cP_2$ , dove  $P_1$  e  $P_2$  sono i parametri non distruttivi di volta in volta considerati ( $I_r$ ,  $V$  oppure  $F$ ), mentre i coefficienti  $a$ ,  $b$  e  $c$  sono stati determinati applicando il metodo dei minimi quadrati.

La Tabella 6 riepiloga i risultati della calibrazione combinata.

Table 6. Multivariable Relationship / Correlazioni multivariable

Parametro PND	Equazione di correlazione	r <sup>2</sup>
Ir-F	$f_c = 1.136 + 0.316 Ir + 0.264 F$	0.3540
Ir-V	$f_c = -0.962 + 0.078 Ir + 0.005 V$	0.3624
F-V	$f_c = -7.76 - 0.098 F + 0.009V$	0.4584

In definitiva, sulla base delle formulazioni di calibrazione precedentemente illustrate è stata stimata la resistenza a compressione del calcestruzzo degli elementi strutturali in opera. Per ciascun elemento strutturale considerato la stima della resistenza a compressione è stata condotta applicando la correlazione contenente i parametri non distruttivi disponibili per l'elemento stesso.

La tabella 7 riporta i dati riepilogativi delle resistenze stimate per il calcestruzzo, mentre la Tabella 8 riepiloga i dati medi per l'acciaio.

Table 7. Estimated compressive strength / Resistenza a compressione stimata

Numerosità del campione	132
Valore minimo [N/mm <sup>2</sup> ]	15.6
Valore massimo [N/mm <sup>2</sup> ]	28.28
Media aritmetica [N/mm <sup>2</sup> ]	21.93
Intervallo di confidenza	
95% per la media	21.55 ÷ 22.32
Mediana [N/mm <sup>2</sup> ]	21.36
Intervallo di confidenza	
95% per la mediana	21.25 ÷ 22.06
Varianza	4.96
Deviazione standard [N/mm <sup>2</sup> ]	2.23
Deviazione standard relativa	0.1016 (10.16%)
Errore standard per la media	0.1939
χ <sup>2</sup> test per la distribuzione Normale	accettare distribuzione Normale (P = 0.2215)
	(χ <sup>2</sup> = 14.213 DF = 11)
2.5 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	18.62
5 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	18.76
10 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	19.38
25 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	20.4
97.5 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	26.85
95 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	26.16
90 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	25.4
75 <sup>th</sup> percentile [N/mm <sup>2</sup> ]	22.97

Table 8. Estimated tensile strength / Resistenza a trazione stimata

	$f_y$ N/mm <sup>2</sup>	$f_t$ N/mm <sup>2</sup>	$f_t/f_y$	$A_{gt}$ %
Valore medio	368	529	1.44	14.9
Dev. St	65.6	90.1	0.08	4.81

#### 4 VALUTAZIONE DELLE RESISTENZE DI PROGETTO

I valori di resistenza ricavati dalle prove distruttive e non distruttive sono stati utilizzati per la determinazione delle resistenze di progetto, secondo quanto indicato nelle Norme Tecniche per le Costruzioni.

La resistenza in situ di progetto  $f_{d,is}$  per il calcestruzzo e l'acciaio è espressa, conformemente alla equazione 1, come:

$$f_{d,is} = \frac{f_{m,is}}{FC \cdot \gamma} \quad (2)$$

dove:  $f_{m,is}$  è la resistenza determinata mediante le prove in situ; FC è il fattore di confidenza proprio del livello di conoscenza LC2, e  $\gamma$  è il coefficiente di sicurezza parziale del materiale.

Di conseguenza, essendo per il livello di conoscenza LC2 FC = 1.2, risulta:

- Per le verifiche agli Stati Limite di Esercizio:

$$f_{cd,is} = \frac{f_{cm,is}}{FC \cdot \gamma} = \frac{21.93}{1.2 \cdot 1} = 18.27 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd,is} = \frac{f_{ym,is}}{FC \cdot \gamma} = \frac{368}{1.2 \cdot 1} = 306.7 \text{ N/mm}^2$$

- Per le verifiche agli Stati Limite Ultimi:

$$f_{cd,is} = \frac{f_{cm,is}}{FC \cdot \gamma} = \frac{21.93}{1.2 \cdot 1.5} = 12.18 \text{ N/mm}^2$$

$$f_{yd,is} = \frac{f_{ym,is}}{FC \cdot \gamma} = \frac{368}{1.2 \cdot 1.15} = 266.7 \text{ N/mm}^2$$

#### 5 CONCLUSIONI

This paper illustrates the application to a reinforced concrete structure of the process of analysis suggested by the Italian Building Code in order to obtain a Level of Knowledge LC2. Destructive tests of materials have been limited and integrated with a much larger number of non-destructive testing. Non-destructive testing data (ultrasonic velocity, rebound index and pull-out force) have been correlated to materials strength derived from cores and samples. A multiple correlation involving ultrasonic velocity and pull-out force showed the higher degree of prediction for concrete compressive strength.

From the process of knowledge, the strength of both the concrete and the bars has been estimated.

Il presente lavoro illustra l'applicazione del percorso conoscitivo suggerito dalle NTC ad un edificio esistente in c.a., per l'ottenimento di un Livello di Conoscenza Adeguata sui materiali (LC2).

Le prove distruttive sui materiali in opera sono state limitate ed integrate con un numero ben maggiore di prove non distruttive, i cui parametri sono stati correlati alle resistenze meccaniche ricavate dalle prove in situ. I risultati ottenuti dalla misura della velocità ultrasonica, dell'indice di rimbalzo e della forza di estrazione sono stati messi in relazione con i valori di resistenza a compressione del calcestruzzo ricavati da prove di compressione su carote.

Le correlazioni singole hanno registrato coefficienti di correlazione leggermente inferiori rispetto le correlazioni a più parametri; in particolare l'uso combinato di forza di estrazione – velocità ultrasonica migliora il grado di correlazione.

I valori medi di resistenza del calcestruzzo, determinati con prove non distruttive calibrate su quelle distruttive, e quelli dell'acciaio, determinati esclusivamente con prove distruttive, hanno consentito di assegnare le resistenze di progetto da impiegare in fase di verifica statica dell'edificio e di progettazione dell'intervento di ristrutturazione.

Report EUR 27128 EN - New European Technical Rules for the Assessment and Retrofitting of Existing Structures (2015)

UNI EN 12504-2 *Testing concrete in structures. Non-destructive testing. Determination of rebound number*

UNI EN 12504-4 *Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici*

UNI EN 12504-3 *Prove sul calcestruzzo nelle strutture - Parte 3: Determinazione della forza di estrazione*

UNI EN 13295 *Prodotti e sistemi per la protezione e la riparazione delle strutture di calcestruzzo - Metodi di prova - Determinazione della resistenza alla carbonatazione*

## REFERENCES

CEN. EN 1998-3; Eurocode 8 – Design of structures for earthquake resistance – Part 3: Assessment and retrofitting of buildings. Brussels; 2013.

ISO 13822:2010 *Bases for design of structures — Assessment of existing structures*

Ministero delle Infrastrutture. DM 14 gennaio 2008. Norme tecniche per le costruzioni. Suppl. Ord. n.30 alla G.U. n.29 del 4/2/2008; 2008.

Ministero delle Infrastrutture. Circolare 2 febbraio 2009. Istruzioni per l'applicazione delle Nuove norme tecniche per le costruzioni. Suppl. or. n.27 alla G.U. n.47 del 26/2/2009; 2009

Concu G., De Nicolo B., Trulli N. & Valdés M. - *Concrete Compressive Strength Estimation by means of Combined NDT ETNDT6*, Emerging Technologies in Non Destructive Testing 6, 27-29 May 2015, Brussels, Belgium

Concu G., De Nicolo B., Trulli N. & Valdés M. - *Combined Non Destructive Testing for concrete compressive strength prediction* – International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2015), Leipzig 5-7 October 2015 – in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV – pp 287-290 - Dehn et al. (Eds) 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02843-2

Concu G., De Nicolo B., Trulli N. & Valdés M. - *Estimation of concrete strength and stiffness by means of Ultrasonic Testing* – International Conference on Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting (ICCRRR 2015), Leipzig 5-7 October 2015 – in Concrete Repair, Rehabilitation and Retrofitting IV – pp 291-294 - Dehn et al. (Eds) 2016 Taylor & Francis Group, London, ISBN 978-1-138-02843-2

Concu G., De Nicolo B., Pani L., Trulli N. & Valdés M. - *Prediction of concrete compressive strength by means of combined non-destructive testing* - ICAMR 2014 - in Advanced Materials Research Vol. 894 (2014) pp 77-81 Trans Tech Publications, Switzerland-  
doi:10.4028/www.scientific.net/AMR.894.77 ISSN:1662-8985

De Nicolo B., Trulli N., & Valdès M. (2013) - *In situ evaluation of concrete compressive strength: reliability of non destructive techniques* - SMAR2013 – Second Conference on Smart Monitoring, Assessment and Rehabilitation of Civil Structures – Istanbul, 9-11 September 2013 – ISBN 978-3-033-04055-7

Pucinotti R. - *Reinforced concrete structure: Non destructive in situ strength assessment of concrete* - Construction and Building Materials 75 (2015) 331–341

Linee guida per la messa in opera del calcestruzzo strutturale e per la valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo indurito mediante prove non distruttive (ed. 2008)