

I METODI COMBINATI A PIÙ PARAMETRI NELLA STIMA DELLA RESISTENZA A COMPRESSIONE DEL CALCESTRUZZO

Raffaele Pucinotti^{*1}, Alessandro D'Elia², Rita A. De Lorenzo³

1. Dipartimento di Meccanica e Materiali, Università "Mediterranea" di Reggio Calabria, loc. Feo di Vito – 89060 Reggio Calabria, Italy.

2. Laboratorio di Prove sui Materiali e Sulle Strutture, Università degli Studi "Mediterranea", Reggio Calabria, Italy.

3. Architetto Libero Professionista di Reggio Calabria.

(*) Autore di riferimento e-mail: raffaele.pucinotti@unirc.it tel. +390965-875223

SOMMARIO

Nel presente lavoro le tecniche di indagini non distruttive a più parametri sono impiegate per la valutazione e la stima delle proprietà meccaniche del calcestruzzo utilizzato per la costruzione di edifici esistenti in cemento armato.

Lo scopo del lavoro è quello di valutare l'affidabilità di alcuni metodi non distruttivi sulla base di confronti con i risultati di prove eseguite su campioni appositamente confezionati. La resistenza a compressione del calcestruzzo sui modelli preparati ad hoc, è stata stimata mediante l'impiego di metodi combinati non distruttivi a più parametri e confrontata con quella ricavata su cubetti di calcestruzzo e su campioni cilindrici (carote) estratte dai modelli sotto indagine.

I metodi combinati sono stati pertanto utilizzati per la valutazione ed il controllo della qualità del calcestruzzo dei campioni.

Lo studio ha evidenziato:

- (i) variazioni a volte anche sensibili nella stima della resistenza meccanica dei modelli;
- (ii) la maggiore affidabilità dei metodi combinati rispetto ai metodi singoli;
- (iii) la necessità di costruire curve di correlazione e di taratura sulla base di prove distruttive eseguite su carote estratte dagli elementi strutturali.

Introduzione

le varie metodologie di prova non distruttiva per la determinazione indiretta della resistenza a compressione di questo composto eterogeneo, calcestruzzo, generalmente misurano parametri che sono variamente influenzati dalle varie componenti che lo costituiscono e dalle condizioni di maturazione.

La stima della resistenza a compressione può essere migliorata misurando simultaneamente più proprietà, a condizione che grandezze fisiche misurate siano le più diverse possibile, e comunque non si influenzino reciprocamente ed a patto che le stesse siano correlabili, anche indirettamente, con la resistenza meccanica a compressione del calcestruzzo.

Non tutti i parametri misurabili possono essere correlate alla resistenza a compressione

del calcestruzzo ed anche se lo fossero comunque andrebbero scelti in modo tale che la loro combinazione riduca la misura del grado di incertezza associato. Cioè, nella scelta dei parametri da misurare per poi combinarne i risultati in un metodo combinato per la stima della resistenza a compressione, si deve operare in modo che gli stessi siano influenzati in modo opposto dai fattori (stagionatura, umidità, carbonatazione, ecc.) che possono falsare i risultati delle misure.

A tal proposito le raccomandazioni RILEM 43-CND [9] richiedono che i metodi combinati utilizzabili per la stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in situ, devono soddisfare i seguenti requisiti:

- ciascun metodo deve misurare differenti proprietà del calcestruzzo, correlate alla resistenza;
- ciascun metodo deve essere applicabile a strutture o elementi strutturali di varia forma e dimensione;
- non devono essere necessarie particolari preparazioni;
- le prove devono essere sufficientemente rapide;
- il livello di accuratezza deve essere simile;
- la prova non deve modificare le prestazioni dell'elemento esaminato.

Numerose sono le correlazioni a più parametri attualmente utilizzate [1]:

1. velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo;
2. velocità ultrasonica longitudinale + pull-out;
3. velocità ultrasonica longitudinale + attenuazione dell'onda ultrasonica;
4. velocità ultrasonica longitudinale + attenuazione dei raggi gamma;
5. velocità ultrasonica longitudinale + smorzamento delle vibrazioni;
6. velocità ultrasonica longitudinale + velocità ultrasonica trasversale;
7. indice di rimbalzo + pull-out

In particolare, l'uso combinato delle misure della velocità degli ultrasuoni e dell'indice di rimbalzo sclerometrico, conosciuto come metodo SONREB, permette di ridurre fattori come l'umidità ed il grado di maturazione del calcestruzzo, in quanto hanno influenze opposte sui suddetti parametri [4, 5].

Le stesse raccomandazioni indicano come soluzione ottimale per migliorare la stima della resistenza a compressione dei calcestruzzi in situ l'utilizzo di metodi a tre parametri tra cui:

1. velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + pull-out;
2. velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + attenuazione dell'onda ultrasonica;
3. velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + velocità ultrasonica trasversale.
4. velocità ultrasonica longitudinale + indice di rimbalzo + forza di penetrazione;

Nel seguente lavoro è stato approfondito l'utilizzo di metodi combinati per attestarne la loro affidabilità nella restituzione di valori di resistenza a compressione ottenuti da campioni di calcestruzzo preparati ad hoc; in particolare sono stati applicati il metodo a due parametri SonReb ed il a tre parametri SonReb+Windsor (SonReb-Win).

1. Il Metodo SonReb

Come è noto il metodo SonReb combina i risultati ottenuti con lo sclerometro (indice di rimbalzo) e con gli impulsi ultrasonici (velocità ultrasonica).

Le leggi di correlazione generalmente utilizzati, che legano la resistenza a compressione del calcestruzzo in situ con i valori dell'indice di rimbalzo e della velocità ultrasonica, presentano una forma del tipo di quella riportata di seguito:

$$R_C = a \cdot I_{rm}^b \cdot V_{L,s}^c \quad (1)$$

in cui si sono indicati con I_{rm} e $V_{L,s}$ rispettivamente i valori medi dell'indice di rimbalzo sclerometrico e della velocità ultrasonica longitudinale; mentre a , b e c sono delle costanti i cui valori vengono determinati mediante il principio dei minimi quadrati [1]. Nel caso in esame, si è deciso di applicare la curva di correlazione seguente [8]:

$$R'_{SonReb} = 2.756 \cdot 10^{-10} \cdot V^{2.487} \cdot I_r^{1.311} \quad (2)$$

in cui la resistenza a compressione del calcestruzzo è espressa in MPa mentre la velocità ultrasonica è espressa in m/s.

La (2) si riferisce ad un calcestruzzo le cui caratteristiche sono quelle previste dalle raccomandazioni RILEM 43-CND [9].

Per calcestruzzi differenti da quello standard essa si modifica nella seguente:

$$R_{SonReb} = R'_{SonReb} \cdot (C_c \cdot C_d \cdot C_a \cdot C_f \cdot C_p \cdot C_m) \quad (3)$$

I coefficienti che compaiono nella (3) tengono conto della differenza tra il calcestruzzo standard e quello utilizzato per confezionare i modelli indagati.

I coefficienti di influenza, nel caso dei calcestruzzi indagati (cifr. paragrafo 3), assumono i valori riportati in tabella 1.

Tabella 1: Coefficienti di influenza

	Coefficienti	Campioni IF	Campioni IS
Tip di Cemento	Cc	1.00	1.00
Dosaggio	Cd	0.93	1.06
Natura aggregato	Ca	1.35	1.00
Frazione fine	Cf	0.94	0.97
Dimensione massima inerte	Cp	1.00	1.00
Presenza additivi	Cm	1.08	1.08

In fine, solo per i campioni IF è stata ricavata la seguente curva di correlazione:

$$R_{SonReb}^{Corr} = 2.75 \cdot 10^{-10} \cdot V^{2.485} \cdot I_r^{1.430} \quad (4)$$

2. Il Metodo SonReb-Win

Nel caso dei campioni in esame è stato applicato un metodo combinato a tre parametri ed in particolare il metodo “SonReb-Win” che combina i risultati del metodo SonReb con quelli ottenuti con l’applicazione del metodo penetrometrico (metodo Windsor).

In questo caso si è assunta per la legge di correlazione la seguente forma:

$$R_C = a \cdot I_m^b \cdot V_{L,s}^c \cdot L_e^d \quad (5)$$

Nella (5) si è indicato con L_e il valore medio della lunghezza esposta della sonda mentre le costanti (a , b , c e d) devono essere determinati mediante il principio dei minimi quadrati [1].

Per i campioni IF la cui durezza Mohs degli inerti (di provenienza fluviale) è variabile tra 3 e 7 si è deciso, anche sulla base di quanto ottenuto in [3], di diagrammare la resistenza a compressione per il valore di durezza Mohs pari a 3.15 che sembrerebbe essere il valore equivalente più probabile, mentre per i campioni IS confezionati con un solo tipo di inerte sarà diagrammato il valore ottenuto in corrispondenza della durezza Mohs pari a 4.5.

Anche in questo caso, solo per i campioni IF è stata ricavata la curva di correlazione seguente:

$$R_{SonReb-Win}^{Corr} = 5.390 \cdot 10^{-3} \cdot V^{0.0401} \cdot I_r^{0.250} \cdot L_e^{1.997} \quad (6)$$

Mentre per i campioni IS si è calcolato un valore medio della resistenza a compressione stimato con il metodo SonReb ed il metodo Windsor per Mohs=4.5.

3. Le Indagini Sperimentali

Nel presente lavoro sono riportati i risultati alcune indagini sperimentali condotte presso il Laboratorio di Prove sui Materiali e Sulle Strutture del Dipartimento MecMat dell’Università degli Studi Mediterranea di Reggio Calabria.

Lo studio è stato condotto su modelli di calcestruzzo di composizione nota, sui quali sono state effettuate delle prove di tipo non distruttivo (Windsor Probe Test, Prove Ultrasoniche, Prove Sclerometriche) e di tipo distruttivo (prove di compressione su carote di calcestruzzo estratte dai modelli), i cui risultati sono in seguito stati confrontati per dare un giudizio sull’applicazione dei metodi combinati a più parametri.

3.1. Campioni IF confezionati con inerti provenienti da fiume

Utilizzando inerti facilmente reperibili sul mercato e provenienti dal torrente Valanidi di Reggio Calabria, sono stati confezionati un totale di 4 modelli 600x600x200-mm con calcestruzzo di classe C25/30, denominati rispettivamente IF1, IF2, IF3 e IF4.

Il diametro massimo degli aggregati è di 25 mm con durezza Mohs variabile tra 3 e 7.

In uno studio precedente si è ricavata una stima della durezza equivalente degli inerti per questi campioni che è risultata essere pari a $D_{Mohs,equiv}=3.15$ [3].

La ricetta di impasto è la seguente:

1. Cemento Portland al calcare del tipo II ad alta resistenza normalizzata ed a resistenza iniziale elevata CEM II/A-LL 42.5R. Contenente conformemente a quanto prescritto dalle Norme UNI EN 197/1 circa l'80%-94% di clinker mentre la restante parte è costituita da calcare ed altri componenti secondari;
2. Dosaggio Cemento: 335 Kg/m³;
3. Rapporto A/C=0.37; sono stati impiegati 123 litri di acqua per ogni metro cubo di calcestruzzo;
4. Additivo Superfluidificante SIKA 3073 : si tratta di un additivo superfluidificante a base di esteri polistearici modificati esente da formaldeide e da cloruri la cui azione fornisce un prolungato mantenimento della fluidità ed un rapido sviluppo delle resistenze iniziali (Dosaggio Additivo: 1% sul peso del cemento).

Da ciascun modello sono stati estratti 2 carote, sottoposte successivamente a prove di compressione. I risultati di tali prove sono riportati in tabella 2.

Tabella 2: Campioni IF - Risultati delle prove a compressione sulle carote

Identificativo	Diametro [mm]	Altezza [mm]	Rcar [MPa]
IF1-CR1	94.00	188.00	26.77
IF1-CR2	94.00	188.00	26.99
IF2-CR1	94.00	188.00	25.52
IF2-CR2	94.00	188.00	26.47
IF3-CR1	94.00	188.00	31.49
IF3-CR2	94.00	188.00	29.93
IF4-CR1	94.00	188.00	20.89
IF4-CR2	94.00	188.00	24.00

3.2.Campioni IS confezionati con inerti provenienti da cava

Gli inerti utilizzati per confezionare questi campioni, sono provenienti dalla Basilicata; sono inerti di tipo calcareo con diametro massimo pari a 25 mm e durezza stimata Mohs compresa tra 4 e 5.

In uno studio precedente si è ricavata una stima della durezza equivalente degli inerti che è risultata pari a $D_{\text{Mohs,equiv}}=4.5$ [3].

Con tali inerti sono stati preparati 2 campioni di dimensioni 600x600x200-mm con calcestruzzo appartenente alla classe di resistenza C25/30.

In questo caso la ricetta di impasto è stata la seguente:

1. Cemento Portland: viene usato lo stesso cemento dei campioni precedenti: (CEM II/A-LL 42.5R);
2. Dosaggio Cemento: 450 Kg/m³;
3. Rapporto A/C=0.42; sono stati impiegati 189 litri di acqua per ogni metro cubo di calcestruzzo;
4. Additivo Superfluidificante SIKA 3073: si tratta di un additivo superfluidificante a base di esteri polistearici modificati esente da formaldeide e da cloruri la cui

azione fornisce un prolungato mantenimento della fluidità ed un rapido sviluppo delle resistenze iniziali (Dosaggio Additivo: 1% sul peso del cemento).

Anche in questo caso da ciascun modello sono stati estratti 2 carote, sottoposte successivamente a prove di compressione. I risultati di tali prove sono riportati in tabella 3.



Figura 1: Fase di confezionamento dei campioni IF

Tabella 3: Campioni IS - Risultati delle prove a compressione sulle carote

Identificativo	Diametro [mm]	Altezza [mm]	Rcar [MPa]
IS1-CR1	94.00	188.00	25.73
IS1-CR2	94.00	188.00	23.49
IS2-CR1	94.00	188.00	21.45
IS2-CR2	94.00	188.00	19.25



Figura 2: Fase di confezionamento dei campioni IS



a)



b)

Figura 3: a) Battute sclerometriche b) Letture ultrasoniche



Figura 4: Sonda Windsor

4. I Risultati

I risultati delle indagini sperimentali sono sinteticamente commentati e riportati di seguito. Le Figure 5 e 6 mettono in reazione la resistenza a compressione misurata direttamente sui campioni cilindrici estratti dai modelli mediante carotaggio con quella stimata con i metodi combinati rispettivamente a due ed a tre parametri.

Con riferimento ai campioni IF, nella Figura 5, sono confrontati i valori di resistenza stimati con il metodo Windsor, per Mohs=3.15, con il metodo SonReb (applicando le eqn. 2, 3 e 4) e con il metodo combinato a tre parametri SonReb-Win (applicando l'eqn. 6).

La Figura 6 mostra il confronto tra le resistenze a compressione misurate sulle carote estratte con i risultati del metodo Windsor, (Mohs=4.5), del metodo SonReb (eqn. 2 e 3) ed del metodo combinato a tre parametri indicato come SonReb-Win (quest'ultimo ottenuto dalla media dei valori di Windsor per Mohs 4.5 e dell'equazione 3).

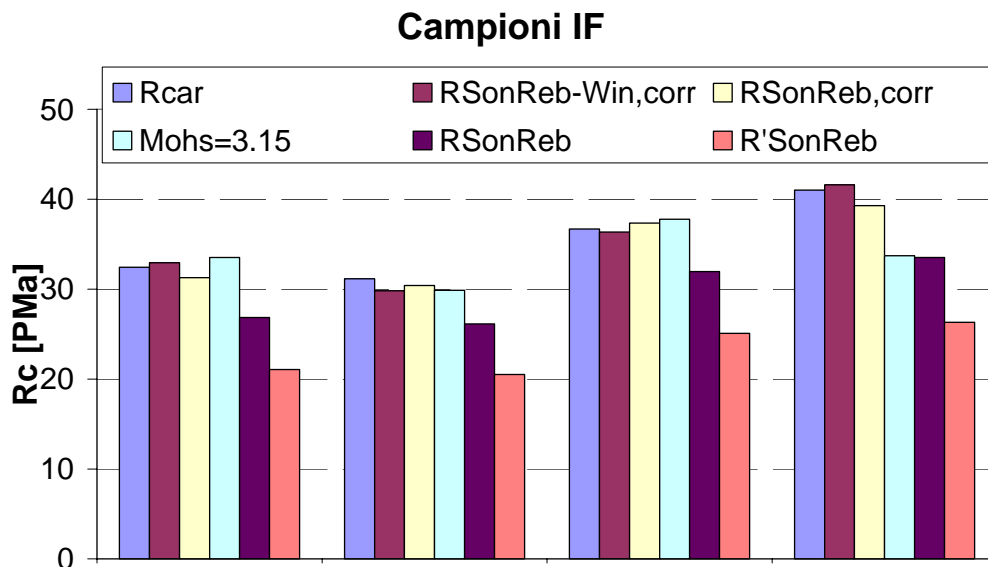


Figura 5: Correlazioni per i Campioni IF

5. Conclusioni

Nel presente lavoro sono stati presi in considerazione riportati e commentati i risultati di alcune indagini sperimentali condotte su campioni di conglomerato cementizio appositamente confezionati.

Si è applicato il metodo di indagine non distruttiva più diffuso noto con il nome di metodo SonReb e successivamente è stato adottato un metodo a tre parametri indicato come "SonReb-Win" che integra i risultati delle indagini SonReb con quelle delle indagini penetrometriche.

I risultati hanno evidenziato come l'utilizzo di metodi a tre parametri migliori la stima della resistenza a compressione del calcestruzzo in situ sia rispetto ai metodi usati singolarmente sia nei confronti dei metodi combinati a due parametri.

Pertanto, quando è possibile, è conviene, al fine di contenere il numero delle carote estratte dagli elementi strutturali utilizzati per la costruzione delle curve di correlazione, utilizzare metodi combinati a più parametri.

Campioni IS

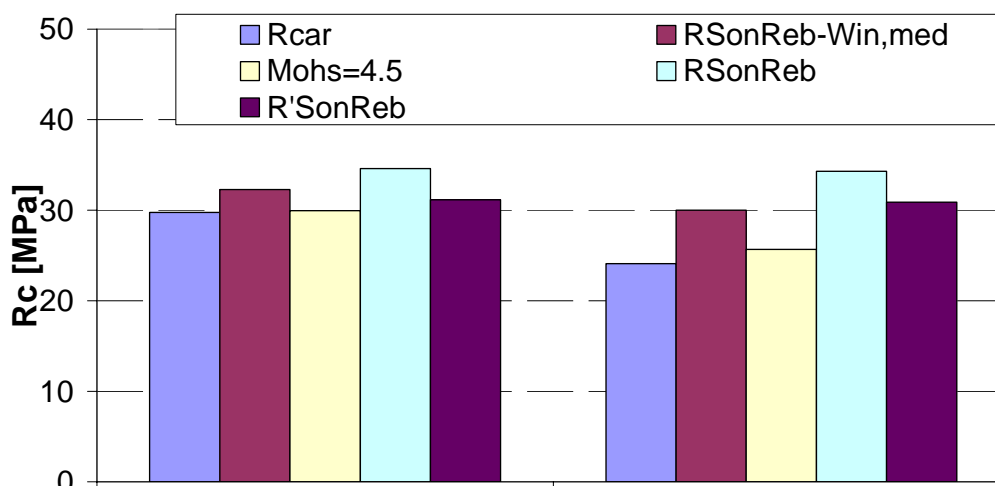


Figura 6: Correlazioni per i Campioni IF

Ringraziamenti

Questo studio è stata possibile grazie al sostegno fornito dalla Regione Calabria.

Si ringrazia l'Azienda Ambrocem di Ambrogio Leandro (Calcestruzzi e Movimenti di Terra), torrente Valanidi Reggio Calabria, per i campioni in cls confezionati con gli inerti di provenienza fluviale.

Si ringrazia inoltre il gruppo imprenditoriale Cav. Rocco Foti per i provini in cls confezionati con gli inerti calcarei.

Bibliografia

- 1 Pucinotti R., Patologia e Diagnostica del Cemento Armato (Indagini non Distruttive e Carotaggi nelle Opere da Consolidare) Dario Flaccovio Editore, 2006;
- 2 Pucinotti R., L'utilizzo del Metodo Windsor nella Valutazione della Resistenza Meccanica del Conglomerato Cementizio, Convegno Internazionale Crolli e Affidabilità delle Strutture Civili, Università degli Studi di Messina 20-21 Aprile 2006;
- 3 Pucinotti R., D'Elia A., De Lorenzo R.A., Sonda Windsor: Sperimentazione su Campioni in Conglomerato Cementizio, atti del Convegno Nazionale "Sperimentazione su Materiali e Strutture", pp. 684-693, Venezia, 6-7 dicembre, 2006;
- 4 Pucinotti R., Indagini non Distruttive nella Valutazione del Degrado di Elementi Strutturali in Cemento Armato, L'Industria Italiana del Cemento, n.810 giugno 2005;
- 5 Malhotra V. M., Carino N. J., CRC Handbook on Nondestructive Testing of Concrete, CRC Press, 1991;
- 6 Braga F., Dolce M., Masi A., Nigro D., Valutazione delle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi di bassa resistenza mediante prove non distruttive, L'Industria Italiana del Cemento, 3, pp. 201-208, 1992;
- 7 Malhotra V. M., and Painter K.P., Evaluation of the Windsor Probe Test for Estimating Compressive strength of Concrete, Mines Branch Investigation Rep. IR 71-50, Ottawa, Canada, 1971;
- 8 Bocca P., Cianfrone S., (1983). Le prove non distruttive sulle costruzioni: una metodologia combinata. L'Industria Italiana del Cemento, 6, pp. 429-436;
- 9 RILEM Recommendation NDT 1, Testing of Concrete by the Ultrasonic Pulse Method, Paris, December 1972.