

La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive

A. Masi

DiSGG, Università degli Studi di Basilicata, Potenza (masi@unibas.it)

Sommario

Le resistenza a compressione del calcestruzzo ha un ruolo cruciale nella valutazione degli edifici esistenti in cemento armato ed è difficile da stimare, per cui sono richieste specifiche procedure di stima. A tale scopo possono essere utilizzate prove distruttive e non distruttive. Nel presente lavoro sono sinteticamente descritte ed esaminate le principali e più diffuse prove di tipo non distruttivo (sclerometro, ultrasuoni, metodo combinato Sonreb). Riguardo ai metodi distruttivi le proprietà del calcestruzzo in situ possono essere stimate adoperando carote estratte dalla struttura. Le prove sulle carote, pur costituendo il mezzo di stima più diretto ed affidabile, forniscono risultati comunque diversi rispetto alle effettive resistenze del calcestruzzo appartenente alla struttura. Inoltre, poiché ragioni pratiche ed economiche rendono possibile estrarre un numero limitato di carote, appare utile affiancare ad esse prove di tipo non distruttivo per ottenere una stima sufficientemente completa ed affidabile del calcestruzzo nella struttura. Nel presente lavoro vengono proposte una espressione per valutare quantitativamente i principali fattori che influiscono sulla resistenza delle carote ed una procedura per stimare la resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive.

Summary

The compressive strength of concrete has a crucial role in the assessment of the seismic resistance of existing reinforced concrete buildings and is usually difficult to estimate, thus specific procedures are strongly needed. It can be estimated through destructive and non-destructive tests. In the paper, the most widespread non-destructive tests (hammer rebound, ultrasonic pulse, combined Sonreb method) are shortly described and examined. With regard to destructive methods, the in-situ mechanical properties of concrete can be estimated using core drilled from the structure. Even though testing core specimens is the most direct and reliable method to estimate concrete strength, it has to be taken into account that there

are many differences between the strength measured on core specimens and the concrete strength in the structure. Further, due to practical and economic reasons, only a limited number of specimens can be extracted, thus non destructive tests can be used together with core tests, thus reducing the amount of coring required to gain a sufficiently complete and reliable understanding of the concrete strength in the structure. In the paper, a purposely set up expression to take into account the main factors influencing the core strength and a procedure to estimate the in-situ concrete strength through destructive and non-destructive tests are proposed.

1. Introduzione

Il tema delle indagini sulle strutture, sia in termini globali che sui materiali costituenti, ha spesso ricevuto e riceve tuttora scarsa attenzione da parte dei progettisti. Ciò ha determinato da un lato, e più frequentemente, assunzioni troppo conservative, dunque inutilmente dispendiose, deleterie rispetto ad una strategia globale di mitigazione del rischio sismico in una condizione di estrema limitatezza delle risorse disponibili. Dall'altro lato, per fortuna meno frequentemente, ha determinato assunzioni non conservative con conseguenze potenzialmente gravi sulla sicurezza.

Vanno riconosciute peraltro le difficoltà oggettive, sia di carattere logistico che economico, nelle quali i tecnici sono spesso chiamati ad operare, senza superare le quali è difficile che un passo avanti in tal senso possa essere compiuto.

Tuttavia va riconosciuto anche il ritardo culturale presente nel settore dell'ingegneria civile sul tema della diagnosi, specie se raffrontato con altri settori come quello medico nel quale indagini, esami, analisi sono ormai patrimonio diffuso ed irrinunciabile da parte degli operatori e, cosa ancor più importante, da parte degli utenti-committenti.

Un altro aspetto che può aver contribuito a limitare l'attenzione verso le indagini è stata l'omologazione adottata in passato nel processo di valutazione della sicurezza tra progettazione di nuove costruzioni e riabilitazione di

costruzioni esistenti. Ci si riferisce in particolare all'adozione di coefficienti di sicurezza identici nelle due situazioni nonostante le evidenti differenze in termini di conoscibilità della struttura e di rappresentatività delle prove eseguite sui materiali, oltre che al problema delicato e non affrontato in questo lavoro della vita utile residua da considerare, rispetto a quella nominalmente attribuita ad un edificio nuovo.

L'Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" [1], ridisegnando complessivamente le strategie di protezione dal rischio sismico in Italia, ha introdotto forti elementi di novità nello svolgimento della valutazione degli edifici esistenti.

Il Capitolo 11 dell'Allegato 2 ("Norme tecniche per il progetto, la valutazione e l'adeguamento sismico degli edifici") alla suddetta OPCM 3274 tratta specificamente degli edifici esistenti evidenziando il ruolo della valutazione come elemento imprescindibile in un corretto processo di progettazione dell'intervento di riabilitazione di un edificio, come peraltro prevedono altre importanti norme internazionali sul tema [2, 3].

La valutazione degli edifici in c.a. richiede che vengano acquisiti dati sui seguenti aspetti principali:

- Identificazione dell'organismo strutturale ottenuto sulla base dei disegni originali di progetto opportunamente verificati con indagini in-situ, oppure con un rilievo ex-novo;
- Identificazione delle strutture di fondazione;
- Informazione sulle dimensioni geometriche degli elementi strutturali, dei quantitativi delle armature, delle proprietà meccaniche dei materiali;
- Informazioni su possibili difetti locali dei materiali;
- Informazioni su possibili difetti nei particolari costruttivi (dettagli delle armature, eccentricità travi-pilastro, eccentricità pilastro-pilastro, collegamenti trave-colonna e colonna-fondazione, etc.);
- Informazioni sulle norme impiegate nel progetto originale;
- Descrizione della destinazione d'uso attuale e futura dell'edificio con identificazione della categoria di importanza ed eventuale rivalutazione dei carichi variabili;
- Informazione sulla natura e l'entità di eventuali danni subiti in precedenza e sulle riparazioni effettuate.

In questo lavoro viene approfondito il tema delle indagini da svolgere per individuare le proprietà meccaniche del calcestruzzo. A tale riguardo nell'ultima versione dell'Allegato 2 all'OPCM 3274 [4] vengono fornite una serie di indicazioni per quanto riguarda le indagini da svolgere:

- La misura delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo si ottiene mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura.

- Sono ammessi metodi di indagine non distruttiva di documentata affidabilità, che non possono essere impiegati in completa sostituzione di quelli distruttivi, ma sono consigliati a loro integrazione, purché i risultati siano tarati su quelli ottenuti con prove distruttive.
- Vanno adottati metodi non distruttivi che limitino l'influenza della carbonatazione degli strati superficiali sui valori di resistenza del calcestruzzo.

2. L'impostazione della campagna di indagini sui materiali

Aspetto fondamentale nella impostazione della campagna di indagini è costituito dalla scelta dei punti che costituiranno oggetto di indagine (campionamento). Il programma prevederà l'entità del campionamento (per il quale le norme forniscono valori di riferimento), la ubicazione dei punti da esaminare ed il tipo di prove da effettuare.

Requisito fondamentale che dovrà avere il campionamento è la rappresentatività dello stato complessivo dell'edificio oggetto di indagine, cercando di riflettere al meglio le caratteristiche di variabilità della struttura. Quanto più la struttura è eterogenea, tanto più complesso è il lavoro necessario per pervenire ad una stima affidabile delle proprietà dei materiali da cui è costituita. Ciò significa che conviene prelevare pochi campioni ed effettuare poche misure laddove il materiale si presenta abbastanza omogeneo, in modo da riservare gli sforzi maggiori alle zone non omogenee. Inoltre i diversi tipi di indagine possono essere eseguiti in una sequenza temporale pianificata, a livello di affidabilità ed onerosità crescente, in modo che la precedente costituisca base di riferimento del campionamento della successiva indagine più costosa ma anche più affidabile sul piano dei risultati, e quindi da effettuare in maniera più mirata.

Per esemplificare i concetti su esposti si pensi alle attività di indagine per accertare le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo. Se ci si avvale di due metodologie di indagine come gli ultrasuoni ed i carotaggi, abbastanza diffuse nella pratica professionale, è opportuno effettuare inizialmente le indagini ultrasoniche e, sulla base dei risultati ottenuti, impostare in maniera mirata la campagna di carotaggi. Infatti, le prove ultrasoniche non consentono di ottenere una stima attendibile delle caratteristiche meccaniche del conglomerato in termini assoluti, sono però abbastanza affidabili in termini relativi e cioè per definire ambiti omogenei. In questo modo, se sulla base delle prove ultrasoniche, si suddivide la struttura in campi omogenei si potranno indirizzare i carotaggi ai diversi campi rilevati evitando sovrapposizioni o preclusioni, ed i risultati diretti, mirati e limitati, ottenuti per ogni singolo campo, potranno essere ritenuti rappresentativi dell'intero campo e consentire la eventuale calibrazione delle misure ultrasoniche riferite a quell'ambito omogeneo.

Nel definire le modalità di svolgimento di una campagna di indagini due aspetti appaiono di particolarmente rilevanti per l'attività del professionista incaricato [5]:

- quali e quanti dati vanno raccolti per poter effettuare la valutazione di sicurezza;
- come vanno trattati ed interpretati questi dati.

Meno rilevante appare l'aspetto relativo alla individuazione ed applicazione delle diverse tecnologie e metodiche di indagine per le quali ci si dovrà avvalere di strutture o laboratori esperti nel settore. Il professionista dovrà conoscere le principali metodiche disponibili ed i vantaggi e svantaggi nell'utilizzo di ognuna di esse, con particolare riferimento alla loro affidabilità ed ai limiti di applicabilità. Inoltre va detto che, per quanto tali metodiche abbiano subito una consistente evoluzione nel corso degli ultimi anni tale da renderle molto efficienti ed affidabili, è da ritenere che un ruolo determinante abbia ed avrà ancora l'indagine visiva ("esame clinico"), attività di specifica pertinenza del professionista incaricato.

PROVA	Costo	Rapidità	Danno str.	Rappresentatività	Affidabilità
Carotaggio	alto	bassa	Moderato	Moderata	buona
Sonde Windsor	medio	alta	Minimo	Superficiale	scarsa
Ultrasuoni	basso	alta	Nullo	Buona	moderata
Sclerometro	minimo	alta	Nullo	Superficiale	scarsa

Tabella 1 - Caratteristiche di alcuni metodi di prova per la determinazione della resistenza del calcestruzzo.

Negli edifici in c.a. le proprietà più importanti da determinare con le indagini sono la resistenza a compressione del calcestruzzo e le resistenze a snervamento ed a rottura delle barre d'acciaio.

Per quanto riguarda la resistenza a compressione del calcestruzzo va detto che, oltre al ruolo determinante che essa ha sulla capacità portante, anche altre proprietà del calcestruzzo, come il modulo elastico, la resistenza a trazione e la durabilità, possono essere ricavate, direttamente o indirettamente, dalla resistenza a compressione. La normativa vigente sulle nuove costruzioni in c.a. [6] qualifica il conglomerato tramite la resistenza caratteristica a compressione.

Per consentire la suddetta valutazione su strutture esistenti possono essere adoperati metodi di indagine di tipo distruttivo (che implicano cioè asportazione localizzata di materiale) e non distruttivo. Tra i primi vanno ricordati il carotaggio e il metodo delle sonde di Windsor, tra i secondi lo sclerometro, gli ultrasuoni ed il metodo combinato Sonreb.

Anche indagine chimiche possono rivelarsi in alcuni casi opportune, come ad esempio quella per stimare la profondità di carbonatazione, condizione che può avere riflessi importanti sul processo di corrosione e sulle condizioni di aderenza delle barre d'acciaio.

3. Le prove sul calcestruzzo

La scelta dei punti di indagine va fatta in maniera casuale, senza privilegiare zone particolari, in modo tale da poter poi ritenere i risultati ottenuti statisticamente rappresentativi delle proprietà del materiale in sito. Qualora si

ritenesse necessario privilegiare zone particolari, ad esempio laddove il calcestruzzo si presenta particolarmente degradato o di scarsa qualità, si dovrebbero individuare diversi ambiti omogenei, mantenendo i risultati relativi alle diverse zone separati tra loro.

Per quanto riguarda la scelta delle metodologie di indagine da adottare va detto che esistono diverse metodologie che consentono di acquisire informazioni qualitativamente identiche. Le considerazioni che conducono alla scelta di una specifica metodologia coinvolgono valutazioni sui costi, sui danni, sui tempi di esecuzione e sulla precisione connessa a ciascun tipo di prova in confronto con quella richiesta dall'indagine in corso. In tabella 1 vengono evidenziate le caratteristiche principali di alcuni metodi per la determinazione della resistenza a compressione del calcestruzzo.

La pianificazione dell'indagine conoscitiva sullo stato della costruzione, pertanto, comporta una serie di decisioni riguardanti la scelta del metodo o dei metodi più idonei, la localizzazione ed il numero di prove necessarie per valutare, con un grado di accuratezza e rappresentatività accettabili, le effettive caratteristiche del materiale.

Nella scelta del metodo di indagine da utilizzare si è spesso fortemente condizionati dalla possibilità o meno di produrre dei danni, anche se solo di natura estetica. Nel caso di limitazioni di questo tipo dovrebbero essere utilizzati prevalentemente metodi non distruttivi (ad esempio sclerometro con ultrasuoni), limitando allo stretto necessario le prove distruttive.

Il numero minimo di prove da effettuare è stabilito dalle norme [4]. In generale il numero "giusto" è il risultato di un compromesso tra precisione richiesta, budget e tempi disponibili, danni arrecabili, pertanto non può che essere valutato caso per caso in base alle esigenze specifiche. Per finalità comparative risultano molto efficienti i metodi non distruttivi, poichè la rapidità con cui si eseguono le misurazioni e il danno limitato che viene arrecato (in genere basta eliminare l'intonaco) permette di esaminare un gran numero di punti.

Occorre segnalare che in tutte le prove non distruttive, ossia quelle per cui la misura della resistenza è indiretta, è necessario procedere ad una operazione di calibrazione, ossia a collegare il risultato della misura alla caratteristica oggetto dell'indagine. Purtroppo la calibrazione tende ad essere maggiormente complessa per metodi meno costosi e che producono i danni minori. Lo sclerometro e gli ultrasuoni infatti non producono alcun tipo di danno, sono economici e rapidi, ideali per stime di omogeneità e comparative, ma la loro calibrazione in termini di stima della resistenza

assoluta pone diversi problemi. Il carotaggio invece, che consente la migliore stima della resistenza della struttura in sito, causa i danni maggiori, è lento e costoso.

Il carotaggio va comunque ritenuto, nella maggior parte dei casi, essenziale per effettuare la calibrazione delle misure ottenute con le altre metodologie non distruttive o semidistruttive da utilizzare più estesamente nelle indagini.

Particolare attenzione va riservata alla scelta dei punti da cui estrarre le carote; si raccomanda di scegliere le zone meno sollecitate nell'ambito dell'elemento strutturale e di far precedere l'estrazione da accurate rilevazioni pacometriche tese ad individuare la posizione delle barre di armatura (almeno di quelle principali) in modo da poterle evitare.

3.1 Il carotaggio

Le norme [4] prevedono che *“la misura delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo si ottenga mediante estrazione di campioni ed esecuzione di prove di compressione fino a rottura”*. Infatti la scarsa affidabilità dei metodi non distruttivi utilizzati singolarmente per giungere ad una definizione diretta della resistenza del conglomerato determina la necessità di effettuare sempre prove di tipo distruttivo i cui risultati possono essere utilizzati da soli o per calibrare i risultati ottenuti con i suddetti metodi indiretti non distruttivi.

Il carotaggio consiste nel prelievo di campioni cilindrici detti carote mediante carotatrici a corona diamantata. Esso è sicuramente il metodo distruttivo più diffuso, in quanto consente di determinare la resistenza del conglomerato in maniera analoga a quella adottata per i campioni standard; è esplicitamente richiamato anche nell'allegato 2 al DM 9/1/96 che tratta i controlli sul conglomerato per le nuove costruzioni.

Il prelievo di carote da strutture in opera è regolato dalla norma UNI 6131 [7] che indica, come criterio fondamentale da adottare nella esecuzione di tali prelievi, quello di ridurre al minimo il danneggiamento del campione nel corso delle operazioni di estrazione. In particolare, durante le operazioni di estrazione, la carotatrice va adeguatamente ancorata in modo che avanzando non subisca vibrazioni tali da rovinare il campione, che deve avere diametro costante ed asse rettilineo. Il diametro delle carote deve essere non minore di tre volte la dimensione massima dell'aggregato, mentre l'altezza deve essere possibilmente pari a due volte il diametro [8].

La resistenza misurata sulle carote risente di numerosi fattori che la differenziano da quella che si misurerebbe su un equivalente provino standard. Tali fattori sono in particolare [5]:

- 1) diverse modalità di preparazione e stagionatura;
- 2) differente età di stagionatura tra carota e provino standard;
- 3) posizione del prelievo nell'ambito dell'elemento strutturale (ad es. al piede o alla testa di un pilastro, parallelamente o ortogonalmente alla direzione di getto);

- 4) disturbo che inevitabilmente consegue alle operazioni di prelievo;
- 5) dimensioni delle carote (ad es. nel caso di microcarote o con H/D diverso da 2);

- 6) presenza di armature incluse.

Per quanto l'effetto di alcuni dei fattori su elencati (ad es. 4) e 6)) possa essere eliminato o ridotto conducendo in maniera accurata le operazioni di prelievo, essi tendono in generale a far sottostimare la resistenza rispetto a quella degli analoghi provini standard. Per correggere ciò si può fare ricorso a coefficienti correttivi opportunamente calibrati, di cui si dirà nei paragrafi successivi. Va sottolineato come un esame a parte meritino i fattori 1) e 2) non solo perché per essi l'operazione di correlazione si presenta particolarmente problematica ma anche perché potrebbe non essere applicabile.

Le carote possono essere utilizzate anche per valutare il modulo elastico del calcestruzzo acquisendo le deformazioni del campione durante le prove di compressione mediante trasduttori di spostamento o strain-gauges. In alternativa il modulo elastico, come pure altre proprietà meccaniche (es. la resistenza a trazione), possono essere valutati sulla base della resistenza a compressione utilizzando espressioni fornite nelle norme [6, 9].

3.2 I metodi non distruttivi

I metodi di prova non distruttivi più diffusi per la stima delle proprietà meccaniche del calcestruzzo sono il metodo sclerometrico, il metodo ultrasonico ed il metodo combinato Sonreb. Tali metodi sono supportati da una vasta e consolidata letteratura ed hanno trovato in molti paesi un riconoscimento ed inquadramento normativo.

3.2.1 Le prove sclerometriche

L'utilizzo dello sclerometro è regolamentato dalla norma UNI 9189 [10] ed è esplicitamente richiamato anche in alcune Istruzioni di norme relative agli interventi su edifici danneggiati dal sisma [11]. Esso è molto diffuso nella pratica professionale corrente per cui verrà descritto con lo scopo principale di chiarirne i presupposti fisici e la scarsa affidabilità nella determinazione della resistenza.

Lo sclerometro è costituito da una massa battente d'acciaio, azionata da una molla, che contrasta un'asta di percussione a contatto della superficie di prova (Fig. 1). Il metodo consiste nel misurare l'altezza di rimbalzo della massa, dopo che questa è stata proiettata, con una data energia, contro la superficie da saggiare; mediante delle curve, in dotazione allo strumento o diversamente ottenute (Fig. 2), l'indice sclerometrico, proporzionale all'altezza di rimbalzo, è correlato alla resistenza a compressione del calcestruzzo.



Fig. 1 - Sclerometro Schmidt.

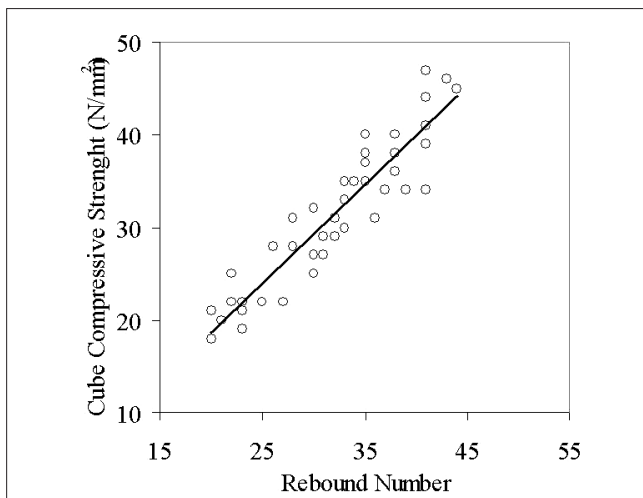


Fig. 2 - Curva indice di rimbalzo-resistenza cubica a compressione (tratta da [15]).

La norma UNI 9189 precisa che lo sclerometro può essere utilizzato per valutare l'omogeneità del calcestruzzo in situ, per delimitare zone di calcestruzzo degradato o di scarsa e per stimare le variazioni nel tempo delle proprietà del calcestruzzo, ma non può sostituire i metodi distruttivi nella determinazione della resistenza; tale determinazione può essere effettuata solo in presenza di una curva sperimentale di taratura.

Per comprendere le limitazioni intrinseche a questo metodo è utile esaminare quali siano i fattori che influiscono sull'entità del rimbalzo [12]. La distanza di rimbalzo dipende dall'energia cinetica posseduta dalla massa battente prima dell'impatto e da quanta di tale energia viene assorbita nell'impatto. Al di là della quota assorbita dall'attrito meccanico nello strumento, l'energia viene assorbita nell'interazione tra l'asta e il calcestruzzo. È questo secondo fattore che consente di utilizzare l'indice di rimbalzo come indicatore delle proprietà del calcestruzzo. I calcestruzzi poco rigidi e resistenti assorbono più energia nell'urto, rispetto a calcestruzzi più rigidi e resistenti, fornendo un minore valore dell'indice di rimbalzo. Poiché è possibile per due calcestruzzi con diversa composizione avere la stessa resistenza ma rigidità diversa, si possono ottenere due differenti indici di rimbalzo anche a parità di resistenza; viceversa, è possibile per due calcestruzzi con diverse resistenze avere lo stesso indice di rimbalzo, se la rigidità del meno resistente è maggiore di quella del più resistente.

Il risultato è legato alle condizioni del punto nel quale la prova viene eseguita, per cui la norma UNI prescrive che vengano effettuate almeno 9 misure, non sovrapposte, per ogni punto da esaminare, e che l'indice di rimbalzo venga individuato come media dei nove indici misurati. La norma americana ASTM C 805 [13] prevede, invece, la esecuzione di 10 misure; se una delle misure differisce dalla media di sette o più unità di rimbalzo essa viene scartata, e viene determinata una nuova media sulla base delle misure restanti; qualora più di due misure differiscano dalla media di sette o più unità, l'intero gruppo di letture va scartato. In ogni caso la prova coinvolge soltanto lo strato superficiale di calcestruzzo, per cui il risultato può non essere rappresentativo del calcestruzzo interno; ad esempio il fenomeno

di carbonatazione che interessa nel tempo il solo strato superficiale aumentandone la rigidità, può portare a valori dell'indice di rimbalzo maggiori di quelli rappresentativi del calcestruzzo interno; per questa ragione la resistenza stimata su calcestruzzi con più di 90 giorni di stagionatura è in generale maggiore di quella effettiva.

3.2.2 Le prove ultrasoniche

La prova consiste nel misurare il tempo impiegato da onde sonore di adeguata frequenza (40-120 KHz) ad attraversare un mezzo compreso tra due trasduttori collocati ad una data distanza, ricavandone la velocità di propagazione. Le letture possono essere effettuate in diversi modi legati alla posizione relativa dei due trasduttori (Fig. 3) ma il modo più corretto per effettuare le letture, e quindi da utilizzare sempre laddove possibile, è quello per trasparenza, cioè con i due trasduttori disposti in contrapposizione su due superfici tra loro parallele.

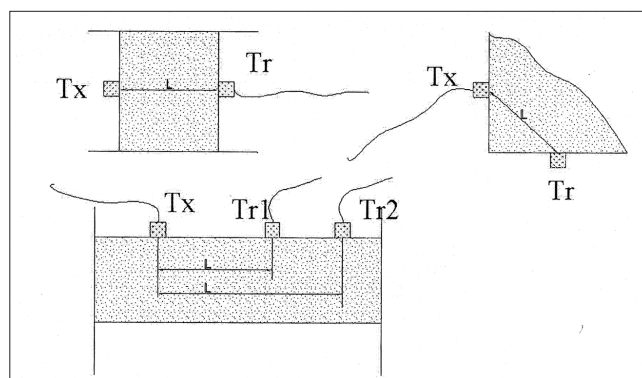


Fig. 3 - Letture ultrasoniche per trasparenza (a), d'angolo (b) e superficiali (c).

Come per il metodo sclerometrico, esistono curve che correlano la velocità ultrasonica alla resistenza del conglomerato (Fig. 4), ma anche in questo caso la utilizzazione diretta di tali correlazioni comporta una stima poco affidabile della resistenza.

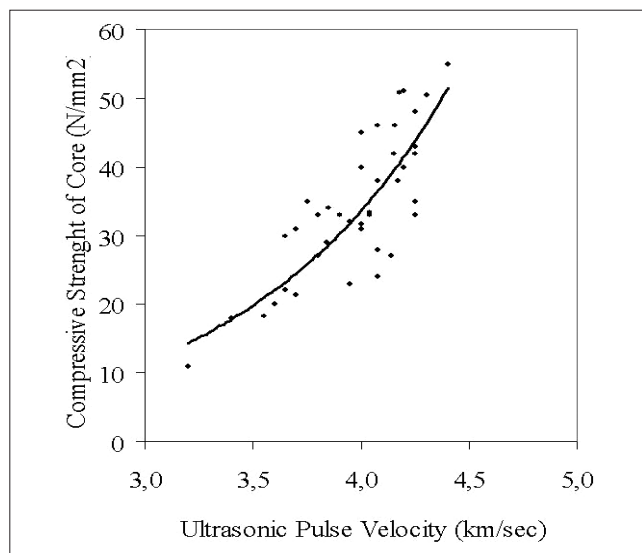


Fig. 4 - Relazione velocità ultrasonica-resistenza a compressione rilevata su carote (tratta da [14]).

Esiste una relazione teorica che lega la velocità di propagazione di onde longitudinali alle caratteristiche elastiche di un mezzo infinito, omogeneo, isotropo ed elastico:

$$V = \sqrt{\frac{E_d(1-\nu)}{\rho(1+\nu)(1-2\nu)}}$$

in cui E è il modulo elastico dinamico in MPa, ν è il modulo di Poisson dinamico e ρ è la densità di massa in kg/m^3 , e V si ottiene in km/s [15].

La velocità ultrasonica è, quindi, direttamente proporzionale alla radice quadrata del modulo elastico dinamico:

$$E_d = \rho V^2 \frac{(1+\nu)(1-2\nu)}{(1-\nu)}$$

D'altra parte il calcestruzzo non è ovviamente un mezzo omogeneo, isotropo ed elastico, cosicché le relazioni che legano la velocità di propagazione alle caratteristiche meccaniche del mezzo devono tener conto delle sue reali proprietà fisico-chimiche.

I fattori che maggiormente influenzano le misurazioni sono [5]:

- 1) tipo di cemento: non è molto significativo se non per calcestruzzi "giovani", in generale può essere trascurato;
- 2) dimensioni degli inerti: la maggior presenza di inerti grandi, nella composizione granulometrica del calcestruzzo, fa aumentare la velocità anche se la resistenza resta costante;
- 3) rapporto acqua/cemento e dosaggio cemento: riducendo il rapporto A/C la velocità resterà pressoché costante mentre la resistenza potrà aumentare anche considerevolmente;
- 4) età del conglomerato: la velocità, al contrario della resistenza, è inversamente proporzionale all'età di stagionatura, e ciò sembra vada addebitato alle microfessurazioni che si verificano (riduzione di velocità), mentre le reazioni di indurimento continuano nel tempo (aumento di resistenza);
- 5) contenuto di umidità: all'aumentare del contenuto di umidità si registra un aumento della velocità fino al 5% [16] ed una diminuzione del carico di rottura;
- 6) stato di sollecitazione: la velocità ultrasonica non è influenzata dallo stato di sollecitazione, in cui si trova l'elemento in prova, fino a sforzi nel materiale pari a circa il 50% del carico di rottura; per livelli di sforzo più elevati si osserva una riduzione della velocità causata dalla formazione di microfessure [17];
- 7) presenza di armature: le armature dovrebbero essere possibilmente evitate a causa dell'errore introdotto dal fatto che la velocità di trasmissione nell'acciaio è circa del 40% superiore alla velocità di trasmissione nel calcestruzzo; in un elemento in c.a. fortemente armato si può rilevare, quindi, una velocità ben maggiore di quella effettiva, specialmente se le barre sono disposte parallelamente alla direzione di propagazione degli impulsi. Alcuni autori (ad es. [18]) ed alcune normative (ad es. [15]) hanno proposto degli opportuni fattori

di correzione, funzione della disposizione delle armature nella zona interessata, ma la loro affidabilità è discutibile; comunque l'influenza di armature di diametro inferiore a 10-12 mm appare essere trascurabile.

Le considerazioni appena svolte sopra confermano la difficoltà di correlare la velocità ultrasonica con la resistenza; è consigliabile non utilizzare le curve di correlazione fornite nei manuali d'uso dai costruttori delle strumentazioni, in quanto esse sono state ricavate per determinati tipi di calcestruzzo e quindi non hanno validità generale. Correlazioni ancora più complesse e/o meno affidabili si verificano in presenza di calcestruzzi degradati o comunque di bassa resistenza, situazione che, purtroppo, si incontra frequentemente negli interventi di rafforzamento [17]. Il metodo ultrasonico si rivela invece molto affidabile nel valutare la omogeneità del conglomerato e rilevare lo stato fessurativo.

3.2.3 Il metodo Sonreb

Per ridurre gli errori commessi con le due metodologie sopra descritte è stato sviluppato il metodo combinato SONREB (SONic + REBound = ultrasuoni+sclerometro). Si è infatti notato che il contenuto di umidità fa sottostimare l'indice sclerometrico e sovrastimare la velocità ultrasonica, e che, all'aumentare dell'età del calcestruzzo, l'indice sclerometrico aumenta mentre la velocità ultrasonica diminuisce. L'uso combinato delle due prove consente quindi di compensare in parte gli errori commessi usando singolarmente le due metodologie.

L'applicazione del metodo Sonreb richiede la valutazione dei valori locali della velocità ultrasonica V e dell'indice di rimbalzo S , a partire dai quali è possibile ottenere la resistenza del calcestruzzo R_c mediante espressioni del tipo:

$$R_c = a V^b S^c \quad (1)$$

In bibliografia vengono fornite numerose espressioni del tipo (4.1), tra le altre:

- 1a) $R_{c,I} = 9.27 \cdot 10^{-11} \cdot S^{1.4} \cdot V^{2.6}$ (tratta da [19])
- 1b) $R_{c,I} = 8.06 \cdot 10^{-8} \cdot S^{1.246} \cdot V^{1.85}$ (tratta da [20])
- 1c) $R_{c,3} = 1.2 \cdot 10^{-9} \cdot S^{1.058} \cdot V^{2.446}$ (tratta da [21])

in cui R_c è la resistenza cubica a compressione in $[\text{N/mm}^2]$, S è l'indice sclerometrico e V è la velocità ultrasonica in $[\text{m/s}]$.

La stima della resistenza R_c può essere effettuata anche utilizzando dei grafici contenenti una serie di curve di iso-resistenza nel piano V-S ottenute dalle espressioni surriportate. L'applicazione richiede la valutazione dei valori locali della velocità ultrasonica e dell'indice di rimbalzo con i quali entrare nel grafico suddetto. In Fig. 5 è riportato un esempio in cui vengono utilizzate le curve basate sull'espressione fornita nelle norme RILEM [19].

Per quanto detto nei paragrafi precedenti sulla dipendenza dei valori di S e V dalle caratteristiche dello specifico calcestruzzo, appare evidente che le suddette espressioni non possono avere validità generale. Per quanto riguarda

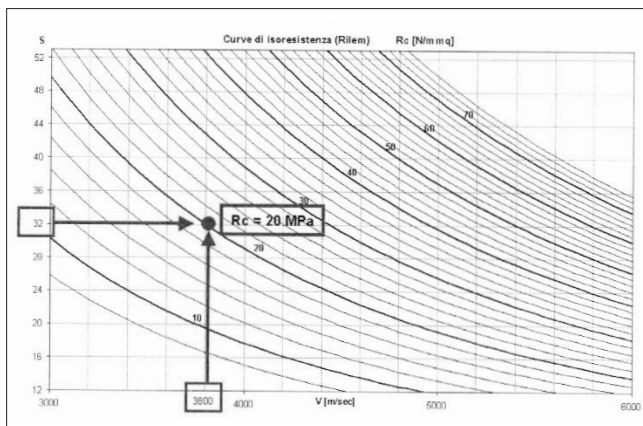


Fig. 5 - Metodo Sonreb: uso del grafico con curve di iso-resistenza (ricavate da [19]).

l'espressione 1a), in bibliografia non vengono fornite indicazioni sui limiti di applicabilità. Anche per l'espressione 1b) viene indicato che essa è stata tratta da prove su calcestruzzi di composizione usuale ma che non viene precisata, pertanto non se possono stabilire i limiti di applicabilità. Infine l'espressione 1c) viene utilizzata per stimare la classe di resistenza del calcestruzzo di travi in c.a.p. di un cavalcavia ferroviario, per cui è da ritenere che tale relazione sia stata messa a punto per calcestruzzi di alta resistenza.

In [22] viene proposta una procedura per la stima della resistenza del calcestruzzo basata su un grafico sperimentale di correlazione (Fig. 6), costituito da una serie di curve di iso-resistenza nel piano V-S. Se il calcestruzzo ha le stesse caratteristiche di quello per il quale sono state ricavate le curve sperimentali, il grafico fornisce direttamente la resistenza stimata del calcestruzzo. Se, come accade abitualmente, si ha a che fare con un calcestruzzo di composizione diversa da quello delle curve, occorre applicare dei coefficienti correttivi che tengano conto del tipo e del dosaggio di cemento, della natura e della dimensione degli inerti, degli eventuali additivi. Qualora si disponga delle informazioni necessarie per stimare i coefficienti correttivi, cosa improbabile nel caso di strutture esistenti, è possibile effettuare una stima abbastanza corretta della resistenza del conglomerato. Infatti in [17] si è visto che, introducendo i coefficienti correttivi, la capacità di stima della resistenza di cubetti di calcestruzzo "giovane" (sottoposti a prova di compressione dopo circa 30 di stagionatura giorni) migliora significativamente.

In ogni caso le espressioni surriportate appaiono di dubbia affidabilità nella applicazione a calcestruzzi di qualità medio-bassa, situazione tipicamente riscontrata nelle strutture esistenti.

4. Stima della resistenza del calcestruzzo in-situ

La procedura di elaborazione da adottare per ottenere la resistenza del calcestruzzo in esame dipende dalle prove eseguite e dai dati disponibili.

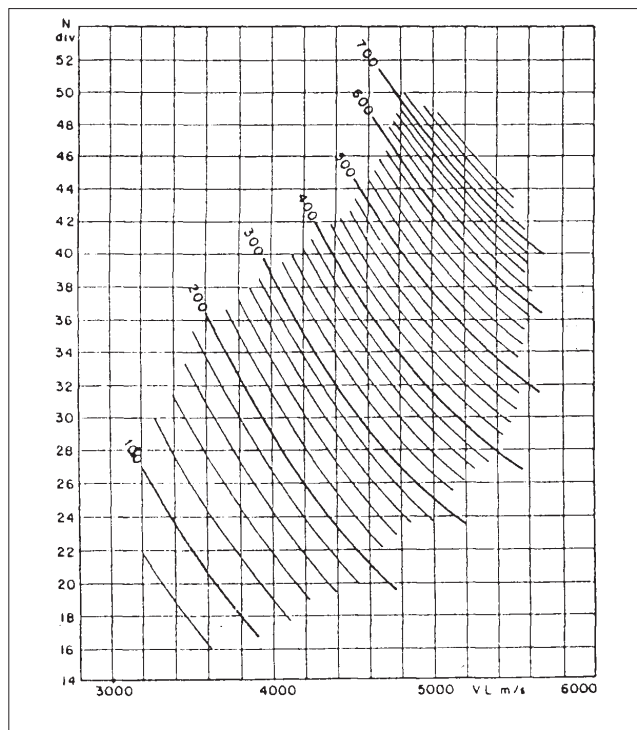


Fig. 6 - Metodo Sonreb: curve di iso-resistenza (ricavate da [22]).

Procedura proposta basata soltanto sui carotaggi

Per convertire le N resistenze ottenute sulle carote $f_{car,i}$ nelle corrispondenti resistenze in-situ $f_{cis,i}$ viene proposta la seguente relazione:

$$f_{cis,i} = (C_{b/D} * C_{dia} * C_a * C_d) f_{car,i} \quad (2)$$

dove:

- $C_{b/D}$ è il coefficiente correttivo per rapporti b/D diversi da 2, pari a $C_{b/D} = 2/(1.5 + D/b)$;
- C_{dia} è il coefficiente correttivo relativo al diametro, da assumere pari a 1.06, 1.00 e 0.98 per D pari, rispettivamente, a 50, 100 e 150 mm;
- C_a è il coefficiente correttivo relativo alla presenza di armature incluse, variabile tra 1.03 per barre di piccolo diametro ($\varnothing 10$) a 1.13 per barre di diametro elevato ($\varnothing 20$).
- C_d è il coefficiente correttivo per tener conto del disturbo arrecato alla carota nelle operazioni di estrazione. Le norme FEMA 274 [2] suggeriscono di assumere un valore costante pari a 1.06, mentre in letteratura si propone di assumere il valore 1.10, in entrambi i casi per operazioni di prelievo condotte con estrema accuratezza. Tenendo però conto del fatto che il rimaneggiamento è tanto maggiore quanto minore è la qualità del calcestruzzo da carotare, appare più convincente l'indicazione riportata in [23] che suggerisce di assumere $C_d = 1.20$ per $f_{car} < 20$ MPa, e $C_d = 1.10$ per $f_{car} > 20$ MPa.

Procedura proposta basata su carotaggi ed indagini non distruttive

Se si dispone di dati ottenuti con indagini non distruttive, i risultati ottenuti dai carotaggi, effettuati negli stessi

punti, possono essere utilizzati per calibrare tali dati. Si raccomanda in particolare di usare il metodo Sonreb e di ricavare l'espressione $R_c = a S^b V^c$, valida specificamente per il calcestruzzo in esame effettuando una regressione basata sui risultati delle prove sulle carote.

Nota la resistenza cilindrica a compressione delle carote f_{car} prelevate (rivalutata con l'espressione (2)), l'indice di rimbalzo S e la velocità ultrasonica V, ottenute dalle prove non distruttive effettuate prima dei carotaggi, è possibile determinare i coefficienti a, b e c delle curve Sonreb mediante una regressione non lineare che forniscono i valori della resistenza del calcestruzzo:

$$R_c = a S^b V^c$$

Applicando la su riportata relazione è possibile stimare le resistenze R_c anche nei punti in cui siano state effettuate solo prove non distruttive, in modo da determinare il valore medio della resistenza del calcestruzzo in esame utilizzando i risultati delle prove distruttive e non distruttive, dunque un campione più ampio e rappresentativo.

5. Conclusioni

L'Allegato 2 all'OPCM 3274 ha finalmente evidenziato l'importanza della valutazione, fino ad allora spesso sottovalutata, nella progettazione degli interventi sugli edifici esistenti.

Nel valutare la resistenza sismica degli edifici esistenti un ruolo fondamentale è svolto dalle indagini sui materiali. In particolare, nel caso degli edifici in cemento armato risulta tanto importante quanto complesso stimare in modo affidabile ma non eccessivamente oneroso la resistenza a compressione del calcestruzzo in situ.

La stima più o meno accurata della resistenza del calcestruzzo concorre ad ottenere un opportuno livello di conoscenza della struttura da cui dipende il valore del fattore di confidenza da adottare nelle verifiche di sicurezza. La resistenza da assumere nei calcoli verrà determinata a partire dalla resistenza media ottenuta dalle prove, dividendola per il fattore di confidenza, che varia da 1.35 per il livello di conoscenza minimo (LC1 conoscenza limitata) a 1 per il livello di conoscenza esaustiva (LC3). Ciò da al professionista più opportunità, ma al tempo stesso lo responsabilizza maggiormente, in quanto esso si troverà a poter decidere di investire maggiori risorse nelle indagini per la conoscenza della struttura, da recuperare successivamente avendo la possibilità di effettuare interventi di adeguamento più mirati e meno onerosi.

Stante il grande deficit di protezione sismica che si è accumulato nel nostro paese, tale aspetto appare importante in termini generali ed ancor più se ci riferisce al patrimonio edilizio pubblico costituito in larga parte da edifici non o parzialmente protetti dal sisma. Ancora una volta vanno però considerati gli aspetti economici, sia in termini di costi delle indagini che di tariffe professionali, che possono deprimere o favorire tale possibilità, nonché quelli tecnici in termini di facilità di esecuzione ed affidabilità dei metodi di indagine disponibili.

Nel lavoro sono sinteticamente descritte ed esaminate le principali e più diffuse prove di tipo non distruttivo (sclerometro, ultrasuoni, metodo combinato Sonreb) e distruttivo (carotaggio) per stimare la resistenza del calcestruzzo. Inoltre vengono proposte due procedure per valutare quantitativamente i principali fattori che influiscono sulla resistenza delle carote ed una procedura per stimare la resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive.

Bibliografia

- [1] OPCM 3274, 2003. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica" (pubblicata sulla G.U. del 8/5/2003).
- [2] Federal Emergency Management Agency (FEMA), 1997. NEHRP Commentary on the Guidelines for the Seismic Rehabilitation of Buildings, FEMA 274, October 1997, Washington D.C.
- [3] CEN, 2004. Eurocode 8 - Design of structures for earthquake resistance - Part 3: Assessment and retrofitting of buildings (draft n. 6), prEN 1998-3, Brussels.
- [4] OPCM 3274, 2005. Ordinanza del Presidente del Consiglio dei Ministri del 20 marzo 2003 "Primi elementi in materia di criteri generali per la classificazione sismica del territorio nazionale e di normative tecniche per le costruzioni in zona sismica", revisione del 12/1/2005 a cura del Gruppo di Lavoro istituito dal Dipartimento di Protezione Civile.
- [5] A. Masi, 1991. Analisi della tecnica costruttiva e dei materiali, in Manuale per la valutazione della sicurezza nei confronti del sisma e per l'adeguamento antisismico (coord. F. Braga), Ordine Ingegneri Potenza.
- [6] Ministero LL.PP. 1996. D.M. 9/1/96, Norme tecniche per l'esecuzione delle opere in cemento armato e precompresso e per le strutture metalliche.
- [7] UNI (1987). UNI 6131, Prelevamento campioni di calcestruzzo indurito, giugno 1987.
- [8] UNI, 1980. UNI 6130 (parte 1), Provini di calcestruzzo per prove di resistenza meccanica, settembre 1980.
- [9] CEN, 2003. Eurocode 2: Design of concrete structures - Part 1-1: General rules and rules for buildings (final draft), December 2003, prEN 1992-1-1, Brussels.
- [10] UNI, 1988. UNI 9189, Calcestruzzo indurito - Determinazione indice sclerometrico, gennaio 1988.
- [11] Ministero LL.PP., 1981. Circolare 12/12/81 n.22120, Istruzioni per la applicazione della normativa tecnica per le riparazioni ed il rafforzamento degli edifici danneggiati dal sisma - Edifici in c.a. ed a struttura metallica.

- [12] American Concrete Institute (ACI), 1998. Non-destructive Test Methods for Evaluation of Concrete in Structures, ACI 228.2R-98, Detroit, Michigan
- [13] American Society for Testing and Materials (ASTM), 1985. Standard Test Method for rebound Number of Hardened Concrete, ASTM C 805, Philadelphia, Pennsylvania.
- [14] C.E.B. 1989. Diagnosis and Assessment of Concrete Structures - State of Art Report, Bulletin d'Information, n. 192, gennaio 1989.
- [15] BS, 1974. British Standard 4408: Part 5, Non-destructive Methods of Test for Concrete Measurement of the Velocity of Ultrasonic Pulses in Concrete, London.
- [16] American Society for Testing and Materials (ASTM), 2002. Standard Test Method for Pulse Velocity Through Concrete, ASTM C 597 - 02,.
- [17] F. Braga, M. Dolce, A. Masi, D. Nigro, 1992, Valutazione delle caratteristiche meccaniche dei calcestruzzi di bassa resistenza mediante prove non distruttive, L'Industria Italiana del Cemento 3/92
- [18] J.H. Bungey, 1984. The Influence of Reinforcement on Ultrasonic Pulse Velocity Testing, da In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, ACI Publication SP-82.
- [19] RILEM, 1993. NDT 4 Recommendations for in situ concrete strength determination by combined non-destructive methods, Compendium of RILEM Technical Recommendations, E&FN Spon, London.
- [20] J. Gasparik, 1992. Prove non distruttive nell' edilizia. Quaderno didattico AIPnD, Brescia.
- [21] Di Leo, G. Pascale, 1994. Prove non distruttive sulle costruzioni in c.a., Il giornale delle prove non distruttive, n. 4.
- [22] P. Bocca, F. Cianfrone, 1983. Le prove non distruttive sulle costruzioni:una metodologia combinata, L'Industria Italiana del Cemento, n. 6.
- [23] M. Collepari, 2002. Il nuovo calcestruzzo (seconda edizione), Edizioni Tintoretto.