

“La vulnerabilità delle infrastrutture viarie e ferroviarie”

I CONTROLLI NON DISTRUTTIVI E LA VALUTAZIONE DELLA RESISTENZA IN OPERA

Donatella Pingitore*

Vincenzo Venturi**

La determinazione della sicurezza residua di un manufatto in c.a. o c.a.p. è un problema complesso che può essere semplificato solo se si realizza la giusta sinergia fra:

- ♦ la storia del manufatto, dalla progettazione all'esercizio;
- ♦ la conoscenza dei materiali, in origine e al momento della verifica;
- ♦ il rilievo del manufatto, strutturale, dello stato fessurativo, del degrado.

È evidente come parlare di “storia del manufatto”, soprattutto in Italia, possa apparire un approccio non percorribile ed assai vago: il nostro patrimonio nazionale di beni monumentali è sterminato e, pur circoscritto ai ponti, copre un arco temporale che va dalle opere romane (ponti, acquedotti, ecc.) fino alle strut-

ture più recenti, in c.a. e c.a.p., che di tanto in tanto hanno avuto qualche riscontro mediatico per crolli, dissesti o limitazioni di esercizio.

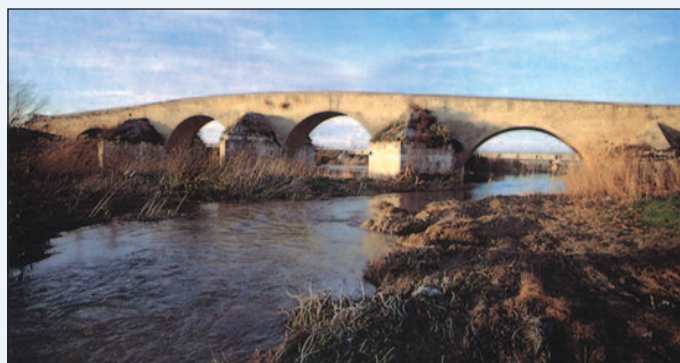
ANAS ed RFI sono le Amministrazioni che in Italia gestiscono il maggiore patrimonio di infrastrutture viarie e da tempo hanno attivato un sistema di monitoraggio, di verifica e di messa in sicurezza dei ponti e dei viadotti della rete stradale e ferroviaria in esercizio su tutto il territorio nazionale.

La possibilità di reperire la documentazione tecnica (progetto, relazione a strutture ultimate, collaudo statico) è a prima vista possibile per tutti i manufatti realizzati dopo il 1972, data che fa riferimento all'entrata in vigore della L. 1086/71, con la quale veniva imposto l'obbligo del deposito di questa documentazione presso gli uffici del Genio Civile.

In realtà chiunque si sia cimentato in questa attività sa quanto la ricerca storica sia difficile, onerosa e spesso infruttuosa.



1. Un particolare del crollo del viadotto Petrulla sulla S.S. 626 Licata-Ravanusa (AG)



2. Il ponte romano a Ofanto, in Puglia



Alcune Amministrazioni hanno propri archivi ma la disponibilità della documentazione è soggetta ad ulteriori variabili: trasloco degli archivi, perdita della figura dell'archivista e/o della memoria storica, ecc..

In conclusione, nella programmazione delle attività si deve sempre prevedere, in genere per la gran parte delle opere d'arte, di ricostruire dall'origine la storia del manufatto dal rilievo topografico alla caratterizzazione dei materiali.

Acquisiti questi dati, ovvero geometria e qualità dei materiali, la necessaria integrazione è l'implementazione, sulla specifica opera, del rilievo del quadro fessurativo e del degrado, elaborati con riferimento ad una adeguata scala di danneggiamento.

Come fin qui premesso, ogni attività sperimentale deve essere preliminarmente preceduta dal rilievo strutturale e dalla mappatura del quadro fessurativo e del degrado. Definire una specifica scala, dei difetti e del degrado, sia tipologica che rappresentativa dell'estensione e della gravità degli stessi, rappresenta il necessario upgrade a queste attività che si perfeziona nella redazione di una scheda di danneggiamento.

Solo a questo punto è possibile pianificare le attività sperimentali mediante le quali quantificare le caratteristiche e l'estensione del danno e che, implementate sui precedenti elaborati, permettono il progetto dell'eventuale intervento conservativo.

I Controlli Non Distruttivi (CND)

La scelta della migliore tecnica sperimentale è sempre in accordo con le finalità dell'indagine. Per esempio il rilievo strutturale può essere eseguito sia con le tradizionali tecniche di rilievo topografico che con il ricorso a tecnologia più avanzata, tipo laser scanner.

L'impiego di questa specifica tecnica consente di acquisire le immagini digitali che, una volta processate ed elaborate, consentono di individuare, classificare e catalogare anche il quadro fessurativo e il degrado.

La caratterizzazione dei materiali, nello specifico delle opere in c.a. e c.a.p., può essere ottenuta mediante il prelievo di campioni di calcestruzzo indurito e di barre ovvero con il ricorso ai cosiddetti metodi diretti; è evidente come in entrambi i casi i due metodi possano risultare molto invasivi e se nel caso del calcestruzzo il ricorso al metodo diretto è spesso giustificato, se non addirittura obbligato, nel caso delle barre l'impiego di metodi indiretti, e meno invasivi, può essere privilegiato e rappresentare la soluzione migliore.

La numerosità dei prelievi e delle prove distruttive può essere opportunamente ridotta (Circolare n° 617/2009 al par. C8A.1.B) se integrata dai cosiddetti Controlli non Distruttivi (CND). I CND, nel caso della valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo ovvero della resistenza alla compressione, possono essere ricondotti, in questa sede e per la necessaria sintesi, ai metodi più diffusi cioè: ultrasuoni (US), sclerometro (SCL), estrazione o pull-out (PO), penetrometrico (Windsor).

Nel caso dell'acciaio il prelievo di saggi, di barre o di acciaio per carpenteria, sui quali eseguire la caratterizzazione mediante prove distruttive, per esempio di trazione, piega, chimiche, di resistenza, può essere ridotto ed integrato da CND come prove di durezza e di spettrometria in situ.

In entrambi i casi il loro impiego deve essere sempre subordinato ad una opportuna calibrazione con determinazioni dirette eseguite su campioni prelevati in opera (carote, saggi).

Altro gruppo di CND, come le prove magnetometriche, radar, X Ray, è quello che consente di acquisire, in maniera non invasiva, alcune fondamentali informazioni indispensabili per la corretta verifica strutturale della geometria, della posizione e della dimensione in opera delle armature, lente e di precompressione.

Il secondo aspetto che condiziona il progetto delle indagini strutturali e delle prove è coerente, soprattutto nelle costruzioni esistenti, con le condizioni al contorno, ambientali ed antropiche, e con le caratteristiche dell'opera. Con queste premesse, ogni progetto può essere visto come un prototipo che richiede di essere calibrato non solo per la specifica opera ma anche in funzione degli specifici obiettivi.

Nel seguito i più frequenti:

- ♦ valutazione della sicurezza e della vulnerabilità di un manufatto;



4. Un particolare dell'analisi chimica



3A e 3B. Particolari del prelievo di carpenteria metallica



5. Un particolare della prova di durezza

- ◆ aumento di capacità portante di un manufatto;
- ◆ azione correttiva per la non conformità di una fornitura di calcestruzzo;
- ◆ attività sperimentali nell'ambito di attività giudiziaria, in sede civile e penale.

Oggi il ricorso ai CND è certamente più semplice, le attrezzature sono, per quanto riguarda l'economicità, la diffusione, ecc., molto più accessibili che in passato; è disponibile una vasta bibliografia tecnica; esistono le Norme tecniche (UNI EN, ASTM, ecc.) che ne legittimano l'impiego; esistono le procedure di qualificazione del personale specializzato che esegue le prove. È però assente una procedura di "accreditamento" cogente del laboratorio che "certifica", con proprio personale e proprie attrezzature, le prove.

Tale ultimo aspetto non è marginale: infatti i parametri rilevati con i CND sono strettamente connessi con la sicurezza di uso e di conseguenza con la pubblica incolumità.

Nel seguito, e in maniera sintetica, i principi fondanti di ciascun metodo, la grandezza fisica che determinano e la correlazione con la resistenza alla compressione del calcestruzzo.

Gli ultrasuoni (UNI EN 12504-4)

Il metodo si basa sulla trasmissione delle onde elastiche, generate da una sonda trasmittente (T) ad alta frequenza che emette impulsi ad ultrasuoni, generalmente intorno a 50 MHz. Un oscilloscopio, che consente di valutare la qualità del segnale e l'attenuazione, e una sonda ricevente (R) permettono di determinare il tempo (t , transit time) che l'onda impiega a percorrere lo spazio noto (s), che separa le due sonde. La velocità dell'onda ($V = s/t$) è la grandezza che in bibliografia viene correlata alla qualità del calcestruzzo.

La velocità (V), integrata dall'attenuazione, è immediatamente correlabile alla compattazione del calcestruzzo e quindi alla sua qualità di posa in opera ma non solo: infatti altra informazione utile che si può ricavare, dall'impiego degli US, è la presenza di difetti che comportano una variazione di densità, e quindi vespai, lesioni ma anche delaminazioni e distacchi; in ultimo, la correlazione fra velocità e resistenza alla compressione (R_c).

In Bibliografia diversi sono gli algoritmi che interpretano l'altrimenti enorme dispersione sperimentale che correla V con R_c , per cui l'unico aspetto che pare indispensabile sottolineare è che al di là della possibilità, teorica, di correlare V con R_c , gli

US possono essere impiegati correttamente solo se congruenti con gli obiettivi dell'indagine e solo se adeguatamente supportati da una calibrazione con grandezze primarie ricavate con metodi diretti.



6. La trasmissione di onde elastiche generate da una sonda trasmittente ad alta frequenza che emette impulsi ad ultrasuoni

Lo sclerometro di Schmidt (UNI EN 12504-2)

Lo sclerometro di Schmidt è una fra le prove non distruttive più vecchie; correla la durezza superficiale (IR), stimata mediante il rimbalzo di una massa battente scagliata con energia nota contro la superficie di calcestruzzo, con la resistenza alla compressione del calcestruzzo (R_c).

Ha avuto negli anni una grandissima diffusione e deve la sua fortuna alla straordinaria semplicità di esecuzione, al basso costo dell'attrezzatura, alla immediatezza sperimentale, alla fruibilità, quasi intuitiva, del risultato; è però caratterizzata da una notevole dispersione dei risultati. Questo ultimo aspetto è facilmente comprensibile se si pensa: al ridotto spessore di cal-

cestruzzo interessato dalla prova, in genere, se non preliminarmente rimosso, limitato al copriferro; all'influenza della densità dell'armatura o delle dimensioni e/o caratteristiche degli aggregati; al condizionamento di processi corticali di degrado, quali porosità, carbonatazione, ecc..

È pertanto indispensabile anche in questo caso il ricorso ad una opportuna calibrazione con metodi diretti ma, per apprezzare la qualità degli strati di calcestruzzo più interni, strutturali, anche rimuovere il copriferro e integrare le misure sclerometriche superficiali con altro metodo indiretto, per esempio ultrasuoni (SonReb).



7. Lo sclerometro di Schmidt è la prova non distruttiva che correla la durezza superficiale con la resistenza alla compressione del calcestruzzo (R_c)

La prova di estrazione o pull-out (UNI EN 12504-3)

La prova di estrazione comporta l'estrazione di un tassello di geometria nota mediante un martinetto idraulico cavo di trazione contrastato da un anello posto sulla superficie di prova. Rispetto ai due metodi precedenti comporta un danneggiamento ridotto, locale, e per questo viene indicato, fra gli addetti ai lavori, come semi-distruttivo o localmente distruttivo; è anche indicato come metodo semi-diretto in quanto durante la prova si determina la rottura, per compressione, della "biella compressa" che si forma fra l'estremità del tassello e l'anello di contrasto. La forza di estrazione del tassello (P)



8. La prova di estrazione prevede l'estrazione di un tassello di geometria nota mediante un martinetto idraulico cavo di trazione contrastato da un anello posto sulla superficie di prova



è, per questa ragione, immediatamente correlabile alla resistenza alla compressione del calcestruzzo (R_c).

I limiti di impiego sono in parte gli stessi già rilevati in precedenza, ovvero il ridotto spessore di calcestruzzo interessato dalla prova (il copriferro), ma anche connessi con la qualità del calcestruzzo; per calcestruzzi mediocri la prova perde spesso di validità, il cono di rottura non è tale da essere conforme al meccanismo di rottura richiesto, più frequentemente il valore di resistenza estrapolato tende ad essere sopravvalutato.

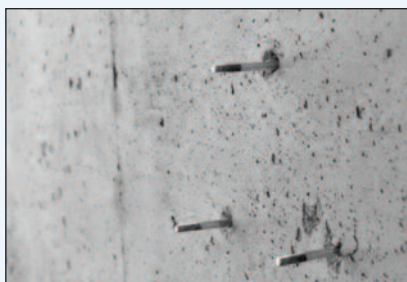
Anche il pull-out richiede di verificare l'efficacia del metodo con gli obiettivi dell'indagine e la calibrazione con risultati sperimentali ricavati con metodi diretti.

Il metodo penetrometrico o sonda di Windsor (ASTM C803)

Il metodo penetrometrico richiede l'infissione, mediante l'impiego di una carica balistica calibrata, di una sonda di geometria nota. Ha avuto una grande diffusione in passato, principalmente nei Paesi anglosassoni ma non solo, in quanto per anni è stato l'unico metodo regolato da una Norma (ASTM C803).

La profondità di penetrazione della sonda viene rilevata mediante un calibro e viene correlata, in funzione della durezza Mohs degli aggregati, alla resistenza alla compressione (R_c) mediante una tabella fornita dal Produttore. Anche questo metodo è influenzato non solo dalle dimensioni degli aggregati e dalla presenza dell'armatura ma anche dalla qualità del calcestruzzo corticale e diviene molto disperso per calcestruzzi mediocri che tende a sopravvalutare.

È bene farvi ricorso solo dopo averne verificata la congruenza con le finalità dell'indagine ed eseguita la calibrazione con i risultati ricavati con metodi diretti.



9A e 9B. Il metodo penetrometrico richiede l'infissione, mediante l'impiego di una carica balistica calibrata, di una sonda di geometria nota

La valutazione della resistenza in opera del calcestruzzo

Affrontare l'argomento della resistenza in opera del calcestruzzo impone una preliminare riflessione sul termine "depotenziato"; nel passato recente troppo spesso questo termine è stato usato impropriamente e in maniera inadeguata, in alcuni casi per l'inesperienza di chi vi faceva ricorso e più spesso per la poca chiarezza che la nostra Normativa pone alla valutazione della resistenza in opera del calcestruzzo.

Per tale ragione è necessario chiarire come la fortuna mediatica che tale definizione ha avuto, riferita a un calcestruzzo ovviamente e non a un motore, non coincide in alcun modo con il requisito di resistenza alla compressione del calcestruzzo.

Per necessità di sintesi in questa nota la valutazione della resistenza in opera viene proposta nel solo caso, o "obiettivo", di "verifica della conformità di una fornitura di calcestruzzo", e ciò per due ragioni: la prima perché rappresenta l'"obiettivo" che viene richiesto con maggiore frequenza; la seconda perché è esplicitamente previsto dalle NTC 08, cap. 11 - par. 11.2.6 "Il valor medio della resistenza del calcestruzzo in opera (definita come resistenza strutturale) è in genere inferiore al valor medio della resistenza dei prelievi in fase di getto maturati in condizioni di laboratorio (definita come resistenza potenziale). È accettabile un valore medio della resistenza strutturale, misurata con tecniche opportune (distruttive e non distruttive) e debitamente trasformata in resistenza cilindrica o cubica, non inferiore all'85% del valore medio definito in fase di progetto.

Per lo stesso motivo, la sintesi, non vengono prese in esame le ragioni che sono alla base della scelta dei coefficienti di conversione, dei valori di resistenza alla compressione in situ nei valori di resistenza, convenzionale, alla compressione su cubi, nonché tutti quegli aspetti connessi con la omogeneizzazione dei risultati provenienti da CND e da prove di compressione di carote.

Il metodo proposto dalle NTC 08, di assumere nella soluzione di una non conformità (NC) il criterio di conformità di cui alla disuguaglianza (1), ovvero il valore della resistenza media in situ maggiore dell'85% del valore della resistenza media di progetto, dove la resistenza media di progetto è esplicitata dalla (2):

$$f_{cm, situ} > 0,85 \cdot f_{cm} \quad (1)$$

$$f_{cm} = f_{ck} + 8 \quad (2)$$

non è convergente con la qualità preliminarmente richiesta al calcestruzzo dai limiti imposti dai controlli di accettazione, tipo A e tipo B, contemplati dalle NTC 08.

La stessa Circolare n° 617/2009 nel tentativo di superare l'evidente incongruenza, di cui al paragrafo richiamato, ha introdotto una variante per un numero di campioni superiore a 15; ha cioè consentito il cosiddetto controllo statistico e quindi l'impiego della resistenza caratteristica in situ ($f_{ck, situ}$), imponendo la disuguaglianza

(3) ovvero la resistenza caratteristica in situ ($f_{ck, situ}$) superiore o pari all'85% della resistenza caratteristica di progetto (f_{ck}). La resistenza caratteristica in situ ($f_{ck, situ}$) viene definita come il minore fra i valori ottenuti dalle relazioni (4) e (5):

$$f_{ck, situ} > 0,85 \cdot f_{ck} \quad (3)$$

$$f_{ck, situ} = f_{cm} - 1,48 \cdot s \quad (4)$$

$$f_{ck, situ} = f_{c, min} - 4 \quad (5)$$



In realtà, come è evidente, la circolare mutua pedissequamente la UNI EN 13791, ma purtroppo non ne recepisce la parte relativa all'approccio forfaitario, per una numerosità di prelievi inferiore a 15, da questa previsto (6) e (7):

$$f_{ck,situ} = f_{cm} - k \quad (6)$$

$$f_{ck,situ} = f_{c,min} - 4 \quad (7)$$

dove:

k = fino a 14, è una funzione decrescente del numero di prelievi (Figura 10).

n	k
da 10 a 14	5
da 7 a 9	6
da 3 a 6	7

10. Il coefficiente k associato al numero di prelievi n

Nel fare ciò determina due grosse incongruenze: la prima non tenendo conto del fatto che l'approccio non statistico, forfaitario, per prelievi di numero inferiore a 15, con le modalità previste dalle NTC 08 non converge con il metodo statistico proposto dalla Circolare n° 617/2009; la seconda lasciando il valore di 1,48, per il coefficiente moltiplicativo della deviazione standard, non adeguandolo al valore di 1,40, del controllo statistico di accettazione, tipo B, previsto dalle NTC 08.

Conclusioni

La presente nota si era posta l'obiettivo, forse ambizioso, di fornire alcuni spunti di riflessione su argomenti fondamentali per la qualità delle nuove opere ma anche per la sicurezza di uso, e la pubblica incolumità, non solo delle nuove costruzioni ma soprattutto di quelle esistenti.

In sintesi, si richiede che la revisione delle NTC affronti con chiarezza il problema dell'approccio alla pianificazione delle indagini e delle conseguenti verifiche strutturali, prevedendo almeno l'obbligo di:

- ◆ acquisire il rilievo geometrico e strutturale, il rilievo dei difetti e del degrado, il catalogo, la scala e la scheda dei difetti;
- ◆ quantificare, mediante attività sperimentali, la consistenza dei difetti e del degrado;
- ◆ definire, mediante controlli diretti (prelievi di carote e saggi) e CND, la qualità dei materiali;
- ◆ richiedere l'implementazione e l'elaborazione dei risultati sperimentali sul modello strutturale.

Al riguardo è opportuno richiamare l'attenzione sulla anomalia presente nelle NTC 08, e nella Circolare n° 617/2009, che prevedono l'obbligatorietà dei controlli da parte di laboratori autorizzati (ex art. 59 DPR n° 380/2001) per tutte le attività di controllo di accettazione dei prodotti strutturali, lasciando nella più assoluta genericità i requisiti dei soggetti abilitati ad eseguire i prelievi, di carote o saggi, e i CND che possono derivare da una eventuale non conformità (NC) dei controlli di accettazione.

Analoga anomalia è evidente nel caso delle prove non distruttive, richiamate nella Circolare n° 617/2009 al par. C8A.1.B, delle quali viene consentito l'impiego a favore di una riduzione della numerosità delle prove dirette-distruttive, senza però ade-

guare, uniformare, opportunamente i requisiti del laboratorio che esegue i prelievi ed i CND.

In assenza di indicazioni, sui soggetti abilitati all'esecuzione dei prelievi in opera e dei controlli non distruttivi (CND) si viene così a creare un evidente paradosso; infatti "Le prove su cubi di calcestruzzo, che devono essere eseguite e certificate da uno dei laboratori di prova di cui all'art. 59 del DPR n° 380/2001 (par. C11.2.5.3), consentono di aprire eventuali Non Conformità (NC); la chiusura della NC, ovvero la valutazione della resistenza in opera del calcestruzzo oggetto della NC, può essere effettuata, alternativamente e genericamente, mediante prelievi e prove distruttive eseguite da soggetti contemplati dalle NTC 08 (ex art. 59 D.P.R. n° 59) oppure mediante prove non distruttive (CND), eseguite da soggetti non contemplati dalle NTC 08 e che sovente operano in assenza di requisiti essenziali come:

- ◆ la terzietà rispetto alle parti;
- ◆ l'efficienza delle attrezzature
- ◆ l'obbligo di tarature periodiche;
- ◆ la qualificazione del Personale".

Ci pare superfluo sottolineare il perché di quanto descritto rappresenti una anomalia!

In ultimo, le nuove NTC, nei criteri di conformità per l'accettazione del calcestruzzo in opera, dovrebbero:

- ◆ uniformare il coefficiente moltiplicativo k della deviazione standard a 1,40 o a 1,48, ma in maniera che il valore sia sempre lo stesso sia che si tratti di controllo di valori di accettazione, tipo B, su cubi convenzionali che di valori determinati in opera come in (4);
- ◆ cancellare il riferimento al criterio di conformità per valori di resistenza in opera della resistenza media di progetto definita come in (2);
- ◆ introdurre la procedura convenzionale per il controllo forfaitario, per un numero di campioni inferiore a 15, per come prevista dalla UNI EN 13791. ■

* *Dottoressa Presidente di ALIG*

** *Ingegnere Vicepresidente di ALIG*

BIBLIOGRAFIA

- [1]. S. Lombardo, V. Venturi - "Il collaudo statico delle strutture", Dario Flaccovio, 2010.
- [2]. V. Venturi - "Quaderno Tecnico Sidercem n° 3, Manuale dei controlli non distruttivi" tip. Lussografica, 2012.
- [3]. Norme Tecniche per le Costruzioni, D.M. 14 Gennaio 2008, Circolare n° 617/C.S.I.LL.PP. 2 Febbraio 2009.
- [4]. UNI EN 13791 - "Valutazione della resistenza a compressione in situ nelle strutture e nei componenti prefabbricati in calcestruzzo", Gennaio 2008.
- [5]. UNI EN 12504-2 - "Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 2: Prove non distruttive - Determinazione dell'indice sclerometrico", Ottobre 2012.
- [6]. UNI EN 12504-3 - "Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 3: Prove non distruttive - Determinazione della forza di estrazione", Luglio 2005.
- [7]. UNI EN 12504-4 - "Prove sul calcestruzzo nelle strutture. Parte 4: Prove non distruttive - Determinazione della velocità di propagazione degli impulsi ultrasonici", Gennaio 2005.
- [8]. ASTM C 803 - "Standard Test Method for Penetration Resistance of Hardened Concrete".
- [9]. BS 1881-204 - "Testing concrete. Recommendations on the use of electromagnetic covermeters", 2008.