Valutazione delle caratteristiche meccaniche del calcestruzzo mediante misure di velocità di onde acustiche

Rocco Ditommaso, Marco Mucciarelli, Marco Vona*, Maria De Bonis, Angelo Masi

*marco.vona@unibas.it

Dipartimento di Strutture, Geotecnica, Geologia applicata. Università degli Studi della Basilicata, Viale dell'Ateneo Lucano, Potenza, Italia

Keywords: Edifici, Cemento armato, Resistenza del calcestruzzo, Prove non distruttive

Sommario

Nel corso degli ultimi anni è stata messa in evidenza l'importanza, nonché la necessità, di procedere all'accertamento della vulnerabilità sismica delle costruzioni esistenti. In Italia, come in molti paesi industrializzati, una quota rilevante di questi è costituita da edifici realizzati con struttura portante in c.a.. Molteplici studi sono stati svolti, e sono tutt'ora in corso, per definire metodologie di indagine che siano efficaci nella predizione ed economiche nell'esecuzione. Le metodologie comunemente adottate a tale scopo si distinguono, in base al livello di danno prodotto, in metodi distruttivi (PD) e metodi non distruttivi (PND). Le indagini di tipo non distruttivo hanno il pregio di non arrecare danni alle parti strutturali e di poter fornire un gran numero di dati a costi relativamente ridotti. In questo lavoro viene proposta una nuova metodologia di indagine non distruttiva basata sulla misura della velocità di propagazione di onde acustiche all'interno degli elementi strutturali. La metodologia, che si propone come alternativa al classico metodo ultrasonico, è stata messa a punto grazie a una campagna sperimentale su elementi in calcestruzzo armato. È stata valutata la velocità media di propagazione di un impulso generato da una massa battente sulla superficie dell'elemento stesso. I risultati sono stati confrontati con quelli ricavati, sugli stessi elementi strutturali, con il classico metodo ultrasonico per trasparenza.

Introduzione

La valutazione della resistenza di una struttura esistente richiede che siano valutate le caratteristiche meccaniche dei materiali che la compongono e, in modo particolare, del calcestruzzo. I metodi di indagine più diffusi sono raggruppabili, in base al livello di danno arrecato alle strutture, in metodi distruttivi, ovvero per i quali è prevista l'estrazione e la prova a distruzione di un campione, e metodi non distruttivi, per i quali le caratteristiche del calcestruzzo sono ricavate indirettamente senza distruzione di campioni. Tra i metodi distruttivi (PD), il carotaggio è sicuramente quello più diffuso ed efficace. Tuttavia i problemi legati a tale metodo consistono sia nell'alto costo di estrazione ed analisi dei provini che nella valutazione delle caratteristiche di resistenza in un numero limitato di punti nell'intera struttura (Masi et al 2009). Le indagini di tipo non distruttivo (PND – Metodo Sclerometrico, Metodo Ultrasonico, Metodo combinato SonReb) hanno il pregio di non arrecare danni alle parti strutturali e di poter fornire un elevato numero di informazioni a costi relativamente ridotti. Per contro, stimando in modo indiretto le proprietà meccaniche del calcestruzzo, le informazioni possono essere condizionate da numerosi fattori ed il loro utilizzo può determinare risultati poco affidabili. Inoltre, non può essere trascurato il danno che mediante tali prove può essere arrecato alle componenti non strutturali e alle rifiniture degli edifici che, in alcuni casi, potrebbe rivelarsi addirittura economicamente più oneroso rispetto a quello arrecato utilizzando indagini di tipo distruttivo.

Molti studi e campagne sperimentali sono state condotte da vari autori al fine di mettere a punto delle metodologie affidabili e poco invasive che consentissero di valutare lo stato di degrado e/o le caratteristiche meccaniche del calcestruzzo in situ. Diversi approcci sono stati utilizzati basati su impulsi ultrasonici (Vary, 1988, Peterson et al., 1994, Rose Joseph L., 1999, Philippidis and Aggelis, 2003, Schubert et al., 2004b, Liang M.T., Wu J., 2002), dispersione delle onde superficiali (Krstulovic-Opara N. et al., 1996, Gudra and Stawinski, 2000), studio della propagazione di impulsi (Lin and Sansalone 1992, Sansalone et al., 1997, Schubert et al., 2004a, Malhotra, 1984), reti neuronali (Hola et al., 2005) e metodi combinati (Masi, 2005; Masi et al., 2007; Masi et al., 2008).

Nel presente lavoro sono riportati i primi risultati di una nuova metodologia di prova non distruttiva molto meno invasiva di quelle attualmente disponibili anche sugli elementi non strutturali, dunque economicamente poco onerosa e di più rapida esecuzione. Tale metodologia risulta, come d'altronde i metodi di prova non distruttivi in genere, computazionalmente poco impegnativa essendo basata su misure di velocità di propagazione di onde acustiche all'interno degli elementi in calcestruzzo armato facilmente eseguibili ed elaborabili. Le peculiarità del metodo proposto consentono di contenere notevolmente i costi di esecuzione rendendolo vantaggioso rispetto ad altre tecniche.

Allo scopo di testare la procedura è stata condotta un'apposita sperimentazione nel Laboratorio Prove, Materiali e Strutture del Dipartimento di Strutture, Geotecnica e Geologia applicata dell'Università degli Studi della Basilicata costituita da una serie di prove di velocità su alcuni elementi strutturali estratti da un edificio in c.a. in fase di demolizione.

Le attività svolte possono essere suddivise in tre fasi:

1 fase sperimentale, condotta nel Laboratorio di Prove Materiali e Strutture del DiSGG dell' Università degli Studi della Basilicata, in cui sono state effettuate misure di velocità su alcuni elementi strutturali;
2 fase di elaborazione e analisi dei dati sperimentali;
3 fase di confronto con i risultati di tecniche misure ultrasoniche classiche.

Descrizione e caratterizzazione degli elementi studiati

La metodologia proposta è stata applicata ad alcuni elementi strutturali estratti da un edificio esistente. In particolare si è fatto riferimento a un insieme di pilastri estratti dalla scuola Fantoni ubicata nel Comune di Fivizzano, in Toscana, e parzialmente demolita. In altri lavori sono già stati riportati i dati relativi agli elementi in esame ed i risultati delle sperimentazioni condotte (Masi et al., 2007; Masi e Vona, 2007; Masi et al., 2008). Per tale ragione nel seguito sono riepilogati e commentati soltanto gli elementi fondamentali ai fini del presente lavoro. Sono quindi illustrati i risultati delle sperimentazioni condotte soltanto su 7 pilastri. Nel gruppo originario di 10 pilastri disponibili dalla demolizione, in funzione delle loro dimensioni e condizioni, quindi della possibilità di condurre le sperimentazioni programmate, gli elementi sono stati suddivisi in due gruppi (Masi et al 2007; Masi et al 2008). Per i pilastri del primo gruppo le indagini sui materiali, sia distruttive che non distruttive, sono state propedeutiche a una sperimentazione successiva finalizzata a valutare l'effetto dei carotaggi sulla resistenza a compressione dei pilastri (Masi et al., 2009); pertanto, su tali elementi, è stata prelevata una sola carota. Sul secondo gruppo è stato invece realizzato il prelievo di un maggior numero di carote per ciascun elemento al fine di valutare la variabilità della resistenza del calcestruzzo lungo l'altezza mediante le PD.

Nel presente lavoro sono stati considerati elementi pilastro appartenenti sia al primo che al secondo gruppo in funzione della possibilità di realizzare le prove programmate. Sono così stati analizzati alcuni elementi del primo gruppo ed alcuni del secondo gruppo includendo quelli per i quali la caratterizzazione del calcestruzzo è più accurata in virtù della presenza di un maggior numero di carotaggi (figura 1). I risultati delle indagini appena descritte sui vari elementi sono illustrati nel seguito (figura 2) con riferimento sia alle prove di tipo ultrasonico, per trasparenza, che ai carotaggi effettuati. Deve essere ricordato che sono state eseguite anche indagini di tipo sclerometrico, ma soltanto su quei pilastri (n° 2, 6, 7, 8 e 10) che presentavano superfici idonee, ovvero poco degradate, tali da consentirne l'esecuzione.

I risultati hanno evidenziano la capacità del metodo non distruttivo classico (velocità ultrasonica per trasparenza) di rappresentare con sufficiente attendibilità la variabilità delle caratteristiche del calcestruzzo lungo lo sviluppo di ciascun elemento. Infatti, dai risultati riportati in figura 2, è possibile evidenziare, in particolare per i pilastri 6, 8, 9, 10, una sostanziale omogeneità delle caratteristiche del

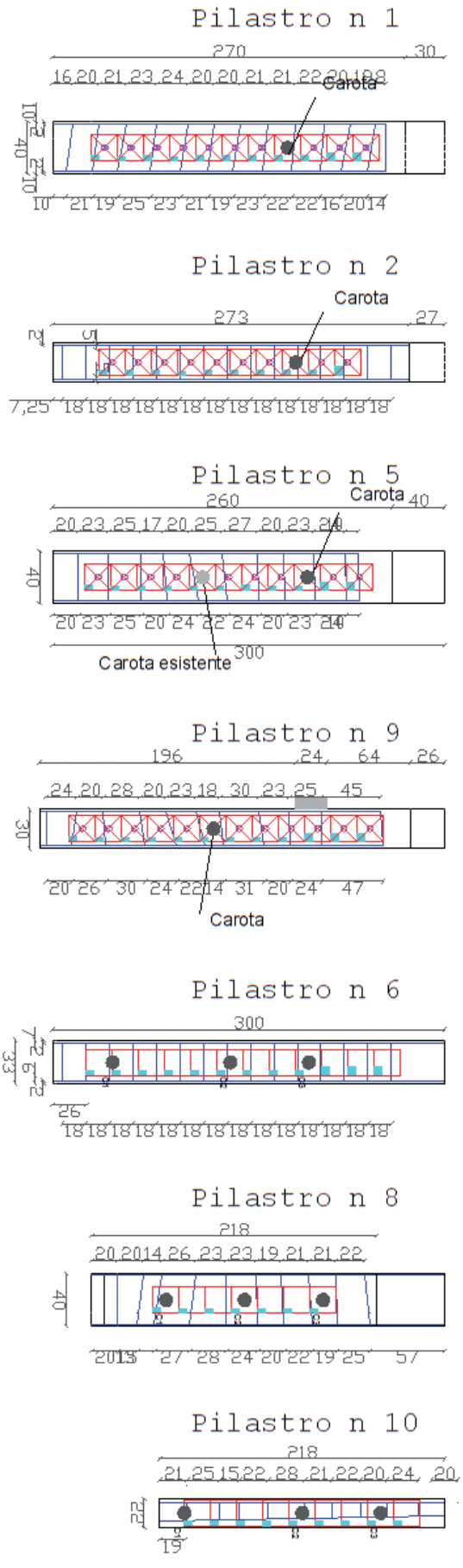

Figura 1. Caratteristiche dimensionali degli elementi pilastro studiati.

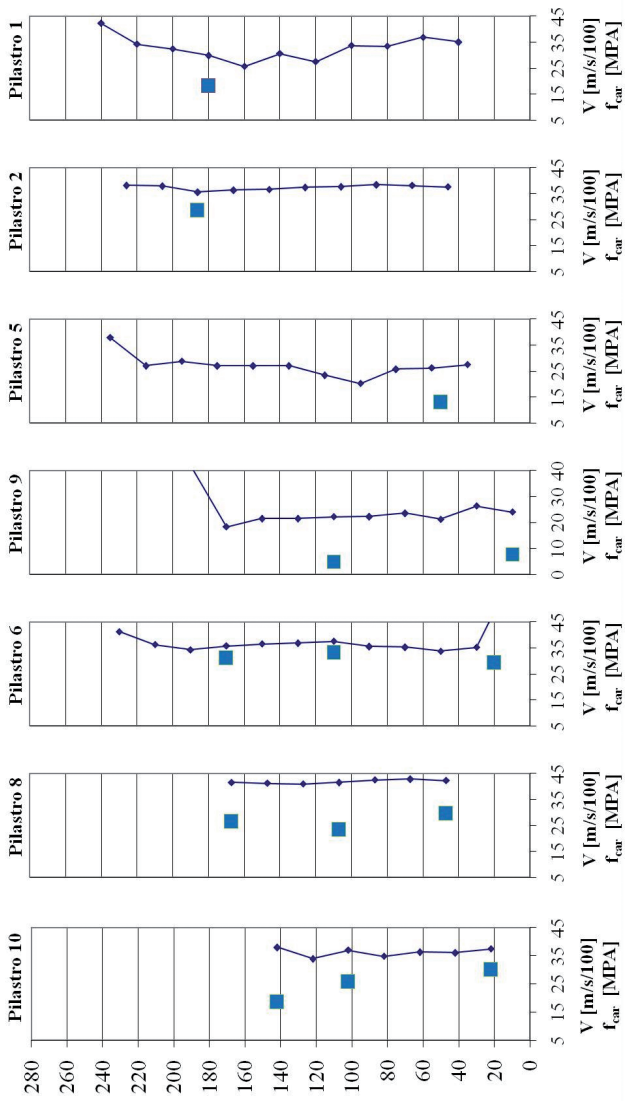

Figura 2. Risultati delle prove ultrasoniche standard e dei carotaggi.

calcestruzzo condizione evidenziata anche dai valori delle resistenze dei carotaggi. Sulla base di tali risultati sono stati condotti i confronti successivi con i risultati ottenuti con la nuova procedura proposta.

La metodologia Proposta

Il principio su cui si basa la sperimentazione di seguito presentata è lo stesso sul quale si basa il metodo ultrasonico. In generale, le prove soniche sfruttano la propagazione nel materiale di onde elastiche di compressione generate da un breve impulso elasto – meccanico sulla superficie. In tal modo è possibile indagare le caratteristiche meccaniche e la condizione di degrado del materiale al suo interno, oppure localizzare eventuali disomogeneità, vuoti e difetti presenti.

Per meglio comprendere le varie modalità di svolgimento della prova e per rendere più espliciti i risultati, appare utile riprendere alcuni aspetti teorici. Perturbando un mezzo elastico in un punto, la vibrazione non rimane localizzata ma si estende progressivamente ai punti vicini con una velocità diversa in funzione delle caratteristiche meccaniche del mezzo attraversato. Questa velocità dipende anchedal tipo di perturbazione applicata. Le perturbazioni di tipo compressivo – distensivo (dette onde primarie o onde P) si propagano con una velocità superiore rispetto alle perturbazioni di tipo taglio (onde secondarie o onde S). Inoltre, sono prodotte onde superficiali che si propagano lungo la superficie dell'elemento. Tali onde sono più lente delle precedenti (velocità pari circa al 95% delle onde S) per un solido di Poisson) e la loro energia è minore in prossimità della sorgente. In ogni caso, poiché risultano meno attenuate con la distanza, diventano prevalenti a grandi distanze dalla sorgente. Infine, deve essere ricordato che nell'approssimazione dell'ottica geometrica, se consideriamo un raggio che attraversa la superficie di separazione fra due mezzi diversi si genera un'onda riflessa (con angolo di incidenza uguale a quello di riflessione) ed un'onda rifratta secondo la legge di Snell.

Il metodo utilizzato nella presente sperimentazione è un metodo deltipo prospezione sismica a rifrazione, che si basa sulla ricezione di onde sismiche rifratte di tipo P. Come sorgente artificiale è stata utilizzata una massa a caduta libera, ossia un semplice martello.

Nella sperimentazione illustrata è stato predisposto un sistema di sensori riceventi con il compito di registrare e trasmettere al sistema di acquisizione la risposta del materiale alla propagazione del segnale. Tale risposta viene registrata come forma d'onda che rappresenta le variazioni di ampiezza delle vibrazioni avvenute alla superficie in un breve lasso di tempo. La propagazione dell'onda nel materiale sarà, infatti, influenzata dalla geometria della sezione oltreché dalle caratteristiche fisico – meccaniche del materiale o dei materiali attraversati. In fase di progettazione della campagna di prove, è stato importante quindi calibrare le caratteristiche della strumentazione agli scopi della prova, oltreché alle condizioni operative ed agli elementi da testare (dimensioni e geometria dell'elemento strutturale da indagare e caratteristiche dei suoi materiali componenti).

In base alle considerazioni sulla geometria elementare ed alla fisica del problema, sono state effettuate alcune scelte riguardanti la distanza relativa tra i sensori. Si è infatti potuto notare che, in tutti gli elementi testati, per piccole distanze tra gli strumenti, fino a un massimo di 50 cm, le velocità di propagazione che si ricavano sono molto basse. In tali casi, il segnale che si legge ai due strumenti, quello che arriva per primo, è quello diretto che, di conseguenza, si propaga nello strato superficiale di calcestruzzo (per gli elementi testati molto degradato). Per distanze maggiori tra i due sensori, invece, valgono le considerazioni fatte in precedenza, ovvero, anche se l'onda superficiale percorrerà sempre un percorso minore, agli strumenti installati arriva per prima l'onda birifratta poiché questa si propaga, seguendo il principio di Fermat, sulla superficie di separazione tra i due strati costituenti l'elemento, dunque con la velocità relativa al secondo strato, cioè la velocità maggiore.

Di conseguenza, le velocità considerate rappresentative del secondo strato sono state ricavate disponendo i velocimetri a distanze relative di 1 m e 1.50 m e sono molto

più elevate di quelle ricavate per il primo strato (calcestruzzo esterno alle armature estremamente degradato). Infine, sono state effettuate ulteriori prove disponendo gli strumenti a distanze ancora maggiori (fino a 2 m): in questo caso sono stati nuovamente ricavati valori bassi di velocità. Tale riduzione si registra poiché all'aumentare della distanza tra i velocimetri ed all'avvicinarsi ai bordi dell'elemento si instaurano fenomeni più complessi che non possono essere descritti da un semplice modello del tipo strato su semispazio.
La strumentazione adottata, ai fini dell'esecuzione delle prove, è un Geode singolo (unità di acquisizione dati) con due canali liberi e programmato con un intervallo di campionamento pari a 0.02 ms, un computer collegato all'unità di acquisizione e in grado di archiviare i segnali generati dalla massa battente sugli elementi, una coppia di velocimetri, collegati da un lato ai due canali di registrazione e, dall'altro, ai tasselli infissi nell'elemento da testare ed infine un semplice martello energizzante in grado di assegnare una forzante impulsiva all'elemento stesso. Dall'analisi delle registrazioni è possibile ricavare il tempo necessario alle diverse fasi del campo d'onda per percorrere lo spazio interposto tra i due velocimetri. Una volta ricavato tale intervallo di tempo , nota la distanza relativa tra i due strumenti di acquisizione, è possibile calcolare la velocità di propagazione delle diverse fasi. Ovviamente nella sperimentazione condotta sono stati considerati i primi arrivi del segnale.
La fase preliminare di studio è stata incentrata sulla messa a punto di un idoneo sistema di bloccaggio dei velocimetri sull'elemento strutturale. Dopo aver testato diverse soluzioni, in questa prima sperimentazione è stata utilizzata una coppia di tasselli in acciaio ad espansione. I tasselli selezionati hanno un diametro esterno pari al diametro del foro al fine di consentire un buon grado di accoppiamento con il materiale ed una vite filettata con lunghezza totale pari a 10 cm, da innestare all'interno del foro effettuato nell'elemento strutturale tramite un semplice trapano a rotazione. Definite le modalità di fissaggio dei ricevitori sugli elementi, sono state definite le condizioni ottimali di esecuzione ed una prima standardizzazione della modalità di svolgimento della prova.

Procedura e Validazione della metodologia

Nel presente capitolo vengono illustrate le elaborazioni e i risultati delle prove effettuate sugli elementi strutturali nel Laboratorio di Prove, Materiali e Strutture del DiSGG dell' Università degli Studi della Basilicata.
Le prove sono state effettuate tramite letture di misure sugli elementi in esame disposti in orizzontale quindi privi anche del benché minimo sforzo assiale. Per ciascun elemento sono state, inoltre, considerate diverse configurazioni di prova definite da diverse distanze dei velocimetri e diverse posizioni della sorgente dell'impulso, ovvero diversi punti di battuta della massa, e considerando le due facce dell'elemento tra loro ortogonali. Per ciascuna configurazione sono state effettuate una media di 15 – 20 battute.
A partire da uno stato di quiete, la caduta della massa battente sull'elemento provoca una perturbazione dello

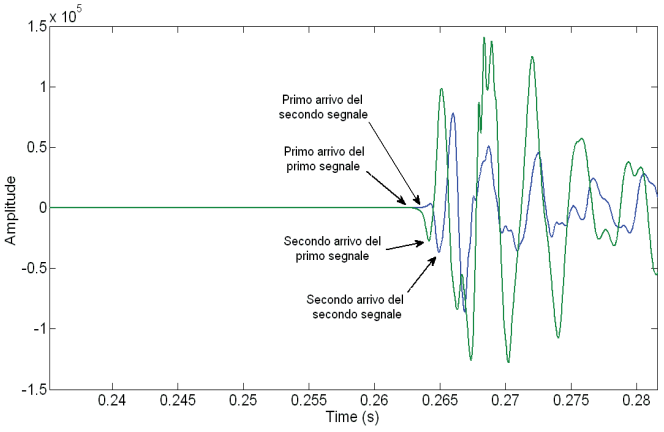

Figura 3. Particolare della fase iniziale del segnale.

stato iniziale. Nascono nel mezzo una serie di onde acustiche che si propagano con una certa velocità. I segnali così ottenuti e visualizzati in funzione del tempo sono registrati dai velocimetri. Il segnale registrato al primo velocimetro, ovvero quello più vicino al punto di battuta, rappresenta l'impulso (figura 3). L'arrivo dell'impulso al secondo velocimetro è riportato in figura 3 con il colore blu. Si può notare come siano facilmente identificabili i picchi relativi ai rispettivi primi arrivi dei due segnali. Direttamente dal grafico è possibile ricavare l'intervallo di tempo, D*t*, che l'onda impiega a percorrere lo spazio interposto tra i due acquisitori. Nota la distanza D*L* alla quale sono stati posizionati i due strumenti di registrazione, è possibile ricavare la velocità di propagazione dell'onda:

$$v = \frac{\Delta L}{\Delta t} \tag{1}$$

In ogni caso, in vista di una possibile standardizzazione ed ottimizzazione della procedura, è possibile ottenere la stessa velocità v con il metodo della cross – correlazione tra due segnali. In generale, dati due segnali x(t) e y(t), la cross – correlazione è una funzione del tempo definita come:

$$\varepsilon_{xy}(\tau) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \cdot y(t+\tau) d\tau \tag{2}$$

Nel nostro caso, data la natura discreta, e quindi non continua del segnale, la formula della cross – correlazione utilizzata è stata la seguente:

$$R_{xy}(k) = \sum_{i=-\infty}^{\infty} x_{i+1} \cdot y_i \tag{3}$$

La cross – correlazione fornisce una misura della similitudine tra i due segnali ed è funzione del ritardo (o dell'anticipo) tra i segnali stessi. Le sequenze x(t) e y(t) devono avere la stessa lunghezza. Inoltre, se x(t) e y(t) sono lo stesso segnale, si parla di autocorrelazione del segnale x(t). In corrispondenza quindi del massimo della funzione di cross – correlazione, si determina l'intervallo di

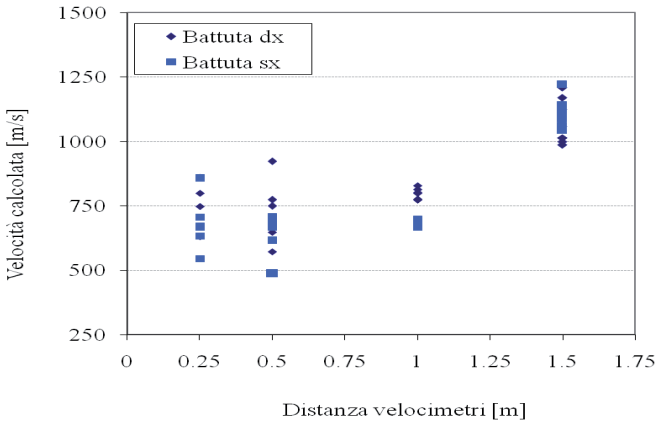

Figura 4. Distribuzione delle velocità pilastro n. 9.

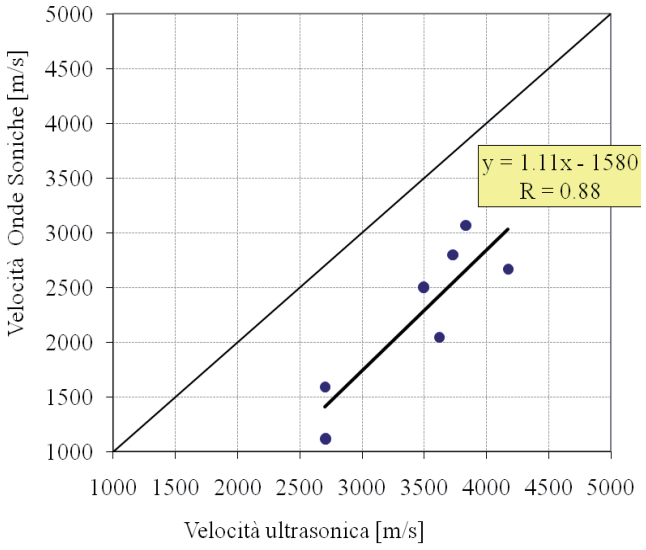

Figura 5. Confronto tra velocità ultrasonica (trasparenza metodo classico per trasparenza) e il valore medio della velocità sonica (metodo proposto).

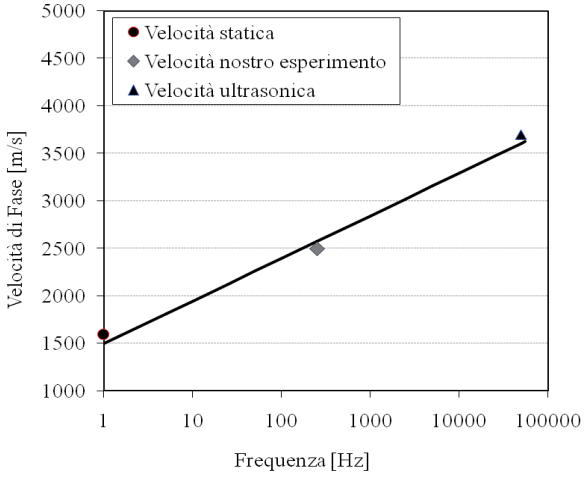

Figura 6. Confronto retta teorica e velocità misurate.

tempo D*t* che intercorre tra i primi arrivi dei segnali, dal quale, noto lo spazio, si ricava la velocità di propagazione dell'onda. Per tale procedura, i dati ottenuti delle prove sono stati elaborati in ambiente MatLab.
Nella figura 4 è riportata, a titolo di esempio, la distribuzione delle velocità calcolate all'interno di uno degli elementi strutturali al variare della distanza tra i velocimetri. Dal grafico si può notare una velocità di propagazione crescente da circa 1000 m/s nello strato superficiale dell'elemento, ovvero con una distanza tra i velocimetri pari a 0.25 m, fino a un massimo di circa 2400 m/s, ottenuta posizionando i velocimetri a una distanza relativa di 1.50 m, che invece, per quanto detto in precedenza, rappresenta la velocità di propagazione dell'onda nello strato interno del materiale con un calcestruzzo di qualità migliore di quello relativo allo strato superficiale.
Infine, sono stati confrontati i valori massimi di velocità ricavati dalla sperimentazione appena descritta, dunque rappresentativi della parte di calcestruzzo componente il nucleo interno dell'elemento testato, con quelli ottenuti mediante il classico metodo ultrasonico per trasparenza (Figura 5). La differenza tra i valori assoluti può essere facilmente giustificata considerando il fatto che con il metodo ultrasonico si utilizza una frequenza di funzionamento che si aggira attorno ai 50 kHz e quindi nettamente superiore a quella utilizzata nella presente sperimentazione. Dall'equazione che lega la velocità di propagazione alla frequenza in un solido lineare standard (equazione 4) è possibile dedurre che all'aumentare della frequenza aumenta la velocità misurata (Figura 6).

$$v(\omega) = v_0\left[1 - \frac{\ln(1/\omega)}{\pi}\left(LQ_\mu^{-1} + (1-L)Q_k^{-1}\right)\right] \qquad (4)$$

In ogni caso è evidente dalla figura 5 come le due metodologie di prova, pur fornendo valori assoluti delle velocità misurate differenti, presentino un andamento sostanzialmente coincidente tra i vari elementi testati.

Conclusioni

Le indagini di tipo non distruttivo (PND), a differenza delle prove di tipo distruttivo (PD), hanno il pregio di non arrecare danni alle parti strutturali e di poter fornire un gran numero di dati a costi relativamente ridotti. Per contro, stimando in modo indiretto le proprietà meccaniche del calcestruzzo, le PND sono condizionate da numerosi fattori ed il loro utilizzo esclusivo, non consentito dalle norme, può determinare risultati poco affidabili. Combinando opportunamente i dati relativi alle PND con i dati relativi alle PD, si ottengono i metodi combinati (PD – PND), che consentono di ridurre gli svantaggi legati all'utilizzo delle singole metodologie.
Obiettivo di questo lavoro è stato quello di presentare una nuova metodologia di prova non distruttiva basata su misure di velocità di propagazione di onde acustiche all'interno di elementi in calcestruzzo armato. Tale tipo di prova, rispetto alle precedenti, è caratterizzata da una grande semplicità esecutiva (è sufficiente fissare nell'elemento da testare di una coppia di velocimetri che registrano la propagazione del segnale nel materiale), da un costo ridotto, da tempi di esecuzione abbastanza brevi, da una semplice procedura di elaborazione dei risultati e, soprattutto, da un danno non strutturale pressoché nullo, non essendo necessario asportare intonaco o altri elementi di finitura.

Da un'analisi dei risultati sperimentali ottenuti dalle prove, effettuate su diversi elementi strutturali estratti da edifici esistenti, è possibile osservare una grande variabilità della velocità di propagazione delle onde acustiche di compressione, generate da una semplice forzante impulsiva. In particolare, in tutti gli elementi esaminati, si ottiene un aumento della velocità di propagazione delle onde all'aumentare della distanza tra i velocimetri fissati sulla superficie dell'elemento stesso. Tale differenza di velocità è dovuta alla presenza, nella sezine trasversale degli elementi strutturali, di più strati dalle diverse caratteristiche meccaniche. In particolare, si osserva la presenza di uno strato superficiale particolarmente degradato, in cui si ottengono valori di velocità piuttosto bassi (circa 1000 m/s) e uno strato interno, in condizioni sicuramente migliori del precedente, in cui si ottengono valori di velocità relativamente più elevati (circa 2500 – 3000 m/s). Dalla sperimentazione illustrata risulta che i valori di velocità ottenuti con il classico metodi degli ultrasuoni risultano generalmente più elevati di quelli ottenuti mediante la metodologia proposta. Le ragioni di tale differenza sono da ricercare nelle differenti modalità di prova ma deve essere notato che la relazione tra di dati delle due tecniche di prova presenta una buona correlazione.

Ulteriori sperimentazioni sono in corso di svolgimento con lo scopo di migliorare le modalità di esecuzione delle prove (tipologia e dimensione dei tasselli, sensori e centraline di acquisizione, procedure di elaborazione dei dati). Inoltre, è in fase di esame l'efficacia ed affidabilità della tecnica in differenti elementi strutturali, sia collocati in edifici esistenti che appositamente preparati in laboratorio, con sforzo assiale variabile e con calcestruzzo danneggiato per effetto di sollecitazioni crescenti.

Bibliografia

Lin Y, Sansalone M. Detecting Flaws in Concrete Beams and Columns Using the Impact-Echo Method. *ACI Materials Journal*, 1992; 89(4):394–405.

Rose, Joseph L. Ultrasonic Waves in Solid Media, *Cambridge University Press*, 1999. p.101-130.

Sansalone M, Lin JM, Streett WB. A Procedure for Determining P-wave Speed in Concrete for Use in Impact-Echo Testing Using a P-wave Speed Measurement Technique. *ACI Materials Journal*, 1997;94(6): 531–9.

Schubert Frank, Wiggenhauser Herbert, Lausch Regine (2004a). On the accuracy of thickness measurements in impact-echo testing of finite concrete specimens—numerical and experimental results. *Ultrasonics*, 42 (2004), 897–901

Schubert F. (2004b). Numerical Time-Domain of Linear and Nonlinear Ultrasonic Wave Propagation Using Finite Integration Techniques-Theory and Applications. *Ultrasonics*, 2004, vol. 42, pp. 221–229.

V.M. Malhotra, In Situ/Nondestructive Testing of Concrete, *SP-82*, *vol. 1*, *American Concrete Institute*, Detroit, 1984, pp. l– 16.

Liang M.T., Wu J. (2002). Theoretical elucidation on the empirical formulae for the ultrasonic testing method for concrete structures. *Cement and Concrete Research 32*, (2002) 1763–1769

T. Gudra, B. Stawinski, Non-destructive characterization of concrete using surface waves, *NDT E Int. 33* (2000) 1 –6.

A. Vary, The acousto-ultrasonic approach, in: J.C. Duke (Ed.), *Acousto - Ultrasonics: Theory and Application*, Plenum, New York, 1988.

Philippidis T.P., D.G. Aggelis (2003). An acousto-ultrasonic approach for the determination of water-to-cement ratio in concrete. Cement and Concrete Research 33 (2003) 525–538

Hoła Jerzy, Krzysztof Schabowicz (2005).New technique of non destructive assessment of concrete strength using artificial intelligence. *NDT&E International 38* (2005) 251–259.

Masi A., 2005. La stima della resistenza del calcestruzzo in situ mediante prove distruttive e non distruttive, *Il Giornale delle Prove non Distruttive Monitoraggio Diagnostica*, n. 1, 2005.

Masi A., Vona M., 2007. Prove distruttive e non distruttive su materiali ed elementi strutturali di edifici esistenti in cemento armato, *Atti del XII Convegno Nazionale dell' AIPnD*, Milano 11-13 ottobre 2007.

Masi A., Dolce M., Vona M., Ferrini M., Pace G., 2007, Indagini sperimentali su elementi strutturali estratti da una scuola esistente in c.a., *ANIDIS 2007 XII Convegno Nazionale l'Ingegneria Sismica in Italia*, Pisa, 10 – 14 giugno 2007.

Masi A., Vona M., Nigro D., Ferrini M., 2008, Indagini sperimentali per la stima della resistenza del calcestruzzo in-situ basata su metodi distruttivi e non distruttivi, *Convegno ReLUIS – Linea 2*, *Valutazione e riduzione della vulnerabilità sismica di edifici esistenti in c.a.*, Roma, 29-30 maggio 2008.