

Identificazione tramite emissione acustica di fenomeni di danneggiamento del calcestruzzo armato durante test di corrosione accelerata

Roberto Bonfiglio

Corpo Nazionale dei Vigili del Fuoco, I.S.A., Roma.

Edoardo Proverbio

Dipartimento di Chimica Industriale e Ingegneria dei Materiali, Università di Messina

Vincenzo Venturi

Sidercam srl, Misterbianco–Caltanissetta

Leszek Golaski

Technical University of Kielce (Polonia)

RIASSUNTO

Nella letteratura scientifica sono oramai numerosi gli esempi di applicazione della tecnica di indagine basata sulla raccolta di segnali di Emissione Acustica (EA) per l'individuazione di fenomeni di corrosione nel calcestruzzo armato. Tale tecnica risulta particolarmente sensibile allorquando la corrosione è associata alla formazione di microfessure nel calcestruzzo all'interfaccia armatura–calcestruzzo.

Il presente lavoro riassume i risultati preliminari di una ricerca sperimentale volta a determinare la possibilità di distinguere le varie tipologie di sorgenti di EA in un c.a. in condizione di corrosione e identificare, dall'analisi dei segnali di EA, la presenza di danneggiamenti pre-esistenti in strutture in c.a. degradate e sollecitate meccanicamente. A tal fine sono stati fabbricati vari provini in c.a. in scala semireale con due diversi mix design con aggiunta di cloruri. Una parte di questi provini è stata sottoposta a corrosione accelerata con l'applicazione di un flusso di corrente esterna. Ciclicamente e in condizione di quiete (assenza di flusso di corrente) è stata effettuata una raccolta di segnali di EA.

L'analisi delle forme d'onda dei segnali ha permesso di identificare tre differenti tipologie di sorgenti emmissive ipoteticamente riconducibili a: corrosione dell'acciaio, microfessurazione del calcestruzzo, accrescimento dei prodotti di corrosione.

Dopo la fase di accelerazione della corrosione i campioni sono stati sollecitati a flessione, seguendo una specifica procedura di carico, per studiare il fattore di *calm-ratio*, ossia il rapporto tra il numero totale di eventi di EA durante la fase di scarico ed il numero totale degli eventi durante l'ultimo ciclo di carico. Valori del *calm-ratio* maggiore di 1 sono da correlare alla presenza di danneggiamenti diffusi nella matrice di calcestruzzo. In questo modo è stato possibile confrontare i campioni sottoposti a corrosione accelerata con quelli in condizione di corrosione naturale.

PAROLE CHIAVE

Emissione acustica, calcestruzzo, corrosione, analisi del segnale

INTRODUZIONE

La tecnologia dell'Emissione acustica (EA), che consiste nella rilevazione di segnali acustici ad alta frequenza emessi durante la propagazione di cricche o in seguito

all'evoluzione di fenomeni corrosivi, è oggi ampiamente usata nel campo dei controllo industriali di strutture metalliche come serbatoi, condotte, impianti chimici ecc... L'utilizzo della tecnica per il controllo di strutture in calcestruzzo armato o di strutture complesse è tuttavia abbastanza recente^[1-3]. Uno dei punti cardine nell'utilizzo della tecnica si basa sull'analisi del segnale. Il segnale di EA dipende da diverse funzioni di trasferimento: quella della sorgente, quella che descrive la propagazione nel mezzo, ed infine quella legata alla rilevazione del trasduttore (rispettivamente H_s , H_m e H_t) nel dominio delle frequenze. Il segnale acustico nel dominio delle frequenze viene espresso dalla seguente relazione:

$$H_{AE} = H_s * H_m * H_t$$

La forma d'onda dovuta all'emissione acustica nel dominio del tempo viene ottenuta attraverso la trasformata inversa di Fourier di H_{AE} , ed il prodotto dovuto alla precedente equazione diventa un integrale di convoluzione.

Tuttavia l'uso dell'analisi deconvolutiva non stata molto sviluppata durante gli ultimi 20 anni, anche perché questa tecnica risulta essere instabile ed altamente sensibile ai rumori di fondo. Altre difficoltà sono rappresentate dall'esistenza di un gran numero di combinazioni di parametri che dipendono dalla sorgente emissiva e dai possibili percorsi di propagazione seguiti dalle onde acustiche. Risulta quindi difficile ottenere risultati di cui si possa confermare la validità. Inoltre la mancanza di valutazioni di H_m per campioni di diverse forme rappresenta un ulteriore svantaggio. Alla fine degli anni '80 Ohtsu e Ono^[4] hanno sviluppato una teoria generalizzata dell'AE sulle basi della teoria elastodinamica e dei modelli dislocativi. Le sorgenti di AE sono rappresentate come movimenti dislocativi, includendo sia discontinuità che spostamenti. Ohtsu e Ono^[5] estesero la rappresentazione della sorgente nella teoria generalizzata correlando la cricca al tensore dei momenti (che fu originariamente introdotto in geofisica). I principali vettori e valori del tensore dei momenti denotano la orientazione della cricca e lo spostamento (o l'area di spostamento). Per un cricca in apertura secondo il modo I, il tensore dei momenti consiste di tre componenti principali posti sulla diagonale del tensore, $[(\lambda+2\mu)b; \lambda b; \lambda b]$, dove b è lo spostamento della fessura in apertura, mentre μ e λ sono le costanti elastiche. Per le cricche dovute a sforzi di taglio il tensore dei momenti ha due termini uguali al di fuori della diagonale, del tipo μb . Ohtsu e Ono^[6] dimostrarono che la distribuzione della ampiezza dei tempi di arrivo iniziali restituisce le caratteristiche della sorgente e fornisce le componenti del tensore dei momenti. Questo metodo ha permesso la classificazione delle sorgenti da trazione da quelle di taglio, ed hanno successivamente permesso lo sviluppo della analisi SIGMA, specialmente per gli studi di AE sul calcestruzzo armato^[7]. Un approfondimento dell'analisi simulata introdotta da Ohtsu e Ono è stata effettuata da Takemoto e Hayashi^[8] con l'utilizzo di un sistema computerizzato che includeva una procedura per l'ottimizzazione della corrispondenza tra la forma d'onda osservata e quella simulata. Suzuki e altri^[9-11] hanno espanso continuamente l'analisi con ulteriori modellazioni.

Il presente lavoro riassume i risultati preliminari di una ricerca sperimentale volta a determinare la possibilità di distinguere le varie tipologie di sorgenti di EA in un c.a. in condizione di corrosione e identificare, dall'analisi dei segnali di EA, la presenza di danneggiamenti pre-esistenti in strutture in c.a. degradate e sollecitate meccanicamente. L'analisi delle forme d'onda dei segnali ha permesso di identificare tre differenti tipologie di sorgenti emissive ipoteticamente riconducibili a: corrosione dell'acciaio, microfessurazione del calcestruzzo, accrescimento dei prodotti di corrosione.

SPERIMENTAZIONE

Per la valutazione dei segnali di emissione acustica sono stati preparati sei differenti travetti (dimensioni 150 cm x 25 cm x 25 cm), usando 2 differenti mix design, come mostrato nella tabella

1. Sono stati preparati tre campioni usando il primo mix design, e tre campioni usando il secondo. In quattro campioni (due per ogni mix design) è stato aggiunto il 3% in peso di CaCl_2 rispetto al contenuto in cemento. Le armature sono state studiate in modo da avere il trasferimento della corrente elettrica su tutte e quattro le barre longitudinali. Per questo motivo ci sono due staffe (quelle esterne) saldate con le armature, e le altre tre staffe sono isolate dalle armature attraverso l'uso di isolatori cilindrici in gomma. La sezione trasversale della trave in calcestruzzo armato è mostrata in figura 1.

La posizione delle barre di armature nella sezione trasversale è stata scelta in maniera tale da favorire la delaminazione del calcestruzzo in corrispondenza degli spigoli. I campioni sono stati successivamente immersi in una vasca e con l'ausilio di una lastra in rame come controelettrodo sono state generate delle condizioni di corrosione accelerata con un flusso di corrente anodica di $100 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ per 170 ore e di $200 \mu\text{A}/\text{cm}^2$ per successive 170 ore. In queste condizioni sono stati utilizzati tre sensori di EA posizionati sulla superficie del calcestruzzo e due sulle barre verticali: in questo modo è stato possibile confrontare i segnali rilevati dai sensori sulle barre (4–5) con i sensori sulla superficie (1–2–3).

Tabella 1. Mix design delle miscele di calcestruzzo utilizzate

Costituente	Dosaggio (kg/m^3)	
	Mix design 1	Mix design 2
Acqua	120	124
Cemento	355	430
Bazalt 1	590	637,5
Piasek	707	717
Bazalt 2	668	637,5
Tricosal 1	1,41	1,92
Tricosal 2	1,06	1,29
A/C	0,34	0,29
Rck (MPa)	35	45

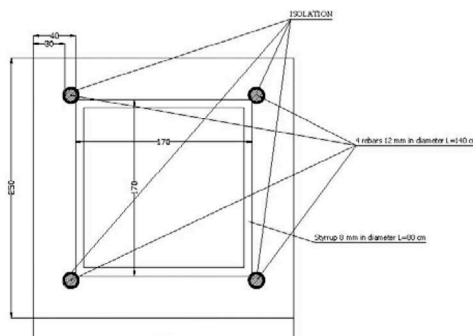


Figura 1. Disposizione dell'armatura nei travetti nel calcestruzzo armato.

Travetto n°	Rck (MPa)	Cloruri
1	350	3%
2	350	3%
3	350	No
4	450	3%
5	450	3%
6	450	No

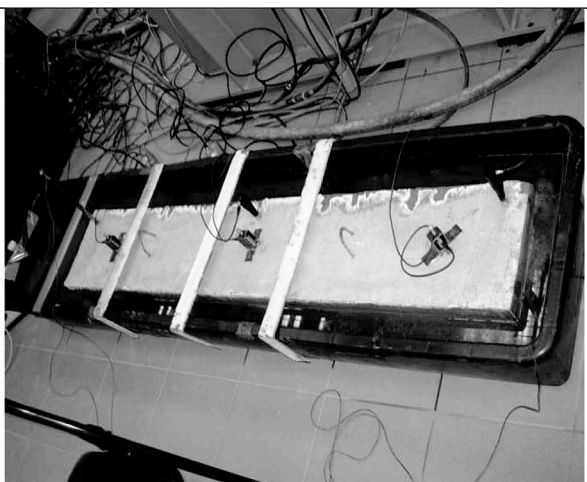


Tabella 2. Tipologie di campioni utilizzati ed esempio test in condizioni di corrosione accelerata

I sensori sulla superficie di calcestruzzo sono stati uniformemente distribuiti (58 cm di distanza l'uno dall'altro), in modo tale da rilevare segnali acustici provenienti da posizioni differenti. I sensori utilizzati sono stati del tipo VS30-V, banda di frequenza 23 – 80 kHz C=140 pF, (-70/-60 dB re 1V/ μ Bar nel range 20–80 kHz). Il valore di soglia (threshold) è stato impostato a 40 dB. Una misura di attenuazione dei segnali è stata eseguita, ottenendo un valore di attenuazione di 15 dB/m di lunghezza della trave in calcestruzzo armato. Le travi sono state successivamente sottoposte ad un ciclo di carico fino a rottura incipiente secondo la procedura riportata di seguito.

- 1) 0 KN a 50 KN, velocità di applicazione del carico 0,05 KN/sec; (1000 sec)
- 2) 5 minuti a deformazione costante a partire da un carico di 50 KN; (300 sec)
- 3) 50 KN a 75 KN, velocità di applicazione del carico 0,05 KN/sec; (500 sec)
- 4) 5 minuti a deformazione costante a partire da un carico di 75 KN; (300 sec)
- 5) 75 KN a 87,5 KN, velocità di applicazione del carico 0,05 KN/sec; (250 sec)
- 6) 5 minuti a deformazione costante a partire da un carico di 87,5 KN; (300 sec)
- 7) 87,5 KN a 100 KN, velocità di applicazione del carico 0,05 KN/sec; (250 sec)
- 8) 5 minuti a deformazione costante a partire da un carico di 100 KN; (300 sec)
- 9) Fase di scarico da 100 KN a 0 KN in 30 sec;

Per questa valutazione è stata utilizzata una diversa configurazione del sistema di acquisizione e più precisamente il sistema consisteva in sei sensori posizionati sui campioni con le seguenti coordinate (l'origine è posizionata sullo spigolo del campione):

Sensore n°1 (52,5; 12,5; 25) sensore a banda larga teipo VS30-V. Sensore n°2 (92,5; 12,5; 25) sensore risonante a 55 KHz; Sensore n°3 (92,5; 12,5; 0) come il sensore 1; Sensore n°4 (52,5; 12,5; 0) come il sensore 2; Sensore n°5 (0; 12,5; 12,5) come il sensore 1; Sensore n°6 (145; 12,5; 12,5) come il sensore 2.

RISULTATI

I risultati delle campagne sperimentali sono riassunti di seguito:

L'AE si è mostrata in grado di rilevare la presenza di corrosione, specie quando questa era legata alla formazione di cricche, specie all'interfaccia calcestruzzo – barra d'acciaio.

Il numero di eventi cresce dopo l'applicazione della corrente, per poi portarsi ad un valore stabile giorno dopo giorno, con un picco massimo al terzo giorno.

Il numero degli eventi acustici è più grande nei sensori collegati direttamente alle barre verticali. Nella prova senza corrente elettrica applicata e dopo due settimane di trattamento, tramite l'uso del software di VC, stato possibile identificare tre classi di segnali, che potrebbero corrispondere a tre diversi meccanismi di AE (corrosione dell'acciaio, microfessurazione del calcestruzzo, accrescimento dei prodotti di corrosione).

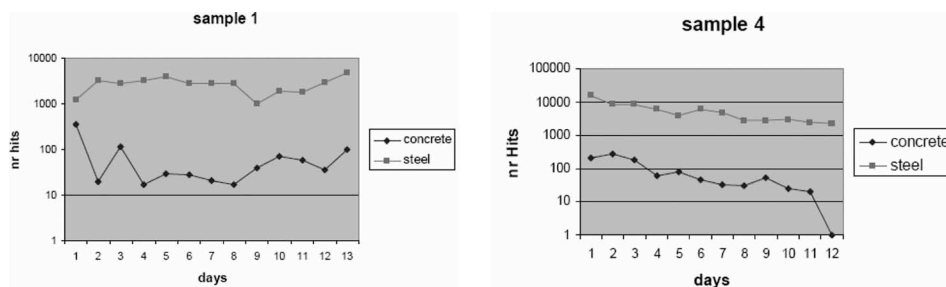


Figura 2. Numero di eventi nel tempo per il campione 1 e per il campione 4.

Differenti tipi di forme d'onda sono state registrate per ogni classe, ed è stato possibile stabilire che i segnali provenienti dalla corrosione sono quelli più deboli, ma a più alta frequenza. Le forme d'onda che presentano più di un picco di frequenza provengono dall'interfaccia calcestruzzo – barra armata, e la frequenza di 18 kHz è quella comune a tutte le forme d'onda. I due mix design utilizzati sono risultati abbastanza simili tra loro, anche perché le velocità media delle onde acustiche in essi calcolati era confrontabile ($v=3200$ m/s); in figura 2 possibile vedere l'andamento del numero di eventi in funzione del tempo durante il quale i campioni sono stati sottoposti a corrosione accelerata. Come si può vedere gli eventi registrati nei sensori posizionati sul calcestruzzo sono di gran lunga inferiori a quelli registrati sulle barre in acciaio.



Figura 3.
Travetto di calcestruzzo armato
durante il ciclo di carico

Per quanto riguarda le prove in condizione di carico (figura 3) una importante valutazione del comportamento è stata effettuata attraverso l'uso del fattore di Calm Ratio. Si definisce Calm Ratio il rapporto tra il numero di eventi cumulati durante la fase di scarico e il numero di eventi totali emessi durante l'ultimo ciclo di carico fino al valore massimo di sollecitazione imposta in quel ciclo. Nel nostro caso non esiste una fase di scarico vera e propria poiché si è deciso di far permanere i campioni a deformazione costante nelle fasi intermedie tra un valore di carico e quello successivo, così possiamo calcolare il Calm Ratio dal rapporto tra il numero totale di eventi emessi durante la fase successiva e il numero totale degli eventi emessi durante la fase precedente. I risultati ottenuti sono mostrati nella tabella 3 ove DF/F è il rapporto tra DF (differenza in KN tra il carico applicato nello stadio finale dello step successivo e il carico applicato allo stadio iniziale dello stesso step) ed F il carico stabilito per lo step a deformazione costante.

Tabella 3. Risultati delle analisi del fattore di *Calm Ratio*

Step 1-2			
Trave n°	Calm ratio sensori 1 – 3 –5	Calm ratio sensori 2 – 4 –6	DF/F
1	0	1,04	0,208
4	0,07	0,24	0,04
5	0,38	0,44	0,062
6	0,35	0,13	0,08
Step 3-4			
1	0,52	0,76	0,098
4	0,08	0,32	0,053
5	0,33	0,24	0,053
6	0,84	0,18	0,064
Step 5-6			
1	1,24	0,65	0,094
4	0,067	2,52	0,057
5	0,9	1,67	0,057
6	1,39	0,61	0,07

Valori di *Calm Ratio* maggiori di 1 sono indicativi di estesi danneggiamenti. Un'ulteriore analisi dei segnali acustici secondo la classificazione NOESIS, effettuata sulla variabile *rise time* ha permesso di ottenere l'individuazione di cinque classi di segnale diversamente distribuite durante le diverse condizioni di carico. Un esempio di tale analisi è riportato in figura 4.

CONCLUSIONI

La tecnica di EA si è dimostrata uno strumento efficace per l'identificazione dei diversi fenomeni che intervengono nei processi di danneggiamento e di comportamento meccanico di elementi in calcestruzzo armato corrosi. L'interpretazione dei segnali è purtroppo ancora uno dei punti più critici per permettere un'ampia diffusione di tale tecnica in campo pratico. L'utilizzo di strumenti di analisi delle forme d'onda (NOESIS) o di parametri macroscopici come il *Calm ratio* sembrano tuttavia molto promettenti, anche se ulteriori ricerche sono necessarie per rendere tale tecnica completamente fruibile come strumento di indagine.

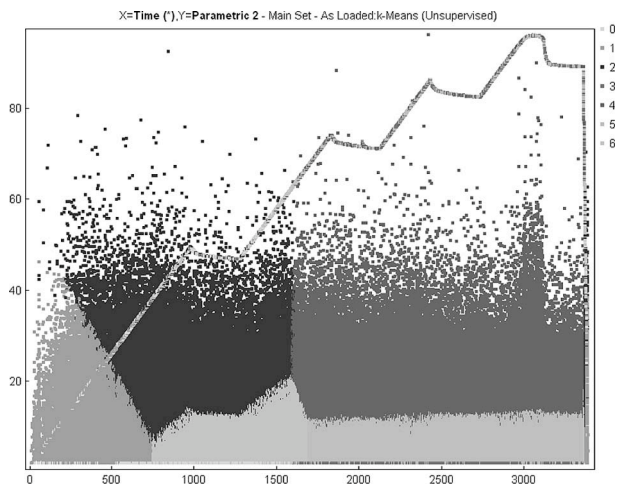


Figura 4.
Valori di *rise time* in funzione del tempo e delle fasi carico (curva a gradini) classificati secondo la procedura NOESIS

BIBLIOGRAFIA

- [1] Weiler, B., Xu, S., and Mayer, U., Acoustic emission analysis applied to concrete under different loading conditions, *Otto Graf Journal*, Vol.8, 1997. 27
- [2] Ohtsu, m. and Tomoda, Y., Corrosion monitoring in reinforced concrete by AE, *Journal of Acoustic Emission*, 2003, 21 pp157–165.
- [3] Colombo, S., Forde, M.C., Main, I.G., Halliday, J and Shigeishi, M., AE energy analysis on concrete bridge beams, *Materials and structures* 38–2005 pp851–856.
- [4] Ohtsu, M. and Ono, K. A generalized theory and source representation of acoustic emission. And Green's functions in half space *Journal of Acoustic Emission* 1984, 3, pp27–40.
- [5] Ohtsu, M. and Ono, K. The generalized theory and source representation of acoustic emission, *Journal of acoustic emission*, 1986, 5, pp124–133.
- [6] Ohtsu, M. and Ono, K. AE source location and orientation determination of tensile cracks from surface observation, *NDT Int.*, 1988, 21, pp143–152.
- [7] Shigeishi, M. and Ohtsu, M. A SIGMA ANALYSIS OF THE 2–Dimensional PMMA, *Acoustic Emission Vol. VI* 1992, pp211–217.
- [8] Takemoto, M., and Hayashi, Y., Direct measurement of water hammer pressure by AE source wave analysis, *Journal of Acoustic Emission*, 1988, 7, pp185–192.
- [9] Suzuki, H., Takemoto, M., and Ono, K., A study of fracture dynamics in a model composite by AE, *Journal of Acoustic Emission*, 1993, 11, pp117–128.
- [10] Suzuki, H., Kinjo, T., Hayashi, Y., Takemoto, M., and Ono, K., Wavelet transform of acoustic emission signals, *Journal of Acoustic Emission*, 1996, 14, pp69–84.
- [11] Suzuki, H., Takemoto, M. and Ono, K., The fracture dynamics in a dissipative glass–fiber/epoxy model composite with AE source wave analysis, *Journal of Acoustic Emission*, 1996, 14, pp35–50.